

Aus der Klinik und Poliklinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie –
Plastische Operationen – der Universitätsmedizin der Johannes Gutenberg-
Universität Mainz

Titel:
**Experimentelle Untersuchung zur Genauigkeit von
konventionellen und digital unterstützten
Implantationen**

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

Vorgelegt von

Joscha Gabriel Werny
aus Langen

Mainz, 2023

Tag der Promotion: 15.05.2023

Für meine Familie

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	1
1 EINLEITUNG	2
2 LITERATURDISKUSSION	4
2.1.1 Dentale Implantologie	4
2.1.2 Digitale Implantologie	6
2.1.3 Genauigkeit der Implantatposition	7
2.1.3.1 Freihand und dynamisch navigiert	8
2.1.3.2 Dynamisch navigiert und statisch geführt.....	9
2.1.3.3 Dynamische Navigationssysteme im Vergleich miteinander.....	10
2.1.3.4 Einfluss der chirurgischen Technik und Erfahrung	11
2.1.3.5 Einfluss der Implantatregion	11
2.1.4 Lernkurve	12
2.1.5 Operationszeit	14
2.2 Subjektive Empfindungen der Operateur*innen.....	16
2.3 Ziel der Arbeit	17
3 MATERIAL UND METHODEN.....	18
3.1 Studiendesign	18
3.2 Beschreibung des in-vitro Modells	18
3.2.1 Herstellungsverfahren mit 3D-Drucker	19
3.2.2 Scann des gedruckten Modells.....	19
3.2.3 Planung	20
3.2.4 Schablonendesign	22
3.2.4.1 Statisch geführte Implantation	22
3.2.4.2 Dynamisch navigierte Implantation	24
3.2.5 3D-Druck	25
3.2.6 Nachbearbeitung	25
3.3 Durchführung der Implantationen	26
3.3.1 Vorbereitungen	26
3.3.2 BLX und TLX Implantate	28
3.3.2.1 Bohrprotokoll	29
3.3.2.2 Randomisierung.....	31

3.3.3	Durchführung der Implantationen	31
3.3.4	Freihand Implantation	33
3.3.5	Statische fully guided Implantation	34
3.3.6	Dynamisch navigierte Implantation	35
3.4	Teilnehmerbefragung	37
3.5	Digitale Datenerhebung.....	37
3.6	Statistische Auswertung	41
4	ERGEBNISSE	42
4.1	Implantationsmethoden	42
4.1.1	Alle Teilnehmer*innen	42
4.1.2	Studentische Teilnehmer*innen	48
4.1.3	Chirurgische Teilnehmer	50
4.2	Vergleich bei unterschiedlicher chirurgischer Expertise.....	53
4.2.1	Freihand durchgeführte Implantation	53
4.2.1.1	Operationszeit	53
4.2.1.2	Genauigkeit	54
4.2.2	Statische fully guided Implantation	55
4.2.2.1	Operationszeit	55
4.2.2.2	Genauigkeit	56
4.2.3	Dynamisch navigierte Implantation	58
4.2.3.1	Operationszeit	58
4.2.3.2	Genauigkeit	59
4.3	Implantatpositionen (Region).....	61
4.3.1	Freihand durchgeführte Implantation	61
4.3.2	Statische fully guided Implantation	62
4.3.3	Dynamisch navigierte Implantation	62
4.4	Lernkurven während der wiederholten Implantation	63
4.4.1	Freihand durchgeführte Implantationen	63
4.4.1.1	Alle Teilnehmer*innen	63
4.4.1.2	Studentische Teilnehmer*innen	63
4.4.1.3	Chirurgische Teilnehmer.....	64
4.4.2	Statisch geführt durchgeführte Implantationen.....	64
4.4.2.1	Alle Teilnehmer*innen	64
4.4.2.2	Studentische Teilnehmer*innen	64

4.4.2.3	Chirurgische Teilnehmer.....	65
4.4.3	Dynamisch navigiert durchgeführte Implantationen.....	65
4.4.3.1	Alle Teilnehmer*innen	65
4.4.3.2	Studentische Teilnehmer*innen	66
4.4.3.3	Chirurgische Teilnehmer	66
4.5	Fragebogen	67
4.5.1	Vergleich zwischen den studentischen und chirurgischen Operateur*innen.....	77
5	DISKUSSION	78
6	ZUSAMMENFASSUNG	85
7	LITERATURVERZEICHNIS	87
8	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	94
9	TABELLENVERZEICHNIS	99
10	ANHANG	100
10.1	Umfragebogen	100
10.2	Erklärung	111

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
BLX	Bone level X Implantat
CAD	Computer aided design
CAM	Computer aided manufacturing
CT	Computertomographie
DICOM	Digital Imaging and Communications in Medicine
DLP	digitale Lichtverarbeitungs-Technologie
DVT	digitale Volumetomographie
IOS	Intraoralscann
mm	Millimeter
n	Anzahl
PEEK	Polyether-ether-keton
SD	Standardabweichung
sec	Sekunden
SLA	Stereolithografie
STL	Dateiformat für dreidimensionale Objekte
TLX	Tissue level X Implantat
Tab	Tabelle
2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
°	Grad

1 Einleitung

Zahn-Implantate sind integraler Bestandteil der modernen Zahnheilkunde. Bei der Implantation werden schraubenförmige Fremdkörper aus Titan oder Keramik in den Alveolarknochen eingebracht. Damit wird eine knöchern verankerte Unterstützungsstruktur geschaffen, die zum Befestigen von Zahnersatz dienen kann. Konventionell wurden Implantate freihand inseriert, wobei sowohl die Bohrung als auch das Einsetzen des Implantats nach taktilen und visuellen Parametern erfolgt. Dabei wurden die, für die Planung nützlichen Informationen, meist aus mehreren zweidimensionalen röntgenologischen Bildern und gegebenenfalls Situationsmodellen gewonnen (2). Durch die Anwendung diesen Workflows kam es häufig zu klinisch relevanten Abweichungen im Vergleich zur präoperativ geplanten Implantatposition (2-9). Ein weiteres Problem war, dass genaue Angaben über das transversale Knochenangebot aufgrund des Mangels an Bildinformationen nicht gemacht werden konnten (10-13). Daher mussten sich Kliniker*innen auf ihre intraoperative Einschätzung verlassen und wurden nicht selten von einem unzureichenden Knochenangebot überrascht (2).

Mit der digitalen Volumentomographie (DVT) und intraoralen Scannern (IOS) stehen heutzutage moderne Möglichkeiten zur Verfügung um die intraorale Situation der Patient*innen zu digitalisieren und darin die präoperative Implantatplanung durchzuführen. Für die Gewährleistung einer erhöhten Therapiesicherheit und um die Übertragung der Planung auf den chirurgischen Eingriff zu erleichtern, stehen unterschiedliche Medien zur Verfügung. Die Übertragungsmedien, mit denen die digital geplanten Implantatpositionen in die Patient*innen überführt werden kann, sind seit zwei Jahrzehnten Gegenstand der implantologischen Forschung (6, 23). Als vielversprechend gelten hierbei insbesondere die statisch führenden und dynamisch navigierenden Implantationshilfen (24, 25).

Bei der statisch geführten Implantation handelt es sich um eine digital geplante (Computer aided Design (CAD)) und im Anschluss durch Maschinen automatisch gefertigte (Computer aided manufacturing (CAM)) Bohrschablone. Durch diese kann die exakte Positionierung der Implantate, durch eingearbeitete Bohrhülsen,

erleichtert und dabei helfen Implantate parallel zueinander auszurichten (20, 26). Zur Fertigung können die Stereolithografie (SLA) und digitale Lichtverarbeitungs-Technologie (DLP) zum Einsatz kommen (23, 24, 29-31). Die Gruppe der statischen Bohrschablonen lässt sich in zwei Unterkategorien unterteilen, diese sind Pilot drill guided und fully guided.

Die dynamisch navigierte Implantation hingegen funktioniert nach dem Prinzip, dass der Bohrer mit Hilfe eines Referenzmarkers die geplante Implantatposition identifiziert und über eine Echtzeitnavigation auf einen Bildschirm projiziert.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Genauigkeit der einzelnen Aufbereitungsmethoden freihand, statisch geführt und dynamisch navigiert hinsichtlich ihrer Abweichung an Implantatschulter, -apex, der Angulation und der Operationszeit miteinander zu vergleichen.

Forschungsfragen:

- Unterscheiden sich die Aufbereitungsmethoden freihand, statisch geführt und dynamisch navigiert in der Genauigkeit, der Zeiteffizienz und der Erlernbarkeit bei Implantationen?
- Unterscheiden sich studentische und chirurgische Teilnehmer in der Genauigkeit und Zeiteffizienz von inserierten Implantaten?
- Hat die Implantatposition einen Einfluss auf die Genauigkeit der inserierten Implantate?
- Gibt es Unterschiede in den subjektiven Empfindungen der Teilnehmer*innen während der Implantation mit verschiedenen Aufbereitungsmethoden?

Im dem folgenden Abschnitt, der Literatordiskussion, wird die aktuelle Literatur zur computerunterstützten Implantologie betrachtet. Im Methodenteil wird die experimentelle in-vitro Studie erläutert. Die Ergebnisse der Studie finden sich im Ergebnisteil und werden anschließend im Diskussionsteil in Bezug auf die aktuelle Forschung beleuchtet.

2 Literaturdiskussion

Ziel dieser Arbeit ist es, die Aufbereitungsmethoden freihand, statisch geführt und dynamisch navigiert für die Implantation hinsichtlich ihrer Genauigkeit, Zeiteffizienz und Erlernbarkeit zu vergleichen. Dadurch soll eine Optimierung der dentalen Implantologie erreicht werden. Im Folgenden wird auf die Therapiefindung und Kontraindikationen für Implantationen eingegangen. Anschließend wird die aktuelle Literatur zur computerunterstützten Implantologie betrachtet.

2.1.1 Dentale Implantologie

Eine Indikation zum Setzen von dentalen Implantaten liegt vor, wenn:

- Patient*innen an Zahnverlust in zahnbegrenzten Lücken oder einer verkürzten Zahnreihe leiden,
- der bisherige konventionelle prothetische Zahnersatz eine unzureichende Stabilität aufweist und mit Implantaten funktionelle Vorteile gegenüber der konventionellen Versorgung erzielt werden können,
- dadurch eingegliedert Zahnersatz weiterhin erhalten werden kann, der anderenfalls nicht erhalten werden könnte,
- eine funktionelle Rehabilitation ohne Implantate nicht zufriedenstellend erreichbar ist oder
- besondere lokale Befunde oder subjektive Gründe dafür vorliegen (37-39).

Um den stetig wachsenden Ansprüchen und Patient*innenwünschen gerecht zu werden und die Therapie mit dentalen Implantaten zu verbessern, wurden in den letzten Jahrzehnten zahlreiche Ansätze verfolgt. Zu den vier Hauptarten der entwickelten dentalen Implantate zählten die transdentale Fixation (Transfixation), das submuköse Implantat, das subperiostale Implantat und das enossale Implantat. Im Folgenden werde ich kurz auf diese vier Unterarten eingehen, wobei das enossale Implantat das einzige, heutzutage verwendete Implantat ist.

Die Transfixation wurde an der natürlichen Zahnwurzel befestigt, wobei das physiologische Weichgewebe um den Zahn erhalten blieb. Dieser Umstand brachte den Vorteil mit sich, dass diese Art der Behandlung nicht mit dem Problem des Pfeilerdurchtritts durch die Mukosa belastet war. Submuköse Implantate waren druckknopfartige Retentionselemente, die unter der Schleimhaut platziert wurden und damit den Halt von Totalprothesen verbessern sollten. Subperiostale Implantate hingegen wurden nach der Bildung eines Mukoperiostlappens direkt auf den krestalen Knochen aufgebracht. Eine Befestigung im Knochen fand dabei nicht statt. Das Gerüst der subperiostalen Implantate wurde nach der Implantation vom Körper lediglich nur toleriert und nicht eigentlich akzeptiert, was mit einer recht hohen Misserfolgsrate einherging. Der Durchbruch der dentalen Implantologie wurde letztendlich mit dem enossalen Implantat erreicht. Die zu Beginn variierenden Formen (Blatt- (42), Hohlzylinder- (43), nadelartige Implantate (44, 45), Schrauben unterschiedlicher Art und vielerlei ähnliche Konstruktionen) und Materialien (Platin-Iridium, Vitallium, rostfreier Stahl und Chrom, Kobalt-Molybdäm-Legierungen, Titan, Tantal und Aluminiumoxid) von Implantaten wurden über die Zeit zunehmend zu schraubenförmigen Basisteilen aus Titan (46). Titan zeichnete sich im Vergleich zu anderen Werkstoffen insbesondere aus biologisch-histologischer Sicht als geeignetes Implantatmaterial aus (47).

Der wichtigste Pionier der modernen Implantologie war dabei Professor P.I. Brånemark, der die ersten präklinischen und klinischen Studien in den 1960ern durchführte (48). Er prägte den Begriff „Osseointegration“, der heute weitverbreitet in der Implantologie Anwendung findet (49). Ein weiterer Pionier war Professor A. Schroeder, der die Gewebereaktion auf unterschiedliche Implantatmaterialien untersuchte. Dabei dokumentierte er den ersten histologischen Knochen-Implantatkontakt (bone-to-implant contact) von Titanimplantaten (47) sowie die erste Weichgewebsreaktion auf Titanimplantate (50). Heutzutage sind Implantate aus Titan beziehungsweise Titanlegierungen aufgrund ihrer sehr gut dokumentierten klinisch erfolgreichen Ergebnisse der Goldstandard (51-53). Dabei kombiniert Titan Eigenschaften wie Stabilität, Rostfreiheit und eine Biokompatibilität, die für die Osseointegration erstrebenswert sind.

Während am Anfang Implantate mit maschinieren (54) und rauen (55) Oberflächen verwendet wurden, setzten sich im Verlauf raue Oberflächen durch (56). Um den ästhetischen Ansprüchen der Patient*innen genügen zu können, haben sich vermehrt prothetische Komponenten und chirurgische Techniken zur Augmentation des Kieferknochens etabliert. Nachhaltig weitverbreitet sind die Sinusbodenelevation und die gesteuerte Knochenregeneration (guided bone regeneration, GBR) (57).

Um Implantate nicht nur in Knochen, der optimale Voraussetzung für eine Implantation in Bezug auf Härte und Volumen bietet, sondern auch in weniger gut geeignetem Knochen inserieren zu können, wurde das Implantat weiterentwickelt. Ziel war es, die Implantatoberfläche bioaktiv oder sogar osseokonduktiv zu gestalten, um die Osseointegration zu beschleunigen. In der Literatur sind unterschiedliche Methoden beschrieben worden, um die Titanoberfläche von Implantaten zu modifizieren (58, 59). Durch die verbesserte Osseointegration wurde es möglich, nach der Extraktion von Zähnen Implantate in die Alveole zu inserieren sowie gesetzte Implantate innerhalb einer kurzen Zeit funktionell zu belasten (immediate or early loading). Die beiden Behandlungsprotokolle Sofortimplantat und Sofortbelastung entstanden.

2.1.2 Digitale Implantologie

Technische Errungenschaften wie die DVT und Intraoralscann-Technologie (IOS) sowie die Leistungsfähigkeit moderner Hard- und Software ermöglichen der Implantologie, auf die Errungenschaften der Digitalisierung zuzugreifen. Bohrschablonen, unabhängig davon, ob sie nach dem Prinzip der dynamisch navigierten oder statisch geführten Implantation gestaltet werden, dienen dem Zweck, die dentale Implantologie zu optimieren. Zum einen ermöglichen sie die präzise Umsetzung der präoperativ in einer Planungssoftware geplanten Implantatposition in Patient*innen. Weitere Anforderungen wie angestrebter Interimplantatabstand, Zahn-Implantatabstand, Implantattiefe und weitere Aspekte machen das virtuelle Planen von Implantaten zu einem wichtigen Tool, um einen möglichst guten Behandlungserfolg zu erreichen (63). Studien haben gezeigt, dass dadurch das ästhetische Ergebnis und die Überlebensrate von Implantaten verbessert werden konnten (64, 65). Weitere Vorteile einer

korrekten Implantatposition sind optimale periimplantäre Hart- und Weichgewebssituationen als Ergebnis einer erleichterten Mundhygiene, eine harmonische Okklusion und angemessene Implantatbelastung (66-68). Korrekte Implantatpositionen ermöglichen das Design von optimalen finalen Prothesen, die mit den Abutments über Schrauben befestigt werden können. Damit kann eine zementierte Befestigung von Zahnersatz, die stets mit Kompromissen einhergeht, umgangen werden (69). Zudem wird die Eingliederung von präfabriziertem provisorischem Zahnersatz dadurch erleichtert (35, 70, 71). Diese Umstände bringen Vorteile für Patient*innen und Zahnärzt*innen mit sich (72). Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Sofortversorgung von Implantaten keine triviale Behandlung darstellt. Es besteht weiterhin die Gefahr von technischen und chirurgischen Komplikationen während und nach der Operation wie Verlust des Halts der Prothese (bei prothetischen Sofortbelastungen), ausgeprägte individuelle Anpassungen, Fraktur der Bohrschablone, fehlerhaft konstruierter Zahnersatz oder erneut herzustellender und zu verändernder Zahnersatz (73).

2.1.3 Genauigkeit der Implantatposition

Die Genauigkeit der Position von inserierten Implantaten spielt eine wichtige Rolle für die Funktionalität und Ästhetik der späteren prothetischen Versorgung. Sie hat das Potential, das klinische Outcome von Implantaten in der ästhetischen Zone (65), das Gelingen der Eingliederung von präfabrizierten provisorischem Zahnersatz (35, 64, 70, 71, 74-78) und die Überlebensrate von implantatgestützten Zahnersatz zu verbessern (64). Aus diesen Gründen birgt der digitale Workflow Vorzüge für sowohl Behandler*innen als auch Patient*innen (72). Durch die Zuhilfenahme der computergestützten Implantationshilfen ist es Chirurg*innen möglich, die zuvor digital geplante Implantatposition mit einer klinisch akzeptablen Abweichung in Patient*innen zu überführen (79, 80). Eine große Anzahl von Studien hat sich mit dem Thema der Genauigkeit von digital geplanten Implantaten auseinandergesetzt. Dabei wurden die Abweichung der tatsächlichen Implantatschulter, des Implantatapex und der Angulation von der digital geplanten Implantatposition gemessen. Um die umgesetzte Implantatposition ermitteln zu können, sind zwei verschiedene Wege möglich: postoperativ ein DVT durchzuführen oder ein Intraoralscann

mithilfe von Scannbodys vorzunehmen. Die radiologische Methode wurde in einem deutlich größeren Teil der Studien angewendet, um die tatsächliche Implantatposition zu ermitteln. Dazu wurden die Datensätze der prä- und postoperativen DVT mit einer entsprechenden Software übereinandergelegt. In der präoperativ durchgeführten DVT befanden sich die geplanten Implantate. Seit kurzer Zeit stehen auch strahlenfreie Optionen zur Verfügung, um die tatsächliche Implantatposition zu erfassen. Hierzu kann ein Intraoralscann von Patient*innen mit Scannbodys nach der Operation durchgeführt werden. Bisher wurde die Erfassung der Implantatposition mittels IOS nur selten in Studien angewendet, um mit STL-Daten die Implantatposition zu errechnen (81, 82). Der Großteil der Wissenschaftler*innen hat nach dem Anfertigen einer DVTs die DICOM Daten zum Analysieren der Implantatposition genutzt (4, 6, 24, 26, 29, 33, 34, 36, 83-85). Die Genauigkeit der Erfassungsmethode scheint beim IOS höher zu sein, als bei der DVT (81). Ein signifikanter Unterschied konnte bisher lediglich in einer einzigen Studie nachgewiesen werden (86). Dafür scheinen die Artefakte um die Implantate herum einen negativen Beitrag zu leisten. Abgesehen davon ist die Ermittlung der Implantatposition mit IOS für das Patient*innenwohl vorzuziehen, da hierdurch eine zusätzliche Dosis toxischer ionisierender Strahlung vermieden werden kann.

Die Abweichungen der Implantatpositionen von den präoperativ geplanten Implantatpositionen sind für die einzelnen Aufbereitungsmethoden unabhängig voneinander zu bewerten, da sie in einigen Studien stark voneinander abweichen.

2.1.3.1 Freihand und dynamisch navigiert

Bei den konkurrierenden Aufbereitungsmethoden, Freihand und dynamisch navigiert, war die dynamische Navigation der Freihandinsertion überlegen. Dies ist zurückzuführen auf ihre signifikant geringeren Abweichungen im Bereich der Implantatschulter und dem Implantatapex (6) oder im besten Falle in allen gemessenen Parametern (5). Insgesamt kamen alle Studien, die diese beiden Methoden miteinander verglichen haben, zu einem ähnlichen Ergebnis. Mit der dynamisch navigierten Implantatbettpräparation und Implantatinsertion konnte eine signifikant höhere Genauigkeit der Implantatposition erzielt werden (3-6). In

den einzelnen Studien wurden bei unterschiedlichen Parametern signifikant voneinander abweichende Genauigkeiten gemessen.

2.1.3.2 Dynamisch navigiert und statisch geführt

Die bisher durchgeführten Studien liefern keine einheitlichen Ergebnisse über die vergleichende Genauigkeit von dynamischen und statischen computergestützten Implantationen. Die Arbeitsgruppe um Jorba-Garcia et al. konnte eine signifikant höhere Genauigkeit von dynamisch navigierten Implantationen im Gegensatz zu statisch geführten Implantationen nachweisen (3). Zum einen bezeugen eine Anzahl an Studien, dass es keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden computergestützten Methoden gäbe (5, 36), während andere Studien signifikante niedrigere Abweichungen im Bereich des Implantatapex, der Implantatschulter oder der Winkelabweichungen bei der Verwendung von dynamischen Navigationssystemen feststellten (6, 33, 34).

Die Abweichungen betragen für die dynamische Navigation in klinischen Studien durchschnittlich $3,68^\circ$ in der Winkelabweichung und 1,03 mm an der Implantatschulter. In in-vitro Studien hingegen fielen die durchschnittlichen Winkelabweichungen um $2,01^\circ$ und 0,46 mm an der Implantatschulter aus (3). Dabei ist aufgefallen, dass die Abweichungen von dynamisch navigierten Implantaten in klinischen Studien höher waren als diejenigen von in-vitro Studien. Diese Umstände führten dazu, dass eine signifikante Abweichung der vertikalen Apexposition zwischen klinischen und präklinischen Studien festgestellt werden konnte (3).

Der Gruppe 5 ITI Consensus Konferenz Report kam zu dem Kenntnisstand, dass Implantate, die mit statisch geführten Bohrschablonen inseriert wurden, eine Abweichung von durchschnittlich 1,20 mm an der Implantatschulter, 1,50 mm am Apex des Implantats sowie eine Winkelabweichung von $3,50^\circ$ (87) aufwiesen. In aktuelleren Arbeiten über statisch geführte Implantationen stellte sich heraus, dass es einen großen Unterschied in der Genauigkeit zwischen pilot drill guided und fully guided Bohrschablonen gab. Fully guided Bohrschablonen waren dabei signifikant genauer, was die Parameter Implantatschulter, Implantatapex sowie die Winkelabweichung (88) anbelangt.

Zu einem Ergebnis, das die Erkenntnisse der zuvor beschriebenen in-vitro Studien relativiert, kamen die zwei folgenden Studien. Bei der ersten zeigten Implantate, die computergestützt (dynamisch navigiert und statisch geführt) in eine Einzelzahnlücke inseriert wurden, keine signifikanten Unterschiede in der Genauigkeit (29). Die Arbeitsgruppe um Yimarj et al. kam zu einem ähnlichen Ergebnis nachdem zwei Implantate im gleichen Quadranten statisch geführt oder dynamisch navigiert inseriert wurden und in der Parallelität zueinander verglichen wurden (26).

2.1.3.3 Dynamische Navigationssysteme im Vergleich miteinander

Bei der Anwendung von verschiedenen dynamischen Navigationssystemen für die orale Implantologie wurden keine signifikanten Unterschiede, die die Genauigkeit von Implantaten beeinflussten, festgestellt (3). Eine weitere Studie untersuchte zwei unterschiedliche Bohrprotokolle unter Verwendung von dynamischen Navigationssystemen. Bei der Kontrollgruppe wurde, von der Pilotbohrung bis zur Implantatinserion, die dynamische Navigation genutzt, während bei der Testgruppe das Navigationssystem allein bei der Pilotbohrung zum Einsatz kam. Die weitere Aufbereitung des Implantatbetts erfolgte freihand. Die Forscher kam zu dem Ergebnis, dass bei dem Pilotbohrerprotokoll die Abweichung des Implantatapex' und die Winkelungengenauigkeit signifikant höher waren als bei dem konventionellen Bohrprotokoll der dynamisch navigierten Implantation. Weitere signifikante Unterschiede konnten in der Genauigkeit zwischen diesen beiden Bohrprotokollen nicht nachgewiesen werden (89).

Unterschiedliche Bohrprotokolle wie das konventionelle Bohrprotokoll mit aufeinanderfolgenden, im Durchmesser zunehmenden Bohrern, und die Aufbereitung durch einen Trepanbohrer wurden im Setting einer in-vitro Studie verglichen. Die mit dem dynamischen Navigationsgeräten inserierten Implantate zeigten keine signifikanten Unterschiede in der Implantatposition oder -angulation (90).

2.1.3.4 Einfluss der chirurgischen Technik und Erfahrung

Zwei klinische Studien fanden unabhängig voneinander heraus, dass bei der dynamisch navigierten Implantation weder der Kiefer noch die Operationstechnik, die zum Einsatz kam (Bildung eines Mukoperiostlappens oder das Fehlen einer Lappenpräparation), einen signifikanten verändernden Effekt auf die Genauigkeit der inserierten Implantate hatten (81, 91).

Zwei weitere Studien konnten keinen signifikanten Unterschied zwischen der Genauigkeit von Implantaten, die durch Chirurg*innen mit variierenden Erfahrungswerten gesetzt wurden, feststellen (36, 84). Eine andere Studie kam zu einem ähnlichen Ergebnis, jedoch waren die Winkelabweichungen bei Chirurg*innen mit viel Erfahrung signifikant geringer als bei weniger erfahrenen Chirurg*innen (4).

2.1.3.5 Einfluss der Implantatregion

Neben der Aufbereitungsmethode, dem Erfahrungshorizont der Operateur*innen und dem Bohrprotokoll scheint die Region des digital geplanten Implantats keine zu vernachlässigende Komponente der Genauigkeit zu sein. In einer experimentellen in-vitro Studie zeigte sich, dass die Region der Implantate einen größeren Einfluss auf die Genauigkeit des Implantats hatte als die angewendete Aufbereitungsmethode oder die Erfahrungen der Chirurg*innen. Bei der dynamisch navigierten Implantation im Frontzahnbereich war eine signifikant größere Abweichung im Bereich des Implantatapex festgestellt worden. In der Molarenregion war es so, dass die Winkelabweichung bei statisch geführter Implantation signifikant höher waren (36). Bei statisch geführten Implantationen wurde zudem ein signifikanter Unterschied in der Abweichung der Implantatschulter zwischen unterschiedlichen Lückenkonfigurationen festgestellt. Implantate, die in den distalen Bereichen einer verkürzte Zahnreihe mit Freundsituation inseriert wurden, waren mit signifikant höheren Ungenauigkeiten assoziiert als Implantate in zahnbegrenzten Lücken (88).

Aus der bisherigen Literatur ist zu erkennen, dass die Aufbereitungsmethode, die Erfahrung der Chirurg*innen, das Bohrprotokoll, die chirurgische Technik, als auch die Region der Implantation eine wichtige Rolle in Bezug auf die Genauigkeit der Implantation spielen. Zum jetzigen Zeitpunkt ist die Datenlage

jedoch noch nicht ausreichend valide und homogen. Aus diesem Grund sind weitere Studien notwendig, um die bisherigen Ergebnisse zu untermauern bzw. zu entkräften.

2.1.4 Lernkurve

Da die computergestützte, dynamisch navigierte Implantation eine Fertigkeit ist, die nicht im klassischen Repertoire von Chirurg*innen oder Studierenden liegt, ist sie zunächst zu erlernen. Je nach Fertigkeit lernen wir diese blind und automatisch, während andere hart erarbeitet werden müssen (92). Lernprozesse und die Lösung von Problemen sind schon seit langer Zeit in der Wissenschaft untersucht worden. Bereits 1898 ermittelte der Psychologe Edward Thorndike, dass Katzen bei der Konfrontation mit der gleichen Herausforderung mit zunehmender Wiederholung stetig weniger Zeit benötigten. Er erkannte in diesem Versuch einen Lernprozess (93). Ein Teilaspekt der vorliegenden experimentellen Studie ist es, zu ermitteln, ob ein Lernprozess während der wiederholten Implantation mit der gleichen Aufbereitungsmethode stattfindet und ob daraus eine Lernkurve ersichtlich wird. Klassischerweise wird eine Lernkurve so definiert, dass sie einen Zusammenhang zwischen dem Erfolgsgrad des Lernens und der dafür verwendeten Zeit graphisch darstellt. Neben dieser psychologischen Definition gibt es weitere, weniger gängige Definitionen der Lernkurve. Da die benötigte Zeit pro Implantation eine interessante Messgröße ist und für die Wirtschaftlichkeit von Zahnarztpraxen bedeutsam ist, haben wir uns für eine modifizierte Lernkurve entschieden, die die chirurgische Zeit auf der Y-Achse und die Anzahl der inserierten Implantate auf der X-Achse graphisch darstellt. Daraus ergibt sich, dass aus einer schnellen Verringerung der Operationszeit eine steile Lernkurve (Richtung X-Achse) ergibt, während bei gleichbleibenden Operationszeiten eine flache Lernkurve erkennbar wird.

Studien haben gezeigt, dass die Entwicklung von Lernkurven zur Verbesserung der Qualität der medizinischen Versorgung beiträgt (94). Block et al. untersuchten, inwiefern Chirurg*innen bei der dynamisch navigierten Implantation eine Lernkurve absolvierten. Dabei wurde herausgefunden, dass Oralchirurg*innen mit einer niedrigen Abweichung zu Beginn des Erlernens eine flachere Lernkurve zeigen als solche, die anfangs größere Abweichungen

aufweisen. Jedoch werde die Lernkurve im Verlauf flacher, was bei den Chirurg*innen mit höheren Abweichungen nach dem zehnten Implantat der Fall war. Die ersten 20 Implantate der Chirurg*innen waren mit einer signifikant größeren Abweichung an der Implantatschulter und dem Implantatapex assoziiert als die folgenden 20. In Bezug auf die Abweichung des Winkels oder zwischen den einzelnen Chirurg*innen gab es jedoch keinen signifikanten Unterschied (85). Zu dem Ergebnis, dass die ersten 20 Implantate eine größere Abweichung im Bereich der Schulter und des Apex´ hatten, die bei den nachfolgenden 20 Implantaten signifikant niedriger war, kam auch eine weitere Studie (83). Im Rahmen einer anderen Studie war eine flache Lernkurve in allen Parametern bis auf die Implantatschulter festgestellt worden. Die höhere Genauigkeit zwischen der realen und geplanten Implantatschulter verbesserte sich zwischen dem 8. und 17. Implantat (91). Die Forschungsgruppe um Sun et al. konnte eine sichere und reproduzierbare Implantation mit dynamischem Navigationssystem bereits nach fünf aufeinanderfolgend inserierten Implantaten feststellen (95). Die bisherigen Studien haben sich mit der veränderten Genauigkeit nach wiederholter dynamisch navigierter Implantation auseinandergesetzt, jedoch wurde nicht die dazu verwendete Zeit gemessen. Nach Zimbardo lässt sich Lernen an den Verbesserungen der Leistung ablesen (96). Die verbesserte Leistung geht, wie in den vorliegenden Publikationen, mit einer höheren Genauigkeit der Implantatposition einher. Beim Betrachten der physikalischen Definition für mechanische Leistung:

$$P = \frac{W}{t}$$

$[P] = \text{Leistung } \frac{J}{s} \text{ (Joule pro Sekunde)} = \text{Watt}$, $[W] = \text{Arbeit } J \text{ (Joule)}$ und
 $[t] = \text{Zeit } s \text{ (Sekunden)}$

wird erkennbar, dass neben der verrichteten Arbeit auch der dafür benötigten Zeit eine große Aufmerksamkeit beigemessen wird. Aus diesem Grund scheint es sinnvoll, für das Ermitteln der Lernkurven neben der Genauigkeit der inserierten Implantate auch die dafür benötigte Zeit zu ermitteln. Damit folgt die Ermittlung der Lernkurve dem Beispiel einer zuvor durchgeführten Studie, wobei die Lernkurve in Bezug auf die Operationszeit gemessen wird (95).

2.1.5 Operationszeit

Einige der bisherigen Studien, die sich mit computergestützten Implantationshilfen auseinandergesetzt haben, beschäftigten sich auch mit der benötigten Operationszeit. Dafür standen meist unterschiedliche chirurgische Protokolle (Trepanbohrer vs. konventionelle Bohrer, ...) zur Auswahl, die in Bezug auf die dafür notwendige Zeit miteinander verglichen wurden. Daneben gab es Studien, die die benötigte Zeit bei der Durchführung derselben Methode von unterschiedlichen Chirurg*innen verglichen. Beim Vergleich von unterschiedlichen Aufbereitungsmethoden kamen Jorba-García et al. zu dem Ergebnis, dass dynamische navigierte Implantation eine signifikant längere Operationszeit als freihand Implantationen benötigten (4).

Bei zwei unterschiedlichen dynamischen Navigationssystemen, die miteinander verglichen wurden, konnte eine verringerte Operationszeit bei der Anwendung der augmented reality-guided navigierten Methode beobachtet werden. Die Methode führte zu einer signifikant reduzierten Operationszeit im Gegensatz zur 2D-image-guided navigierten Methode (97). Bei der augmented reality-guided navigierten Methode trägt der*die Chirurg*in eine VR-Brille, die ihm*ihr zeigt wo das Implantat zu inserieren ist. Die 2D image-guided navigierte Methode hingegen zeigt dem*der Chirurg*in auf einem Bildschirm, wo sich das Modell und die geplante Implantatposition befinden.

Demetoglu et al. untersuchten Unterschiede in der Operationszeit unter Anwendung unterschiedlicher Bohrprotokolle unter dynamischer Navigation. Dabei kamen ein Pilotbohrerprotokoll zum Einsatz, bei dem allein der Pilotbohrer unter dynamischer Navigation im Modell versenkt wurde. Die folgenden Bohrungen fanden freihand statt. Daneben wurde ein Bohrprotokoll praktiziert, bei dem vom Pilotbohrer bis zum Inserieren des Implantats das Navigationssystem Verwendung fand. Es zeigte sich, dass das Pilotbohrerprotokoll die Operationszeit signifikant reduzieren konnte (89).

In der klinischen Anwendung der drei chirurgischen Methoden freihand, dynamisch navigiert und statisch geführt konnte in der Operationszeit, die in der Anwendung benötigt wurde, kein statistisch signifikanter Unterschied gefunden werden (98). Eine klinische Studie, die statisch geführte Implantationen mit freihand durchgeführt

verglichen, kam zu dem Ergebnis, dass die chirurgischen Zeiten zwischen dem Setzen der Anästhesie und dem Verschluss der Wunde durch Nähte gleich waren. Zudem konnten bei der Sofortversorgung von Implantaten zwischen dem konventionell durchgeführten, freihand durchgeführten Implantationsprotokoll und der statisch geführten Implantation keine signifikanten zeitlichen Differenzen festgestellt werden. Als Start und Endpunkt der Messung dieser Zeitspanne dienten die Durchführung der DVT und die provisorische prothetische Versorgung. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Studienteilnehmenden in der Gruppe mit statisch geführten Implantaten ein deutlich komplexeres Patientenkollektiv waren als die der Freihand-Gruppe und somit die Vergleichbarkeit fraglich ist (99).

Neben dem Vergleich unterschiedlicher Aufbereitungsmethoden bzgl. der technischen Umsetzung der digital geplanten Implantatposition gab es den Ansatz, Trepanbohrer zur Implantatbettaufbereitung anzuwenden. Dabei kam allein die dynamisch navigierte Implantation zum Einsatz. In der Kontrollgruppe dieser in-vitro Studie wurde das Implantatbett mit konventionellen Bohrern aufbereitet, während bei der Testgruppe Trepanbohrer verwendet wurden. Es konnte gezeigt werden, dass es keinen signifikanten Unterschied in der Operationszeit zwischen den angewendeten Bohrprotokollen gab (90).

Die verwendeten Aufbereitungsmethoden spielten in Bezug auf die benötigte Operationszeit eine wichtige Rolle. Jedoch ist zu beachten, dass die Kenntnisstände der Chirurg*innen in Bezug auf die Implantologie im Allgemeinen als auch die verwendeten Methoden, insbesondere in der dynamisch navigierten Implantologie, eine ebenso wichtige Rolle spielen, um die Operationszeit zu reduzieren. Bei dem Vergleich von Chirurg*innen mit unterschiedlichen Erfahrungen war zu beobachten, dass Chirurg*innen, die in der dynamisch navigierten Implantation geübt waren, länger brauchten als Chirurg*innen mit weniger Erfahrung. Gleichzeitig waren die erfahrenen Chirurg*innen den Unerfahrenen in der Winkelgenauigkeit deutlich überlegen, allerdings in keinem anderen erhobenen Parameter (4).

In einer Studie von Pellegrino et al. wurde die Operationszeit von unterschiedlichen Chirurg*innen mit verschiedenen Kenntnisständen in der dynamisch navigierten

Implantation untersucht. Dabei konnte lediglich ein erfahrener Chirurg mit viel Expertise, sowohl im Umgang mit dem Navigationssystem als auch in der Implantologie die Operationszeit signifikant verringern. Während die Operationszeit reduziert wurde, hatte dies keinen negativen Einfluss auf die Genauigkeit der inserierten Implantate. Die alleinige Erfahrung in einem der zwei Bereiche, orale Implantologie oder im Umgang mit dem Navigationssystem, war vergleichbar mit der Operationszeit eines*r Operateur*in, der*die weder in der Implantologie noch im Umgang mit dem Navigationssystem geübt war (84). Daraus wird ersichtlich, dass eine Reduzierung der Operationszeit bei der dynamisch navigierten Implantation dann reproduzierbar erwartbar ist, wenn Anwender*innen sowohl im Umgang mit der dynamisch navigierten Implantation als auch in der Chirurgie versiert sind oder die Reihenfolge bzw. die anzuwendenden Bohrer verändert werden. Als weitere Möglichkeit zur Reduktion der Operationszeit dienen technische Hilfsmittel wie VR-Brillen.

2.2 Subjektive Empfindungen der Operateur*innen

Um das subjektive Empfinden von Chirurg*innen während der Operation ermitteln zu können, ist eine anonyme Umfrage der chirurgischen Teilnehmer*innen eine sinnvolle Möglichkeit. Bisher wurden in lediglich einer klinischen Studie eine solche Umfrage durchgeführt. Dabei ergab die Befragung von Kliniker*innen, die computergestützte und freihand Implantationen verglichen, dass die computergestützte Implantation mit niedrigeren Angaben bezüglich des Stresslevels und der benötigten chirurgischen Kompetenz assoziiert waren. In Hinsicht auf die Genauigkeit und Vorhersagbarkeit waren keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen erkennbar. Computergestützte Implantationshilfen wurden insbesondere bei zahnlosen Patient*innen empfohlen, während die zusätzlichen Kosten als signifikant großer Nachteil empfunden wurden (100). Um die geringe Datenlage bezüglich der subjektiven Befragung von chirurgischen Teilnehmern zu ergänzen, sind weitere Erhebungen notwendig.

2.3 Ziel der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, die Aufbereitungsmethoden freihand, statisch geführt und dynamisch navigiert für die Implantation hinsichtlich ihrer Genauigkeit, Zeiteffizienz und Erlernbarkeit zu vergleichen. Die Untersuchungsparameter sind die Abweichung der Implantatschulter, dem Implantatapex und der Angulation der tatsächlichen Implantatposition verglichen mit der digital geplanten. Zudem wurde die benötigte Zeit gemessen und eine Lernkurve während der Implantation ermittelt. Dafür führten zwei unterschiedliche Gruppen diese Studie durch. Gruppe A setzte sich aus erfahrenen Chirurgen zusammen, während sich Gruppe B aus unerfahrenen Studierenden zusammensetzte. Anschließend wurde eine anonyme Umfrage durchgeführt, um die subjektiven Empfindungen der Teilnehmer*innen während der Implantationen zu erheben.

Die angenommenen Nullhypothesen sind:

- a) Die erfahrenen Chirurgen und unerfahrenen Studierenden werden sich in keinem Parameter unterscheiden.
- b) Die dynamische navigierte Implantation wird weder von der statisch geführten noch von der Freihand-Methode in den gemessenen Parametern abweichen.

In der Abgrenzung zu früheren Studien werden in dieser Forschungsarbeit drei anstatt zwei verschiedene Aufbereitungsmethoden gleichzeitig miteinander verglichen. Die statisch geführte Implantation wird mit einem Fully-guided System durchgeführt. Neben der Messung der zeitlichen Effizienz und ihre Verbesserung nach wiederholter Implantation wird ebenfalls das subjektive Empfinden der Teilnehmer*innen während der Implantationen erfragt. Im Rahmen dieser Studie wird eine deutlich höhere Anzahl an Implantaten inseriert als in vorherigen Studien. Damit möchten wir Forschungslücken in der Vergleichbarkeit der Aufbereitungsmethoden freihand, statisch geführt und dynamisch navigiert schließen. Außerdem zählt zu den Zielen dieser Arbeit die Datenlage bezüglich der Fully-guided Systeme, der Lernprozesse während der Implantationen und Zeiteffizienz der Aufbereitungsmethoden sowie die mangelnde Datenlage zu den subjektiven Empfindungen der Teilnehmer*innen zu ergänzen.

3 Material und Methoden

3.1 Studiendesign

Bei der vorliegenden Studie handelt es sich um ein in-vitro durchgeführtes Experiment. Die Hauptarme der Studie waren die zwei Gruppen von Operateur*innen mit unterschiedlichem Erfahrungshorizont. Gruppe 1 bestand aus Chirurgen mit viel Erfahrung (mind. 5 Jahre) in der Implantologie ($n = 6$), Gruppe 2 aus Studierenden, die in der Implantologie unerfahrenen (ohne klinische Erfahrung) waren ($n = 6$). Die jeweiligen Operateur*innen hatten die Aufgabe, mit drei unterschiedlichen Methoden die Implantatbohrung vorzunehmen, um diese im Rahmen der vorliegenden Untersuchung im Anschluss, bezüglich der Genauigkeit der Implantatposition mit der präoperativen digitalen Planung, zu vergleichen. Die Aufbereitungsmethoden waren freihand, statisch geführt und dynamisch navigiert.

3.2 Beschreibung des in-vitro Modells

Als Objekt, in welches die Implantate eingebracht wurden, diente ein in-vitro Kunststoffmodell, das einen Oberkiefer eines*r Patient*in darstellte. Um das Patientenmodell für die Studie zu modifizieren und eine zusätzliche Einzelzahnücke zu schaffen, wurde ein weiterer Prothesenzahn (VITAPAN, VITA Zahnfabrik, Deutschland) in Regio 17 aufgestellt. Das Ergebnis war ein Oberkiefermodell mit einer Einzelzahnücke in Regio 16, einer Einzelzahnücke mit Extraktionsalveole in Regio 11 und einer extrem verkürzten Zahnreihe im zweiten Quadranten. Um das Modell zu digitalisieren, wurde es mit einem IOS (TRIOS 4, 3shape, Dänemark) gescannt und daraus eine STL-Datei erstellt. Anschließend wurde die STL-Datei des Modells in eine 3D Designsoftware (PlastyCAD, 3DIEMME, Italien) importiert. Dort wurden weitere Modifikationen vorgenommen, um die Herstellung des Modells zu vereinfachen und leichteres Montieren der Modelle im Phantomkopf (Frasaco AG-3, Frasco, Deutschland) zu gewährleisten. Zu diesem Zweck wurden die Kanten des Modells mit der smooth-Funktion geglättet und eine runde Perforation wurde mittig, palatinal geschaffen, um das Modell möglichst leicht an der Schraube des Phantomkopfes zu befestigen. Eine sechseckige Einbuchtung in Form einer Mutter wurde daher

ebenfalls in den palatinalen Bereich des Modells modelliert. Anschließend wurde das Modell als STL-Datei aus der Designsoftware exportiert.

3.2.1 Herstellungsverfahren mit 3D-Drucker

Nun folgte das Importieren der STL-Daten in die 3D-Drucksoftware (ideaMaker 4.2.0, Raise3D, Niederlande). Nach der Positionierung des Modells wurde eine Klempe um das Modell projiziert, um dem Lösen des Modells von der Bauplatzform entgegenzuwirken. Die Druckparameter waren eine Schichtdicke von 2 mm und eine Füllung von 50%, um eine cortical-spongiose Knochenarchitektur mit Härte D2 zu erhalten. Das verwendete Filament war ein Biopolymer-Filament (GreenTEC Pro, Extrudr, Österreich), welches zu einem Großteil aus Polylactid bestand (Abb. 2). Eine Anzahl von 36 Modellen wurde durch den 3D-Filamentdrucker (E2, Raise3D, Niederlande) additiv gefertigt. Dabei wurden bei jedem Bauzyklus zwei Modelle hergestellt.

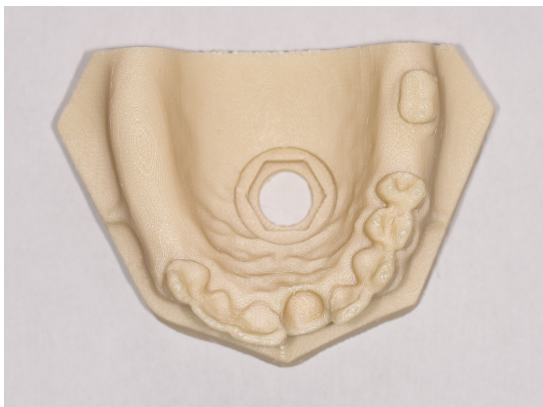


Abbildung 1: Kunststoff-Oberkiefermodell

3.2.2 Scann des gedruckten Modells

Um die zukünftigen Implantatpositionen digital planen zu können, wurde ein weiterer IOS des gedruckten Oberkiefermodells und eine DVT desselbigen angefertigt. Die DVT wurde mit einem 3D Accuitomo 170 Gerät (J. Morita Inc., Japan) zur Gewinnung eines DICOM-Datensatzes durchgeführt. Dabei wurden folgende Röntgenparameter 2mA, 63 kV, 0,16 x 0,16 x 0,16 mm Voxel-Größe und ein Field of view von 16 x 8 cm eingestellt. Da alle Modelle mit den gleichen Rohdaten und unter den gleichen Fertigungsparametern hergestellt wurden, war

der Autor der Ansicht, dass für die 35 weiteren Modelle die gleiche DICOM und STL-Datei genutzt werden kann.

3.2.3 Planung

Die digitale Planung der Implantatpositionen wurde mithilfe eines Computers durchgeführt, der über eine entsprechende Planungssoftware (coDiagnostiX, Dental Wings GmbH, Germany) verfügte. In die Software wurden die DICOM Daten der DVT und die STL-Daten des IOS¹ importiert. Anschließend wurden die beiden Datensätze mit der Matching-Funktion übereinandergelegt, damit sowohl die tieferliegenden als auch die oberflächlichen Strukturen des Modells exakt in der Planungssoftware simuliert erschienen (Abb. 3). Hieran schloss sich die Ausrichtung des Modells an der axialen, transversalen und sagittalen Ebene sowie die Einzeichnung einer Kurve, die den Verlauf des Zahnbogens wiedergeben sollte, an. Die Kurve kann dazu dienen, die Wax-up Aufstellung der Prothesenzähe zu erleichtern und ermöglicht die Rekonstruktion einer errechneten Panoramaschichtaufnahme. Die Wax-up Zähne wurden für die entsprechende Region ausgewählt und platziert. Dabei war es möglich, die Zähne in allen Raumrichtungen translatorisch als auch rotatorisch zu bewegen und eine Anpassung der Zahnlänge, -breite sowie -tiefe vorzunehmen. Somit konnte die optimale zukünftige prothetische Position des Zahnersatzes simuliert werden. Daraufhin folgte die Positionierung der Implantate in die Zahnlücken. In Regio 16, 24 und 26 wurden dabei Straumann SP/RT TLX 12 x 3,75 Implantate und in Regio 11, der ästhetischen Zone, ein Straumann RC BLX 10 x 3,75 Implantat (Basel, Schweiz) aus der Implantat-Bibliothek ausgewählt und in den multiplanaren Rekonstruktionsbildern des DVTs projiziert (Abb. 4). Anschließend wurden sie in die optimale dreidimensionale Position, im Einklang mit den prothetischen und biologischen Prinzipien, gestellt. Die digitale Planung der Implantatpositionen erfolgte durch JW, SF und LD¹, die für die Planung denselben Raum, Computer und dieselbe Software verwendeten. Als finale Planung wurde eine Mittelung der zuvor erstellten Planungen angefertigt. Die weiteren Arbeitsschritte, je nach statisch geführter oder dynamisch navigierter

¹ Hierbei handelt es sich um den Promotionsstudenten, sowie zwei erfahrene Chirurgen, die ebenfalls eine digitale Planung durchgeführt haben, um eine möglichst operatuerunabhängige Planung der Implantatpositionen zu erreichen.

Implantation, unterschiedenen sich leicht, daher wird auf die einzelnen Workflows gesondert eingegangen.

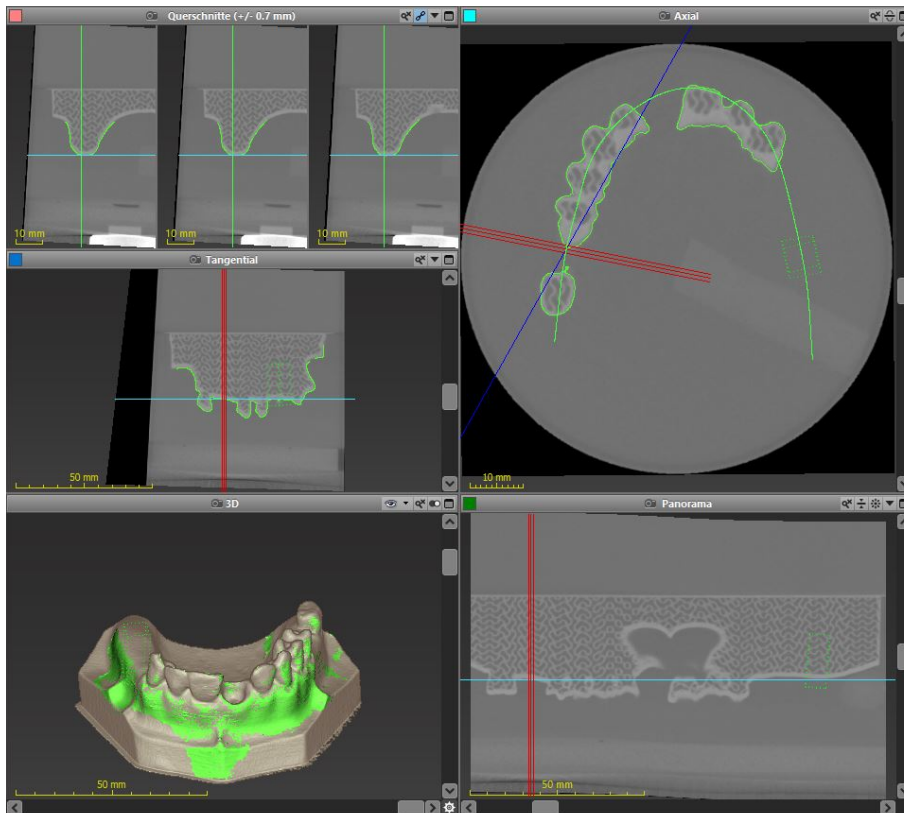


Abbildung 2: Gematchte DVT und IOS des Modells

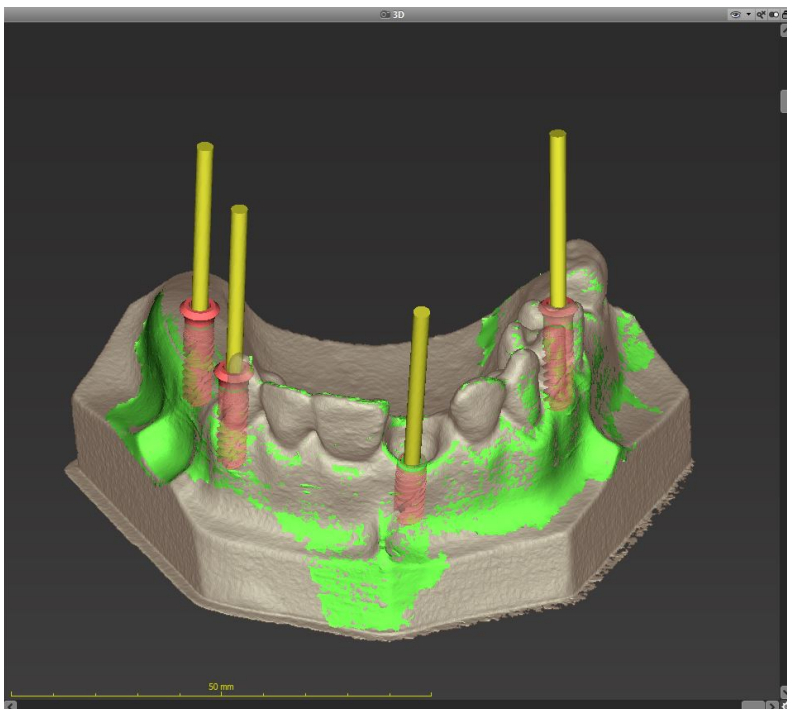


Abbildung 3: Virtuell geplante Implantatpositionen

3.2.4 Schablonendesign

3.2.4.1 Statisch geführte Implantation

Um die Schablone für die fully guided Implantation zu designen, war es notwendig, für die eingefügten Implantate jeweils ein Sleeve aus der Sleeve-Bibliothek auszuwählen. Hierbei konnten generische als auch präfabrizierte Sleeves zum Einsatz kommen, wobei letztere separat beim Hersteller bestellt und nach dem Drucken der Schablone in sie eingearbeitet werden mussten. Im Rahmen dieser Studie wurden präfabrizierte Sleeves (T-Sleeve, Straumann, Schweiz) aus PEEK (Polyether-ether-ketone) verwendet (Abb. 5). Die Distanz zwischen den Sleeves und Modelloberfläche betrug in Regio 16, 24 und 26 4 mm und in Regio 11 6 mm. Nach dem Auswählen der Sleeves und deren Distanz zum krestalen Knochen konnte mit dem Design der Schablone begonnen werden. Zuerst wurde die Einschubrichtung der Schablone festgelegt, die je nach Bedürfnis und Zahnstatus gewählt werden konnte. Im Fall dieser Studie wurde sie so definiert, dass alle vestibulären und palatinalen Flächen der verbleibenden Zähne oberhalb des prothetischen Äquators zu erkennen waren. Hieran schloss sich die Auswahl der Auflageflächen auf den Nachbarzähnen 17, 15, 14, 13, 12, 21, 22 und 23, die in Höhe und Breite so variiert wurden, dass die Zähne nahezu vollkommen von der Schablone bedeckt wurden, die angrenzenden Bereiche, wie die Schleimhaut, jedoch nicht. Um die Schablone leichter zuordnen zu können, gab es die Möglichkeit die Schablone mit einem Schriftzug zu markieren. Die Schablone, die im Rahmen dieser Studie verwendet wurde, erhielt die Markierung „I <3 MKG“, um nicht mit anderen Schablonen verwechselt zu werden. Die Stärke der Schablone betrug 2,7 mm und die Distanz zwischen IOS und der Schablone betrug 0,15 mm. Diese Parameter wurden gewählt, um eine stabile Schablone zu designen, die möglichst wenig Bewegungsspielraum hat (Abb. 6). Im Anschluss an den Designvorgang wurde eine STL-Datei erstellt und aus der Planungssoftware exportiert.

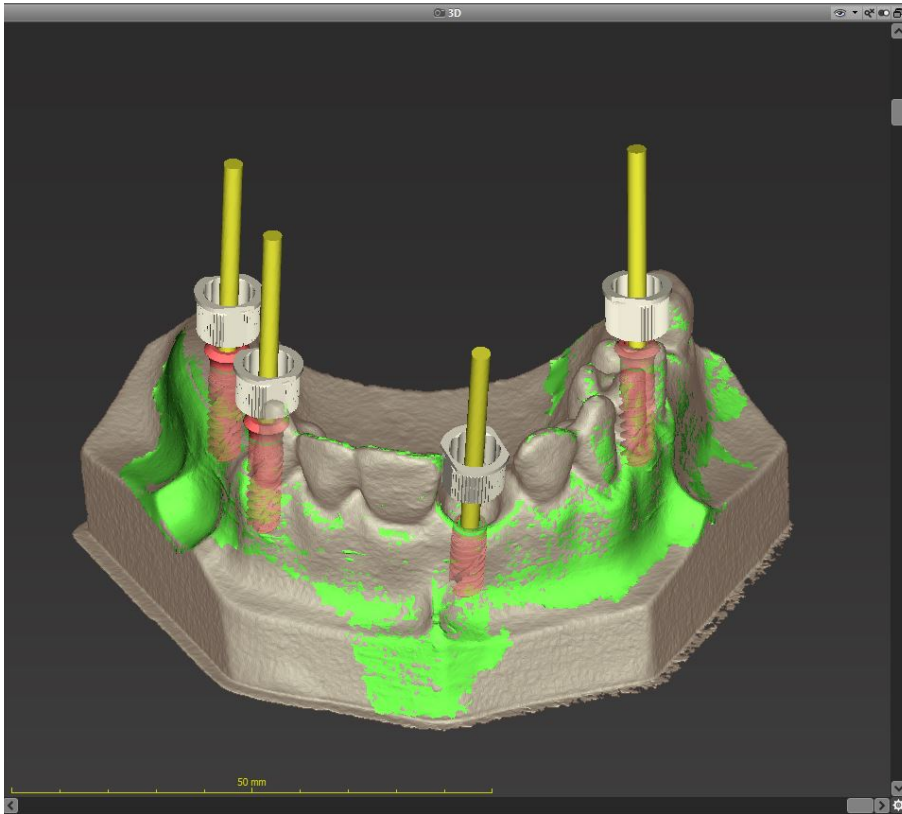


Abbildung 4: Virtuell geplante Implantatpositionen mit T-Sleeves

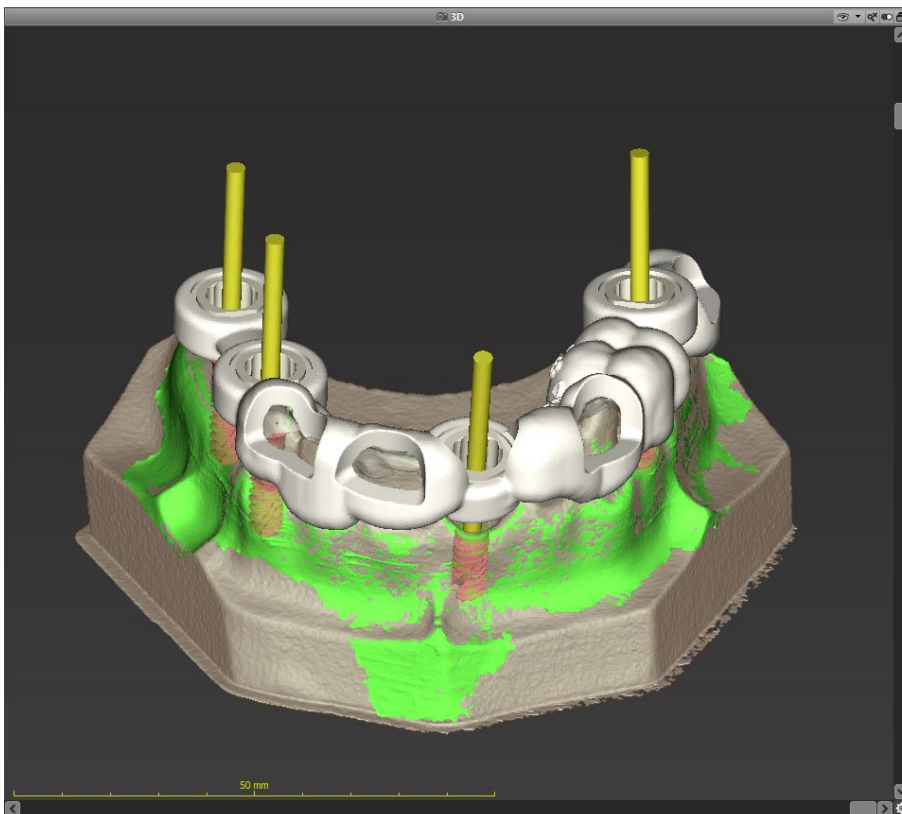


Abbildung 5: Virtuell geplante statische Bohrschablone inklusive T-Sleeves

3.2.4.2 Dynamisch navigierte Implantation

Zum Designen der Schablone für die dynamisch navigierte Implantation wurde die Einschubrichtung ähnlich gewählt wie bei der Schablone für die fully guided Implantation, jedoch etwas steiler, sodass die vestibuläre und palatinale Fläche der Zähne 21, 22, 23 gut zu erkennen waren. Die Auflageflächen wurden so gewählt, dass die Schablone diese Zähne umschloss. Das Markertray für die Befestigung des Referenzmarkers wurde in die Planungssoftware importiert, horizontal ausgerichtet und in Regio 23 vestibulär platziert. Im folgenden Schritt verschmolzen die Bohrschablone und das Markertray miteinander und bildeten ein einziges Objekt. Die Stärke der Schablone betrug 2,7 mm und die Distanz zwischen IOS und der Schablone war 0,15 mm, um eine stabile Schablone zu designen, die möglichst wenig Bewegungsspielraum aufweist (Abb. 7). Im Anschluss an den Designvorgang wurde eine STL-Datei der Schablone erstellt und aus der Planungssoftware exportiert. Vor dem 3D-Druck wurde die Schablone in eine 3D Designsoftware (PlastyCAD, 3DIEMME, Italien) importiert. Dort wurde sie auf ein optimales Maß zurechtgeschnitten (Abb. 8 und 9).

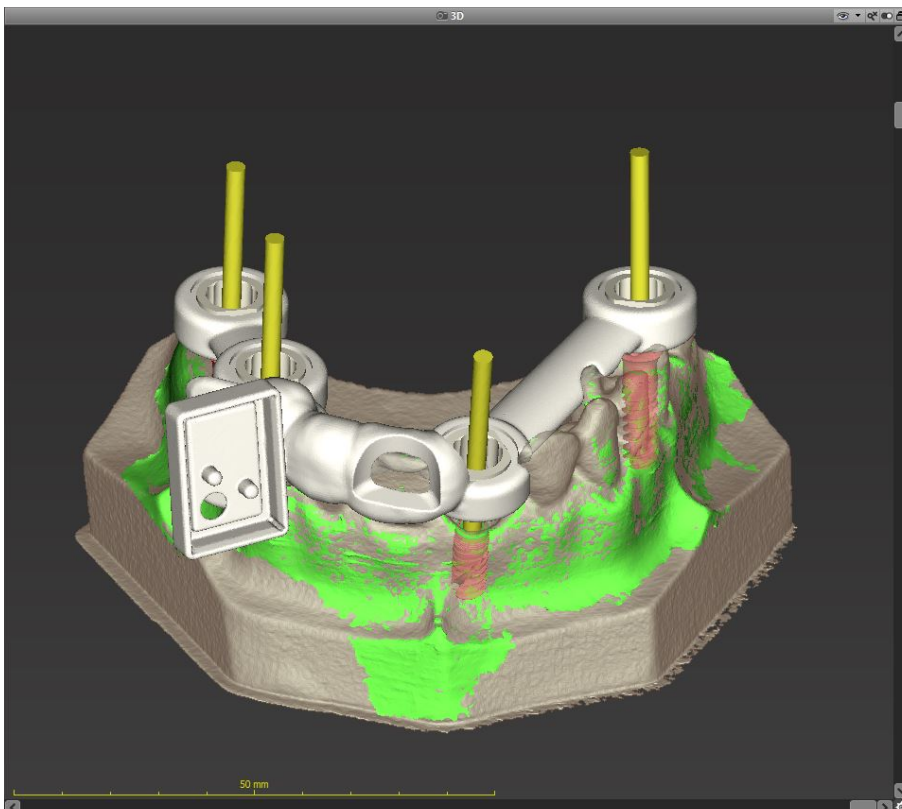


Abbildung 6: Unbeschnittene Bohrschablone für dynamisch navigierte Implantationen

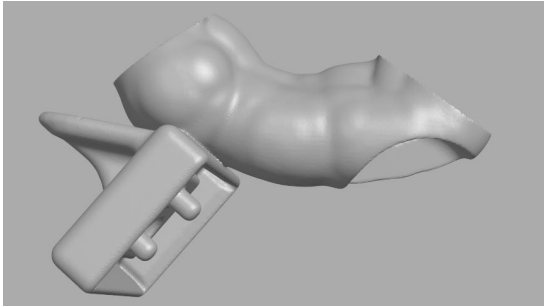


Abbildung 7: Beschnittene Bohrschablone für dynamisch navigierte Implantationen von okklusal

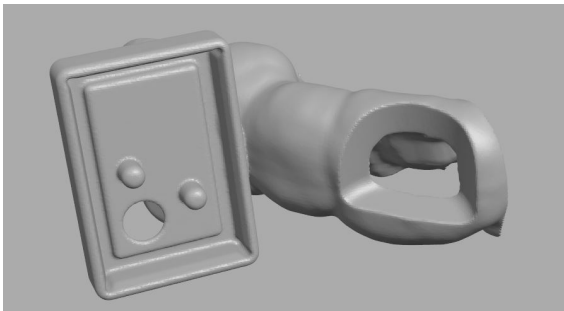


Abbildung 8: Beschnittene Bohrschablone für dynamisch navigierte Implantationen von vestibulär

3.2.5 3D-Druck

Die designten Schablonen wurden in die 3D-Druckersoftware für den 3D-Drucker importiert, um die Schablonen auf der Bauplattform auszurichten und die Supportstrukturen zu designen. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Supportstrukturen weder auf der Innenfläche der Schablone, dem Markertray oder im Bereich der Bohrhülsen waren, um weder die Genauigkeit noch die Passform der Schablone zu manipulieren. Anschließend wurde mit dem Druckvorgang begonnen und die statische Bohrschablone sowie die Schablone für die dynamische Navigation wurden vom PDL-3D-Drucker (SolFlex 170, VOCO, GmbH, Deutschland) unter Verwendung eines lichthärtenden Kunststoffes zur generativen Fertigung von dentalen Bohrschablonen (V-Print SG, VOCO GmbH, Deutschland) schichtweise hergestellt.

3.2.6 Nachbearbeitung

Die Nachbearbeitung der 3D-Druckobjekte beinhaltete das Reinigen mit Isopropanol, um überschüssiges, nicht ausgehärtetes Photopolymer von den 3D-Druckobjekten zu entfernen. Um die Druckobjekte in den finalen Festigkeitszustand zu überführen, wurden sie in einem

Lichtpolymerisationsgerät mit einer Wellenlänge von 405 nm zur Nachhärtung bestrahlt. Die Supportstrukturen wurden nach dem Lichthärten entfernt, um die Geometrie der Objekte nicht vor dem Lichthärten zu verändern, was zu einer erhöhten Ungenauigkeit der Schablone hätte führen können. Scharfe Kanten wurden geglättet und poliert, um das Handling zu vereinfachen. Bei der Bohrschablone für die statisch geführte Implantation wurden die vom Hersteller gefertigten PEEK Sleeves und bei der Schablone für die dynamische Navigation der Marker eingesetzt. Damit waren die Schablonen für die chirurgische Anwendung vorbereitet.

3.3 Durchführung der Implantationen

Die experimentelle in-vitro Studie wurde in der Klinik für Zahn-, Mund- und Kiefererkrankungen der Universitätsmedizin Mainz durchgeführt. Zweck dieser Untersuchung war es die freihand, statisch geführte und dynamisch navigierte Implantation miteinander zu vergleichen.

3.3.1 Vorbereitungen

Um die verschiedenen Implantationsmethoden miteinander zu vergleichen, wurde folgender Versuchsaufbau durchgeführt: In einem Raum mit Behandlungsstuhl wurde ein Phantomkopf (Frasaco AG-3, Frasaco, Deutschland) auf diesem befestigt. In den Phantomkopf konnten die Oberkiefermodelle eingesetzt und mit einer Schraube fixiert werden, zu diesem Zweck wurde eine Mutter (M6, Bauhaus, Deutschland) im palatinalen Bereich des Modells genutzt (Abb. 10). Als Motor für alle Implantationen wurde das Handstück des Navigationssystems (DENACAM, mininavident AG, Schweiz) verwendet, um den Vergleich zwischen den Aufbereitungsmethoden nicht zu beeinflussen. Bevor das Navigationssystem genutzt werden konnte, mussten die Informationen für die Modellgeometrie, die Position des Markers sowie der Implantate mit einem USB-Stick auf die Navigationssoftware transferiert werden. Bei den Methoden freihand und statisch geführte Implantation war das Navigationssystem im ausgeschalteten Zustand und lediglich der chirurgische Motor wurde aktiviert. Auf dem Nebentray am Kopfende des Behandlungsstuhls befanden sich die Bohrer, Löffel und eine mechanische Ratsche (VeloDrill,

Straumann, Schweiz), zum Einbringen der Implantate, sowie das Straumann RC BLX \varnothing 3,75 \times 10 mm und die drei Straumann SP/RT TLX \varnothing 3,75 \times 12 mm Implantate. Auf dem Haupttray lagen zudem zwei zahnärztliche Spiegel, eine Pinzette und eine PA-Sonde. An der Wand befanden sich ausgedruckte DIN-A4-Blätter, die jeweils die Implantatpositionen und -angulation eines jeden Implantats abbildeten, als auch das Bohrprotokoll wiedergaben. Je nach Aufbereitungsmethode befanden sich die notwendigen Hilfsmittel wie eine statische Bohrschablonen (Abb. 11), Schablone mit Markertray (Abb. 12) oder Kalibrierungshilfe auf dem Nebentray. Um die Modelle später pseudoanonymisiert auswerten zu können, wurden sie zuvor randomisiert den Teilnehmer*innen zugeordnet.

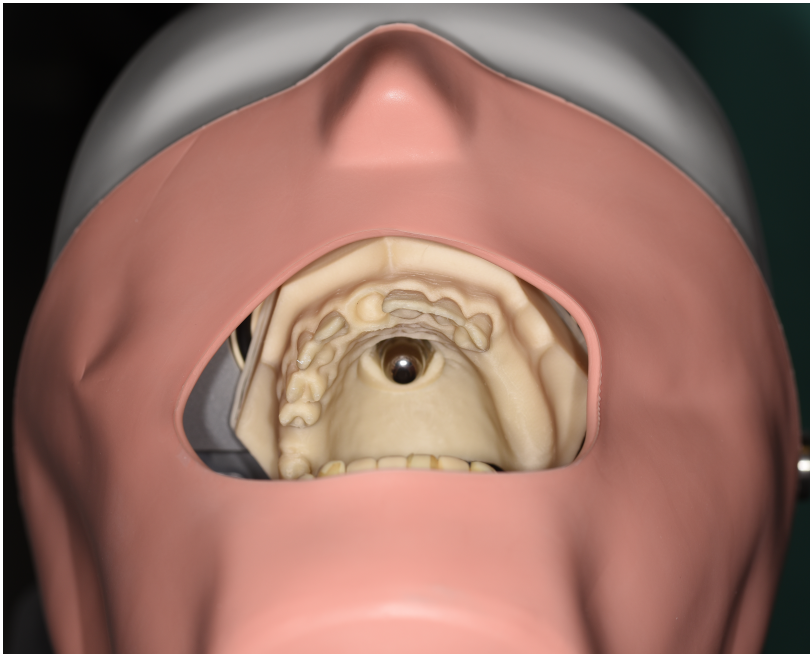


Abbildung 9: Kunststoff-Oberkiefermodell befestigt im Phantomkopf

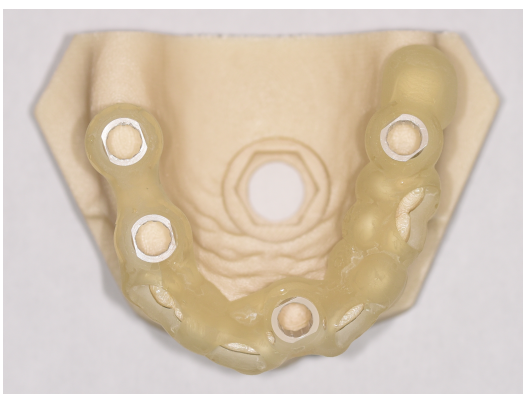


Abbildung 10: Kunststoff-Oberkiefermodell mit fully guided Bohrschablone inklusive Sleeves



Abbildung 11: Kunststoff-Oberkiefermodell mit Markertray-Bohrschablone inklusive Marker

3.3.2 BLX und TLX Implantate

Die Implantate der Bone level X (BLX) und Tissue level X (TLX) Reihe vom Hersteller Straumann repräsentieren, neben vielen weiteren Implantatherstellern, die „state of the art Implantate“, aufgrund des fortschrittlichen makroskopischen und mikroskopischen Implantatdesigns. Aus diesem Grund wurden die BLX und TLX Implantate für die Durchführung dieser Studie ausgewählt. Das BLX Implantat ist besonders für den ästhetischen Bereich, bei gutem, gingivalem Biotyp und bei maximaler Ausnutzung des vorhandenen Knochens geeignet. Die Geometrie des Implantats ist so gewählt, dass sie bei unterschiedlichen Knochenhärten zum Einsatz kommen kann und die Stabilität des Implantats im Knochen erhöht, insbesondere im kortikalen Bereich, in dem der Knochen sehr sensibel mit Resorption auf Reize reagiert. Das Hybriddesign mit parallelem Gewindeanteil im koronalen Bereich des Implantats und einem Taper in den apikalen 5 mm bringt den Vorteil einer erhöhten Flexibilität zwischen dem Bohren und Positionieren von parallelwandigen Implantaten sowie die erhöhte Primärstabilität von konischen Implantaten und die Möglichkeit, sie in suboptimalen Knochen zu inserieren (Knochendefekte, frische Extraktionsalveolen, ...).

Das TLX Implantat ist eine Kombination des Standardimplantats und BLX Implantats der Firma Straumann und weist dabei die gleiche Gewindestruktur wie das BLX Implantat auf (Abb.1). Der Unterschied zum BLX Implantat ist die koronale „Tulpe“, die das Implantat zu einem tissue level Implantat macht. Durch das integrierte Emergenzprofil kann die Störung des Weichgewebes reduziert

werden. Dieser Bereich weist eine glatte, maschinerte Schulter auf, die das Wundheilungsmanagement und den Erhalt des periimplantären Weichgewebes fördern soll (62).



Abbildung 12: BLX Implantat, TLX Implantat und Standardimplantat von links nach rechts, unten BLT Implantat {Straumann Group, 2021 #171}

3.3.2.1 Bohrprotokoll

Das Bohrprotokoll wurde nach der Planung der Implantatpositionen automatisch von der Planungssoftware generiert. Jeweils eine DIN A4 Seite gab die Position eines jeden Implantates in axialer, transversaler und sagittaler Ebene wieder sowie eine dreidimensionale Projektion (Abb. 13). Daraus konnte diese sowie die Angulation der Implantate erkannt werden. Zudem gab es ein Protokoll dafür, in welcher Reihenfolge die Bohrer und Löffel (für die fully guided Implantation) zu verwenden sind (Abb. 14). Die Anzahl der Striche gab an, welche Länge der Bohrer haben sollte. Die Farbe und Spalte gaben den Durchmesser des Bohrers an und die Punkte den zu verwendenden Löffel. Bei hartem Knochen (D1) war

ein anderes Protokoll zu beachten als bei mittelhartem Knochen (D2 - D3) oder weichem Knochen (D4). Diese Angaben fanden sich in der Spalte ganz links und mussten durch den Chirurgen nach subjektivem Empfinden interpretiert und angewendet werden.

coDiagnostiX		Patientendaten		dental wings	
Version 10.6		Name: Schablonen-Studie			
Lizenziert für: 14359907		Geburtsdatum: 01.01.2022			
SC6-IT Matrix42 Softwarevert...		Patienten-ID: 123456			

Implantatdetails		FDI-Schema (World Dental Federation)	
Plan: Position:	Kopie mini navident 16		
Hülse Straumann Self-locking T-sleeve, PEEK			
Artikelnummer:	034.299V4		
Hülsenlänge:	5.00 mm		
Durchmesser:	5.00 mm		
Implantat Straumann Tissue Level X Standard Plus Roxolid® SLActive® (RT) (RT)			
Artikelnummer:	035.3112S		
Länge:	12.00 mm		
Durchmesser 1:	3.75 mm		
Durchmesser 2:	3.50 mm		
Chirurgisches Protokoll			
Hülsenposition:	H4 (4 mm)		
Bohrerlänge:	≡ lang		
Bohrlöföfel:	●●● +3 mm		
Planfräser:	3.5 mm		

Hinweis: Dieses Protokoll stützt sich auf die von Dental Wings bereitgestellten Daten. Die Dental Wings GmbH, die für die Produktion des Protokolls verantwortlich ist, übernimmt keine Haftung für Schäden, die aus der Verwendung dieses Protokolls resultieren. Dieses Protokoll ist nur für die Dokumentation bestimmt. Die Bilder dürfen nicht für die Druckproduktion verwendet werden. Copyright © 2022, Dental Wings GmbH. Alle Rechte vorbehalten.

Abbildung 13: Chirurgisches Protokoll für die Implantation in Regio 16

coDiagnostiX		Patientendaten		dental wings											
Version 10.6		Name: Schablonen-Studie													
Lizenziert für: 14359907		Geburtsdatum: 01.01.2022													
SC6-IT Matrix42 Softwarevert...		Patienten-ID: 123456													
Kopie mini navident												Chirurgisches Protokoll		FDI-Schema (World Dental Federation)	
Straumann VeloDrill Guided Surgery															
Position	Planfräser	ø2.2 X VeloDrill	Knochendichte	ø2.8 X VeloDrill	ø3.2 X VeloDrill	ø3.5 X VeloDrill	ø3.7 X VeloDrill	ø4.2 X VeloDrill	ø4.7 X VeloDrill	ø5.2 X VeloDrill	ø6.2 X VeloDrill	Implantat	Tiefenstopp		
16	ø 3.5		weich/D4 mittel/D2-D3 hart/D1									035.31125 TLX RT ø 3.75 12 mm SLActive	H4		
11	ø 3.5		weich/D4 mittel/D2-D3 hart/D1									061.4310 BLX RB ø 3.75 10 mm SLActive	H6		
24	ø 3.5		weich/D4 mittel/D2-D3 hart/D1									035.31125 TLX RT ø 3.75 12 mm SLActive	H4		
26	ø 3.5		weich/D4 mittel/D2-D3 hart/D1									035.31125 TLX RT ø 3.75 12 mm SLActive	H4		

Koronale Erweiterung: Verwenden Sie den Bohrer für eine Tiefe von 4 mm (für Implantate der Länge 6 mm und 8 mm) oder 6 mm (für Implantate der Länge 10 mm und länger), um nur den koronalen Durchmesser des Implantatbets zu erweitern.
 Use profile drill if inserting Straumann® TLX implant deeper on implant shoulder. Use TLX RT profile drill for implant RT Ø 3.75/Ø 4.8. Use TLX WT profile drill for implant WT Ø 5.5/Ø 6.5. Profile drill is not needed for TLX NT implants.

Haftungswaechsel: Dieses Protokoll stützt sich auf die vom Nutzer der coDiagnostiX Software in die coDiagnostiX Software eingegebenen Daten. Daher ist der Nutzer für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Signatur aller eingegebenen Daten alleine verantwortlich. Dieses Protokoll ersetzt nicht die Beurteilung und Dokumentation des individuellen Falles durch einen angestammten Spezialisten. Die Dental Wings GmbH, die für die funktionale Übertragung und andere instrumentelle/strukturelle jeglicher Art, ausdrücklich oder stillschweigend, bereit stellen, stellt für die daraus, insbesondere durch jeglichen anderen Stellen, die in Zusammenhang mit diesem Protokoll, mit Fehlern in der professionellen Beurteilung oder mit Fehlen oder Unvollständigkeiten bei der Datenangabe in der coDiagnostiX Software resultieren, keine Haftung für Schäden aus, die im Zusammenhang mit oder infolge der Anwendung von Produkten von Dental Wings entstehen können.

Gedruckt: 2022-08-20 09:29
Copyright © 2022, Dental Wings GmbH. Alle Rechte vorbehalten.

Abbildung 14: Bohrprotokoll für die Implantationen

3.3.2.2 Randomisierung

Die Oberkiefer-Kunststoff-Modelle dieser Studie wurden randomisiert den Teilnehmer*innen zugeordnet, um die Implantatpositionen unvoreingenommen analysieren zu können. Hierzu wurden 36 Karten mit den Zahlen von 1 bis 36 in einen Lostopf gegeben, aus dem die Teilnehmer*innen jeweils drei Karten zogen. Die Zahlen wurden auf die Unterseite der Modelle geschrieben und in einer Tabelle eingetragen. Die Tabelle beinhaltete die Informationen, welche*r Teilnehmer*in in welches Modell implantiert hatte und welche Aufbereitungsmethode dabei zur Anwendung kam. Die Tabelle wurde nach der Analyse der Implantatpositionen und deren Abweichungen zur präoperativen Planung entblindet.

3.3.3 Durchführung der Implantationen

Die Implantationen wurden von 12 Teilnehmer*innen durchgeführt, die einer von zwei Gruppen angehörten. Die erste Gruppe bestand aus Chirurgen mit einem

großen Erfahrungshorizont (mind. 5 Jahre) in der Implantologie, wobei die zweite Gruppe aus Studierenden bestand, die keine praktische Erfahrungen in der Implantologie hatten. Zur Gruppe der Chirurgen gehörten BA, KS, ES, LD, SF und MG. Studentische Teilnehmende an der Studie waren AS, LW, EK, GK, VB und JW. In einer wiederkehrenden Reihenfolge wurden die Implantate zuerst in Regio 16 und anschließend in Region 11, 24 und 26 inseriert. Als erste Methode wurde freihand ausgewählt, da die dreidimensionale Ausrichtung der Implantate nach Möglichkeit nicht durch vorherige Methoden beeinflusst werden sollte (Abb. 15). Daraufhin folgte die statisch geführte, gefolgt von der dynamisch navigierten Implantation. Je Modell wurde eine Einbringmethode angewendet, mit der vier Implantate inseriert wurden. Bei vier Implantaten pro Model und drei Modellen je Teilnehmer*in wurden insgesamt 144 Implantate inseriert. Die Maximalgeschwindigkeit des Bohrers für die Aufbereitung betrug 1200 Rotationen pro Minute. Nach dem Aufbereiten des Implantatbetts wurden die Implantate manuell, den Herstellerangaben folgend, inseriert (Abb. 16 und 17). Während der Implantationen wurde für jedes einzelne Implantat die nötige Zeit gemessen und in eine Excel-Tabelle (Excel, Microsoft Corporation, USA) eingetragen.

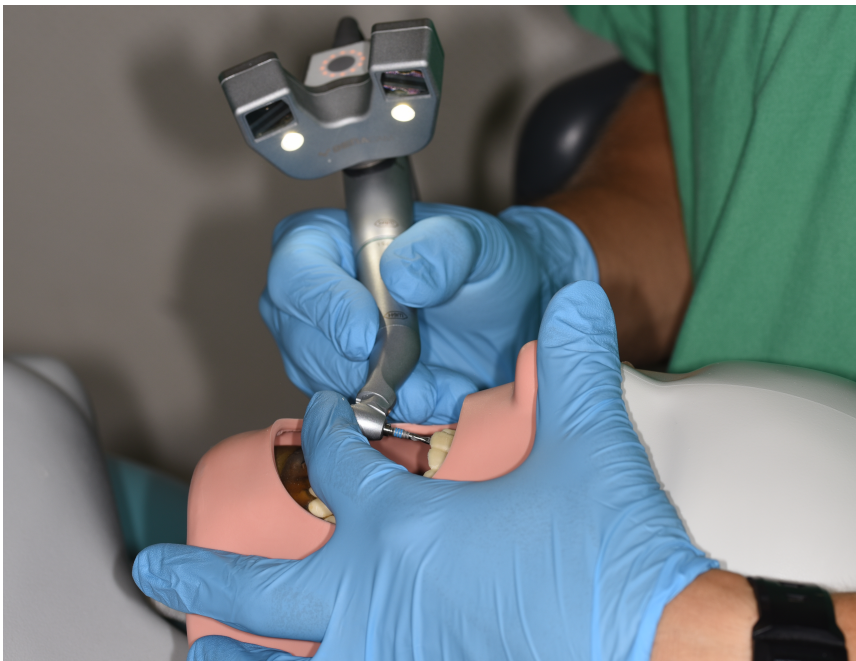


Abbildung 15: Aufbereitung des Bohrstollens



Abbildung 16: Manuelles Einbringen des Implantats (Teil 1)



Abbildung 17: Manuelles Einbringen des Implantats mit Ratsche (Teil 2)

3.3.4 Freihand Implantation

Die ersten vier Implantate wurden von den Teilnehmer*innen freihand implantiert (Abb. 18). Die Anweisungen für die Implantatposition konnten die Teilnehmer*innen aus dem chirurgischen Protokoll entnehmen, das durch die Planungssoftware generiert wurde. Außerdem wurde den Operateur*innen mitgeteilt, wie weit die Implantate in Regio 24 und 26 vom Zahn 23 entfernt sein sollten. Um die Länge zu messen, durfte eine PA-Sonde genutzt werden. Nach der freihand Aufbereitung, die den Angaben des Bohrprotokolls folgte, wurden die Implantate manuell mit Hilfe einer Ratsche inseriert.



Abbildung 18: Freihand Aufbereitung des Bohrstollens

3.3.5 Statische fully guided Implantation

Nach der Implantatplanung, dem Designen, Drucken und Nachbearbeiten der Bohrschablone mit den zuvor erwähnten Geräten konnte mit der fully guided Implantation begonnen werden. Am Anfang wurde kontrolliert, ob die Schablone gut auf das Modell passt, was auf jedes Modell zutraf. Die einzelnen Implantate hatte ihre eigenen Perforationen in der Schablone, die 4 mm (Regio 16, 24 und 26) oder 6 mm (Regio 11) von der Modelloberfläche entfernt waren. Für die fully guided Implantation war das Bohrprotokoll von besonderer Bedeutung, da auf diesem die Informationen für die korrekte Reihenfolge und Länge der Bohrer als auch die Löffel mit unterschiedlichen Durchmessern zu finden waren. Jeder Bohrer benötigte einen dazu passenden Löffel mit der korrekten Längeninformation (Abb. 19). Bei exakter Umsetzung des Bohrprotokolls konnten die Bohrer so tief inseriert werden, bis ein erhöhter Widerstand zu spüren war. Nach dem Bohrprozess wurden die Implantate manuell inseriert.



Abbildung 19: Statisch geführte Aufbereitung des Bohrstollens

3.3.6 Dynamisch navigierte Implantation

Mit dem real-time Navigationssystem DENACAM, einem computergestützten chirurgischen Assistenten, der nach dem Prinzip der Stereotriangulation durch optische Kameras funktioniert, wurden die dynamischen Implantationen durchgeführt. Nach dem Auswählen des Studienmodells in der Datenbank der importierten Fälle war das Oberkiefermodell auf dem Bildschirm zu sehen. Bevor der Bohrer genutzt werden konnte, musste er samt Handstück kalibriert werden, was mit einem Referenzobjekt des Herstellers möglich war. Dabei wurde die Richtung gemessen, in welche das Winkelstück zum Bezugspunkt der Kamera anguliert war, ebenso die Länge und Breite des Bohrers. Entsprechend der Herstellerangaben mussten nach jedem Wechsel die Bohrer erneut kalibriert werden. Nach dem Kalibrierungsvorgang war das Kamerasystem bereit, den Marker zu detektieren, um die Echtzeit-Position des Bohrers zu messen und auf dem Bildschirm, der mit dem Kamerasystem verbunden war, wiederzugeben. Die Position des Bohrers wurde in transversaler und sagittaler Ebene wiedergegeben. Zudem wurde von okklusal angezeigt, in welche Richtung und wie weit der Bohrer von der zukünftigen Implantatposition entfernt war. Zusätzlich wurde angegeben, um wieviel Grad die momentane Bohrerachse von der geplanten Implantatachse abweicht. Außerdem gab es eine Anzeige für die Insertionstiefe des Bohrers (Abb. 21). Vor dem Bohren wurde geprüft, ob der

Marker in seiner richtigen Position innerhalb des Markertrays war und ob die Schablone gut auf die Zähne des Modells passte (Abb. 20). Während des Bohrprozesses war es wichtig, dass weder Finger noch die Gingivamaske des Phantomkopfes zwischen der Kamera am Bohrer und dem Marker in der Schablone war. Die Reihenfolge der Bohrer wurde, wie im Bohrprotokoll angegeben, strikt befolgt. Im Anschluss an den Bohrvorgang wurden die Implantate manuell inseriert.

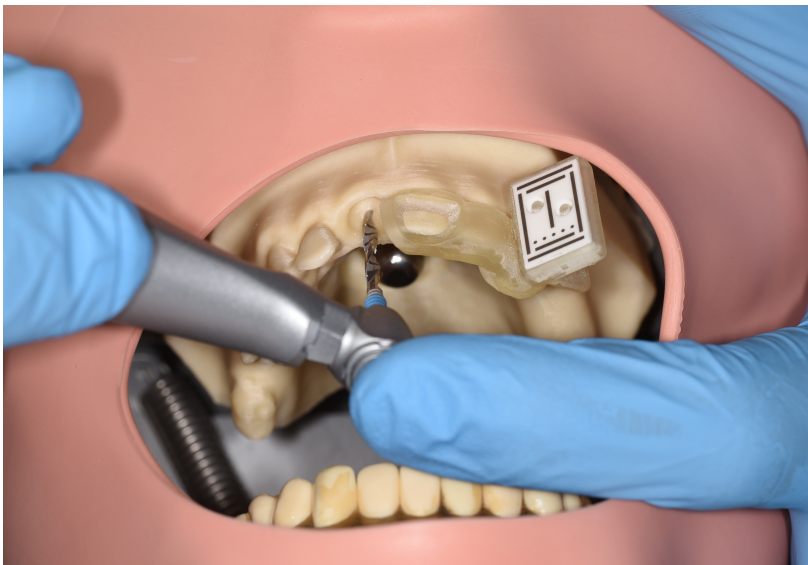


Abbildung 20: Dynamisch navigierte Aufbereitung des Bohrstollens

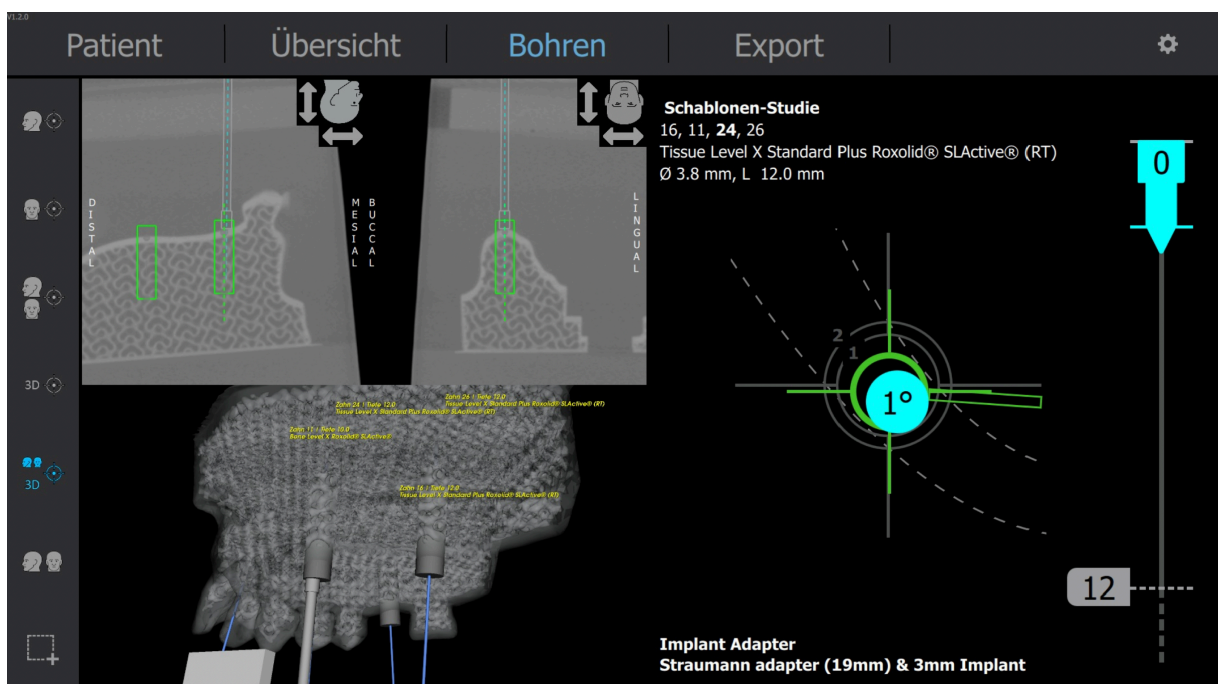


Abbildung 21: Bildschirmanzeige des DENACAM chirurgischen Assistenten

3.4 Teilnehmerbefragung

Im Anschluss an die Studie wurden die Teilnehmer*innen gebeten einen statistischen Fragebogen anonymisiert auszufüllen. Themenbereiche des Fragebogens waren der chirurgische Erfahrungsstand, Berührungspunkte mit den Aufbereitungsmethoden der vorliegenden Studie sowie das subjektive Empfinden während den unterschiedlichen Bohrvorgängen. Dazu wurden sie zu ihrer empfundenen Selbstsicherheit, Flexibilität, Aufmerksamkeit und Genauigkeit während der Aufbereitung befragt. Außerdem wurde erhoben, mit welcher Wahrscheinlichkeit sie zukünftig auf die durchgeführten Aufbereitungsmethoden zurückgreifen würden. Alle Fragen im Rahmen des Fragebogens wurden in der gleichen Reihenfolge gestellt. Bei den Fragen zu den Themen Erfahrungsstand, Berührungspunkte mit den jeweiligen Aufbereitungsmethoden und Geschlecht gab es verschiedene Antwortmöglichkeiten, aus denen die Teilnehmer wählen konnten. Die Befragung zum subjektiven Empfinden während der unterschiedlichen Bohrvorgänge konnten die Teilnehmer auf einer fünfstufigen Skala von 0 bis 5 zwischen einer bejahenden und einer verneinenden Aussage eine differenzierte Antwort geben. Für diese Befragung wurde ein online-Befragungstool (Google Forms, Google Inc., USA) verwendet. Da es bisher keinen standardisierten Fragebogen zu den Forschungsfragen dieser Forschungsarbeit gab, wurde ein individualisierter Fragebogen entwickelt und angewendet (der Umfragebogen befindet sich im Anhang).

3.5 Digitale Datenerhebung

Um die Genauigkeit der inserierten Implantate analysieren zu können, wurden nach den Implantationen Scanbodies (CARES®, Straumann®, Schweiz) auf den Implantaten verschraubt (Abb. 22 und 23). Von jedem Modell wurde mit dem Intraoralscanner (TRIOS 4, 3Shape, Dänemark) ein digitaler Abdruck angefertigt (Abb. 24 und 25). Dabei wurden dieselben Scanparameter genutzt wie bei dem initialen Scan des Modells. Die neu generierten STL-Daten wurden vom Intraoralscanner in die Planungssoftware (coDiagnostiX, Dental Wings GmbH, Deutschland) transferiert und mit dem initialen Scan des Modells gematcht. Anschließend wurde das Behandlungsauswertungs-Tool der Planungssoftware

geöffnet. Mit diesem wurden die implantatgestützten Scanbodies als solche erkannt und durch den interaktiv nächsten Punkt-Algorithmus automatisch mit der am deckungsgleichen Oberfläche gematcht. Im Fall, dass einer oder mehrere Scanbodies nicht erkannt werden konnten, wurde ein neuer Scan angefertigt. Nach dem erfolgreichen Detektieren der Scanbodies wurden die entsprechenden Implantate in ihrer entsprechenden Position in das 3D-Modell projiziert. Nun konnten die realen Implantatpositionen mit den zuvor geplanten miteinander verglichen werden (Abb. 26 bis 28). Die Abweichungen zwischen realer und geplanter Implantatposition wurden automatisch kalkuliert. Die berechneten Parameter waren die Abweichungen der Implantatschulter und des -apex in Millimeter sowohl in mesio-distaler, oro-vestibulärer und vertikaler Richtung. Daraus wurden die globalen dreidimensionalen Abweichungen berechnet. Zudem wurde die Abweichung der Angulation in Grad gemessen. Diese Angaben wurden für jedes einzelne Implantat generiert. Der Vorgang wurde für alle 36 Modelle wiederholt und die gewonnenen Werte wurden in eine Excel-Tabelle übertragen. Im Anschluss an die Auswertung aller Modelle wurde die Pseudonymisierung entblindet. Damit konnte die Excel-Tabelle um die Zeit und die verwendete Aufbereitungsmethode der einzelnen Teilnehmer*innen ergänzt werden.



Abbildung 22: Kunststoff-Oberkiefermodell mit inserierten Implantaten



Abbildung 23: Kunststoff-Oberkiefermodell mit Scannbodies auf den inserierten Implantaten



Abbildung 24: Scann der Kunststoff-Oberkiefermodell mit Scannbodys auf den inserierten Implantaten

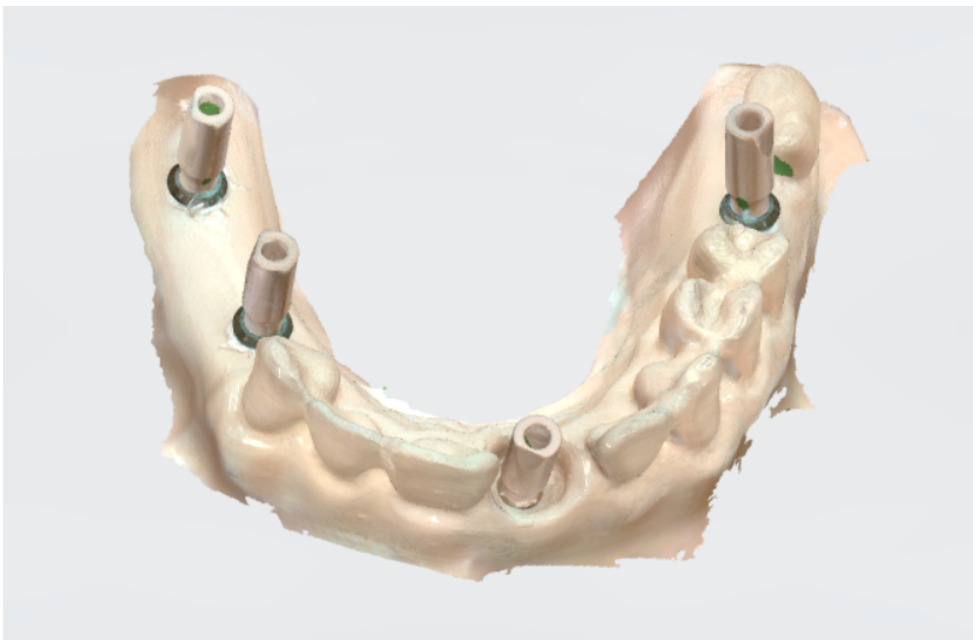


Abbildung 25: STL-Daten des Kunststoff-Oberkiefermodell mit Scannbodys

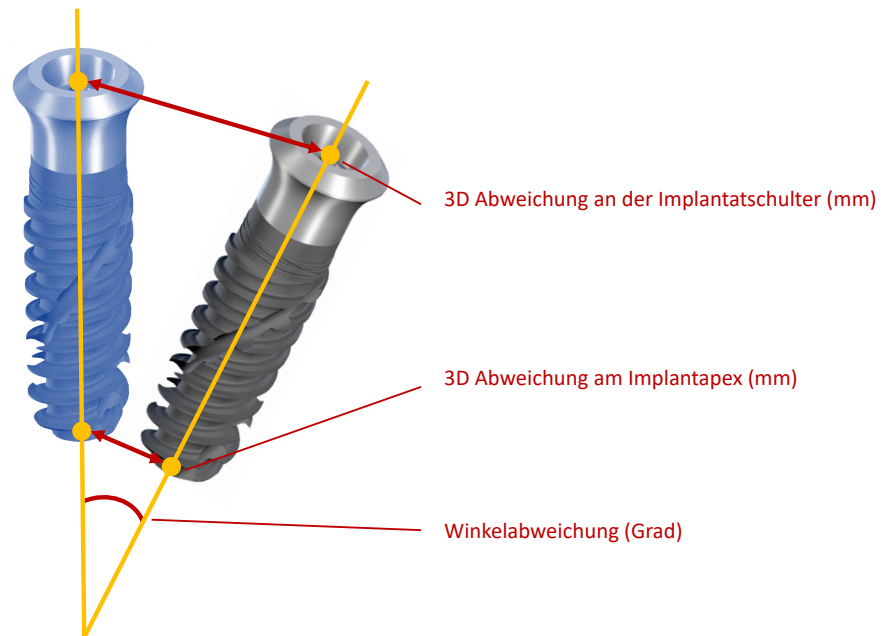


Abbildung 26: Gezeichneter Vergleich der geplanten und endgültigen Implantatposition des Winkels, der 3D Abweichung an Plattform und Apex in mm. Das blaue Implantat stellt die digital geplante Position und das graue Implantat die endgültige Implantatposition dar. Die gelben Punkte bilden die Mitte von Apex und Plattform ab, während die Linie die Achse des Implantats anzeigt.

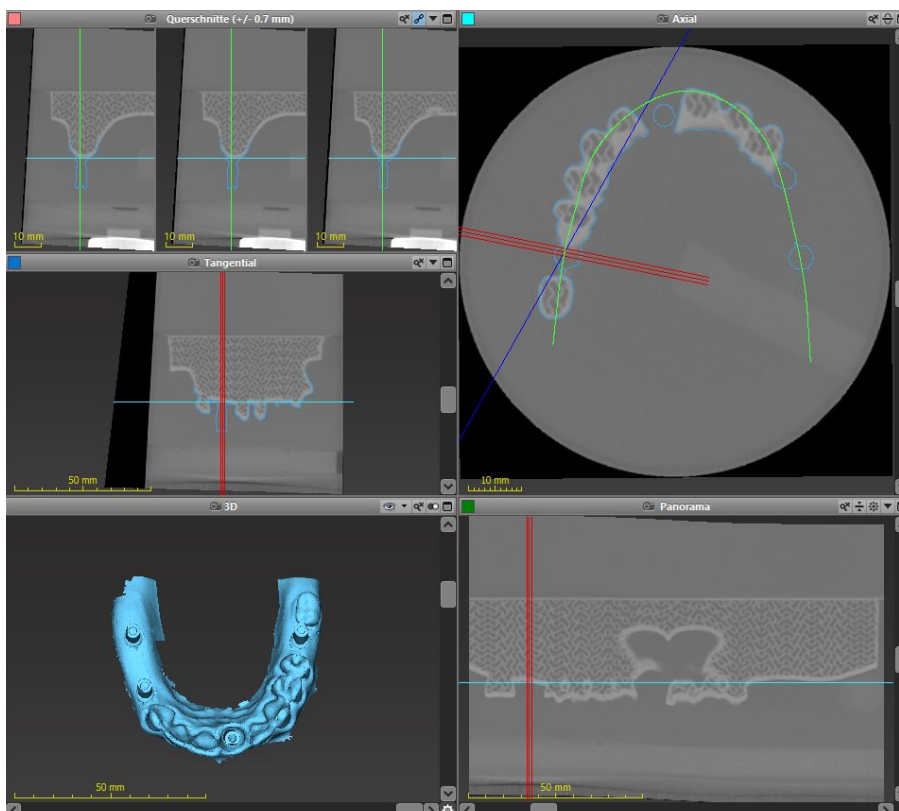


Abbildung 27: Gematchte STL-Daten des Kunststoff-Oberkiefermodell mit Scannbodies

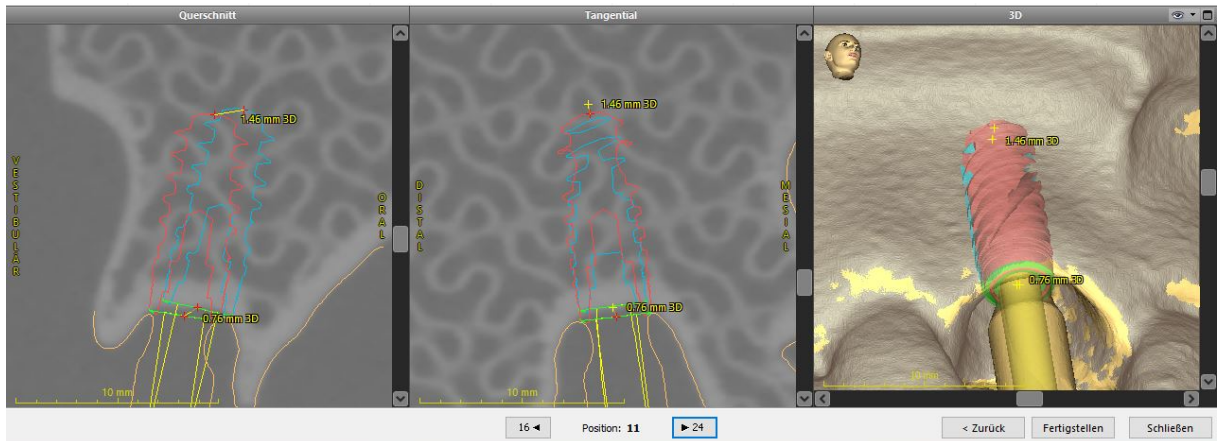


Abbildung 28: Analyse der Implantatabweichung mittels Behandlungsauswertung

3.6 Statistische Auswertung

Die statistische Analyse wurde mit der Software SPSS 27.0 durchgeführt. Die Operationszeit der verschiedenen Gruppen, Erfahrungen der Teilnehmer*innen und Einbringmethode wurden mit einer ANOVA verglichen, gefolgt von einem Scheffe-Post-Hoc-Test. Ebenso wurde mit den koronalen, apikalen und angulären Abweichungen insgesamt und den verschiedenen Positionen verfahren. P-Werte von $< 0,05$ wurden als statistisch signifikant definiert.² Die Auswertung des Fragebogens erfolgte ebenso mit der Software SPSS 27.0. Die Lernkurven wurden durch linear gemischte Modelle und eine Kenward-Roger-Approximation analysiert.

² Bei der statistischen Auswertung war ein Mitarbeiter vom Institut für medizinische Biometrie, Epidemiologie und Informatik Klinik der Gutenberg-Universität Mainz unterstützend tätig.

4 Ergebnisse

In die 36 Modelle wurden jeweils vier Implantate inseriert, eine Anzahl von insgesamt 144 Implantaten wurden nach den drei verschiedenen Aufbereitungsmethoden manuell inseriert. Die Implantate wurden in Einzelzahn­lücken in Regio 16 und 11 sowie der verkürzten Zahnreihe im zweiten Quadranten in Regio 24 und 26 platziert. Jeweils sechs Chirurgen mit weitem Erfahrungshorizont und sechs Studierende ohne eigene praktische Erfahrungen in der Implantologie führten die Implantationen durch. Alle angestrebten Messungen konnten an den Modellen durchgeführt werden. Die Ergebnisse der einzelnen Gruppen sind in den untenstehenden Tabellen zu finden. Im Folgenden gehe ich näher auf die Ergebnisse ein. Dabei werden in dem Kapitel 4.1 die drei Aufbereitungsmethoden miteinander verglichen, als erstes unabhängig von der implantologischen Vorerfahrung und später mit Berücksichtigung der praktischen Erfahrung. In Kapitel 4.2 wird näher auf die Performance-Unterschiede zwischen den Studierenden und Chirurgen eingegangen. Kapitel 4.3 befasst sich mit dem Einfluss der Implantatregion auf die Genauigkeit der Implantatposition. Die Lernkurve der Teilnehmer*innen wird in Kapitel 4.4 dargestellt. Im letzten Abschnitt des Ergebnisteils befinden sich die Ergebnisse der subjektiven Befragung der Teilnehmer*innen.

4.1 Implantationsmethoden

4.1.1 Alle Teilnehmer*innen

Die statistische Analyse zeigte, dass signifikante Unterschiede zwischen den Aufbereitungsmethoden, unabhängig von dem Kenntnisstand, zu ermitteln waren (Tab. 1). Statisch geführte Implantatpositionen waren gegenüber freihand signifikant genauer in der Winkelgenauigkeit ($2,66 \pm 1,77^\circ$ und $6,67 \pm 3,70^\circ$) ($p < ,001$), der globalen Abweichung der Implantatschulter ($0,67 \pm 0,32$ mm und $1,31 \pm 0,88$ mm) ($p < ,001$), als auch am Implantatapex ($1,00 \pm 0,39$ mm und $1,75 \pm 0,9$ mm) ($p < ,001$). Kein signifikanter Unterschied konnte zwischen den Operationszeiten während der beiden Methoden festgestellt werden ($2:55 \pm 1:12$ min und $3:15 \pm 1:21$ min) ($p = ,608$).

Signifikante Unterschiede wurden zwischen dynamisch navigierten und freihand Implantationen in den Parametern Winkelgenauigkeit ($3,20 \pm 2,16^\circ$ und $6,67 \pm 3,70^\circ$) ($p = ,002$), globaler Abweichung des Implantatapex ($1,23 \pm 0,58$ mm und $1,75 \pm 0,90$ mm) ($p = ,043$) und der Operationszeit ($4:27 \pm 2:04$ min und $3:15$ min) ($p = ,016$) gefunden. Kein signifikanter Unterschied wurde zwischen der globalen Abweichung der Implantatschulter zwischen den zwei Methoden ($1,14 \pm 0,70$ mm und $1,31 \pm 0,88$ mm) ($p = ,466$) festgestellt.

Der Vergleich zwischen den beiden computergestützten Methoden zeigte, dass statisch geführte Implantationen signifikant niedrigere Werte in den Parametern globale Abweichungen an der Implantatschulter ($0,67 \pm 0,32$ mm und $1,14 \pm 0,70$ mm) ($p = ,004$) und der Operationszeit ($2:55 \pm 1:12$ min und $4:27 \pm 2:04$ min) ($p < ,001$) aufwiesen als dynamisch navigierte. Die Winkelabweichung ($2,66 \pm 1,77^\circ$ und $3,20 \pm 2,16^\circ$) ($p = ,608$) und die Abweichung des Implantatapex ($1,00 \pm 0,39$ mm und $1,23 \pm 0,58$ mm) ($p = ,245$) zeigten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Aufbereitungsmethoden (Abb. 29 bis 38)³.

Tabelle 1: Abweichungen der Implantatpositionen und Operationszeiten aller Teilnehmer*innen, aufgeteilt anhand der Aufbereitungsmethode SD: Standardabweichung

	freihand		statisch		dynamisch		ANOVA
	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD	p-Wert
Winkelabweichung (°)	6,67	3,70	2,66	1,77	3,20	2,16	< 0,001
Globale Abweichung Schulter (mm)	1,31	0,88	0,67	0,32	1,14	0,70	< 0,001
Globale Abweichung Apex (mm)	1,75	0,90	1,00	0,39	1,23	0,58	< 0,001
Operationszeit (min)	3:15	1:21	2:55	1:12	4:27	2:04	< 0,001

³ Beim Plotten der Grafiken war Jonas Paulus (B.Sc. in Physik) unterstützend tätig.

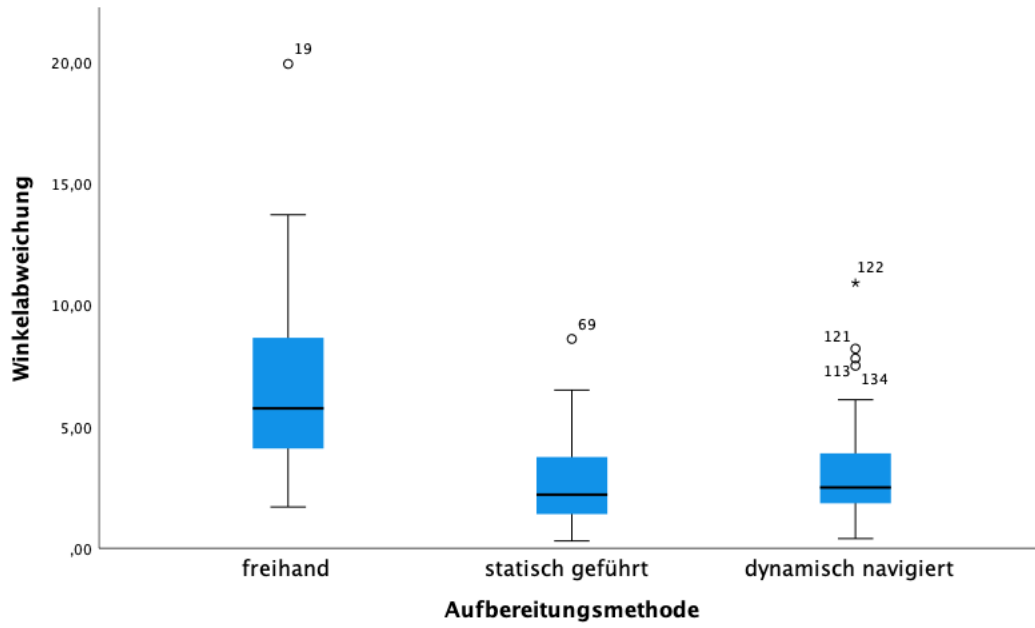


Abbildung 29: Einfacher Boxplot der Winkelabweichung

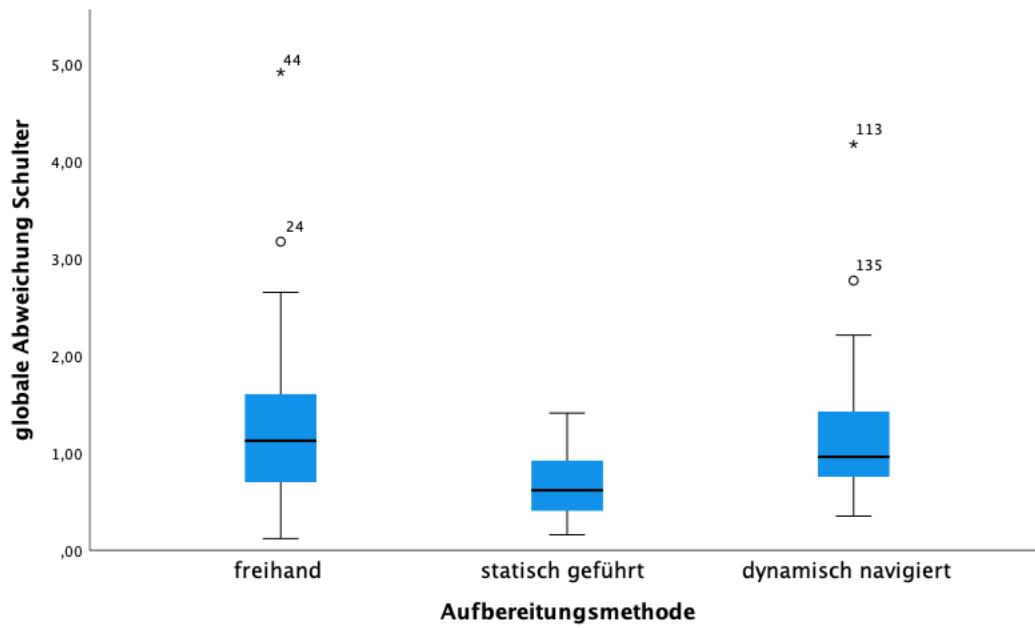


Abbildung 30: Einfacher Boxplot der globalen Abweichung an der Implantatschulter

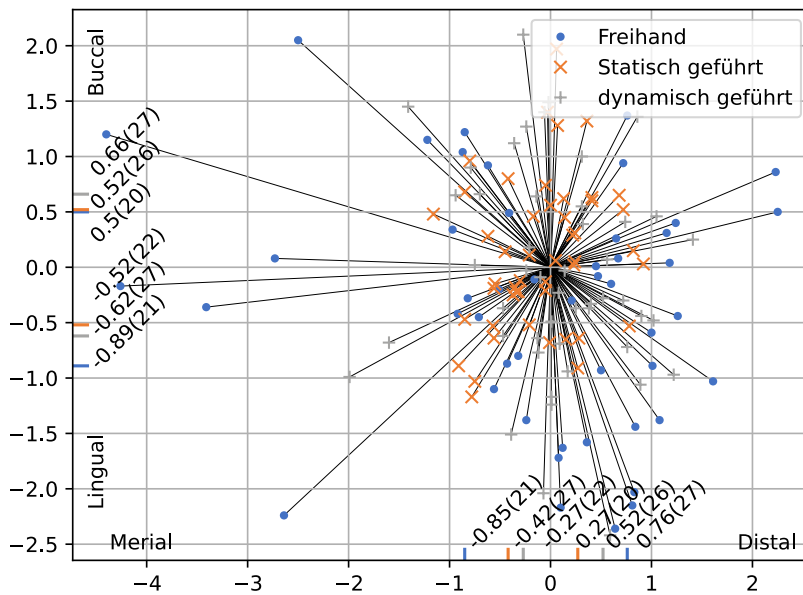


Abbildung 31: Verteilung der Abweichung der Plattform der einzelnen Implantate in der axialen Schicht. Punkte und Linien stellen Größe und Richtung der Abweichung dar. Die Balken stellen den Medianwert der Abweichung in Millimetern für jede Richtung dar (mesial, distal, bukkal, lingual). Die Zahl in () steht für die Anzahl der Implantate, die in die einzelnen Richtungen abweichen. Die blaue Farbe steht für die freihand Gruppe, orange für die statisch geführte Gruppe und grau für die dynamisch navigierte Gruppe.

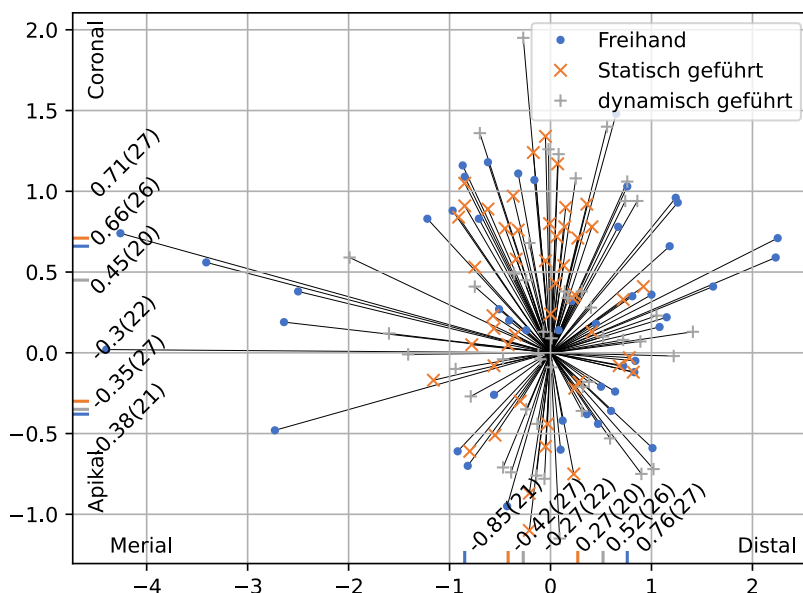


Abbildung 32: Verteilung der Abweichung der Plattform der einzelnen Implantate in der sagittalen Schicht. Punkte und Linien stellen Größe und Richtung der Abweichung dar. Die Balken stellen den Medianwert der Abweichung in Millimetern für jede Richtung dar (mesial, distal, apikal, koronal). Die Zahl in () steht für die Anzahl der Implantate, die in die einzelnen Richtungen abweichen. Die blaue Farbe steht für die freihand Gruppe, orange für die statisch geführte Gruppe und grau für die dynamisch navigierte Gruppe.

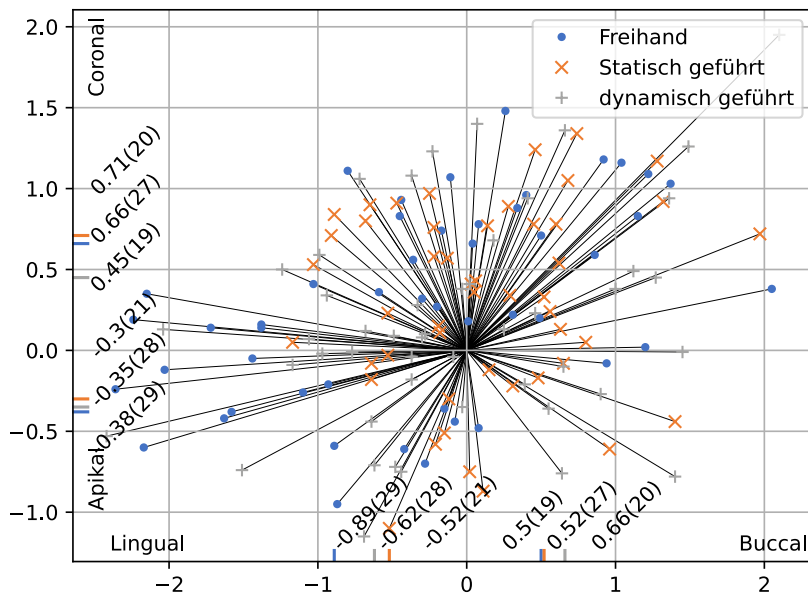


Abbildung 33: Verteilung der Abweichung der Plattform der einzelnen Implantate in der coronaren Schicht. Punkte und Linien stellen Größe und Richtung der Abweichung dar. Die Balken stellen den Medianwert der Abweichung in Millimetern für jede Richtung dar (bukkal, lingual, apikal, koronal). Die Zahl in () steht für die Anzahl der Implantate, die in die einzelnen Richtungen abweichen. Die blaue Farbe steht für die freihand Gruppe, orange für die statisch geführte Gruppe und grau für die dynamisch navigierte Gruppe.

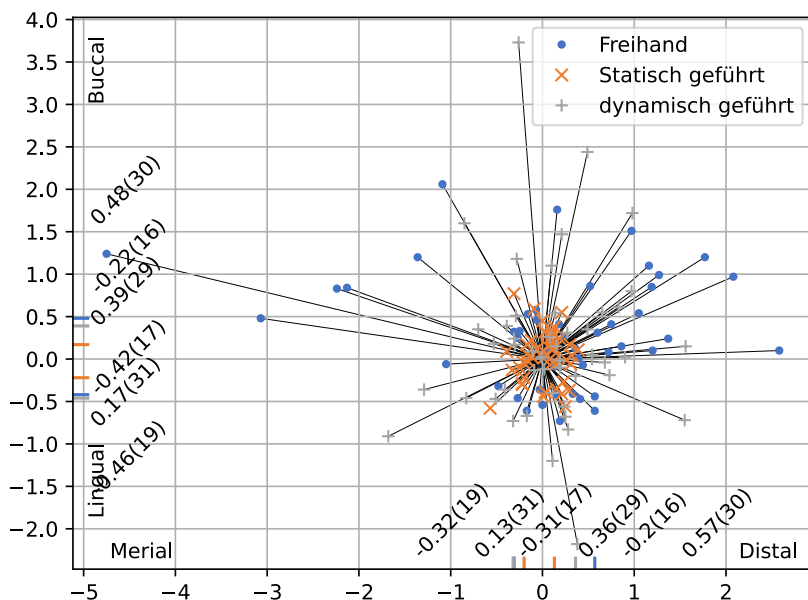


Abbildung 34: Verteilung der Abweichung am Implantatapex der einzelnen Implantate in der axialen Schicht. Punkte und Linien stellen Größe und Richtung der Abweichung dar. Die Balken stellen den Medianwert der Abweichung in Millimetern für jede Richtung dar (mesial, distal, bukkal, lingual, apikal, koronal). Die Zahl in () steht für die Anzahl der Implantate, die in die einzelnen Richtungen abweichen. Die blaue Farbe steht für die freihand Gruppe, orange für die statisch geführte Gruppe und grau für die dynamisch navigierte Gruppe.

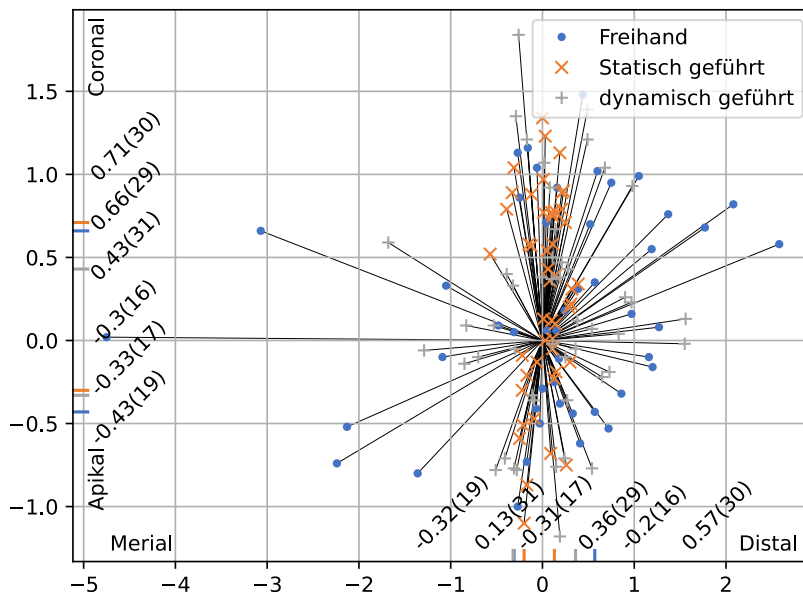


Abbildung 35: Verteilung der Abweichung am Implantatapex der einzelnen Implantate in der sagittalen Schicht. Punkte und Linien stellen Größe und Richtung der Abweichung dar. Die Balken stellen den Medianwert der Abweichung in Millimetern für jede Richtung dar (mesial, distal, bukkal, lingual, apikal, koronal). Die Zahl in () steht für die Anzahl der Implantate, die in die einzelnen Richtungen abweichen. Die blaue Farbe steht für die freihand Gruppe, orange für die statisch geführte Gruppe und grau für die dynamisch navigierte Gruppe.

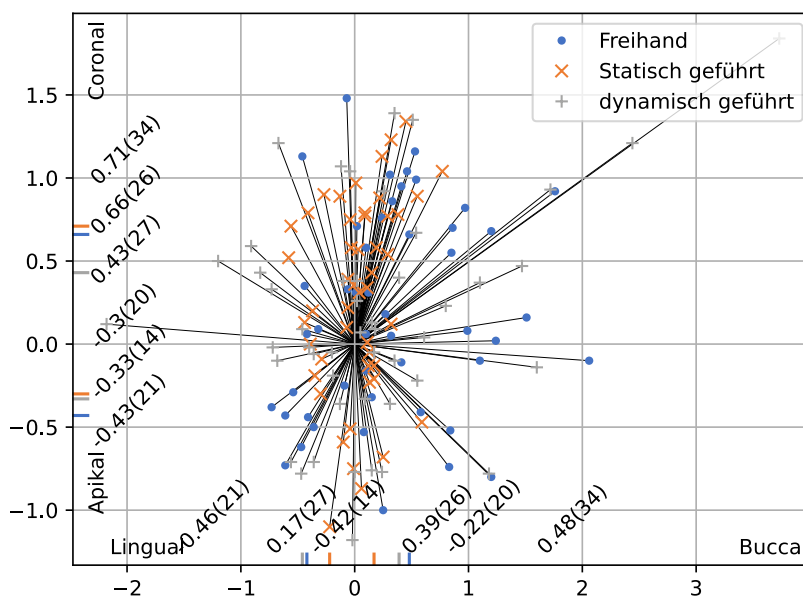


Abbildung 36: Verteilung der Abweichung am Implantatapex der einzelnen Implantate in der coronaren Schicht. Punkte und Linien stellen Größe und Richtung der Abweichung dar. Die Balken stellen den Medianwert der Abweichung in Millimetern für jede Richtung dar (mesial, distal, bukkal, lingual, apikal, koronal). Die Zahl in () steht für die Anzahl der Implantate, die in die einzelnen Richtungen abweichen. Die blaue Farbe steht für die freihand Gruppe, orange für die statisch geführte Gruppe und grau für die dynamisch navigierte Gruppe.

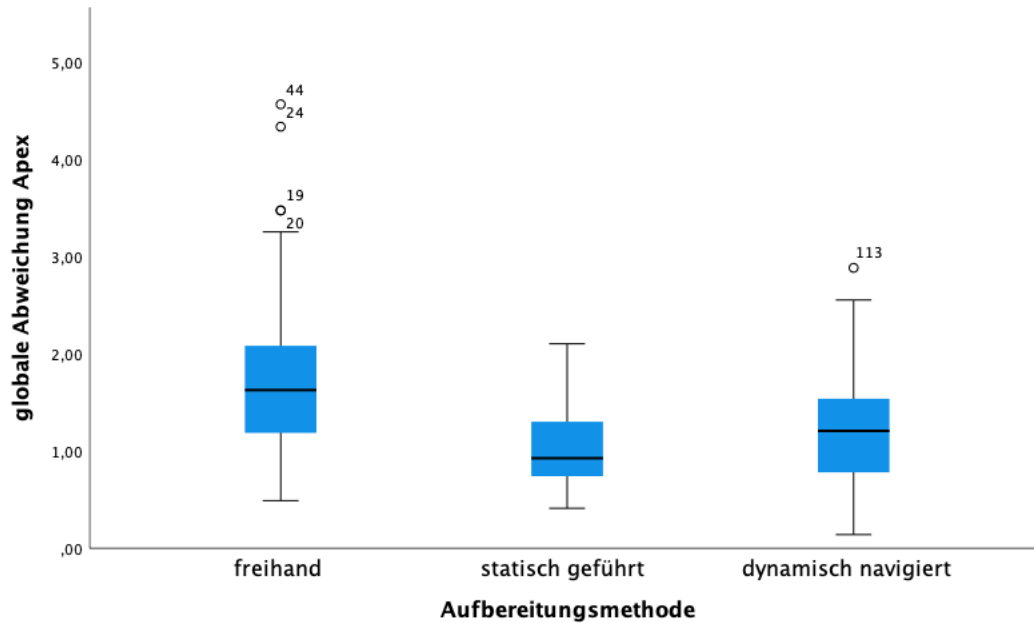


Abbildung 37: Einfacher Boxplot der globalen Abweichung am Implantatapex

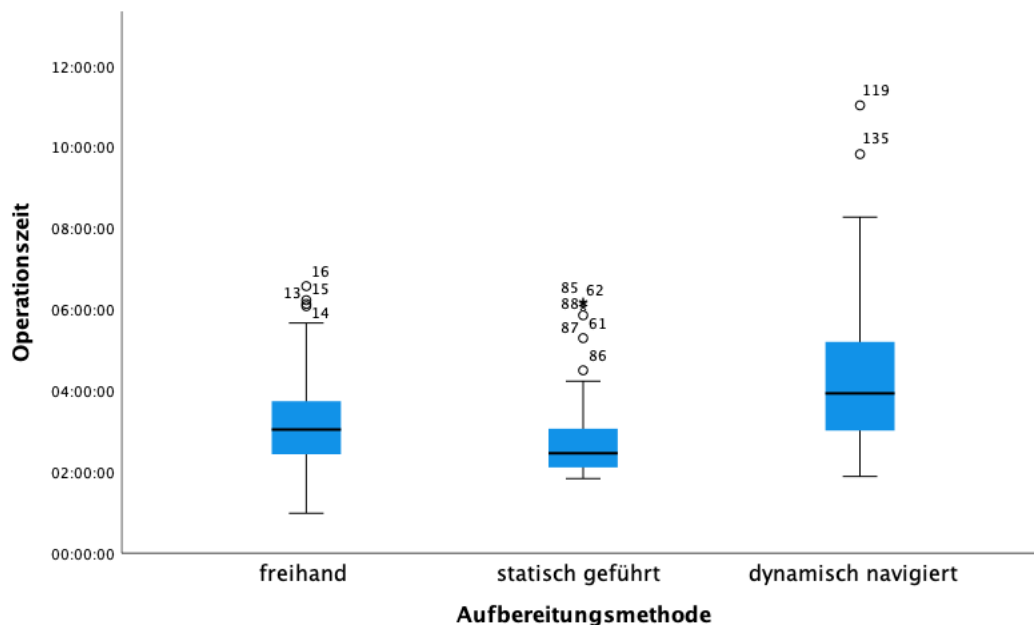


Abbildung 38: Einfacher Boxplot der Operationszeit

4.1.2 Studentische Teilnehmer*innen

Beim Betrachten der unterschiedlich geschulten Gruppen kam es zu folgenden Ergebnissen (Tab. 2 Abb. 39 bis 42). Studierende zeigten eine signifikant höhere Genauigkeit der statisch geführten Implantatposition im Vergleich zu freihand in Bezug auf Winkelgenauigkeit ($3,20 \pm 2,13^\circ$ und $7,11 \pm 4,25^\circ$) ($p < ,001$), globale Abweichung der Implantatschulter ($0,62 \pm 0,32$ mm und $1,29 \pm 0,73$ mm) ($p =$

,004) sowie des Apex' ($1,02 \pm 0,46$ mm und $1,84 \pm 0,98$ mm) ($p < ,001$). Es war kein signifikanter Unterschied zwischen den Operationszeiten der beiden Aufbereitungsmethoden ($2:57 \pm 1,04$ min und $3:35 \pm 1:37$ min) ($p = ,432$) festzustellen.

Beim Vergleich der Methoden dynamisch navigierten und freihand Implantationen zeigten sich eine signifikant höhere Präzision in der Winkelgenauigkeit ($2,65 \pm 1,68^\circ$ und $7,11 \pm 4,25^\circ$) ($p < ,001$) und der globalen Abweichung des Apex' ($1,09 \pm 0,64$ mm und $1,84 \pm 0,98$ mm) ($p = ,003$). Keine signifikanten Unterschiede wurden in der Operationszeit ($4:42 \pm 2:11$ min und $3:35 \pm 1:37$ min) ($p = ,084$) oder der globalen Abweichung der Implantatschulter ($1,14 \pm 0,83$ mm und $1,29 \pm 0,73$ mm) ($p = ,739$) festgestellt.

Statisch geführt und dynamisch navigierte Implantationen zeigten signifikante Unterschiede in der globalen Abweichung der Implantatschulter ($0,62 \pm 0,32$ mm und $1,14 \pm 0,83$ mm) ($p = ,030$) und der Operationszeit ($2:57 \pm 1,04$ min und $4:42 \pm 2:11$ min) ($p = ,003$). In der Winkelgenauigkeit ($3,20 \pm 2,13^\circ$ und $2,65 \pm 1,68^\circ$) ($p = ,808$) und der globalen Abweichung des Implantatapex ($1,02 \pm 0,46$ mm und $1,09 \pm 0,64$ mm) ($p = ,936$) waren keine signifikanten Unterschiede zu ermitteln.

Tabelle 2: Abweichungen der Implantatpositionen und Operationszeiten der Studierenden, aufgeteilt anhand der Aufbereitungsmethode, SD: Standardabweichung.

	freihand		statisch		dynamisch		ANOVA
	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD	p-Wert
Winkelabweichung (°)	7,11	4,25	3,20	2,13	2,65	1,68	< 0,001
Globale Abweichung Schulter (mm)	1,29	0,73	0,62	0,32	1,14	0,83	0,002
Globale Abweichung Apex (mm)	1,84	0,98	1,02	0,46	1,09	0,64	< 0,001
Operationszeit (min)	3:35	1:37	2:57	1,04	4:42	2:11	0,003

4.1.3 Chirurgische Teilnehmer

Bei der gleichen Untersuchung für die Gruppe der erfahrenen Chirurgen kam es zu folgenden Ergebnissen (Tab. 3 und Abb. 39 bis 42). Statisch geführte und freihand Implantationen unterschieden sich signifikant in den Parametern Winkelgenauigkeit ($2,11 \pm 1,11^\circ$ und $6,23 \pm 3,08^\circ$) ($p < ,001$), globale Abweichung der Implantatschulter ($0,72 \pm 0,33$ mm und $1,33 \pm 1,03$ mm) ($p = ,013$) und Implantatapex ($0,98 \pm 0,31$ mm und $1,65 \pm 0,83$ mm) ($p < ,001$), jedoch nicht in der Operationszeit ($2:53 \pm 1:21$ min und $2:54 \pm 0:55$ min) ($p = 1$).

Dynamisch navigierte und freihand Implantationen zeigten signifikant unterschiedliche Ergebnisse in der Winkelgenauigkeit ($3,75 \pm 2,46^\circ$ und $6,23 \pm 3,08^\circ$) ($p = ,002$) und der Operationszeit ($4:12 \pm 1:58$ min und $2:54 \pm 0:55$ min) ($p = ,013$). Nicht-signifikant waren die globale apikale ($1,36 \pm 0,48$ mm und $1,65 \pm 0,83$ mm) ($p = ,229$) und koronale ($1,14 \pm 0,54$ mm und $1,33 \pm 1,03$ mm) ($p = ,636$) Abweichung des Implantats.

Zwischen statisch geführter und dynamisch navigierter Implantatbettaufrbereitung waren signifikante Unterschiede in der Operationszeit zu entdecken ($2:53 \pm 1:21$ min und $4:12 \pm 1:58$ min) ($p = ,012$). Alle anderen Parameter variierten nicht signifikant [Winkelgenauigkeit ($2,11 \pm 1,11^\circ$ und $3,75 \pm 2,46^\circ$) ($p = ,062$), globale Abweichung der Implantatschulter ($0,72 \pm 0,33$ mm und $1,14 \pm 0,54$ mm) ($p = ,123$) und des Implantatapex' ($0,98 \pm 0,31$ mm und $1,36 \pm 0,48$ mm) ($p = ,088$)] zwischen den beiden Aufbereitungsmethoden.

Tabelle 3: Abweichungen der Implantatpositionen und Operationszeiten der erfahrenen chirurgischen Teilnehmer, aufgeteilt anhand der Aufbereitungsmethode, SD: Standardabweichung

	freihand		statisch		dynamisch		ANOVA
	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD	p-Wert
Winkelabweichung (°)	6,23	3,08	2,11	1,11	3,75	2,46	< 0,001
Globale Abweichung Schulter (mm)	1,33	1,03	0,72	0,33	1,14	0,54	0,011
Globale Abweichung Apex (mm)	1,65	0,83	0,98	0,31	1,36	0,48	< 0,001
Operationszeit (min)	2:54	0:55	2:53	1:21	4:12	1:58	0,003

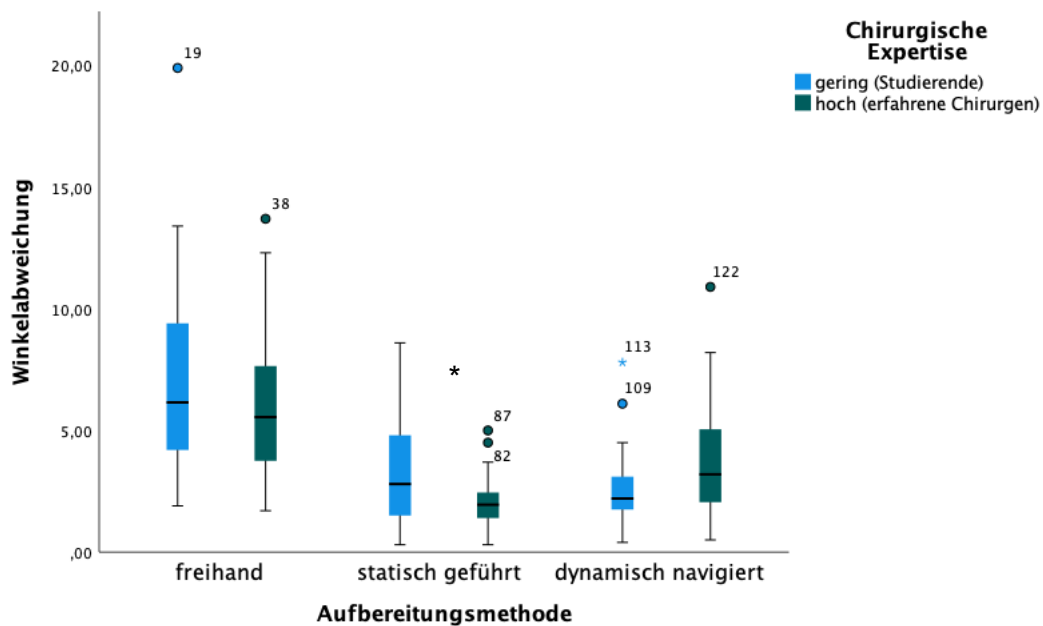


Abbildung 39: Gruppiertes Boxplot der Winkelabweichung von Studierenden und Chirurgen

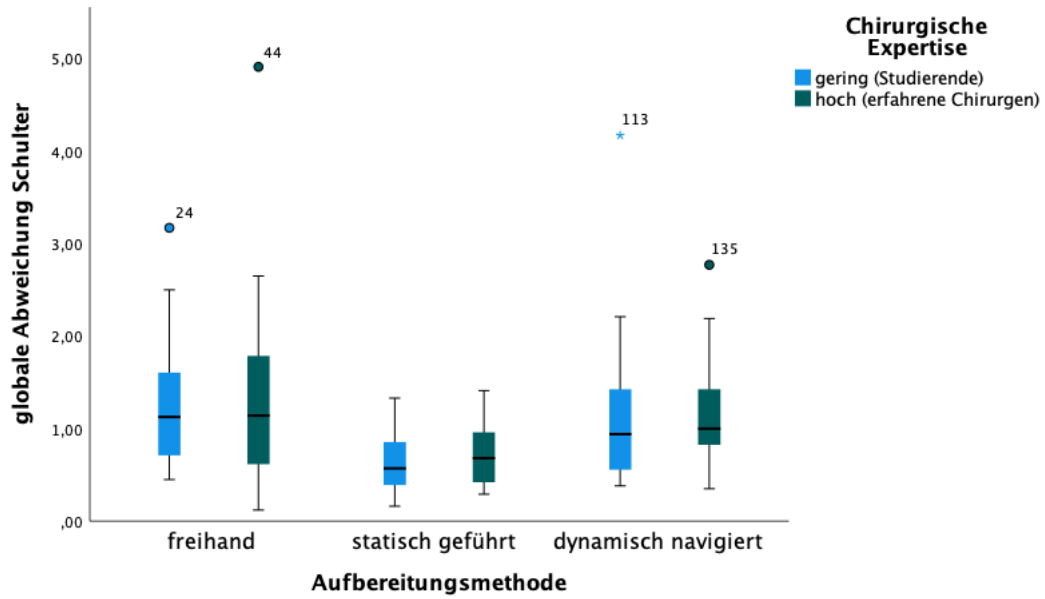


Abbildung 40: Gruppiertes Boxplot der globalen Abweichung an der Implantatschulter von Studierenden und Chirurgen

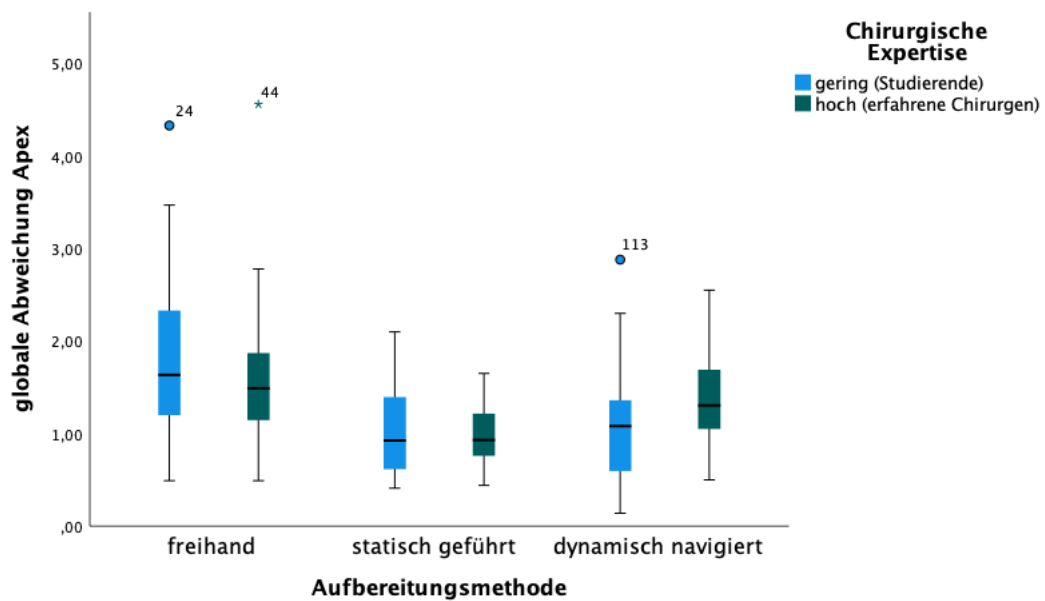


Abbildung 41: Gruppiertes Boxplot der globalen Abweichung am Implantatapex von Studierenden und Chirurgen

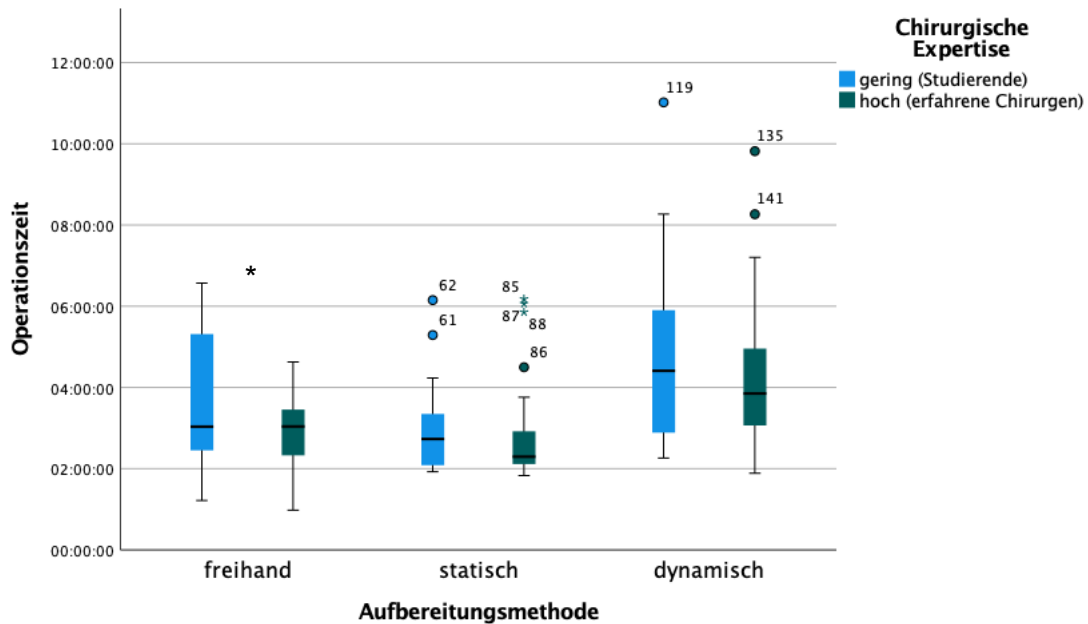


Abbildung 42: Gruppiertes Boxplot der Operationszeit von Studierenden und Chirurgen

4.2 Vergleich bei unterschiedlicher chirurgischer Expertise

Die drei verschiedenen Aufbereitungsmethoden wurden jeweils von sechs Personen der zwei Gruppen durchgeführt. Die erste Gruppe bestand aus Studierenden, die keine praktischen Erfahrungen in der Implantologie hatten, wohingegen die zweite Gruppe aus Chirurgen bestand, die viel Erfahrungen im Bereich der Implantologie hatten.

4.2.1 Freihand durchgeführte Implantation

4.2.1.1 Operationszeit

Bei der freihand durchgeführten Implantatbettauflbereitung konnten signifikant unterschiedliche Operationszeiten zwischen studentischen und chirurgischen Operateur*innen ($3:35 \pm 1:37$ min und $2:54 \pm 0:55$ min) gefunden werden (Abb. 43).

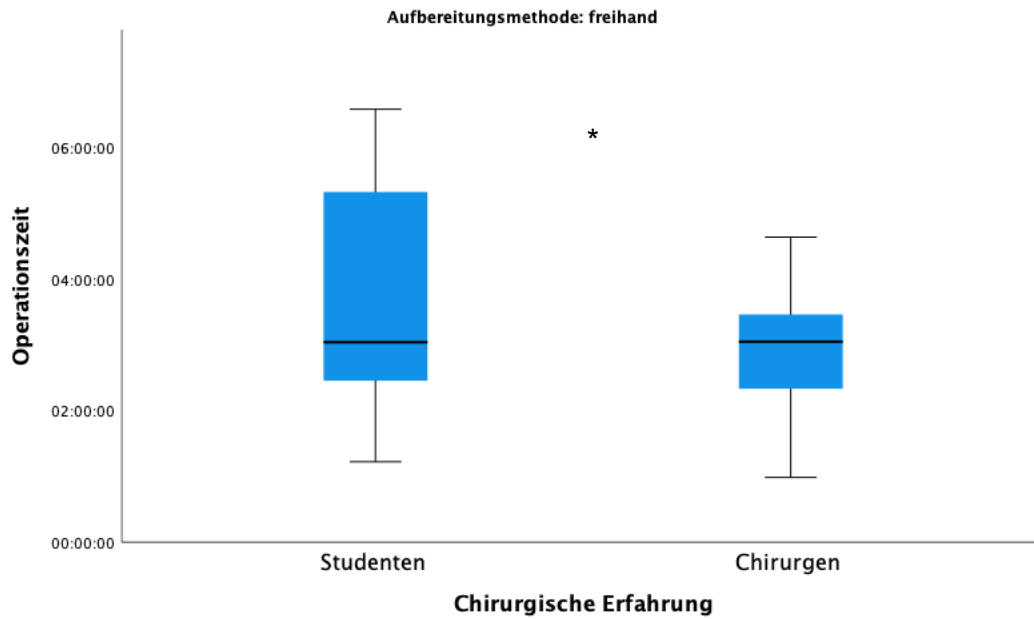


Abbildung 43: Einfacher Boxplot der Operationszeit bei freihand Implantationen von Studierenden und Chirurgen

4.2.1.2 Genauigkeit

Alle Parameter, die die Genauigkeit der Implantatposition verglichen, zeigten keine signifikanten Unterschiede (Winkelgenauigkeit ($7,11 \pm 4,25^\circ$ und $6,23 \pm 3,08^\circ$), globale Abweichung der Implantatschulter ($1,29 \pm 0,73$ mm und $1,33 \pm 1,03$ mm) und des Implantatapex ($1,84 \pm 0,98$ mm und $1,65 \pm 0,83$ mm)) (Abb. 44 bis 46).

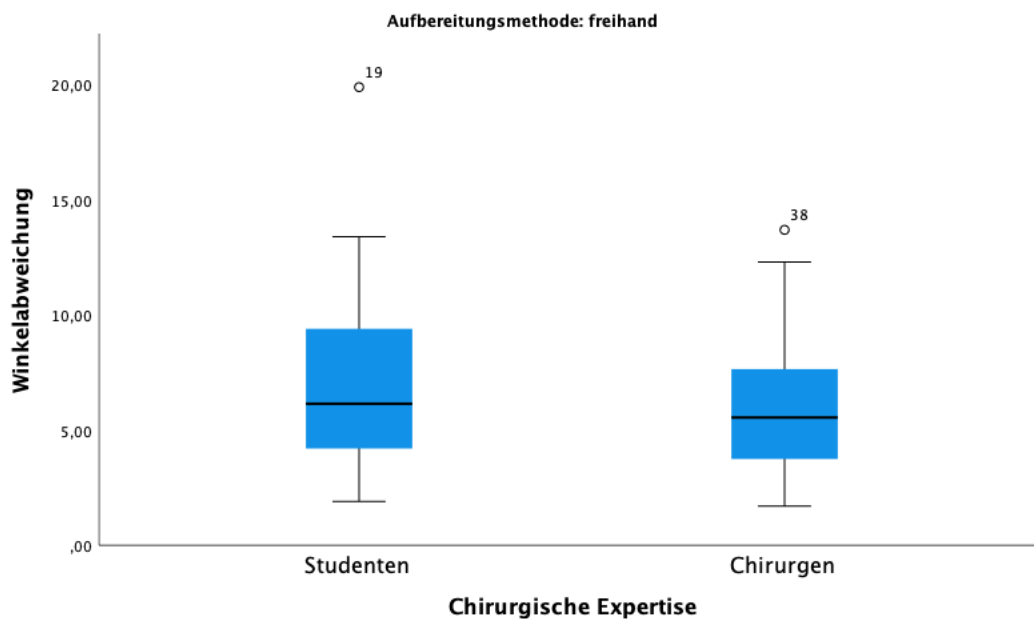


Abbildung 44: Einfacher Boxplot der Winkelabweichung bei freihand Implantationen von Studierenden und Chirurgen

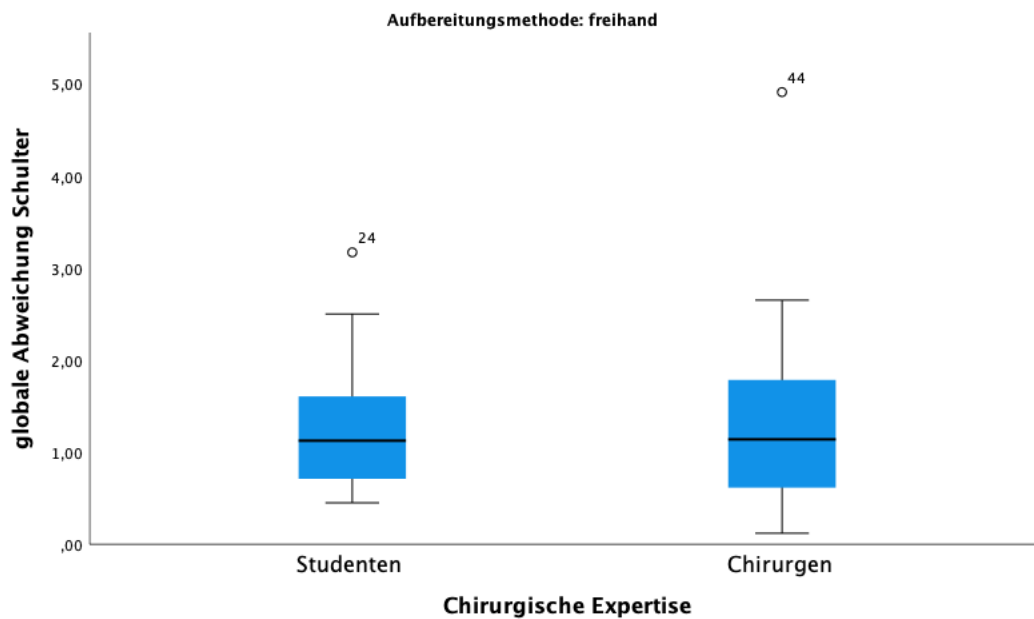


Abbildung 45: Einfacher Boxplot der globalen Abweichung an der Implantatschulter bei freihand Implantationen von Studierenden und Chirurgen

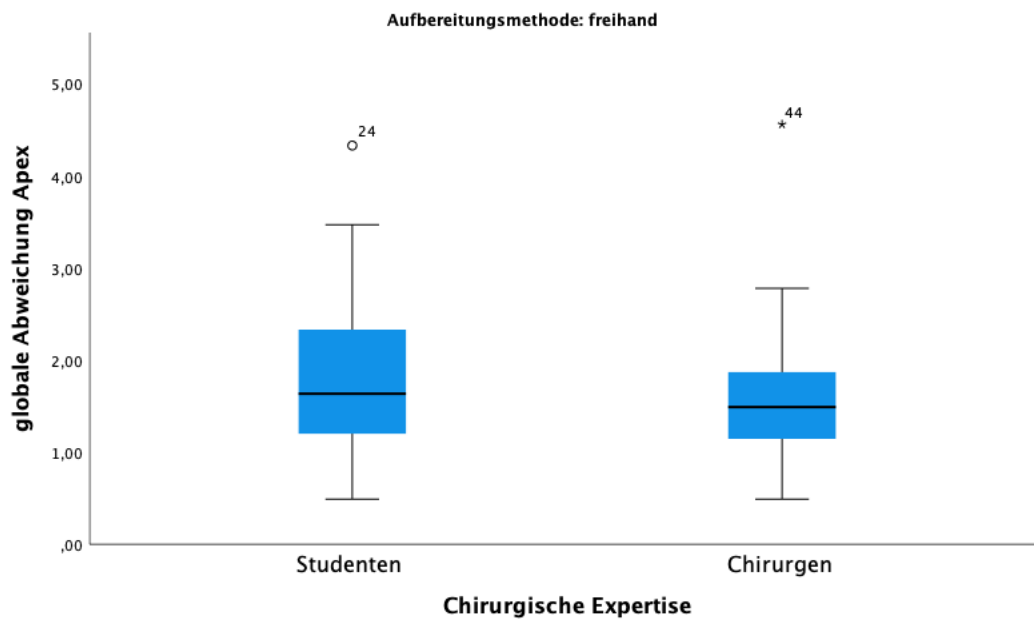


Abbildung 46: Einfacher Boxplot der globalen Abweichung am Implantatapex bei freihand Implantationen von Studierenden und Chirurgen

4.2.2 Statische fully guided Implantation

4.2.2.1 Operationszeit

Bezüglich der Operationszeiten der statisch geführten Implantation ließen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den studentischen und

chirurgischen Operateur*innen feststellen ($2:57 \pm 1:04$ min und $2:53 \pm 1:21$ min) (Abb. 47).

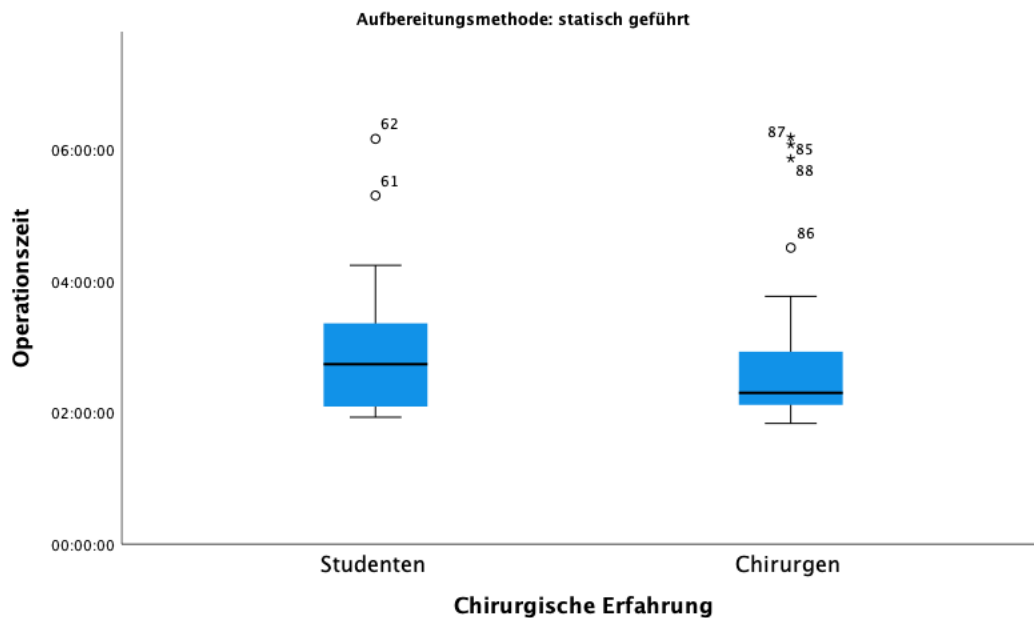


Abbildung 47: Einfacher Boxplot der Operationszeit bei statisch geführten Implantationen von Studierenden und Chirurgen

4.2.2.2 Genauigkeit

Die Genauigkeit der Implantatposition unterschied sich lediglich signifikant im Winkel zwischen den studentischen und chirurgischen Operateur*innen ($3,20 \pm 2,13^\circ$ und $2,11 \pm 1,11^\circ$). Alle anderen Parameter unterschieden sich nicht signifikant (globale Abweichung der Implantatschulter ($0,62 \pm 0,32$ mm und $0,72 \pm 0,33$ mm) und des Implantatapex' ($1,02 \pm 0,46$ mm und $0,98 \pm 0,31$ mm)) (Abb. 48 bis 50).

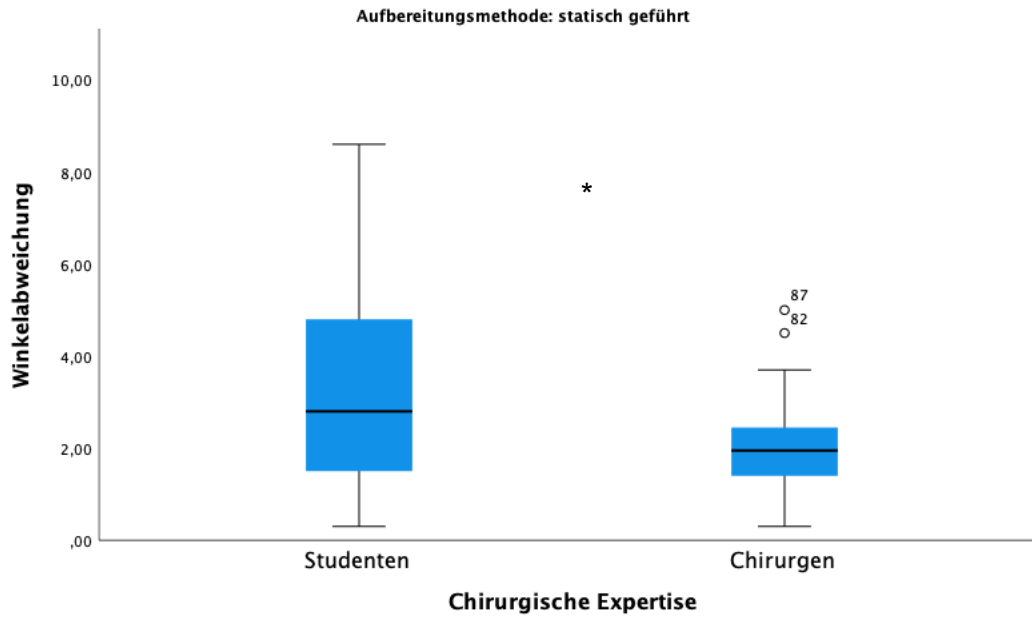


Abbildung 48: Einfacher Boxplot der Winkelabweichung bei statisch geführten Implantationen von Studierenden und Chirurgen

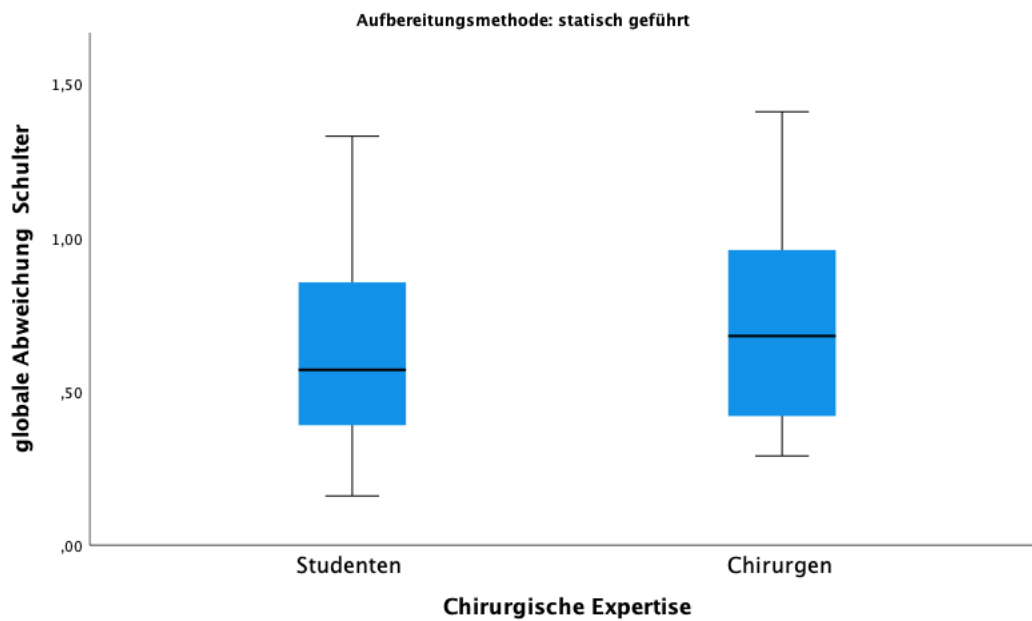


Abbildung 49: Einfacher Boxplot der globalen Abweichung an der Implantatschulter bei statisch geführten Implantationen von Studierenden und Chirurgen

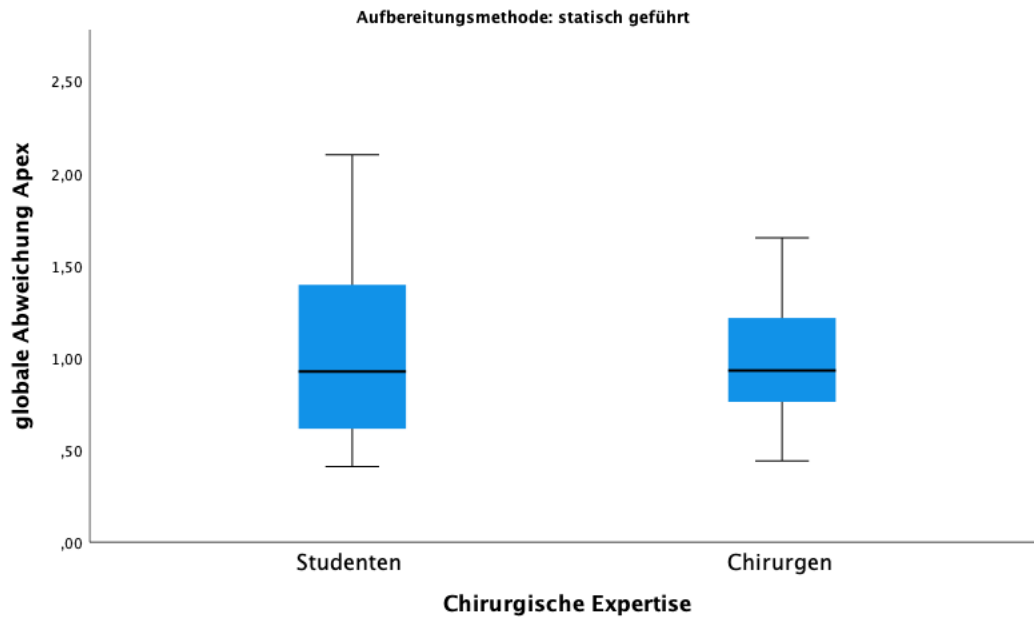


Abbildung 50: Einfacher Boxplot der globalen Abweichung am Implantatapex bei statisch geführten Implantationen von Studierenden und Chirurgen

4.2.3 Dynamisch navigierte Implantation

4.2.3.1 Operationszeit

In den Operationszeiten zwischen den studentischen und chirurgischen Operateur*innen ließen sich bei der dynamisch navigierten Implantation keine signifikanten Unterschiede ($4:42 \pm 2:11$ min und $4:12 \pm 1:58$ min) nachweisen (Abb. 51).

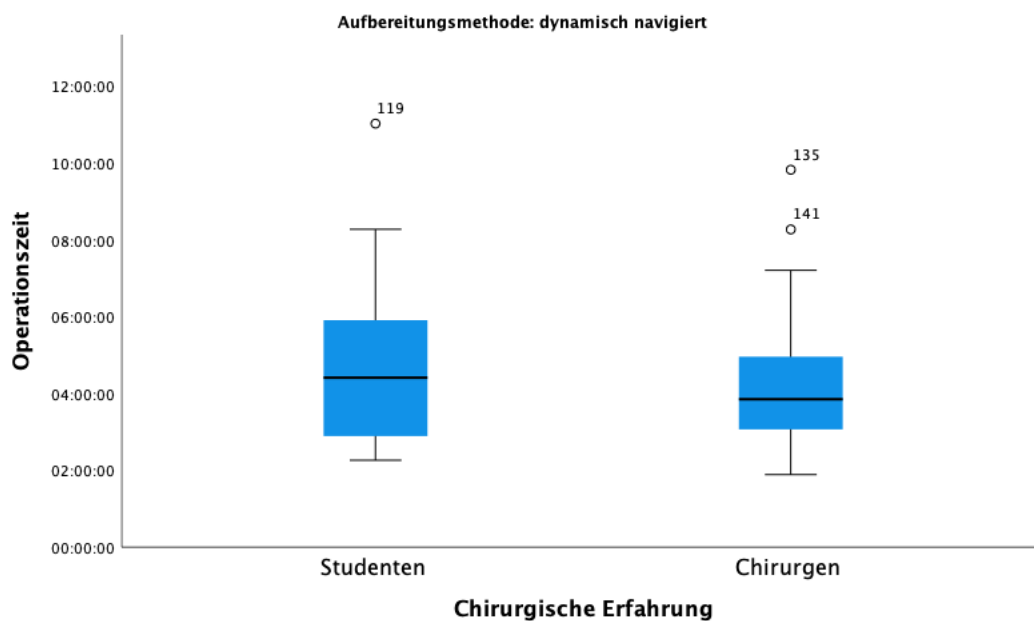


Abbildung 51: Einfacher Boxplot der Operationszeit bei dynamisch navigierten Implantationen von Studierenden und Chirurgen

4.2.3.2 Genauigkeit

Alle Parameter, die die Genauigkeit der Implantatposition verglichen [Winkelgenauigkeit ($2,65 \pm 1,68^\circ$ und $3,75 \pm 2,46^\circ$), globale Abweichung der Implantatschulter ($1,14 \pm 0,83$ mm und $1,14 \pm 0,54$ mm) und des Implantatapex' ($1,09 \pm 0,64$ mm und $1,36 \pm 0,48$ mm)], zeigten keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Gruppen mit unterschiedlichen Erfahrungen in der Implantologie (Abb. 52 bis 54).

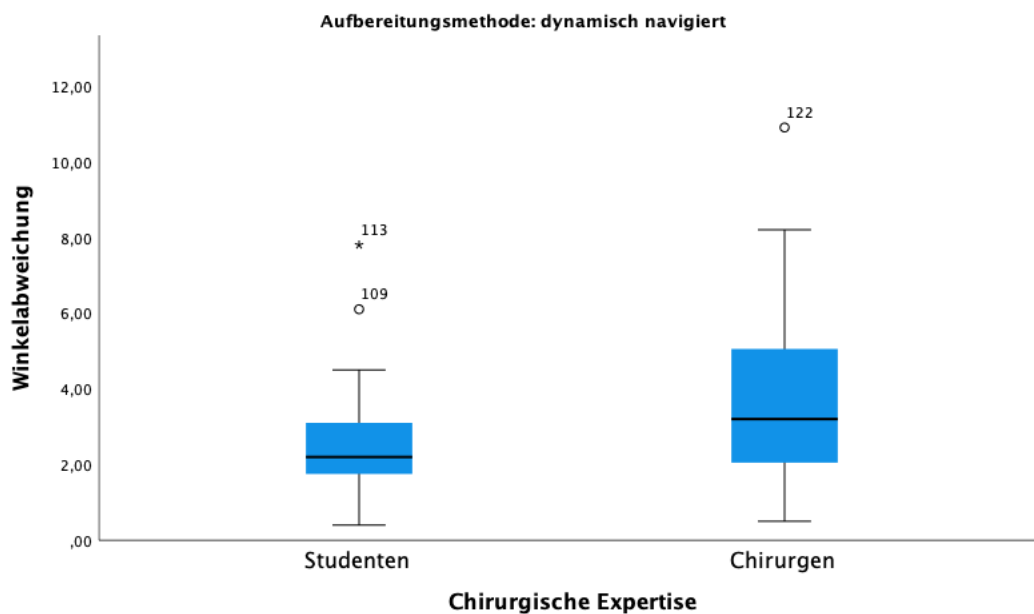


Abbildung 52: Einfacher Boxplot der Winkelabweichung bei dynamisch navigierten Implantationen von Studierenden und Chirurgen

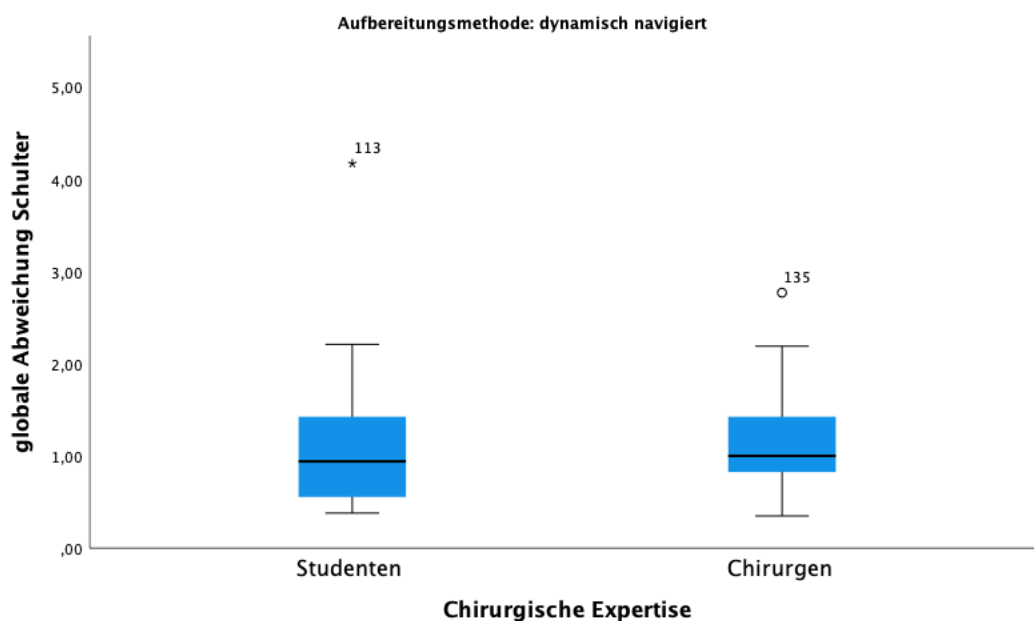


Abbildung 53: Einfacher Boxplot der globalen Abweichung an der Implantatschulter bei dynamisch navigierten Implantationen von Studierenden und Chirurgen

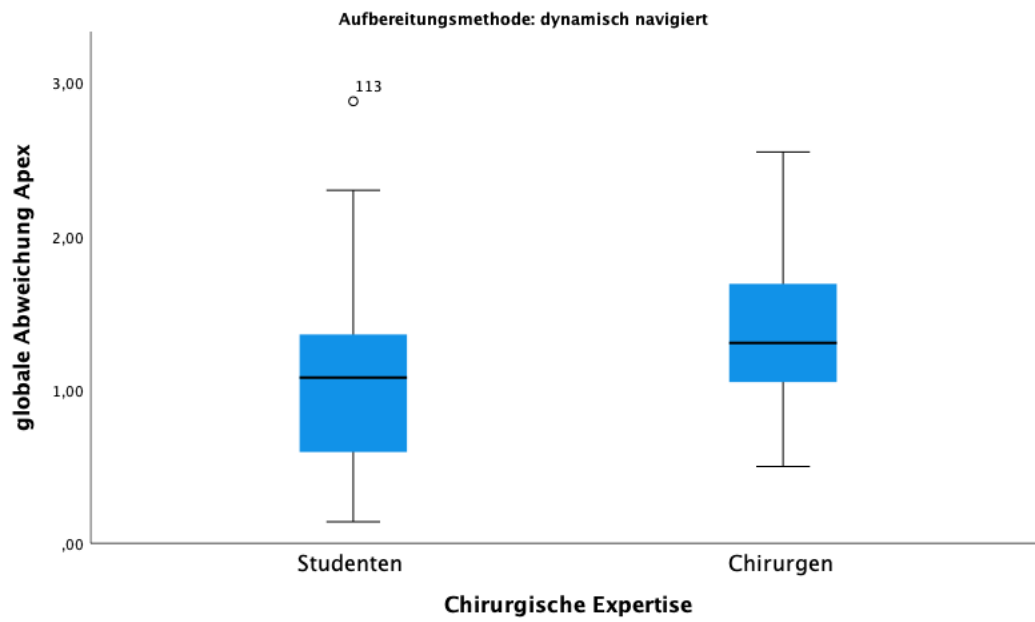


Abbildung 54: Einfacher Boxplot der globalen Abweichung am Implantatapex bei dynamisch navigierten Implantationen von Studierenden und Chirurgen

4.3 Implantatpositionen (Region)

Die einzelnen Regionen der Implantate wurden hinsichtlich ihrer Genauigkeit und der benötigten Zeit miteinander verglichen.

4.3.1 Freihand durchgeführte Implantation

In der Winkelgenauigkeit waren die Implantate, die Freihand in den vier Positionen implantiert wurden, nicht signifikant unterschiedlich. Die globale Abweichung der Schulter des Implantats in Regio 26 war signifikant größer als die der Implantate in Regio 16 ($2,21 \pm 1,08$ mm und $0,87 \pm 0,47$ mm) und 11 ($2,21 \pm 1,08$ mm und $0,67 \pm 0,24$ mm). Gleiches galt für das Implantat in Regio 24 im Vergleich zum Implantat in Regio 11 ($1,49 \pm 0,55$ mm und $0,67 \pm 0,24$ mm). Dabei ist zu erkennen, dass die Abweichung der Implantatshulter mit dem Abstand zu einem benachbarten Zahn zunimmt (Tab. 4).

Tabelle 4: Abweichungen der Implantatpositionen in verschiedenen Implantatregion nach Freihand Implantation, SD: Standardabweichung

Implantat- position	16		11		24		26		ANOVA
	Mittel- wert	SD	Mittel- wert	SD	Mittel- wert	SD	Mittel- wert	SD	p-Wert
Winkelab- weichung (°)	4,81	3,12	6,37	3,30	8,54	4,45	6,97	3,20	0,095
Globale Abweichung Schulter (mm)	0,87	0,47	0,67	0,24	1,49	0,55	2,21	1,08	< 0,001
Globale Abweichung Apex (mm)	1,58	0,71	1,55	0,59	1,76	0,79	2,10	1,35	0,442

4.3.2 Statische fully guided Implantation

Bei der statisch geführten fully guided Implantation gab es zwischen den Implantatpositionen keine signifikanten Unterschiede, weder in den Operationszeiten noch in der Genauigkeit der inserierten Implantate (Tab. 5).

Tabelle 5: Abweichungen der Implantatpositionen in verschiedenen Implantatregion nach statisch geführter Implantation, SD: Standardabweichung

Implantat- position	16		11		24		26		ANOVA
	Mittel- wert	SD	Mittel- wert	SD	Mittel- wert	SD	Mittel- wert	SD	p-Wert
Winkelab- weichung (°)	2,60	2,36	2,61	2,04	2,73	1,41	2,68	1,27	1,00
Globale Abweichung Schulter (mm)	0,76	0,39	0,62	0,25	0,61	0,33	0,70	0,32	0,64
Globale Abweichung Apex (mm)	1,09	0,50	0,93	0,38	0,97	0,30	1,01	0,37	0,77

4.3.3 Dynamisch navigierte Implantation

Bei der dynamisch navigierten Implantation gab es zwischen den Implantatpositionen keine signifikanten Unterschiede, weder in den Operationszeiten noch in der Genauigkeit der inserierten Implantate (Tab. 6).

Tabelle 6: Abweichungen der Implantatpositionen in verschiedenen Implantatregion nach dynamisch navigierter Implantation, SD: Standardabweichung

Implantat- position	16		11		24		26		ANOVA
	Mittel- wert	SD	Mittel- wert	SD	Mittel- wert	SD	Mittel- wert	SD	
Winkelab- weichung (°)	3,53	2,42	3,91	2,91	3,08	1,58	3,20	2,16	0,29
Globale Abweichung Schulter (mm)	1,24	1,00	0,88	0,35	1,48	0,60	0,96	0,59	0,13
Globale Abweichung Apex (mm)	1,30	0,61	1,29	0,56	1,39	0,46	0,93	0,62	0,21

4.4 Lernkurven während der wiederholten Implantation

4.4.1 Freihand durchgeführte Implantationen

4.4.1.1 Alle Teilnehmer*innen

Die wiederholten freihand durchgeführten Implantationen führten zu einer durchschnittlichen Reduktion der Implantationszeit von 35 Sekunden zwischen dem ersten und dem vierten inserierten Implantat (Tab. 7). Zwischen dem ersten und vierten Implantat war ein signifikanter Unterschied in der Operationszeit zu verzeichnen. Die zweiten und dritten Implantate gelangen zwar in kontinuierlich geringer werdender Operationszeit, jedoch ohne signifikante Unterschiede zum vierten Implantat.

4.4.1.2 Studentische Teilnehmer*innen

Die wiederholten freihand durchgeführten Implantationen der studentischen Teilnehmer*innen führten zu einer durchschnittlichen Reduktion der Implantationszeit von 48 Sekunden zwischen dem ersten und dem vierten inserierten Implantat (Tab. 7). Zwischen dem ersten und vierten Implantat war ein signifikanter Unterschied in der Operation zu verzeichnen. Die zweiten und

dritten Implantate wiesen eine kontinuierlich fallende Operationszeit auf, jedoch keine signifikanten Unterschiede zum vierten Implantat.

4.4.1.3 Chirurgische Teilnehmer

Die wiederholten freihand durchgeführten Implantationen der chirurgischen Teilnehmer führten zu einer durchschnittlichen Reduktion der Implantationszeit von 22 Sekunden zwischen dem ersten und dem vierten inserierten Implantat (Tab. 7). Zwischen dem ersten und vierten Implantat war ein signifikanter Unterschied in der Operation zu verzeichnen. Die zweiten Implantationen waren mit der kürzesten Operationszeit assoziiert, die folgenden hatten eine kontinuierlich steigende Operationszeit.

Tabelle 7: Durchschnittliche Operationszeiten aller Teilnehmer*innen sowie getrennt für studentische und chirurgische Teilnehmer*innen bei freihand Implantationen

	Alle Teilnehmer	Studierende	Chirurgen
Regio	Mittelwert (s)	Mittelwert (s)	Mittelwert (s)
16	140,92	159,52	122,32
11	112,44	128,92	95,96
24	109,07	117,95	100,19
26	105,95	111,53	100,38

4.4.2 Statisch geführt durchgeführte Implantationen

4.4.2.1 Alle Teilnehmer*innen

Die wiederholten statisch geführt durchgeführten Implantationen führten zu einer durchschnittlichen Reduktion der Implantationszeit von 22 Sekunden zwischen dem ersten und vierten inserierten Implantat (Tab. 8). Zwischen den Implantaten war kein signifikanter Unterschied in der Operation erkennbar. Jedoch nahm die Operationszeit kontinuierlich ab.

4.4.2.2 Studentische Teilnehmer*innen

Die wiederholten statisch geführt durchgeführten Implantationen der studentischen Teilnehmer*innen führten zu einer durchschnittlichen Reduktion

der Implantationszeit von 29 Sekunden zwischen dem ersten und vierten inserierten Implantat (Tab. 8). Zwischen den Implantaten war kein signifikanter Unterschied in der Operation erkennbar, jedoch nahm die Operationszeit kontinuierlich ab.

4.4.2.3 Chirurgische Teilnehmer

Die wiederholten statisch geführt durchgeführten Implantationen führten zu einer durchschnittlichen Reduktion der Implantationszeit von 15 Sekunden zwischen dem ersten und vierten inserierten Implantat (Tab. 8). Zwischen den Implantaten war, analog zu den Studierenden, kein signifikanter Unterschied in der Operation erkennbar, jedoch nahm die Operationszeit kontinuierlich ab.

Tabelle 8: Durchschnittliche Operationszeiten aller Teilnehmer*innen sowie getrennt studentische und chirurgische Teilnehmer*innen bei statisch geführten Implantationen

	Alle Teilnehmer	Studierende	Chirurgen
Regio	Mittelwert (s)	Mittelwert (s)	Mittelwert (s)
16	120,21	122,72	117,71
11	104,01	114,27	93,75
24	99,12	95,57	102,67
26	98,13	93,36	102,89

4.4.3 Dynamisch navigiert durchgeführte Implantationen

4.4.3.1 Alle Teilnehmer*innen

Die wiederholten dynamisch navigierten Implantationen führten zu einer durchschnittlichen Reduktion der Implantationszeit von 54 Sekunden zwischen dem ersten und dem vierten inserierten Implantat (Tab. 9). Zwischen dem ersten und vierten Implantat wurde ein signifikanter Unterschied in der Operationszeit zu messen. Das zweite Implantat hatte insgesamt die kürzeste Operationszeit. Bei keiner der weiteren Operationszeiten konnte ein signifikanter Unterschied zum vierten Implantat festgestellt werden.

4.4.3.2 Studentische Teilnehmer*innen

Die wiederholten dynamisch navigiert durchgeführten Implantationen der studentischen Teilnehmer*innen führten zu einer durchschnittlichen Reduktion der Implantationszeit von 32 Sekunden zwischen dem ersten und dem vierten inserierten Implantat (Tab. 9). Zwischen keinem der Implantate war ein signifikanter Unterschied in der Operationszeit zu messen. Das zweite Implantat hatte dabei die kürzeste Operationszeit.

4.4.3.3 Chirurgische Teilnehmer

Die wiederholten dynamisch navigiert durchgeführten Implantationen der chirurgischen Teilnehmer führten zu einer durchschnittlichen Reduktion der Implantationszeit von 76 Sekunden zwischen dem ersten und dem vierten inserierten Implantat (Tab. 9). Zwischen keinem der Implantate war ein signifikanter Unterschied in der Operationszeit zu messen. Das zweite Implantat hatte dabei die kürzeste Operationszeit.

Tabelle 9: Durchschnittliche Operationszeiten aller Teilnehmer*innen, sowie der studentischen und chirurgischen Teilnehmer*innen bei dynamisch navigierten Implantationen

	Alle Teilnehmer	Studierende	Chirurgen
Regio	Mittelwert (s)	Mittelwert (s)	Mittelwert (s)
16	190,07	186,04	202,02
11	131,89	145,83	124,45
24	169,82	192,33	153,81
26	136,48	153,65	125,80

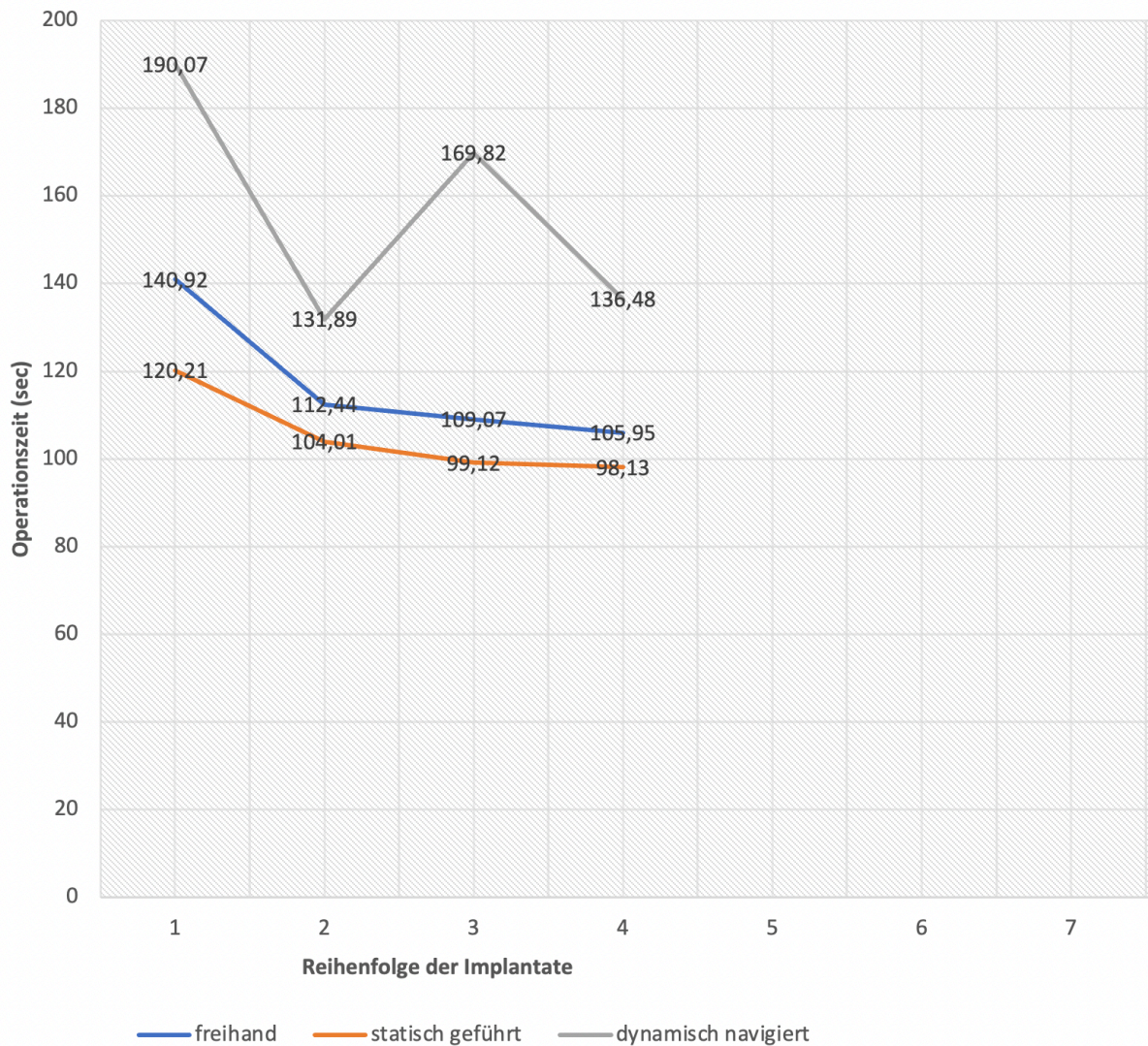


Abbildung 55: Durchschnittliche Lernkurve aller Teilnehmer*innen. Blau repräsentiert die freihand, orange die statisch geführte und grau die dynamisch navigierte Implantation.

4.5 Fragebogen

Die Ergebnisse der Befragung lassen erkennen, dass die Teilnehmer*innen der Studie die Aufbereitungsmethode freihand als sehr flexibel (bezogen auf ein großes Freiheitsempfinden) und sehr aufmerksamkeitsnehmend empfunden haben. Die empfundene Selbstsicherheit und Genauigkeit gaben sie als moderat an. Neben der hohen Beliebtheit, da sie als die bisher am häufigsten gewählte Aufbereitungsmethode gilt, konnte sie ihren großen Zuspruch bei allen Teilnehmer*innen erhalten.

Dynamisch navigierte Implantationen wurden bisher von nur wenigen Operateur*innen durchgeführt. Die Umfrage führte zu moderaten Ergebnissen in der empfundenen Selbstsicherheit, Genauigkeit und Flexibilität. Zudem waren hohe Resultate bei der zu widmenden Aufmerksamkeit vorliegend. Die Wiederholungswahrscheinlichkeit war sehr gestreut, wobei der Großteil der Teilnehmer sie gering einschätzte.

Als zweithäufigste bisher angewendete Aufbereitungsmethode zeichnete sich die statisch geführte Implantation ab. In der empfundenen Selbstsicherheit und Genauigkeit wurde sie sehr hoch bewertet. Die benötigte Aufmerksamkeit und Flexibilität wurden hingegen moderat eingeschätzt. Alle Teilnehmer*innen gaben bei dieser Methode eine hohe bis sehr hohe Wiederholungswahrscheinlichkeit an.

Um die Erfahrungen der Teilnehmer zu erfassen, wurde erhoben, wie hoch die Anzahl der pro Jahr inserierten Implantate war (Abb. 56), welche Methode dabei am häufigsten zur Anwendung kam (Abb. 57) und wie häufig dynamisch navigierte Implantationen bereits durchgeführt wurden (Abb. 58).

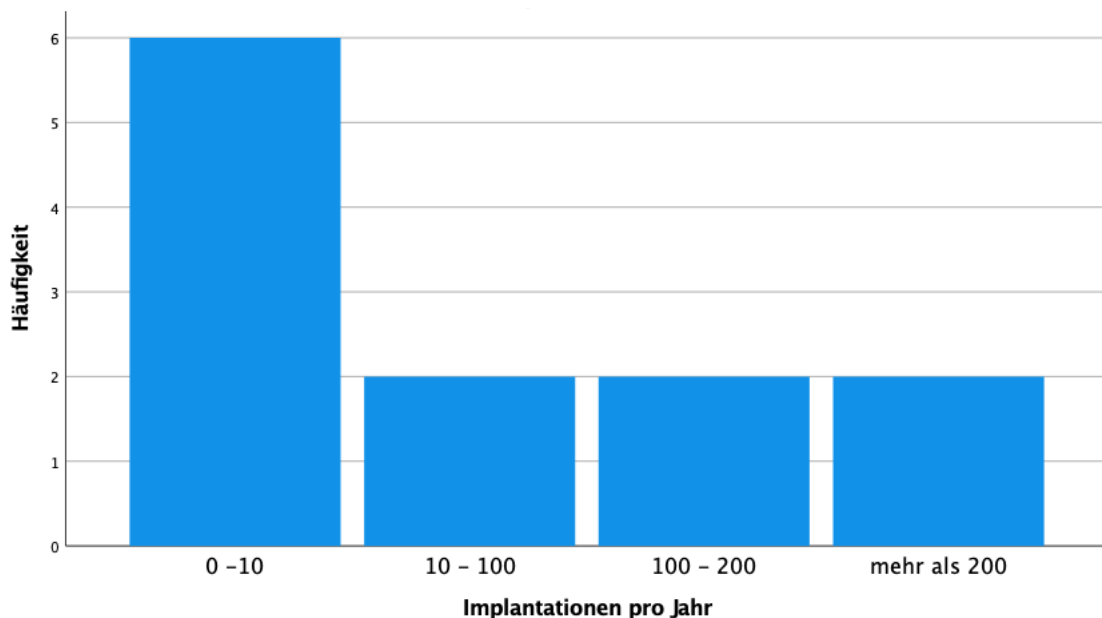


Abbildung 56: Befragungsergebnisse bezüglich der durchgeführten Implantationen pro Jahr

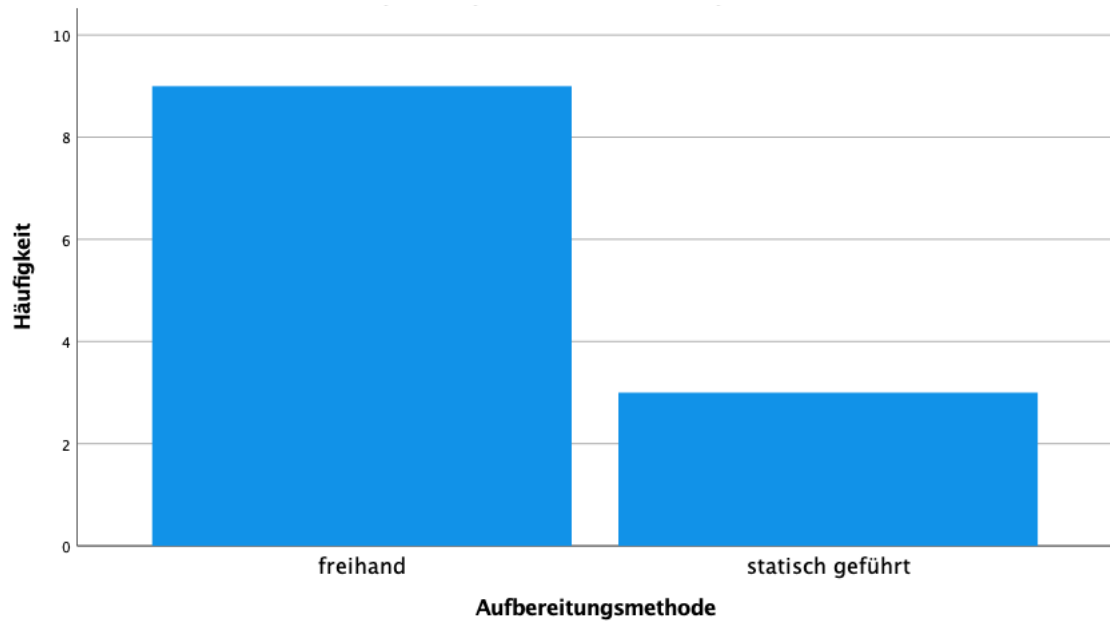


Abbildung 57: Befragungsergebnisse bezüglich der bisher am häufigsten angewendeten Aufbereitungsmethode

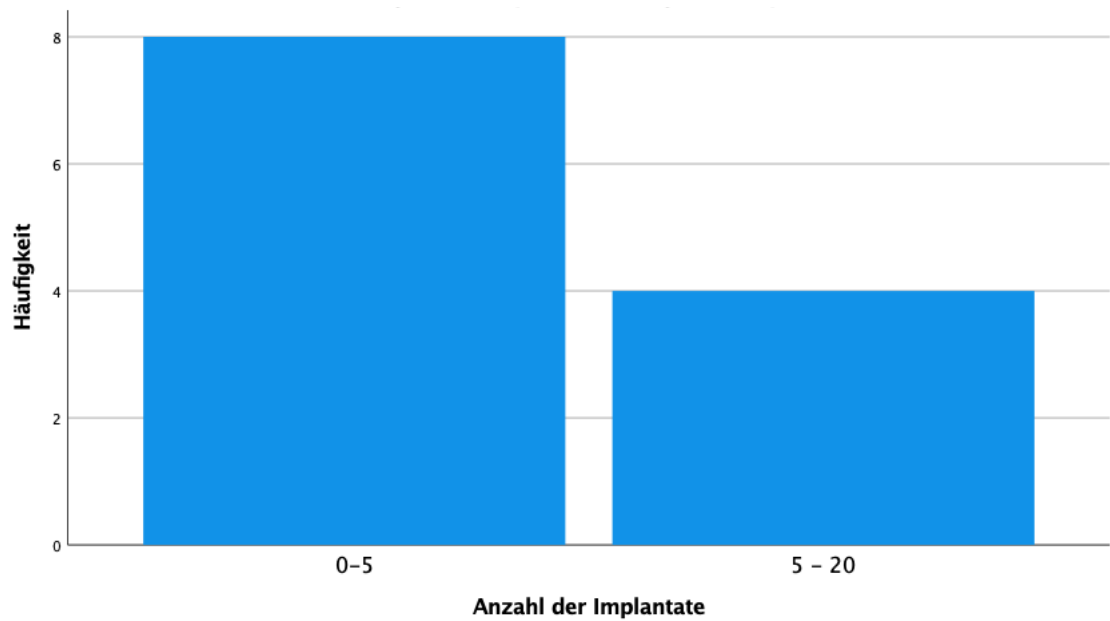


Abbildung 58: Befragungsergebnisse bezüglich der Anzahl der bisher dynamisch navigiert durchgeführten Implantationen

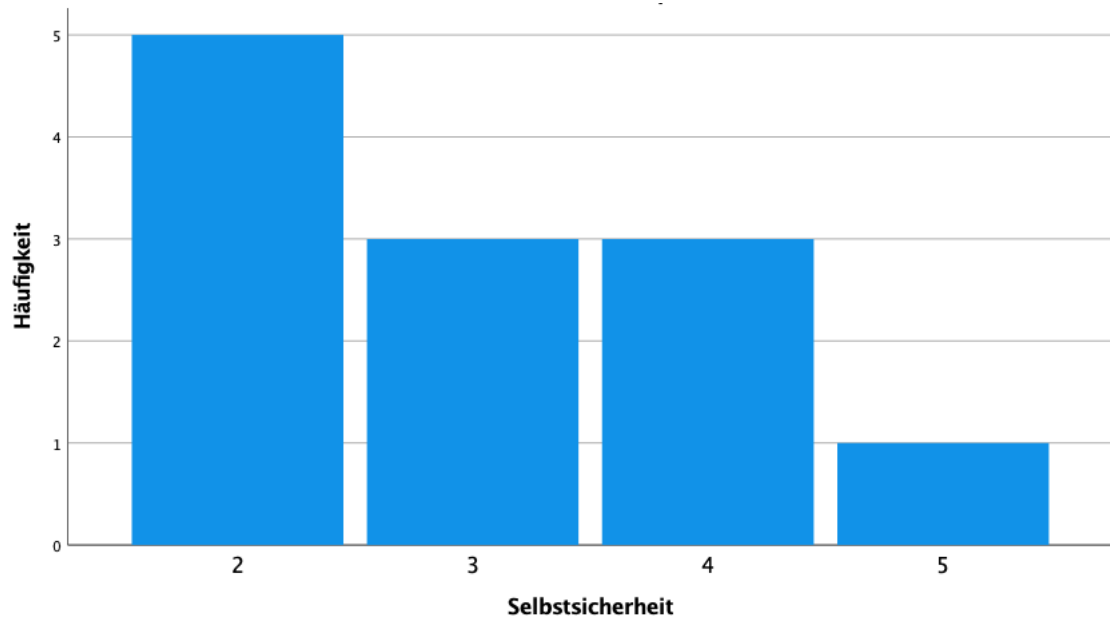


Abbildung 59: Befragungsergebnisse bezüglich der Selbstsicherheit bei freihand Implantationen

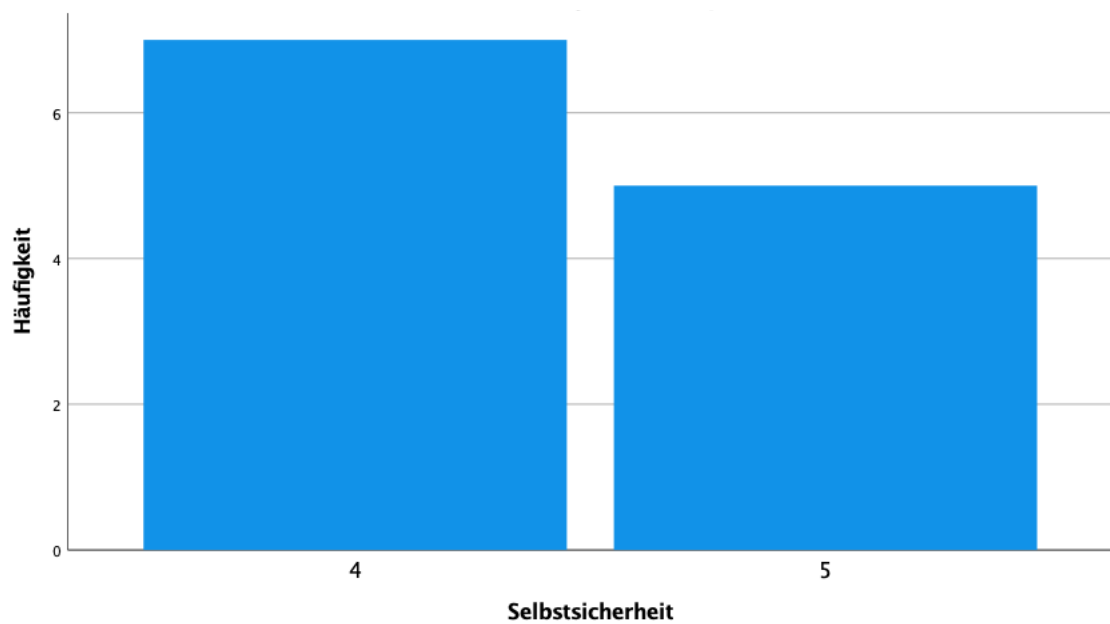


Abbildung 60: Befragungsergebnisse bezüglich der Selbstsicherheit bei statisch geführten Implantationen

Die empfundene Selbstsicherheit wurde in Zahlen von 0 bis 5 angegeben. 0 bedeutete dabei „Sehr unsicher“, während 5 „Sehr sicher“ repräsentierte. Abstufungen konnten mit den dazwischenliegenden Zahlen erreicht werden (Abb. 59 bis 61).

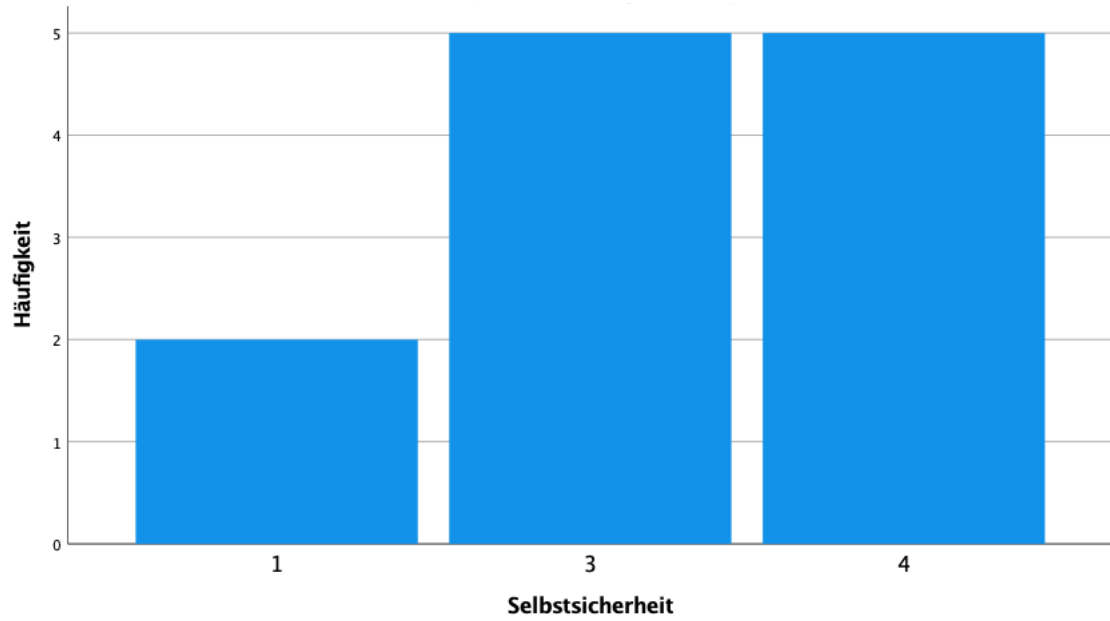


Abbildung 61: Befragungsergebnisse bezüglich der Selbstsicherheit bei dynamisch navigierten Implantationen

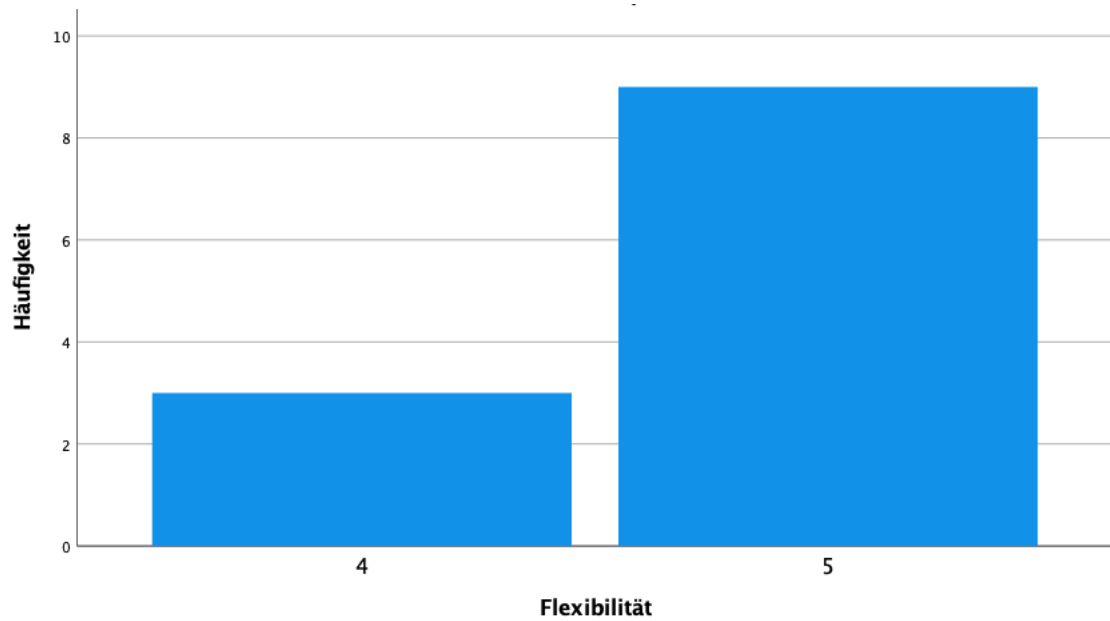


Abbildung 62: Befragungsergebnisse bezüglich der Flexibilität bei freihand Implantationen

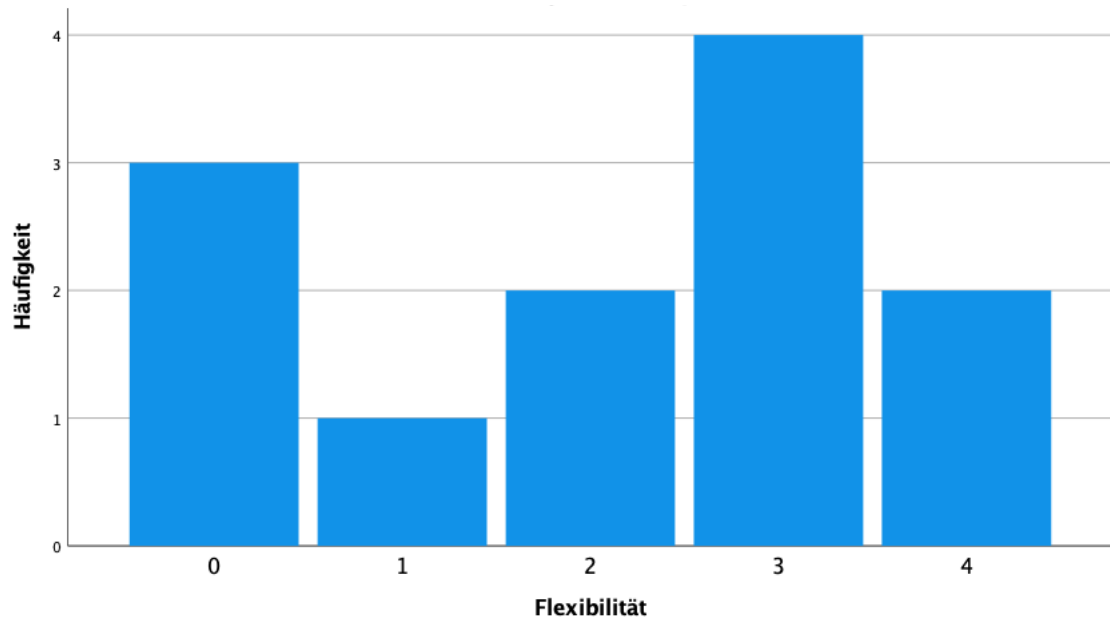


Abbildung 63: Befragungsergebnisse bezüglich der Flexibilität bei statisch geführten Implantationen

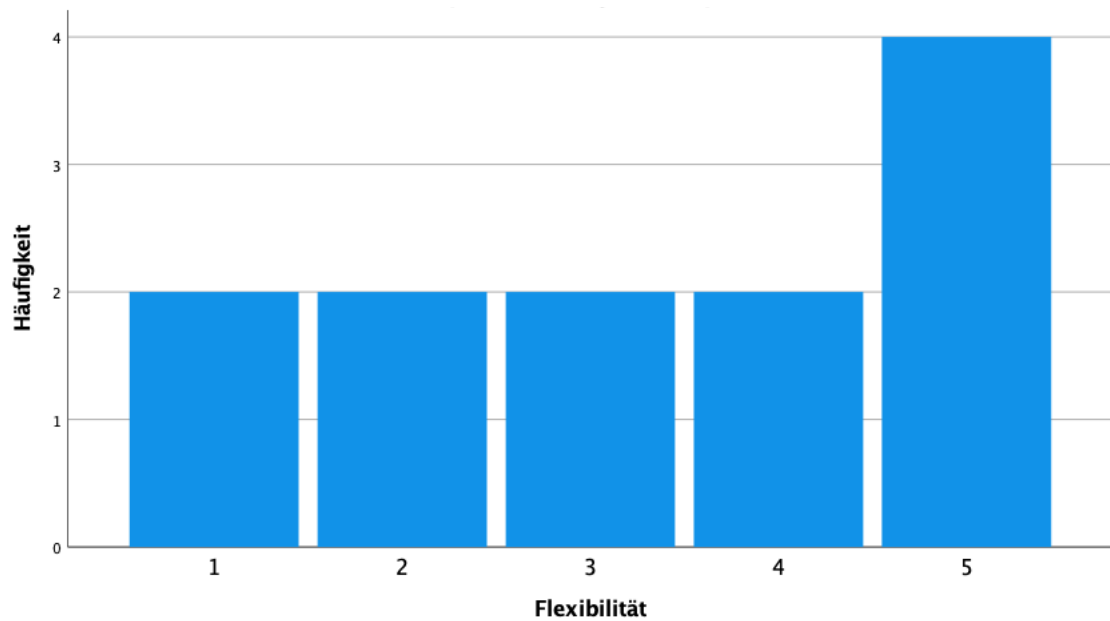


Abbildung 64: Befragungsergebnisse bezüglich der Flexibilität bei dynamisch navigierten Implantationen

Die empfundene Flexibilität wurde in Zahlen von 0 bis 5 angegeben. 0 bedeutete dabei „Sehr unflexibel“, während 5 „Sehr flexibel“ repräsentierte. Abstufungen konnten mit den dazwischenliegenden Zahlen erreicht werden (Abb. 62 bis 64).

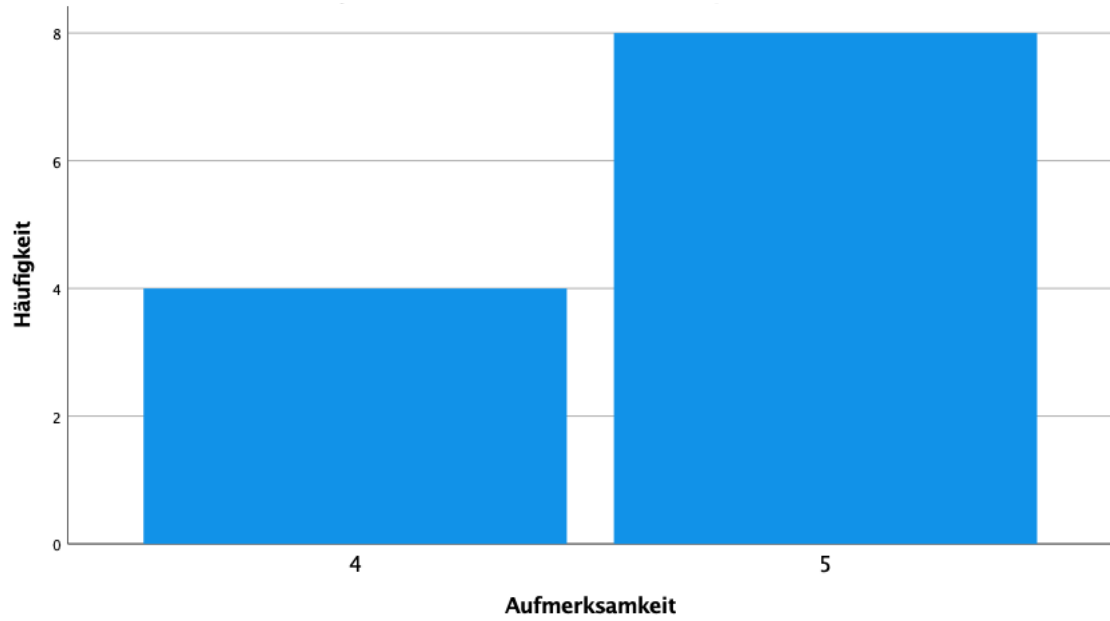


Abbildung 65: Befragungsergebnisse bezüglich der benötigten Aufmerksamkeit bei freihand Implantationen

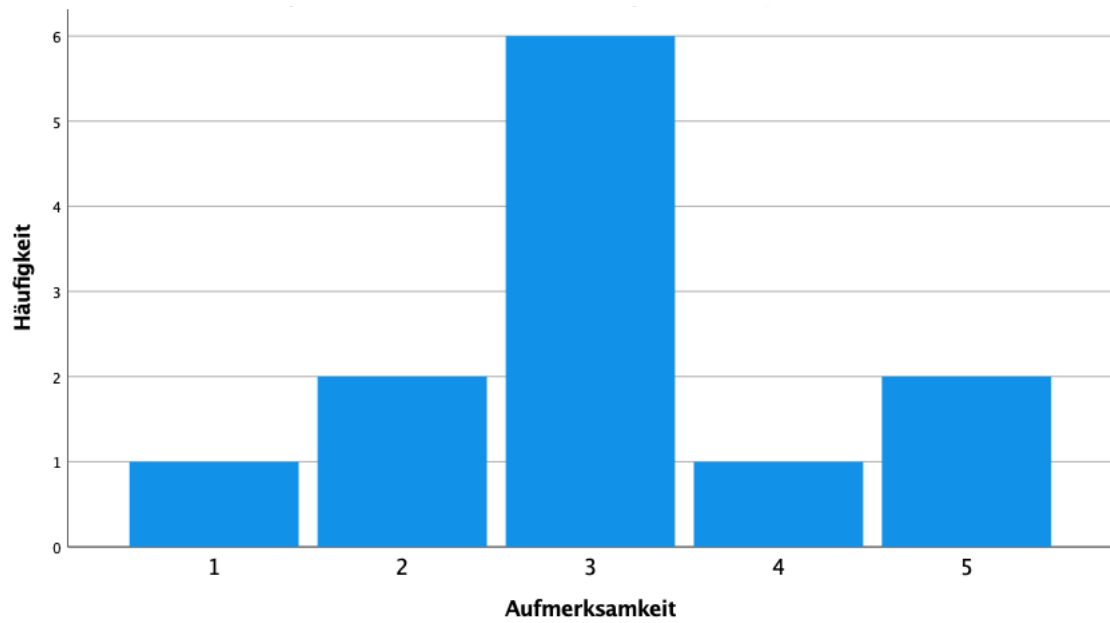


Abbildung 66: Befragungsergebnisse bezüglich der benötigten Aufmerksamkeit bei statisch geführten Implantationen

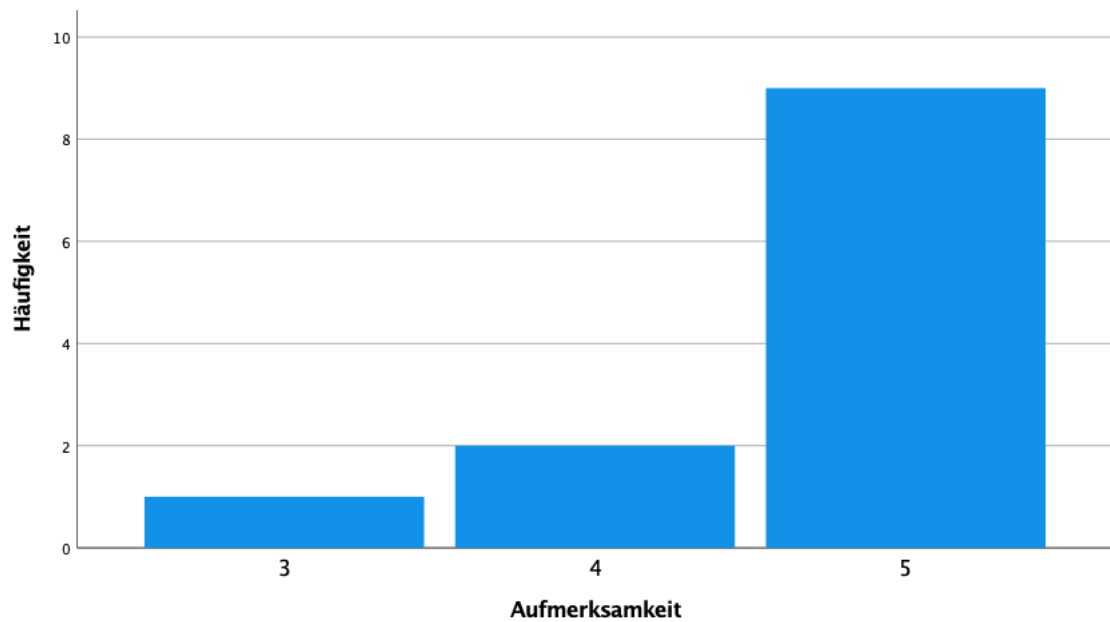


Abbildung 67: Befragungsergebnisse bezüglich der benötigten Aufmerksamkeit bei dynamisch navigierten Implantationen

Die benötigte Aufmerksamkeit wurde in Zahlen von 0 bis 5 angegeben. 0 bedeutete dabei „Sehr wenig Aufmerksamkeit“, während 5 „Sehr viel Aufmerksamkeit“ repräsentierte. Abstufungen konnten mit den dazwischenliegenden Zahlen erreicht werden (Abb. 65 bis 67).

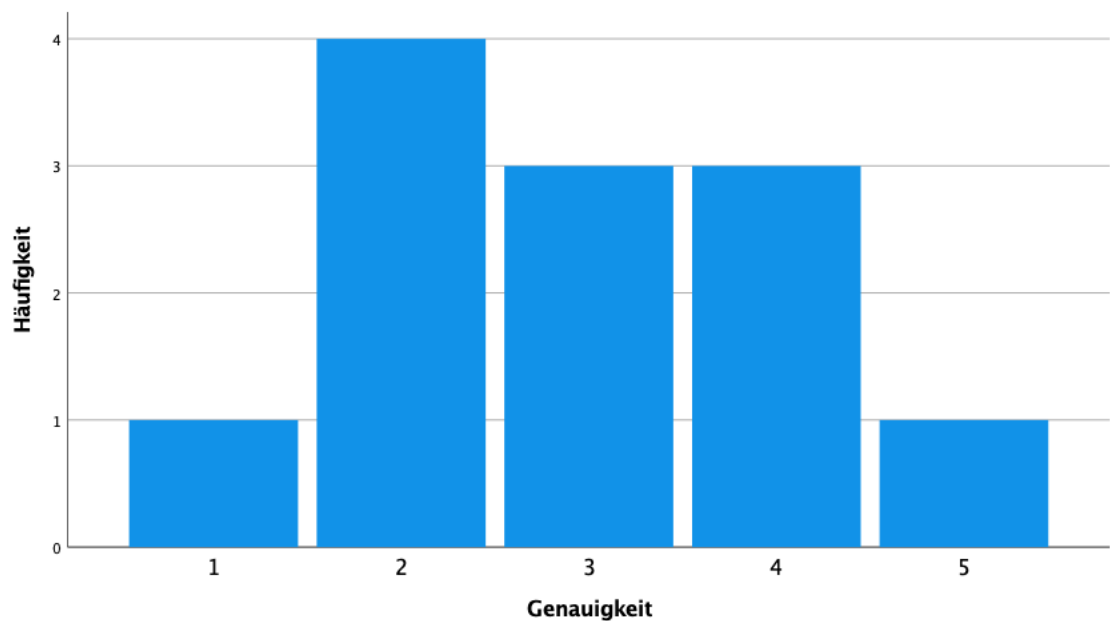


Abbildung 68: Befragungsergebnisse bezüglich der Genauigkeit bei freihand Implantationen

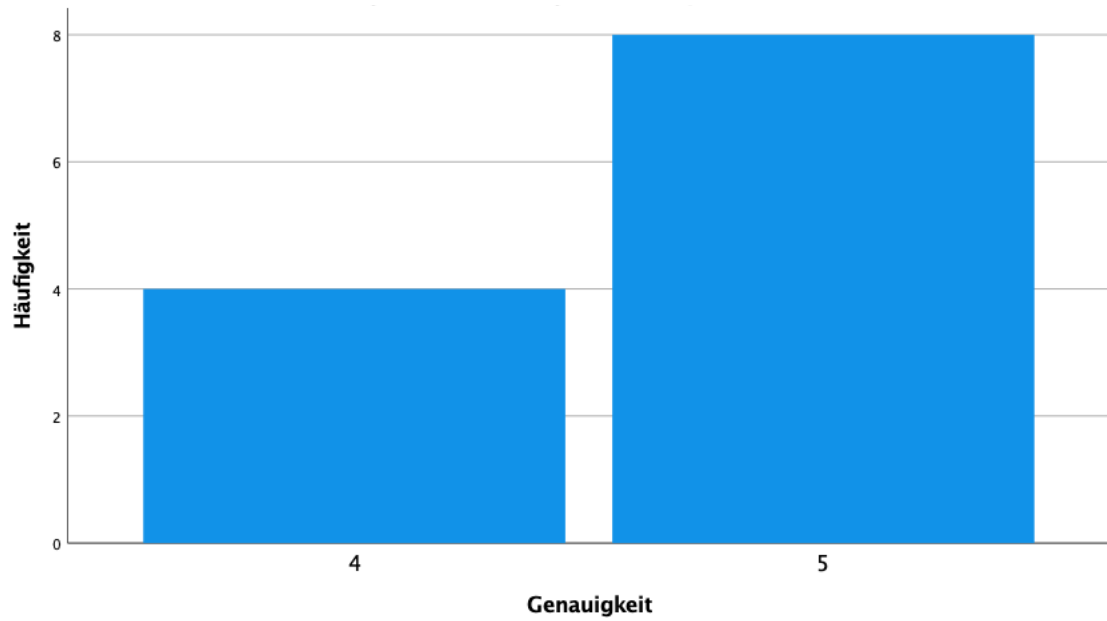


Abbildung 69: Befragungsergebnisse bezüglich der Genauigkeit bei statisch geführten Implantationen

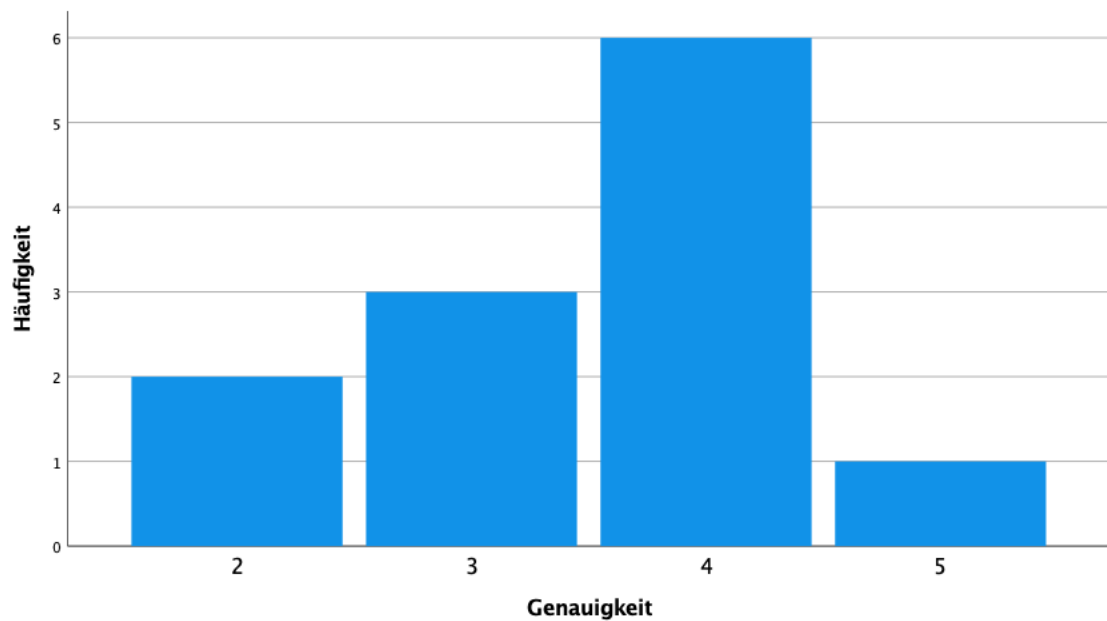


Abbildung 70: Befragungsergebnisse bezüglich der Genauigkeit bei dynamisch navigierten Implantationen

Die empfundene Genauigkeit wurde in Zahlen von 0 bis 5 angegeben. 0 bedeutete dabei „Sehr ungenau“, während 5 „Sehr genau“ repräsentierte. Abstufungen konnten mit den dazwischenliegenden Zahlen erreicht werden (Abb. 68 bis 70).

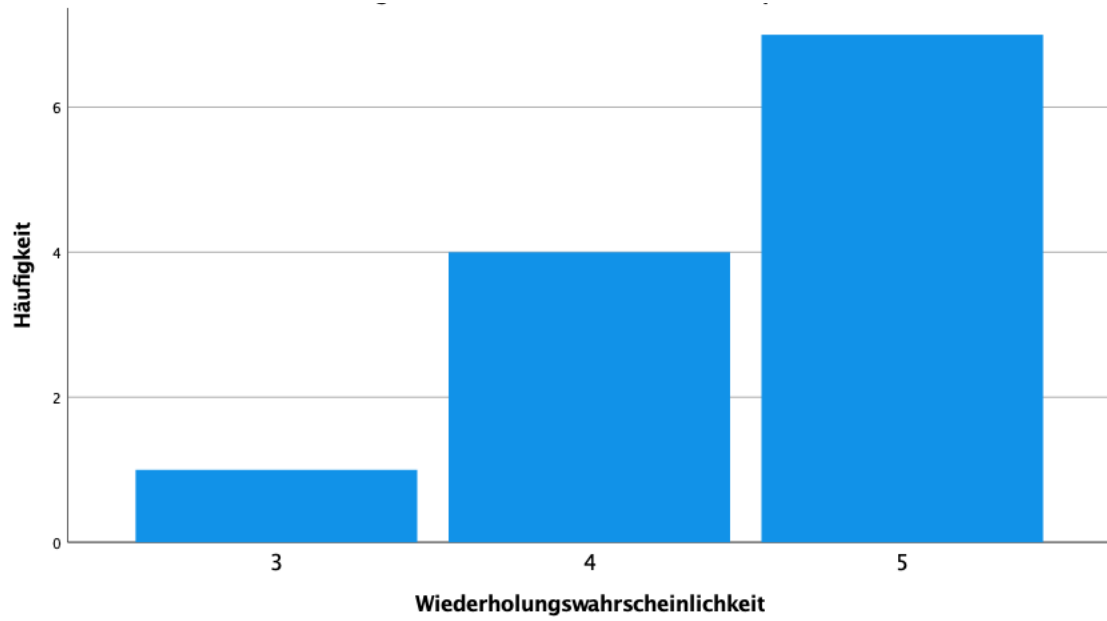


Abbildung 71: Befragungsergebnisse bezüglich der Wiederholungswahrscheinlichkeit von freihand Implantationen

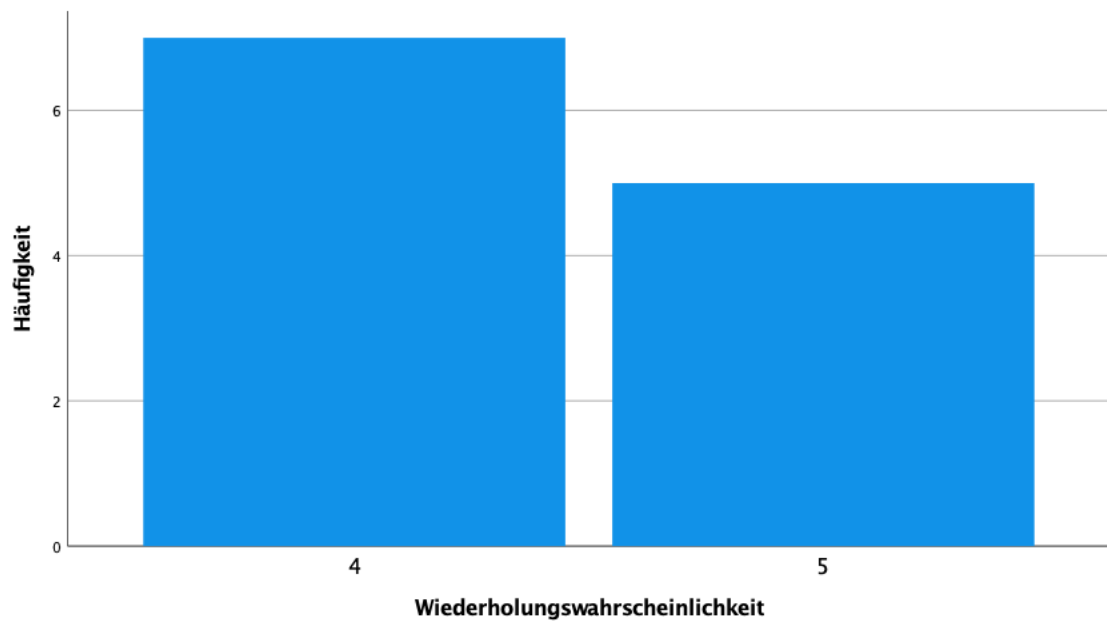


Abbildung 72: Befragungsergebnisse bezüglich der Wiederholungswahrscheinlichkeit von statisch geführten Implantationen

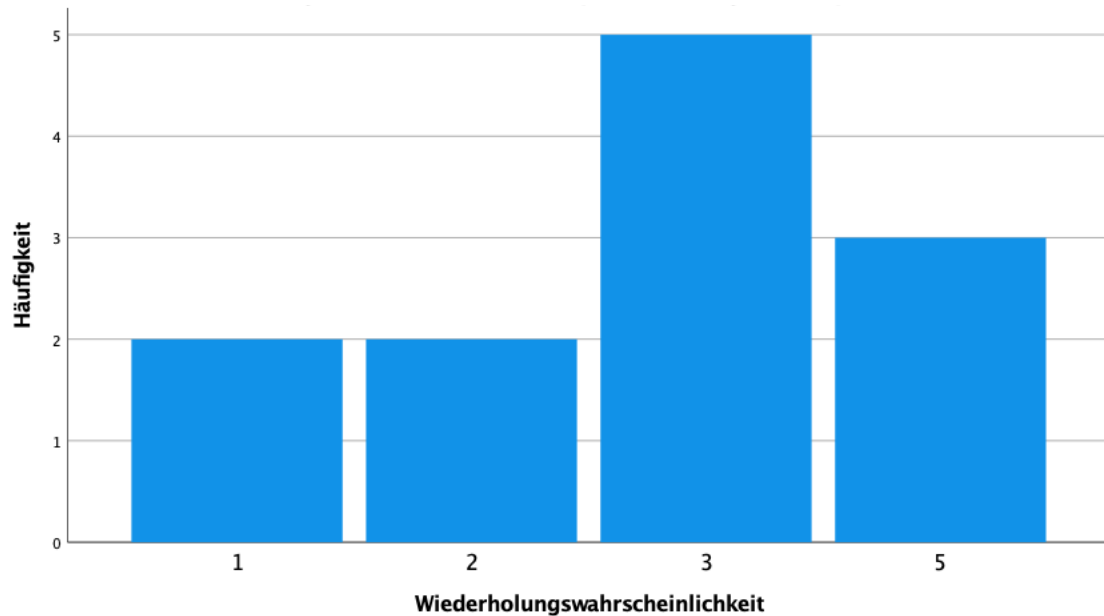


Abbildung 73: Befragungsergebnisse bezüglich der Wiederholungswahrscheinlichkeit von dynamisch navigierten Implantationen

Die Größe der Wiederholungswahrscheinlichkeit wurde in Zahlen von 0 bis 5 angegeben. 0 bedeutete dabei „Sehr unwahrscheinlich“, während 5 „Sehr wahrscheinlich“ repräsentierte. Abstufungen konnten mit den dazwischenliegenden Zahlen erreicht werden (Abb. 71 bis 73).

4.5.1 Vergleich zwischen den studentischen und chirurgischen Operateur*innen

In den Fragen zur Anzahl der pro Jahr inserierten Implantate und den Implantaten, die bereits mit dynamischer Navigation inseriert wurden, hatten die Chirurgen signifikant höhere Werte als die Studierenden (100-200 ± 89,33 Implantate pro Jahr und 0-10 ± 0 Implantate pro Jahr). Zudem gaben Chirurgen signifikant höhere Werte bezüglich ihres Sicherheits- (3,67 ± 1,03 und 2,33 ± 0,52) und Freiheitsgefühls (5,00 ± 0,00 und 4,50 ± 0,55) während der freihand Implantation an als Studierende. Es wurden keine weiteren signifikanten Unterschiede zwischen den Antworten der Gruppen bezüglich der Selbstsicherheits-, Freiheits-, Genauigkeitsgefühl oder der benötigten Aufmerksamkeit während der Implantation gemessen. Ebenso bestand kein signifikanter Unterschied zwischen der Aufbereitungsmethode, welche die Teilnehmer*innen laut ihrer Angabe zukünftig favorisiert anwenden würden.

5 Diskussion

Ziel der Studie war es, die drei Aufbereitungsmethoden freihand, statisch geführt und dynamisch navigiert in ihrer Genauigkeit, Zeiteffizienz und Erlernbarkeit miteinander zu vergleichen. Zudem zählte zu den Zielen der Studie ein Vergleich zwischen erfahrenen Chirurgen und unerfahrenen Studierenden bei der Anwendung der drei unterschiedlichen Aufbereitungsmethoden. Außerdem wurde eine subjektive Befragung der Teilnehmer*innen durchgeführt, um die subjektiven Empfindungen während der Implantation und die präferierte Aufbereitungsmethode der Teilnehmer*innen zu ermitteln.

In unserer Studie zeigte sich, dass bei dem Vergleich der drei verschiedenen Aufbereitungsmethoden statisch geführte gegenüber freihand Implantatpositionen signifikant genauer in der Winkelgenauigkeit, der globalen Abweichung der Implantatschulter und des Implantatapex waren. Die gemessenen Werte der statisch durchgeführten Implantationen in der vorliegenden Studie waren dabei deutlich genauer als die von gemessenen Abweichungen des Winkels ($2,66^\circ$ und $3,50^\circ$), der globalen Abweichung der Implantatschulter (0,67 mm und 1,2 mm) und dem Implantatapex (1,00 mm und 1,5 mm) (87). Dieser Umstand kann dadurch zustande kommen, dass in der Übersichtsarbeit pilot-drill guided Bohrschablonen integriert waren, die mit einer verringerten Genauigkeit der Implantatposition einhergehen als fully guided Bohrschablonen (88). Letztere waren Forschungsgegenstand in dieser Studie. Der nicht signifikante Unterschied in der Operationszeit zwischen der statisch geführten und freihand Implantation steht im Einklang mit einer vorangegangenen Studie (99).

Signifikant überlegen war die dynamisch navigierte der freihand Implantation in den Parametern Winkelgenauigkeit und der globalen Abweichung des Implantatapex'. Bei Berücksichtigung der Operationszeit war die freihand Implantation signifikant kürzer als die bei dynamischer Navigation. Ähnliche Ergebnisse bezüglich der Implantatposition wurden bereits von anderen Studien gemessen (3, 5, 6). Im Gegensatz zu den Ergebnissen der Arbeitsgruppe um Afrashtehfar et al. (98) dauerte die Operationszeit unter dynamisch navigierter

Implantation signifikant länger als bei solchen die freihand durchgeführt wurden, ähnliches wurde bereits in früheren Studien gezeigt (4).

Beim Vergleich zwischen den beiden computergestützten Methoden zeigte sich, dass statisch geführte Implantationen signifikant genauere Implantatpositionen in den Parametern globale Abweichungen an der Implantatschulter erreicht werden konnten. Zudem war die Operationszeit bei statisch geführten Implantationen signifikant kürzer. Diese Ergebnisse stehen im Konflikt mit früheren Studien, in welchen eine signifikant höhere Genauigkeit der dynamisch navigierten Implantation gegenüber der statisch geführten nachgewiesen wurde (3). Die durchschnittlich gemessenen Abweichungen der dynamisch navigierten Implantationen in in-vitro Studien waren bei der systematischen Review in der globalen Abweichung der Implantatschulter (0,46 mm und 1,14 mm) und Winkelungenauigkeit (2,01° und 3,20°) deutlich kleiner als bei den dynamisch navigierten Implantaten innerhalb dieser Studie. Die zum Vergleich mit statisch geführten Implantationen herangezogenen Werte waren mit denen der vorliegenden Studie sehr ähnlich (2,87° und 2,66°) (3). In den meisten Parametern konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den zwei computergestützten Methoden gezeigt werden, was in zwei Studien zuvor ebenfalls festgestellt worden ist (5, 36). Entgegen vorheriger Studien (6, 26, 29, 33, 34) wurden bei der statisch geführten Implantation signifikant genauere Werte in der globalen Abweichung der Implantatschulter als bei der dynamisch navigierten festgestellt. Beim Vergleich der Operationszeiten der beiden computergestützten Methoden konnte gezeigt werden, dass statisch geführte Implantationen mit signifikant kürzeren Operationszeiten assoziiert waren.

Beim alleinigen Betrachten der studentischen Teilnehmer*innen waren die Ergebnisse größtenteils übereinstimmend mit den Gesamtergebnissen der Aufbereitungsmethoden aller Teilnehmer*innen. Lediglich in der benötigten Zeit während der beiden Aufbereitungsmethoden freihand und dynamisch navigiert gab es keine signifikanten Unterschiede. Die chirurgischen Teilnehmer hingegen zeigten keine signifikanten Unterschiede zwischen freihand und dynamisch navigierten Implantationen in der globalen Abweichung des Implantatapex'. Beim

Vergleich zwischen den computergestützten Methoden zeigte sich kein signifikanter Unterschied in der globalen Abweichung der Implantatschulter.

Signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen mit variierender chirurgischer Expertise gab es bei den freihand Implantationen lediglich in der Operationszeit. Die von Studierenden durchgeführten Implantationen dauerten signifikant länger als die der Chirurgen. In den Implantatpositionen gab es keine signifikanten Unterschiede. Bei statisch geführten Implantationen zeigte sich, dass die Gruppe der Chirurgen eine signifikant höhere Winkelgenauigkeit aufwies als die Gruppe der Studierenden. Die Parameter, die bei dynamisch navigierten Implantationen gemessen wurden, unterschieden sich nicht signifikant zwischen den chirurgischen und den studentischen Teilnehmer*innen. Stark variierende Ergebnisse zwischen erfahrenen und unerfahrenen Operateur*innen wie bei Jorba-García et al. (4) konnten in unserer Studie nicht nachgewiesen werden. Die geringen Unterschiede zwischen den beiden Gruppen lassen sich mit der Beobachtung der Arbeitsgruppe von Pellegrino et al. erklären, die feststellten, dass eine reduzierte Operationszeit erreicht werden konnte, wenn ein Chirurg viel Erfahrung sowohl in der Chirurgie als auch mit der dynamisch navigierten Implantation hatte (84). Da sich in unserer Studie keine Expert*innen in der dynamisch navigierten Implantologie befanden und die Operationszeit zwischen den Gruppen nicht signifikant variierte, bekräftigt unsere Studie die Feststellung von Pellegrino et al.. Ebenso haben Studien gezeigt, dass unterschiedliche chirurgische Kompetenz keinen Einfluss auf die Genauigkeit der Implantatposition bei dynamisch Navigation hatte (36, 84).

Die Rolle der unterschiedlichen Implantatpositionen zeigte bei freihand Implantationen in der globalen Abweichung der Implantatschulter einen signifikanten Unterschied zwischen den Implantaten, die in Einzelzahnlücken inseriert und denen, die in eine verkürzte Zahnreihe inseriert wurden. Die Positionierung der Implantate in der verkürzten Zahnreihe wiesen jeweils eine größere Ungenauigkeit der Implantatschulter auf. Diese Beobachtungen wurden bereits zuvor von Putra et al. (88) gemacht, jedoch nur in Bezug auf statisch geführte Implantationen. Diese Abweichungen ließen sich durch computergestützte Implantationshilfen verringern, sodass kein signifikanter

Unterschied mehr zu erkennen war. Somit stehen die Beobachtungen von Putra et al. (88) nicht komplett im Einklang mit denen innerhalb der vorliegenden Studie. Diese Feststellung unterstützt die Ergebnisse von vorherigen Studien, die eine variierende Genauigkeit im Zusammenhang mit der Implantatposition bei dynamisch navigierter Implantation widerlegten (81, 91). Die Arbeitsgruppe um Wu et al. hatte zuvor festgestellt, dass dynamisch navigierte Implantationen im Frontzahnbereich mit einer höheren globalen Abweichung des Implantatapex´ und statisch geführte Implantationen im Seitenzahnbereich mit höheren Winkelabweichungen assoziiert waren (36). Diese Behauptung wird durch die Ergebnisse unserer Studie nicht untermauert, sondern eher für statische fully guided Bohrschablonen entkräftet.

Die Ergebnisse des Fragebogens zeigten, dass sowohl bei der freihand als auch bei der dynamisch geführten Implantation die Teilnehmer*innen sehr viel Aufmerksamkeit benötigten. Für statisch geführte Implantationen war die aufzubringende Aufmerksamkeit hingegen moderat. Die Einschätzung für die Genauigkeit und Sicherheit waren bei freihand und dynamisch navigierten ebenfalls ähnlich. Bei statisch geführten Implantationen wurden hier höhere Angaben erzielt. Diese Ergebnisse waren damit assoziiert, dass die Wiederholungswahrscheinlichkeit für die Methoden freihand und statisch geführte Implantation hoch waren. Dynamisch navigierte Implantationen waren dagegen mit einer niedrigeren Wiederholungswahrscheinlichkeit assoziiert. In Bezug auf die freihand Implantation fühlten sich die chirurgisch erfahrenen Teilnehmer deutlich sicherer und flexibler als die Studierenden ohne entsprechende Erfahrung. Bei der Studie von Ashy et al. (100) hingegen konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen der empfundenen Genauigkeit und Vorhersagbarkeit im Setting einer subjektiven Befragung nach computergestützten und freihand durchgeführten Implantationen gezeigt werden. Die vorliegende Studie war in der Lage, unterschiedliche Ergebnisse zwischen freihand und statisch geführten Implantationen darzulegen. Diese Ergebnisse lassen sich aufgrund der fehlenden Unterscheidung zwischen statisch geführten und dynamisch navigierten Implantationen in der zuvor durchgeführten Befragung vermuten.

Unsere Ergebnisse bezüglich der Operationszeit nach viermalig wiederholter Implantation zeigten, dass es bei allen Aufbereitungsmethoden zu einer Reduktion der Operationszeit kam. Diese Reduktion war bei der dynamisch navigierten Implantation am höchsten und bei der statisch geführten Implantation am geringsten. Bei den Methoden freihand und statisch geführt nahm die benötigte Zeit für die Implantation kontinuierlich ab, was zu einer erkennbaren Lernkurve führte. Die Lernkurve bei freihand inserierten Implantaten war dabei steiler als die bei statisch geführten Implantationen. Bei der dynamisch navigierten Implantation hingegen wurde keine Lernkurve mit kontinuierlich abnehmenden Operationszeiten festgestellt. Stattdessen schwankten die Ergebnisse, wobei ein Trend zu einer abnehmenden Operationszeit zu erkennen war. Die gemessenen Operationszeiten der aufeinanderfolgenden Implantationen ergänzen die Ergebnisse von Block et al. (85), Marques-Guasch et al. (91) sowie Feng et al. (83), die bei einer höheren Anzahl von Implantaten die Lernkurve in Bezug auf die Genauigkeit von dynamisch navigierten Implantationen untersucht haben. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die wiederholte Anwendung der dynamisch navigierten Implantation zu einer höheren Genauigkeit der Implantatposition und zu einer verringerten Operationszeit führt.

Sun et al. (95) beobachteten eine sichere und reproduzierbare Implantation mit dynamischem Navigationssystem nach dem fünften aufeinanderfolgend inserierten Implantat. Diese Beobachtung konnte in der vorliegenden Studie nicht gemacht werden. Der Grund hierfür ist die niedrigere Anzahl an inserierten Implantaten pro Aufbereitungsmethode.

Nach der mehrmaligen Wiederholung einer Aufbereitungsmethode kommt es sowohl bei unerfahrenen studentischen als auch erfahrenen chirurgischen Teilnehmern zur Reduktion der benötigten Operationszeit. Bei freihand und dynamisch geführten Implantationen wiesen die studentischen Teilnehmer*innen eine stärkere Verringerung der Operationszeit auf als die chirurgischen Teilnehmer. Bei der dynamisch navigierten Implantation ließ sich der umgekehrte Fall beobachten. Diese Ergebnisse lassen vermuten, dass erfahrene Operateure mit den bekannten Methoden eine flachere Lernkurve in Bezug auf die für die

Implantation benötigte Zeit vorweisen als solche, die unerfahren sind. Bei Aufbereitungsmethoden, die weder den erfahrenen noch den unerfahrenen Teilnehmer*innen geläufig waren, lässt sich eine steilere Lernkurve bei den erfahrenen Teilnehmern nachweisen.

Zu Beginn der dynamisch navigierten Implantation ist kein großer Unterschied zwischen den chirurgischen und studentischen Teilnehmer*innen zu erkennen, was den Beobachtungen von Pellegrino et al. (84) entspricht. Jedoch kommt es innerhalb der aufeinanderfolgenden Implantationen zu einer deutlich stärkeren Verbesserung bei den chirurgischen Teilnehmern. Hierbei kommt es zur Demonstration des von Krüger et al. (101) beschriebenen Phänomens, die Fähigkeit, zuvor gemachte Erfahrungen auf neue Situationen übertragen zu können, welches als eine Folge des Lernens zu verstehen ist.

Ähnliche Experimente wurden bereits von anderen Wissenschaftler*innen durchgeführt, die jedoch methodisch anders aufgebaut waren. In der vorliegenden Studie wurden die Implantate manuell inseriert. Diese Art der Insertion wurde ebenfalls von einer anderen Studie gewählt (8), kann jedoch mit einer größeren Ungenauigkeit der Implantatposition als mechanisch inserierte Implantate assoziiert sein. In einem Großteil der zuvor durchgeführten Studien wurde nicht erwähnt, auf welche Art die Implantate in den Bohrstollen eingebracht wurden (6, 24, 26, 29, 33, 34, 36, 82, 84, 85). In lediglich drei Studien wurde erwähnt, dass die Implantate mechanisch in den Bohrstollen inseriert wurden (4, 81, 83). Die statische Führung in der vorliegenden Studie waren fully guided Bohrschablonen, wie sie bei zwei weiteren Studien zum Einsatz kam (26, 29). Statische pilot drill Schablonen wurden hingegen bei drei anderen Studien verwendet (6, 34, 89), während andere Forschungsgruppen nicht näher erwähnt haben, welche Art von Bohrschablone zum Einsatz kam (24, 33, 36). Eine große Variation unterschiedlicher Implantatsystemen wurden in den bisherigen Studien eingesetzt, die verschiedene Aufbereitungsmethoden untersucht haben. Zu den Implantatsystemen zählen Straumann BL (26, 29, 34), BLT (29, 82), TL (29), Camlog iSy (81), BioHorizons (33), Callus Pro (6), Nobel Replace Tapered Groovy (83) und Ticare InHex standard (4). In einigen Studien wurde nicht näher darauf eingegangen mit welchen Implantatsystemen die

Studie durchgeführt wurde (24, 36, 84, 85). Die vorliegende experimentelle Studie untersuchte zum ersten Mal in diesem Kontext die Straumann BLX und TLX Implantate. Zudem ist sie eine der wenigen, die tissue level Implantate verwendete. Für die Analyse der Implantatposition wurden in der Vergangenheit zwei unterschiedliche Möglichkeiten gewählt. Zum einen konnten postoperativ mit dem IOS STL-Daten erstellt werden (81, 82) und zum anderen bestand die Möglichkeit, DVTs anzufertigen (4, 6, 24, 26, 29, 33, 34, 36, 83-85). Die Genauigkeit der Daten scheint bei der IOS Methode (81) höher zu sein. Hierfür könnten die materialbedingten Artefakte um die Implantate beim DVT verantwortlich sein. Außerdem ist ein IOS aus der Perspektive des Strahlenschutzes zu bevorzugen, da sich hierdurch die Exposition ionisierender Strahlung vermindern lässt.

Mit Hilfe der Ergebnisse aus der vorliegenden Arbeit lässt sich die Nullhypothese: „Die dynamische navigierte Implantation wird weder von der statisch geführten noch von der Freihand-Methode in den gemessenen Parametern abweichen.“ widerlegen. Zwischen allen Aufbereitungsmethoden gab es signifikante

Unterschiede in der Genauigkeit der Implantatposition. Tatsächlich erwies sich die Methode statisch geführt als genaueste Methode.

Die weitere Nullhypothese: „Die erfahrenen Chirurgen und unerfahrenen Studenten werden sich in keinem Parameter unterscheiden.“ wurde ebenfalls durch die Ergebnisse der vorliegenden Studie widerlegt. Sowohl in der Operationszeit als auch in der Genauigkeit der Implantatpositionen gab es signifikante Unterschiede zwischen den Studierenden und den Chirurgen.

Weiterhin bleibt die Frage offen, ob sich die festgestellten Ergebnisse nur auf in-vitro durchgeführte Implantationen beziehen lassen oder ob sie auch eine Gültigkeit für klinische Implantationen zeigen. Diese Frage muss in weiteren Studien klinisch untersucht werden.

6 Zusammenfassung

Hintergrund:

Ziel der Studie war es, die Aufbereitungsmethoden freihand, statisch geführt und dynamisch navigiert hinsichtlich ihrer Genauigkeit, Zeiteffizienz und Erlernbarkeit miteinander zu vergleichen. Zudem wurde eine anonyme Umfrage durchgeführt, um die Empfindungen der Teilnehmer*innen während der unterschiedlichen Aufbereitungsmethoden zu evaluieren.

Material und Methode:

Hierfür wurden 144 Implantate in 36 Modellen inseriert. Jeder der zwölf Teilnehmer*innen inserierte jeweils vier Implantate in drei verschiedene Modelle. Das erste Modell wurde mit der Methode freihand, das zweite statisch geführt und das dritte dynamisch navigiert zur Implantation aufbereitet. Während der Implantation wurde die benötigte Zeit gemessen und anschließend wurde die Position der Implantate digital analysiert.

Ergebnisse:

Die Ergebnisse zeigten, dass sowohl statisch geführte [(Winkel-, Schulter- und Apex-Abweichung ($p < 0,001$))] als auch dynamisch navigierte [(Winkel- und Apex-Abweichung ($p < 0,050$))] den freihand Implantationen in der Genauigkeit der Implantatposition signifikant überlegen waren. Zudem waren die statisch geführten Implantationen in der globalen Abweichung der Implantatschulter ($p < 0,006$) und der Operationszeit ($p < 0,003$) statistisch signifikant niedriger als dynamisch navigierte. Die Erlernbarkeit war für die Methoden freihand und statisch geführt mit einer echten Lernkurve assoziiert, während bei den Methoden freihand und statisch geführt eine signifikante Verkürzung der Operationszeit innerhalb von vier aufeinanderfolgenden Implantaten ersichtlich war.

Conclusio:

Die Ergebnisse dieser Arbeit deuten darauf hin, dass computergestützte Implantationen mit einer verbesserten Genauigkeit bei der Umsetzung von

präoperativ geplanten Implantatpositionen im Vergleich zu freihand inserierten Implantaten assoziiert sind. Die Methoden scheinen unterschiedlich schwer erlernbar zu sein. Je nach Methode ist mit unterschiedlichen subjektiven Empfindungen während den Implantationen zu rechnen.

7 Literaturverzeichnis

1. Pjetursson BE, Thoma D, Jung R, Zwahlen M, Zembic A. A systematic review of the survival and complication rates of implant-supported fixed dental prostheses (FDPs) after a mean observation period of at least 5 years. *Clin Oral Implants Res.* 2012;23 Suppl 6:22-38.
2. Kurt BR. [Template guided surgery with the open-access software "smop"]. *Swiss Dent J.* 2014;124(3):305-23.
3. Jorba-García A, González-Barnadas A, Camps-Font O, Figueiredo R, Valmaseda-Castellón E. Accuracy assessment of dynamic computer-aided implant placement: a systematic review and meta-analysis. *Clin Oral Investig.* 2021;25(5):2479-94.
4. Jorba-García A, Figueiredo R, González-Barnadas A, Camps-Font O, Valmaseda-Castellón E. Accuracy and the role of experience in dynamic computer guided dental implant surgery: An in-vitro study. *Med Oral Patol Oral Cir Bucal.* 2019;24(1):e76-e83.
5. Wang F, Wang Q, Zhang J. Role of Dynamic Navigation Systems in Enhancing the Accuracy of Implant Placement: A Systematic Review and Meta-Analysis of Clinical Studies. *J Oral Maxillofac Surg.* 2021;79(10):2061-70.
6. Kivovics M, Takács A, Péntzes D, Németh O, Mijiritsky E. Accuracy of dental implant placement using augmented reality-based navigation, static computer assisted implant surgery, and the free-hand method: An in vitro study. *J Dent.* 2022;119:104070.
7. Hoffmann J, Westendorff C, Gomez-Roman G, Reinert S. Accuracy of navigation-guided socket drilling before implant installation compared to the conventional free-hand method in a synthetic edentulous lower jaw model. *Clin Oral Implants Res.* 2005;16(5):609-14.
8. Kühl S, Zürcher S, Mahid T, Müller-Gerbl M, Filippi A, Cattin P. Accuracy of full guided vs. half-guided implant surgery. *Clin Oral Implants Res.* 2013;24(7):763-9.
9. Nickenig HJ, Wichmann M, Hamel J, Schlegel KA, Eitner S. Evaluation of the difference in accuracy between implant placement by virtual planning data and surgical guide templates versus the conventional free-hand method - a combined in vivo - in vitro technique using cone-beam CT (Part II). *J Craniomaxillofac Surg.* 2010;38(7):488-93.
10. BouSerhal C, Jacobs R, Quirynen M, van Steenberghe D. Imaging technique selection for the preoperative planning of oral implants: a review of the literature. *Clin Implant Dent Relat Res.* 2002;4(3):156-72.
11. Tyndall DA, Brooks SL. Selection criteria for dental implant site imaging: a position paper of the American Academy of Oral and Maxillofacial radiology. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2000;89(5):630-7.
12. Tyndall DA, Price JB, Tetradis S, Ganz SD, Hildebolt C, Scarfe WC. Position statement of the American Academy of Oral and Maxillofacial Radiology on selection criteria for the use of radiology in dental implantology with emphasis on cone beam computed tomography. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol.* 2012;113(6):817-26.
13. Vazquez L, Saulacic N, Belser U, Bernard JP. Efficacy of panoramic radiographs in the preoperative planning of posterior mandibular implants: a prospective clinical study of 1527 consecutively treated patients. *Clin Oral Implants Res.* 2008;19(1):81-5.

14. Loubele M, Bogaerts R, Van Dijck E, Pauwels R, Vanheusden S, Suetens P, et al. Comparison between effective radiation dose of CBCT and MSCT scanners for dentomaxillofacial applications. *Eur J Radiol.* 2009;71(3):461-8.
15. Ludlow JB, Ivanovic M. Comparative dosimetry of dental CBCT devices and 64-slice CT for oral and maxillofacial radiology. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2008;106(1):106-14.
16. Suomalainen A, Kiljunen T, Kaser Y, Peltola J, Kortenesniemi M. Dosimetry and image quality of four dental cone beam computed tomography scanners compared with multislice computed tomography scanners. *Dentomaxillofac Radiol.* 2009;38(6):367-78.
17. Hirsch E, Wolf U, Heinicke F, Silva MA. Dosimetry of the cone beam computed tomography Veraviewepocs 3D compared with the 3D Accuitomo in different fields of view. *Dentomaxillofac Radiol.* 2008;37(5):268-73.
18. Poeschl PW, Schmidt N, Guevara-Rojas G, Seemann R, Ewers R, Zipko HT, et al. Comparison of cone-beam and conventional multislice computed tomography for image-guided dental implant planning. *Clin Oral Investig.* 2013;17(1):317-24.
19. Al-Ekrish AA, Ekram M. A comparative study of the accuracy and reliability of multidetector computed tomography and cone beam computed tomography in the assessment of dental implant site dimensions. *Dentomaxillofac Radiol.* 2011;40(2):67-75.
20. Luckey R. Navigationsimplantologie.2010.
21. Baysal U. Analyse der metrischen Abweichung von dreidimensional geplanten Implantatpositionen [Medical Dissertation]. Köln: Universität zu Köln; 2012.
22. Marmulla R, Brief J., Heurich T., Mühling J., S. H. Perspektiven in der rechnergestützten Implantologie. Köln: Deutscher Ärzte-Verlag; 2002.
23. Behneke A, Burwinkel, M., , B. d'Hoedt NB. Clinical assessment of the reliability of a computer-aided implant planning concept using laboratory-fabricated templates based on cone beam computed tomography. *Z Zahnärztl Impl* 2009;25 (4)(Deutscher Ärzte-Verlag).
24. Somogyi-Ganss E, Holmes HI, Jokstad A. Accuracy of a novel prototype dynamic computer-assisted surgery system. *Clin Oral Implants Res.* 2015;26(8):882-90.
25. Schnutenhaus S, Edelmann C, Knipper A, Luthardt RG. Accuracy of Dynamic Computer-Assisted Implant Placement: A Systematic Review and Meta-Analysis of Clinical and In Vitro Studies. *J Clin Med.* 2021;10(4).
26. Yimarj P, Subbalekha K, Dhanesuan K, Siriwatana K, Mattheos N, Pimkhaokham A. Comparison of the accuracy of implant position for two-implants supported fixed dental prosthesis using static and dynamic computer-assisted implant surgery: A randomized controlled clinical trial. *Clin Implant Dent Relat Res.* 2020;22(6):672-8.
27. Gordils A, inventorApparatus and process for parallel placement of bone-integrated cylindrical type implants in dentistr. Europe1996.
28. Palacci P, inventorIndicating device and a method for marking out and forming one or more attachment points for a fixture in an area of the human body, preferably the jaw. United States1998.
29. Kaewsiri D, Panmekiate S, Subbalekha K, Mattheos N, Pimkhaokham A. The accuracy of static vs. dynamic computer-assisted implant surgery in single

- tooth space: A randomized controlled trial. *Clin Oral Implants Res.* 2019;30(6):505-14.
30. Kang SH, Lee JW, Lim SH, Kim YH, Kim MK. Verification of the usability of a navigation method in dental implant surgery: in vitro comparison with the stereolithographic surgical guide template method. *J Craniomaxillofac Surg.* 2014;42(7):1530-5.
31. Vercruyssen M, Fortin T, Widmann G, Jacobs R, Quirynen M. Different techniques of static/dynamic guided implant surgery: modalities and indications. *Periodontol 2000.* 2014;66(1):214-27.
32. formlabs. SLA vs. DLP: 3D-Drucktechnologien für Kunstharze im Vergleich 2020 [Available from: <https://formlabs.com/de/blog/vergleich-3d-druck-sla-dlp/>].
33. Mediavilla Guzmán A, Riad Deglow E, Zubizarreta-Macho Á, Agustín-Panadero R, Hernández Montero S. Accuracy of Computer-Aided Dynamic Navigation Compared to Computer-Aided Static Navigation for Dental Implant Placement: An In Vitro Study. *J Clin Med.* 2019;8(12).
34. Spille J, Jin F, Behrens E, Açil Y, Lichtenstein J, Naujokat H, et al. Comparison of implant placement accuracy in two different preoperative digital workflows: navigated vs. pilot-drill-guided surgery. *Int J Implant Dent.* 2021;7(1):45.
35. Tahmaseb A, De Clerck R, Aartman I, Wismeijer D. Digital protocol for reference-based guided surgery and immediate loading: a prospective clinical study. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2012;27(5):1258-70.
36. Wu D, Zhou L, Yang J, Zhang B, Lin Y, Chen J, et al. Accuracy of dynamic navigation compared to static surgical guide for dental implant placement. *Int J Implant Dent.* 2020;6(1):78.
37. Jaana-Sophia Kern, Wolfart S. Implantatprothetische Versorgung des zahnlosen Oberkiefers. S3-Leitlinie (Langfassung): AWMF online; 2013.
38. Grisar K, Sinha D, Schoenaers J, Dormaar T, Politis C. Retrospective Analysis of Dental Implants Placed Between 2012 and 2014: Indications, Risk Factors, and Early Survival. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2017;32(3):649-54.
39. Diz P, Scully C, Sanz M. Dental implants in the medically compromised patient. *J Dent.* 2013;41(3):195-206.
40. Chanavaz M. Patient screening and medical evaluation for implant and preprosthetic surgery. *J Oral Implantol.* 1998;24(4):222-9.
41. Gomez-de Diego R, Mang-de la Rosa Mdel R, Romero-Perez MJ, Cutando-Soriano A, Lopez-Valverde-Centeno A. Indications and contraindications of dental implants in medically compromised patients: update. *Med Oral Patol Oral Cir Bucal.* 2014;19(5):e483-9.
42. Linkow LI. Atypical implantations for anatomically contraindicated situations. *Dent Concepts.* 1967;11(5):11-7.
43. Buser D, Bragger U. [Two-part ITI-hollow cylinder and hollow screw implant]. *Phillip J.* 1989;6(5):263-74.
44. Pruin EH. [Experiences with intraosseous implantations]. *Dtsch Zahnarztl Z.* 1970;25(2):337.
45. Scialom J. Implants aiguilles (pin implants). *J Oral Implant Transplant Surg.* 1965;11:18-23.
46. D. Buser, B. Maeglin, S. Steinemann, H. Stich, Zypen Evd. *Orale Implantologie.* Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 1988.
47. Schroeder A, Pohler O, Sutter F. [Tissue reaction to an implant of a titanium hollow cylinder with a titanium surface spray layer]. *SSO Schweiz Monatsschr Zahnheilkd.* 1976;86(7):713-27.

48. Branemark PI, Adell R, Breine U, Hansson BO, Lindstrom J, Ohlsson A. Intra-osseous anchorage of dental prostheses. I. Experimental studies. *Scand J Plast Reconstr Surg*. 1969;3(2):81-100.
49. Branemark PI, Hansson BO, Adell R, Breine U, Lindstrom J, Hallen O, et al. Osseointegrated implants in the treatment of the edentulous jaw. Experience from a 10-year period. *Scand J Plast Reconstr Surg Suppl*. 1977;16:1-132.
50. Schroeder A, van der Zypen E, Stich H, Sutter F. The reactions of bone, connective tissue, and epithelium to endosteal implants with titanium-sprayed surfaces. *J Maxillofac Surg*. 1981;9(1):15-25.
51. Liu X, Chu PK, Ding C. Surface modification of titanium, titanium alloys, and related materials for biomedical applications. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2004;47(3):49-121.
52. McCracken M. Dental implant materials: commercially pure titanium and titanium alloys. *J Prosthodont*. 1999;8(1):40-3.
53. Siegenthaler DW, Jung RE, Holderegger C, Roos M, Hammerle CH. Replacement of teeth exhibiting periapical pathology by immediate implants: a prospective, controlled clinical trial. *Clin Oral Implants Res*. 2007;18(6):727-37.
54. Adell R, Lekholm U, Rockler B, Branemark PI. A 15-year study of osseointegrated implants in the treatment of the edentulous jaw. *Int J Oral Surg*. 1981;10(6):387-416.
55. Ledermann D, Schroeder A. [Clinical experiences with the ITI hollow cylinder implant]. *SSO Schweiz Monatsschr Zahnheilkd*. 1981;91(5):349-67.
56. Smeets R, Stadlinger B, Schwarz F, Beck-Broichsitter B, Jung O, Precht C, et al. Impact of Dental Implant Surface Modifications on Osseointegration. *Biomed Res Int*. 2016;2016:6285620.
57. Aghaloo TL, Moy PK. Which hard tissue augmentation techniques are the most successful in furnishing bony support for implant placement? *Int J Oral Maxillofac Implants*. 2007;22 Suppl:49-70.
58. El-Banna A, Bissa MW, Khurshid Z, Zohaib S, Asiri FYI, Zafar MS. 4 - Surface modification techniques of dental implants. In: Zafar MS, Khurshid Z, Khan AS, Najeeb S, Sefat F, editors. *Dental Implants*: Woodhead Publishing; 2020. p. 49-68.
59. Ionescu AC, Brambilla E, Azzola F, Ottobelli M, Pellegrini G, Francetti LA. Laser microtextured titanium implant surfaces reduce in vitro and in situ oral biofilm formation. *PLoS One*. 2018;13(9):e0202262.
60. Trisi P, Rao W. Bone classification: clinical-histomorphometric comparison. *Clin Oral Implants Res*. 1999;10(1):1-7.
61. FROMOVICH O, DADA K, PARIENTÉ LO, DAAS M. BLX: a new generation of self-drilling implants. *Quintessence*. 2019;Special issue(Special Issue).
62. AG IS. Straumann® TLX Legendäres Tissue Level trifft auf Sofortversorgung 2021 [Available from: <https://www.straumann.com/ch/de/discover/tlx/heropage.html>].
63. Tarnow DP, Cho SC, Wallace SS. The effect of inter-implant distance on the height of inter-implant bone crest. *J Periodontol*. 2000;71(4):546-9.
64. Pozzi A, Arcuri L, Carosi P, Nardi A, Kan J. Clinical and radiological outcomes of novel digital workflow and dynamic navigation for single-implant immediate loading in aesthetic zone: 1-year prospective case series. *Clin Oral Implants Res*. 2021;32(12):1397-410.
65. Forna N, Agop-Forna D. Esthetic aspects in implant-prosthetic rehabilitation. *Med Pharm Rep*. 2019;92(Suppl No 3):S6-s13.

66. Buser D, Bornstein MM, Weber HP, Grutter L, Schmid B, Belser UC. Early implant placement with simultaneous guided bone regeneration following single-tooth extraction in the esthetic zone: a cross-sectional, retrospective study in 45 subjects with a 2- to 4-year follow-up. *J Periodontol.* 2008;79(9):1773-81.
67. Buser D, Halbritter S, Hart C, Bornstein MM, Grutter L, Chappuis V, et al. Early implant placement with simultaneous guided bone regeneration following single-tooth extraction in the esthetic zone: 12-month results of a prospective study with 20 consecutive patients. *J Periodontol.* 2009;80(1):152-62.
68. Buser D, Wittneben J, Bornstein MM, Grutter L, Chappuis V, Belser UC. Stability of contour augmentation and esthetic outcomes of implant-supported single crowns in the esthetic zone: 3-year results of a prospective study with early implant placement postextraction. *J Periodontol.* 2011;82(3):342-9.
69. Linkevicius T, Puisys A, Vindasiute E, Linkeviciene L, Apse P. Does residual cement around implant-supported restorations cause peri-implant disease? A retrospective case analysis. *Clin Oral Implants Res.* 2013;24(11):1179-84.
70. Johansson B, Friberg B, Nilson H. Digitally planned, immediately loaded dental implants with prefabricated prostheses in the reconstruction of edentulous maxillae: a 1-year prospective, multicenter study. *Clin Implant Dent Relat Res.* 2009;11(3):194-200.
71. Meloni SM, De Riu G, Pisano M, Cattina G, Tullio A. Implant treatment software planning and guided flapless surgery with immediate provisional prosthesis delivery in the fully edentulous maxilla. A retrospective analysis of 15 consecutively treated patients. *Eur J Oral Implantol.* 2010;3(3):245-51.
72. D'Haese J, Ackhurst J, Wismeijer D, De Bruyn H, Tahmaseb A. Current state of the art of computer-guided implant surgery. *Periodontol 2000.* 2017;73(1):121-33.
73. Komiyama A, Klinge B, Hultin M. Treatment outcome of immediately loaded implants installed in edentulous jaws following computer-assisted virtual treatment planning and flapless surgery. *Clin Oral Implants Res.* 2008;19(7):677-85.
74. Pozzi A, Polizzi G, Moy PK. Guided surgery with tooth-supported templates for single missing teeth: A critical review. *Eur J Oral Implantol.* 2016;9 Suppl 1:S135-53.
75. Vincent K, Manni LL, Mainjot A, Lecloux G, Lambert F. An individualized approach for a one-abutment one-time protocol using fully guided implant surgery: a 4-year follow-up case series. *Int J Comput Dent.* 2022;25(1):83-98.
76. Hanozin B, Li Manni L, Lecloux G, Bacevic M, Lambert F. Digital vs. conventional workflow for one-abutment one-time immediate restoration in the esthetic zone: a randomized controlled trial. *Int J Implant Dent.* 2022;8(1):7.
77. Makarov N, Pompa G, Papi P. Computer-assisted implant placement and full-arch immediate loading with digitally prefabricated provisional prostheses without cast: a prospective pilot cohort study. *Int J Implant Dent.* 2021;7(1):80.
78. van Steenberghe D, Glauser R, Blomback U, Andersson M, Schutyser F, Pettersson A, et al. A computed tomographic scan-derived customized surgical template and fixed prosthesis for flapless surgery and immediate loading of implants in fully edentulous maxillae: a prospective multicenter study. *Clin Implant Dent Relat Res.* 2005;7 Suppl 1:S111-20.
79. Gargallo-Albiol J, Barootchi S, Salomó-Coll O, Wang HL. Advantages and disadvantages of implant navigation surgery. A systematic review. *Ann Anat.* 2019;225:1-10.

80. Hämmerle CH, Cordaro L, van Assche N, Benic GI, Bornstein M, Gamper F, et al. Digital technologies to support planning, treatment, and fabrication processes and outcome assessments in implant dentistry. Summary and consensus statements. The 4th EAO consensus conference 2015. *Clin Oral Implants Res.* 2015;26 Suppl 11:97-101.
81. Edelmann C, Wetzel M, Knipper A, Luthardt RG, Schnutenhaus S. Accuracy of Computer-Assisted Dynamic Navigation in Implant Placement with a Fully Digital Approach: A Prospective Clinical Trial. *J Clin Med.* 2021;10(9).
82. Schnutenhaus S, Knipper A, Wetzel M, Edelmann C, Luthardt R. Accuracy of Computer-Assisted Dynamic Navigation as a Function of Different Intraoral Reference Systems: An In Vitro Study. *Int J Environ Res Public Health.* 2021;18(6).
83. Feng Y, Yao Y, Yang X. Effect of a dynamic navigation device on the accuracy of implant placement in the completely edentulous mandible: An in vitro study. *J Prosthet Dent.* 2022.
84. Pellegrino G, Bellini P, Cavallini PF, Ferri A, Zacchino A, Taraschi V, et al. Dynamic Navigation in Dental Implantology: The Influence of Surgical Experience on Implant Placement Accuracy and Operating Time. An in Vitro Study. *Int J Environ Res Public Health.* 2020;17(6).
85. Block MS, Emery RW, Lank K, Ryan J. Implant Placement Accuracy Using Dynamic Navigation. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2017;32(1):92-9.
86. Ma B, Park T, Chun I, Yun K. The accuracy of a 3D printing surgical guide determined by CBCT and model analysis. *J Adv Prosthodont.* 2018;10(4):279-85.
87. Wismeijer D, Joda T, Flügge T, Fokas G, Tahmaseb A, Bechelli D, et al. Group 5 ITI Consensus Report: Digital technologies. *Clinical Oral Implants Research.* 2018;29(S16):436-42.
88. Putra RH, Yoda N, Astuti ER, Sasaki K. The accuracy of implant placement with computer-guided surgery in partially edentulous patients and possible influencing factors: A systematic review and meta-analysis. *J Prosthodont Res.* 2022;66(1):29-39.
89. Demetoglu U, Bilge S, Aslan S, Simsek HO. Comparison of the accuracy of pilot-drill-guided and fully guided implant surgery with dynamic navigation. In vitro model study. *J Oral Implantol.* 2021.
90. Deeb JG, Frantar A, Deeb GR, Carrico CK, Rener-Sitar K. In Vitro Comparison of Time and Accuracy of Implant Placement Using Trephine and Conventional Drilling Techniques Under Dynamic Navigation. *J Oral Implantol.* 2021;47(3):199-204.
91. Marques-Guasch J, Rodriguez-Bauza R, Satorres-Nieto M, Wang HL, Hernandez-Alfaro F, Gargallo-Albiol J. Accuracy of dynamic implant navigation surgery performed by a novice operator. A preliminary study in a cadaveric model. *Int J Comput Dent.* 2022;0(0):0.
92. Hilgard ERB, Gordon H. *Theorien des Lernens I und II.* Stuttgart: Ernst Klett Verlag.; 1973.
93. Thorndike EL. Animal intelligence: An experimental study of the associative processes in animals. *The Psychological Review: Monograph Supplements.* 1898;(4), i-109.
94. Waldman JD, Yourstone SA, Smith HL. Learning curves in health care. *Health Care Manage Rev.* 2003;28(1):41-54.
95. Sun TM, Lan TH, Pan CY, Lee HE. Dental implant navigation system guide the surgery future. *Kaohsiung J Med Sci.* 2018;34(1):56-64.

-
96. Zimbardo PG. Psychologie. Berlin, Heidelberg: Springer; 1992.
 97. Jiang W, Ma L, Zhang B, Fan Y, Qu X, Zhang X, et al. Evaluation of the 3D Augmented Reality-Guided Intraoperative Positioning of Dental Implants in Edentulous Mandibular Models. *Int J Oral Maxillofac Implants*. 2018;33(6):1219-28.
 98. Afrashtehfar KI. Conventional free-hand, dynamic navigation and static guided implant surgery produce similar short-term patient-reported outcome measures and experiences. *Evidence-Based Dentistry*. 2021;22(4):143-5.
 99. Pozzi A, Tallarico M, Marchetti M, Scarfo B, Esposito M. Computer-guided versus free-hand placement of immediately loaded dental implants: 1-year post-loading results of a multicentre randomised controlled trial. *Eur J Oral Implantol*. 2014;7(3):229-42.
 100. Ashy LM. Clinicians' Attitude Toward Computer-Guided Implant Surgery Approach: Survey in Saudi Arabia. *Pragmat Obs Res*. 2021;12:1-8.
 101. Krüger H-H, Helsper W. Einführung in Grundbegriffe und Grundfragen der Erziehungswissenschaft. Opladen: Budrich + Leske; 2002.

8 **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 2: Kunststoff-Oberkiefermodell	19
Abbildung 3: Gematchte DVT und IOS des Modells	21
Abbildung 4: Virtuell geplante Implantatpositionen	21
Abbildung 5: Virtuell geplante Implantatpositionen mit T-Sleeves	23
Abbildung 6: Virtuell geplante statische Bohrschablone inklusive T-Sleeves ...	23
Abbildung 7: Unbeschnittene Bohrschablone für dynamisch navigierte Implantationen	24
Abbildung 8: Beschnittene Bohrschablone für dynamisch navigierte Implantationen von okklusal	25
Abbildung 9: Beschnittene Bohrschablone für dynamisch navigierte Implantationen von vestibulär.....	25
Abbildung 10: Kunststoff-Oberkiefermodell befestigt im Phantomkopf	27
Abbildung 11: Kunststoff-Oberkiefermodell mit fully guided Bohrschablone inklusive Sleeves	27
Abbildung 11: Kunststoff-Oberkiefermodell mit Markertray-Bohrschablone inklusive Marker.....	28
Abbildung 12: BLX Implantat, TLX Implantat und Standartimplantat von links nach rechts, unten BLT Implantat {Straumann Group, 2021 #171}	29
Abbildung 13: Chirurgisches Protokoll für die Implantation in Regio 16	30
Abbildung 14: Bohrprotokoll für die Implantationen	31
Abbildung 15: Aufbereitung des Bohrstollens	32
Abbildung 16: Manuelles Einbringen des Implantats (Teil 1).....	33
Abbildung 17: Manuelles Einbringen des Implantats mit Ratsche (Teil 2).....	33
Abbildung 18: Freihand Aufbereitung des Bohrstollens	34
Abbildung 19: Statisch geführte Aufbereitung des Bohrstollens	35
Abbildung 20: Dynamisch navigierte Aufbereitung des Bohrstollens	36
Abbildung 21: Bildschirmanzeige des DENACAM chirurgischen Assistenten ..	36
Abbildung 22: Kunststoff-Oberkiefermodell mit inserierten Implantaten	38
Abbildung 23: Kunststoff-Oberkiefermodell mit Scannbodys auf den inserierten Implantaten	38
Abbildung 24: Scann der Kunststoff-Oberkiefermodell mit Scannbodys auf den inserierten Implantaten	39
Abbildung 25: STL-Daten des Kunststoff-Oberkiefermodell mit Scannbodys...	39

- Abbildung 26: Gezeichneter Vergleich der geplanten und endgültigen Implantatposition des Winkels, der 3D Abweichung an Plattform und Apex in mm. Das blaue Implantat stellt die digital geplante Position und das graue Implantat die endgültige Implantatposition dar. Die gelben Punkte bilden die Mitte von Apex und Plattform ab, während die Linie die Achse des Implantats anzeigt.40
- Abbildung 27: Gematchte STL-Daten des Kunststoff-Oberkiefermodell mit Scannbodys.....40
- Abbildung 28: Analyse der Implantatabweichung mittels Behandlungsauswertung.....41
- Abbildung 29: Einfacher Boxplot der Winkelabweichung44
- Abbildung 30: Einfacher Boxplot der globalen Abweichung an der Implantatschulter44
- Abbildung 31: Verteilung der Abweichung der Plattform der einzelnen Implantate in der axialen Schicht. Punkte und Linien stellen Größe und Richtung der Abweichung dar. Die Balken stellen den Medianwert der Abweichung in Millimetern für jede Richtung dar (mesial, distal, bukkal, lingual). Die Zahl in () steht für die Anzahl der Implantate, die in die einzelnen Richtungen abweichen. Die blaue Farbe steht für die freihand Gruppe, orange für die statisch geführte Gruppe und grau für die dynamisch navigierte Gruppe. .45
- Abbildung 32: Verteilung der Abweichung der Plattform der einzelnen Implantate in der sagittalen Schicht. Punkte und Linien stellen Größe und Richtung der Abweichung dar. Die Balken stellen den Medianwert der Abweichung in Millimetern für jede Richtung dar (mesial, distal, apikal, koronal). Die Zahl in () steht für die Anzahl der Implantate, die in die einzelnen Richtungen abweichen. Die blaue Farbe steht für die freihand Gruppe, orange für die statisch geführte Gruppe und grau für die dynamisch navigierte Gruppe. .45
- Abbildung 33: Verteilung der Abweichung der Plattform der einzelnen Implantate in der coronaren Schicht. Punkte und Linien stellen Größe und Richtung der Abweichung dar. Die Balken stellen den Medianwert der Abweichung in Millimetern für jede Richtung dar (bukkal, lingual, apikal, koronal). Die Zahl in () steht für die Anzahl der Implantate, die in die einzelnen Richtungen abweichen. Die blaue Farbe steht für die freihand Gruppe, orange für die statisch geführte Gruppe und grau für die dynamisch navigierte Gruppe. .46

Abbildung 34: Verteilung der Abweichung am Implantatapex der einzelnen Implantate in der axialen Schicht. Punkte und Linien stellen Größe und Richtung der Abweichung dar. Die Balken stellen den Medianwert der Abweichung in Millimetern für jede Richtung dar (mesial, distal, bukkal, lingual, apikal, koronal). Die Zahl in () steht für die Anzahl der Implantate, die in die einzelnen Richtungen abweichen. Die blaue Farbe steht für die freihand Gruppe, orange für die statisch geführte Gruppe und grau für die dynamisch navigierte Gruppe.....	46
Abbildung 35: Verteilung der Abweichung am Implantatapex der einzelnen Implantate in der sagittalen Schicht. Punkte und Linien stellen Größe und Richtung der Abweichung dar. Die Balken stellen den Medianwert der Abweichung in Millimetern für jede Richtung dar (mesial, distal, bukkal, lingual, apikal, koronal). Die Zahl in () steht für die Anzahl der Implantate, die in die einzelnen Richtungen abweichen. Die blaue Farbe steht für die freihand Gruppe, orange für die statisch geführte Gruppe und grau für die dynamisch navigierte Gruppe.....	47
Abbildung 36: Verteilung der Abweichung am Implantatapex der einzelnen Implantate in der coronaren Schicht. Punkte und Linien stellen Größe und Richtung der Abweichung dar. Die Balken stellen den Medianwert der Abweichung in Millimetern für jede Richtung dar (mesial, distal, bukkal, lingual, apikal, koronal). Die Zahl in () steht für die Anzahl der Implantate, die in die einzelnen Richtungen abweichen. Die blaue Farbe steht für die freihand Gruppe, orange für die statisch geführte Gruppe und grau für die dynamisch navigierte Gruppe.....	47
Abbildung 37: Einfacher Boxplot der globalen Abweichung am Implantatapex	48
Abbildung 38: Einfacher Boxplot der Operationszeit.....	48
Abbildung 39: Gruppiertes Boxplot der Winkelabweichung von Studierenden und Chirurgen	51
Abbildung 40: Gruppiertes Boxplot der globalen Abweichung an der Implantatschulter von Studierenden und Chirurgen	52
Abbildung 41: Gruppiertes Boxplot der globalen Abweichung am Implantatapex von Studierenden und Chirurgen.....	52
Abbildung 42: Gruppiertes Boxplot der Operationszeit von Studierenden und Chirurgen	53

Abbildung 43: Einfacher Boxplot der Operationszeit bei freihand Implantationen von Studierenden und Chirurgen.....	54
Abbildung 44: Einfacher Boxplot der Winkelabweichung bei freihand Implantationen von Studierenden und Chirurgen	54
Abbildung 45: Einfacher Boxplot der globalen Abweichung an der Implantatschulter bei freihand Implantationen von Studierenden und Chirurgen	55
Abbildung 46: Einfacher Boxplot der globalen Abweichung am Implantatapex bei freihand Implantationen von Studierenden und Chirurgen.....	55
Abbildung 47: Einfacher Boxplot der Operationszeit bei statisch geführten Implantationen von Studierenden und Chirurgen	56
Abbildung 48: Einfacher Boxplot der Winkelabweichung bei statisch geführten Implantationen von Studierenden und Chirurgen	57
Abbildung 49: Einfacher Boxplot der globalen Abweichung an der Implantatschulter bei statisch geführten Implantationen von Studierenden und Chirurgen.....	57
Abbildung 50: Einfacher Boxplot der globalen Abweichung am Implantatapex bei statisch geführten Implantationen von Studierenden und Chirurgen.....	58
Abbildung 51: Einfacher Boxplot der Operationszeit bei dynamisch navigierten Implantationen von Studierenden und Chirurgen	58
Abbildung 52: Einfacher Boxplot der Winkelabweichung bei dynamisch navigierten Implantationen von Studierenden und Chirurgen	59
Abbildung 53: Einfacher Boxplot der globalen Abweichung an der Implantatschulter bei dynamisch navigierten Implantationen von Studierenden und Chirurgen	59
Abbildung 54: Einfacher Boxplot der globalen Abweichung am Implantatapex bei dynamisch navigierten Implantationen von Studierenden und Chirurgen ..	60
Abbildung 55: Durchschnittliche Lernkurve aller Teilnehmer*innen. Blau repräsentiert die freihand, orange die statisch geführte und grau die dynamisch navigierte Implantation.	67
Abbildung 56: Befragungsergebnisse bezüglich der durchgeführten Implantationen pro Jahr	68
Abbildung 57: Befragungsergebnisse bezüglich der bisher am häufigsten angewendeten Aufbereitungsmethode.....	69

Abbildung 58: Befragungsergebnisse bezüglich der Anzahl der bisher dynamisch navigiert durchgeführten Implantationen.....	69
Abbildung 59: Befragungsergebnisse bezüglich der Selbstsicherheit bei freihand Implantationen	70
Abbildung 60: Befragungsergebnisse bezüglich der Selbstsicherheit bei statisch geführten Implantationen	70
Abbildung 61: Befragungsergebnisse bezüglich der Selbstsicherheit bei dynamisch navigierten Implantationen.....	71
Abbildung 62: Befragungsergebnisse bezüglich der Flexibilität bei freihand Implantationen	71
Abbildung 63: Befragungsergebnisse bezüglich der Flexibilität bei statisch geführten Implantationen	72
Abbildung 64: Befragungsergebnisse bezüglich der Flexibilität bei dynamisch navigierten Implantationen.....	72
Abbildung 65: Befragungsergebnisse bezüglich der benötigten Aufmerksamkeit bei freihand Implantationen.....	73
Abbildung 66: Befragungsergebnisse bezüglich der benötigten Aufmerksamkeit bei statisch geführten Implantationen.....	73
Abbildung 67: Befragungsergebnisse bezüglich der benötigten Aufmerksamkeit bei dynamisch navigierten Implantationen	74
Abbildung 68: Befragungsergebnisse bezüglich der Genauigkeit bei freihand Implantationen	74
Abbildung 69: Befragungsergebnisse bezüglich der Genauigkeit bei statisch geführten Implantationen	75
Abbildung 70: Befragungsergebnisse bezüglich der Genauigkeit bei dynamisch navigierten Implantationen.....	75
Abbildung 71: Befragungsergebnisse bezüglich der Wiederholungswahrscheinlichkeit von freihand Implantationen	76
Abbildung 72: Befragungsergebnisse bezüglich der Wiederholungswahrscheinlichkeit von statisch geführten Implantationen	76
Abbildung 73: Befragungsergebnisse bezüglich der Wiederholungswahrscheinlichkeit von dynamisch navigierten Implantationen	77

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Abweichungen der Implantatpositionen und Operationszeiten aller Teilnehmer*innen, aufgeteilt anhand der Aufbereitungsmethode SD: Standardabweichung	43
Tabelle 2: Abweichungen der Implantatpositionen und Operationszeiten der Studierenden, aufgeteilt anhand der Aufbereitungsmethode, SD: Standardabweichung	49
Tabelle 3: Abweichungen der Implantatpositionen und Operationszeiten der erfahrenen chirurgischen Teilnehmer, aufgeteilt anhand der Aufbereitungsmethode, SD: Standardabweichung	51
Tabelle 4: Abweichungen der Implantatpositionen in verschiedenen Implantatregion nach freihand Implantation, SD: Standardabweichung	61
Tabelle 5: Abweichungen der Implantatpositionen in verschiedenen Implantatregion nach statisch geführter Implantation, SD: Standardabweichung	62
Tabelle 6: Abweichungen der Implantatpositionen in verschiedenen Implantatregion nach dynamisch navigierter Implantation, SD: Standardabweichung	63
Tabelle 7: Durchschnittliche Operationszeiten aller Teilnehmer*innen sowie getrennt für studentische und chirurgische Teilnehmer*innen bei freihand Implantationen	64
Tabelle 8: Durchschnittliche Operationszeiten aller Teilnehmer*innen sowie getrennt studentische und chirurgische Teilnehmer*innen bei statisch geführten Implantationen	65
Tabelle 9: Durchschnittliche Operationszeiten aller Teilnehmer*innen, sowie der studentischen und chirurgischen Teilnehmer*innen bei dynamisch navigierten Implantationen	66

10 Anhang

10.1 Umfragebogen

Umfrage zur Schablonenstudie

Vielen Dank für Ihre Bereitschaft an der Umfrage teilzunehmen!
Bitte beantworten Sie die Fragen wahrheitsgerecht, Ihrem subjektiven Gefühl während der Studie entsprechend.

joschawerny@gmail.com [Konto wechseln](#)



* Erforderlich

E-Mail-Adresse *

Ihre E-Mail-Adresse

Welchem Geschlecht gehören Sie an?

- weiblich
- männlich

Welcher Gruppe sind Sie angehörig?

- Erfahrene Operateure
- Studenten

Wie viele Implantate setzen Sie pro Jahr?

- 0-10
- 10-100
- 100-200
- mehr als 200

Welche Methode verwenden Sie für Implantationen am häufigsten?

- Freihand
- Navigation
- Fully guided

Wie viele Implantate haben Sie bisher mit Navigation Implantiert?

- 0-5 mal
- 5-20
- 20-50
- 50-100
- über 100

Wie selbstsicher haben Sie sich mit der Methode "Freihand" gefühlt?

- 0 Sehr unsicher
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5 Sehr sicher

Wie selbstsicher haben Sie sich mit der Methode "Navigation" gefühlt?

- 0 Sehr unsicher
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5 Sehr sicher

Wie selbstsicher haben Sie sich mit der Methode "Fully guided" gefühlt?

- 0 Sehr unsicher
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5 Sehr sicher

Wie flexibel haben Sie sich mit der Methode "Freihand" gefühlt?

- 0 Sehr unflexibel
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5 Sehr flexibel

Wie flexibel haben Sie sich mit der Methode "Navigation" gefühlt?

- 0 Sehr unflexibel
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5 Sehr flexibel

Wie flexibel haben Sie sich mit der Methode "Fully guided" gefühlt?

- 0 Sehr unflexibel
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5 Sehr flexibel

Wie flexibel haben Sie sich mit der Methode "Navigation" gefühlt?

- 0 Sehr unflexibel
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5 Sehr flexibel

Wie flexibel haben Sie sich mit der Methode "Fully guided" gefühlt?

- 0 Sehr unflexibel
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5 Sehr flexibel

Wie viel Aufmerksamkeit benötigt die Methode "Freihand", nach Ihrer Meinung?

- 0 sehr wenig Aufmerksamkeit
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5 Sehr viel Aufmerksamkeit

Wie viel Aufmerksamkeit benötigt die Methode "Navigation", nach Ihrer Meinung?

- 0 sehr wenig Aufmerksamkeit
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5 Sehr viel Aufmerksamkeit

Wie viel Aufmerksamkeit benötigt die Methode "Fully guided", nach Ihrer Meinung?

- 0 sehr wenig Aufmerksamkeit
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5 Sehr viel Aufmerksamkeit

Wie akkurat hat sich die Implantation mit "Freihand" angefühlt?

- 0 Sehr unakkurat
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5 Sehr akkurat

Wie akkurat hat sich die Implantation mit "Navigation" angefühlt?

- 0 Sehr unakkurat
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5 Sehr akkurat

Wie akkurat hat sich die Implantation mit "Fully guided" angefühlt?

- 0 Sehr unakkurat
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5 Sehr akkurat

Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass Sie "Freihand" erneut für eine Implantation anwenden werden?

- 0 Sehr unwahrscheinlich
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5 Sehr wahrscheinlich

Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass Sie "Navigation" erneut für eine Implantation anwenden werden?

- 0 Sehr unwahrscheinlich
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5 Sehr wahrscheinlich

Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass Sie "Navigation" erneut für eine Implantation anwenden werden?

- 0 Sehr unwahrscheinlich
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5 Sehr wahrscheinlich

Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass Sie "Fully guided" erneut für eine Implantation anwenden werden?

- 0 Sehr unwahrscheinlich
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5 Sehr wahrscheinlich

Senden

[Alle Eingaben löschen](#)

Dieser Inhalt wurde nicht von Google erstellt und wird von Google auch nicht unterstützt. [Missbrauch melden](#) - [Nutzungsbedingungen](#) - [Datenschutzerklärung](#)

Google Formulare

10.2 Erklärung

Ich, Joscha Gabriel Werny, erkläre hiermit, dass die vorgelegte Dissertation von mir selbstständig, ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel, angefertigt wurde. Alle von mir benutzten Veröffentlichungen, ungedruckten Materialien, sonstige Hilfsmittel sowie Textstellen, die ich wörtlich oder inhaltlich aus gedruckten oder ungedruckten Arbeiten übernommen habe, habe ich als solche gekennzeichnet und mit den erforderlichen bibliographischen Angaben nachgewiesen. Unterstützungsleistungen, die ich von anderen Personen erhalten habe, wurden in der Dissertationsschrift als solche benannt. Die Dissertation wurde bei keiner anderen Fakultät oder einem anderen Fachbereich vorgelegt, weder im In- noch im Ausland. Überdies bin ich nicht im Besitz eines anderen Doktorgrades. Ich habe bisher kein Promotionsverfahren erfolglos beendet. Mir ist bekannt, dass die Zulassung zur Promotion zu versagen ist, wenn die Unterlagen unvollständig oder die Angaben unrichtig sind. Ich bin darüber informiert, dass ich zur Führung des Dokortitels erst mit Aushändigung der Promotionsurkunde berechtigt bin.

Ort, Datum

Unterschrift

Mainz, den 19.06.2023