

# **Diplomarbeit**

## **Digitaler Workflow in der Implantologie bei schwierigen anatomischen Bedingungen. Literaturübersicht**

eingereicht von  
**Diana Chechotka**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor(in) der Zahnmedizin**

**(Dr.(in) med. dent.)**

an der

**Medizinischen Universität Graz**

ausgeführt an der

**Universitätsklinik für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde**

Klinischen Abteilung für Zahnerhaltung, Parodontologie und Zahnersatzkunde

unter der Anleitung von

Univ.-Prof. Dr. Martin Lorenzoni

Dr. med. univ. Dr. med. dent. Alwin Sokolowski

Graz, am 27.01.2025

### *Eidesstattliche Erklärung*

*Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe, andere als die angegebenen Quellen nicht verwendet habe und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.*

*Des Weiteren erkläre ich hiermit, dass, sofern bei der Erstellung dieser Arbeit Künstliche Intelligenz (KI) Werkzeuge zur Generierung und/oder Korrektur bestimmter Textpassagen verwendet wurden, dieser Einsatz unter Einhaltung ethischer Grundsätze, akademischer Integrität und den Vorgaben meiner Universität erfolgte, sowie in Folge dies transparent gemacht und in angemessener Weise gekennzeichnet wurde.*

*Graz 27.01.2025*

*Diana Chechotka eh.*

## Danksagungen

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei allen Personen bedanken, die mich während der Entstehung dieser Diplomarbeit unterstützt und begleitet haben.

Mein besonderer Dank gilt meinen Betreuern, Herrn Univ.-Prof. Dr. Martin Lorenzoni und Herrn Dr. med. univ. Dr. med. dent. Alwin Sokolowski, für wertvolle Unterstützung, geduldige Anleitung und konstruktiven Ratschläge. Ihre Expertise und kontinuierliche Unterstützung haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Ein großes Dankeschön gebührt auch meinen Eltern und meiner Familie, die mir während meiner gesamten Studienzeit Rückhalt und Motivation gegeben haben. Ihr Vertrauen und ihre Ermutigung waren stets eine wichtige Quelle der Inspiration für mich.

## **Zusammenfassung**

**Einleitung:** Computergestützte 3D-Implantatplanung hat sich in den letzten 20 Jahren zu einem wichtigen Instrument in der Implantologie entwickelt. Dabei kommen sowohl statische als auch dynamische Systeme zum Einsatz, die auf der Verwendung von Schablonen basieren. Die vorherige Planung ermöglicht eine hohe Genauigkeit bei der Positionierung des Implantats unter Berücksichtigung anatomischer Bedingungen und minimalinvasiver Eingriffe. Aus diesem Grund bleibt die Entwicklung von Methoden zur Wiederherstellung von Zahndefekten mit Hilfe von Computersoftware eine wichtige Aufgabe für die moderne Zahnmedizin.

**Ziel:** Dieser Literaturrecherche ist die Vorstellung und der Vergleich verschiedener Arten von Computersystemen für die navigationsgestützte Planung der präzisen Positionierung von Implantaten. Ein weiteres Ziel ist ein Vergleich der Softwarefunktionalität und der Methoden zur Durchführung von Operationen mit «digitalem Workflow».

**Methoden:** Hierzu wurde eine Literaturrecherche aus wissenschaftlichen Datenbanken wie PubMed, Cochrane Library sowie Veröffentlichungen in zahnmedizinischen Online-Zeitschriften und offiziellen Herstelleranweisungen durchgeführt. Zusätzlich wurden Internetseiten offizieller medizinischer und technischer Institute sowie offizielle Herstellerangaben herangezogen.

**Resultate:** Verglichen wurden Datenformate, Verwaltung und der Prozess der Erstellung einer Bohrschablone für Implantation. Die beschriebenen Systeme verwenden DICOM-Daten und enthalten 2D- und 3D-Querschnitte mit unterschiedlichen Orientierungen für die virtuelle Implantatplanung. Die computergestützte Konstruktion (CAD/CAM) von Bohrschablonen wird von dem:der Benutzer:in mittels automatischer Parameter oder vom Programmanbieter erstellt. Solche Systeme wie CoDiagnostix, SimPlant und ImplantStudio enthalten in ihrer Bibliothek mehr als 50 Implantatsysteme. Die Daten können weiterverarbeitet werden um präfabrizierte Kronen oder Abutments anzufertigen. Abhängig von der ausgewählten Software hat jede ihre eigenen Vorteile und beschränkten Möglichkeiten für die virtuelle Planung. Der Einsatz der Computerplanung bei Patient\*innen mit komplexen anatomischen Situationen ermöglicht die effizienteste Nutzung des verfügbaren Gewebavolumens durch optimale Platzierung der Implantate. Dies verbessert die Sicherheit und Effektivität der Implantation erheblich und macht den Eingriff weniger riskant und besser vorhersehbar.

**Schlussfolgerung:** Basierend auf der Literaturrecherche kann festgestellt werden, dass alle Studien eine hohe Genauigkeit bei der Anwendung von Navigationssystemen zeigen. Dies lässt sich nicht über die unkontrollierte traditionelle Implantatsetzung sagen. In Bezug auf die Einheilung der

Implantate gibt es keine signifikanten Unterschiede zwischen der traditionellen und der navigationsgesteuerten Implantation. Ziel der digitalen Planung ist es, optimale ästhetische und prothetische Ergebnisse zu erzielen und gleichzeitig die Genauigkeit unter Berücksichtigung des verfügbaren Hart- und Weichgewebes zu maximieren. Bei digitalen Methoden können auch Fehler oder minimale Abweichungen auftreten. Es gibt eine begrenzte Anzahl von Studien über Abweichungen zwischen der geplanten und der tatsächlichen Positionierung von Implantaten, die mit Hilfe von Bohrschablonen gesetzt wurden. Für die Zukunft besteht ein Bedarf an klinischen Studien mit geführten Systemen und zur Untersuchung möglicher Fehler, die während des Eingriffs auftreten können. Auf diese Weise kann der digitale Workflow zu einem Standard in der Behandlung werden. Dies führt zu einer Stärkung des Vertrauens der Spezialist\*innen und zu einer weiteren Verbreitung seiner Anwendung.

**Schlüsselwörter: digital workflow, 3-D-Druck, Navigationschiene, Implantatinsertion, geführte Chirurgie, digitale Implantatplanung.**

## **Abstract**

**Objectives:** Computer-assisted 3D implant planning has evolved into a crucial tool in implantology over the past 20 years. Both static and dynamic systems are utilized, based on the use of templates. Preceding planning allows for high accuracy in implant positioning, considering anatomical conditions and minimally invasive procedures. Hence, the development of algorithms for restoring dental defects using personalized structures during implantation through computer programs remains an important task in modern dentistry.

**The aim** of this literature review is to present and compare different types of computer systems for navigation-assisted planning of the precise positioning of implants. In addition, a comparison of the software functionality and the methods for performing operations with a "digital workflow".

**Material and Methods:** For this purpose, a literature search was conducted using scientific databases such as PubMed, Cochrane Library, as well as publications in dental online journals, and official manufacturer instructions. In addition, the websites of official medical and technical institutes and official manufacturer information were consulted.

**Results:** Data formats, management and the process of creating a surgical guide for implant placement were compared. The systems described use DICOM data and contain 2D and 3D cross-sections with different orientations for virtual implant planning. The computer-aided design (CAD/CAM) of surgical guides is created by the user using automatic parameters or by the program provider. Systems such as CoDiagnostix, SimPlant and ImplantStudio contain more than 50 implant systems in their library. The data can be further processed to fabricate prefabricated crowns or abutments. Depending on the software selected, each has its own advantages and limited possibilities for virtual planning. The use of computer planning in patients with complex anatomical situations allows the most efficient use of the available tissue volume through optimal placement of the implants. This significantly improves the safety and effectiveness of implant placement and makes the procedure less risky and more predictable.

**Conclusion:** Based on the literature search, it can be stated that all studies show a high degree of accuracy when using navigation systems. This cannot be said about uncontrolled traditional implant placement. There are no significant differences between traditional and navigation-guided implant placement in terms of implant healing. The aim of digital planning is to achieve optimal esthetic and prosthetic results while maximizing accuracy, taking into account the available hard and soft tissue. Errors or minimal deviations can also occur with digital methods. There are a limited number of studies on deviations between the planned and actual positioning of implants placed using

surgical guides. In the future, there is a need for clinical studies with guided systems and to investigate possible errors that may occur during the procedure. In this way, the digital workflow can become a standard in treatment. This will lead to an increase in the confidence of specialists and a further spread of its use.

**Keywords: digital workflow, 3D printing, navigation splint, implant placement, guided surgery, digital implant planning.**

# ***Inhaltsverzeichnis***

<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>10</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>11</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>12</b>
1.1. Bedeutung von Implantaten .....	12
1.2. Ideale und schwierige anatomische Bedingungen für Implantaten .....	13
1.3. Systemerkrankungen und ihre Auswirkungen auf die Osseointegration .....	14
1.4. Übersicht: Implantationsmethoden.....	15
1.5. Implantatplanung.....	18
1.6. Radiologische Diagnostik.....	20
1.7. 3-D Planung und Navigation.....	22
1.8. Technische Beschreibung digitaler Zugangsmöglichkeiten in der Implantologie.....	23
1.9. Übersicht der technischen Spezifikationen von Implantationsplanungssystemen.....	26
1.10 Darstellung der Herstellungstechniken (3D-Druck, Fräsen).....	36
<b>2 Material und Methoden.....</b>	<b>38</b>
2.1. Recherche von Daten für die Hilfe digitaler Workflow und Unterstützung bei der Implantationsplanung.....	38
<b>3 Ergebnisse.....</b>	<b>39</b>
3.1. Studienübersicht.....	39
3.2. Review Studien.....	43
3.3. Klinische Studien.....	46
3.4. In-vitro Studie.....	49
3.5. Zusammenfassung der Ergebnisse.....	51
<b>4 Diskussion.....</b>	<b>52</b>
4.1. Zweckmäßigkeit der klinischen Anwendung.....	52
4.2. Vergleich von Behandlungsmethoden mit und ohne Digitaler Workflow.....	53

4.3 Einfluss von Herstellungstechniken auf die Genauigkeit der Behandlungsergebnisse.....	54
4.4. Entwicklung digitaler Technologien in der Navigationsimplantologie.....	54
<b>5 Schlussfolgerung.....</b>	<b>56</b>
<b>6 Literaturverzeichnis.....</b>	<b>57</b>

## ***Abbildungsverzeichnis***

Abbildung 1. Beispiel eines Winkelstückes mit optischen Treckern der Firma Navident, Deutschland.....	26
Abbildung 2. Beispiel einer 3-D Darstellung mit Implant Studio.....	28
Abbildung 3. Beispiel der Bohrschablone der Firma Exocad, Deutschland.....	29
Abbildung 4. Beispiel eines Dual-Scan-Protokolls mit Exoplan.....	29
Abbildung 5. Beispiel einer 3-D Planung mit CoDiagnostix.....	31
Abbildung 6. Beispiel der 3D-Planung «All-on-4» mit NobelGuide.....	33
Abbildung 7. Beispiel einer knochengestützten Schablone Beispiel von Simplant Guide.....	35
Abbildung 8. Organigramm der Literaturrecherche.....	39
Abbildung 9. Anzahl der zusammengefassten Studien.....	42
Abbildung 10. Erscheinungsjahre der zusammengefassten Studien.....	43

## ***Tabellenverzeichnis***

Tabelle 1:Abschätzung der effektiven Dosis von zahnärztlichen Röntgengeräten (Qiang et al, 2019).....	22
Tabelle 2. Tabellarischer Überblick der zusammengefassten Studien.....	40
Tabelle 3. Darstellungsmöglichkeiten und Planungshilfen für die virtuelle Implantatplanung mit den getesteten Softwaresystemen (Flügge et al., 2022).....	44
Tabelle 4. Abweichungen bei der Implantatinsertion mit statischer, dynamischer und computergestützter Navigationsmethode (Khaohoen et al., 2024).....	44
Tabelle 5. Charakteristika der ausgewählten Studien zum Vergleich der statischen und dynamischen CAIS.....	45
Tabelle 6. Abweichungen von 236 eingeschlossenen Implantaten in X-, Y-, Z-Achse, 3D-Abweichung in mm und Winkelabweichung in Grad an der Implantatschulter und am Implantat-Apex. n entspricht der Anzahl der eingeschlossenen Werte für die statistische Analyse (Naziri et al., 2016).....	46
Tabelle 7. Anzahl der Implantate und Patient*innen, nach Implantationsorten und Bohrschablonen (Zhao et al., 2014).....	47
Tabelle 8. Lineare und angulare Abweichungen von Implantaten und ihre statistischen Ergebnisse (Zhao et al., 2014).....	48
Tabelle 9. Abweichungen zwischen den geplanten und tatsächlichen Implantatpositionen bei der Verwendung von Navigationschablonen.....	48
Tabelle 10: Deskriptive und bivariate Ergebnisse der wichtigsten Ergebnisvariablen für beide Gruppen (Jorba-Garcia et al., 2018).....	49
Tabelle 11: Übersicht der Studien zur dynamischen Navigationssoftware.....	50
Tabelle 12: Abweichungen zwischen den geplanten und aktuellen Implantatpositionen bei der dynamischen Navigationsoftware .....	50

## 1.1 Bedeutung von Implantaten

Die Bedeutung von Implantaten in der modernen Zahnmedizin ist von herausragender Wichtigkeit und hat eine tiefgreifende Auswirkung auf die Wiederherstellung der oralen Funktion und Ästhetik. Implantate sind künstliche Zahnwurzeln, die in den Kieferknochen eingefügt werden, um als stabile Fundamente für Zahnersatz zu dienen. Ihr Einfluss erstreckt sich über verschiedene Aspekte der zahnärztlichen Versorgung und beeinflusst maßgeblich die Lebensqualität der Patient\*innen (Duong et al, 2022).

Implantate ermöglichen die Wiederherstellung der oralen Funktion. Sie dienen als stabil verankerte Basis für Einzelzahnkronen, Brücken oder implantatgetragene Prothesen. Dies trägt dazu bei, die normale Bissfunktion wiederherzustellen, was für die Nahrungsaufnahme und das allgemeine Wohlbefinden von entscheidender Bedeutung ist. Implantatprothetik sieht natürlich aus und ist stabil, wodurch das Aussehen des\*der Patient\*in verbessert und Selbstvertrauen gestärkt wird.

Im Vergleich zu herkömmlichen Zahnersatzlösungen bieten Implantate eine langfristige Lösung (Pandey et al., 2022). Im Gegensatz zu herausnehmbaren Prothesen stimulieren Implantate das Knochengewebe, da die Belastungen auf das Knochengewebe übertragen werden, wodurch eine Atrophie des Kieferknochens verhindert wird. Die Versorgung auf Implantaten erfordert keine Präparation der Nachbarzähne zur Abstützung, im Gegensatz zu herkömmlichen Brücken. Dies trägt zur Erhaltung der Integrität der umliegenden Zähne bei und verhindert den unnötigen Verlust gesunder Zahnschubstanz durch Präparationen (Hebel et al, 2000).

Die Bedeutung von Implantaten erstreckt sich über die rein funktionale Wiederherstellung hinaus und beeinflusst positiv die Lebensqualität, das Selbstbild und die langfristige Mundgesundheit der Patient\*innen (Duong et al, 2022). Im Kontext dieser Arbeit kommt es zu einer vertieften Auseinandersetzung mit den verschiedenen Aspekten der Implantologie, um ein umfassendes Verständnis für deren Anwendung und Effektivität in unterschiedlichen Situationen zu entwickeln.

Gemäß einem Artikel der Deutschen Gesellschaft für Implantologie ist die Anzahl der gesetzten Zahnimplantate allein in Deutschland in den letzten 20 Jahren von 380.000 auf 1,3

Millionen gestiegen (Ritzert, 2018), was die Wichtigkeit der vorliegenden Arbeit deutlich macht.

## **1.2 Ideale und schwierige anatomische Bedingungen für Zahnimplantate**

Die anatomischen Gegebenheiten spielen eine entscheidende Rolle in der erfolgreichen Integration von Zahnimplantaten.

Die ideale anatomische Situation für die Platzierung von Zahnimplantaten zeichnet sich durch folgende Merkmale aus: ausreichendes Knochenangebot, Knochenqualität, sowie ausgeglichenes Verhältnis von Hart- zu Weichgewebe (LeGeros et al, 1993). Die Qualität des Knochengewebes hat einen signifikanten Einfluss auf die Osseointegration. Dies hängt von der Knochendichte, seiner anatomischen Struktur und seinem Volumen ab (Pandey et al., 2022). Die Knochenqualität wird durch das Verhältnis von kortikaler Platte und Spongiosa im Knochen sowie seine Dichte definiert. Das Volumen des Knochengewebes ist wichtig für die Implantatsfixierung. Bei unzureichendem Knochenvolumen besteht die Gefahr der mechanischen Überlastung.

Schwierige anatomische Bedingungen können mehrere Herausforderungen darstellen. Unzureichendes Knochenangebot kann aufgrund von Resorption, Trauma oder angeborenen Gegebenheiten auftreten und erfordert möglicherweise Knochenaufbauverfahren (Roccuzzo et al., 2022). Die Qualität des Knochens, beispielsweise bei porösem oder dichtem Knochen, kann die Osseointegration beeinträchtigen und erfordert möglicherweise ein angepasstes Implantatsdesign oder Chirurgisches Protokoll (LeGros et al., 1993). Ein Ungleichgewicht zwischen Hart- und Weichgewebe kann ästhetische Komplikationen verursachen und erfordert präzises Weichgewebemanagement (Evans et al., 2008).

Parodontale Gesundheit spielt eine entscheidende Rolle bei der langfristigen Stabilität von Zahnimplantaten. Untersuchungen haben gezeigt, dass das Vorhandensein von Parodontitis das Risiko von Komplikationen nach der Implantation erhöhen kann. Es ist wichtig, den Einfluss der parodontalen Gesundheit auf den Implantationserfolg zu verstehen und geeignete präventive Maßnahmen zu ergreifen (Roccuzzo et al., 2022). Gemäß einer Studie nach Hu C. et al (Hu et al, 2020) hatten in einer Gruppe von 100 Personen, die regelmäßige parodontologische Kontrollen durchliefen, 6 % Periimplantitis, während in einer anderen Gruppe von 100 Personen, die keine Dokumentation über parodontologische Kontrollen hatten, 20 % an Parodontitis litten. Patient\*innen mit ausgeheilter Parodontitis ohne

angemessene unterstützende Pflege haben ein hohes Risiko für die Entwicklung von Periimplantitis (Lopez et al., 2020).

Der Kieferkamm kann eine hohe Variabilität hinsichtlich seiner anatomischen Strukturen aufweisen, die von unregelmäßigen Knochenstrukturen, über Positionen der Nasennebenhöhlen bis hin zu Verläufen von Nervenbahnen reichen kann. Die Kenntnis dieser Variationen ist entscheidend, um mögliche Komplikationen während der Implantation zu vermeiden und individuelle Behandlungspläne zu erstellen.

### **1.3 Systemerkrankungen und ihre Auswirkungen auf die Osseointegration**

Die Wechselwirkung zwischen systemischen Erkrankungen und dem Erfolg der Osseointegration bei Zahnimplantaten ist ein wesentlicher Aspekt in der Implantologie.

Diabetes mellitus, eine weit verbreitete Stoffwechselerkrankung, kann die Knochengesundheit beeinträchtigen (Murray et al., 2019). Studien haben gezeigt, dass Diabetes das Risiko von Komplikationen nach der Implantation erhöhen kann, da es die vaskuläre Versorgung und den Knochenaufbau beeinflusst (Wagner et al., 2022).

Diabetes mellitus führt zu einer Verzögerung der Wundheilung von Knochen und Weichgeweben. In Übereinstimmung mit den Studien von Katsiroumpa und Scaf de Molon wird angenommen, dass Diabetes keinen Einfluss auf die Osseointegration von Implantaten hat (Katsiroumpa et al., 2022). Zudem wird davon ausgegangen, dass die Knochenheilung bei Diabetiker\*innen langsamer verläuft (Scaf de Molon et al., 2013). Gemäß einer Studie nach Fiorellini et al. (Fiorellini et al. 2000) ist die Erfolgsrate von Implantaten bei den Diabetiker\*innen während der Beobachtungszeit nach 6,5 Jahren bei 85,7%.

Osteoporose, eine Erkrankung, die zu einer Abnahme der Knochendichte führt, kann die Stabilität von Zahnimplantaten beeinträchtigen (Chen et al., 2013). Eine gründliche Bewertung der Knochengesundheit und mögliche Interventionen zur Verbesserung der Knochendichte sind entscheidend, um den Erfolg der Osseointegration zu gewährleisten. Osteoporose betrifft zwar selten die Kieferknochen, kann sie sich negativ auf die Knochenheilung auswirken, wenn Implantate bei den Patient\*innen mit anderen Komorbiditäten eingesetzt werden. Aufgrund des Mangels an klinischen Studien können jedoch keine definitiven Aussagen über die Auswirkungen von Osteoporose auf Zahnimplantate getroffen werden (Giro et al., 2015). Vor der Implantation sollte der\*die Patient\*in über mögliche Risiken einer gestörten Knochenheilung informiert werden (Mellado-Valero et al. 2010). Bei den Patient\*innen, in deren Anamnese eine Osteoporose

verzeichnet ist, wird eine Therapie mit Bisphosphonaten eingesetzt, die bei invasiven zahnärztlichen Eingriffen eine Bisphosphonat-Osteonekrose des Kiefers verursachen kann. Die lokale Anwendung von Bisphosphonaten führt zu einer verbesserten Osseointegration bei Zahnimplantaten und stellt eine wirksame Maßnahme in der Parodontalbehandlung dar. Die systemische Therapie erhöht das Risiko einer Bisphosphonat-Osteonekrose des Kiefers, insbesondere bei gleichzeitig vorliegenden entzündlichen Zuständen in der Mundhöhle (Lee et al., 2023). Die Implantationschirurgie kann für die genannte Patient\*innengruppe als sicher betrachtet werden, sofern vor dem Eingriff eine angemessene Prophylaxe, beispielsweise in Form einer antibiotischen Prophylaxe, durchgeführt wird (Fiorillo et al., 2022).

Autoimmunerkrankungen wie rheumatoide Arthritis oder systemischer Lupus erythematodes können die Immunantwort des Körpers beeinflussen. Die Interaktion zwischen dem Immunsystem und den Implantaten kann die Osseointegration beeinträchtigen (Alenazi, 2021). Eine umfassende Analyse der immunologischen Auswirkungen ist wichtig, um präzise Vorhersagen über den Erfolg von Implantationsverfahren zu treffen. Die Literaturübersicht bestätigt, dass Zahnimplantate bei Autoimmunkrankheiten fast keine Komplikationen verursachen, jedoch ist die Einhaltung der Mundhygiene und regelmäßige Kontrollen besonders wichtig (Esimekara et al. 2022).

Herz-Kreislauf-Erkrankungen können die vaskuläre Versorgung im Körper beeinträchtigen, was wiederum Auswirkungen auf die Blutversorgung des Implantatbettes haben kann. Herz-Kreislauf-Erkrankungen können lebensbedrohlich sein, daher sollten sie stabilisiert werden, bevor eine geplante Operation durchgeführt wird, um während des Eingriffs keine Gefahr darzustellen (Gomez-de Diego et al., 2014).

Hyperlipidämie führt zu Knochenverlust und hemmt die Osseointegration von Zahnimplantaten. Daher werden Statine als Medikamente der Wahl eingesetzt, um die Knochenbildung zu stimulieren und die Osseointegration zu fördern (Sun et al., 2023).

#### **1.4 Übersicht: Implantationsmethoden**

Die Auswahl der geeigneten Implantationsmethode spielt eine entscheidende Rolle für den Erfolg einer implantologischen Behandlung.

Die minimalinvasive Implantologie repräsentiert einen innovativen Ansatz, der darauf abzielt, chirurgische Eingriffe auf das notwendige Minimum zu beschränken, um die Genesung zu beschleunigen und der Patient\*innen Erlebnis zu verbessern, um optimale Ergebnisse bei

minimaler Beeinträchtigung des Gewebes zu erzielen. Die schonende Gewebebehandlung und die Anwendung kleiner Inzisionen minimiert Traumata an umliegenden Strukturen und fördert eine schnellere Heilung (Aldahlawi et al., 2023).

Die Sofortimplantation, ist eine Vorgehensweise in der Implantologie, die darauf abzielt, den Prozess der Zahnimplantation durch unmittelbares Setzen des Implantats nach der Zahnextraktion zu beschleunigen. Kois J. definiert fünf Faktoren, die bei der Sofortimplantation für die peri-implantäre Ästhetik berücksichtigt werden müssen: die Position des Zahnes relativ zum freien Zahnfleischrand, die Form und der Biotyp des Parodonts, die Form des Zahnes, die Position des Knochenkamms vor der Zahnentfernung (Kois et al., 2004). Die patient\*innenindividuellen Merkmale der Hart- und Weichgewebesituation müssen beachtet werden, um die Indikation einer sofortigen Implantatinsertion nach Entfernung des Zahnes abzuwägen. Der parodontale Biotyp spielt eine bedeutende Rolle bei der Bestimmung der Dimensionen der parodontalen Gewebe, einschließlich der Kauschleimhaut und der biologischen Breite. Ein dicker Biotyp ist durch Zahnfleischgewebe gekennzeichnet, in dem man die Parodontalsonde während der Sondierung nicht sehen kann (Olsson et al., 1991), während beim dünnen Biotyp die Sonde durch dünnes Zahnfleischgewebe zu sehen ist. Dicke Biotypen neigen dazu, widerstandsfähig zu sein, sind jedoch anfälliger zur Erhöhung der Sondierungstiefe, während dünnere Biotypen nach mechanischer oder chirurgischer Manipulation eher zu Zahnfleischrezessionen neigen (Claffey et al., 1986). Wenn jedoch die sofortige Insertion von Implantaten bei den Patient\*innen mit dünnem Biotyp durchgeführt wird, besteht ein erhöhtes Risiko, den Metallrand des Implantats freizulegen, deshalb muss das Implantat tiefer eingesetzt werden. Dünne Gewebebiotypen weisen eine höhere Häufigkeit von Zahnfleischrezessionen von mehr als 1 mm im Vergleich zu dicken Biotypen auf (Evans et al., 2008). Darüber hinaus wurde bei Lokalisationen mit sofort platzierten Implantaten berichtet, dass 50 % der ursprünglichen Breite des bukkalen Knochens einer Resorption unterliegen. Daher wird die sofortige Insertion von Implantaten in Bereichen mit dünnem Gewebebiotyp aufgrund dieser Bedenken oft nicht empfohlen (Koh et al., 2010). Für die Sofortimplantation ist eine Kieferkambbreite von 4–5 mm in der Breite und 10 mm in der Höhe erforderlich, sodass die Stabilität und die Sicherheit der anatomischen Strukturen (Unterkieferkanal, Kieferhöhle, Nasenboden) gewährleistet sind (Tarnow et al., 2003). Eine Schleimhautdicke von 3-4 mm ist ideal, um die langfristig vorhersehbare Ergebnisse des Implantats zu erreichen, nämlich 2 mm keratinisierte Gingiva und 1 mm befestigte Gingiva.

In vielen Fällen hängt der Erfolg eines Implantats von der Stabilität des Weichgewebes ab. Laut Zhang zufolge trägt eine ausreichende Menge an haftender Schleimhaut zu einem besseren Implantatsüberleben bei und verringert das Risiko von Rezessionen und Periimplantitis (Zhang et al., 2022). Bei unzureichendem Weich- oder Hartgewebenvolumen erfolgt eine Gewebeaugmentation mit xenogenen, autologen Materialien, chirurgischen Techniken, vor allem der koronal verschobenen Lappenmethode, durchgeführt. Die Methode des koronal verschobenen Lappens ist für die Rezessionsbeseitigung indiziert, wenn die Dicke der keratinisierten Gingiva weniger als 1 mm beträgt, im Falle eines dünnen Biotyps der Gingiva, der zur Rezession neigt (Dawson et al., 2022). Die operative Technik im Rahmen der Sofortimplantation besteht in einem trapezförmigen Flap mit schrägen submarginalen Inzisionen und atraumatischer Zahnextraktion (Zucchelli et al., 2000). Nach dem Einsetzen des Implantats wird die Implantatoberfläche und die bukkale Alveolenwand mit einer Masse aus xenologischem Material (z.B. Cerabone, Botiss) und autologem Knochen bedeckt, und das Biomaterial wird mit einer Membran (z.B. Perikard oder Kollagenmembran) stabilisiert (Stefanini et al., 2022). Das freie Gingivatransplantat, das aus dem hinteren Teil des Gaumens entnommen wurde, wird extraoral de-epithelisiert und koronal an der Innenseite des bukkalen Lappens genäht (Zucchelli et al., 2010). Der Verschluss des Lappens beginnt koronal, zuerst wird die schwächere anatomische Papille vernäht, eine provisorische Krone aufgesetzt und nach der zweiten Papille die abschließende Naht am Rande der Implantatkrone angebracht. Weichgewebeaugmentationen mittels Bindegewebestransplantaten ermöglichen eine gezielte Verbesserung ästhetischer Emergenzprofile und den Ausgleich von Weichgewebedefiziten (Chackaratchi et al., 2019).

Die Zukunft des Weichgewebemanagements könnte durch die Integration modernster Technologien, wie digitale Bildgebung und 3D-Planung, weiter optimiert werden. Fortschritte in regenerativen Verfahren könnten ebenfalls die Vorhersagbarkeit und Effizienz verbessern. Die digitale Verfahrenstechnologie verbessert die Planung und Durchführung von Weichgewebeaugmentationen und verringert gleichzeitig Komplikationen. So ermöglicht die Digitale Volumetomografie (DVT) mit STL-Dateien eine Bewertung der Menge des verfügbaren Knochengewebes, des Phänotyps des Parodontiums, der peri-implantären Gewebe und der Schleimhautdicke (Couso-Queiruga et al., 2023).

Periapikale Läsionen sind nach Tolman und Keller eine Kontraindikation für einen sofortigen Eingriff (Tolman et al., 1991). Nach einer Zahnextraktion mit chronischer periapikaler Infektion wird die Alveole gründlich gereinigt, mit einem Antibiotikum aufgefüllt und 3-6 Monate lang geheilt (Esposito et al., 2010). Trotz des Ziels, den Alveolarknochen zu erhalten,

besteht das Risiko eines vorübergehenden Knochenverlusts, insbesondere in den ersten Wochen nach der Extraktion. Dies könnte die langfristige Stabilität des Implantats beeinflussen (Esposito et al., 2010). Die Volumenerhaltung des Kieferkamms während der Extraktion, auch bekannt als Socket Preservation, ist eine Technik zur Kontrolle der Resorption nach einer Zahnentfernung (Kassim et al., 2014). Solche Knochenersatzmaterialien wie Hydroxylapatit, bioaktives Glas, deproteinisiertes bovines Knochenmineral (DBKM), menschliche demineralisierte Knochenmatrix sind geeignet zum Ausfüllen der Alveole nach einer Extraktion (Machtei et al., 2018). In einer Studie von Fan et al. wurde nach einer Zeitdauer von zwölf Wochen nach der Extraktion bei 82 % der Patient\*innen eine Erhaltung der Breite des Alveolarkamms beobachtet. Zudem wurde eine Zunahme der Knochendichte sowie eine Verringerung des vertikalen Knochenverlusts festgestellt (Fan et al., 2021).

Die Spätimplantation bezeichnet das Einsetzen eines Implantats nach einer Heilungsphase von 12–16 Wochen bis 6-12 Monate, in welcher das Weichgewebe und der Alveolarknochen nach der Zahnextraktion verheilen (Tonetti et al., 2019). Dieser Ansatz eignet sich für die Patient\*innen mit periapikalen Läsionen des Alveolarknochens, einer radikulären Zyste und unzureichendem Knochenvolumen zur Stabilisierung des Implantats (Buser et al., 20216). Patels Studie zeigt, dass es Unterschiede in der Überlebensdauer von Implantaten gibt, wenn man die Methoden der sofortigen und der verzögerten Implantation vergleicht. Eine detailliertere Analyse zeigt einen höheren Prozentsatz an erfolgloser Osseointegration bei der Sofortimplantation, nämlich 5-10 %. Bei der verzögerten Implantation sind es weniger als 5 % (Patel et al., 2023). Insgesamt repräsentiert die Sofortimplantation eine spannende Entwicklung in der Implantologie, die darauf abzielt, nicht nur Effizienz, sondern auch Qualität und ästhetische Ergebnisse zu maximieren. Der Erfolg dieser Methode hängt jedoch wesentlich von der präzisen Umsetzung und einer individuellen Patient\*innen Beurteilung ab.

### **1.5. Implantatplanung**

Ein wichtiger Aspekt ist die genaue Planung der Implantatsposition, die stets eine Balance zwischen prothetischen und ästhetischen Anforderungen, vorhandenem Knochenmaterial und chirurgischen Gegebenheiten darstellt. Die Behandlungsprotokolle haben sich in den letzten Jahren stark weiterentwickelt. Die chirurgischen Techniken sind aufgrund der Entwicklung von Planungstechnologien und des Verständnisses der biomechanischen Aspekte für ein günstiges Behandlungsergebnis vorhersehbarer geworden (Kernen et al., 2020). Eine präzise Planung trägt zu einer besseren Ästhetik, Gewebestabilität und prothetischen Ergebnissen bei

und ermöglicht eine korrekte Verteilung der Belastung und geeignete okklusale Kontakte (Besser et al., 2009). Die korrekte 3D-Positionierung der Implantate ermöglicht eine exakte Planung der abnehmbaren, verschraubten Suprakonstruktion.

Die konventionelle Implantatsplanung repräsentiert einen bewährten Ansatz in der Zahnmedizin, der auf traditionellen diagnostischen Methoden und dem Fachwissen des\*der Zahnarzt\*ärztin basiert. Diese besteht aus bewährten diagnostischen Verfahren wie Röntgenaufnahmen, Abdrücken und manuellen Vermessungen. Bei der klassischen Methode wird in der Regel ein Orthopantomogramm verwendet, wobei der Knochen jedoch nur zweidimensional beurteilt werden kann. Während digitale Technologien Einzug halten, bleibt die traditionelle Planung eine verlässliche Methode, die durch sorgfältige Analyse und präzise Umsetzung gekennzeichnet ist. Der digitale Ansatz beinhaltet die Planung in umgekehrter Richtung, das so genannte "Backward Planning", d. h. die Bestimmung der idealen Implantatsposition auf der Grundlage der Anatomie und der zukünftigen Prothetik. Die folgenden Computerprogramme sind die populärsten. Unter Berücksichtigung der individuellen anatomischen Merkmale, Scans und 3D-Röntgendaten können in den folgenden Computerprogrammen klinische Fälle geplant werden: Implant Studio, Exoplan, Codiagnostix, Nobel Clinician, Simplant (Kernen et al., 2020).

Der Verlauf der Behandlung mit dem digitalen Implantationsverfahren ist folgender: Vor der Planung des Eingriffs werden die Kieferabdrücke des\*der Patient\*in genommen, der Zahntechniker fertigt dann ein Modell für die Planung des Prothetiks an. Bei der vollständig zahnlosen Patient\*innen erfolgt die Anfertigung einer Röntgenschablone, auf welcher röntgendichte Marker angebracht und auf dem Röntgenbild identifiziert werden. Im Rahmen der präoperativen Planung erfolgt als nächster Schritt die Erstellung einer 3D-Aufnahme des\*der Patient\*in mit einer Röntgenschablone mittels digitaler Volumetomografie (DVT). Falls erforderlich, kann die Schablone mit Fixierungsschrauben fixiert werden. Ein 3D-Modell, welches mittels eines Koordinatensystems orientiert wurde, wird für die digitale Planung verwendet. Auf einem Panoramabild des Kiefers werden die Positionen der Implantate in Bezug auf die markierten anliegenden anatomischen Strukturen (z. B. N. mandibularis, C. mandibularis, Nasenboden, Kieferhöhlen) ausgewählt, und die Position des Implantats wird zusätzlich auf Querschnitten korrigiert. Geeignete Implantate werden aus der Implantatbibliothek ausgewählt und zum Schluss wird die passende Bohrschablone angefertigt. Die Schablone wird während der Operation am Kiefer fixiert, wobei die Schleimhaut für den chirurgischen Zugang durchbohrt oder inzidiert wird. Im ersten Schritt erfolgt die Bohrung mit dem Rosenbohrer, gefolgt von den Führungs- und

Aufweitungsbohrungen der entsprechenden Größe. Nachdem das Implantatbett vorbereitet ist, wird das Implantat eingeschraubt, ein Gingivaformer oder eine Abdeckschraube eingesetzt und die Schleimhaut vernäht. Zur Kontrolle der Position des Implantats wird ein postoperatives 2D-Röntgenbild angefertigt.

## **1.6. Radiologische Diagnostik**

### Orthopantomogramm

Die Röntgenaufnahme, wie das Orthopantomogramm, zeigt die Zahnhartsubstanz und die angrenzenden Skelettknochen. Bei dieser Untersuchung erhält der\*die Patient\*in eine geringe Strahlendosis ( $0,014\mu\text{Sv}$ )(Cosson, 2020). Der\*die Behandler\*in erhält ein detailliertes Bild von beiden Kiefern und Zähnen. Außerdem können bei Bedarf die Helligkeit und der Kontrast eingestellt und Messungen vorgenommen werden. Einerseits eignet sich das OBG aufgrund der geringen Strahlendosis gut für den täglichen Zahnarztbesuch, andererseits werden die Daten nur in einer zweidimensionalen Ebene dargestellt. Aufgrund des vertikalen und horizontalen Zooms kann das Bild in bestimmten Fällen weniger informativ sein (Jacobs et al., 2004). Dies macht es unmöglich, die Form und Dicke des Knochengewebes und die Topographie der anatomisch wichtigen Strukturen zu beurteilen. Die Studie von Maddalone zeigt, dass das OPG-Bild in den vorderen und prämolaren Bereichen des Unterkiefers eine höhere Empfindlichkeit aufweist und die geringste Empfindlichkeit in den oberen Molaren (Maddalone et al., 2019).

Digitalisierte Panoramabilder haben ein höheres Qualitätsniveau und werden als diagnostische Methode in der Implantologie empfohlen (Jacobs et al., 2004). So lässt sich die Länge des Mandibularkanals, der sich vom Foramen mandibulae bis zum Foramen mentale erstreckt, beurteilen (Mehra et al., 2012). Die Studien zeigten, dass es einen Unterschied in der Sichtbarkeit der oberen, unteren, medialen und distalen Wände im Oberkieferzahnsegment auf dem digitalen Panoramabild gibt. In 22 % der Oberkieferzahnsegmente ist der obere Rand des MC nicht sichtbar, während der untere Rand des Unterkieferkanals in 9-10 % der Fälle nicht erkennbar ist. Daher wird in 25 % der Fälle eine 3D-Untersuchung empfohlen, um den oberen Rand des Unterkieferkanals genau zu erkennen (Kubilius et al., 2016). In vielen klinischen Fällen ist die zweidimensionale Bildgebung für die Zahnimplantation nicht ausreichend, da vitale anatomische Strukturen und anatomische Veränderungen des Knochens nicht klar erkennbar sind und auch für digitale Planungsverfahren nicht genügend sind (Kunzendorf et al., 2021). Für eine hochwertige

Implantatsplanung und digitale Lösungen empfehlen die Autor\*innen dreidimensionale Röntgenuntersuchungen (Jacobs et al., 1999).

### Computertomografie

Die ersten CT-Scanner wurden 1973 verwendet. Seither hat sich diese Technologie weiterentwickelt und wird in verschiedenen Bereichen der Medizin verwendet. Die Computertomographie ist eine Röntgenuntersuchungsmethode, die sich von anderen Methoden dadurch unterscheidet, dass sie eine digitale Darstellung einer Serie von axialen Schichten erstellt. Die Bilder werden überlagert, wodurch sich anatomische Strukturen dreidimensional untersuchen lassen. Die Softwarefunktionalität ermöglicht es, die Schichten in verschiedenen Dimensionen zu drehen, so dass man Winkel- und Längenmaße messen und die Knochendichte bestimmen kann (Norton et al., 2001). Zwar hat auch diese Methode ihre Nachteile: Der Abstand zwischen den Schichten von bis zu 0,5 mm kann für die Planung eines chirurgischen Eingriffs zu wenig sein (Ganz, 2001). Zudem ist die Strahlendosis für den\*die Patient\*in den Angaben zufolge recht hoch (400-2100  $\mu\text{Sv}$ ). Wenn der Eingriff nicht lebensrettend ist, rechtfertigt dies nicht die Risiken für seine Durchführung (Swennen et al., 2006).

### Digitale Volumetomografie

Seit 1990 ist die Digitale Volumetomografie die neueste Technologie, die den Anforderungen der Implantologie entspricht (Stanford et al., 2007). Die Entwicklung kompakter, hochwertiger Sensoren für die Aufnahme von Röntgenstrahlen und die Entwicklung einer leistungsfähigeren Computertechnologie haben dies ermöglicht. Das Gerät wird mit einem kegelförmigen Röntgenstrahl und einem flachen Sensor ausgestattet, der die Strahlung registriert. Der Cone Beam CT-Scanner bedeckt den Untersuchungsbereich in einer Umdrehung, so dass die Strahlenbelastung im Vergleich zur herkömmlichen CT deutlich geringer ist (6-120  $\mu\text{Sv}$ ) (Mishima et al., 2001). Aufgrund der hohen Bildauflösung können die anatomischen Strukturelemente, die der\*die Operateur\*in benötigt, deutlich sichtbar werden. DVT ist schnell und einfach durchzuführen. Der Nachteil dieser Art der 3D-Diagnostik ist die unzureichende Differenzierung der Weichteile, die eine Beurteilung von Weichteiltumoren und tumorähnlichen Gebilden erschweren kann (Loubele et al., 2007). Die Strahlenbelastung hängt von den Geräten und ihren Einstellungen ab. Die neuesten Geräte sind automatisch mit einem Niedrigdosisprotokoll programmiert, das für die Zahnmedizin erforderlich ist (Yeung et al., 2019). DVT sollte die wichtigste 3D-Diagnosemethode für die Planung der chirurgischen Phase der Implantation sein.

## Strahlenexposition

Abhängig von der Wahl des Röntgengeräts variiert die Strahlungsmenge. In der Zahnmedizin werden für Röntgenuntersuchungen geringere Strahlendosen verwendet als in der Allgemeinmedizin. In aktueller Röntgensoftware wird in der Regel auch die Strahlendosis erfasst. Bei der Berechnung der Dosis werden der Körperbau und das Gewicht des\*der Patient\*in berücksichtigt. Im Gegensatz zu Erwachsenen ist der Körper von Kindern während der Wachstumsphase empfindlicher gegenüber Strahlung.

Untersuchung	µSv pro Aufnahme
Kleinbildröntgen	5
Panoramaröntgen	2.7-24,5
DVT	11-674
CT	180-2100

**Tabelle 1: Abschätzung der effektiven Dosis von zahnärztlichen Röntgengeräten (Qiang et al, 2019).**

Bei einer Panoramaröntgenaufnahme erhält der\*die Patient\*in eine Strahlendosis, die der eines 8-stündigen Fluges entspricht, nämlich 0,04 mSv. Die jährliche effektive Dosis aus natürlichen Strahlenquellen beträgt in Österreich 2,8 mSv pro Person / Jahr (Ludlow et al., 2015).

### **1.7. 3-D Planung und Navigation.**

Die 3D-Bildverarbeitungssoftware ermöglicht die Bestimmung des Volumens und der Struktur des Knochengewebes. Für die Navigationsplanung bietet die Software die Möglichkeit, eine Bibliothek verfügbarer virtueller Implantate zu verwenden, wobei deren Länge und Durchmesser berücksichtigt werden. Das erlaubt die Wahl des geeigneten Implantats je nach klinischer Situation. Laut der vielen Autor\*innen ist die

3D-Implantatplanung einer der wichtigsten Faktoren für die Stabilität des periimplantären Gewebes (z.B. Papaspzridakos et al., 2012). Bei der analogen Methode hängt der Erfolg der Operation von den Fähigkeiten des\*der Chirurg\*in ab. Gleichzeitig erfordern die Tiefe und die Achse der Implantatspositionierung eine größere Präzision, die ohne Navigation schwer zu erreichen ist. Die Position der Implantate wird dem\*der Patient\*in mit Hilfe einer im Labor hergestellten stereolithografischen Schablone übertragen.

Die Wahl eines digitalen Ansatzes ermöglicht eine vollständige Operationsplanung und die Vermeidung von Schäden an wichtigen anatomischen Strukturen durch DVT-Scans. Dieser Ansatz bietet die Möglichkeit, provisorische Konstruktionen für die sofortige Belastung vorzubereiten, was für den Patient\*innen Komfort wichtig ist. Die Sofortbelastung benötigt eine gute Primärstabilität des Implantats, weniger mechanischen Druck und die Anfertigung einer provisorischen Versorgung, um eine Abstoßung oder Verschiebung des Implantats zu verhindern (Morton et al., 2004). Studien von Brief et al. zeigen, dass die geführte Implantation genauer als die manuelle Implantation ist (Brief et al., 2005). Navigationsplanungssoftware verwendet Dicom-basierte Dateien in der DVT, die zur Berechnung der Parameter für die Schablonenherstellung verwendet werden (Serrano et al., 2008). DICOM (Digital Imaging and Communication in the Medicine) ist ein Standard-Format für die Übertragung von digitalen radiologischen Bilddateien zwischen allen medizinischen Softwaresystemen verschiedener Hersteller und unterschiedlichen Geräten, die Aufnahmen empfangen (Burgess, 2015). Die vor der Operation erhaltenen dreidimensionalen Bilddaten sind die Grundlage für die nachfolgende digitale Implantatsplanung. So kann man den Alveolarknochen und die Knochenstrukturen in den Schnitten dreidimensional beurteilen. Danach wird aus der verfügbaren Implantatsbibliothek ein Implantat ausgewählt, das in der Länge und im Durchmesser perfekt passt. Das Programm ermöglicht die Position des Implantats in verschiedenen Dimensionen einzustellen. Sobald die Planung abgeschlossen ist, können alle Daten gespeichert und für die Herstellung einer stereolithografischen Bohrschablone übertragen werden.

### **1.8 Technische Beschreibung digitaler Zugangsmöglichkeiten in der Implantologie**

Die wichtigsten Konzepte der digitalen Implantologie sind statische und dynamische Navigierungsmethoden. Für die klassische Methode wird in der Regel eine Bohrschablone für die Reihenfolge der Knochenbohrung und der Implantatsplatzierung verwendet. Für die dynamische Navigation wird ein Referenzmarker an der Schiene befestigt, der in Echtzeit als Orientierungspunkt dient. Durch die ständige Kontrolle kann das Implantat in der geplanten

Position platziert werden. Zweck beider Techniken ist es, während des Eingriffs eine präzise Implantatspositionierung mit vorheriger virtueller Planung zu erreichen.

### Statische Navigationskonzepte

Die Freihandmethode und die geführte statische Navigation sind heute die beliebtesten Methoden (Gargallo-Arbiol et al., 2019). Bei der statischen Methode wird eine Schablone auf Basis von DVT- und CT-Daten mit einem virtuellen Softwareprogramm geplant. Es gibt verschiedene Varianten von Schablonenunterstützung: schleimhautgetragene, knochengetragene oder yahngetragene Schablonen. Bei der Bohr- und Implantationsführung wird unterschieden zwischen: voll- und teilgeführt. Schleimhautgetragene Schablonen stellen die ideale Lösung für lappenlose Operationen dar. Sie verkürzen die Eingriffsdauer signifikant und ermöglichen es den Patient\*innen nach dem Eingriff, nahezu schmerz- und schwellungsfrei zu sein (Arisan et al., 2010). Zur Erzielung einer stabilen Positionierung kann die Bohrschiene bei zahnlosen Patient\*innen mit transmukosalen Stiften fixiert werden. Die vorliegende Bohrschablone eignet sich nicht für Indikationen, bei welchen eine Knochenaugmentation erforderlich ist, mit Ausnahme der Variante des Tunnelzugangs für die Gewebeaugmentation (Florian et al., 2021). Schablonen mit Knochenunterstützung finden Anwendung bei schwierigen anatomischen Verhältnissen, sofern eine Gewebeaugmentation erforderlich ist. Die Methode ermöglicht dem\*der behandelnden Arzt\*Ärztin eine präzise Beurteilung der klinischen Situation. Schablonen, die auf den Zähnen befestigt werden, sind am stabilsten und können auch bei teilweisem Fehlen von Zähnen verwendet werden. Es ist wichtig, das Design des Lappens während der virtuellen Planung zu überlegen, damit keine Schwierigkeiten beim Anlegen der Schiene während der Operation entstehen (Thieringer et al.). Bohrschablonen können entweder geschlossen oder offen sein. Erstere werden für vollständig kontrollierte Eingriffe verwendet. Als Nachteil besteht das Risiko einer Überhitzung des Knochens und der Unterbrechung des Heilungsprozesses aufgrund einer unzureichenden Kühlung während des Eingriffs. Bei der Verwendung offener Schablonen kann die Position des Implantats aufgrund der direkten Sicht auf den Knochen angepasst werden (Kühl et al., Thieringer et al.). Um die korrekte Implantatsposition zu erreichen, stehen bei den verschiedenen Implantatssystemen spezielle Sets mit Stoppfern oder Bohrern mit Markierungen für die Tiefenkontrolle zur Verfügung.

Es gibt zwei Arten der geführten Implantation: die halbgeführte und die vollständig geführte Methode. Beim ersten Konzept wird die Schablone nicht in allen Phasen des Eingriffs verwendet, sondern nur für die erste Bohrung. Damit kann der\*die Chirurg\*in die

anatomischen Bedingungen zum Zeitpunkt des Eingriffs beurteilen und gegebenenfalls die Position der Implantate anpassen. Hier kommt es auf die Erfahrung des\*der Chirurg\*in an, da das Implantat ohne Führungsschiene eingesetzt wird (Kühl et al, 2013). Das zweite Konzept der vollständig geführten Chirurgie zeigte laut Studien eine höhere Genauigkeit beim Einsetzen von Implantaten entsprechend der Vorplanung (Kühl et al, 2013). Andererseits ist es nicht möglich, den Verlauf der geplanten Operation zu ändern, da die Schablone für alle Schritte vorgesehen ist. Bei vollständig geführten Eingriffen besteht praktisch kein Risiko, anatomische Strukturen zu beschädigen. Außerdem wird dadurch eine hohe Genauigkeit bei den Patient\*innen mit teilweise fehlenden Zähnen gewährleistet (Chia-Cheng et al, 2020).

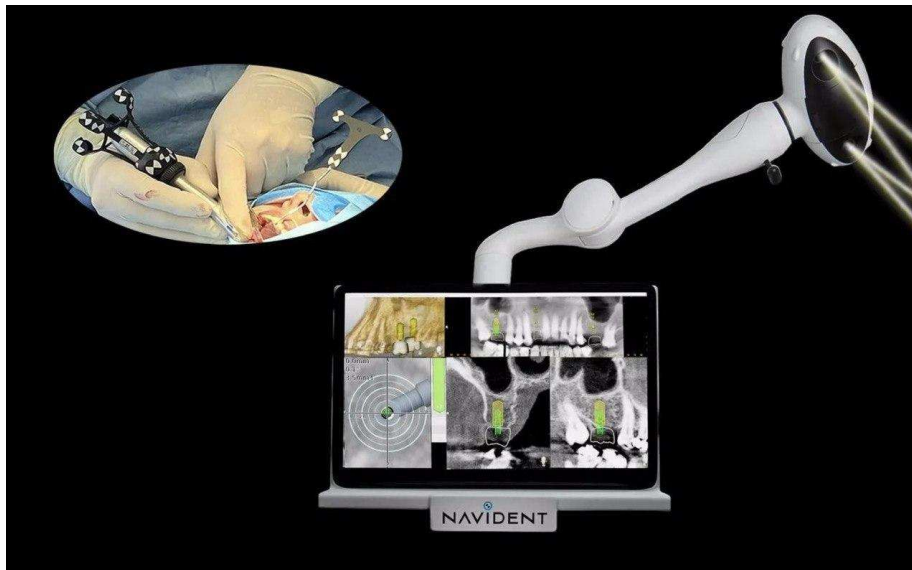
Die Freihandimplantation zeigt seit langem gute Ergebnisse. Trotzdem gibt es ohne Schablonen oder dynamische Navigationssysteme deutliche Unterschiede in der Genauigkeit. Untersuchungen zur Abweichung zwischen geplanter und erreichter Implantatsposition zeigen bei der Freihandmethode eine deutlichere koronale, apikale und anguläre Deviation als beim navigationsgestützten Eingriff (Kivovics et al, 2022).

#### Dynamische Navigationskonzepte

Die dynamische Navigation ermöglicht dem\*der Chirurg\*in die Untersuchung des\*der Patient\*in und die schnellstmögliche Durchführung der Operation, ohne Zeit für die Erstellung einer Navigationsschablone zu verlieren. Voraussetzung dafür sind CBCT, virtuelle Planung, Kalibrierung und Platzierung des Implantats in Übereinstimmung mit dem 3D-Bild auf dem Bildschirm (Panchal et al., 2019).

Im Operationssaal sieht der\*die Implantolog\*in das CBCT-Bild auf dem Computer, das die Position und den Winkel des Bohrers sowie die Bohrungstiefe in Echtzeit anzeigt. In Abhängigkeit vom dynamischen System werden bestimmte Orientierungspunkte oder optische Markierungen gesetzt, die vom Kamerasystem erkannt und an das Navigationssystem auf dem Bildschirm übertragen werden (Wu et al., 2020). Die dynamische Navigation kann mit oder ohne Navigationsschiene durchgeführt werden, je nachdem, welches System verwendet wird. Ohne Bohrschablone ist das Sichtfeld und der direkte Zugang größer, und der Knochen wird beim Bohren nicht überhitzt. Zur Echtzeitkontrolle des Eingriffs erfolgt die Registrierung an ausgewählten Punkten auf den Zähnen, und die Genauigkeit wird bewertet, indem die Spitze des Trackers auf der okklusalen, bukkalen und lingualen Seite platziert wird. Nach der Kalibrierung am Kiefer wird der am Winkelstück befestigte Tracker im System auf dem Computer kalibriert. Während der Behandlung zeigen die Richtungspfeile auf dem Bildschirm die angulare, mesio-distale und bucco-linguale

Verschiebung an. Nach dem Schritt für Schritt Bohren werden die ausgewählten Implantate kalibriert und in den entsprechenden Bereich eingesetzt (Nirula et al., 2023). Der Unterschied



zur statischen Methode besteht in der Möglichkeit, den Operationsverlauf und die Implantatsgröße nach objektiver Beurteilung der klinischen Verhältnisse zu ändern.

**Abbildung 1. Beispiel eines Winkelstückes mit optischen Treckern der Firma Navident, Deutschland (Dentino, <https://www.dentino.de/navident>, Zugriff am: 24.02.2024)**

### **1.9. Übersicht der technischen Spezifikationen von Implantationsplanungssystemen.**

Im Folgenden werden die verschiedenen Systeme für die navigierte Implantologie beschrieben. Jedes dieser Programme ist für die Zahnärzt\*innen kommerziell erhältlich. Informationen über die Hersteller von Computersystemen und deren Beschreibungen wurden auf offiziellen Webseiten der Softwarehersteller recherchiert. Berücksichtigt wurden die Softwareprogramme der folgenden Hersteller:

- Implant Studio, Kopenhagen, Dänemark
- Exoplan, Darmstadt, Deutschland
- Codiagnostix, Basel, Schweiz
- Nobel Clinician, Zürich, Schweiz
- Simplant, Dentsply Implants, Mannheim, Deutschland

- Navident, Toronto, Ontario, Kanada

Die Informationen wurden auf offiziellen Websites der Softwarehersteller recherchiert.

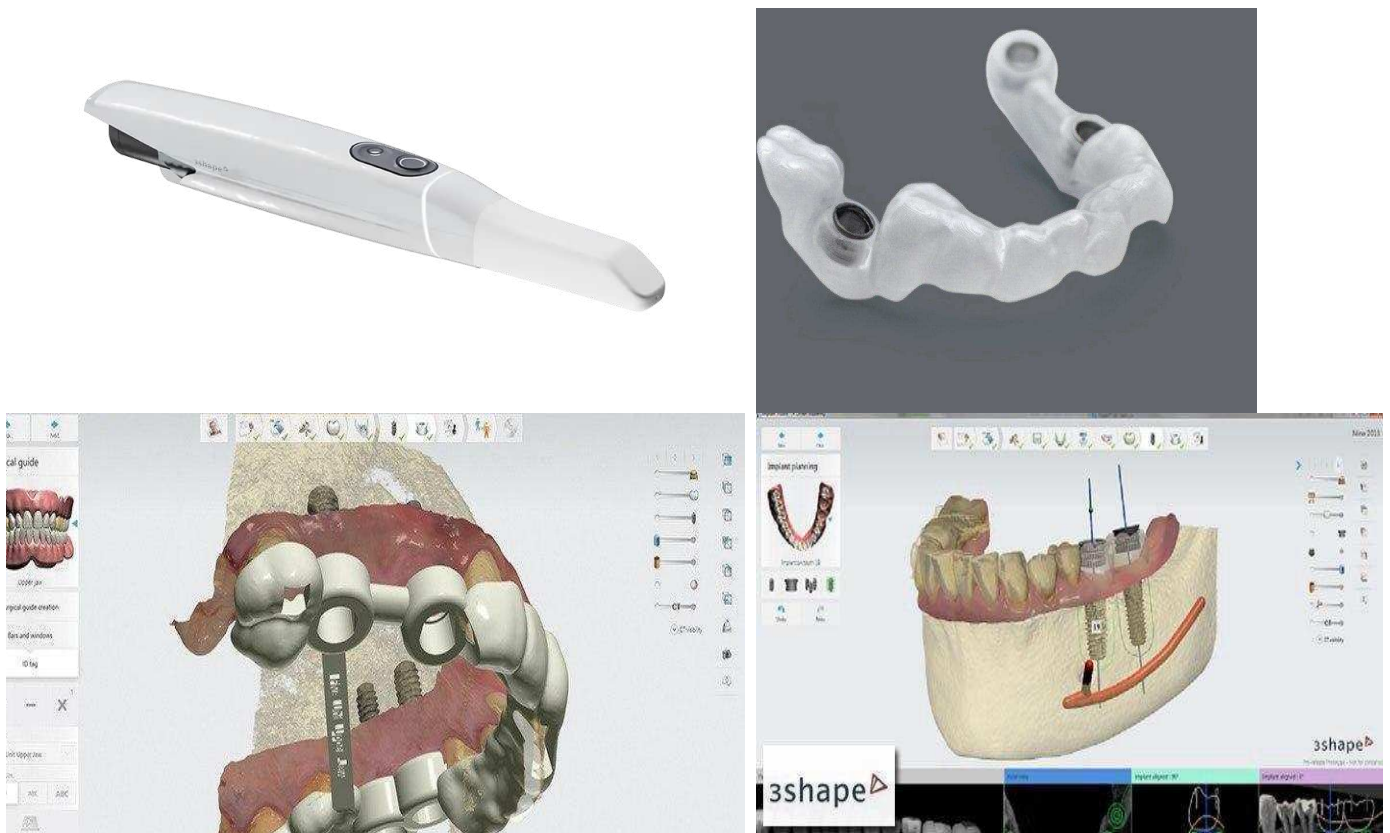
### **Implant Studio**

Die Firma 3Shape bietet das 3D-Navigationssystem Implant Studio an (<https://www.3shape.com/en-us/software/implant-studio>, Zugriff am: 25.02.2024). Implant Studio bietet einen schnellen und ergonomischen Arbeitsablauf und mehr Komfort für die Patient\*innen.

Um mit diesem System zu arbeiten, wird ein intraoraler Scanner von 3Shape oder einem anderen Hersteller verwendet. Andere Dateien im Dicom- und STL-Format (ohne Texturangaben) sind ebenfalls geeignet.

Der digitale Ansatz in diesem Programm könnte beispielsweise wie folgt aussehen:

- Scannen. Für diese Phase wird empfohlen, den Trios Präzisions-Intraoralscanner und den DVT-Scan des\*der Patient\*in zu verwenden. Auf diese Weise werden die Dicom- und STL-Daten in die Software importiert und miteinander verbunden. Intraorales Scannen reduziert die Anzahl der Schritte und die Zeit, die für die Erstellung virtueller Modelle erforderlich sind.
- Planung. Die prothetisch orientierte Implantatsplanung berücksichtigt die klinische Situation, Anatomie, Gingiva, Knochendichte, Nervenstrukturen
- Design. Für die Planung der individuellen Navigationsschablone und der verschraubten Kronen wird die Software verwendet.
- Drucken. Die geplante Schablone und die provisorischen Kronen können auf dem vorhandenen Drucker in der Klinik ausgedruckt oder an das Labor geschickt werden.
- Eingriff. Schablone, kann auf den Zähnen, Knochen oder der Schleimhaut befestigt werden und wird in allen Phasen der Bohrung und der Implantatinsertion verwendet. Wenn es die klinische Situation erlaubt, wird dem\*der Patient\*in zum Zeitpunkt der Implantation die Versorgung mit einer Krone angeboten.



**Abbildung 2. Beispiel einer 3-D Darstellung mit Implant Studio (3Shape, <https://www.3shape.com/en-us/software/implant-studio>, Zugriff am: 25.02.2024)**

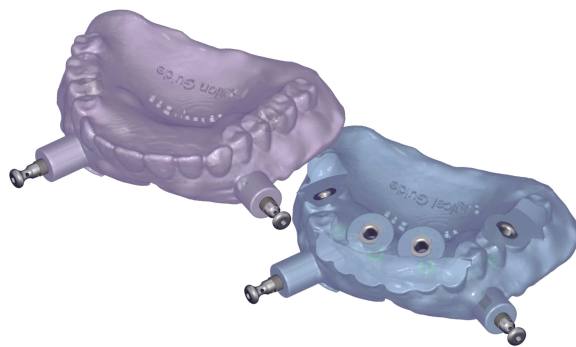
Die Implantatsplanung unter Berücksichtigung der Weichgewebsqualität ist heute nur noch mit diesem System möglich, das über einen eigenen Intraoralscanner (Trios) mit Texturinformation verfügt.

### **Exoplan**

Exoplan basiert auf der Exocad Software-Plattform (<https://exocad.com/our-products/exoplan>, Zugriff am: 25.02.2024) Exoplan ermöglicht es die virtuelle Position des Implantats prothetisch orientiert zu planen und individuelle Navigationsschablonen mit dem Guide Creator zu erstellen. Durch die Integration von exoplan in die CAD-Software DentalCad wird die Planung von temporärer und permanenter implantatgetragener Prothetik ermöglicht.

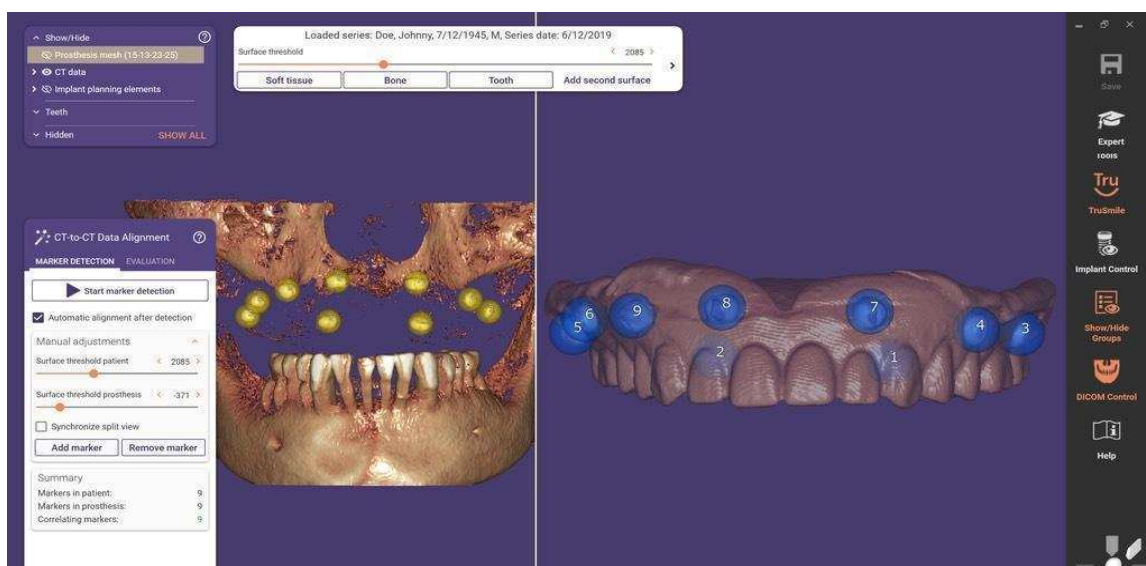
Um mit dem Programm arbeiten zu können, benötigt man einen CBCT-Scan im Dicom-Format und einen intraoralen Scan im STL-Format. Die Dateien werden dann in die

virtuelle Implantatsplanungssoftware Exoplan importiert. Der nächste Schritt ist, die Panoramakurve auszuwählen und die Dicom- und STL-Dateien zusammenzuführen. Wenn alles genau ausgerichtet ist, kann der digitale Wax-up-Zahn an der richtigen Stelle platziert werden. Ausgehend von dieser Wax-up-Position und dem überlagerten CBCT-Scan kann das Implantat in die ideale Position gebracht werden. Die Software bietet dann Anleitungen für die Platzierung von Führungshülsen an den richtigen Stellen und das Design der chirurgischen Schablone. Die Schablone wird mit einem 3-D-Drucker aus chirurgischem Harz hergestellt. Die digitale Implantatsdesigndatei wird in der Cad-Software gespeichert, so dass man die Gestaltung der zukünftigen Restauration weiter planen kann (Wimmer, 2021).



**Abbildung 3. Beispiel der Bohrschablone der Firma Exocad, Deutschland ([https://emeraldental.com/uploads/exocad\\_whats\\_new\\_exoplan\\_Galway\\_en.pdf](https://emeraldental.com/uploads/exocad_whats_new_exoplan_Galway_en.pdf), Zugriff am: 25.02.2024)**

Während der Operation wird das Implantat von Anfang bis Ende mit Hilfe der Navigation eingesetzt. Wenn die klinische Situation optimal ist, kann eine vorgefertigte provisorische Krone eingesetzt werden.



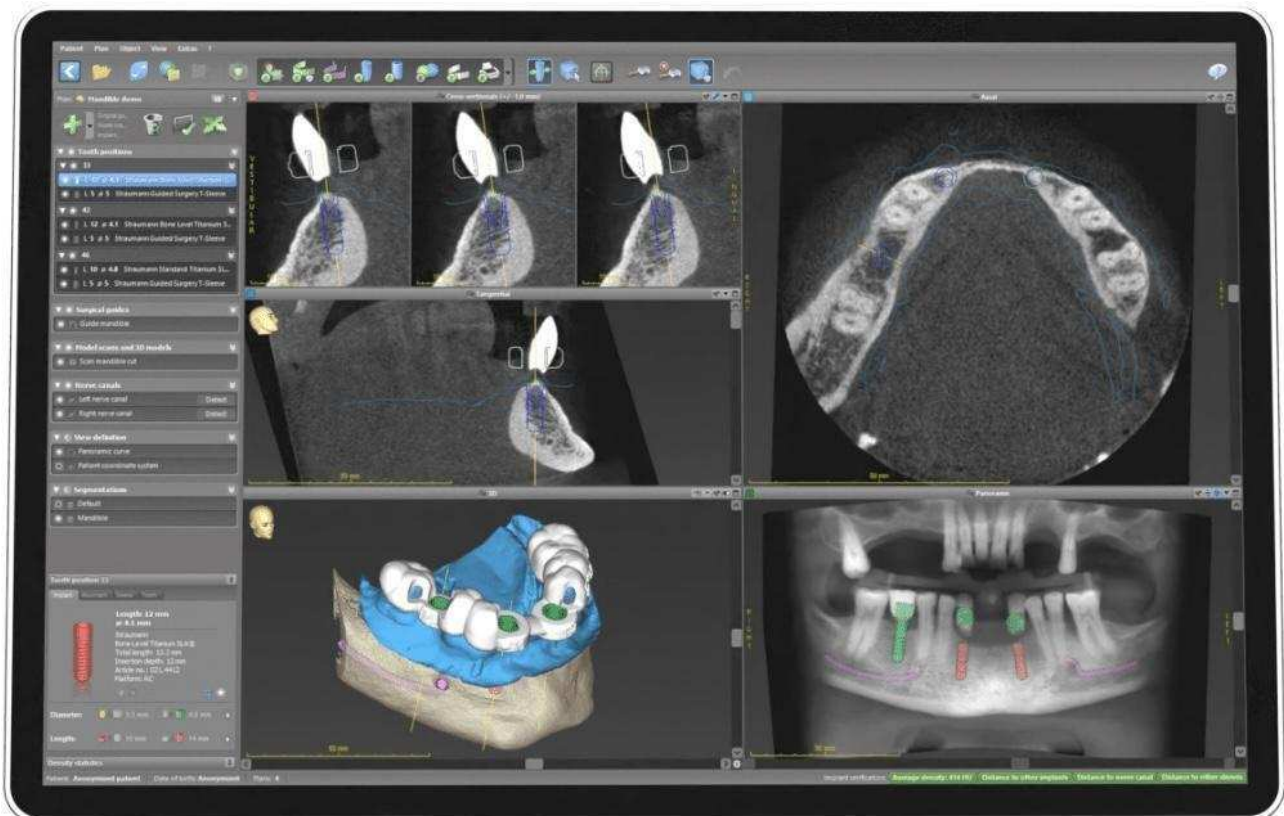
**Abbildung 4. Beispiel eines Dual-Scan-Protokolls mit Exoplan (Dentistry Today, <https://www.dentistrytoday.com/exocad-releases-explain-3-0-galway-software-in-the-united-states/>, Zugriff am: 25.02.2024)**

Für die Behandlungsplanung bei zahnlosen Patient\*innen mit Exoplan wird ein Dual-Scan-Protokoll verwendet. Zu diesem Zweck werden zwei CBCT- oder CT-Scans überlagert. Bei der einen trägt der\*die Patient\*in eine Röntgenschablone, bei der anderen nur eine Röntgenschablone.

### **Codiagnostix**

CoDiagnostix hat ähnliche Funktionen wie die zuvor beschriebene Software (<https://codiagnostix.com>, Zugriff am 25.02.2024). Die kontrollierte Implantation mit CoDiagnostix besteht aus der Herstellung einer stereolithografischen Bohrschablone. Das Behandlungsprotokoll besteht aus den folgenden Schritten: Abformung des Kiefers und Bissregistrierung, Scannen der Modelle mit einem Laborscanner. Nach Möglichkeit kann auch ein intraoraler Scan (STL-Datei) angefertigt werden, der die Planung erleichtert. In der Regel wird für die Planung von zahnlosen Patient\*innen ein Doppel-Scan-Protokoll verwendet. Zuvor werden Abdrücke von beiden Kiefern genommen und Modelle angefertigt. Im Labor werden die Modelle gescannt, der Biss wird mit Guttapercha-Markern aufgezeichnet und der endgültige Scan wird durchgeführt. Es wird ein CBCT-Scan des\*der Patient\*in angefertigt, der dann zusammen mit der STL-Datei in das Programm übertragen wird. Die erhaltenen Daten werden zur virtuellen Platzierung der Implantate in der gewünschten Position verwendet. Ihre Position wird in drei Dimensionen kontrolliert, in axialer, koronaler und sagittaler Richtung. Das Programm visualisiert den Nervus alveolaris inferior und warnt den\*die Anwender\*in automatisch, wenn das Implantat zu nahe an diesem Nerv liegt.

Die Auswahl der Implantate erfolgt aus einer virtuellen Implantatsbibliothek, in der etwa 3000 Implantate von 50 Herstellern zur Verfügung stehen. Je nach Länge, Durchmesser und System der Implantate wird das passende ausgewählt. Das Implantat wird in diesen Bildern platziert und seine Position kann in verschiedenen Projektionen betrachtet werden.



**Abbildung 5. Beispiel einer 3-D Planung mit CoDiagnostix (CoDiagnostix, <https://codiagnostix.com>, Zugriff am: 25.02.2024)**

Backward Planning wird durchgeführt, um eine ästhetisch ansprechende und funktionelle prothetische Versorgung zu erhalten. Dazu wird ein virtuelles Abutment in Länge, Neigung, Durchmesser und Rotation modelliert. Die Position des Implantats ist dann ideal, wenn die Achsen des Implantats mit der Achse der prothetischen Versorgung übereinstimmen. Nach der virtuellen Planung wird aus den Daten im Labor eine Schablone mit genauem Bohrprotokoll und die Möglichkeit der Implantatinsertion hergestellt.

### **Nobel Clinician**

Nobel Clinician von Nobel Biocare ist eine Software für die Diagnose und Implantatsplanung (<https://www.implantdentist.co.nz/procedures/dental-implants/nobel-guide/>). Alle Parameter bezüglich Behandlungsansatz, Diagnose und ästhetischem Ergebnis können vom\*von der Behandler\*in kontrolliert werden (Nobel Biocare USA, LLC).

Das Programm enthält alle Werkzeuge für die Anwendung des «All on 4» -Konzepts (Nobel Biocare, Göteborg, Sweden), das die Insertion von 4 Implantaten im zahnlosen Kiefer mit

einem minimalen Knochenvolumen vorsieht. Die Implantation erfolgt unter Verwendung einer mit NobelGuide geplanten Navigationsschablone.

Zu Beginn der Arbeit mit Nobel Guide werden die CT- oder CBCT-Daten des\*der Patient\*in, d.h. Dicom-Dateien, hochgeladen und in 3D-Bilder für eine präzise virtuelle Planung des Eingriffs umgewandelt. Eine vorgefertigte herausnehmbare Prothese dient als radiologische Schablone für den CT- oder CBCT-Scan. Wenn der\*die Patient\*in bereits eine Totalprothese hat, kann diese verwendet werden. An der Prothese werden 3 Löcher palatinal und 6 Löcher bukkal mit einem Durchmesser von 1,5 mm und einer Tiefe von 1 mm angebracht und mit einem Röntgenkontrastmaterial, zum Beispiel Guttapercha, gefüllt. Für die Bissregistrierung wird eine Silikonrolle verwendet (Lopes et al., 2016). Der nächste Schritt ist ein Doppel-Scan-Protokoll. Zuerst wird ein CBCT-Scan des\*der Patient\*in mit einer herausnehmbaren Prothese mit Röntgenmarkierungen erstellt und dann ein CBCT-Scan der Röntgenschablone.

Wie bei jeder anderen Software werden alle Dicom-Daten in NobelGuide integriert und die 3D-Bildgebung kann für die Planung verwendet werden. Die Implantate werden entsprechend dem Knochenangebot lingual und palatinal in die richtige anatomische Position platziert (Lopes et al., 2016). Die Schablone wird bei NobelBiocare in Göteborg, Sweden durch Online-Übertragung der 3D-Daten erstellt. Die fertige Schablone ist mit drei transversalen Löchern versehen, um die Schablone am Kiefer zu befestigen, und mit hohlen Metallhülsen für die schrittweise Bohrung des Implantatbetts (Melone et al., 2013). Nach dem Positionieren der Schablone kann ein Zugang ohne Flap erstellt und das Bohrprotokoll entsprechend dem ausgewählten System angewendet werden. Vor der Operation wird anhand einer chirurgischen Schablone und eines Modells eine provisorische Prothese mit Schraubenbefestigung angefertigt. Die prothetische Versorgung von Implantaten wird in der gleichen Sitzung durchgeführt, wenn keine Kontraindikationen dafür vorliegen (Lopes et al., 2016).

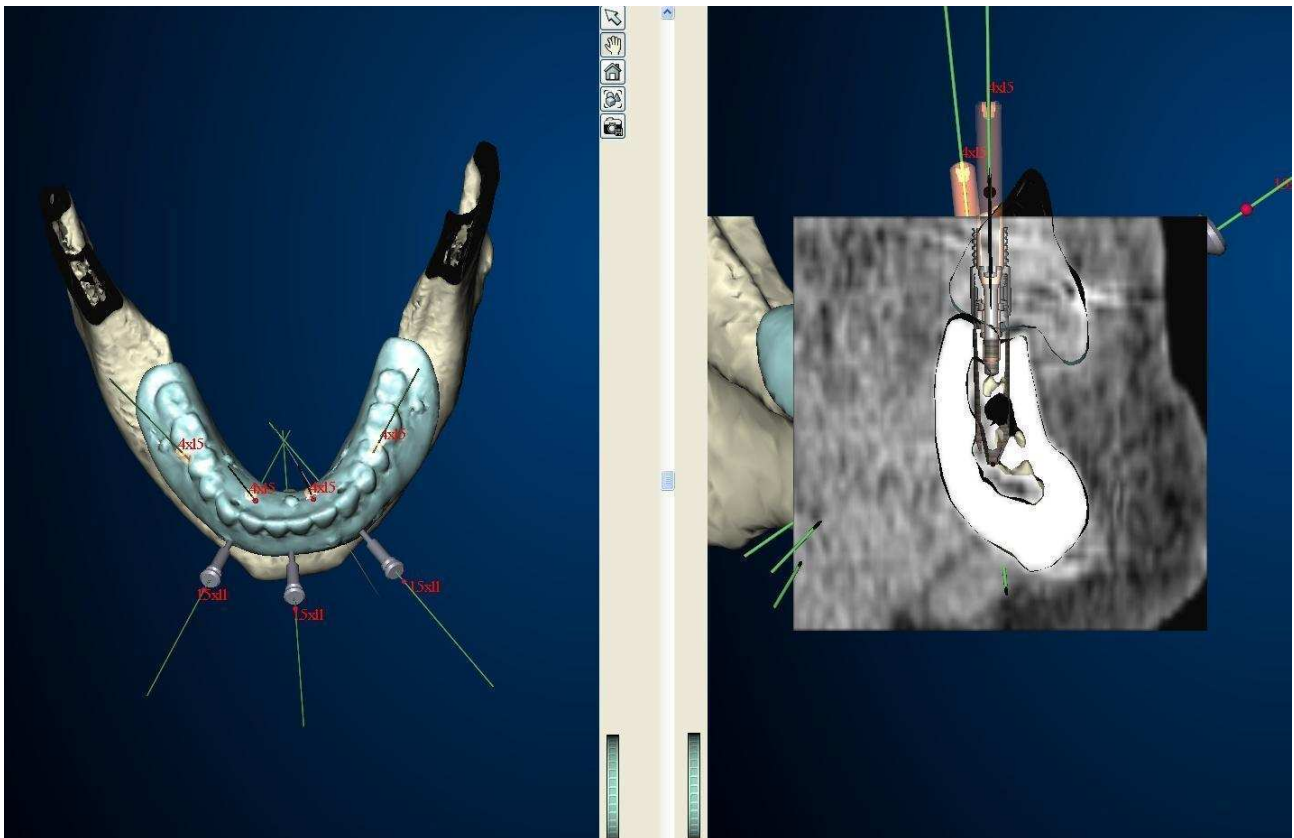
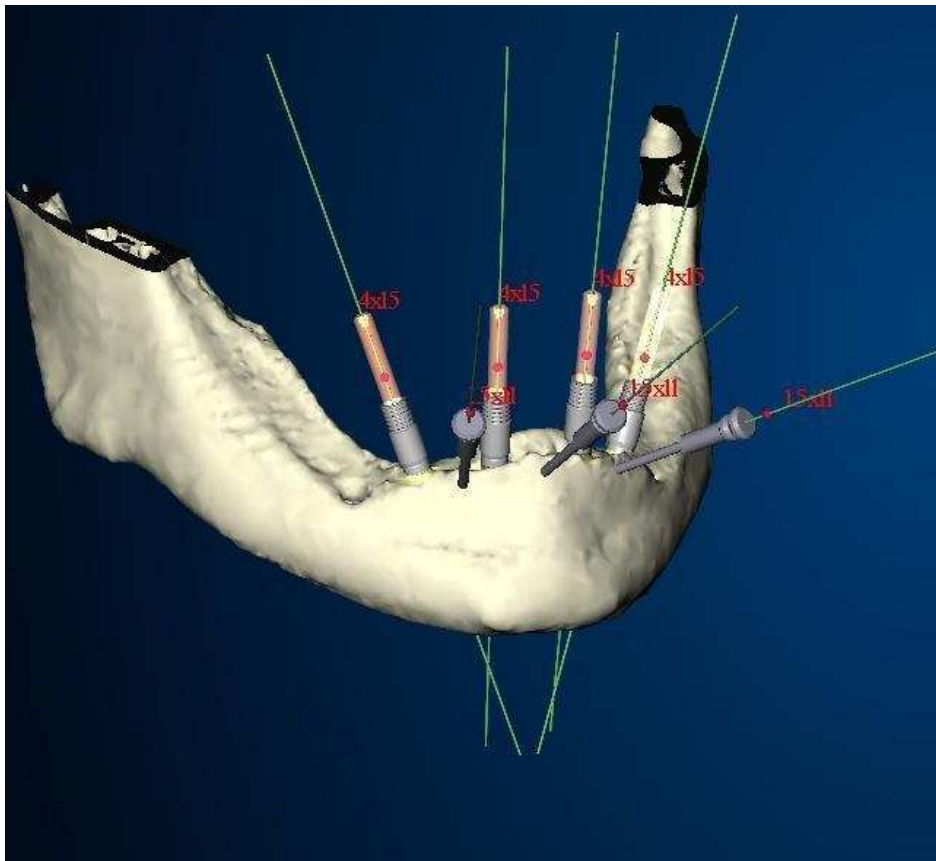


Abbildung 6. Beispiel der 3D-Planung "All-on-4" mit NobelGuide (Institute of Dental Implants&Periodontics, <https://www.implantdentist.co.nz/procedures/dental-implants/nobel-guide/>, Zugriff am: 25.02.2024)

## **SimPlant**

Die Planung in Simplant basiert praktisch auf demselben Protokoll wie in anderen Systemen. Es werden die Datenformate Dicom und STL verwendet. Je nach klinischer Situation können Schablonen an Nachbarzähnen, Schleimhaut oder Knochen angefertigt werden (<https://www.dentsplysirona.com/content/dam/dentsply/web/Implants/Franchise%20Content/German%20PDF/1224655-DE-SIMPLANT-Delivering-restorative-driven-implant-treatment-w5x04je-en-1502.pdf>, Zugriff am: 25.02.2024).

Der erste Schritt besteht in der Abformung beider Kiefer, der Anfertigung eines Wax-ups und dem Scannen des Trainingsmodells. Im Falle eines oder mehrerer fehlender Zähne kann alternativ zu Abdrücken ein intraoraler Scan durchgeführt werden. Die CT- und STL-Daten werden in die Simplant-Software importiert, um die weitere virtuelle Planung, Positionierung und Auswahl der Implantatsgröße zu ermöglichen. Dabei wird das Knochenangebot in diesem Bereich berücksichtigt (Hardani et al., 2020). Mit Simplant ist die Planung einer Schablone für die Sofortimplantation in die Alveole vor der Extraktion des Zahnes möglich. Die virtuelle Zahnextraktion kann sowohl auf einem digitalen Scan als auch auf einem Modell durchgeführt werden. Bei völliger Zahnlosigkeit, wie bei den anderen Programmen, ist das Dual-Scan-Protokoll zu empfehlen. Dazu kann die alte Prothese des\*der Patient\*in verwendet werden, wobei röntgendichte Markierungen anzubringen sind. Die Prothese darf keine Metallteile enthalten und muss in der Mundhöhle stabil sein (Spinelli et al., 2010). Während des Planungsprozesses identifiziert die Software den Nervus alveolaris inferior und erstellt ein Knochenmodell. Simplant enthält Implantatssysteme von rund 100 Herstellern und ermöglicht zudem die Planung eines individuellen Abutments. Der letzte Schritt ist die Bestellung der Simplant-Schablone oder der Simplant-Schablonendatei, welche in der Klinik mit dem FormLabs Form2 3D-Drucker ausgedruckt werden kann.

Bei ausreichendem Weichteilangebot ist ein lappenloser Eingriff bevorzugt. Die Inzision sollte, falls erforderlich, bis zur Fixierung der Schablone durchgeführt werden. Eine knochen- oder schleimhautgestützte Navigationsschiene wird mit Schrauben am Kiefer fixiert, um das Risiko einer Verschiebung zu minimieren. Mit Simplant Guide kann jeder Schritt der Bohrung bis zum Einsetzen des Implantats kontrolliert werden (Flügge et al., 2022). Das Immediate Smile Konzept des Simplant-Programms bietet die Möglichkeit, provisorische Kronen in Kombination mit einem individuellen Atlantis-Abutment während desselben Besuchs einzusetzen (Dentsply Sirona, 2023).



**Abbildung 7. Beispiel einer knochengestützten Schablone von Simplant Guide (Dentsply Sirona, <https://www.dentsplysirona.com/content/dam/dentsply/web/Implants/Franchise%20Content/German%20PDF/1224655-DE-SIMPLANT-Delivering-restorative-driven-implant-treatment-w5x04je-en-1502.pdf>, Zugriff am: 25.02.2024).**

### **Navident**

Das dynamische Navigationssystem Navident basiert auf einer 3D-Planung und einer Echtzeitnavigation (<https://www.dentingo.de/navident>, Zugriff am: 24.02.2024). Vor dem Einsetzen von Zahnimplantaten erfolgt eine Abformung zur Herstellung diagnostischer Modelle. Anhand der Modelle erfolgt die Fertigung des NaviStents. Hierbei handelt es sich um eine Scanschablone, an welcher die Referenzmarker angebracht werden. Anschließend wird ein CBCT-Scan des\*der Patient\*in mit dem Navident durchgeführt (Nirula et al., 2023). Im nächsten Schritt werden die CBCT-Daten im DICOM-Format in die Software hochgeladen (Nirula et al., 2023). Wie in ähnlichen Programmen erfolgt die Markierung des Zahnbogens, des Nervus alveolaris inferior sowie die Platzierung des Implantats auf der Basis des CBCT-Scans. Während des Eingriffs erfolgt die Befestigung des NaviStents an den vorhandenen Zähnen. Die Bohrung kann dann in Echtzeit auf dem Computerbildschirm durch Auswahl der Bohrrichtung gesteuert werden. Wenn die Bohrer schrittweise gewechselt werden, müssen sie kalibriert werden (Wang et al., 2022). Auch der Prozess der Implantatinsertion wird mittels Echtzeitkontrolle überwacht und gesteuert. Die Steuerung der Bohrtiefe und des Implantat-Einsetzvorgangs erfolgt durch die Software, welche die relevanten Parameter auf dem Monitor visualisiert und zusätzlich ein akustisches Signal

abgibt (Nirula et al., 2023). Das Computerprogramm ist vollständig kompatibel mit verschiedenen Implantatssystemen, sodass keine weiteren speziellen Sets erforderlich sind.

### **1.10 Darstellung der Herstellungstechniken (3D-Druck, Fräsen)**

Die Cad/Cam-Technologie besteht aus zwei verschiedenen Produktionsmethoden: dem Fräsen (MM - milling manufacture) und der additiven Fertigung - 3D-Druck (AM - additive manufacturing). Der Einsatz des 3D-Drucks in der Zahnchirurgie ist dank CBCT und CAD/CAM, welches die notwendigen dreidimensionalen Bilddaten für den Druck liefert, deutlich zugänglicher geworden. Dies erlaubt die Erstellung von 3D-Modellen des Kiefers, die Analyse der Anatomie, insbesondere in komplexen Fällen, sowie die Planung und Ausarbeitung des chirurgischen Vorgehens bei der Operation (Dawood et al., 2015). Der 3D-Druck ermöglicht eine schnellere, weniger invasive und besser vorhersagbare Operation (Sanna et al., 2007). Für den Druck wird eine Vielzahl von 3D-Druckern verwendet, wobei jedoch spezifische Anforderungen an die Materialien zu berücksichtigen sind. Diese müssen insbesondere zuverlässig und präzise sein sowie sich sterilisieren und desinfizieren lassen, da sie im Verlauf des Eingriffs verwendet werden. Der Anwendungsbereich des 3D-Drucks ist vielfältig und umfasst die Herstellung von Schablonen für Implantate, individuelle Abutments, temporäre und permanente Versorgung sowie Modelle für die Prothetik. Der im Softwareprogramm geplante virtuelle 3D-Behandlungsplan wird mit Hilfe einer 3D-Schablone, welche als Schnittstelle zwischen dem virtuellen Plan und dem\*der physischen Patient\*in fungiert, auf das Operationsfeld übertragen (Flügge et al., 2013, Chen et al., 2014). Die Materialien, welche für den 3D-Druck verwenden, müssen sich durch eine hohe Auflösung auszeichnen, um eine Genauigkeit zu vermitteln. Als Materialien für den Druck kommen beispielsweise lichtgehärtetes Photopolymerharz,  $ZrO_2/Al_2O_3$  Biokeramik, Keramik, Metalle, Kunststoffe sowie Polypropylen, Polycarbonate und Polyester. Die Stereolithographie, auch als SL-Technologie bezeichnet, findet Anwendung in der Fertigung chirurgischer Schablonen und prothetischer Versorgung. In dieser Methode werden Teile in Schichten auf der Oberfläche eines flüssigen Photopolymerharzes oder eines anderen Materials durch einen Abtastlaser erzeugt (Dawood et al., 2015). Die Lasereinwirkung initiiert den Prozess der Aushärtung der Materialschicht. In der Folge wird die Plattform abgesenkt, der Laser erneut aktiviert und die Teile des Objekts weiter geformt, bis das gewünschte Teil schließlich geformt ist. Im Rahmen der abschließenden Bearbeitung erfolgt die Entfernung des überschüssigen Materials sowie die Härtung desselben in einem UV-Ofen (Dawood et al., 2015). Die DLP-Technologie, welche auf der Grundlage der SLA-Technologie entwickelt wurde, unterscheidet sich von dieser dadurch, dass

DLP-3D-Drucker anstelle eines Lasers einen Projektor verwenden, welcher eine gesamte Schicht auf einmal härtet, im Gegensatz zum schichtweisen Drucken nach und nach, wie es bei der SLA-Stereolithografie ist (Nulty et al, 2022).

Scanfehler, Artefakte sowie Softwarefehler können zu Ungenauigkeiten bei Implantaten und vorgefertigten Prothesen führen, die sich erheblich auswirken (Dawood et al., 2015).

Beim Fräsen wird das Material abgetragen, um aus einem intakten Materialblock einen Teil zu formen. Das verwendete Material kann Zirkonium ZrO<sub>2</sub>, Kobalt-Chrom-Legierung (Co-Cr), Titan (Ti), Wachs, Harz, Polymethylmethacrylat (PMMA) oder Polyetheretherketon (PEEK) sein. Das Fräsen ist derzeit die präziseste Technik (Khosandi et al., 2021) und hat den Vorteil, dass das verwendete Material homogenen Ursprungs ist und nicht von den Betriebsbedingungen beeinflusst wird; eine Nachbearbeitung ist nicht erforderlich (Dawood et al., 2015). In Kombination mit dem 3D-Druck kann das Fräsen beispielsweise für die Herstellung von Implantatbrücken eingesetzt werden, um die hochpräzisen Eigenschaften des Druckens mit dem Fräsen und der maschinellen Bearbeitung für eine bessere Oberflächenverbindung zu kombinieren (Dawood et al., 2015).

## **2. Material und Methoden**

### **2.1. Recherche von Daten für die Unterstützung des digitalen Workflows und der Implantationsplanung bei schwierigen anatomischen Bedingungen**

Grundlage dieser Arbeit ist eine Literaturrecherche zum Thema navigierte Implantologie und digitale Implantatsplanung. Für die Informationssuche wurden die Datenbank PubMed, Daten von den Websites offizieller medizinischer und technischer Institute sowie Daten von Computersoftwareherstellern verwendet.

Berücksichtigt wurden englischsprachige Übersichtsartikel sowie Review-, klinische- und in-Vitro Studien aus der wissenschaftlichen Datenbank PubMed. Die Suche wurde auf Artikel beschränkt, die zwischen dem 01.01.2013 und dem 01.04.2024 veröffentlicht wurden.

Die Suche wurde mit den folgenden Stichwörtern durchgeführt: "dental implant", "digital implantology", "guided implant surgery", "freehand surgery", "dynamic navigation", "surgical guide", "anatomical outcomes".

Die Ausschlusskriterien waren Folgende:

- Nicht relevante Studien

- Nicht-englischsprachige Studien
- Studien ohne vollständigen Text
- Tierstudien

Die Auswahlkriterien waren folgende:

- Berücksichtigt wurden Artikel, die vollständig im Volltext und in englischer Sprache verfügbar waren.
- Die ausgewählten Artikel mussten metrische Daten über die Genauigkeit der Implantatsposition in Abhängigkeit von der Implantationstechnik enthalten.
- Der Artikel befasst sich mit der Untersuchung der Genauigkeit der Implantatinsertion unter komplexen anatomischen Bedingungen.
- Der Artikel musste Daten zur Bewertung und Anwendung eines der 6 beschriebenen Computerprogramme für die Navigationsimplantologie enthalten.
- Die ausgewählten Artikel mussten die Daten über die Genauigkeit der Implantatspositionierung im Vergleich zur Vorplanung enthalten.
- Relevanz für digitalen Workflow in der Implantologie

In den überprüften klinischen Studien wurde die Genauigkeit der Implantatsposition mit Hilfe des digitalen Workflows unter schwierigen anatomischen Bedingungen bewertet:

- Winkelverschiebung
- Vertikale Verschiebung
- Horizontale Verschiebung
- Axiale Verschiebung

Im Diskussionsteil werden die Komplikationen beschrieben, die bei der Anwendung digitaler Ansätze auftreten können, sowie die klinische Erfahrung mit den Methoden der Navigationsunterstützung und Free-Hand Methoden bei schwierigen anatomischen

Bedingungen. Außerdem wurde der Einfluss der Herstellungstechniken von Schablonen auf die Genauigkeit der Ergebnisse beschrieben.

### 3. Ergebnisse

#### 3.1. Studienübersicht

Die Recherche in der Datenbank Pubmed ergab 635 Ergebnisse. Im Anschluss an die Sortierung der Literatur nach Erscheinungsjahren und Ausschlusskriterien wurde eine weitere Auswahl nach Titel und Abstracts getroffen, wurden 573 Ergebnisse gefunden. Nach der Durchsicht der Literatur wurden 188 Artikel identifiziert, die im Volltext verfügbar waren. Anschließend wurden die Einschluss- und Relevanzkriterien angewandt, um die relevanten Artikel zu identifizieren. Von den 188 Artikeln erfüllten 31 die Anforderungen. Die Genauigkeit des digitalen Ansatzes und seine Möglichkeiten werden am deutlichsten in den folgenden sechs Vergleichstudien demonstriert, die in Tabelle 2 nach den beiden Kriterien dargestellt sind. Die aktuellen Publikationen werden nach Kriterien wie „Vergleich der Funktionalität von Software für die Navigationsplanung von Implantaten unter schwierigen anatomischen Bedingungen“ und „Genauigkeit der Implantatspositionierung im Vergleich zur Vorplanung“ sortiert.

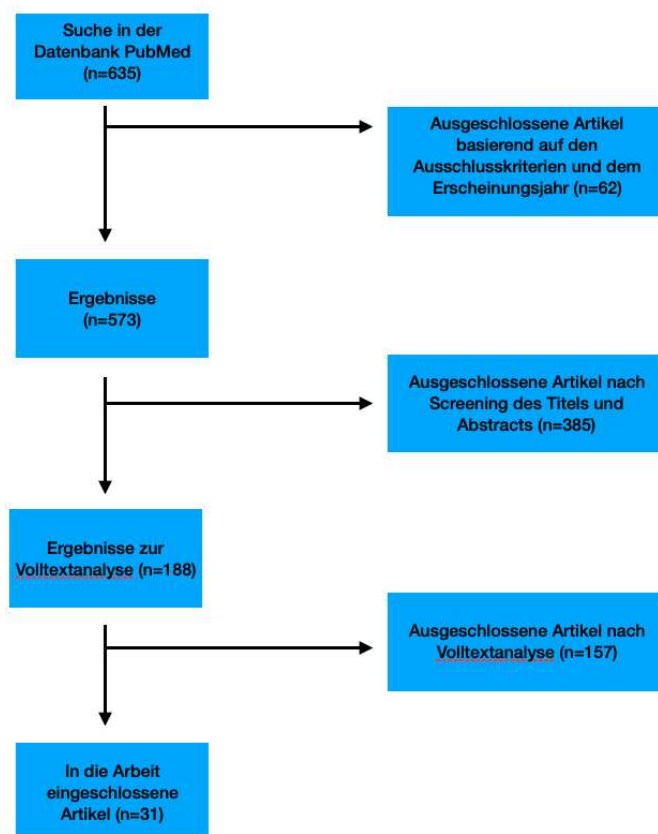


Abbildung 8. Organigramm der Literaturrecherche

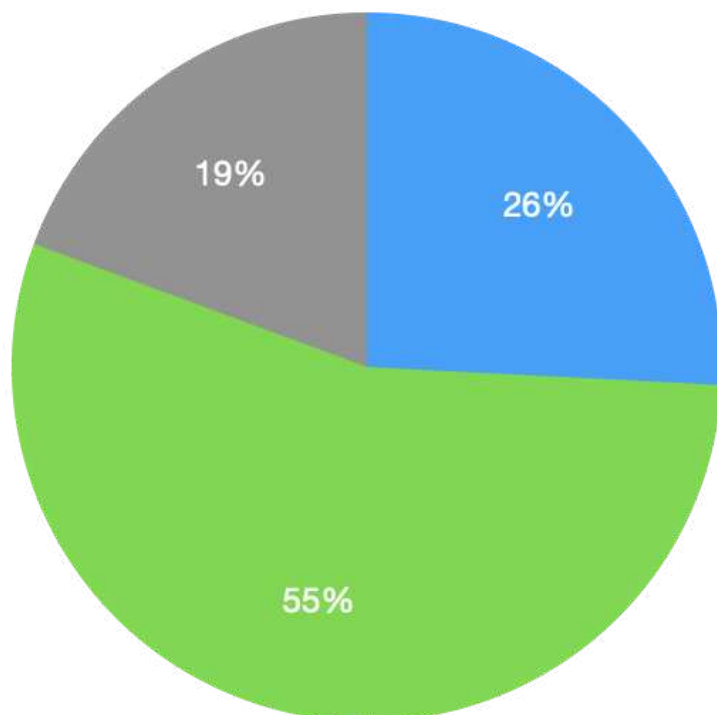
Art der Forschung	Jahr der Veröffentlichung	Studie	Thema des Artikels
Review	2022	Flügge et al.	Vergleich der Funktionalität von Software. CDX, SIM, NC, IST
Review	2020	Kernen et al.	Vergleich der Funktionalität von Software. CAD/CAM optionen. CDX, SIM, NC, IST
Review	2024	Khaohoen et al.	Genauigkeit bei der Verwendung statischer und dynamischer Navigationssysteme
Review	2021	Schnutenhaus et al.	Genauigkeit bei der Verwendung von dynamischen Navigationssystemen
Review	2018	Tahmaseb et al.	Genauigkeit bei der Verwendung statischer Navigationssysteme
Review	2016	Block et al.	Vergleich der statischer und dynamischer Methoden im zahnlosen Kiefer
Review	2018	Bover-Ramos et al.	Genauigkeit der Implantatinserterion mit digitalem Workflow
Review	2018	Seo et al.	Genauigkeit bei der Anwendung von schleimhautgetragenen Schablonen in zahnlosen Kiefern.
Klinisch	2014	Zhao et al.	Genauigkeit bei der Anwendung von Schablonen.Nobel Clinician
Klinisch	2021	Edelmann et al.	Genauigkeit bei der Verwendung von dynamischen Navigationssystemen. Codiagnostix, Denacam
Klinisch	2014	Vercruyssen et al.	Vergleich von geführter und konventioneller Implantatinserterion
Klinisch	2020	Aydemir et al.	Genauigkeit bei der Verwendung von dynamischen Navigationssystemen vs Free-Hand Technik

Klinisch	2019	Kaewsiri et al.	Genauigkeit bei der Verwendung statischer und dynamischer Navigationssysteme
Klinisch	2023	Jaemsuwan et al.	Vergleich der statischer und dynamischer Methoden im zahnlosen Kiefer. CoDiagnostiX, Iris
Klinisch	2014	Vercruyssen et al.	Schablonengeführte Implantatinsertion vs Free-Hand Technik
Klinisch	2019	Pellegrino et al.	Genauigkeit bei der Verwendung von dynamischen Navigationssystemen.
Klinisch	2021	Zhou et al.	Digitaler Workflow nur Implantatinsertion bei Kieferdefekten
Klinisch	2015	Verhamme et al.	Genauigkeit bei der Implantatinsertion im augmentierten Oberkiefer unter Verwendung von Schablonen
Klinisch	2019	Chen at al.	Dynamisches Navigationssystem in der Socket Shield-Technik
Klinisch	2017	Choi et al.	Genauigkeit bei der Verwendung von statischen Navigationssystemen vs Free-Hand Technik
Klinisch	2015	Kühl et al.	Genauigkeit gedruckter Navigationschablonen mit der Codiagnostix-Software
Klinisch	2020	Kivovics et al.	Genauigkeit der Anwendung des statischen Navigationssystems im zahnlosen Kiefer. CoDiagnostiX
Klinisch	2020	Stefanelli et al.	Genauigkeit der Anwendung des dynamischen Navigationssystems im zahnlosen Kiefer. Navident
Klinisch	2016	Naziri et al.	Genauigkeit und klinisches Ergebnis. CoDiagnostiX
Klinisch	2020	Kiatkroekkrai et al.	Genauigkeit der Anwendung des statischen Navigationssystems im teilbezahnten Kiefer. CoDiagnostiX
In-vitro	2018	Jorba-Garcia et al.	Genauigkeit bei der Verwendung dynamischen Navigationssystemen und Freihandtechniken. Navident

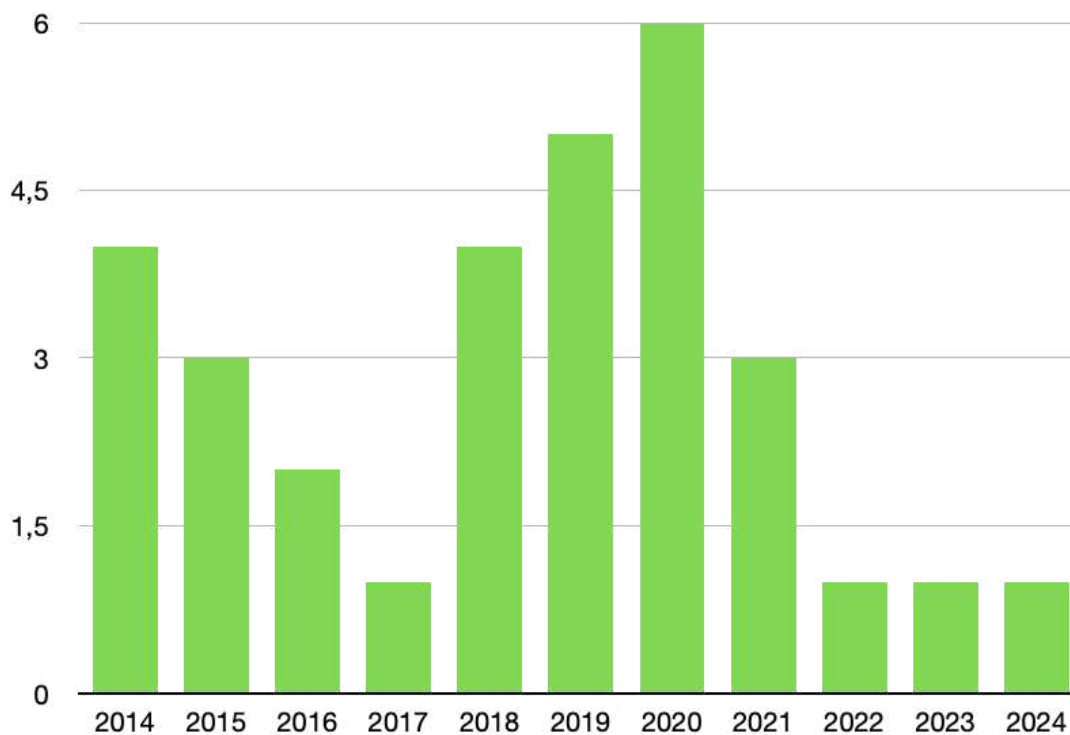
In-vitro	2020	Yeung et al.	Der Einfluss von Bohrschablonen auf die Genauigkeit der Implantatinsertion. 3Shape
In-vitro	2015	Scherer et al.	Genauigkeit der schablonengeführten Implantatinsertion vs Free-Hand Technik
In-vitro	2019	Guzman et al.	Vergleich der statischer und dynamischer Methoden
In-vitro	2019	Liang et al.	Der Einfluss von Bohrschablonen auf die Genauigkeit der Implantatinsertion. 3Shape
In-vitro	2014	Kang et al.	Genauigkeit bei der Verwendung statischer und dynamischer Navigationssysteme. Simulant, Cbyon Suite

**Tabelle 2. Tabellarischer Überblick der zusammengefassten Studien**

● Review Studien    ● Klinische Studien    ● In-vitro Studien



**Abbildung 9. Anzahl (%) der zusammengefassten Studien**



**Abbildung 10. Erscheinungsjahre der zusammengefassten Studien**

## **3.2. Reviews und Meta-Analysen**

### **3.2.1. Vergleich der Funktionalität von Software: CDX, SIM, NC, IST**

Flügge et al. (Flügge et al., 2022) verglichen und überprüften die Funktionalitäten kommerziell erhältlicher virtueller Implantatplanungssoftware im Hinblick auf die Integration von Prothetik und anatomischen Daten. Alle Softwaresysteme unterschieden sich in der Anzahl der verfügbaren Implantatsbibliotheken. Diese variierte von 7 bis 120. Die vollständig geführte Implantatinsertion war bei einigen Implantatherstellern möglich: 26 mit CDX, 24 mit SIM, 36 mit SMP, 1 mit NC und 66 mit IST (Flügge et al., 2022). Der Verlauf des Nervus mandibularis konnte automatisch bestimmt und seine Position korrigiert werden. Wenn der Abstand zum Nerv während der virtuellen Implantatspositionierung weniger als 2 mm betrug, wurde dies von der Software automatisch gemeldet (Flügge et al., 2022). Der virtuelle Artikulator war nur in Implant Studio enthalten. In allen Programmen war es möglich, das virtuelle Set-up zu importieren und verschiedene Zahndesigns auszuwählen. (Flügge et al., 2022).

Virtual implant planning	CDX	SIM	SMP	NC	IST
Implant systems	>50	>50	33	1	>50
Selective display of mandibular canal	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Default settings of minimal distances around implants	Yes	No	Yes	Yes	Yes
Display of volume for bone augmentation	No	No	Yes	No	No

**Tabelle 3. Darstellungsmöglichkeiten und Planungshilfen für die virtuelle Implantatsplanung mit den getesteten Softwaresystemen (Flügge et al., 2022)**

### 3.2.2. Genauigkeit bei der Verwendung statischer und dynamischer Navigationssysteme

In der Studie von Khaohoen wurde die Genauigkeit der computergestützten Implantatinsertion, einschließlich statischer, dynamischer und robotergestützter Chirurgie, anhand der PubMed-Datenbank analysiert. Khaohoen analysierte in ihrer Review-Studie 67 Artikel (n=5673 Implantate), von denen 53 statische, 15 dynamische und 2 robotergestützte Methoden der Implantatsnavigation beschrieben (Khaohoen et al., 2024). Verglichen wurden die Fälle bei den Patient\*innen mit vollständig oder teilweise fehlenden Zähnen.

	Coronal deviation	Apical deviation	Angular deviation
Static approach	1,11	1,44	3,58°
Dynamic approach	1,18	1,36	3,51°
Robotic approach	0,81	0,77	1,71°

**Tabelle 4. Abweichungen bei der Implantatinsertion mit statischer, dynamischer und computergestützter Navigationsmethode (Khaohoen et al., 2024)**

Der Genauigkeitsvergleich ergab eine durchschnittliche Gesamtabweichung von 1,11 mm am Einführungspunkt, 1,40 mm am Apex und eine Winkelabweichung von 3,51°. Die Robotersysteme zeigten die höchste Genauigkeit mit einer koronalen Abweichung von 0,81 mm, einer apikalen Abweichung von 0,77 mm und einer Winkelabweichung von 1,71° (Khaohoen et al., 2024).

Studie	Software	Kiefer	Anzahl der Patient*innen	Anzahl der Implantate	Winkelabweichung (°)	
					Statisch	Dynamisch
Guzman et al., 2019	NemoStudio/Navident	OK, teilbezahnt	20	40	3,0±3,96	2,26±1,62
Block et al., 2016	Simplant/X-Nav	OK,UK, teilbezahnt, zahnlos	KA	KA	3,2±3,62	2,96±3,77
Kang et al., 2014	Simplant/CBYO NE Suite	UK, zahnlos	KA	3033	2,44±3,90	3,83±5,26
Kaewsiri et al., 2019	coDiagnostiX/Iris	OK,UK, teilbezahnt	60	60	2,84±1,71	3,06±1,37
Jaemsuwan et al.,	coDiagnostiX/Iris	OK,UK, zahnlos	13	40	4,98±2,16	5,75±2,09
Schnutenhaus et al., 2021	KA	OK,UK, teilbezahnt, zahnlos	KA	KA	3,5±2,33	3,7±1,95
Kivovics et al., 2020	coDiagnostiX/Iris	OK,UK, zahnlos	13	40	3,20±1,56	4,08±2,77
Edelmann et al., 2021	Codiagnostix, Denacam	OK,UK, zahnlos	10	18	2,26±3,95	3,06±1,37
Zhou et al., 2021	Nobel Clinician, iPlan	OK,UK, zahnlos	4	14	2,61±1,16	0,99±1,22

**Tabelle 5. Charakteristika der ausgewählten Studien zum Vergleich der statischen und dynamischen CAIS. KA: keine Angabe, OK: Oberkiefer, UK: Unterkiefer.**

In der vergleichenden Analyse verschiedener Studien wurde festgestellt, dass es keinen signifikanten Unterschied in der Genauigkeit der gesetzten Implantate gibt, wenn statische und dynamische Navigationssysteme verwendet werden (Tab.5).

### 3.3. Klinische Studien

#### 3.3.1. Genauigkeit der computergesteuerten Implantatinsertion mit Bohrschablonen bei den Patient\*innen mit teilweiseem Zahnverlust

Naziri et al. untersuchten im Rahmen einer Studie die Genauigkeit der Implantatinsertion unter Verwendung von Navigationsschablonen mit computergestützter Software. Mit den Schablonen wurden 246 Implantate bei der 181 Patient\*innen mit teilweiseem Zahnverlust eingesetzt. Die Patient\*innen wurden aufgrund der Verwendung unterschiedlicher Implantatssysteme in 5 Gruppen eingeteilt. Für die virtuelle Planung und Herstellung der Schablonen im Labor wurde die CoDiagnostiX-Software verwendet. Nach der Implantatinsertion wurden während des Eingriffs Abdrücke genommen, um ein Gipsmodell herzustellen. Die Berechnungen der Abweichungen wurden anhand von CT-Modellen der Kiefer nach der Operation und dem CT-Scan des\*der Patient\*in vor der Operation durchgeführt (Naziri et al., 2016).

236 Implants	Median	Minimum	Maximum	Range	Interquartile Range
Implant apex X (n=234)	0,7	0,0	3,3	3,3	0,8
Implant apex Y (n=234)	0,6	0,0	3,8	3,8	0,7
Implant apex Z (n=224)	0,6	0,0	4,0	4,0	0,7
Implant apex 3D (n=224)	1,4	0,3	5,5	5,2	1,0
Implant shoulder X (n=236)	0,3	0,0	2,6	2,6	0,4
Implant shoulder Y (n=236)	0,3	0,0	2,7	2,7	0,5
Implant shoulder Z (n=224)	0,6	0,0	4,0	4,0	0,7
Implant shoulder 3D (n=224)	1,0	0,2	4,3	4,1	0,7

Angular deviation (n=236)	3,6	0,0	16,6	16,6	3,1
---------------------------	-----	-----	------	------	-----

**Tabelle 6. Abweichungen von 236 eingeschlossenen Implantaten in X-, Y-, Z-Achse, 3D-Abweichung in mm und Winkelabweichung in Grad an der Implantatsschulter und am Implantat-Apex. n entspricht der Anzahl der eingeschlossenen Werte für die statistische Analyse (Naziri et al., 2016).**

Die durchschnittliche Abweichung zwischen der präoperativen Planung und der postoperativen Implantatsposition betrug 1 mm an der Implantatsschulter und 1,4 mm am Implantat-Apex, bei einer durchschnittlichen Winkelabweichung von 3,6 Grad. Mit zunehmender Implantatslänge wurde die Abweichung von der geplanten Position immer größer (Naziri et al., 2016).

### **3.3.2. Genauigkeit der chirurgischen Schablonen für die Implantation bei der zahnlosen Patient\*innen, die mit Hilfe der CAD/CAM-Technologie hergestellt werden**

Im Rahmen der Studie von Zhao (Zhao et al., 2014) wurden zahnlose Patient\*innen untersucht und ein CBCT-Scan durchgeführt. Die diagnostischen Modelle wurden gescannt und in die Simplant Software geladen. Die Positionen der Implantate wurden in der Software geplant und die Schablonen für die Implantate wurden erstellt (Zhao et al., 2014).

Implantation sites		Classification of surgical templates			
Anterior region	Posterior region	Tooth-supported		Tooth-mucosa supported	
Number of implants	Number of implants	Number of patients	Number of implants	Number of patients	Number of implants
14	17	9	13	2	18

**Tabelle 7. Anzahl der Implantate und Patient\*innen, nach Implantationsorten und Bohrschablonen (Zhao et al., 2014)**

Die durchschnittliche Abweichung im Bereich der Implantatsschulter betrug 1 mm und im Bereich der Implantatsspitze 1,26 mm. Die durchschnittliche Winkelabweichung betrug 4,74 Grad. Die Abweichungen waren im Seitenzahnbereich größer als im Frontzahnbereich. Die von den Zähnen getragenen Schablonen waren genauer als die von der Schleimhaut getragenen Schablonen.

Parameter	Linear deviations for implant shoulder (mm)			Linear deviations for implant apex (mm)			Angular deviation (degrees)		
	Mean	Range	<i>P</i>	Mean	Range	<i>P</i>	Mean	Range	<i>P</i>
Implantation site									
Anterior region	0,89	0-1,75	>0,05	1,13	0,51-1,90	>0,05	4,21	0,37-10,28	>0,05
Posterior region	1,13	0-2,16		1,42	0,56-2,86		5,32	2,87-8,60	
Template type									
Tooth-supported	0,90	0-1,93	>0,05	1,23	0,56-2,13	>0,05	3,99	1,26-9,91	>0,05
Tooth-mucosa-supported	1,06	0,32-2,16		1,29	0,51-2,86		5,14	0,37-10,28	

**Tabelle 8. Lineare und angulare Abweichungen von Implantaten und ihre statistischen Ergebnisse (Zhao et al., 2014)**

Studie	Software	Bohrschablone	Kiefer	Anzahl der Patient*innen	Anzahl der Implantate	Apikale Abweichung (mm)	Winkelabweichung (°)
Yeug et al., 2020	3Shape	zahngestützte Schablone	OK, teilbezahnt	30	30	0,69-2,03	0,64-2,48
Kiatkroekrai et al., 2020	CoDiagnostiX	zahngestützte Schablone	OK, UK, teilbezahnt	60	60	0,57-1,63	0,95-2,42
Kühl et al., 2015	CoDiagnostiX	schleimhautgetragene Schablone	UK, zahnlos	9	KA	0,22-0,38	0,4-1,5
Liang et al., 2019	3Shape	zahngestützte Schablone	OK, teilbezahnt	100	100	0,32-0,98	KA
Scherer et al., 2015	KA	schleimhautgetragene Schablone	UK, zahnlos	24	180	0,47-1,55	1,5-2,5
Seo et al., 2018	KA	schleimhautgetragene Schablone	OK, UK, zahnlos	93	572	0,67-2,19	2,6-4,67
Tahmasebi et al., 2018	Nobel Guide, Simplant	schleimhautgetragene Schablone	OK, UK, teilbezahnt, zahnlos	471	2238	1,28-1,58	3,0-3,96

Verhamme et al., 2015	Nobel Guide	schleimhautgetragene Schablone	OK, zahnlos	12	72	0,99-1,27	0,6-2,5
Vercruyssen et al., 2014	Simplant	schleimhautgetragene Schablone	OK, UK, zahnlos	59	295	0,2-3,7	0,2-8,4
Zhao et al., 2014	Simplant	zahngestützte Schablone	OK, UK, teilbezahnt	11	31	0,51-2,86	0,37-4,74

**Tabelle 9. Abweichungen zwischen den geplanten und tatsächlichen Implantatpositionen bei der Verwendung von Navigationschablonen. KA: keine Angabe, OK:Oberkiefer, UK:Unterkiefer**

### 3.4. In-vitro Studien

#### 3.4.1. Die Genauigkeit der Implantatinsertion mit der konventionellen Freihandmethode und dem dynamischen Navigationssystem

In der In-vitro-Studie von Jorba-Garcia et al. (Jorba-Garcia et al., 2018) wurden das dynamische Navigationssystem Navident und die Freihandmethode von dem\*der Chirurg\*in mit und ohne große Erfahrung zum Einsetzen von Implantaten in 6 Kunststoff-Unterkiefermodelle verwendet. Um die Genauigkeit der eingesetzten Implantate zu messen, wurde eine CBCT-Aufnahme des Messmodells durchgeführt und mit einer vorläufigen virtuellen Planung auf der CBCT-Aufnahme überlagert (Jorba-Garcia et al., 2018).

	N	Entry 3D mean (SD)	Entry 2D mean (SD)	Apex 3D mean (SD)	Apex vertical mean (SD)	Angulation mean (SD)	Surgical time mean (SD)
Dynamic navigation system	18	1,29 mm (0,46)	0,85 mm (0,41)	1,33 mm (0,5)	0,88 mm (0,47)	1,6° (1,3)	511,7 sec (131,6)
Freehand	18	1,5 mm (0,58)	1,26 mm (0,66)	2,26 mm (1,11)	0,57 mm (0,33)	9,7° (5,2)	240,1 sec (65,2)
Bivariate		$p=0,229$	$p=0,02$	$p=0,001$	$p=0,034$	$p=0,000$	$p=0,000$

**Tabelle 10: Deskriptive und bivariate Ergebnisse der wichtigsten Ergebnisvariablen für beide Gruppen (Jorba-Garcia et al., 2018).**

Insgesamt wurden 36 Implantate untersucht. Die Gruppe, die das Navigationssystem Navident verwendete, zeigte deutlich genauere Ergebnisse, wiesen jedoch eine längere Operationszeit auf (Jorba-Garcia et al., 2018). In der Studie von Stefanelli wurden keine signifikanten Abweichungen von der geplanten Implantatposition festgestellt (Stefanelli et al., 2020). In der in-vitro Studien von Kang waren die apikalen und koronalen Verschiebungen nicht signifikant, aber die Winkelabweichungen waren mit 3,9 bis 6,7 Grad signifikanter (Kang et al., 2014)

Vergleicht man die Erfahrung der Chirurg\*innen, die mit den verschiedenen Systemen arbeiten, so lässt sich feststellen, dass der\*die unerfahrener\*e Chirurg\*in eine höhere Genauigkeit erzielte, wenn er\*sie das dynamische Navigationssystem benutzte. Gleichzeitig erreichte der\*die erfahrene Chirurg\*in klarere Parameter, und die Operation dauerte deutlich länger (Jorba-Garcia et al., 2018).

Studie	Software	Kiefer	Anzahl der Patient*innen	Anzahl der Implantate
Kang et al., 2014	Cbyon Suite	UK	10	40
Edelmann et al., 2021	Denacam	OK,UK	10	18
Aydemir et al., 2020	Navident	OK	30	43
Pellegrino et al., 2019	ImplaNav	OK,UK	16	112
Stefanelli et al., 2020	Navident	OK,UK	59	136

**Tabelle 11: Übersicht der Studien zur dynamischen Navigationsoftware. OK:Oberkiefer, UK:Unterkiefer**

Studie	Winkelabweichung	Apikale Abweichungen	Koronale Abweichungen
Kang et al., 2014	6,7±3,9	1,97±0,92	0,76±0,32
Edelmann et al., 2021	3,3±2,2	2,5±1,4	2,3±1,34

Aydemir et al., 2020	7,1±3,48	1,19±0,19	1,02±0,39
Stefanelli et al., 2020	2,5±0,9	0,9±0,29	0,67±0,26

**Tabelle 12: Abweichungen zwischen den geplanten und aktuellen Implantatpositionen bei der dynamischen Navigationssoftware.**

### 3.5. Zusammenfassung der Ergebnisse

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass alle oben beschriebenen Artikel zeigen, dass die computergestützte Chirurgie dazu beiträgt, Implantate mit größerer Genauigkeit zu setzen, unabhängig von der Erfahrung des\*der Chirurg\*in. Dies zeigt die Studie von Jorba-Garcia (Jorba-Garcia et al., 2018), in der ein dynamisches Navigationssystem während der Implantation verwendet wurde, um Abweichungen von der geplanten Implantatsposition abzugleichen. Der Unterschied in der Genauigkeit war zwar nicht sehr signifikant, aber es war auf jeden Fall vorhanden. In der Studie von Zhao et al. (Zhao et al., 2016) waren die Abweichungen bei Verwendung von mukosagestützten Schablonen größer als bei der Verwendung von zahngestützten Schablonen. Über einen signifikanten Unterschied in der Genauigkeit zwischen zahn- und schleimhautgetragenen Schablonen berichteten auch Seo et al., Liang et al. (Seo et al., 2018, Liang et al., 2019). Daher ist es bei den Patient\*innen mit komplexen anatomischen Verhältnissen besser, die Schablonen mit Verankerungsstiften zu fixieren, wobei nach der Studie von Yeung et al. ein ähnliches Ergebnis wie mit zahngestützten Schablonen erzielt werden kann (Yeung et al., 2020). Eine hohe Übereinstimmung zwischen den präoperativen digitalen Planungsdaten und den intraoperativen Ergebnissen zeigen jedoch die Ergebnisse der klinischen Studie von Naziri et al. In 100 % der Fälle gab es eine Übereinstimmung zwischen den geplanten und den intraoperativen Ergebnissen hinsichtlich der Implantatsposition, in 94,9 % der Fälle hinsichtlich der Implantatslänge und in 97,5 % der Fälle bezüglich des Implantatsdurchmessers (Naziri et al., 2016). Ähnliche Ergebnisse wurden von Aydemir (Aydemir et al., 2020) und Pellegrino (Pellegrino et al., 2019) berichtet. In den analysierten Studien wurden keine signifikanten Unterschiede in der Softwarefunktionalität festgestellt. Alle Programme können dank der Dicom-Schnittstelle RTG-Daten, 3D- und 2D-Aufnahmen mit verschiedenen Orientierungen für die virtuelle Implantatinsertion importieren (Kernen et al., 2020, Flügge et al., 2022). Studien zeigen gute Genauigkeit in 97% der Fälle bei der

Implantatinsertion mit Hilfe dynamischen Software (Edelmann et al., 2021, Aydemir et al., 2020, Jorba-Garcia et al., 2018).

Zu den möglichen Komplikationen, die bei Operationen mit Navigationsschablonen auftreten können, gehören: Bruch der Schablone während der Operation, schlechte Sicht auf das OP-Feld, sowie unzureichende Mundöffnung des\*der Patient\*in bei Eingriffen im Seitenzahnbereich (Khaohoen et al., 2024). Bei der dynamischen Navigation können Fehler bei der Erfassung der CBCT-Daten, bei der Kalibrierung, bei der Befestigung der Navigationsschrauben, menschliche Fehler wie Tremor der Hand oder mangelnde Erfahrung auftreten (Naziri et al., 2016).

## **4. Diskussion**

### **4.1. Zweckmäßigkeit der klinischen Anwendung**

Ein Digitaler Workflow ermöglicht vollständig geführte Implantation. Die Computernavigationssoftware erlaubt es dem\*der Chirurg\*in und Zahntechniker\*in, das Design der Bohrschablone und die Position der Implantate frei zu wählen. Die virtuelle Planung der prothetischen Versorgung wird unter Berücksichtigung anatomischer und chirurgischer Bedingungen nach okklusalen und ästhetischen Aspekten optimiert (Pascual, 2016). Die oben beschriebenen Software für die virtuelle Planung sind mit einem Dicom-Interface ausgestattet. Damit können die Untersuchungsdaten des\*der Patient\*in einfach hochgeladen werden. Zur besseren Orientierung können die 3D-Bilder schichtweise betrachtet und gedreht werden. Wichtige anatomische Strukturen, wie zum Beispiel der Nervus mandibularis, werden von der Software in den meisten Fällen automatisch hervorgehoben. Je nachdem, welches Implantatssystem in der Klinik verwendet wird, kann das gewünschte Implantat aus der Bibliothek ausgewählt und auf dem virtuellen 3D-Modell positioniert werden. Die Verwendung eines vollständig geführten Protokolls ermöglicht die Kontrolle aller Schritte von der Pilotbohrung bis zur Implantatinsertion (Abduo et al., 2020). Es können sowohl Techniken mit als auch ohne Lappenbildung angewendet werden. Dadurch wird der Eingriff sowohl für den\*die Patient\*in als auch für den\*die Arzt\*Ärztin weniger belastend. Die computerassistierte Chirurgie ist der Goldstandard, mit dem eine höhere Präzision und Qualität bei der Rehabilitation von den Patient\*innen mit Implantaten erreicht werden kann (Naziri et al., 2016).

## 4.2. Vergleich von Behandlungsmethoden mit und ohne Digitaler Workflow

Die Free-Hand-Technik ohne Verwendung von Bohrschablonen oder speziellen Geräten bietet im Vergleich zu allen anderen Navigationskonzepten in der Implantatchirurgie die geringste Genauigkeit. Andererseits ist diese häufig angewandte Technik mit keinen zusätzlichen Kosten verbunden. Allerdings hängt der Erfolg der Operation weitgehend von der Erfahrung des\*der Chirurg\*in ab. Der Vorteil der Navigationsmethoden liegt in ihrer Vorhersagbarkeit. Durch die Einhaltung des virtuellen Planungsprotokolls werden Abweichungen während der Operation minimiert und eine höhere Genauigkeit erreicht. Bei komplexen anatomischen Verhältnissen, bei denen alles genau geplant werden muss, ist der digitale Workflow besonders geeignet. Die prothetische Versorgung kann auch vor der Operation angefertigt werden. Randomisierte kontrollierte Studien zeigten, dass die Genauigkeit der Implantatinsertion mit Navigationsschablonen höher ist (Vercruyssen et al., 2014). Bei Freihandtechnik wurden mesiodistale Abweichungen im Unterkiefer, Winkelabweichungen im Oberkiefer und Implantattiefenabweichungen im Seitenzahnbereich festgestellt (Jorba-Garcia, 2023, Schnutenhaus et al., 2021). Das Vorhandensein von Nachbarzähnen und die Position des Implantatlagers können die Implantat-Insertionsrichtung und deren Winkelabweichung beeinflussen (Choi et al., 2017, Tang et al., 2019). Diese Unterschiede in der Genauigkeit können die Qualität der Behandlung beeinträchtigen und sich negativ auf die spätere prothetische Versorgung auswirken (Younis et al., 2024).

Der Unterschied zwischen digitalen und konventionellen Ansätzen ist noch nicht vollständig erforscht. Es gibt Studien, die keinen Unterschied bei der Implantation im Frontzahnbereich des Oberkiefers feststellen konnten (Baldi et al., 2020). Allerdings wurden auch die Vorteile des digitalen Workflows erkannt, vor allem die Unterstützung des schrittweisen Prothetik-Workflows, wie z.B. vorgefertigte provisorische Prothesen, die der\*die Patient\*in sofort nach der Operation erhält. In Studien mit einer Nachbeobachtungszeit von 1-3 Jahren konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen der Implantatinsertion mit der konventionellen Methode und mit Navigationsschablonen festgestellt werden (Bernhardt et al., 2019, Pozzi et al., 2014). Computergestützte Implantationsmethoden werden in der Regel von Patient\*innen bevorzugt, da sie mit weniger Unannehmlichkeiten verbunden sind und weniger Beschwerden wie postoperative Schwellungen und Schmerzen verursachen (Orden et al., 2020, Sancho-Puchades et al., 2019).

### **4.3 Einfluss von Herstellungstechniken auf die Genauigkeit der Behandlungsergebnisse**

Die Fähigkeit, die benötigten Objekte und Funktionsteile schnell herzustellen, verändert den digitalen Ansatz in der Zahnmedizin. Der 3D-Druck auf der Basis von SL-Techniken bietet höchste Genauigkeit und Auflösung, feine Designdetails und eine glatte Druckoberfläche. Es wurde untersucht, dass die Druckausrichtung, die Formungswinkel und die Position die Druckgenauigkeit, die Festigkeit und die Oberflächenmorphologie beeinflussen (Shim et al, 2020) (Dikova et al, 2018). Teile, die in einem Winkel von 45 Grad gedruckt wurden, zeigten die höchste Genauigkeit (Unkovskiy et al, 2018). Es konnte festgestellt werden, dass Objekte, die an den Rändern der Druckerplattform gedruckt wurden, eine höhere Anfälligkeit für Ungenauigkeiten aufweisen als Objekte, die in der Mitte platziert wurden (Unkovskiy et al., 2018). In der Studie von Della Bona et al., wurden alle polymerbasierten gedruckten Strukturen hinsichtlich ihrer Festigkeit untersucht, wobei festgestellt wurde, dass diese über dem für provisorische Versorgungen zulässigen Minimum lag (Della Bona et al., 2021). Die klinische Anwendbarkeit der 3D-gedruckten Strukturen wurde bestätigt und zeigte, dass diese in der klinischen Praxis einsetzbar sind (Della Bona et al., 2021).

In einer Studie von Valenti et al. (2024) konnte festgestellt werden, dass die Frästechnik lediglich in Bezug auf die Biegefestigkeit der Restaurationen sowie die Biegefestigkeit unter Alterung bessere Ergebnisse zeigt (Valenti et al., 2024). Valenti et al. konstatieren, dass die mechanischen Eigenschaften von MM und AM (Fräsen und 3D-Druck) ähnlich sind, was die Zuverlässigkeit dieser neuen Technologie in der Zahnmedizin zeigt (Valenti et al., 2024).

Dennoch, wenn Scannen, Bildgebung, CAD/CAM, Fräsen und 3D-Drucktechnologien mit der Entwicklung von Materialeigenschaften kombiniert werden, werden die Ergebnisse ständig besser und genauer werden (Dawood et al., 2015).

### **4.4. Entwicklung digitaler Technologien in der Navigationsimplantologie**

Die Entwicklung digitaler Technologien hat die Zahnimplantologie grundlegend verändert: sie ist präziser, vorhersagbarer und effizienter geworden. Alle Programme zur virtuellen 3D-Planung werden ständig verbessert und es werden neue Funktionen hinzugefügt. Außerdem ermöglichen dynamische Navigationssysteme, die virtuelle Realität und Echtzeit-Tracking nutzen, sowie erlauben es der Ärzt\*innen, die Instrumente mit höchster Genauigkeit zu steuern. Die Kontrolle über den Implantationsprozess wird durch solche Systeme erheblich verbessert. Das Kriterium für eine erfolgreiche Implantation ist heute nicht nur die Einheilungsrate, sondern auch ein günstiges prothetisches Ergebnis und die

langfristige Stabilität des Hart- und Weichgewebes um das Implantat herum. Eine präzise Implantatsplatzierung sorgt für ästhetische und prothetische Ergebnisse, optimale okklusale Kontakte und die Verteilung der Kaubelastung (Chackaratchi et al., 2022). Die dreidimensionale Visualisierung ermöglicht die Planung der Implantatsposition unter Berücksichtigung des endgültigen prothetischen Designs, die Berechnung des korrekten Abstands zwischen den Implantaten, die Tiefe der Platzierung, den Neigungswinkel usw.

Mit dem Aufkommen von intraoralen Scannern haben sich die Möglichkeiten erheblich erweitert, da es möglich ist, auf ein vollständig digitales Protokoll umzusteigen und die Abnahme von Abdrücken zu vermeiden. Die durch intraorales Scannen erhaltenen digitalen Daten können für die virtuelle Planung verwendet werden. Die Ergänzung durch ein digitales Wax-up ermöglicht es der Zahnärzt\*innen, die Operation unter Berücksichtigung der zukünftigen prothetischen Struktur im Verhältnis zu den vorhandenen Geweben zu planen. Um den digitalen Behandlungsplan auf das chirurgische Feld zu übertragen, wird eine digitale Schablone erstellt und mit einem 3-D-Drucker in eine reale Kunststoffschablone umgewandelt.

Digitale Technologien verringern das Risiko von Fehlern und Komplikationen, ermöglichen eine detaillierte Planung des Eingriffs und eine Vorhersage der Ergebnisse und verkürzen sowohl die Dauer des Eingriffs als auch die Zeit der Genesung. Das Ergebnis ist nicht nur eine Verbesserung der Qualität der medizinischen Versorgung, sondern auch eine Verbesserung der Erfahrung des\*der Patient\*in insgesamt.

## 5. Schlussfolgerung

Basierend auf der Literaturrecherche kann festgestellt werden, dass alle Studien eine hohe Genauigkeit bei der Anwendung von Navigationsverfahren zeigen. Dies lässt sich nicht über die unkontrollierte traditionelle Implantatssetzung sagen. In Bezug auf die Einheilung der Implantate gibt es keine signifikanten Unterschiede zwischen der traditionellen und der navigationsgesteuerten Implantation. Ziel der digitalen Planung ist es, optimale ästhetische und prothetische Ergebnisse zu erzielen und gleichzeitig die Genauigkeit unter Berücksichtigung des verfügbaren Hart- und Weichgewebes zu maximieren. Natürlich können auch bei digitalen Methoden Fehler oder minimale Abweichungen auftreten. Es gibt eine begrenzte Anzahl von Studien über Abweichungen zwischen der geplanten und der tatsächlichen Positionierung von Implantaten, die mit Hilfe von Bohrschablonen gesetzt wurden.

Allerdings muss beachtet werden, dass die Autor\*innen teilweise unterschiedliche klinische Situationen und Protokolle für die durchgeführten Messungen beschrieben haben.

Für die Zukunft besteht ein Bedarf an klinischen Studien mit geführten Systemen und zur Untersuchung möglicher Fehler, die während des Eingriffs auftreten können. Auf diese Weise kann der digitale Workflow zu einem Standard in der Behandlung werden. Dies führt zu einer Stärkung des Vertrauens der Spezialist\*innen und zu einer weiteren Verbreitung seiner Anwendung.

## Literaturverzeichnis

AYDEMIR, C.,A., ARISAN, V. Accuracy of dental implant placement via dynamic navigation or the freehand method: A split-mouth randomized controlled clinical trial. *Clin Oral Implants Res.* 2020 Mar;31(3):255-263.

ALDAHLAWI, S., NOURAH, D. M., AZAB, R. Y., BINYASEEN, J. A., ALSEHLI, E. A., ZAMZAMI, H. F., & BUKHARI, O. M., 2023. Cone-beam computed tomography (CBCT)-based assessment of the alveolar bone anatomy of the maxillary and mandibular molars: Implication for immediate implant placement. *Cureus*, 15(7), e41608.

ALENAZI, A., 2021. Association between rheumatoid factors and proinflammatory biomarkers with implant health in rheumatoid arthritis patients with dental implants. *European Review for Medical and Pharmacological Sciences*, 25(22), 7014-7021.

ARISAN, V., KARABUDA, C. Z., ÖZDEMİR, T., 2010. Implant surgery using bone- and mucosa-supported stereolithographic guides in totally edentulous jaws: Surgical and post-operative outcomes of computer-aided vs. standard techniques. *Clinical Oral Implants Research*, 21(9), 980-988.

BALDI, D.; COLOMBO, J.; MOTTA, F.; MOTTA, F.M.; ZILLIO, A.; SCOTTI, N., 2020. Digital vs. Freehand Anterior Single-Tooth Implant Restoration. *BioMed Res. Int.* 2020, 2020, 4012127.

BAUER, F. 2022. Implantologie und digitaler Workflow. *ZWP 7-8.2022*, 3 (Online). Available: <https://epaper.zwp-online.info/epaper/gim/sp/2022/sp0722/epaper/ausgabe.pdf> (Accessed: 05.02.2024).

BELSER, U. C., GRÜTTER, L., VAILATI, F., BORNSTEIN, M. M., WEBER, H.-P., BUSER, D., 2009. Outcome evaluation of early placed maxillary anterior single-tooth implants using objective esthetic criteria: A cross-sectional, retrospective study in 45 patients with a 2- to 4-year follow-up using pink and white esthetic scores. *Journal of Periodontology*.

BERNARD, L., VERCRUYSSSEN, M., DUYCK, J., JACOBS, R., TEUGHEL, W., QUIRYNEN, M. A randomized controlled clinical trial comparing guided with nonguided implant placement: A 3-year follow-up of implant-centered outcomes. *J. Prosthet. Dent.* 2019, 121, 904–910.

BHOLE, M., NEELY, A. L., KOLHATKAR, S., 2008. Immediate implant placement: Clinical decisions, advantages, and disadvantages. *Journal of Prosthodontics*, 17(7), 576-581.

BLOCK, M.,S., EMERY, R.,W. Static or dynamic navigation for implant placement—choosing the method of guidance. *J Oral Maxillofac Surg.* 2016 Feb;74(2):269-277.

BOVER-RAMOS, F., VIÑA-ALMUNIA, J., CERVERA-BALLESTER, J., PEÑARROCHA-DIAGO, M., GARCÍA-MIRA, B. Accuracy of implant placement with

computer-guided surgery: A systematic review and meta-analysis comparing cadaver, clinical, and in vitro studies. *Int J Oral Maxillofac Implants*. 2018 Jan/Feb;33(1):101-115.

BRIEF, J., EDINGER, D., HASSFELD, S., EGGERS, G. 2005. Accuracy of image-guided implantology. *Clin Oral Implants Res*, 16, 495-501.

BURGESS, J., 2015. Digital DICOM in dentistry. *The Open Dentistry Journal*, 9, 330-336.

BUSER, D., CHAPPUIS, V., BELSER, U. C., CHEN, S., 2017. Implant placement post extraction in esthetic single tooth sites: when immediate, when early, when late? *Periodontology 2000*, 73(1), 84-102.

CASAP, N., WEXLER, A., PERSKY, N., SCHNEIDER, A., LUTSMANN, J. 2004. Navigation surgery for dental implants: assessment of accuracy of the image guided implantology system. *J Oral Maxillofac Surg*, 2004 Sep;62(9 Suppl 2):116-9.

CHACKARTCHI, T., ROMANOS, G. E., PARKANYI, L., SCHWARZ, F., SCULEAN, A. 2022. Reducing errors in guided implant surgery to optimize treatment outcomes. *Periodontology 2000*, 88(1), 64-72.

CHACKARTCHI, T., ROMANOS, G. E., SCULEAN, A. 2019. Soft tissue-related complications and management around dental implants. *Periodontology 2000*, 81(1), 124-138.

CHEN, H., LIU, N., XU, X., QU, X., & LU, E., 2013. Smoking, radiotherapy, diabetes, and osteoporosis as risk factors for dental implant failure: A meta-analysis. *PLoS One*, 8(8), e71955.

CHEN, J., T. A novel application of dynamic navigation system in socket shield technique. *J Oral Implantol*. 2019 Oct;45(5):409-415.

CHIARELLI, T., LAMMA, E. & SANSONI, T., 2010. A fully 3D work context for oral implant planning and simulation. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 5, 57-67.

CHOI, W.; NGUYEN, B.C.; DOAN, A.; GIROD, S.; GAUDILLIERE, B.; GAUDILLIERE, D., 2017. Freehand Versus Guided Surgery: Factors Influencing Accuracy of Dental Implant Placement. *Implant Dent*. 2017, 26, 500–509.

CLAFFEY, N., SHANLEY, D., 1986. Relationship of gingival thickness and bleeding to loss of probing attachment in shallow sites following nonsurgical periodontal therapy. *Journal of Clinical Periodontology*, 13(7), 654–657.

CoDiagnostix (Online). Available: <https://codiagnostix.com> (Accessed: 25.02.2024)

DAWOOD, A., MARTI, B., SAURET-JACKSON, V., DARWOOD, A. 2015.. 3D printing in dentistry. *British Dental Journal*, 219, 521–529.

DEL FABBRO, M., CERESOLI, V., TASCHIERI, S., CECI, C., TESTORI, T., 2015. Immediate loading of postextraction implants in the esthetic area: Systematic review of the literature. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*, 17(1), 52-70.

DELLA BONA A., CANTELLI V., BRITTO V.T., COLLARES K.F., STANSBURY J.W. 3D printing restorative materials using a stereolithographic technique: a systematic review. *Dent Mater.* 2021; 37(2): 336-350. doi: 10.1016/j.dental.2020.11.030.

DENTINGO, Navident (Online). Available: <https://www.dentino.de/navident> (Accessed: 24.02.2024).

D'Haese, J. 2015. Use of dynamic navigation for dental implant surgery. Presentation at Ghent University (Online). Available: <https://recursosmedicos.com/use-of-dynamic-navigation-for-dental-implant-surgery/> (Accessed: 04.04.2024).

Dentistry Today, Exocad Releases Exoplan 3.0 Galway Software in the United States, 2022 (Online). Available: <https://www.dentistrytoday.com/exocad-releases-explain-3-0-galway-software-in-the-united-states/> (Accessed: 25.02.2024).

Dentsply Sirona, Computergestützte Lösungen für die Implantatbehandlung (Online). Available: <https://www.dentsplysirona.com/content/dam/dentsply/web/Implants/Franchise%20Content/German%20PDF/1224655-DE-SIMPLANT-Delivering-restorative-driven-implant-treatment-w5x04je-en-1502.pdf> (Accessed: 25.02.2024).

D'HAESE, J., ACKHURST, J., WISMEIJER, D., DE BRUYN, H., TAHMASEB, A. 2017. Current state of the art of computer-guided implant surgery. *Periodontol* 2000. 2017 Feb;73(1):121-133.

D'HAESE, R., VROMBAUT, T., HOMMEZ, G., DE BRUYN, H., VANDEWEGHE, S., 2021. Accuracy of guided implant surgery in the edentulous jaw using desktop 3D-printed mucosal supported guides. *Journal of Clinical Medicine*, 10(3), 391.

D'HAESE, R., VROMBAUT, T., HOMMEZ, G., DE BRUYN, H., VANDEWEGHE, S., 2022. Accuracy of guided implant surgery using an intraoral scanner and desktop 3D-printed tooth-supported guides. *International Journal of Oral and Maxillofacial Implants*, 37(3), 479-484.

DIKOVA, T.D., DZHENDOV, D.A., IVANOV, D., BLIZNAKOVA, K. Dimensional accuracy and surface roughness of polymeric dental bridges produced by different 3D printing processes. *Archives of Materials Science and Engineering*, 2018, 94, pp. 65–75.

DUONG, H.-Y., ROCCUZZO, A., STÄHLI, A., SALVI, G. E., LANG, N. P., & SCULEAN, A. (2022). Oral health-related quality of life of patients rehabilitated with fixed and removable implant-supported dental prostheses. *Periodontology* 2000, 88(1), 201-237.

EBELING, M., SAKKAS, A., SCHRAMM, A., WILDE, F., SCHEURER, M., WINTER, K., PIETZKA, S., 2023. Accuracy analysis of computer-assisted and guided dental implantology by comparing 3D planning data and actual implant placement in a mandibular training model:

A monocentric comparison between dental students and trained implantologists. *Journal of Personalized Medicine*, 13(7), 1037.

EDELMANN, C., WETZEL, M., KNIPPER, A., LUTHARDT, R.G., SCHNUTENHAUS, S. Accuracy of computer-assisted dynamic navigation in implant placement with a fully digital approach: A prospective clinical trial. *J Clin Med*. 2021 Apr 21;10(9):1808.

EMERALD DENTAL. Exocad. Guided surgery from another galaxy (Online). Available: [https://emeraldental.com/uploads/exocad\\_whats\\_new\\_exoplan\\_Galway\\_en.pdf](https://emeraldental.com/uploads/exocad_whats_new_exoplan_Galway_en.pdf), (Accessed: 25.02.2024).

ESIMEKARA, J. O., PEREZ, A., COURVOISIER, D. S., SCOLOZZI, P., 2022. Dental implants in patients suffering from autoimmune diseases: A systematic critical review. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 123(5), e464-e473.

ESPOSITO, M., GRUSOVIN, M. G., LOLI, V., COULTHARD, P., WORTHINGTON, H. V., 2010. Does antibiotic prophylaxis at implant placement decrease early implant failures? A Cochrane systematic review. *European Journal of Oral Implantology*, 3(2), 101-110.

ESPOSITO, M., GRUSOVIN, M. G., POLYZOS, I. P., FELICE, P., WORTHINGTON, H. V., 2010. Timing of implant placement after tooth extraction: immediate, immediate-delayed or delayed implants? A Cochrane systematic review. *European Journal of Oral Implantology*, 3(3), 189-205.

EVANS, C. D. J., CHEN, S. T., 2008. Esthetic outcomes of immediate implant placements. *Clinical Oral Implants Research*, 19(1), 73–80.

EXOCAD. Exoplan (Online). Available: <https://exocad.com/our-products/exoplan> (Accessed: 25.02.2024).

FIORILLO, L., CICCÌÙ, M., TÖZÜM, T. F., D'AMICO, C., OTERI, G., CERVINO, G., 2022. Impact of bisphosphonate drugs on dental implant healing and peri-implant hard and soft tissues: a systematic review. *BMC Oral Health*, 22(1), 291

FLÜGGE, T., KRAMER, J., NELSON, K., NAHLES, S., KERNEN, F., 2022. Digital implantology—a review of virtual planning software for guided implant surgery. Part II: Prosthetic set-up and virtual implant planning. *BMC Oral Health*.

FORTIN, T., BOSSON, J. L., ISIDORI, M., & BLANCHET, E., 2006. Effect of flapless surgery on pain experienced in implant placement using an image-guided system. *The International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, 21(2), 298-304.

GANZ, S. D., 2016. 3D Imaging in the Digital Workflow: Essential diagnostic tools for effective treatment planning. *Inside Dentistry*, 12(3).

GAPSKI, R., WANG, H.-L., MASCARENHAS, P., LANG, N. P., 2003. Critical review of immediate implant loading. *Clinical Oral Implants Research*, 14(5), 515-527.

GARGALLO-ALBIOL, J., BAROOTCHI, S., SALOMÓ-COLL, O., WANG, H.-L., 2019. Advantages and disadvantages of implant navigation surgery: A systematic review. *Annals of Anatomy - Anatomischer Anzeiger*, 225, 1-10.

GIRO, G., CHAMBRONE, L., GOLDSTEIN, A., RODRIGUES, J. A., ZENÓBIO, E., FERES, M., FIGUEIREDO, L. C., CASSONI, A., SHIBLI, J. A., 2015. Impact of osteoporosis in dental implants: A systematic review. *World Journal of Orthopedics*, 6(2), 311–315.

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 Dec 2;8(12):2123.

GÓMEZ-DE DIEGO, R., MANG-DE LA ROSA, M. DEL R., ROMERO-PÉREZ, M. J., CUTANDO-SORIANO, A., LÓPEZ-VALVERDE-CENTENO, A., 2014. Indications and contraindications of dental implants in medically compromised patients: Update. *Medicina Oral, Patología Oral y Cirugía Bucal*, 19, e0-e9.

HEBEL, K., GAJJAR, R., HOFSTEDE, T., 2000. Single-tooth replacement: Bridge vs. implant-supported restoration. *Journal of the Canadian Dental Association*, 66(8), 435-438.

HOLL, E. 2017. Digitaler Workflow in der Implantologie. (Online). Available: [https://www.zmk-aktuell.de/amp-detail/story/digitaler-workflow-in-der-implantologie\\_\\_5032.html](https://www.zmk-aktuell.de/amp-detail/story/digitaler-workflow-in-der-implantologie__5032.html) (Accessed 02.02.2024).

HU, C., LANG, N. P., ONG, M. M.-A., LIM, L. P., & TAN, W. C. 2020. Influence of periodontal maintenance and periodontitis susceptibility on implant success: A 5-year retrospective cohort on moderately rough surfaced implants. *Clinical Oral Implants Research*, 31(8), 727-736.

INSTITUTE OF DENTAL IMPLANTS&PERIODONTICS, NobelGuide (Online). Available: <https://www.implantdentist.co.nz/procedures/dental-implants/nobel-guide/>. (Accessed: 25.02.2024)

JAEMSUWAN, S., ARUNJAROENSUK, S., KABOOSAYA, B., SUBBALEKHA, K., MATTHEOS, N., PIMKHAOKHAM, A. Comparison of the accuracy of implant position among freehand implant placement, static and dynamic computer-assisted implant surgery in fully edentulous patients: a non-randomized prospective study. *Int J Oral Maxillofac Surg*. 2023 Feb;52(2):264-271.

JORBA-GARCÍA A, BARA-CASAUS JJ, CAMPS-FONT O, SÁNCHEZ-GARCÉS MÁ, FIGUEIREDO R, VALMASEDA-CASTELLÓN E., 2023. Accuracy of dental implant placement with or without the use of a dynamic navigation assisted system: A randomized clinical trial. *Clin Oral Implants Res*. 2023;34:438–49.

JORBA-GARCÍA, A., FIGUEIREDO, R., GONZÁLEZ-BARNADAS, A., CAMPS-FONT, O., VALMASEDA-CASTELLÓN, E., 2018. Accuracy and the role of experience in dynamic

computer guided dental implant surgery: An in-vitro study. *Medicina Oral, Patología Oral y Cirugía Bucal*, 23(2), e190-e195.

JOSE, E. P., PAUL, P., RECHE, A., 2023. Soft tissue management around the dental implant: A comprehensive review. *Cureus*, 15(10), e48042.

KATSIROUMPA, A., GALANIS, P., DIAMANTIS, I., GEORGIKOPOULOU, S., KATSOULAS, T., KATSIMPERI, E., KONSTANTINOY, E., 2022. Impact of diabetes mellitus on the stabilization and osseointegration of dental implants: a systematic review.

KAWSIRI, 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 Jun;30(6):505-514.

KANG, S.H., LEE, J.W., LIM, S.H., KIM, Y.H., KIM, M.K. 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 Oct;42(7):1530-5.

KERNEN, F., KRAMER, J., WANNER, L., WISMEIJER, D., NELSON, K., FLÜGGE, T. 2020. A review of virtual planning software for guided implant surgery: Data import and visualization, drill guide design, and manufacturing. *BMC Oral Health*, 20:251.

KHAHOEN, A., POWCHAROEN, W., SORNSUWAN, T., CHAIJAREENONT, P., RUNGSIYAKULL, C., RUNGSIYAKULL, P., 2024. Accuracy of implant placement with computer-aided static, dynamic, and robot-assisted surgery: A systematic review and meta-analysis of clinical trials. *BMC Oral Health*, 24(1), 33.

KHORSANDI, D., FAHIMIPOUR, A., ABASIAN, P., SABER, S.S., SEYEDI, M., GHANAVATI, S. 3D and 4D printing in dentistry and maxillofacial surgery: printing techniques, materials, and applications. *Acta Biomater*, 122 (2021), pp. 26-49

KIM, H.-S., KIM, Y.-K., & YUN, P.-Y., 2016. Minimal invasive horizontal ridge augmentation using subperiosteal tunneling technique. *Maxillofacial Plastic and Reconstructive Surgery*, 38(1), 41.

KIATKROEKKRAI, P., TAKOLPUCKDEE, C., SUBBALEKHA, K., MATTHEOS, N., PIMKHAOKHAM, A. Accuracy of implant position when placed using static computer-assisted implant surgical guides manufactured with two different optical scanning techniques: a randomized clinical trial. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2020 Mar;49(3):377-383. doi: 10.1016/j.ijom.2020.01.002.

KIVOVICS, M., TAKÁCS, A., PÉNZES, D., NÉMETH, O., MIJIRITSKY, E., 2022. Accuracy of dental implant placement using augmented reality-based navigation, static computer-assisted implant surgery, and the free-hand method: An in vitro study. *Journal of Dentistry*, 119, 104070.

KIVOVIĆ, M., PÉNZES, D., NÉMETH, O., MIJIRITSKY, E. The influence of surgical experience and bone density on the accuracy of static computer-assisted implant surgery in edentulous jaws using a mucosa-supported surgical template with a half-guided implant placement protocol—a randomized clinical study. *Materials (Basel)*. 2020 Dec 17;13(24):5759.

KOH, R. U., RUDEK, I., WANG, H.-L., 2010. Immediate implant placement: Positives and negatives. *Implant Dentistry*, 19(2), 98-108.

KOIS, J. C., 2004. Predictable single-tooth peri-implant esthetics: Five diagnostic keys. *Compendium of Continuing Education in Dentistry*, 25, 895–896, 898, 900 passim; quiz 906–907.

KOODARYAN, R., HAFEZEQORAN, A., 2021. Effect of laser-microtexturing on bone and soft tissue attachments to dental implants: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Dental Research, Dental Clinics, Dental Prospects*, 15(4), 290-296. doi: 10.34172/joddd.2021.048.

KUBILIUS, M., KUBILIUS, R., VARINAUSKAS, V., ŽALINKEVIČIUS, R., TÖZÜM, T. F., JUODŽBALYS, G., 2016. Descriptive study of mandibular canal visibility: morphometric and densitometric analysis for digital panoramic radiographs. *Dentomaxillofacial Radiology*, 45(7), 20160079.

KUNZENDORF, B., NAUJOKAT, H., WILTFANG, J., 2021. Indications for 3-D diagnostics and navigation in dental implantology with the focus on radiation exposure: A systematic review. *International Journal of Implant Dentistry*, 7, 52.

KÜHL, S., PAYER, M., ZITZMANN, N., U., LAMBRECHT, J., T., FILIPPI, A. Technical accuracy of printed surgical templates for guided implant surgery with the coDiagnostiX™ software. *Clin Implant Dent Relat Res*. 2013 Sep;17(S1):e177-e182.

KÜHL, S, ZÜRCHER S, MAHID T, MÜLLER-GERBL M, FILIPPI A, CATTIN P., 2013. Accuracy of full guided vs. half-guided implant surgery. *Clin Oral Implan Res* 2013;24:763–769.

LEE, E. S., TSAI, M.-C., LEE, J.-X., WONG, C., CHENG, Y.-N., LIU, A.-C., LIANG, Y.-F., FANG, C.-Y., WU, C.-Y., LEE, I.-T., 2023. Bisphosphonates and their connection to dental procedures: Exploring bisphosphonate-related osteonecrosis of the jaws. *Cancers*, 15(22)

LEGEROS, R. Z., CRAIG, R. G., 1993. Strategies to affect bone remodeling: Osteointegration. *Journal of Bone and Mineral Research*, 8(Suppl 2), S583-S596.

LIEBERMANN, A., PACHE, C., SCHWEIGER, J., STAWARCZYK, B., HUTH K. 2019. 3-D-Echtzeitnavigationssystem im digitalen Workflow zur Implantation und prothetischen Versorgung eines Einzelzahnimplantats. *Implantologie* 2019;27(3):221–231 (Online). Available:

<https://www.mininavident.com/view/data/7825/Publikationen/Digital%20workflow%20with%20innovative%20Denacam-3D%20real-time%20navigation%20system%20for%20implanta>

tion%20and%20prosthetic%20restoration%20of%20a%20single-tooth%20implant%20A%20case%20report.pdf (Accessed: 09.11.2023).

LIANG, Y., YUAN, S., HUAN, J., ZHANG, Y., FANG, C., LI, J. In vitro experimental study of the effect of adjusting the guide sleeve height and using a visual direction-indicating guide on implantation accuracy. *Dent Implantol.* 2019 Nov;77(11):2259-2268.

LIN, C.-C., WU, C.-Z., HUANG, M.-S., HUANG, C.-F., CHENG, H.-C., WANG, D. P., 2020. Fully digital workflow for planning static guided implant surgery: A prospective accuracy study. *Journal of Clinical Medicine*, 9(4), 980.

LINKEVICIUS, T., PUISYS, A., VINDASIUTE, E., LINKEVICIENE, L., APSE, P., 2012. Does residual cement around implant-supported restorations cause peri-implant disease? A retrospective case analysis. *Clinical Oral Implants Research*, 24(11), 1179-1184.

LOPES, A., MALÓ, P., DE ARAÚJO NOBRE, M., SÁNCHEZ-FERNÁNDEZ, E., GRAVITO, I. 2016. The NobelGuide® All-on-4® treatment concept for rehabilitation of edentulous jaws: A retrospective report on the 7-years clinical and 5-years radiographic outcomes. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*, 18(5), 946-956.

LOPEZ, N. J., QUINTERO, A., 2020. Peri-implant disease in patients with a history of periodontitis: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Periodontology*, 91(7), 855-870.

MADDALONE, M., BALDONI, M., 2019. Digital orthopantomography vs Cone Beam Computed Tomography-Part 1: Detection of periapical lesions. *Bicocca Open Archive* (Online). Available: <https://boa.unimib.it/handle/10281/246514?mode=complete> (Accessed: 04.10.2023).

MANSOUR, S., BEUER, F., 2018. Digitale Implantatplanung. Vor- und Nachteile der implantologischen 3D-Röntgendiagnostik und navigationsgestützten Implantologie. *Deutscher Ärzteverlag, ZZI*, 2018, 34, 02: 100-106 (Online). Available: [https://www.online-zzi.de/fileadmin/user\\_upload/Heftarchiv/ZZI/article/2018/02/A0147F74-8A9C-4EC8-8B8C-B863B9EE5AE0/A0147F748A9C4EC88B8CB863B9EE5AE0\\_review\\_mansour\\_1\\_original.pdf](https://www.online-zzi.de/fileadmin/user_upload/Heftarchiv/ZZI/article/2018/02/A0147F74-8A9C-4EC8-8B8C-B863B9EE5AE0/A0147F748A9C4EC88B8CB863B9EE5AE0_review_mansour_1_original.pdf) (Accessed: 04.10.2023).

MELLADO-VALERO, A., FERRER-GARCÍA, J. C., CALVO-CATALÁ, J., LABAIG-RUEDA, C. 2010. Implant treatment in patients with osteoporosis. *Medicina Oral, Patología Oral y Cirugía Bucal*, 15(1), e52-e57.

MELONI, S. M., DE RIU, G., PISANO, M., LOLLI, F. M., DELEDDA, A., CAMPUS, G., & TULLIO, A. 2013. Implant restoration of edentulous jaws with 3D software planning, guided surgery, immediate loading, and CAD-CAM full arch frameworks. *International Journal of Dentistry*, 2013, 683423.

MARCHACK, C. B., 2007. CAD/CAM-guided implant surgery and fabrication of an immediately loaded prosthesis for a partially edentulous patient. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 97(6), 389-394.

- MORTON, D., JAFFIN, R., WEBER, H. P., 2004. Immediate restoration and loading of dental implants: Clinical considerations and protocols. *International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, 19(Suppl 1), 103-108.
- MURRAY, C. E., COLEMAN, C. M., 2019. Impact of diabetes mellitus on bone health. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(19), 4873.
- NAZIRI, E., SCHRAMM, A., WILDE, F., 2016. Accuracy of computer-assisted implant placement with insertion templates. *GMS Interdisciplinary Plastic and Reconstructive Surgery DGPW*, 5, Doc15.
- NEUWIRTH, J., 2017. Strahlenschutz in der Zahnarztpraxis. *Praxiseinrichtung. ZWP Online*, 2017 (Online). Available: <https://www.zwp-online.info/zwpnews/wirtschaft-und-recht/praxiseinrichtung/strahlenschutz-in-der-zahnarztpraxis>. (Accessed 04.12.2023).
- NIRULA, P., SELVAGANESH, S., THIYANESWARAN, N., 2023. Feedback on dental implants with dynamic navigation versus freehand. *Bioinformation*, 19(3), 290-294.
- NULTY, A. 2022. A literature review of 3D printing materials in dentistry: part four. *Clinical Dentistry*, 2(3), 44-49.
- OLSSON, M., LINDHE, J., 1991. Periodontal characteristics in individuals with varying form of the upper central incisors. *J. Clin. Periodontol.* 1991;18:78–82.
- OZDEN YUCE, M., GUNBAY, T., GUNIZ BAKSI, B., COMLEKOGLU, M., MERT, A. , 2020. Clinical benefits and effectiveness of static computer-aided implant surgery compared with conventional freehand method for single-tooth implant placement. *J. Stomatol. Oral Maxillofac. Surg.* 2020.
- PANCHAL, N., MAHMOOD, L., RETANA, A., EMERY, R., 2019. Dynamic Navigation for Dental Implant Surgery. *Oral and Maxillofacial Surgery Clinics of North America*, 31(4), 539-547.
- PANDEY, C., ROKAYA, D., & BHATTARAI, B. P., 2022. Contemporary concepts in osseointegration of dental implants: A review. *Biomed Research International*, 2022, Article 6170452.
- PAPASPYRIDAKOS, P., CHEN, C.-J., SINGH, M., WEBER, H.-P., GALLUCCI, G. O., 2012. Success criteria in implant dentistry: A systematic review. *Journal of Dental Research*, 91(3), 242-248.
- PASCUAL, D., VAYSSE, J., 2016. Chirurgie implantaire et prothèse guidées et assistées par ordinateur: Le flux numérique continu (Guided and computer-assisted implant surgery and prosthetic: The continuous digital workflow). *Revue de Stomatologie, de Chirurgie Maxillo-faciale et de Chirurgie Orale*, 117(1), 28–35.

- PATEL, R., UCER, C., WRIGHT, S., KHAN, R. S., 2023. Differences in dental implant survival between immediate vs. delayed placement: A systematic review and meta-analysis. *Dentistry Journal (Basel)*, 11(9), 218.
- PELLEGRINO, G., TARASCHI, V., ZACCHINO, A., FERRI, A., MARCHETTI, C. Dynamic navigation: a prospective clinical trial to evaluate the accuracy of implant placement. *Clin Oral Implants Res.* 2019 May;30(2):139-147. doi: 10.1111/clr.13424.
- PISTILLI, R., CANULLO, L., PESCE, P., PISTILLI, V., CAPONIO, V. C. A., SBRICOLI, L. 2022. Guided implant surgery and sinus lift in severely resorbed maxillae: A retrospective clinical study with up to 10 years of follow-up. *Journal of Dentistry*, 121, 104137.
- PONTORIERO, R., & CARNEVALE, G., 2001. Surgical crown lengthening: 12-month clinical wound healing study. *Journal of Periodontology*, 72(7), 841–848.
- POZZI, A.; TALLARICO, M.; MARCHETTI, M.; SCARFO, B.; ESPOSITO, M., 2014. 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, 229–242.
- PUTRA, R. H., YODA, N., IIKUBO, M., KATAOKA, Y., YAMAUCHI, K., KOYAMA, S., SASAKI, K., 2020. Influence of bone condition on implant placement accuracy with computer-guided surgery. *International Journal of Implant Dentistry*, 6, 62.
- QIANG W, QIANG F, LIN L., 2019. Estimation of effective dose of dental x-ray devices. *Radiat Prot Dosim.* 2019;183(4):417–421.
- RAGUCCI, G. M., ELNAYEF, B., CRIADO-CÁMARA, E., SUÁREZ-LÓPEZ DEL AMO, F., HERNÁNDEZ-ALFARO, F., 2020. Immediate implant placement in molar extraction sockets: A systematic review and meta-analysis. *International Journal of Implant Dentistry*, 6(1), 49.
- RITZERT, B. 2018. Zahnimplantate zunehmend erste Wahl: 1,3 Millionen werden in Deutschland pro Jahr eingepflanzt. Deutsche Gesellschaft für Implantologie im Zahn-, Mund- und Kieferbereich (Online). Available: <https://idw-online.de/de/news707107> (Accessed: 04.10.2023)
- ROCCUZZO, A., IMBER, J.-C., MARRUGANTI, C., SALVI, G. E., RAMIERI, G., & ROCCUZZO, M., 2022. Clinical outcomes of dental implants in patients with and without history of periodontitis: A 20-year prospective study. *Journal of Clinical Periodontology*, 49(12), 1346–1356.
- RUBIO SERRANO, M., ALBALAT ESTELA, S., PEÑARROCHA DIAGO, M., PEÑARROCHA DIAGO, M., 2008. Software applied to oral implantology: Update. *Medicina Oral, Patología Oral y Cirugía Bucal*, 13(10), E661-E665.
- SALOMÃO, G. V. D. S., CHUN, E. P., PANEGACI, R. D. S., SANTOS, F. T., 2021. Analysis of digital workflow in implantology. *Case Reports in Dentistry*, 2021, 6655908.

SANCHO-PUCHADES, M., ALFARO, F.H., NAENNI, N., JUNG, R., HAMMERLE, C., SCHNEIDER, D. A , 2019. Randomized Controlled Clinical Trial Comparing Conventional And Computer-Assisted Implant Planning and Placement in Partially Edentulous Patients. Part 2: Patient Related Outcome Measures. *Int. J. Periodont. Restor. Dent.* 2019, 39, e99–e110.

SANNA, A, MOLLY L, VAN STEENBERGHE, D . Immediately loaded CAD-CAM manufactured fixed complete dentures using flapless implant placement procedures: a cohort study of consecutive patients. *J Prosthet Dent* 2007; 97: 331–339.

SCAF DE MOLON, R., MORAIS-CAMILO, J. A. N. D., VERZOLA, M. H. A., FAEDA, R. S., PEPATO, M. T., MARCANTONIO JR., 2013. Impact of diabetes mellitus and metabolic control on bone healing around osseointegrated implants: removal torque and histomorphometric analysis in rats. *Clinical Oral Implants Research*, 24(7), 831-837.

SCHERER, U., STOETZER, M., RUECKER, M., GELLRICH, N.C, VON SEE, C. Template-guided vs. non-guided drilling in site preparation of dental implants. *Clin Oral Investig.* 2015;19:1339-1346.

SCHNUTENHAUS, S., EDELMANN, C., KNIPPER, A., LUTHARDT, R.G. Accuracy of dynamic computer-assisted implant placement: A systematic review and meta-analysis of clinical and in vitro studies. *J Clin Med.* 2021 Feb 11;10(4):704.

SCHNUTENHAUS, S., WAGNER, M., EDELMANN, C., LUTHARDT, R. G., RUDOLPH, H., 2021. Factors influencing the accuracy of freehand implant placement: A prospective clinical study. *Dent. J.*, 9(5), 54.

3SHAPE, 3Shape Implant Studio (Online). Available: <https://www.3shape.com/en-us/software/implant-studio> (Accessed 25.02.2024).

SHIM J.S., KIM J.E., JEONG S.H., CHOI Y.J., RYU J.J. Printing accuracy, mechanical properties, surface characteristics, and microbial adhesion of 3D-printed resins with various printing orientations. *J Prosthet Dent.* 2020.

SEO, C.,B., JUODZBALYS, G. Accuracy of guided surgery via stereolithographic mucosa-supported surgical guide in implant surgery for edentulous patient: a systematic review. *J Oral Maxillofac Res.* 2018 Mar 31;9(1):e1.

SMITH, R. B., TARNOW, D. P., SARNACHIARO, G., 2019. Immediate placement of dental implants in molar extraction sockets: An 11-year retrospective analysis. *Compendium of Continuing Education in Dentistry*, 40(3), 188-196.

STEFANELLI, L.,V., MANDELARIS, G.,A., FRANCHINA, A., PRANNO, N., PAGLIARULO, M., CERA, F., MALTESE, F., DE ANGELIS, F., DI CARLO, S. Accuracy of dynamic navigation system workflow for implant supported full arch prosthesis: A case series. *Int J Environ Res Public Health.* 2020 Jul 13;17(14):5038.

STRAUSS, F. J., GIL, A., SMIRANI, R., RODRIGUEZ, A., JUNG, R., THOMA, D., 2024. The use of digital technologies in peri-implant soft tissue augmentation – A narrative review on planning, measurements, monitoring and aesthetics. *Clinical Oral Implants Research*.

SUN, H., MENG, S., CHEN, J., WAN, Q., 2023. Effects of Hyperlipidemia on Osseointegration of Dental Implants and Its Strategies. *Journal of Functional Biomaterials*, 14(4), 194.

TAHMASEB, A., WU, V., WISMEIJER, D., COUCKE, W, EVANS, C. The accuracy of static computer-aided implant surgery: A systematic review and meta-analysis. *Clin Oral Implants Res*. 2018 Oct;29(Suppl 16):416-435.

TANG, T.; HUANG, Z.; LIAO, L.; GU, X.; ZHANG, J.; ZHANG, X.,2019. Factors that Influence Direction Deviation in Freehand Implant Placement. *J. Prosthodont*. 2019, 28, 511–518.

TARNOW, D., ELIAN, N., FLETCHER, P., FROUM, S., MAGNER, A., CHO, S. C., 2003. Vertical distance from the crest of bone to the height of the interproximal papilla between adjacent implants. *Journal of Periodontology*, 74(12), 1785–1788.

THIERINGER, F., M., ZAREAN, P., ZAREAN, P., ABAZI, S., JODA T. 2021. Navigierte digitale Implantologie. Möglichkeiten und Grenzen innovativer Technologien. *Implantologie* 2021;29(3):269–284 (Online). Available: [https://dbe.unibas.ch/fileadmin/user\\_upload/dbe/04\\_Research/Swiss\\_MAM/Implantologie\\_3\\_2021.pdf](https://dbe.unibas.ch/fileadmin/user_upload/dbe/04_Research/Swiss_MAM/Implantologie_3_2021.pdf) (Accessed: 04.10.2023).

TOLMAN, D. E., KELLER, E. E., 1991. Endosseous implant placement immediately following dental extraction and alveoloplasty: Preliminary report with 6-year follow-up. *International Journal of Oral and Maxillofacial Implants*, 6(1), 24–28.

UNKOVSKIY A., BUI P.H., SCHILLE C., GEIS-GERSTORFER J., HUETTIG F., SPINTZYK S. Objects build orientation, positioning, and curing influence dimensional accuracy and flexural properties of stereolithographically printed resin. *Dent Mater*. 2018;34:e324–e33.

VALENTI, C., FEDERICI, M. I., MASCIOTTI, F., MARINUCCI, L., XHIMITIKU, I., CIANETTI, S., PAGANO, S. 2024. Mechanical properties of 3D printed prosthetic materials compared with milled and conventional processing: A systematic review and meta-analysis of in vitro studies. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 132(2), 381-391.

VERCRUYSSSEN M, COX C, COUCKE W, NAERT I, JACOBS R, QUIRYNEN M., 2014. A randomized clinical trial comparing guided implant surgery (bone- or mucosa-supported) with mental navigation or the use of a pilot-drill template. *J Clin Periodontol*. 2014;41:717–23.

VERCRUYSSSEN, M., FORTIN, T., WIDMANN, G., JACOBS, R., & QUIRYNEN, M., 2014. Different techniques of static/dynamic guided implant surgery: Modalities and indications. *Periodontology* 2000, 66(1), 214-227.

VERCRUYSSSEN, M., LALEMAN, I., JACOBS, R., QUIRYNEN, M. 2015. Computer-supported implant planning and guided surgery: a narrative review. *Clin Oral Implants Res.* 2015 Sep;26 Suppl 11:69-76.

VERCRUYSSSEN, M., VAN DE WIELE, G., TEUGHEL, W., NAERT, I., JACOBS, R., QUIRYNEN, M. Implant- and patient-centred outcomes of guided surgery, a 1-year follow-up: An RCT comparing guided surgery with conventional implant placement. *J Clin Periodontol.* 2014 Dec;41(12):1154-60.

VERHAMME, L.,M., MEIJER, G.,J., BERGÉ, S.,J., SOEHARDI, R.,A., XI, T., DE HAAN, A.,F.,J., SCHUTYSER, F., MAAL, T.,J.,J. An accuracy study of computer-planned implant placement in the augmented maxilla using mucosa-supported surgical templates. *Clin Implant Dent Relat Res.* 2015 Dec;17(6):1154-1163.

WAGNER, J., SPILLE, J. H., WILTFANG, J., NAUJOKAT, H., 2022. Systematic review on diabetes mellitus and dental implants: An update. *International Journal of Implant Dentistry*, 8(1), 1.

WANG, X., SHAHEEN, E., SHUJAAT, S., MEEUS, J., LEGRAND, P., LAHOUD, P., GERHARDT, M. N., POLITIS, C., & JACOBS, R., 2022. Influence of experience on dental implant placement: an in vitro comparison of freehand, static guided and dynamic navigation approaches. *International Journal of Implant Dentistry*, 8, 42.

WHITLEY, D. III, EIDSON, R. S., RUDEK, I., BENCHARIT, S. 2017. In-office fabrication of dental implant surgical guides using desktop stereolithographic printing and implant treatment planning software: A clinical report. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 118(3), 256-263.

WIMMER, M., 2021. Digital implant planning with prefabricated immediate provisional: A digital workflow example. *Dental Economics*, 2021 Nov:15 (Online). Available: <https://www.dentaleconomics.com/science-tech/article/14211746/digital-implant-planning-with-prefabricated-immediate-provisional-a-digital-workflow-example> (Accessed: 10.02.2024).

WU, D., ZHOU, L., YANG, J., ZHANG, B., LIN, Y., CHEN, J., HUANG, W., & CHEN, Y., 2020. Accuracy of dynamic navigation compared to static surgical guide for dental implant placement. *International Journal of Implant Dentistry*, 6, 78.

XIANG, B., YU, J., LU, J., YAN, Z., 2023. Comparisons between digital-guided and nondigital protocol in implant planning, placement, and restorations: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Journal of Evidence-Based Dental Practice*, 23(4), 101919.

YEUNG, M., ABDULMAJEED, A., CARRICO, C.K., DEEB, G.,R., BENCHARIT, S. Accuracy and precision of 3D-printed implant surgical guides with different implant systems: An in vitro study. *J Dent Educ.* 2020 Jun;123(6):821-828.

YOUNIS, H., LV, C., XU, B., ZHOU, H., DU, L., LIAO, L., ZHAO, N., LONG, W., ELAYAH, S. A., CHANG, X., HE, L., 2024. Accuracy of dynamic navigation compared to

static surgical guides and the freehand approach in implant placement: A prospective clinical study. *Head & Face Medicine*, 20(30).

ZHANG L., LIU H., YAO H., ZENG Y., CHEN J. Preparation, Microstructure, and Properties of ZrO<sub>2</sub>(3Y)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Bioceramics for 3D Printing of All-ceramic Dental Implants by Vat Photopolymerization. *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers*.

ZHANG, S., LEE, K., 2022. Soft tissue augmentation of dental implants-before, during and after implant placement. *Journal of Oral Medicine and Dental Research*, 3(1), 1-3.

ZHAO, X. Z., XU, W. H., TANG, Z.T., WU, M. J., ZHU, J., CHEN, S. 2014. Accuracy of computer-guided implant surgery by a CAD/CAM and laser scanning technique. *Chin J Dent Res*. 2014;17 2014;17(1):31-6.

ZHOU, W., FAN, S., WANG, F., HUANG, W., JAMJOOM, F.Z, WU, Y. A novel extraoral registration method for a dynamic navigation system guiding zygomatic implant placement in patients with maxillectomy defects. *Int J Oral Maxillofac Surg*. 2021 Jan;50(1):116-120.