

# **Diplomarbeit**

## **Implantatgetragene Sofortversorgung im zahnlosen Kiefer - Eine vergleichende Literaturrecherche von statischen und dynamischen Navigationsverfahren**

eingereicht von

**Florian Sprinz**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor der Zahnmedizin**

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

an der

**Medizinischen Universität Graz**

ausgeführt an der

**Universitätsklinik für Zahnmedizin und Mundgesundheit Graz**

**Klinischen Abteilung für orale Chirurgie und Kieferorthopädie**

Unter der Anleitung von

Univ. OÄ Priv.-Doz. Dr.<sup>in</sup> scient.med. Dr.<sup>in</sup> med.dent. Barbara Kirnbauer  
Assoz. Prof. Priv.-Doz. Dr.med.univ. Dr.med.dent.et scient.med. Michael Payer

Graz, am 05.08.2024

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die den Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen inländischen oder ausländischen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Graz, am 05.08.2024

Florian Sprinz eh.

## Danksagung

Als erstes möchte ich mich bei meinen Betreuern Frau Univ. OÄ Priv.-Doz. Dr.<sup>in</sup> scient.med. Dr.<sup>in</sup> med.dent. Barbara Kirnbauer und Assoz. Prof. Priv.-Doz. Dr.med.univ. Dr.med.dent.et scient.med. Michael Payer bedanken, die mir diese Arbeit ermöglicht und mich immer unterstützt haben.

Ganz herzlich bedanke ich mich auch bei Mag.iur. Eva Willfort, die mir bei der Literatursuche zur Seite gestanden ist.

Vielen Dank an meine Studienkollegen, die die gesamte Studienzeit besser und lustiger gemacht haben. Ganz besonders danke ich euch Julia, Melina und Lukas für eure Freundschaft, ohne euch wäre die Zeit nur halb so schön gewesen.

Der größte Dank geht an meine Familie, die mich in jeglicher Hinsicht bedingungslos unterstützt und immer an mich geglaubt hat.

## Zusammenfassung

Um die Genauigkeit der Platzierung von Zahnimplantaten zu verbessern und das Risiko von Komplikationen zu verringern, wurde die computergestützte Implantatchirurgie (CAIS) eingeführt. Die CAIS ermöglicht eine präzise Umsetzung der geplanten optimalen Implantatposition in den Kiefer der Patient\*innen sowie eine anschließende Sofortversorgung. Mittels einer Implantatplanungssoftware werden die genauen Positionen der Implantate in einem präoperativen Röntgenbild virtuell geplant und anschließend mit Hilfe von statischer Führung oder dynamischer Navigation auf das tatsächliche Operationsgebiet übertragen. Bei der statischen Führung wird eine Bohrschablone mit eingebetteten Bohrhülsen verwendet, die die Bohrung und Insertion des Implantates präzise führen. Die dynamische Navigation nutzt ein Tracking-System, das die Position des Kiefers und des Winkelstücks in Echtzeit am Computerbildschirm verfolgt und mit dem präoperativen Planungsbild überlagert. Beide Systeme ermöglichen eine präzise Übertragung des virtuellen Plans auf das Operationsgebiet und weisen im Vergleich zur konventionellen Freihandimplantation eine höhere Genauigkeit auf. Die vorliegende Arbeit beschreibt zuerst den theoretischen Hintergrund der CAIS und vergleicht anschließend die Navigationsschienenanwendung mit der dynamischen Implantation. Schlussendlich wird auf den aktuellen Stand der Literatur der letzten 10 Jahre bezüglich volldigitalisierter Sofortimplantation in zahnlosen Kiefern und anschließender Sofortversorgung eingegangen, wobei insbesondere ein Augenmerk auf die Genauigkeit der erzielten Ergebnisse gelegt wird.

## Abstract

Computer-aided implant surgery (CAIS) was introduced to improve the accuracy of dental implant placement and reduce the risk of complications. CAIS enables precise realisation of the planned optimal implant position in the patient's jaw and subsequent immediate restoration. Using implant planning software, the exact positions of the implants are planned virtually in a preoperative X-ray image and then transferred to the actual surgical site using static guidance or dynamic navigation. Static guidance uses a drilling template with embedded drill sleeves that precisely guide the drilling and insertion of the implant. Dynamic navigation uses a tracking system that follows the position of the jaw and the handpiece in real time on the computer screen and superimposes it on the preoperative planning image. Both systems enable precise transfer of the virtual plan to the surgical site and are more accurate than conventional freehand implantation. This diploma thesis first describes the theoretical background of CAIS and then compares the navigation splint application with dynamic implant placement. Finally, the current state of the literature of the last 10 years regarding fully digitalised immediate implant placement in edentulous jaws and subsequent immediate restoration is discussed, with a particular focus on the accuracy of the results achieved.

# Inhaltsverzeichnis

<i>Abkürzungsverzeichnis</i> .....	<i>vii</i>
<i>Abbildungsverzeichnis</i> .....	<i>viii</i>
<i>Tabellenverzeichnis</i> .....	<i>x</i>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Ablauf der computergestützten Implantatchirurgie</b> .....	<b>2</b>
1.1.1 Präoperatives Röntgen mittels Digitaler Volumetomografie .....	2
1.1.2 Virtuelle Planung des Implantats .....	4
1.1.3 Statische computergestützte Implantatchirurgie .....	5
1.1.4 Dynamische computergestützte Implantatchirurgie.....	11
<b>1.2 Genauigkeitsbestimmung der durchgeführten Implantation</b> .....	<b>16</b>
<b>1.3 Vor- und Nachteile statischer und dynamischer Verfahren</b> .....	<b>17</b>
<b>1.4 Kombination von statischer und dynamischer CAIS</b> .....	<b>19</b>
<b>1.5 Zielsetzung</b> .....	<b>22</b>
<b>2 Materialien und Methoden</b> .....	<b>23</b>
<b>3 Ergebnisse</b> .....	<b>24</b>
<b>3.1 Ergebnisse hinsichtlich statischer und dynamischer CAIS im Vergleich</b> .....	<b>28</b>
3.1.1 Ausgewählte Studien für den Methodenvergleich .....	29
<b>3.2 Ergebnisse zur computergestützten Implantatchirurgie in zahnlosen Kiefern</b> .....	<b>41</b>
3.2.1 Ergebnisse zur statischen CAIS in zahnlosen Kiefern.....	42
3.2.2 Ergebnisse zur dynamischen CAIS in zahnlosen Kiefern .....	58
3.2.3 Ergebnisse zur Kombination von statischer und dynamischer CAIS in zahnlosen Kiefern .....	67
<b>4 Diskussion und Schlussfolgerung</b> .....	<b>68</b>
<b>5 Ausblick in die Zukunft</b> .....	<b>72</b>
<b>6 Literatur</b> .....	<b>73</b>

## Abkürzungsverzeichnis

AR	Augmented Reality
BOP	Bleeding on Probing
CAD/CAM	Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing
CAIS	Computer-assisted implant surgery (Computergestützte Implantatchirurgie)
CBCT	Cone Beam Computertomografie (Kegelstrahl-Computertomografie)
CT	Computertomografie
DICOM	Digital Imaging and Communications in Medicine
DVT	Digitale Volumetomografie
IOS	Intraoralscanner
OK	Oberkiefer
STL	Standard Tessellation Language
UK	Unterkiefer
Vs.	Versus

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Stabilisierung der Bohrschablonen mittels Silikonindex [17].....	6
Abbildung 2: Zahngestützte Bohrschablone [14].....	7
Abbildung 3: A: Schleimhautgestützte Bohrschablone [14], B: Schleimhautgestützte Bohrschablone mit Stiften im Knochen verankert [17].....	8
Abbildung 4: A: Offene, zahngestützte Bohrschablone [14], B: Zahngestützte Bohrschablone ohne Metallhülsen mit eingebautem Schlitz [19].....	9
Abbildung 5: Intraoralscan eines zahnlosen OK mit Harzmarkern am Gaumen [20].....	10
Abbildung 6: A: Virtuelle prothetisch gesteuerte Implantatplanung [20], B: Mit drei Schrauben fixierte schleimhautgestützte Bohrschablone [20].....	11
Abbildung 7: Schematische Darstellung des von den Markern zu den Kameras reflektierten Lichtes bei der dynamischen Implantation [21] .....	12
Abbildung 8: Positionsabweichungen zwischen einem geplanten (grau) und einem tatsächlichen (rot) Implantat [27] .....	17
Abbildung 9: Röntgenschablone mit röntgenopaken Referenzpunkten und abnehmbarem Clip mit Metallkügelchen [11] .....	20
Abbildung 10: A: Virtuell geplante Bohrschablone mit abnehmbarem Clip, B: Virtuell geplante Bohrschablone ohne Clip, C: Virtuell geplanter Clip, D: 3D gedruckte Bohrschablone und 3D gedruckter Clip [11].....	21
Abbildung 11: Bohrschablone mit integriertem, nicht abnehmbarem Clip. A: virtuell geplant, B: 3D gedruckt [11].....	22
Abbildung 12: Flussdiagramm zur Literaturrecherche.....	24
Abbildung 13: Erscheinungsjahre der einbezogenen Publikationen .....	26
Abbildung 14: Anzahl der In-vitro- und In-vivo-Studien der einbezogenen Publikationen.....	27
Abbildung 15: Thematik der einbezogenen Publikationen .....	27
Abbildung 16: Kategorisierung der Studien beim direkten Vergleich von statischer und dynamischer CAIS nach zahnlosen und teilbezahnten Kiefern .....	29
Abbildung 17: In-vitro- vs. In-vivo-Studien beim direkten Vergleich von statischer und dynamischer CAIS.....	29
Abbildung 18: Implantatbohrung unter der Verwendung einer statischen Bohrschablone in einem zahnlosen Unterkiefermodell [34] .....	30
Abbildung 19: Anzahl der Studien zur dynamischen und statischen CAIS sowie zur Doppelfaktor-Technik in zahnlosen Kiefern, unterteilt in In-vitro- und In-vivo-Studien... ..	41

Abbildung 20: Schleimhautgestützte Bohrschablone, die durch die Osteosyntheseschrauben stabilisiert wird [43] .....	46
Abbildung 21: Workflow einer statisch geführten Implantation im zahnlosen Kiefer mit stapelbaren Schablonen [60].....	50

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auflistung der in diese Arbeit einbezogenen Publikationen .....	26
Tabelle 2: Veranschaulichung der Studien zum Vergleich der statischen und dynamischen CAIS. KA: Keine Angabe, OK: Oberkiefer, UK: Unterkiefer, gelb markiert: Studien mit zahnlosen Kiefern, rote Schrift: Studie mit Pilotbohrschablone .....	38
Tabelle 3: Auflistung der Abweichungen zwischen den geplanten und tatsächlichen Implantatpositionen bei der statischen und dynamischen CAIS. KA: Keine Angabe, gelb markiert: Studien mit zahnlosen Kiefern, rote Schrift: Studie mit Pilotbohrschablone .....	39
Tabelle 4: Conclusio der beschriebenen Studien. Gelb markiert: Studien mit zahnlosen Kiefern, rote Schrift: Studie mit Pilotbohrschablone .....	40
Tabelle 5: Veranschaulichung der Studien zur statischen CAIS in zahnlosen Kiefern. KA: Keine Angabe, OK: Oberkiefer, UK: Unterkiefer.....	52
Tabelle 6: Auflistung der Abweichungen zwischen den geplanten und tatsächlichen Implantatpositionen bei der statischen CAIS in zahnlosen Kiefern. KA: Keine Angabe ...	54
Tabelle 7: Durchführung einer Sofortbelastung bei den beschriebenen Studien zur statischen CAIS in zahnlosen Kiefern.....	55
Tabelle 8: Conclusio der beschriebenen Studien zur statischen CAIS in zahnlosen Kiefern .....	57
Tabelle 9: Veranschaulichung der Studien zur dynamischen CAIS in zahnlosen Kiefern. KA: Keine Angabe, OK: Oberkiefer, UK: Unterkiefer.....	63
Tabelle 10: Auflistung der Abweichungen zwischen den geplanten und tatsächlichen Implantatpositionen bei der dynamischen CAIS in zahnlosen Kiefern. KA: Keine Angabe .....	64
Tabelle 11: Durchführung einer Sofortbelastung bei den beschriebenen Studien zur dynamischen CAIS in zahnlosen Kiefern.....	65
Tabelle 12: Conclusio der beschriebenen Studien zur dynamischen CAIS in zahnlosen Kiefern.....	66
Tabelle 13: Tabellarische Darstellung der beschriebenen Studie zur kombinierten statischen und dynamischen CAIS.....	67

# 1 Einleitung

Mit der zunehmenden Verbreitung digitaler Technologien im medizinischen Bereich wurde die computergestützte Implantatchirurgie (computer-assisted implant surgery (CAIS)) im Jahr 1995 eingeführt. [1] Mithilfe von computergestützten Implantationssystemen können Zahnimplantate genau und präzise im Mund des\*der Patient\*in positioniert werden. Diese Methode nutzt den Einsatz von Computertechnologie, um in einem dreidimensionalen Kegelstrahl-Computertomographie-Bild des Kiefers die optimale Implantatposition zu planen. Die nachfolgende Insertion der Implantate erfolgt geführt – entweder mittels Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing (CAD/CAM) hergestellten statischen Bohrschablonen oder durch ein dynamisches System, bei dem die Position des Winkelstücks und des Implantats in Echtzeit am Computerbildschirm verfolgt werden können. [2,3] Die Implantate können anschließend mit einem mittels CAD/CAM geplanten und hergestellten Provisorium sofort belastet werden. [4]

Bei der computergestützten Implantation wird ein vorab erstellter virtueller Implantationsplan mit hoher Genauigkeit auf den Kiefer des\*der Patient\*in übertragen. Es handelt sich um eine schnelle und minimal-invasive Methode, die auch ohne Lappenbildung durchgeführt werden kann und somit wenig Risiken für den\*die Patient\*in hinsichtlich Infektionen und Blutungen mit sich bringt. Eine schnelle Genesung und eine kürzere Behandlungsdauer tragen zu einer erhöhten Patient\*innenzufriedenheit bei. Weitere Vorteile sind seltene iatrogene Schädigungen angrenzender anatomischer Strukturen und der Wegfall der Notwendigkeit von Gipsmodellen. [2,5]

Im Gegensatz dazu wird bei der konventionellen Implantation das Implantatbett freihändig aufbereitet sowie das Implantat freihändig in den Kieferknochen inseriert. Das birgt vermehrte Fehlerquellen hinsichtlich der korrekten Platzierung der Implantate und erhöht das Risiko für postoperative Komplikationen. Es kann vorab mit Hilfe einer Schablone eine Körnung im Knochen erfolgen, welche die spätere Lokalisierung der richtigen Implantatposition erleichtert. Auch wenn die Schablone unter Berücksichtigung der Positionierung der Implantatkrone hergestellt wird, führt dies jedoch bei weitem nicht zu der Genauigkeit, die mittels computergestützter Systeme erreicht wird. [6] Bei zahnlosen Patient\*innen ist die konventionelle Methode besonders herausfordernd. Denn aufgrund von

fehlenden anatomischen Referenzpunkten ist im zahnlosen Kiefer ein Erreichen der optimalen Implantatposition äußerst schwierig. [7]

Um einen Literaturvergleich zwischen statischer und dynamischer CAIS zu ermöglichen sowie den aktuellen Stand der Literatur bezüglich statischer und dynamischer CAIS in zahnlosen Kiefern mit anschließender Sofortversorgung darzustellen, muss zuerst der theoretische Hintergrund der CAIS verstanden werden. Daher werden im Folgenden Teil die Grundlagen sowie der genaue Ablauf der computergestützten Implantatchirurgie beschrieben.

## **1.1 Ablauf der computergestützten Implantatchirurgie**

Nach der gründlichen Anamnese des\*der Patient\*in folgt als erster Schritt einer jeden computergestützten Implantation eine dreidimensionale radiologische Untersuchung mittels Digitaler Volumentomografie (DVT) oder Computertomografie (CT). Die enorale Situation kann zusätzlich mit einem Intraoralscanner (IOS) digitalisiert werden. Mit Hilfe einer Implantatplanungssoftware werden im Datensatz die optimalen Implantatpositionen virtuell geplant. Die DVT-Aufnahme kann gegebenenfalls mit Dateien des Intraoralscanners überlagert werden. Die intraoperative Übertragung des virtuellen Plans auf das tatsächliche Operationsgebiet erfolgt entweder mittels statischer oder dynamischer CAIS. Bei der statischen Methode werden nach der präoperativen Planung chirurgische Bohrschablonen hergestellt, die eine präzise Führung des Bohrers und Insertion des Implantates ermöglichen. Die dynamische CAIS verwendet Tracking-Marker, die an Winkelstück und Kiefer des\*der Patient\*in befestigt sind und durch ein optisches Kamerasystem registriert werden. Das ermöglicht eine Verfolgung der Position der Bohrspitze in Echtzeit am Computerbildschirm bei gleichzeitiger Überlagerung mit dem präoperativen Planungsbild. Dadurch können Positionsabweichungen des Bohrers und des Implantats intraoperativ korrigiert werden. [6]

### **1.1.1 Präoperatives Röntgen mittels Digitaler Volumentomografie**

Um die Implantate virtuell planen zu können, wird zuerst ein dreidimensionales Röntgenbild des Kiefers mittels Kegelstrahl-Computertomografie (CBCT), auch Digitale Volumentomografie (DVT) genannt, aufgenommen. Abgebildet werden beispielsweise der für das Implantat zur Verfügung stehende Knochen, die umliegenden Zähne sowie die

Position der Kieferhöhle, des Nervus alveolaris inferior, des Schneidekanals und des Foramen mentale. [6] Die DVT ist eine alternative dreidimensionale Röntgentechnik im Vergleich zur Computertomografie (CT). Die Funktionsweise der DVT ist grundlegend ähnlich wie ein herkömmliches CT, zeigt jedoch einige spezifische Unterscheidungsmerkmale. Die DVT nutzt einen kegelförmigen Röntgenstrahl. Die durchgelassenen Strahlen werden von einem gegenüberliegenden Detektor erfasst. Bei herkömmlichen CT-Scans drehen sich die Röhre und die Detektoren kontinuierlich um den Körper des\*der Patient\*in. Es werden zweidimensionale Schnittaufnahmen erzeugt, die zu einem dreidimensionalen Bild zusammengesetzt werden. Dahingegen erfolgt bei der DVT lediglich eine einzelne Umdrehung. Bei dieser erfasst der Detektor mehrere Bilder aus verschiedenen Winkeln, wodurch eine dreidimensionale Aufnahme entsteht. [8]

Ein großer Vorteil der DVT ist, dass es zu einer geringeren Strahlenbelastung als bei der CT kommt. [9] Außerdem sind DVT-Scanner kompakter und kostengünstiger im Vergleich zu herkömmlichen CT-Geräten sowie in der Funktionsweise schnell und einfach. [10] Dadurch, dass ein DVT-Bild eine sehr hohe Auflösung aufweist und anatomische Strukturen dreidimensional dargestellt werden können, ist diese Technologie sehr bedeutend für die computergestützte Implantologie. Somit kann in Kombination mit einer Implantatplanungssoftware die gewünschte Implantatposition virtuell geplant und schlussendlich vom Computer auf den\*die Patient\*in übertragen werden. [3]

#### 1.1.1.1 Durchführung der DVT bei der computergestützten Implantatchirurgie

Bevor im Rahmen der CAIS eine DVT durchgeführt wird, erfolgt bei zahnlosen Kiefern die Herstellung einer Röntgenschablone. Dafür wird zunächst ein Wax-up einer Prothese digital oder analog gestaltet und intraoral auf Funktion sowie Ästhetik überprüft. Anschließend wird eine Röntgenschablone aus Kunststoff hergestellt, die ein Duplikat dieser Wax-up Prothese darstellt. Wenn der\*die Patient\*in schon eine Prothese besitzt, die den funktionellen und ästhetischen Parametern entspricht, kann diese auch direkt verwendet bzw. gegebenenfalls noch unterfüttert werden und es muss keine Röntgenschablone hergestellt werden. Zur späteren Überlagerung verschiedener DVT- sowie IOS-Aufnahmen werden röntgenopake Referenzpunkte (z.B. Guttapercha-Marker) auf der Röntgenschablone bzw. der Prothese befestigt. Bei teilbezahnten Patient\*innen ist nicht unbedingt eine Röntgenschablone erforderlich, da hier auch noch vorhandene Zähne oder bereits im Mund befindliche Implantate als Referenzpunkte dienen und somit die Überlappung der DVT-Bilder ermöglichen. Die röntgenopaken Referenzpunkte können sich hier auch auf einer

thermoplastischen Schiene („Clip“), die auf der Teilbezahnung befestigt wird, befinden. [4,6,11]

Um eine optimale Passform der Röntgenschablone zu gewährleisten, wird ein Bissindex aus Silikon hergestellt. Anschließend wird das Kiefer in der richtigen Vertikaldimension stabilisiert. Die DVT kann nun im One- oder Double-Scan-Verfahren erfolgen. Beim One-Scan-Verfahren wird nur eine DVT-Aufnahme von dem\*der Patient\*in gemacht, während dieser die Röntgenschablone in Endbissstellung trägt. Beim Double-Scan Verfahren erfolgt ein weiterer Scan nur von der Röntgenschablone. Dies ermöglicht eine genauere Darstellung der Schablone ohne mögliche Artefakte durch umliegende Strukturen. Die röntgenopaken Referenzpunkte ermöglichen das anschließende Matchen der Bilder in der Planungssoftware. [4,6]

### **1.1.2 Virtuelle Planung des Implantats**

Mit geeigneten Softwareprogrammen, zu denen unter anderen EasyGuide, DTX Studio Implant, Biohorizons, Nobel Biocare, InVivo5, Sicat und Simplant gehören, können die Implantate virtuell geplant werden. Somit werden die genauen Positionen der Implantate im Kieferknochen in einem 3D-Modell am Computerbildschirm dargestellt. Dies wird in verschiedenen Ansichten überprüft, um sicherzustellen, dass das Implantat optimal platziert wird. [6]

Dafür müssen die durch die Kegelstrahl-Computertomografie erhaltenen Bilder im medizinische Format DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) gespeichert und in das Softwareprogramm importiert werden. Die nachfolgende Planung der Implantate erfolgt nach dem Prinzip der umgekehrten Behandlungsplanung (backward planning), bei dem sich die geplanten Implantatpositionen am erwünschten prothetischen Ergebnis orientieren. Dazu werden anhand der im DVT-Bild sichtbaren Röntgenschablone bzw. Prothese virtuelle Implantate unter Berücksichtigung der realen Anatomie geplant. Falls keine Röntgenschablone oder vorhandene Prothese verwendet wurde, kann auch die Prothese virtuell in der Software entworfen werden. Die optimale Implantatposition sowie der Winkel, die Insertionstiefe und die Größe des Implantats werden mit Hilfe des Softwareprogramms ermittelt und am Bildschirm dargestellt. Um das Implantat herum kann ein Sicherheitsabstand zu anderen anatomischen Strukturen gewählt werden. Eine Unterschreitung dieser Abstände wird in der Software angezeigt. Im Softwaresystem sind zusätzlich Implantate von verschiedenen Herstellern auswählbar. Nicht nur die

Implantatpositionen, sondern auch die bei der statisch geführten Implantation verwendeten Bohrschablonen sowie die provisorischen Prothesen zur Sofortversorgung können in der Software geplant werden. [2,6]

Zur Verbesserung der Behandlungsplanung und um genaue Details zu berücksichtigen, können zusätzlich Dateien im STL-Format (Standard Tessellation Language) von Intraoralscannern in die Software importiert und über die DICOM-Bilder gelegt werden. [3] Das genaue Zusammenführen der beiden Datensätze erfolgt durch den Abgleich von mindestens drei Referenzpunkten, bei denen es sich um röntgenopake Strukturen wie beispielsweise Guttapercha-Marker handelt. Diese Referenzpunkte sind sowohl im DVT-Bild als auch im Bild des Intraoralscanners sichtbar. [12]

### **1.1.3 Statische computergestützte Implantatchirurgie**

Derzeit ist die am häufigsten angewandte Methode für die computergestützte Implantation die statische Führung unter der Verwendung von chirurgischen Bohrschablonen. Mit Hilfe der Bohrschablonen sollen die Informationen aus der präoperativen Planung auf das tatsächliche Operationsgebiet übertragen werden. Innerhalb der Bohrschablone sind Führungselemente („Bohrhülsen“, „Metallhülsen“) integriert, die ermöglichen, dass die Implantatbohrungen an der geplanten Stelle, im richtigen Winkel und mit der vorgesehenen Tiefe durchgeführt werden können. Die Bohrhülsen limitieren den Durchmesser für die verschiedenen Bohrer und ein mechanischer Stopp auf der Schablone reguliert die Tiefe der Bohrungen. Das ermöglicht eine präzise Führung des Bohrers und die Löcher für die Implantate können so wie virtuell geplant, gebohrt werden. Nach abgeschlossener Osteotomie werden die Implantate exakt an den vorher festgelegten Stellen platziert. [6,13,14]

#### **1.1.3.1 Herstellung von Bohrschablonen**

Bei der computergestützten statischen Führung werden die Bohrschablonen mittels CAD/CAM hergestellt. Dazu wird wie zuvor beschrieben zuerst das DVT-Bild des Kiefers und gegebenenfalls das entsprechende Bild des Intraoralscanners in die Computersoftware importiert, wo die Bilder überlagert werden können. Nach der virtuellen Planung der optimalen Implantatpositionen wird auch die Bohrschablone mit Hilfe der CAD-Software entworfen. Die Bohrschablone wird als STL-Format von der Software übermittelt und computergestützt mittels 3D-Druck (Rapid Prototyping) hergestellt, wobei hier vor allem die Photopolymerisationstechnik im Rahmen der Stereolithographie verwendet wird. Als

Alternative zum meistens verwendeten 3D-Druck steht auch die Frästechnik zur Verfügung. Die Metallhülsen werden anschließend eingearbeitet. [6,12,15,16]

#### 1.1.3.2 Chirurgischer Eingriff unter der Verwendung von Bohrschablonen

Vor dem Eingriff wird die jeweilige angefertigte Bohrschablone in den Mund des\*der Patient\*in eingesetzt und der korrekte Sitz mit Hilfe eines Bissindex überprüft sowie stabilisiert (Abbildung 1). Eine exakte Passform der Schablone stellt sicher, dass die Bohrungen genau an den zuvor festgelegten Positionen durchgeführt werden und nicht davon abweichen. [13]



*Abbildung 1: Stabilisierung der Bohrschablonen mittels Silikonindex [17]*

Außerdem muss sich der Behandler zuvor entscheiden, ob eine Lappenpräparation oder ein lappenloser Ansatz („flapless“) durchgeführt wird. Letzterer bietet einen raschen Zugang und ermöglicht eine kürzere Stuhlzeit. Des Weiteren ist das Vorgehen minimalinvasiver, die keratinisierte Schleimhaut wird geschont und es entstehen kleinere Wundränder. Folglich kommt es zu weniger Narbenbildung und einem besseren ästhetischem Outcome. Ein lappenloser Ansatz ist allerdings nur möglich, wenn ausreichend Knochenvolumen und keratinisierte Schleimhaut vorhanden sind, da kein Knochenaufbau durchgeführt werden kann. Zu den Nachteilen des lappenlosen Ansatzes gehören außerdem der kleinere Zugang und somit die geringere Übersicht über das Implantationsgebiet, die eingeschränkte Möglichkeit den Knochen abzumessen und dadurch auch die Gefahr der Perforation des kortikalen Knochens, welche zu einem Implantatverlust führen kann. [5,6,14]

Der operative Eingriff kann entweder vollständig oder partiell geführt erfolgen. Diese beiden Varianten unterscheiden sich darin, dass bei der vollständig geführten Implantation sowohl die Osteotomie als auch die Insertion des Implantats mit Hilfe der mittels CAD/CAM-hergestellten Bohrschablone durchgeführt werden, was zu einer hohen Genauigkeit und

Vorhersagbarkeit führt. Die partiell geführte Variante kann entweder bohr- oder pilotbohrgesteuert sein. Bohrgesteuert heißt, dass nur die Osteotomie mit Hilfe der Bohrschablone durchgeführt wird und das Eindrehen des Implantats freihändig erfolgt. Bei der pilotbohrgesteuerten Methode wird nur die Pilotbohrung mit der Bohrschablone gemacht. Danach wird die Bohrschablone entfernt und sowohl die weitere Bohrung als auch die Implantatinsertion erfolgen freihändig. Im Vergleich zu vollständig geführten Implantationen haben partiell geführte jedoch ein wenig präziseres Outcome. [10] Da sich diese Arbeit auf die Volldigitalisierung beschränkt, beziehen sich die in späteren Kapiteln beschriebenen Genauigkeitsergebnisse nur auf die vollständig geführte CAIS und auf mittels CAD/CAM-gefertigte Bohrschablonen.

### 1.1.3.3 Arten von Bohrschablonen

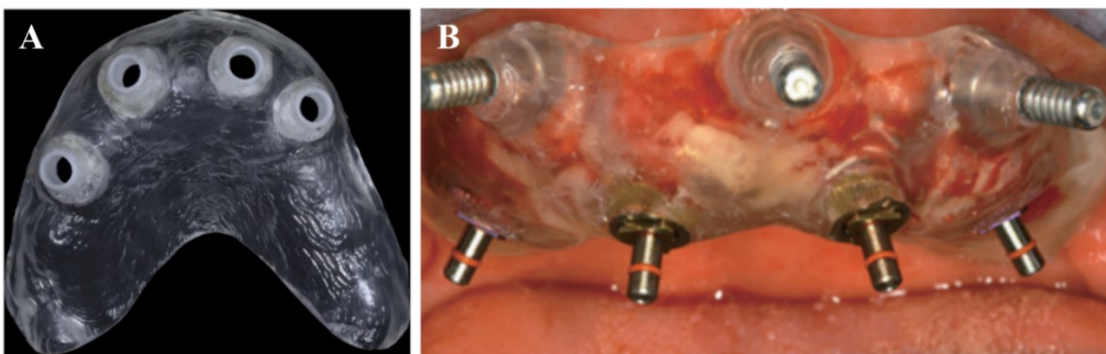
Die Bohrschablonen können entweder von den vorhandenen Zähnen getragen werden (zahngestützt), auf der Schleimhaut aufliegen (schleimhautgestützt) oder im Knochen verankert sein (knochengestützt). Für zahnlose Kiefer werden vor allem schleimhaut- und knochengestützte Bohrschablonen verwendet. [6] Zahngestützte Bohrschablonen ermöglichen jedoch die genaueste Positionierungskontrolle. [18]

Bei teilbezahnten Patient\*innen werden hauptsächlich zahngestützte Bohrschablonen (Abbildung 2) verwendet, die durch die noch vorhandenen Zähne stabilisiert werden. Bei zahnlosen Kiefern können temporäre Implantate als Stabilisierungsmöglichkeit dienen. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, die Bohrschablone auf Schleimhaut oder Knochen zu stützen, um die Stabilität zu erhöhen. Zahngestützte Bohrschablonen ermöglichen eine höhere Genauigkeit als schleimhaut- und knochengestützte, da sie am stabilsten sind. Zu beachten ist aber, dass bei einer Lappenpräparation die Position der Bohrschablone und folglich die Genauigkeit der Implantation beeinflusst werden kann, was vor allem bei dicken Schleimhautverhältnissen oder ungünstigen Schienendesign der Fall ist. [14]



Abbildung 2: Zahngestützte Bohrschablone [14]

Schleimhautgestützte Bohrschablonen (Abbildung 3 A) werden von der Mundschleimhaut getragen und sind typischerweise mit lappenlosen Ansätzen verbunden. Wenn kein Knochenaufbau erforderlich ist, ist bei zahnlosen Patient\*innen eine schleimhautgestützte Bohrschablone die erste Wahl. Hier können zusätzlich Mini-Implantate bzw. Fixierstifte verwendet werden, um eine bessere Stabilität zu erreichen (Abbildung 3 B). Bei teilbezahnten Patient\*innen ist auch eine Kombination aus schleimhaut- und zahngestützter Bohrschablone möglich. Durch einen lappenlosen Ansatz kommt es zu einer kurzen Operationsdauer, weniger postoperativen Komplikationen und einer hohen Patient\*innenzufriedenheit. [14]



*Abbildung 3: A: Schleimhautgestützte Bohrschablone [14], B: Schleimhautgestützte Bohrschablone mit Stiften im Knochen verankert [17]*

Die Verwendung von knochengestützten Bohrschablonen ist immer mit dem Abpräparieren des Mukoperiostlappens verbunden. Auch hier erfolgt die Verankerung der Bohrschablonen im Knochen über Mini-Implantate oder Fixierstifte. [7,14] Knochengestützte Bohrschablonen werden vor allem bei Patient\*innen eingesetzt, bei denen ein Knochenaufbau oder -umbau erforderlich ist. Durch die Lappenpräparation wird ein direkter Blick auf den Knochen und anatomische Strukturen ermöglicht, was einen Vorteil darstellt. Eine Lappenpräparation ist jedoch mit einer längeren Behandlungszeit sowie erhöhten postoperativen Komplikationen wie Schmerzen, Schwellungen, Narbenbildung und Infektionsrisiko verbunden. [14]

Neben der Klassifizierung hinsichtlich der Art, wie die Bohrschablonen im Kiefer gestützt werden, können Bohrschablonen auch in geschlossene und offene Bohrschablonen unterteilt werden. Meistens werden geschlossene Bohrschablonen verwendet, die das ganze Operationsgebiet verdecken und dadurch die Sicht auf Schleimhaut und Knochen während der Osteotomie und Implantatinsertion verhindern. Intraoperativ sind somit keine Veränderungen möglich, wodurch präoperative Planungsfehler zu einer falschen

Implantatpositionierung führen können. Geschlossene Bohrschablonen verhindern zusätzlich, dass die Kühlflüssigkeit zum Bohrer gelangt, wodurch die Gefahr der Überhitzung des Knochens besteht. Jedoch ermöglichen geschlossene Bohrschablonen die geringsten Abweichungen von der präoperativen Planung und führen folglich zu genaueren Ergebnissen. [14]

Offene Bohrschablonen (Abbildung 4 A) haben dagegen auf der bukkalen Seite eine Öffnung, wodurch die Bohrung und das Einsetzen des Implantates visuell kontrolliert werden können. So sind Schleimhaut und Knochen jederzeit sichtbar. Auch eine Überhitzung des Knochens ist unwahrscheinlich, da die Kühlflüssigkeit durch die Öffnungen direkt zum Bohrer kommen kann. Jedoch sind Positionierungsfehler und Ungenauigkeiten bei dieser Variante häufig, was zu einer restriktiven Verwendung führt. [14]

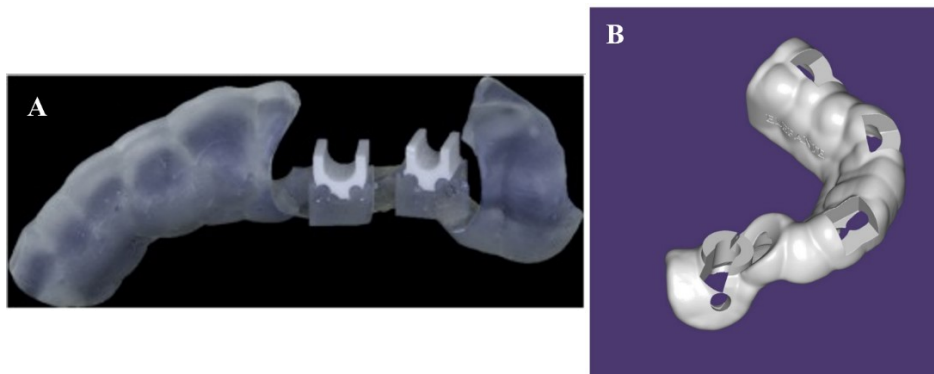


Abbildung 4: A: Offene, zahngestützte Bohrschablone [14], B: Zahngestützte Bohrschablone ohne Metallhülsen mit eingebautem Schlitz [19]

Die zur Implantation genutzten Bohrschablonen können entweder mit oder ohne Metallhülsen ausgestattet sein. Nachteile der metallischen Hülsen sind der größere Platzbedarf in mesiodistaler Ausrichtung und die Knochenerwärmung, da die Kühlflüssigkeit den Bohrer unzureichend erreichen kann. Um dieses Problem zu beheben, können Hülsen mit einem lingual oder bukkal eingebauten Schlitz konstruiert werden (Abbildung 4 B). Durch den Schlitz kann die Kühlflüssigkeit zum Bohrer gelangen und somit wird das Risiko einer Knochenüberhitzung minimiert. [6,19]

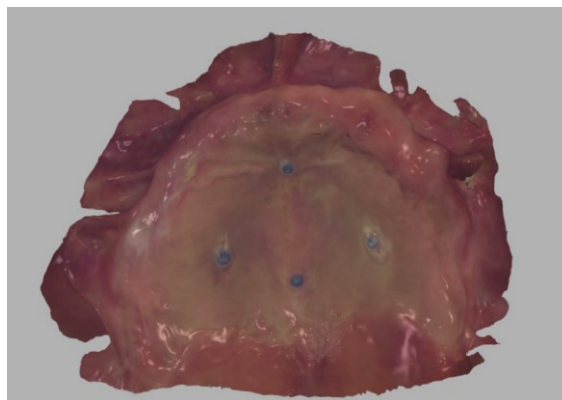
#### 1.1.3.4 Fallbeispiel einer statischen CAIS im zahnlosen Kiefer

Zum Abschluss dieses Kapitels wird der beschriebene theoretische Ablauf der statischen CAIS nun anhand eines konkreten Fallbeispiels veranschaulicht, wobei auch die praktischen Anpassungen im Detail dargestellt werden. Um bei zahnlosen Patient\*innen die jeweiligen

DVT- und IOS-Bilder überlagern zu können, wird normalerweise eine Röntgenschablone mit röntgenopaken Markern verwendet. Oh et al. [20] haben 2017 jedoch eine statische CAIS an einem 60-jährigen Patienten mit einem zahnlosen Oberkiefer durchgeführt, ohne der Verwendung einer Röntgenschablone.

Zuerst erfolgten eine DVT sowie ein Intraoralscan vom Ober- sowie vom Unterkiefer. Anschließend wurde die korrekte Vertikaldimension mit Hilfe eines Polyvinylsiloxan-Abdruckmaterials auf dem zahnlosen Oberkiefer ermittelt. Dazu wurde der Unterkiefer des Patienten in die Vertikaldimension geführt und stabilisiert, bis das Abdruckmaterial ausgehärtet war. Das Abdruckmaterial wurde aus dem Mund entfernt und mit dem Intraoralscanner gescannt. Die digital erfassten Daten des zahnlosen Oberkiefers und des bezahnten Unterkiefers wurden in Übereinstimmung mit den digital erfassten interokklusalen Aufnahmen virtuell zusammengesetzt. Danach wurde die interokklusale Aufnahme im virtuellen Bild entfernt und übrig blieb ein Scan der beiden Kiefer in der richtigen Endbissstellung.

Die DVT- und IOS-Daten wurden in die Planungssoftware importiert. Um die Aufnahmen überlagern zu können, wurde bereits vor der DVT sowie vor dem IOS „Flowable Komposit“ an vier verschiedenen Stellen in die keratinisierte Mukosa als kleine halbkugelförmige Referenzpunkte mit einem Durchmesser von 1-2 mm palatinal injiziert. Die röntgenopaken Kompositmarker wurden mittels Photopolymerisation ausgehärtet und mit einem Histoacryl-Kleber fixiert. Bei Abbildung 5 handelt es sich um den Intraoralscan des zahnlosen Oberkiefers des Patienten, in dem man die Kompositmarker am Gaumen erkennen kann.



*Abbildung 5: Intraoralscan eines zahnlosen OK mit Harzmarkern am Gaumen [20]*

Nach dem Matchen der DVT- und IOS-Bilder wurden in der Planungssoftware die Implantate prothetisch gesteuert geplant (Abbildung 6 A) und eine virtuelle Bohrschablone

erstellt, die mittels 3D-Druck hergestellt wurde. Auch die Abutments sowie die provisorische Prothese wurden virtuell geplant und anschließend mittels CAD/CAM im Fräsverfahren hergestellt. Für den chirurgischen Eingriff wurde ein lappenloser Ansatz verwendet und die schleimhautgetragene Bohrschablone mit drei Schrauben im Knochen fixiert (Abbildung 6 B). Vier Implantate wurden unter statischer Führung mit Hilfe der Bohrschablone implantiert. Nach der Implantation wurde die Bohrschablone entfernt und die schon hergestellten Abutments sowie das Provisorium eingesetzt. Eine postoperative DVT-Aufnahme bestätigte, dass alle Implantate, so wie virtuell geplant, platziert wurden.

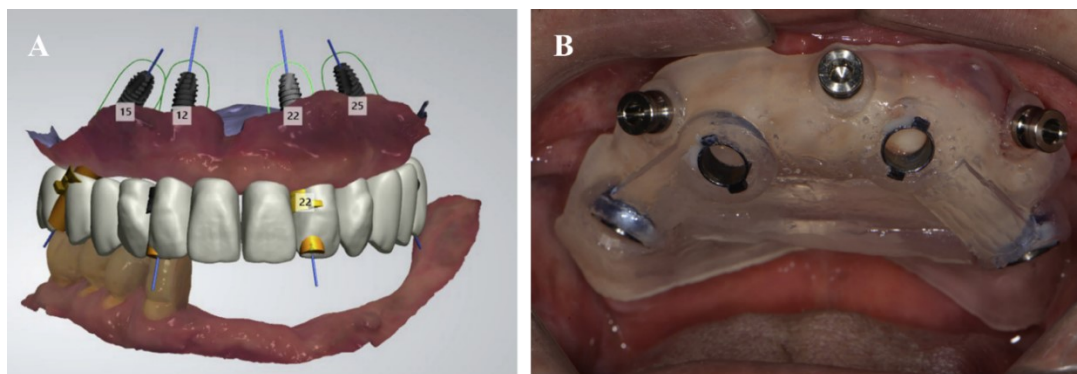


Abbildung 6: A: Virtuelle prothetisch gesteuerte Implantatplanung [20], B: Mit drei Schrauben fixierte schleimhautgestützte Bohrschablone [20]

#### 1.1.3.5 Komplikation der statischen CAIS

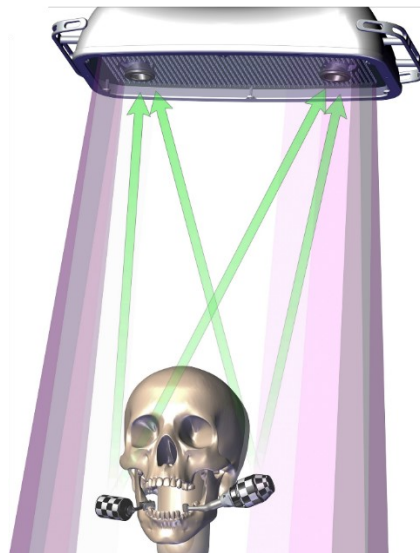
Trotz ihrer Genauigkeit weist die statische CAIS Nachteile auf, darunter der fehlende direkte Sichtkontakt der Operationsstelle und ein intraoperativ nicht veränderbarer Operationsplan. Außerdem kann es wie bei jeglichen Eingriffen oder Manipulationen zu Komplikationen kommen, die sowohl chirurgisch als auch prothetisch bedingt sein können. Zu chirurgischen Misserfolgen können beispielsweise ein schlechter oder falscher Sitz der Bohrschablone führen oder eine insuffizient erreichte Primärstabilität der Implantate. Die prothetischen Komplikationen können ein falscher Sitz oder Fraktur der Prothese, Abplatzen von Verblendungen oder Lockerungen der Suprastrukturen sein. [6]

#### 1.1.4 Dynamische computergestützte Implantatchirurgie

Bei der dynamischen CAIS entfällt der Schritt, bei dem die Bohrschablonen erstellt werden. Hier kann der chirurgische Eingriff direkt im Anschluss an die Kegelstrahl-Computertomografie und die virtuelle Planung mittels Softwareprogramm erfolgen. Die Osteotomie und die Implantation erfolgen bei der dynamisch navigierten Implantation ohne analoge Führungshilfen. Mit Hilfe von optischen Kameras werden die Bewegungen von

zwei extraoralen Tracking-Marken, von denen einer starr am Kiefer des\*der Patient\*in und einer starr am Winkelstück befestigt ist, verfolgt. Eine Software berechnet aus diesen Tracking-Daten in Echtzeit die exakte Position von Bohrspitze und Implantat und stellt sie am Computerbildschirm im virtuellen DVT-Planungsbild dar. So sieht der\*die Operateur\*in jederzeit die tatsächliche Position der Bohrspitze am Bildschirm und wird zur geplanten Position des Implantates geführt. [3]

Der Tracking-Marker am Kiefer des\*der Patient\*in wird entweder an einem oder mehreren noch im Kiefer befindlichen Zähnen, die keine erhöhte Mobilität aufweisen oder schon an einem im Kiefer befindlichen Implantat, starr befestigt. Dies geschieht beispielsweise über eine thermoplastische Schiene („Clip“), die über die vorhandenen Zähne geformt wird und anschließend aushärtet. Der Tracking-Marker wird über eine Halterung an der Schiene fixiert. [2,21,22] Bei zahnlosen Kiefern kann vorab ein Implantat freihändig eingesetzt werden, um eine stabile Basis für die Verankerung der Tracking-Marker zu schaffen. [22] Es können aber auch temporäre Mini-Implantate zur Befestigung eingesetzt werden, welche nach dem chirurgischen Eingriff wieder entfernt werden. [2] Die beiden Tracking-Marker an Winkelstück und Mund reflektieren das Licht, das von einer Lichtquelle emittiert wird, zurück an die im Bereich der OP-Leuchte angebrachten Kameras, was in Abbildung 7 dargestellt wird. [21]



*Abbildung 7: Schematische Darstellung des von den Markern zu den Kameras reflektierten Lichtes bei der dynamischen Implantation [21]*

Durch die kontinuierliche Aufnahme und Auswertung der Markerpositionen kann die genaue Ortung des Winkelstücks und des Implantats erfolgen. Eine Software berechnet die exakte Position und Achse des Bohrers und vergleicht sie mit der geplanten

Implantatposition. [13] Während des chirurgischen Eingriffs wird somit eine Echtzeitsimulation auf dem Bildschirm erzeugt und die genaue Position der Bohrerspitze kontinuierlich angezeigt. Das erfordert, dass über die gesamte Operationsdauer ein direkter Blick auf den Bildschirm zur ständigen Positionsüberprüfung gewährleistet ist. Der\*die Operateur\*in sieht somit durchgehend die gewünschte Position des Implantats am Computerbildschirm und wird mithilfe eines Fadenkreuzes am Monitor zur richtigen Position geführt. Wenn der Bohrer in der gewünschten Achse und Position steht, zeigt der Bildschirm in Echtzeit die Korrektheit an mithilfe der bis zur gewünschten Aufbereitungstiefe vorgedrungen wird. Dadurch ist es möglich, die Bohrerspitze exakt an der geplanten Implantationsstelle anzusetzen, den gewünschten Eintrittswinkel präzise einzuhalten und die Osteotomie mit der vorgesehenen Tiefe durchzuführen. Nach der Osteotomie kann derselbe Ansatz für das geführte Einbringen des Implantats verwendet werden. Die am häufigsten verwendeten dynamischen Navigationssysteme sind „DenX Image Guided Implantology“, „X-Guide Dynamic 3D Navigation“, „Inliant“ und „Navident“. [2,6,22]

Vor dem chirurgischen Eingriff erfolgt eine Registrierung des Bohrers im Registrierungstool des Navigationssystems. Das System erkennt dadurch welche Länge und welchen Durchmesser die verwendete Bohrerspitze aufweist. Dieser Schritt muss bei jedem Bohrerwechsel wiederholt werden. [12] Um die Genauigkeit des dynamischen Systems zu überprüfen, ist ebenfalls vor dem chirurgischen Eingriff ein Vergleich von Referenzpunkten erforderlich. Hierzu werden mindestens drei Referenzpunkte benötigt, die sowohl in der DVT als auch im Mund des\*der Patient\*in während des chirurgischen Eingriffs sichtbar sind. Diese Referenzpunkte dienen als bekannte Positionen und sind somit in den virtuellen Bilddaten und im Mund des\*der Patient\*in eindeutig identifizierbar. Die Referenzpunkte können noch vorhandene Zähne, bereits im Mund befindliche Implantate oder bei zahnlosen Kiefern röntgenopake Strukturen, wie zum Beispiel Titan-Miniimplantate sein. In teilbezahnten Kiefern können sich die röntgendichten Strukturen auch zum Beispiel als Guttapercha-Marker auf der thermoplastischen Schiene („Clip“) befinden, über die der Tracking-Marker später beim chirurgischen Eingriff befestigt wird. Die Referenzpunkte werden im virtuellen Bild markiert. Im Anschluss werden die entsprechenden Punkte im Mund des\*der Patient\*in mit der Bohrerspitze berührt. Durch den Vergleich der erfassten Positionen der Referenzpunkte mit den entsprechenden Positionen auf den virtuellen Bildern können Abweichungen zwischen der virtuellen Planung und der realen Anatomie erkannt

werden. So kann die Genauigkeit des dynamischen Verfahrens vor dem chirurgischen Eingriff und auch jederzeit währenddessen verifiziert werden. [3,21–25]

Auch die dynamisch geführte Implantation kann vollständig oder partiell geführt erfolgen. Bei der vollständig geführten dynamischen Implantation wird das Implantat bis zu seiner endgültigen Position mit Hilfe des Navigationssystems platziert. Bei der partiell geführten dynamischen Implantation geschieht die Osteotomie geführt, das Einsetzen des Implantats erfolgt jedoch zu mindestens 50% ohne Navigation. Dies ist dann der Fall, wenn das Drehmoment des Winkelstücks niedriger ist als das vom Implantathersteller vorgesehene oder wenn der\*die Operateur\*in ein höheres Drehmoment bevorzugt. Des Weiteren kann es auch notwendig sein, die Tiefe des Implantats direkt zu visualisieren. [26]

Bei der dynamisch navigierten Implantation kann ebenfalls ein lappenloser Zugang gewählt werden oder ein Abpräparieren des Mukoperiostlappens erfolgen. Ein lappenloser Ansatz bringt wie schon bei der statischen Methode beschrieben einige Vorteile mit sich, wie beispielsweise eine geringere Invasivität sowie folglich weniger Risiken für den\*die Patient\*in und ein möglicherweise besseres ästhetisches Outcome. [6]

#### 1.1.4.1 Fallbeispiel einer dynamisch navigierten Implantation

Wang et al. [22] haben im Jahr 2021 erfolgreich eine dynamisch navigierte Implantation in einem zahnlosen Kiefer durchgeführt. Dabei wurden die Implantate in die unbezahnten Kiefer einer 55-jährigen Patientin mittels dynamisch geführter Navigation präzise platziert, wobei sie anschließend mit einem Sofortprovisorium belastet wurden. Der angewandte Workflow dieser Gruppe wird im Folgenden genau beschrieben.

Zuerst wurden Röntgenschablonen aus Kunststoff durch Replikation der Prothesen der Patientin hergestellt. Auf diesen Kunststoffprothesen wurden röntgenopake Guttapercha-Marker befestigt und Röntgenaufnahmen mittels DVT im Doppelscanverfahren durchgeführt. Die DVT-Daten wurden mit einer Planungssoftware analysiert und die Positionen der Implantate virtuell geplant. Dabei ermöglichten die röntgenopaken Marker eine genaue Überlagerung der aufgenommenen Bilder. [22]

Virtuell geplant wurden nicht nur die Implantate für die prothetische Versorgung, sondern auch Titan-Miniimplantate, die als Referenzpunkte dienten. Wie bereits weiter oben beschrieben, handelt es sich bei diesen Miniimplantaten um bekannte Positionen, die sowohl im DVT als auch beim chirurgischen Eingriff im Mund der Patientin eindeutig identifizierbar sind und die Genauigkeit des dynamischen Navigationssystems verifizieren.

Die virtuelle Planung dieser Punkte war erforderlich, um zufällige Überlagerungen zwischen Miniimplantaten und den Positionen der prothetischen Implantate zu verhindern. Für die präzise Implantation der Miniimplantate wurde in diesem Fall eine 3D-gedruckte statische Bohrschablone hergestellt. Nach der Insertion der Miniimplantate in den Kiefer der Patientin mit Hilfe dieser Bohrschablone wurde wiederum eine DVT durchgeführt und die Daten in das Softwareprogramm eingespielt. So waren die Referenzpunkte sowohl virtuell als auch im Mund der Patientin erkennbar. [22]

In der Regio 22 und 32 wurde nun je ein Implantat ohne Führungshilfe eingesetzt. Diese beiden Einzelimplantate dienten als Verankerung, um den jeweiligen Marker sowohl im Unter- als auch im Oberkiefer stabil befestigen zu können. Auch das Winkelstück war mit einem Marker versehen und wurde vor dem chirurgischen Eingriff kalibriert. Darauf folgte die Registrierung der Referenzpunkte anhand der Titan-Miniimplantate. Zusätzlich wurde eine Knochenreduktion in der Koronalebene durchgeführt, der Kieferkammknochen geglättet und die Implantatlager aufbereitet. Die Insertion der geplanten 10 Implantate erfolgte unter dynamischer Führung. Dabei wurden die genauen Positionen des Kiefers und des Winkelstücks kontinuierlich auf dem Bildschirm angezeigt und mit der virtuellen Planung überlagert. Abweichungen zwischen der realen und der virtuellen Position des Bohrers und des Implantats waren am Computer sichtbar. Dadurch konnten die Eintrittsstelle des Bohrers, der Eintrittswinkel und die Bohrtiefe jederzeit während des Eingriffs überprüft und gegebenenfalls korrigiert werden. Nach der Implantation wurde eine weitere DVT gemacht, wobei die röntgenopaken Titan-Miniimplantate eine exakte Überlagerung der prä- und postoperativen Aufnahmen ermöglichten. Somit war ein direkter Vergleich der geplanten und tatsächlichen Implantatpositionen möglich. Die Ergebnisse zeigten, dass alle Implantate exakt wie virtuell geplant positioniert waren. [22]

Die Implantate wurden unmittelbar nach der Insertion belastet. Als Sofortprovisorien wurden metallverstärkte Prothesen aus Kunststoff auf den Implantaten verschraubt. Die Endversorgung wurde nach vier Monaten eingesetzt. [22]

#### 1.1.4.2 Komplikationen der dynamischen CAIS

Auch bei der dynamisch geführten Implantation gibt es Fehlerquellen, welche die Genauigkeit dieser Methode verringern. So können Kalibrierungsfehler die Verfolgungsgenauigkeit der Bohrspitze beeinträchtigen und zu ungenauen Implantatpositionierungen führen. Externe Einflüsse, wie zum Beispiel Lichtveränderungen,

beeinflussen die Kameras des Tracking-Systems und somit ebenfalls die Bewegungsverfolgung der Bohrerspitze. Auch Softwarefehler können die Genauigkeit des Verfahrens beeinträchtigen, ebenso wie defekte Kameras. Des Weiteren führen unvorhergesehene Bewegungen des\*der Patient\*in zu Ungenauigkeiten. Zusätzlich kann es zu einer Lockerung der starren Befestigung der Marker im Mund des\*der Patient\*in oder am Winkelstück kommen, wodurch die Ortung der Bohrerspitze erschwert wird. [2]

Obwohl es sich um ein computergesteuertes Verfahren handelt, spielen die Feinmotorik des\*der Operateur\*in sowie die Koordination zwischen der Hand, die das Winkelstück steuert, und den Augen, die sowohl das virtuelle Bild als auch die realen Patient\*innen betrachten, eine wichtige Rolle. Nicht nur verschiedene Operateur\*innen können unterschiedliche Genauigkeiten erzielen, sondern auch der\*dieselbe Operateur\*in kann bei schlechter Konzentration ungenauere oder bei zunehmender Erfahrung präzisere Ergebnisse erreichen. Somit können auf Grund der manuell durchgeführten Osteotomie und Implantatinsertion bedienerabhängige, individuelle Fehler auftreten, die unabhängig von der Technologie selbst sind. [2]

Wie auch bei der statischen CAIS kann es zu Verletzungen von anatomischen Nachbarstrukturen sowie Nervenverletzungen oder geringer Primärstabilität und folglich Implantatverlusten kommen. Prothetische Komplikationen wie falscher Sitz, Prothesenbruch, Abplatzen von Verblendungen oder lockere Schrauben können ebenso bei der Navigationsanwendung vorkommen. [6]

## **1.2 Genauigkeitsbestimmung der durchgeführten Implantation**

Zur Überprüfung der Genauigkeit der Implantation und um Positionsabweichungen zwischen den geplanten und den tatsächlichen Implantaten zu bestimmen, kann postoperativ eine weitere DVT-Aufnahme gemacht und in der Software mit dem präoperativen Planungsbild überlagert werden. [2] Die genaue Überlagerung der prä- und postoperativen Bilder erfolgt wiederum mittels röntgenopaken Referenzpunkten wie Titan-Miniimplantaten oder Guttapercha-Marker.

Bei der Genauigkeitsanalyse werden die Eintrittspunkt-, Apex- und Winkelabweichungen ermittelt. Beim Eintrittspunkt und Apex können die laterale Abweichung, die Tiefenabweichung und die globale Abweichung bestimmt werden. Bei der lateralen

Abweichung handelt es sich um die Differenz in der mesialen/distalen (y-Achse) und bukkalen/lingualen (x-Achse) ohne Berücksichtigung der Tiefenabweichung (z-Achse). Die Differenz in der Tiefe entlang der Längsachse des Implantats wird als Tiefenabweichung oder vertikale Abweichung bezeichnet. Werden die laterale (x- und y-Achse) und die Tiefenabweichung (z-Achse) gemeinsam berücksichtigt, spricht man von einer dreidimensionalen oder globalen Abweichung. Die Winkelabweichung ist der größte Winkel im dreidimensionalen Raum zwischen den Hauptachsen. [3] Abbildung 8 zeigt schematisch die beschriebenen Abweichungen zwischen einem geplanten Implantat in Grau und einem tatsächlichen Implantat in Rot. [27]

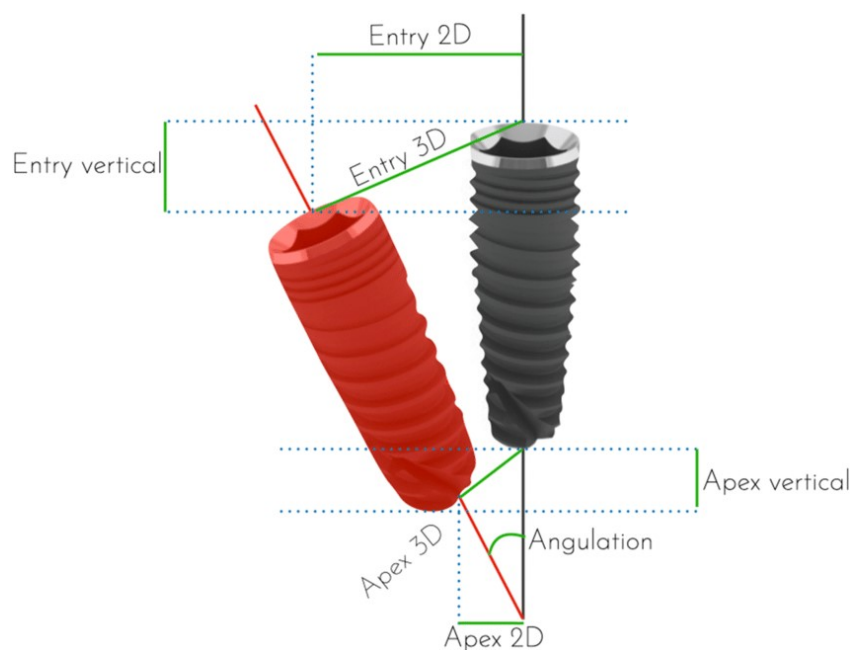


Abbildung 8: Positionsabweichungen zwischen einem geplanten (grau) und einem tatsächlichen (rot) Implantat [27]

### 1.3 Vor- und Nachteile statischer und dynamischer Verfahren

Zurzeit werden bei einer geführten Implantation hauptsächlich statische Verfahren mittels Bohrschablonen angewendet. Hier können die Löcher für die Implantate zwar präzise an den zuvor geplanten Stellen gebohrt werden, während des chirurgischen Eingriffs sind aber keine Änderungen der Implantatpositionierung möglich, da zuvor erst eine andere Bohrschablone angefertigt werden müsste. Im Gegensatz dazu ist bei der dynamisch geführten Implantation während des Eingriffs jederzeit eine Veränderung der Position des Implantats möglich, was ein großer Vorteil dieser Variante ist. Somit kann der\*die operierende Zahnarzt\*Zahnärztin intraoperativ auf gegebene anatomische Situationen oder unerwartete Komplikationen

flexibel reagieren. Ein weiterer Vorteil der dynamischen Navigation ist, dass während des chirurgischen Eingriffs das gesamte Operationsgebiet sichtbar und nicht durch beispielsweise eine Bohrschablone, wie bei der statischen Führung, verdeckt ist. [13,22] Außerdem kann sich bei der statischen Methode die Positionierung der Bohrschablone mit der anschließenden Implantatbettauflbereitung herausfordernd gestalten. Das liegt vor allem an Mundöffnungseinschränkungen der Patient\*innen, mangelnden Platzverhältnissen im distalen Kieferbereich oder an der Länge der Bohrer. Speziell im hinteren Bereich, wo eine eingeschränkte Sicht sowie Platzmangel herrschen, kann das Einfädeln der Implantatbohrer über die statische Bohrschablone schwierig sein. Sichteinschränkungen vor allem bei distal gesetzten Implantaten sind bei der dynamisch geführten Implantation kein Problem, da der\*die Operateur\*in jederzeit am Computerbildschirm das gesamte Operationsgebiet im Blick hat. [6] Ein weiteres Problem bei der statischen CAIS ist, dass die Bohrschablonen verrutschen können, was zu ungenauen Implantatpositionierungen führt. Aber auch bei der dynamischen CAIS können sich die Markerbefestigungen lockern, was ebenfalls eine Fehlerquelle darstellt. [28]

Durch die Berührung der festgelegten Referenzpunkte mit der Bohrerspitze und die gleichzeitige Beobachtung auf dem Bildschirm, wie exakt dies auf das virtuelle Bild übertragen wird, kann die Genauigkeit bei der dynamischen Navigation vor dem chirurgischen Eingriff und auch jederzeit während des Eingriffs verifiziert werden. Das macht diese Methode besser vorhersehbar sowie sicherer, und schwerwiegende Navigationsfehler können vermieden werden. Dies ist bei der statischen Navigation nicht möglich. Auch das Risiko von Knochenschäden durch Überhitzung ist bei der dynamischen Navigation geringer als bei der statischen Führung. Das liegt daran, dass bei der dynamischen Variante keine Bohrschablone vorhanden ist, die die Kühlung des Bohrers und des Operationsgebiets behindert. Ein weiterer Vorteil der dynamisch geführten Implantation ist, dass der gesamte Prozess innerhalb eines Tages möglich ist. So können DVT, Planung und Insertion der Implantate an ein und demselben Tag erfolgen, was sowohl für den\*die Patient\*in als auch für das operierende Team eine Zeitersparnis ist. Ebenso Vorteil der dynamischen CAIS ist, dass der\*die Operateur\*in seinen eigenen Kopf nicht so nah zum Mund des\*der Patient\*in bringt wie bei der statischen, wodurch das Infektionsrisiko durch Blut- oder Speichelspritzer minimiert wird. [29] Beide Methoden erfolgen lappenlos oder minimal-invasiv, wodurch Risiken für den\*die Patient\*in wie Infektionen oder Blutungen minimal sind. [2,5,22]

Die Operationszeit ist bei der dynamischen CAIS länger als bei der statischen. So dauerten Einzelzahnimplantationen mit der dynamischen Methode durchschnittlich 3-8 Minuten länger als mit der statischen. [11,18] Ein weiterer Nachteil der dynamisch geführten Implantation ist die Notwendigkeit einer Fixierungsmöglichkeit des Tracking-Markers am Kiefer des\*der Patient\*in. So ist im zahnlosen Kiefer das Einsetzen von temporären Mini-Implantaten oder freihändigen Implantaten erforderlich. Zusätzlich sind dynamische Navigationssysteme im Vergleich zu statischen Systemen teurer. Das betrifft nicht nur die Anschaffung, sondern auch das Training der\*die Operateure\*in. Es stellte sich heraus, dass bei der dynamisch geführten Implantation mit zunehmender Erfahrung des\*der Operateur\*in genauere Ergebnisse erzielt werden. Der\*die Operateur\*in muss nicht nur auf den Computerbildschirm schauen, sondern gleichzeitig auch seine Hand mit dem Winkelstück im Mund des\*der Patient\*in kontrollieren, was koordinativ anspruchsvoll ist und ein hohes Maß an Schulung und Erfahrung erfordert. [2,30] Bei der statischen CAIS spielt die Erfahrung der Operateur\*innen dagegen nicht so eine große Rolle, was in einer Studie von Cassetta et al. [31] aus dem Jahr 2017 untersucht wurde. In einer weiteren Studie aus dem Jahr 2022 wurden die Lernkurven von Anfängern für statische und dynamische CAIS miteinander verglichen. Bei der dynamischen Gruppe wurden mit zunehmender Erfahrung genauere Ergebnisse erreicht, nicht jedoch bei der statischen. Nach fünf Implantationsversuchen stagnierte die Lernkurve und es konnten keine Genauigkeitsunterschiede zwischen statischer und dynamischer CAIS gefunden werden. [32]

#### **1.4 Kombination von statischer und dynamischer CAIS**

Durch Kombination von statischer und dynamischer CAIS können die Herausforderungen vom dynamischen System bezüglich Befestigung von Tracking-Marker und Referenzpunkten bei zahnlosen Kiefern überwunden werden. Bei der sogenannten „Doppelfaktor-Technik“ werden die Tracking-Marker auf der chirurgischen Bohrschablone montiert und auch die Referenzpunkte befinden sich auf dieser. Dadurch ist kein invasiver Eingriff zur Befestigung von Tracking-Marker und Referenzpunkten mehr notwendig. Die Bohrschablone muss zwar während des chirurgischen Eingriffs im Knochen über Fixierungsstifte verankert werden. Jedoch werden bei der reinen dynamischen CAIS die als Referenzpunkte dienenden Mini-Implantate bereits vor der DVT in den Kiefer eingesetzt, wodurch ein zusätzlicher invasiver Eingriff notwendig ist. Bei der Kombination der beiden

Methoden kann die Fixierung der Bohrschablone in der gleichen Operation wie die Implantation erfolgen. Die Kombination beider Methoden bietet die Möglichkeit, alle Vorteile der statischen und der dynamischen CAIS auszunutzen. Die genauen Positionen von Bohrspitze und Implantat können kontinuierlich in Echtzeit am Computerbildschirm verfolgt und mit dem Planungsbild abgeglichen werden, während gleichzeitig die Bohrhülsen eine präzise Führung bei der Osteotomie und Implantatinsertion ermöglichen. Außerdem können intraoperativ Veränderungen abweichend vom präoperativen Plan durchgeführt werden. Dadurch sind auch im zahnlosen Kiefer minimal invasive Eingriffe und sehr genaue Implantatpositionierungen möglich. Obwohl sich die Stuhlzeit für den\*die Patient\*in verkürzt, ist die Kombination der beiden Methoden für das Operationsteam ein großer Aufwand, sowohl zeitlich als auch preislich. Denn es muss sowohl ein dynamisches Navigationssystem vorhanden sein als auch eine Bohrschablone hergestellt werden. [11]

#### 1.4.1.1 Workflow der Doppelfaktor-Technik

Die genaue Vorgangsweise bei der Doppelfaktor-Technik wird im Folgenden anhand eines von Pomares-Puig et al. [11] im Jahr 2022 beschriebenen Workflows genauer erklärt. Zuerst wird entweder digital oder analog ein Wax-up der Vollprothese gemacht und intraoral bezüglich Funktionalität und Ästhetik bewertet. Mit Hilfe der Wax-up Prothese wird eine Röntgenschablone mit röntgenopaken Referenzpunkten hergestellt. Zusätzlich wird ein abnehmbarer Clip mit Metallkugeln auf der Röntgenschablone fixiert, die der späteren Registrierung im dynamischen System dienen (Abbildung 9). [11]



*Abbildung 9: Röntgenschablone mit röntgenopaken Referenzpunkten und abnehmbarem Clip mit Metallkugeln [11]*

Dann erfolgt eine DVT im Doppelscanverfahren. Die DICOM-Daten werden in die Planungssoftware importiert und die ideale Positionierung der Implantate virtuell mittels „backward planning“ geplant. Die röntgenopaken Referenzpunkte ermöglichen ein Matchen

der DVT-Bilder im Softwareprogramm. Nun wird die chirurgische Bohrschablone mit Hilfe der Software entsprechend der virtuellen Implantatpositionen entworfen und mittels 3D-Druck gedruckt. Dabei muss der Clip mit den Metallkugeln an exakt derselben Position wie bei der Röntgenschablone konstruiert sein, um eine korrekte Registrierung im dynamischen Navigationssystem zu ermöglichen. Da die Metallkugeln möglicherweise die Platzierung der Bohrhülsen behindern könnten, befinden sie sich auf einem Clip und nicht direkt auf der Bohrschablone. Die Bohrschablone wird für die Dauer der Operation im jeweiligen Kiefer platziert und mit zwei bis drei Fixierstiften im Knochen stabilisiert. [11]

Bei dieser Methode ist es besonders wichtig, bei jedem Schritt die Röntgen- und Bohrschablonen immer an der genau gleichen Stelle zu positionieren, da eine falsche Platzierung die Hauptfehlerquelle für Ungenauigkeiten darstellt. Die Tracking-Marker werden starr an der Bohrschablone und am Winkelstück montiert. Nach der Registrierung der Referenzpunkte (Metallkugeln) und der Verifizierung der Genauigkeit kann ein abnehmbarer Clip (Abbildung 10) entfernt werden, wenn er eine Behinderung während des Eingriffs darstellt. Es gibt aber auch einteilige Bohrschablonen, bei denen der Clip in die Bohrschablone integriert und nicht abnehmbar ist, falls er die Bohrhülsen nicht behindert (Abbildung 11). [11]

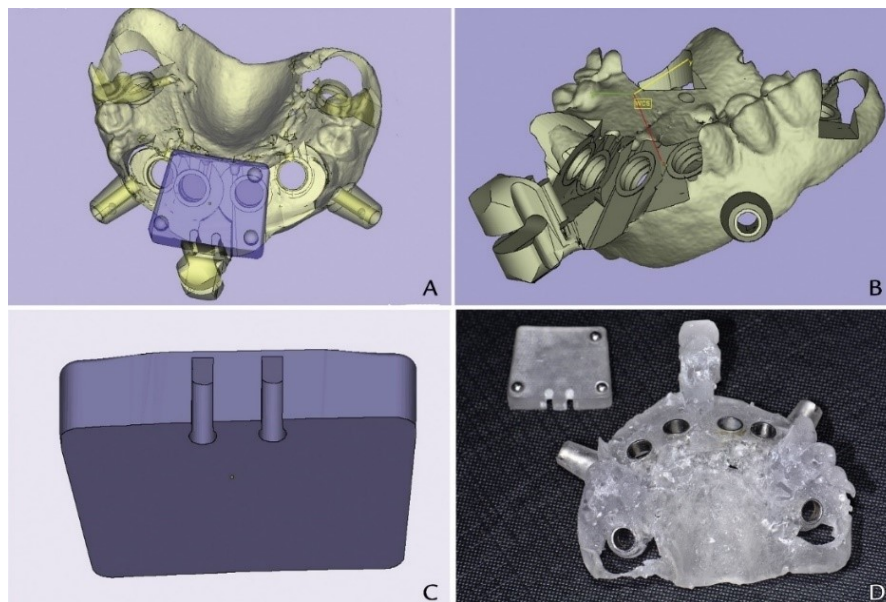


Abbildung 10: A: Virtuell geplante Bohrschablone mit abnehmbarem Clip, B: Virtuell geplante Bohrschablone ohne Clip, C: Virtuell geplanter Clip, D: 3D gedruckte Bohrschablone und 3D gedruckter Clip [11]

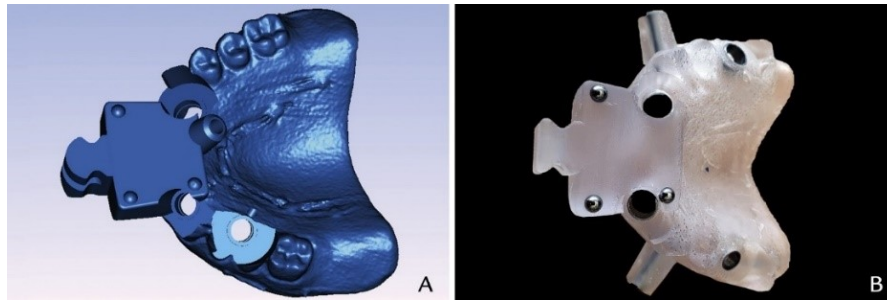


Abbildung 11: Bohrschablone mit integriertem, nicht abnehmbarem Clip. A: virtuell geplant, B: 3D gedruckt [11]

Die Osteotomie und Implantatinsertion erfolgen nun vollständig geführt, sowohl durch die Führungselemente der Bohrschablone als auch durch das dynamische Navigationssystem. Die Implantate können nach der Implantation bei ausreichender Primärstabilität sofort mit einem Provisorium belastet werden. [11]

## 1.5 Zielsetzung

Implantate werden nach wie vor bevorzugt als Zahnersatz bei zahnlosen und teilbezahnten Patient\*innen gewählt. Eine genaue Planung und Ausführung sind für das funktionelle und ästhetische Outcome äußerst wichtig, da ansonsten Komplikationen wie übermäßige Scherkräfte, prothetische Fehlausrichtungen, Knochenresorptionen und Periimplantitis auftreten können. Jegliche Abweichungen bei der Implantation können zu Schäden an Nerven, Gefäßen, Zahnwurzeln, Sinusperforationen und anderen Nachbarstrukturen führen. Somit ist nach der Planung ein präzises Ausführen von höchster Wichtigkeit, um Verletzungen und postoperative Beschwerden zu minimieren. [33]

Ziel dieser Arbeit ist eine Aufarbeitung der rezenten Literatur zum Thema implantatgetragene Sofortversorgung im zahnlosen Kiefer in Form einer narrativen Literaturanalyse. Dabei soll der derzeitige Stand der Literatur im Hinblick auf statische und dynamische Navigationsverfahren im zahnlosen Kiefer sowie deren Potenzial für eine Sofortversorgung dargestellt werden. Zu diesem Zweck werden zuerst die statische und die dynamische CAIS direkt miteinander verglichen, um Aussagen hinsichtlich der Genauigkeit beider Methoden treffen zu können. Anschließend wird der aktuelle Stand der Forschung bezüglich statischer und dynamischer CAIS im zahnlosen Kiefer erläutert, wobei vor allem ein Augenmerk auf die Genauigkeit der in den Studien erzielten Ergebnisse gelegt wird.

## 2 Materialien und Methoden

Bei der vorliegenden Arbeit handelt es sich um eine reine Literaturrecherche. Zuerst wurde folgender Suchterminus, der mit Unterstützung von Frau Mag.iur. Eva Willfort erstellt wurde, in die Datenbank PubMed eingegeben:

```
((("Edentulous jaw") OR ("Jaw, Edentulous"[Mesh])) AND ((„Immediate loading*“) OR („Immediate Dental Implant Loading“)) AND ((„guided implant surgery“) OR (surgery)) AND ((„full digital workflow“) OR (digitalization) OR (digitalisation)))
```

Als Schlagwörter wurden "guided implant surgery", "implant supported rehabilitation of edentulous jaw", "full digital workflow", "immediate loading of implants", "navigation assisted implant placement", "full arch reconstruction", "static computer-aided implant surgery", "static computer-assisted implant surgery", "dynamic computer-aided implant surgery", "dynamic computer-assisted implant surgery" und "computer-aided dental implant surgery" definiert. Die Schlagwörter wurden sowohl einzeln als auch in diversen Kombinationen in die Datenbanksuche auf PubMed miteinbezogen. Des Weiteren wurden zitierte Publikationen aus den verwendeten Quellen in diese Arbeit integriert, wenn sie den thematischen Aspekten entsprochen haben. Bereits gefundene Suchergebnisse wurden nicht erneut berücksichtigt.

Die erhaltenen Ergebnisse wurden auf den Zeitraum 2014 bis 2024 beschränkt. Außerdem wurden nur Publikationen miteinbezogen, bei denen ein Volltext zur Verfügung stand. Verwendet wurden ausschließlich Originaltexte in englischer Sprache. Die Volltexte wurden gelesen und auf inhaltliche Relevanz geprüft. Die erste Literaturrecherche wurde am 11.12.2023 durchgeführt. Am 30.05.2024 erfolgte eine weitere Suche, um auch die aktuellsten Publikationen in diese Arbeit miteinzubeziehen.

### 3 Ergebnisse

Mit Hilfe des beschriebenen Suchterminus wurden in der Datenbank PubMed 90 Veröffentlichungen gefunden (Abbildung 12). Nach Beschränkung der Suche auf die letzten 10 Jahre (2014-2024) blieben 42 Publikationen übrig. Davon waren bei zwei Publikationen frei zugängliche Volltexte verfügbar. Anhand der beschriebenen Schlagwörter, die einzeln und in diversen Kombinationen gesucht wurden sowie anhand von in verwendeten Quellen zitierten Publikationen, wurden weitere 111 Veröffentlichungen gefunden. Hierbei wurden bereits gefundene Suchergebnisse nicht erneut berücksichtigt. Bei Beschränkung dieser Texte auf den Zeitraum 2014 bis 2024 blieben 62 Publikationen übrig. Davon waren 46 Volltexte frei zugänglich. Nach dem Durchlesen der Abstracts und Prüfung auf inhaltliche Relevanz blieben insgesamt 42 Publikationen übrig, die in diese Arbeit miteinbezogen wurden.

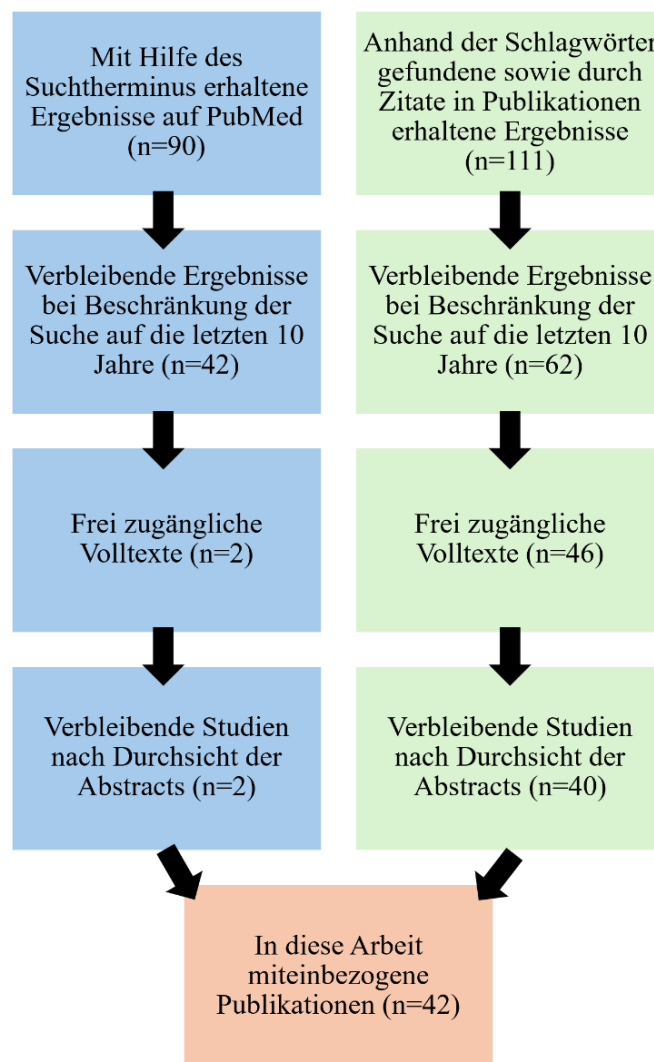


Abbildung 12: Flussdiagramm zur Literaturrecherche

Tabelle 1 listet die 42 verwendeten Publikationen auf und kategorisiert sie nach Erscheinungsjahr, Studiendesign sowie Thematik. Ein sogenannter „Methodenvergleich“ bezieht sich auf Studien, die die statische und die dynamische CAIS direkt miteinander vergleichen. Dieser Methodenvergleich wurde in gesamt 14 Studien durchgeführt. 21 Studien beschäftigten sich mit der statischen und 10 mit der dynamischen CAIS im zahnlosen Kiefer sowie eine mit der Doppelfaktor-Technik. 31 Studien führten Implantationen unter In-vivo- und 10 unter In-vitro-Bedingungen durch. Eine Studie war eine reine Beschreibung der durchgeführten Technik. Zur besseren Übersicht werden die Studien anschließend in Diagrammen grafisch dargestellt (Abbildung 13 bis Abbildung 15/Abbildung 15).

Studie	Studiendesign	Thematik
Kang et al. (2014) [34]	In-vitro	Statisch, dynamisch, Methodenvergleich, zahnlos
Somogyi-Ganss et al. (2014) [35]	In-vitro	Methodenvergleich, teilbezahnt
Beretta et al. (2014) [17]	In-vivo	Statisch, zahnlos
Stübinger et al. (2014) [36]	In-vivo	Statisch, zahnlos
Verhamme et al. (2014) [37]	In-vivo	Statisch, zahnlos
Vercruyssen et al. (2014) [38]	In-vivo	Statisch, zahnlos
Cassetta et al. (2014) [39]	In-vivo	Statisch, zahnlos
Van de Wiele et al. (2014) [40]	In-vivo	Statisch, zahnlos
Geng et al. (2015) [41]	In-vivo	Statisch, zahnlos
Tallarico et al. (2015) [42]	In-vivo	Statisch, zahnlos
Emery et al. (2016) [3]	In-vitro	Dynamisch, zahnlos
Verhamme et al. (2016) [43]	In-vivo	Statisch, zahnlos
Cassetta et al. (2017) [31]	In-vivo	Statisch, zahnlos
Oh et al. (2017) [20]	In-vivo	Statisch, zahnlos
Marra et al. (2017) [44]	In-vivo	Statisch, zahnlos
Tonellini et al. (2018) [45]	In-vivo	Statisch, zahnlos
Venezze et al. (2018) [46]	In-vivo	Statisch, zahnlos
Stefanelli et al. (2018) [2]	In-vivo	Dynamisch, zahnlos
Pellegrino et al. (2019) [47]	In-vivo	Dynamisch, zahnlos
Guzmán et al. (2019) [48]	In-vitro	Methodenvergleich, teilbezahnt
Kaewsiri et al. (2019) [18]	In-vivo	Methodenvergleich, teilbezahnt
Yimarj et al. (2020) [49]	In-vivo	Methodenvergleich, teilbezahnt
Wu et al. (2020) [50]	In-vivo	Methodenvergleich, teilbezahnt
Franchina et al. (2020) [51]	In-vitro	Methodenvergleich, teilbezahnt
Sun et al. (2020) [15]	In-vitro	Methodenvergleich, teilbezahnt
Pellegrino et al. (2020) [52]	In-vitro	Dynamisch, zahnlos
Baruffaldi et al. (2020) [53]	In-vivo	Statisch, zahnlos
Stefanelli et al. (2020) - 1 [54]	In-vivo	Dynamisch, zahnlos
Stefanelli et al. (2020) - 2 [55]	In-vivo	Dynamisch, zahnlos

Studie	Studiendesign	Thematik
Zhou et al. (2021) [56]	In-vivo	Methodenvergleich, teilbezahnt
Pozzi et al. (2021) [4]	In-vivo	Dynamisch, zahnlos
Wang et al. (2021) [22]	In-vivo	Dynamisch, zahnlos
Liu et al. (2021) [57]	In-vivo	Statisch, zahnlos
Kivovics et al. (2022) [58]	In-vitro	Methodenvergleich, zahnlos
Yuzhang et al. (2022) [59]	In-vivo	Methodenvergleich, teilbezahnt
La Monaca et al. (2022) [5]	In-vivo	Statisch, zahnlos
Taheri Otaghsara et al. (2023) [12]	In-vitro	Methodenvergleich, teilbezahnt
González Rueda et al. (2023) [23]	In-vitro	Methodenvergleich, teilbezahnt
Jaemsuwan et al. (2023) [7]	In-vivo	Statisch, dynamisch, Methodenvergleich, zahnlos
Manfredini et al. (2023) [60]	Technical note	Statisch, zahnlos
Pomares-Puig et al. (2023) [29]	In-vivo	Doppelfaktor-Technik, zahnlos
Martins et al. (2024) [61]	In-vivo	Statisch, zahnlos

Tabelle 1: Auflistung der in diese Arbeit einbezogenen Publikationen



Abbildung 13: Erscheinungsjahre der einbezogenen Publikationen

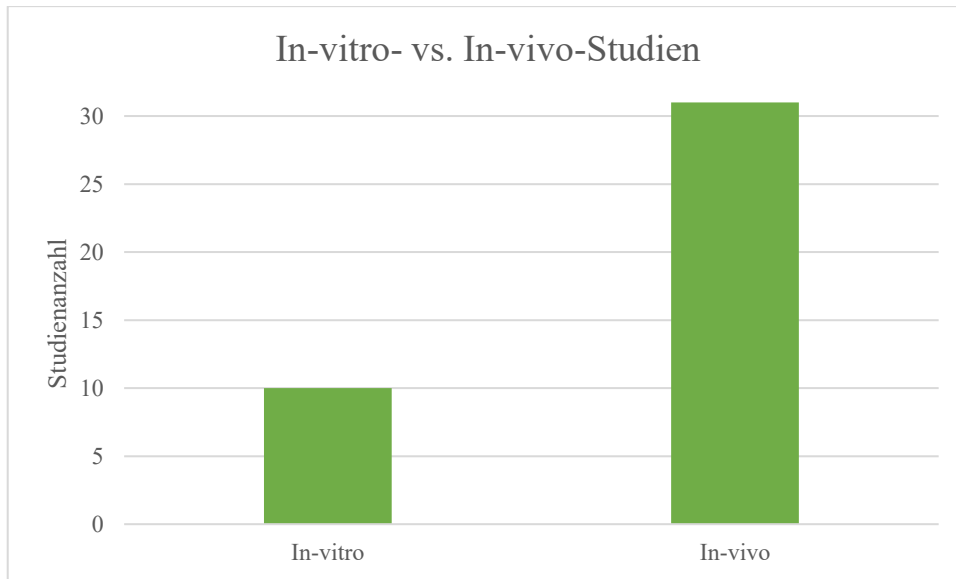


Abbildung 14: Anzahl der In-vitro- und In-vivo-Studien der einbezogenen Publikationen

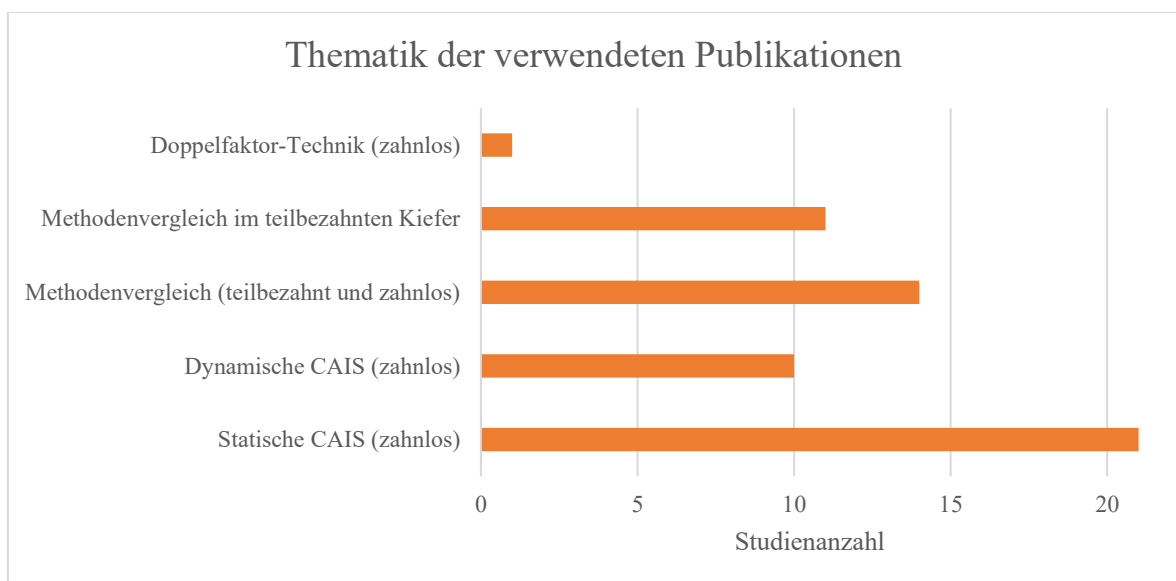


Abbildung 15: Thematik der einbezogenen Publikationen

Im nun folgenden Teil werden die angeführten Studien genauer beschrieben und der aktuelle Stand der Literatur dargestellt. Zuerst werden die Studien, die die statische und dynamische CAIS miteinander vergleichen, erläutert. Im Anschluss daran erfolgt eine genaue Darstellung der Studien, die die computergestützte Implantatchirurgie im zahnlosen Kiefer durchgeführt haben.

### 3.1 Ergebnisse hinsichtlich statischer und dynamischer CAIS im Vergleich

Der direkte Vergleich der Genauigkeiten von statischer und dynamischer CAIS wurde nur in wenigen Studien untersucht, die wiederum zu gegensätzlichen Ergebnissen kamen. [12] Diese Studien haben den Methodenvergleich vor allem in teilbezahnten Kiefern durchgeführt. Es konnten nur drei Studien gefunden werden, in denen sowohl die statische als auch die dynamische CAIS in zahnlosen Kiefern erfolgten, wobei es sich hier um eine in-vivo (Jaemsuwan et al. [7]) und zwei in-vitro Studien (Kang et al. [34] und Kivovics et al. [58]) handelte. Kivovics et al. [58] haben jedoch keine vollständig geführte statische CAIS durchgeführt, sondern die Bohrschablone nur für die Pilotbohrung verwendet. Da es sich jedoch um eine der wenigen Studien handelt, in denen ein Methodenvergleich in zahnlosen Kiefermodellen erfolgte, wurde sie trotzdem miteinbezogen.

Um einen präziseren Vergleich zwischen den beiden Methoden zu ermöglichen und eine umfassendere Vergleichsbasis sowie einen Vergleich zwischen zahnlosen und teilbezahnten Kiefern zu schaffen, wurden hier nicht nur Studien miteinbezogen, die Implantationen in zahnlosen Kiefern durchgeführt haben, sondern auch solche, die teilbezahnte Kiefer untersucht haben. Insgesamt wurden 14 Studien mit Volltext gefunden, die die statische und die dynamische CAIS direkt miteinander vergleichen, wobei sich diese Arbeit auf Studien ab dem Jahr 2014 bis heute beschränkt. Wie schon erwähnt wurden in drei davon zahnlose und in 11 teilbezahnte Kiefer untersucht. Acht Studien wurden in-vitro an Kiefermodellen, und sechs in-vivo an den Kiefern von Patient\*innen durchgeführt. Mit Ausnahme der Pilotbohrschablone bei Kivovics et al. [58] waren alle Studien vollständig computergeführt und in allen Studien wurden die Bohrschablonen mittels CAD/CAM hergestellt. Abbildung 16 und Abbildung 17 zeigen die für den direkten Vergleich von statischer und dynamischer CAIS einbezogenen Studien kategorisiert nach zahnlosen vs. teilbezahnten Kiefern sowie In-vitro- vs. In-vivo-Studien.

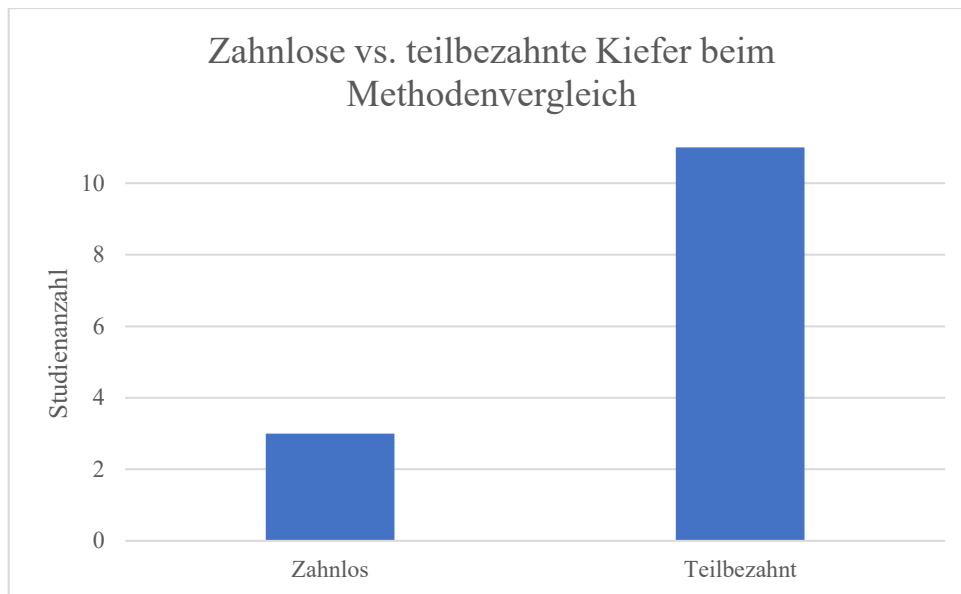


Abbildung 16: Kategorisierung der Studien beim direkten Vergleich von statischer und dynamischer CAIS nach zahnlosen und teilbezahnten Kiefern

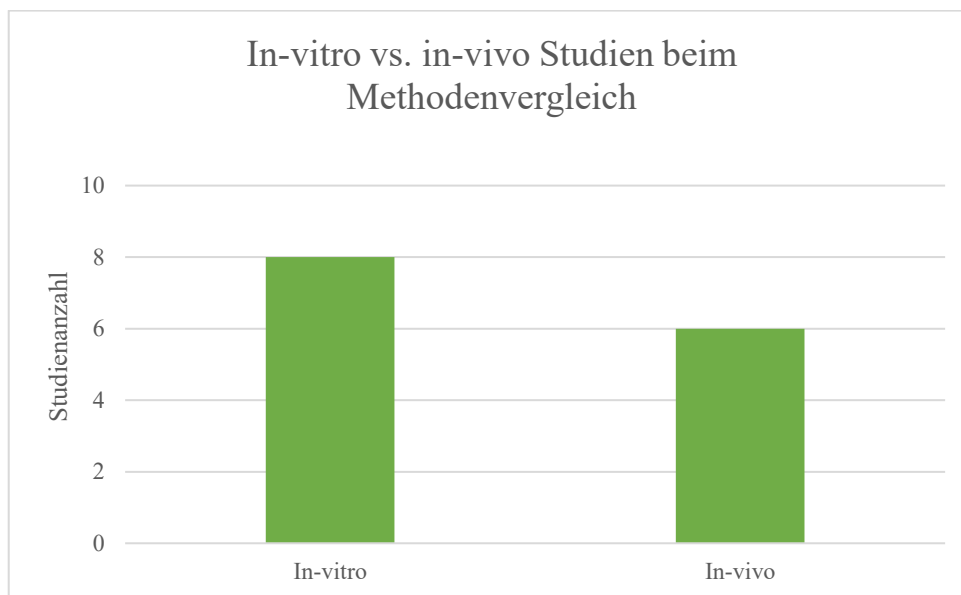


Abbildung 17: In-vitro- vs. In-vivo-Studien beim direkten Vergleich von statischer und dynamischer CAIS

Die 14 gefundenen Studien werden im Folgenden genauer beschrieben und letztendlich in Tabellen vergleichend dargestellt. Die Literaturrecherche wurde nach bestem Wissen und Gewissen durchgeführt, jedoch kann keine Vollständigkeit gewährleistet werden.

### 3.1.1 Ausgewählte Studien für den Methodenvergleich

Kang et al. [34] führten einen Genauigkeitsvergleich von statischer und dynamischer CAIS an zahnlosen Unterkiefermodellen durch. Jeweils vier Implantate wurden von einem\*einer

Operateur\*in im Eckzahn- und Molarenbereich eines Unterkiefermodells eingesetzt. Insgesamt wurden 80 Implantate in 20 Unterkiefermodelle implantiert, die Hälfte davon mit statischer und die andere mit dynamischer CAIS. Die statische Methode unter der Verwendung einer knochengestützten Bohrschablone ist in Abbildung 18 dargestellt. Im Eckzahnbereich wurde bei der statischen CAIS über eine Winkelabweichung von  $6,72 \pm 3,41^\circ$  berichtet, im Gegensatz zu  $12,37 \pm 4,18^\circ$  bei der dynamischen. Im Bereich der Molaren waren es für die statische CAIS  $3,90 \pm 2,44^\circ$ , im Vergleich zu  $8,97 \pm 3,83^\circ$  bei der dynamischen. Zusätzlich wurden die vertikalen und horizontalen Abweichungen an Eintrittspunkt und Apex ermittelt. In Tabelle 3 sind die jeweiligen horizontalen Abweichungen für Eckzahn- und Molarenbereich aufgelistet. Zusammenfassend ergab die Studie von Kang et al., dass die dynamische CAIS im Vergleich zur statischen Methode weniger präzise ist. [34]



*Abbildung 18: Implantatbohrung unter der Verwendung einer statischen Bohrschablone in einem zahnlosen Unterkiefermodell [34]*

Somogyi-Ganss et al. [35] haben 2014 die Genauigkeit der dynamischen CAIS mit drei statischen CAIS-Systemen verglichen. Zusätzlich wurde ein Vergleich mit einer im Labor hergestellten Acryl-Bohrschablone durchgeführt. Von fünf Operateur\*innen wurden insgesamt 400 Implantationen pro System vollzogen. Die Genauigkeitsanalyse ergab, dass das dynamische CAIS-System vergleichbar genau wie die drei statischen CAIS-Systeme war. Im Vergleich zur im Labor hergestellten Bohrschablone sind die mittels CAD/CAM hergestellten Schablonen deutlich genauer. Die genauen Abweichungswerte für die computergestützten Systeme sind in Tabelle 3 dargestellt. [35]

In einer Studie von Guzmán et al. [48] aus dem Jahr 2019 wurden die Genauigkeiten der statischen und der dynamischen Navigation direkt miteinander verglichen. Insgesamt

wurden 40 Implantate in 20 standardisierte teilbezahnte Oberkiefermodelle implantiert. Bei der statisch geführten Implantation wurde von einer koronalen Eintrittsabweichung von  $0,85 \pm 0,48$  mm, einer Apexabweichung von  $1,18 \pm 0,60$  mm und einer Winkelabweichung von  $4,00 \pm 1,41^\circ$  berichtet. Bei der dynamisch geführten Implantation wurde eine koronale Eintrittsabweichung von  $0,78 \pm 0,43$  mm, eine Apexabweichung von  $1,20 \pm 0,48$  mm und eine Winkelabweichung von  $2,95 \pm 1,48^\circ$  erreicht. Bei der Winkelabweichung war die dynamisch geführte Implantation signifikant genauer als bei der statischen. [48]

Auch Kaewsiri et al. [18] haben 2019 ebenfalls die Genauigkeit der statischen und dynamischen Navigation direkt miteinander verglichen. In dieser Studie wurden von einem\*einer erfahrenen Chirurg\*in jeweils 30 Einzelimplantate entweder unter Verwendung einer Bohrschablone oder mit Hilfe eines dynamischen Navigationssystems in teilbezahnte Kiefer von insgesamt 60 Patient\*innen eingesetzt. Die Abweichungsanalyse zwischen geplanter und tatsächlicher Implantatposition ergab bei der statischen Gruppe eine Winkelabweichung von  $2,84 \pm 1,71^\circ$ , eine globale Eintrittspunktabweichung von  $0,97 \pm 0,44$  mm und eine globale Apexabweichung von  $1,28 \pm 0,46$  mm. Bei der dynamischen Gruppe betrug die Winkelabweichung  $3,06 \pm 1,37^\circ$ , die globale Eintrittspunktabweichung  $1,05 \pm 0,44$  mm und die globale Apexabweichung  $1,29 \pm 0,50$  mm. Neben der globalen Eintrittspunkt- und Apexabweichung sowie der Winkelabweichung wurden auch Abweichungen in jeder Dimension (mesial-distal, bukkal-lingual, apikal-koronal) berechnet. Hier wurde in die mesiale Richtung eine signifikant höhere Abweichung bei der dynamischen Gruppe gefunden als bei der statischen. Insgesamt kam die Studie trotzdem zu dem Ergebnis, dass die statische und die dynamische CAIS gleich genau sind. Zusätzlich wurden bei allen Patient\*innen lediglich geringfügige Schmerzen und Schwellungen beobachtet, ohne dass intra- oder postoperative Komplikationen auftraten. [18]

In einer Studie von Yimarj et al. [49] aus dem Jahr 2020 wurde nicht nur die Positionierungsgenauigkeit zwischen statischer und dynamischer CAIS untersucht, sondern auch die Parallelität zweier Implantate. Insgesamt wurden 60 Implantate in teilbezahnte Kiefer von 30 Patient\*innen von einem\*einer erfahrenen Operateur\*in implantiert. Jeweils für die statische bzw. dynamische CAIS betrug die globalen Eintrittspunktabweichungen  $1,04 \pm 0,67$  bzw.  $1,24 \pm 0,39$  mm, die globalen Apexabweichungen  $1,54 \pm 0,79$  bzw.  $1,58 \pm 0,56$  mm und die Winkelabweichungen  $4,08 \pm 1,69^\circ$  bzw.  $3,78 \pm 1,84^\circ$ . Bei allen Parametern und auch bei der Parallelität zweier nebeneinander platzierten Implantate gab es keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen beiden Gruppen. [49]

Wu et al. [50] führten 2020 einen Vergleich der statischen und dynamischen CAIS in einer retrospektiven Studie durch. Von zwei erfahrenen Operateur\*innen und einem\*einer wenig erfahrenen Operateur\*in, die aber alle gründlich geschult wurden, wurden insgesamt 57 Implantate in 29 Kiefer mittels statischer und 38 Implantate in 25 Kiefer mittels dynamischer CAIS implantiert. Die koronale Eintrittspunktabweichung betrug  $1,36 \pm 0,65$  mm, die Apexabweichung  $1,48 \pm 0,65$  mm und die Winkelabweichung  $3,71 \pm 1,32^\circ$  in der statischen Gruppe, im Gegensatz zu  $1,22 \pm 0,70$  mm,  $1,33 \pm 0,73$  mm und  $4,34 \pm 2,22^\circ$  in der dynamischen Gruppe. Zwischen beiden Gruppen wurden keine statistisch signifikanten Unterschiede festgestellt. Auch zwischen den drei unterschiedlich erfahrenen Chirurg\*innen konnten keine statistisch signifikanten Unterschiede beobachtet werden. Das deutet darauf hin, dass bei ausreichender Schulung der Operateur\*innen die Erfahrung die Genauigkeit nicht beeinflusst. Hinsichtlich der Implantationsstelle kam man zu dem Ergebnis, dass die dynamische CAIS im Bereich der Molaren bei der Winkelabweichung genauer war als die statische. In den Frontzähnen wurde jedoch bei der statischen CAIS eine höhere Genauigkeit hinsichtlich der apikalen Eintrittspunktabweichung festgestellt. [50]

Franchina et al. [51] haben 2020 eine in-vitro Studie zum Genauigkeitsvergleich der Methoden durchgeführt. Pro teilbezahnten Gipsmodell wurden zwei Implantate freihändig (es erfolgte eine Körnung mit einer Schablone), zwei Implantate mittels statischer CAIS und zwei Implantate mittels dynamischer CAIS implantiert. Insgesamt wurden 15 Gipsmodelle verwendet. Die Winkelabweichungen waren am geringsten bei der dynamischen CAIS ( $2,76 \pm 0,61^\circ$ ), danach kam die statische CAIS ( $3,23 \pm 1,00^\circ$ ) und am ungenauesten war die Freihandimplantation ( $7,41 \pm 3,87^\circ$ ). Die koronale Eintrittspunktabweichung betrug  $0,79 \pm 0,35$  mm bei der statischen CAIS,  $0,89 \pm 0,37$  mm bei der dynamischen und  $1,65 \pm 0,61$  mm bei der Freihandmethode. Die Apexabweichung war bei  $1,17 \pm 0,48$  mm (statisch),  $1,31 \pm 0,68$  mm (dynamisch) und  $2,33 \pm 1,01$  mm (freihändig). Zwischen statischer und dynamischer CAIS waren die Ergebnisse nicht signifikant unterschiedlich. Im Vergleich zur freihändigen Methode waren aber beide computergestützten Methoden signifikant genauer. Normalerweise wird die Genauigkeit der Implantatpositionierungen durch die Überlagerung von prä- und postoperativen DVT-Bildern bestimmt. In dieser Studie wurde zusätzlich eine Genauigkeitsanalyse anhand der Überlagerungen von prä- und postoperativen Intraoralscans durchgeführt. Es wurden keine Unterschiede zwischen der DVT- und der IOS-Beurteilung gefunden. Das zeigt, dass für den\*die Patient\*in eine weitere DVT-Aufnahme nach der

Operation nicht unbedingt erforderlich ist, und auch ein Intraoralscan durchgeführt werden könnte. [51]

Sun et al. [15] haben 2020 die statische und die dynamische CAIS miteinander sowie mit der Freihandmethode verglichen. Zusätzlich wurde in dieser Studie die statische CAIS mittels Bohrschablonen mit der dynamischen CAIS kombiniert. In jeder der vier Gruppen wurden 32 Implantate in die teilbezahnten Kiefer von Patient\*innen von einem\*r Operateur\*in eingesetzt. Der Vergleich der vier Methoden ergab, dass die Kombination von dynamischen Navigationssystem und statischen Bohrschablonen am genauesten war, jedoch auch am längsten dauerte. Mit der Freihandmethode wurde die geringste Genauigkeit erreicht. Die dynamische CAIS war signifikant genauer als die statische. Die Winkelabweichungen betragen  $2,20 \pm 0,38^\circ$  (Kombination dynamisch + statisch),  $3,24 \pm 0,36^\circ$  (dynamisch),  $4,54 \pm 0,29^\circ$  (statisch) und  $6,12 \pm 0,12^\circ$  (freihändig). [15]

Zhou et al. [56] haben 2021 80 Implantate in 20 teilbezahnte Unterkiefermodelle entweder mittels statischer oder mittels dynamischer CAIS eingesetzt und die beiden Methoden miteinander verglichen. Bei der statischen CAIS betrug die Eintrittspunktabweichung  $1,15 \pm 0,34$  mm, die Apexabweichung  $1,37 \pm 0,38$  mm und die Winkelabweichung  $2,60 \pm 1,11^\circ$ . Mit der dynamischen Methode konnten bei allen Messwerten deutlich geringe Abweichungen erreicht werden. So wurde über eine Eintrittspunktabweichung von  $0,40 \pm 0,41$  mm, eine Apexabweichung von  $0,34 \pm 0,33$  mm und eine Winkelabweichung von  $0,97 \pm 1,21^\circ$  berichtet. [56]

In einer Studie aus dem Jahr 2022 von Kivovics et al. [58] wurden die statische und die dynamische CAIS miteinander sowie mit der konventionellen Freihandmethode verglichen. Pro Gruppe wurden 16 Implantate in vier zahnlose Unterkiefermodelle eingesetzt. Bei der dynamischen CAIS handelte es sich um ein „Augmented Reality“-basiertes Verfahren, bei dem die Echtzeitverfolgung der Bohrspitzenposition nicht am Computerbildschirm sondern mit einer „Virtual-Reality“-Brille erfolgte. Bei der statischen CAIS wurden die Bohrschablonen mit drei Fixierstiften auf den Modellen stabilisiert. Es wurde jedoch nur die Pilotbohrung mit Hilfe der Bohrschablone durchgeführt. Nach der Pilotbohrung wurde die Bohrschablone entfernt und die Osteotomien freihändig durchgeführt. Die globalen Eintrittspunktabweichungen betragen  $1,93 \pm 0,79$  mm (Freihand),  $1,31 \pm 0,42$  mm (statisch) sowie  $1,27 \pm 0,40$  mm (dynamisch) und die globalen Apexabweichungen  $2,28 \pm 0,74$  mm (Freihand),  $1,38 \pm 0,41$  mm (statisch) sowie  $1,34 \pm 0,41$  mm (dynamisch). Als

Winkelabweichungen wurden für Freihandmethode  $5,85 \pm 2,60^\circ$  angegeben, für die statische CAIS  $3,21 \pm 1,52^\circ$  und für die dynamische  $4,09 \pm 2,79^\circ$ . Alle Parameter zwischen statischer und dynamischer CAIS unterschieden sich nicht signifikant, was darauf hindeutet, dass beide Methoden gleich genau sind. Im Vergleich zur konventionellen Freihandmethode waren die computergestützten Methoden jedoch deutlich genauer, mit Ausnahme der Winkelabweichung bei der dynamischen CAIS. [58]

In einer Studie von Yuzhang et al. [59] wurden 2022 von einem\*einer erfahrenen Operateur\*in 20 Implantate mittels statischer und 20 Implantate mittels dynamischer CAIS in insgesamt 40 teilbezahnte Oberkiefer von Patient\*innen im ästhetischen Bereich eingesetzt. Die globalen Eintrittspunktabweichungen betragen  $0,99 \pm 0,63$  mm für die statische und  $1,06 \pm 0,55$  mm für die dynamische CAIS. Die globale Apexabweichung lag bei der statischen Methode bei  $1,50 \pm 0,75$  mm sowie bei der dynamischen bei  $1,18 \pm 0,53$  mm und die Winkelabweichung bei  $3,07 \pm 2,18^\circ$  bzw.  $3,23 \pm 1,67^\circ$ . Es konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Gruppen hinsichtlich dieser Parameter beobachtet werden. Bei der dynamischen Gruppe war allerdings die Abweichung in labial-palatinaler Richtung deutlich labialer als bei der statischen. [59]

Taheri Otaghsara et al. [12] verglichen 2023 die Genauigkeit von statischer und dynamischer CAIS. Dabei wurden je zwei Implantate im Seitenzahnbereich eines Oberkiefermodells implantiert, wobei für jeden Ansatz 10 gleiche Modelle verwendet wurden. Bei den Positionen handelte es sich um den Bereich des zweiten Prämolaren (Regio 15) und des ersten Molaren (Regio 16). Bei der statischen CAIS unter der Verwendung von zahngestützten Bohrschablonen betrug die globale Eintrittspunktabweichung  $0,77 \pm 0,32$  mm, die globale Apexabweichung  $1,26 \pm 0,39$  mm und die Winkelabweichung  $4,31 \pm 1,22^\circ$ . In der dynamischen CAIS wurde eine globale Eintrittspunktabweichung von  $0,88 \pm 0,32$  mm, eine globale Apexabweichung von  $1,28 \pm 0,55$  mm sowie eine Winkelabweichung von  $3,35^\circ \pm 1,89^\circ$  erreicht. Dabei ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen statischer und dynamischer CAIS. Wie in der Studie von Kaewsiri et al. [18] wurden zusätzlich die Abweichungen in jeder Richtung in allen Ebenen (mesiodistal, bukkolingual apikal-koronar) berechnet. Die bukkolinguale Abweichung war bei der statischen CAIS höher und die mesiodistale Abweichung bei der dynamischen. Die Implantate, die mittels dynamischer CAIS inseriert wurden, lagen mehr in mesialer Richtung als bei der statischen Variante, was mit den Ergebnissen von Kaewsiri et al. [18] übereinstimmte. Schlussfolgernd wurde die Hypothese, die besagt, dass es keinen Genauigkeitsunterschied zwischen den

beiden Methoden gibt, widerlegt. Taheri Otaghsara et al. berichteten außerdem, dass bei beiden Varianten der CAIS die Implantatposition die Genauigkeit erheblich beeinflusst. [12]

González Rueda et al. [23] verglichen 2023 die Genauigkeit der statischen und dynamischen CAIS mit der Freihandimplantation. In gesamt 15 Oberkiefermodellen wurden je vier Jochbein-Implantate im Front- und Seitenzahnbereich gesetzt, was pro Gruppe 20 Implantate ergab. Zuerst wurden die Implantate mittels statischer CAIS, dann mittels dynamischer CAIS und zum Schluss freihändig implantiert. Die Genauigkeitsanalyse ergab keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen der statischen und der dynamischen CAIS. Die koronalen Eintrittspunktabweichungen betragen  $5,54 \pm 1,72$  mm (statisch),  $5,43 \pm 2,13$  mm (dynamisch) und  $4,75 \pm 1,58$  mm (Freihand), die Apexabweichungen  $5,33 \pm 2,14$  mm (statisch),  $4,92 \pm 1,89$  mm (dynamisch) und  $3,20 \pm 1,45$  mm (Freihand) sowie die Winkelabweichungen  $5,30 \pm 2,80^\circ$  (statisch),  $7,36 \pm 4,12^\circ$  (dynamisch) und  $8,47 \pm 4,40^\circ$  (Freihand). Bei der konventionellen Freihandimplantation wurden sowohl am koronalen Eintrittspunkt als auch am Apex geringere Abweichungen von der geplanten Implantatposition erreicht als bei den geführten Methoden. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass in der Freihandgruppe die Implantate zuletzt eingesetzt wurden und der\*die Operateur\*in sich die korrekte Position anhand der vorherigen Implantationen gemerkt hatte. [23]

In einer Studie von Jaemsuwan et al. [7] wurde 2023 die Genauigkeit der statischen und dynamischen CAIS an zahnlosen Patient\*innen untersucht. 60 Implantate wurden bei 13 Patient\*innen von einem\*einer erfahrenen Operateur\*in implantiert, davon 20 mit der konventionellen Freihandmethode, 20 mit statischer und 20 mit dynamischer CAIS. Die globalen Eintrittspunktabweichungen betragen  $3,48 \pm 2,00$  mm (Freihand),  $1,40 \pm 0,72$  mm (statisch) und  $1,73 \pm 0,43$  mm (dynamisch). Die globalen Apexabweichungen waren bei  $3,60 \pm 2,11$  mm (Freihand),  $1,66 \pm 0,61$  mm (statisch) sowie  $1,86 \pm 0,82$  mm (dynamisch) und die Winkelabweichungen bei  $10,09 \pm 4,64^\circ$  (Freihand),  $4,98 \pm 2,16^\circ$  (statisch) sowie  $5,75 \pm 2,09^\circ$  (dynamisch). Diese Ergebnisse zeigten keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen statischer und dynamischer CAIS. Beide computergestützten Verfahren waren im Vergleich zur konventionellen Freihandmethode deutlich genauer. [7]

In den folgenden drei Tabellen sind die beschriebenen Studien sowie deren Ergebnisse übersichtlich dargestellt. Um die Erkennung zu erleichtern, sind die drei Studien an

zahnlosen Kiefern gelb markiert und die Studie, in der nur die Pilotbohrung mit Hilfe der Bohrschablone erfolgte, in roter Schrift hervorgehoben.

Studie	Studien- design	Bezeichnung	Software		OK/ UK	Anzahl Implantate		Anzahl Kiefer	
			Statisch	Dynamisch		Statisch	Dynamisch	Statisch	Dynamisch
Kang et al. (2014) [34]	In-vitro	Zahnlos	SimPlant	CBYON Suite	UK	40	40	10	10
Somogyi-Ganss et al. (2014) [35]	In-vitro	Teilbezahnt	SimPlant	Prototype dynamic system	OK, UK	400	400	je 25 OK, je 25 UK	25 OK, 25 UK
			Straumann Guided Surgery			400			
			NobelClinician			400			
Guzmán et al. (2019) [48]	In-vitro, randomisiert, kontrolliert	Teilbezahnt	NemoStudio	Navident	OK	20	20	10	10
Kaewsiri et al. (2019) [18]	In-vivo, randomisiert, kontrolliert	Teilbezahnt	coDiagnostiX	Iris-100	OK, UK	30	30	30	30
Yimarj et al. (2020) [49]	In-vivo, randomisiert, kontrolliert	Teilbezahnt	coDiagnostiX	Iris-100	KA	30	30	15	15
Wu et al. (2020) [50]	In-vivo, respektiv	Teilbezahnt	KA	DHC-DI3E	KA	57	29	38	25
Franchina et al. (2020) [51]	In-vitro, randomisiert	Teilbezahnt	Naviguide	Navident	UK	30	30	15	15
Sun et al. (2020) [15]	In-vitro, randomisiert	Teilbezahnt	Naviguide	Navident	UK	30	30	15	15
Zhou et al. (2021) [56]	In-vivo, prospektiv	Teilbezahnt	SmilePlan	AQNavi	OK, UK	32	32	KA	KA
Kivovics et al. (2022) [58]	In-vitro	Zahnlos	coDiagnostiX	Innoral System	UK	16	16	4	4

Studie	Studien- design	Bezahnung	Software		OK/ UK	Anzahl Implantate		Anzahl Kiefer	
			Statisch	Dynamisch		Statisch	Dynamisch	Statisch	Dynamisch
Yuzhang et al. (2022) [59]	In-vivo, prospektiv randomisiert	Teilbezahnt	NobelClinician	Digital-care	OK	20	20	20	20
Taheri Otaghsara et al. (2023) [12]	In-vitro	Teilbezahnt	coDiagnostiX	DENACAM	OK	20	20	10	10
González Rueda et al. (2023) [23]	In-vitro, randomisiert, kontrolliert	Teilbezahnt	NemoStudio	Navident	OK	20	20	5	5
Jaemsuwan et al. (2023) [7]	In-vivo, nicht randomisiert, prospektiv	Zahnlos	coDiagnostiX	Iris-100	OK, UK	20	20	Gesamt 13 (für Freihand, statisch und dynamisch)	

Tabelle 2: Veranschaulichung der Studien zum Vergleich der statischen und dynamischen CAIS. KA: Keine Angabe, OK: Oberkiefer, UK: Unterkiefer, gelb markiert: Studien mit zahnlosen Kiefern, rote Schrift: Studie mit Pilotbohrschablone

Studie	Eintrittspunktabweichung (mm)		Apexabweichung (mm)		Winkelabweichung (°)	
	Statisch	Dynamisch	Statisch	Dynamisch	Statisch	Dynamisch
Kang et al. (2014) [34]	Eckzahn: 0,73 ± 0,41 (2D)	Eckzahn: 2,06 ± 1,43 (2D)	Eckzahn: 2,03 ± 0,97 (2D)	Eckzahn: 2,76 ± 1,03 (2D)	Eckzahn: 6,72 ± 3,41	Eckzahn: 12,37 ± 4,18
	Molar: 0,68 ± 0,44 (2D)	Molar: 3,03 ± 1,81 (2D)	Molar: 1,08 ± 0,77 (2D)	Molar: 3,31 ± 2,07 (2D)	Molar: 3,90 ± 2,44	Molar: 8,97 ± 3,83
Somogyi-Ganss et al. (2014) [35]	0,76 ± 0,54 (2D)	1,14 ± 0,55 (2D)	1,46 ± 0,76 (2D)	1,71 ± 0,61 (2D)	3,09 ± 1,9	2,99 ± 1,68
	0,90 ± 0,48 (2D)		1,71 ± 0,86 (2D)		3,31 ± 1,86	
	0,81 ± 0,55 (2D)		1,91 ± 0,94 (2D)		4,24 ± 2,66	
Guzmán et al. (2019) [48]	0,85 ± 0,48 (2D)	0,78 ± 0,43 (2D)	1,18 ± 0,60 (2D)	1,20 ± 0,48 (2D)	4,00 ± 1,41	2,95 ± 1,48
Kaewsiri et al. (2019) [18]	0,97 ± 0,44 (3D)	1,05 ± 0,44 (3D)	1,28 ± 0,46 (3D)	1,29 ± 0,50 (3D)	2,84 ± 1,71	3,06 ± 1,37
Yimarj et al. (2020) [49]	1,04 ± 0,67 (3D)	1,24 ± 0,39 (3D)	1,54 ± 0,79 (3D)	1,58 ± 0,56 (3D)	4,08 ± 1,69	3,78 ± 1,84

Studie	Eintrittspunktabweichung (mm)		Apexabweichung (mm)		Winkelabweichung (°)	
	Statisch	Dynamisch	Statisch	Dynamisch	Statisch	Dynamisch
Wu et al. (2020) [50]	1,22 ± 0,70 (2D)	1,36 ± 0,65 (2D)	1,33 ± 0,73 (2D)	1,48 ± 0,65 (2D)	4,34 ± 2,22	3,71 ± 1,32
Sun et al. (2020) [15]	KA	KA	KA	KA	4,54 ± 0,29	3,24 ± 0,36
Zhou et al. (2021) [56]	1,15 ± 0,34 (2D)	0,40 ± 0,41 (2D)	1,37 ± 0,38 (2D)	0,34 ± 0,33 (2D)	2,60 ± 1,11	0,97 ± 1,21
Kivovics et al. (2022) [58]	1,31 ± 0,42 (3D)	1,27 ± 0,40 (3D)	1,38 ± 0,41 (3D)	1,34 ± 0,41 (3D)	3,21 ± 1,52	4,09 ± 2,79
Yuzhang et al. (2022) [59]	0,99 ± 0,63 (3D)	1,06 ± 0,55 (3D)	1,50 ± 0,75 (3D)	1,18 ± 0,53 (3D)	3,07 ± 2,18	3,23 ± 1,67
Taheri Otaghsara et al. (2023) [12]	0,77 ± 0,32 (3D)	0,88 ± 0,32 (3D)	1,26 ± 0,39 (3D)	1,28 ± 0,55 (3D)	4,31 ± 1,22	3,35 ± 1,89
González Rueda et al. (2023) [23]	5,54 ± 1,72 (2D)	5,43 ± 2,13 (2D)	5,33 ± 2,14 (2D)	4,92 ± 1,89 (2D)	5,30 ± 2,80	7,36 ± 4,12°
Jaemsuwan et al. (2023) [7]	1,40 ± 0,72 (3D)	1,73 ± 0,43 (3D)	1,66 ± 0,61 (3D)	1,86 ± 0,82 (3D)	4,98 ± 2,16	5,75 ± 2,09

Tabelle 3: Auflistung der Abweichungen zwischen den geplanten und tatsächlichen Implantatpositionen bei der statischen und dynamischen CAIS. KA: Keine Angabe, gelb markiert: Studien mit zahnlosen Kiefern, rote Schrift: Studie mit Pilotbohrschablone

Studie	Conclusio
Kang et al. (2014) [34]	Sowohl im Eckzahn- als auch im Molarenbereich war die statische CAIS genauer als die dynamische.
Somogyi-Ganss et al. (2014) [35]	Die Genauigkeitsanalyse ergab, dass die dynamische CAIS vergleichbar genau wie die drei statischen CAIS war. Im Vergleich zu einer im Labor hergestellten Bohrschablone waren die computergestützten Verfahren deutlich genauer.
Guzmán et al. (2019) [48]	Sowohl statische als auch dynamische CAIS ermöglichen eine genaue Implantatplatzierung. Hinsichtlich der Winkelabweichung war die dynamische CAIS signifikant genauer als die statische.
Kaewsiri et al. (2019) [18]	Bei Einzelzahnimplantaten waren die statische und die dynamische CAIS gleich genau. In der dynamischen Gruppe wurde jedoch eine höhere Abweichung in die mesiale Richtung gefunden als bei der statischen.
Yimarj et al. (2020) [49]	Bei allen Parametern und auch bei der Parallelität zweier nebeneinander platzierten Implantate gab es keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen statischer und dynamischer CAIS.
Wu et al. (2020) [50]	Die statische und die dynamische CAIS sind gleich genau und auch zwischen den verschiedenen Operateur*innen wurde kein signifikanter Unterschied festgestellt.

Studie	Conclusio
Franchina et al. (2020) [51]	Zwischen statischer und dynamischer CAIS waren die Ergebnisse nicht signifikant unterschiedlich.
Sun et al. (2020) [15]	Die dynamische CAIS war signifikant genauer als die statische. Mit der Freihandmethode wurde die geringste Genauigkeit erreicht.
Zhou et al. (2021) [56]	Die dynamische CAIS war bei allen Messwerten deutlich genauer als die statische.
Kivovics et al. (2022) [58]	Alle Parameter zwischen statischer und dynamischer CAIS unterschieden sich nicht signifikant. Im Vergleich zur konventionellen Freihandmethode waren beide computergestützten Methoden deutlich genauer.
Yuzhang et al. (2022) [59]	Hinsichtlich Eintrittspunkt-, Apex- und Winkelabweichung waren die statische und die dynamische CAIS gleich genau. Bei der dynamischen Gruppe wurden die Implantate jedoch mehr in die labiale Richtung platziert als bei der statischen.
Taheri Otaghsara et al. (2023) [12]	Dynamische und statische CAIS führten zu genauen Implantatplatzierungen. Die Implantate, die mittels dynamischer CAIS inseriert wurden, lagen mehr in mesialer Richtung als bei der statischen Variante.
González Rueda et al. (2023) [23]	Zwischen statischer und dynamischer CAIS ergab die Genauigkeitsanalyse keine statistisch signifikanten Unterschiede.
Jaemsuwan et al. (2023) [7]	Die Ergebnisse zeigten keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen statischer und dynamischer CAIS. Beide computergestützten Verfahren waren im Vergleich zur konventionellen Freihandmethode deutlich genauer

*Tabelle 4: Conclusio der beschriebenen Studien. Gelb markiert: Studien mit zahnlosen Kiefern, rote Schrift: Studie mit Pilotbohrschablone*

### 3.2 Ergebnisse zur computergestützten Implantatchirurgie in zahnlosen Kiefern

Einige Studien haben die computergestützte Implantatchirurgie bei vollständig zahnlosen Kiefern angewandt. Hinsichtlich der statischen CAIS im zahnlosen Kiefer war die Studienlage sehr umfangreich. Diese Arbeit beschränkt sich auf 21 mit Hilfe der Schlagwörter gefundenen Publikationen im Zeitraum 2014 bis 2024, bei denen ein Volltext zur Verfügung stand. 19 der Studien wurden unter in-vivo Bedingungen durchgeführt, eine Studie erfolgte in-vitro (Kang et al. [34]) und bei einer Studie handelte es sich um eine Beschreibung der durchgeführten Technik (Manfredini et al. [60]). Zur dynamischen CAIS im zahnlosen Kiefer wurden nur 10 Studien mit Volltext gefunden - drei in-vitro und sieben in vivo-Studien. Auch hier beschränkt sich die Recherche auf Literatur, die in den letzten 10 Jahren publiziert wurde. In einer weiteren Studie erfolgte die Kombination von statischer und dynamischer CAIS („Doppelfaktor-Technik“). Abbildung 19 stellt die in dieses Kapitel integrierten Studien in einem Balkendiagramm grafisch dar.

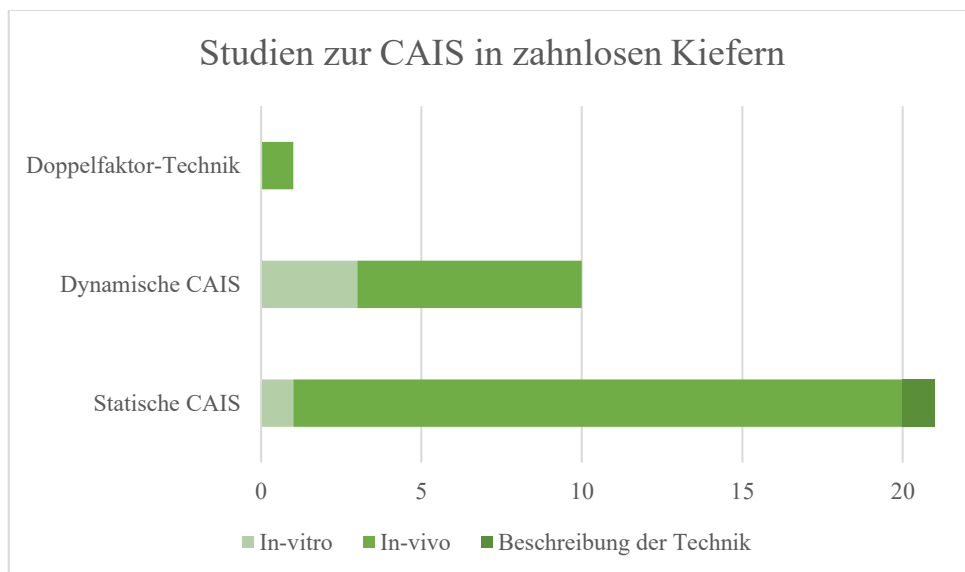


Abbildung 19: Anzahl der Studien zur dynamischen und statischen CAIS sowie zur Doppelfaktor-Technik in zahnlosen Kiefern, unterteilt in In-vitro- und In-vivo-Studien

Nur bei einem Teil der angeführten Studien wurde nach der computergestützten Implantation eine Sofortversorgung durchgeführt. Der Vollständigkeit halber werden jedoch auch Studien miteinbezogen, bei denen die eingesetzten Implantate nicht mit einem Provisorium sofortbelastet wurden. Um den aktuellen Stand der Literatur hinsichtlich statischer und dynamischer CAIS in zahnlosen Kiefern darzustellen, werden im Folgenden verschiedene

Studien beschrieben, die die CAIS in zahnlosen Kiefern durchgeführt haben. Anschließend werden diese Studien in Tabellen vergleichend dargestellt. Zum Schluss wird auf eine weitere Möglichkeit des vollständig digitalisierten Workflows eingegangen – der Kombination der statischen und dynamischen CAIS („Doppelfaktor-Technik“).

### 3.2.1 Ergebnisse zur statischen CAIS in zahnlosen Kiefern

In einer prospektiven klinischen Studie aus dem Jahr 2014 von Beretta et al. [17] wurden insgesamt 14 Implantate bei zwei zahnlosen Patient\*innen sowohl im Ober- als auch Unterkiefer unter der Verwendung von schleimhautgestützten Bohrschablonen implantiert. Dabei wurden die Bohrschablonen mit Fixierungsstiften im Knochen verankert. Als Ergebnis wurde über eine koronale Eintrittspunktabweichung von  $0,56 \pm 0,23$  mm, eine Apexabweichung von  $0,64 \pm 0,29$  mm und eine Winkelabweichung von  $2,42 \pm 1,02^\circ$  berichtet. Auch wenn es sich hierbei um sehr genaue Ergebnisse handelt, ist die geringe Stichprobengröße zu berücksichtigen. [17]

Stübinger et al. [36] haben 2014 die statische CAIS an 10 zahnlosen Patient\*innen unter der Verwendung von knochengestützten Bohrschablonen durchgeführt und die Genauigkeitsabweichungen zwischen virtuell geplanten und tatsächlichen Implantatpositionen untersucht. Die Bohrschablonen wurden mit Stiften im Knochen fixiert und insgesamt wurden 44 Implantate implantiert. Es kam zu keinen Komplikationen, sowohl intraoperativ als auch während des einjährigen Recalls. Die globale Eintrittspunktabweichung betrug  $0,71 \pm 0,40$  mm, die globale Apexabweichung  $0,77 \pm 0,38$  mm und die Winkelabweichung  $2,39 \pm 0,97^\circ$ . Dabei waren die distal platzierten Implantate etwas ungenauer als die mesial gelegenen. Insgesamt konnten in dieser Studie jedoch auch mit knochengestützten Bohrschablonen sehr genaue Ergebnisse erreicht werden. [36]

In einer Studie von Verhamme et al. [37] aus dem Jahr 2014 wurden 150 Implantate in zahnlose Oberkiefer von 25 Patient\*innen mit Hilfe der statischen CAIS implantiert. Da alle Patient\*innen eine starke Atrophie des Kieferknochens aufwiesen, wurde sechs Monate zuvor ein präimplantologischer Sinuslift durchgeführt. Bei der Implantation wurden mittels CAD/CAM hergestellte schleimhautgestützte Bohrschablonen verwendet, die bei einem Teil der Patient\*innen mit Fixierungsstiften im Knochen verankert wurden. Die Verankerung war nicht immer möglich, da die Fixierungsstifte in manchen Fällen die Implantation behinderten. Insgesamt wurde über eine globale Eintrittspunktabweichung von  $1,96 \pm 0,23$  mm, eine globale Apexabweichung von  $2,29 \pm 0,27$  mm und eine Winkelabweichung von

3,93 ± 0,41° berichtet. Laut dieser Studie waren diese Ergebnisse im Vergleich zu Implantationen ohne vorheriger Knochenaugmentation etwas ungenauer. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass bei den Patient\*innen, bei denen die Bohrschablone über Fixierungsstifte stabilisiert wurde, die bukkal-lingualen Abweichungen am Eintrittspunkt signifikant geringer waren. Somit sind die größeren Abweichungen vor allem auf die mangelnde Befestigung der Bohrschablone zurückzuführen. [37]

Im Jahr 2014 führten Vercruyssen et al. [38] eine randomisierte kontrollierte Studie mit 59 Patient\*innen (72 Kiefer) durch, um die Genauigkeit der statischen CAIS zu beurteilen. Dabei wurden nicht nur schleimhaut- und knochengestützte Bohrschablonen miteinander verglichen, sondern auch mit der konventionellen Freihandimplantation sowie der Verwendung von Pilotbohrschablonen. Alle Patient\*innen wurden in sechs Gruppen unterteilt. Die Gruppen umfassten schleimhautgestützte Bohrschablonen mit partieller Führung, knochengestützte Bohrschablonen mit partieller Führung, schleimhautgestützte Bohrschablonen mit vollständiger Führung, knochengestützte Bohrschablonen mit vollständiger Führung, Freihandimplantationen und Pilotbohrschablonen. Sowohl die schleimhaut- als auch die knochengestützten Bohrschablonen wurden über drei bis vier Fixierungsstifte im Knochen verankert. Bei der Freihandimplantation wurden die virtuellen Planungsbilder zur Orientierung verwendet. Insgesamt wurden 314 Implantate eingesetzt, wobei vier bis sechs Implantate pro Kiefer implantiert wurden. Die genauen Abweichungen der tatsächlichen Implantatpositionen von den geplanten sind in Tabelle 6 erkennbar. Die statische CAIS ergab sowohl bei schleimhaut- als auch bei knochengestützten Bohrschablonen signifikant genauere Ergebnisse im Vergleich zur Freihandimplantation und zur Nutzung von Pilotbohrschablonen. Zwischen schleimhaut- und knochengestützten Bohrschablonen sowie zwischen partieller und vollständiger Führung gab es keinen statistisch signifikanten Unterschied. Außerdem wurden im Oberkiefer geringere Genauigkeitsabweichungen beobachtet als im Unterkiefer. [38] In einer weiterführenden Studie wurden zusätzlich der Knochenverlust, die Taschensondierungstiefe, die Blutung bei Sondierung (Bleeding on Probing, „BOP“) und die Plaque-Werte sowohl zum Zeitpunkt der Implantation, der Protheseneinsetzung als auch des ein-, zwei- und dreijährigen Recalls untersucht. Bei allen Parametern konnten keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den sechs Gruppen gefunden werden. [62]

In der retrospektiven Studie von Cassetta et al. [39] aus dem Jahr 2014 wurden 225 Implantate bei 20 Patient\*innen mit Hilfe von 28 schleimhautgestützten Bohrschablonen

implantiert (bei acht Patient\*innen wurden sowohl Ober- als auch Unterkiefer behandelt). Pro Kiefer wurden acht bis neun Implantate eingesetzt. Die Bohrschablone wurde bei einem Teil der Patient\*innen mit mindestens drei Schrauben im Knochen fixiert, wohingegen sie bei einem anderen Teil nicht fixiert wurde. Außerdem wurde untersucht, wie sich Rauchen sowie Implantate im Ober- oder Unterkiefer auf die Positionierungsgenauigkeit auswirken. Insgesamt wurde über eine globale Eintrittspunktabweichung von  $1,68 \pm 0,60$  mm, eine globale Apexabweichung von  $2,19 \pm 0,83$  mm und eine Winkelabweichung von  $4,67 \pm 2,68^\circ$  berichtet. Mit im Knochen fixierten Bohrschablonen wurden signifikant geringere Winkelabweichungen erzielt als mit nicht fixierten. Dasselbe gilt für Implantate im Oberkiefer im Vergleich zu Implantaten im Unterkiefer. Bei Rauchern waren auf Grund der verringerten Schleimhautdicke die globalen Eintrittspunkt- sowie Apexabweichungen signifikant ungenauer als bei Nichtrauchern. [39]

In der Studie von Van de Wiele et al. [40] aus dem Jahr 2014 wurden 75 Implantate in 17 vollständig zahnlose Kiefer von neun unerfahrenen Operateur\*innen unter Aufsicht eines\*einer erfahrenen Zahnarztes\*Zahnärztin mittels statischer CAIS unter der Verwendung von schleimhautgestützten Bohrschablonen implantiert. Die globale Eintrittspunktabweichung betrug  $0,9 \pm 0,5$  mm, die globale Apexabweichung  $1,1 \pm 0,5$  mm und die Winkelabweichung  $2,8 \pm 1,5^\circ$ . Beim Vergleich dieser Abweichungen mit Werten aus der Literatur, wurde keine Unterlegenheit gegenüber erfahrenen Operateur\*innen gefunden. Das deutet darauf hin, dass die Erfahrung der Operateur\*innen bei der statischen CAIS eine untergeordnete Rolle spielt. [40]

Geng et al. [41] haben 2015 111 Implantate bei 24 Patient\*innen mittels statischer CAIS implantiert. Davon wurden 59 Implantate bei 15 vollständig zahnlosen Patient\*innen unter Verwendung einer schleimhautgetragenen Bohrschablone eingesetzt. Hier betrug die Winkelabweichung  $2,71 \pm 2,58^\circ$ , die koronale Eintrittspunktabweichung  $0,69 \pm 0,66$  mm und die Apexabweichung von  $0,94 \pm 0,75$  mm. Bei den teilbezahnten Patient\*innen unter der Verwendung einer zahngestützten Bohrschablone konnten signifikant genauere Ergebnisse erzielt werden (Winkelabweichung  $1,72 \pm 1,67^\circ$ , koronale Eintrittspunktabweichung  $0,27 \pm 0,24$  mm und Apexabweichung  $0,37 \pm 0,35$  mm). Bei einem Teil der Patient\*innen wurde nur die Pilotbohrung mit Hilfe der Bohrschablone durchgeführt. Es wurde jedoch kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Genauigkeit im Vergleich zu vollständig geführten Implantationen gefunden. [41]

Im Jahr 2015 verglichen Tallarico et al. [42] das All-on-4- mit dem All-on-6-Prinzip bei der statischen CAIS. Dabei wurden insgesamt 200 Implantate in die zahnlosen Oberkiefer von 40 Patient\*innen implantiert und anschließend sofort belastet. Beobachtet wurden unter anderem die Überlebensraten von Implantaten und Prothesen sowie technische und biologische Komplikationen. Während des fünfjährigen Recalls kam es zu sieben Implantatverlusten, wohingegen die Überlebensrate der Prothesen 100% betrug. Bei acht Patient\*innen kam es zu technischen Komplikationen wie Lockerung von Schrauben oder Bruch des Provisoriums und bei fünf zu biologischen Komplikationen wie Schmerzen oder Schwellungen. Zwischen beiden Gruppen gab es keinen statistisch signifikanten Unterschied hinsichtlich dieser Parameter. Das All-on-4-Prinzip zeigte jedoch eine höhere Tendenz zu Komplikationen und mit dem All-on-6-Prinzip kam es zu mehr Implantatverlusten. Die Genauigkeit der Implantatpositionierungen wurde in dieser Studie nicht analysiert. [42]

Verhamme et al. [43] haben 2016 eine weitere Studie zur statischen CAIS in 12 zahnlosen Kiefern durchgeführt. Da alle Patient\*innen eine starke Atrophie des Oberkieferknochens aufwiesen, wurde ein präimplantologischer Sinuslift mit autologen Knochenmaterial vom Beckenkamm durchgeführt. Im Rahmen der Augmentation wurden Osteosyntheseschrauben in bukkolingualer Richtung eingebracht. Da diese Osteosyntheseschrauben als röntgenopake Marker im DVT-Bild dienten, musste keine Röntgenschablone angefertigt werden. Die Implantate und die Bohrschablone wurden mit Hilfe der Planungssoftware virtuell geplant und die Bohrschablone 3D-gedruckt. Auf der Bohrschablone befanden sich Stabilisierungsarme, die zu den Osteosyntheseschrauben ausgerichtet waren. So konnten die Osteosyntheseschrauben lokalisiert und freigelegt werden. Die Schrauben wurden zwei bis drei herausgeschraubt und dienten der Stabilisierung der Bohrschablone während des chirurgischen Eingriffs (Abbildung 20). Falls es zu einer unvermeidbaren Überlagerung einer Osteosyntheseschraube mit einer Implantatposition kam, wurden zuerst alle nicht interferierenden Implantate gesetzt. Danach konnte die störende Osteosyntheseschraube entfernt und die Implantation fortgesetzt werden. Nach dem Eingriff wurden die Bohrschablone sowie die Osteosyntheseschrauben entfernt. Insgesamt wurden 72 Implantate mit Hilfe der durch die Osteosyntheseschrauben fixierten schleimhautgestützten Bohrschablone implantiert. Die Genauigkeitsanalyse ergab eine globale Eintrittspunktabweichung von  $2,05 \pm 0,07$  mm, eine globale Apexabweichung von  $1,60 \pm 0,07$  mm und eine Winkelabweichung von  $5,02 \pm 0,20^\circ$ . [43]



*Abbildung 20: Schleimhautgestützte Bohrschablone, die durch die Osteosyntheseschrauben stabilisiert wird [43]*

In einer weiteren Studie von Cassetta et al. [31] aus dem Jahr 2017 wurde untersucht, inwiefern die Erfahrung der Operateur\*innen die Genauigkeit der statischen CAIS beeinflusst. Insgesamt wurden 33 Implantate von je fünf unerfahrenen und 37 Implantate von je fünf erfahrenen Operateur\*innen in je fünf zahnlose Kiefer mittels schleimhautgestützten Bohrschablonen eingesetzt. Die erfahrene Gruppe erreichte eine globale Eintrittspunktabweichung von  $0,60 \pm 0,25$  mm, eine globale Apexabweichung von  $0,67 \pm 0,34$  mm und eine Winkelabweichung von  $3,21 \pm 1,57^\circ$ . Bei der unerfahrenen Gruppe betrug die globale Eintrittspunktabweichung  $0,75 \pm 0,18$  mm, die globale Apexabweichung  $1,02 \pm 0,44$  mm und die Winkelabweichung von  $3,07 \pm 2,70^\circ$ . Hinsichtlich der Genauigkeit konnten somit keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen erfahrenen und unerfahrenen Operateur\*innen festgestellt werden. Es wurde jedoch nicht nur die Abweichungen der tatsächlichen Implantatposition mit den geplanten untersucht, sondern auch der Positionierungsfehler, bei dem es sich um den Fehler handelt, der sich aus der ungenauen Positionierung der Bohrschablone ergibt. Hier spielte die Erfahrung eine deutliche Rolle, denn der Positionierungsfehler war bei den unerfahrenen Operateur\*innen signifikant größer. [31]

Im weiter oben beschriebenen Fallbeispiel der statischen CAIS von Oh et al. [20] aus dem Jahr 2017 wurden bei einem Patienten im zahnlosen Oberkiefer vier Implantate unter der Verwendung einer mittels CAD/CAM-hergestellten Bohrschablone implantiert und anschließend mit einem ebenfalls digital entworfenen Provisorium sofort belastet. Die koronale Eintrittspunktabweichung betrug  $0,43 \pm 0,16$  mm, die Apexabweichung  $0,55 \pm 0,25$  mm und die Winkelabweichung  $2,40 \pm 1,43^\circ$ . Diese sehr geringen Abweichungen sind unter anderem auf die Verwendung eines speziellen „Scan-Retractors“ während des Intraoralscans zurückzuführen, der das Zurückziehen der Lippen und Wangen erleichterte.

Aber auch die Verwendung von röntgenopaken Harzmarkern, die direkt auf dem Gaumen befestigt wurden anstatt von röntgenopaken Markern auf einer Röntgenschablone erhöhte die Genauigkeit des Verfahrens durch exaktes Matchen der DVT- und IOS-Bilder. Da die Bohrschablone über drei Schrauben im Knochen fixiert war, konnte sie nicht verrutschen und eine sehr genaue Osteotomie sowie Implantatinsertion waren möglich. [20]

Die Studie von Marra et al. [44] aus dem Jahr 2017 vergleicht die Zufriedenheit von Patient\*innen, die entweder implantatgetragene Vollprothesen oder herkömmliche herausnehmbare Prothesen erhalten haben. Für die Gruppe mit den festsitzenden Vollprothesen wurden Implantate mittels statischer CAIS unter der Verwendung von schleimhautgestützten Bohrschablonen implantiert und anschließend mit einem Provisorium sofortbelastet. Dabei wurden insgesamt 312 Implantate in die zahnlosen Ober- oder Unterkiefer von 30 Patient\*innen eingesetzt. Die Studie ergab, dass Patient\*innen mit implantatgetragenen Vollprothesen deutlich zufriedener waren als diejenigen mit herausnehmbaren Prothesen. Hinsichtlich der Genauigkeit der Implantatpositionierungen wurden keine Aussagen gemacht. [44]

Tonellini et al. [45] haben 2018 eine doppeltgeführte statische CAIS bei sieben zahnlosen Patient\*innen durchgeführt, bei denen zusätzlich eine Knochenabtragung erforderlich war. Insgesamt wurden 28 Implantate nach dem All-on-4-Prinzip von einem\*einer Operateur\*in eingesetzt. Zuerst wurde für die Knochenabtragung eine knochengestützte Operationsschablone verwendet, die mit drei Ankerstiften am Knochen befestigt war. Danach wurde für die Platzierung der Implantate eine Bohrschablone in denselben Löchern fixiert, in denen zuvor die ersten Ankerstifte platziert waren. Noch am selben Tag erfolgte eine Sofortbelastung mit implantatgetragenen Provisorien. Die Genauigkeitsanalyse ergab eine Winkelabweichung von  $2,16 \pm 2,03^\circ$ , eine Eintrittspunktabweichung von  $0,76 \pm 0,55$  mm und eine Apexabweichung von  $0,57 \pm 0,40$  mm. Ein Jahr nach der Implantation betrug die Implantatüberlebensrate 100%, es wurden über keine Komplikationen berichtet und die ästhetischen Ergebnisse waren ausgezeichnet. [45]

Venezze et al. [46] haben 2018 sechs Implantate im zahnlosen Unterkiefer von einem Patienten unter Verwendung einer Bohrschablone implantiert. Bei der in dieser Studie vorgestellten Methode war die analoge Herstellung eines prothetischen Wax-ups, das sowohl den funktionellen als auch ästhetischen Parametern entsprach, entscheidend. Ein Duplikat dieser Prothese diente dann als Röntgenschablone, die nach der virtuellen Planung

der Implantatpositionen in die Bohrschablone umgewandelt wurde. Somit wurde die Bohrschablone nicht durch CAD/CAM hergestellt. Ein weiteres Duplikat des Wax-ups wurde verwendet, um die provisorische Prothese mittels CAD im Fräsverfahren herzustellen. 24 h nach dem chirurgischen Eingriff wurden die Implantate mit dem Provisorium sofortbelastet. [46]

Baruffaldi et al. [53] haben 2020 bei 11 zahnlosen Patient\*innen 86 Implantate mittels statischer CAIS implantiert. Die Implantate wurden direkt nach der Implantation mit der endgültigen prothetischen Versorgung belastet. Wie weiter unten bei Manfredini et al. [60] 2023 genauer beschrieben, wurden hier stapelbare Schablonen verwendet, bei denen eine im Knochen verankerte Basisschablone sowohl der Befestigung der Bohrschablone als auch dem späteren Einsetzen und Anpassen der Prothese diene. Im Unterschied zu Manfredini et al. [60] wurden die nicht erhaltungswürdigen Zähne als Positionierungshilfe der Basisschablone verwendet. Die Implantatüberlebensrate betrug 100% und es wurden über keine Komplikationen berichtet. [53]

In einer klinischen Pilotstudie von Liu et al. [57] wurden 2021 57 Implantate in die zahnlosen Ober- und/oder Unterkiefer von sechs Patient\*innen mittels statischen Bohrschablonen implantiert und mit einem Provisorium sofort belastet. Die Patient\*innen wurden in zwei Gruppen unterteilt. Bei der ersten Gruppe erfolgte der Workflow volldigitalisiert und die provisorische Prothese wurde bereits vor der Implantation mittels CAD/CAM im Fräsverfahren hergestellt. Dafür wurden vor der DVT mindestens drei Fixierungsstifte im Knochen verankert. Die Röntgenschablone wurde über ein digital designtes und mittels 3D-Druck hergestelltes Befestigungssystem an diesen Fixierungsstiften fest gemacht. Nach der virtuellen Planung der Implantatpositionen wurden die Führungselemente für die Bohrung direkt in die Röntgenschablone gefräst und somit wurde die Röntgenschablone in die Bohrschablone umgewandelt. Während des chirurgischen Eingriffs wurde die Bohrschablone an den Fixierungsstiften befestigt. Die Implantate wurden anschließend mit der mittels CAD/CAM hergestellten provisorischen Prothese sofort belastet. Im Gegensatz zur ersten Gruppe wurde in der zweiten Gruppe das Provisorium erst nach der Implantation nicht digitalisiert angefertigt. Während des chirurgischen Eingriffs wurde die schleimhautgestützte Bohrschablone über drei Fixierungsstifte im Knochen verankert und somit wurde kein mittels CAD/CAM-hergestelltes Befestigungssystem benötigt. Sowohl die gesamte klinische Behandlungszeit als auch die postoperative Stuhlzeit waren bei der ersten Gruppe signifikant kürzer als bei der zweiten. Hinsichtlich der Zufriedenheit von

Patient\*innen und Ärzt\*innen konnte zwischen den beiden Gruppen kein Unterschied festgestellt werden. Die Genauigkeit der Implantatpositionierung wurde in dieser Studie nicht untersucht. [57]

La Monaca et al. [5] haben 2022 eine retrospektive Studie veröffentlicht, die die Vollbogenrehabilitation bei 28 zahnlosen Patient\*innen unter der Verwendung der statischen CAIS beschreibt. Insgesamt wurden 164 Implantate implantiert und mit gesamt 32 Prothesen aus Acryl (17 nach dem All-on-4- und 15 nach dem All-on-6-Prinzip) sofort belastet. Es wurden schleimhautgestützte Bohrschablonen verwendet, die mit Ankerstiften im Knochen fixiert wurden. Die endgültigen Prothesen wurden vier bis sechs Monate nach der Implantation eingesetzt. Als Ergebnisse dieser Studie wurden die Implantat- und Prothesenüberlebensraten, der marginale Knochenverlust sowie das Auftreten von biologischen oder prothetischen Komplikationen innerhalb von 10 Jahren Nachsorge berichtet. Die kumulative Implantatüberlebensrate betrug beim All-on-4-Prinzip 89,7% und beim All-on-6-Prinzip 99,0%, die kumulative Prothesenerfolgsrate 58,8% beim All-on-4-Prinzip und 43,8% beim All-on-6-Prinzip. Die Überlebensrate der Prothesen belief sich beim All-on-4-Prinzip auf 88,2% und beim All-on-6-Prinzip auf 100%. Hinsichtlich des marginalen Knochenverlusts konnten keine Unterschiede zwischen dem All-on-4- und dem All-on-6-Prinzip festgestellt werden. Beim All-on-Six-Prinzip kam es zu einer Mukositis (1,0%) und beim All-on-4-Prinzip zu zwei Fällen von Periimplantitis (10,3%). [5]

Manfredini et al. [60] haben 2023 mittels statischer CAIS eine Vollbogenrestauration mit anschließender Sofortbelastung bei einem Patienten mit zahnlosen Oberkiefer durchgeführt. In dieser Studie wurden statt herkömmlichen Bohrschablonen stapelbare Schablonen aus mehreren Komponenten verwendet. Der im Folgenden beschriebene Workflow ist in Abbildung 21 dargestellt. Zuerst wurde eine titanverstärkte Harz-Basisschablone mit bukkal und palatinal gelegenen Fixierstiften im Kieferknochen verankert. Eine schleimhautgestützte Harz-Positionierungsschablone, die mit der Basisschablone verschraubt war, diente der richtigen Positionierung der Basisschablone (a). Anschließend wurde die Positionierungsschablone entfernt (b) und der Mukoperiostlappen abpräpariert (c). Nun wurde die Titan-Bohrschablone mit Schrauben auf der Basisschablone befestigt (d). Nach der Implantation wurde die Bohrschablone wieder entfernt und die mittels CAD/CAM gefräste provisorische Prothese mit der Basisschablone verschraubt (e). Somit verblieb die Basisschablone während des gesamten Eingriffes im Mund des Patienten befestigt und wurde erst nach dem Einsetzen und Anpassen des Provisoriums entfernt (f). Es

wurden sowohl intra- als auch postoperativ über keine Komplikationen berichtet. Die Genauigkeit der Implantatpositionierung wurde in dieser Studie nicht beschrieben. [60]



*Abbildung 21: Workflow einer statisch geführten Implantation im zahnlosen Kiefer mit stapelbaren Schablonen [60]*

Martins et al. [61] haben 2024 bei vier Patient\*innen eine Vollbogenrehabilitation mit anschließender Sofortversorgung durchgeführt. Dabei wurden die Implantate entweder im Ober- oder im Unterkiefer unter Verwendung des All-on-4-Prinzips eingesetzt, wobei ebenfalls stapelbare Schablonen verwendet wurden. Sowohl die stapelbaren Schablonen als auch die Sofortprovisorien wurden digital designt und mittels 3D-Druck hergestellt. Die gesamte Stuhlzeit, die sowohl die Implantation als auch das Einsetzen des Provisoriums beinhaltete, betrug durchschnittlich nur zwei Stunden und 30 Minuten. Zusätzlich konnte durch die umgekehrte Behandlungsplanung, bei der zuerst die Prothese entworfen und anschließend die Position der Implantate bestimmt wurde, die erforderliche Knochenreduktion erfolgreich vorhergesagt werden. Die Implantate konnten korrekt platziert werden und es wurden über keine Komplikationen betreffend der Prothesenpassung berichtet. Somit stellte dieser digitale Workflow unter der Verwendung von stapelbaren Schablonen eine geeignete Methode zur Rehabilitation von zahnlosen Kiefern mit implantatgetragenen Vollbogenprothesen dar. [61]

Studie	Studiendesign	Software	OK/ UK	Anzahl Implantate	Anzahl Kiefer	Anzahl Patient*innen	Anzahl Chirurg*innen
Kang et al. (2014) [34]	In-vitro	SimPlant	UK	40	10	10 Modelle	1
Beretta et al. (2014) [17]	In-vivo, prospektiv, klinisch, Pilotstudie	3Diagnosys	OK, UK	14	4	2	1
Stübinger et al. (2014) [36]	In-vivo, klinisch, nicht kontrolliert, nicht randomisiert	Facilitate	OK	44	10	10	1
Verhamme et al. (2014) [37]	In-vivo, prospektiv	Procera Clinical Design	OK	150	25	25	1
Vercruyssen et al. (2014) [38]	In-vivo, randomisiert, kontrolliert, klinisch	Simplant	OK, UK	314	72	59	1
Cassetta et al. (2014) [39]	In-vivo, observierend, retrospektiv	Simplant	OK, UK	225	28	20	4
Van de Wiele et al. (2014) [40,41]	In-vivo, prospektiv	Simplant	OK, UK	75	17	16	9
Geng et al. (2015) [41]	In-vivo, prospektiv	Simplant	OK, UK	59	15	KA	KA
Tallarico et al. (2015) [42]	In-vivo, randomisiert, kontrolliert	NobelGuide	OK	200	40	40	KA
Verhamme et al. (2016) [43]	In-vivo, prospektiv	Procera Clinical Design	OK	72	12	12	1
Cassetta et al. (2017) [31]	In-vivo, randomisiert, Pilotstudie	3Diagnosys	OK, UK	Erfahren: 33	Erfahren: 5	Erfahren: 5	Erfahren: 5

Studie	Studiendesign	Software	OK/ UK	Anzahl Implantate	Anzahl Kiefer	Anzahl Patient*innen	Anzahl Chirurg*innen
				Unerfahren: 37	Unerfahren: 5	Unerfahren: 5	Unerfahren: 5
Oh et al. (2017) [20]	In-vivo, Fallbericht	Implant Studio	OK	4	1	1	KA
Marra et al. (2017) [44]	In-vivo, retrospektiv, nicht randomisiert, kontrolliert	NobelGuide	OK, UK	312	30	30	KA
Tonellini et al. (2018) [45]	In-vivo, retrospektiv	3Diagnosys, Mimics	UK, OK	28	7	7	1
Venezze et al. (2018) [46]	In-vivo, Fallbericht, Technical note	Romexis	UK	6	1	1	KA
Baruffaldi et al. (2020) [53]	In-vivo, Fallserie	coDiagnostiX	OK, UK	86	13	11	KA
Liu et al. (2021) [57]	In-vivo, klinisch, Pilotstudie	Organical Dental Implant	OK, UK	57	10	6	2
La Monaca et al. (2022) [5]	In-vivo, retrospektiv, Kohortenstudie	NobelGuide	OK, UK	164	32	28	1
Manfredini et al. (2023) [60]	Technical note	RealGuide	OK	6	1	1	1
Jaemsuwan et al. (2023) [7]	In-vivo, prospektiv, nicht randomisiert	coDiagnostiX	OK, UK	20	KA	KA	1
Martins et al. (2024) [61]	In-vivo, Fallserie	BlueSky Plan, Meshmixer	OK, UK	16	4	4	KA

Tabelle 5: Veranschaulichung der Studien zur statischen CAIS in zahnlosen Kiefern. KA: Keine Angabe, OK: Oberkiefer, UK: Unterkiefer

Studie	Bohrschablone	Eintrittspunktabweichung (mm)	Apexabweichung (mm)	Winkelabweichung (°)
Kang et al. (2014) [34]	Knochengestützt	Eckzahn: 0,73 ± 0,41 (2D)	Eckzahn: 2,03 ± 0,97 (2D)	Eckzahn: 6,72 ± 3,41
		Molar: 0,68 ± 0,44 (2D)	Molar: 1,08 ± 0,77 (2D)	Molar: 3,90 ± 2,44
Beretta et al. (2014) [17]	Schleimhautgestützt	0,56 ± 0,23 (2D)	0,64 ± 0,29 (2D)	2,42 ± 1,02
Stübinger et al. (2014) [36]	Knochengestützt	0,71 ± 0,40 (3D)	0,77 ± 0,38 (3D)	2,39 ± 0,97
Verhamme et al. (2014) [37]	Schleimhautgestützt	1,96 ± 0,23 (3D)	2,29 ± 0,27 (3D)	3,93 ± 0,41
Vercruyssen et al. (2014) [38]	Schleimhautgestützt, partiell	1,23 ± 0,60 (2D)	1,57 ± 0,71 (2D)	2,86 ± 1,6
	Knochengestützt, partiell	1,60 ± 0,92 (2D)	1,65 ± 0,82 (2D)	3,79 ± 2,36
	Schleimhautgestützt, vollständig	1,38 ± 0,64 (2D)	1,60 ± 0,70 (2D)	2,71 ± 1,36
	Knochengestützt, vollständig	1,33 ± 0,82 (2D)	1,50 ± 0,72 (2D)	3,20 ± 2,70
Cassetta et al. (2014) [39]	Schleimhautgestützt	1,68 ± 0,60 (3D)	2,19 ± 0,83 (3D)	4,67 ± 2,68
Van de Wiele et al. (2014) [40]	Schleimhautgestützt	0,9 ± 0,5 (3D)	1,1 ± 0,5 (3D)	2,8 ± 1,5
Geng et al. (2015) [41]	Schleimhautgestützt	0,69 ± 0,66 (2D)	0,94 ± 0,75 (2D)	2,71 ± 2,58
Tallarico et al. (2015) [42]	Schleimhautgestützt	KA	KA	KA

Studie	Bohrschablone	Eintrittspunktabweichung (mm)	Apexabweichung (mm)	Winkelabweichung (°)
Verhamme et al. (2016) [43]	Schleimhautgestützt	2,05 ± 0,07 (3D)	1,60 ± 0,07 (3D)	5,02 ± 0,20
Cassetta et al. (2017) [31]	Schleimhautgestützt	Erfahren: 0,60 ± 0,25 (3D)	Erfahren: 0,67 ± 0,34 (3D)	Erfahren: 3,21 ± 1,57
		Unerfahren: 0,75 ± 0,18 (3D)	Unerfahren: 1,02 ± 0,44 (3D)	Unerfahren: 3,07 ± 2,70
Oh et al. (2017) [20]	Schleimhautgestützt	0,43 ± 0,16 (2D)	0,55 ± 0,25 (2D)	2,40 ± 1,43
Marra et al. (2017) [44]	Schleimhautgestützt	KA	KA	KA
Tonellini et al. (2018) [45]	Knochengestützt	0,76 ± 0,55 (2D)	0,57 ± 0,40 (2D)	2,16 ± 2,03
Venezze et al. (2018) [46]	KA	KA	KA	KA
Baruffaldi et al. (2020) [53]	Stapelbare Schablonen	KA	KA	KA
Liu et al. (2021) [57]	Schleimhautgestützt	KA	KA	KA
La Monaca et al. (2022) [5]	Schleimhautgestützt	KA	KA	KA
Manfredini et al. (2023) [60]	Stapelbare Schablonen	KA	KA	KA
Jaemsuwan et al. (2023) [7]	Knochengestützt	1,40 ± 0,72 (3D)	1,66 ± 0,61 (3D)	4,98 ± 2,16
Martins et al. (2024) [61]	Stapelbare Schablonen	KA	KA	KA

Tabelle 6: Auflistung der Abweichungen zwischen den geplanten und tatsächlichen Implantatpositionen bei der statischen CAIS in zahnlosen Kiefern. KA: Keine Angabe

<b>Studie</b>	<b>Sofortbelastung</b>
Kang et al. (2014) [34]	Nein (da in-vitro)
Beretta et al. (2014) [17]	Finale Prothese wurde nach 6 Monaten eingesetzt
Stübinger et al. (2014) [36]	Nein
Verhamme et al. (2014) [37]	Nein
Vercruyssen et al. (2014) [38]	Finale Prothese wurde nach 3-4 Monaten eingesetzt
Cassetta et al. (2014) [39]	Nein
Van de Wiele et al. (2014) [40]	Nein
Geng et al. (2015) [41]	Nein
Tallarico et al. (2015) [42]	Finale Prothese wurde nach 5 Monaten eingesetzt
Verhamme et al. (2016) [31,43]	Nein
Cassetta et al. (2017) [31]	Nein
Oh et al. (2017) [20]	Ja
Marra et al. (2017) [44]	Ja
Tonellini et al.(2018) [45]	Ja
Venezze et al. (2018) [46]	Ja
Baruffaldi et al. (2020) [53]	Ja
Liu et al. (2021) [57]	Ja
La Monaca et al. (2022) [5]	Ja
Manfredini et al. (2023) [60]	Ja
Jaemsuwan et al. (2023) [7]	Nein
Martins et al. (2024) [61]	Ja

*Tabelle 7: Durchführung einer Sofortbelastung bei den beschriebenen Studien zur statischen CAIS in zahnlosen Kiefern*

Studie	Conclusio
Kang et al. (2014) [34]	Sowohl im Eckzahn- als auch im Molarenbereich war die statische CAIS genauer als die dynamische.
Beretta et al. (2014) [17]	Bei einer kleinen Stichprobengröße (zwei Patient*innen) konnten die Implantate sehr präzise platziert werden.
Stübinger et al. (2014) [36]	Mit knochengestützten Bohrschablonen wurden sehr genaue Ergebnisse erreicht. Distal platzierte Implantate wiesen eine höhere Abweichung auf als mesial gelegene.
Verhamme et al. (2014) [37]	Auch bei Durchführung eines präimplantologischen Sinuslifts konnten mit Hilfe der statischen CAIS Implantate präzise positioniert werden. Wenn die Bohrschablone nicht über Fixierungsstifte im Knochen verankert wurde, kam es zu größeren Abweichungen von der geplanten Implantatposition.
Vercruyssen et al. (2014) [38]	Schleimhaut- und knochengestützte Bohrschablonen waren gleich genau. Im Vergleich zur Freihandimplantation und zu Pilotbohrschablonen war die statische CAIS signifikant genauer.
Cassetta et al. (2014) [39]	Mit im Knochen fixierten Bohrschablonen im Oberkiefer wurden bei Nichtrauchern die genauesten Ergebnisse erreicht. Zu deutlich ungenaueren Ergebnissen kam es bei nicht fixierten Bohrschablonen, Unterkiefern und Rauchern.
Van de Wiele et al. (2014) [40]	9 unerfahrene Operateur*innen erreichten unter der Aufsicht eines*einer erfahrenen Zahnarztes*Zahnärztin sehr genaue Implantatplatzierungen mittels statischer CAIS.
Geng et al. (2015) [41]	Zahngestützte Bohrschablonen führten zu genaueren Ergebnissen als schleimhautgestützte. Die teilweise und die vollständig geführte statische CAIS führte zu gleich genauen Ergebnissen.
Tallarico et al. (2015) [42]	Sowohl das All-on-4 als auch das All-on-6-Prinzip stellten geeignete Optionen im Rahmen der statischen CAIS bei vollständig zahnlosen Patient*innen dar.
Verhamme et al. (2016) [43]	Die Fixierung der Bohrschablone mit Osteosyntheseschrauben stellte eine geeignete Methode dar.
Cassetta et al. (2017) [31]	Die Erfahrung der Operateur*innen spielte nur eine geringe Rolle bei der Genauigkeit der statischen CAIS. Der Positionierungsfehler der Bohrschablone konnte jedoch mit zunehmender Erfahrung deutlich reduziert werden.
Oh et al. (2017) [20]	Bei der statischen CAIS ist es auch bei zahnlosen Patient*innen möglich, keine Röntgenschablone zu verwenden. In diesem Fallbeispiel wurden sehr genaue Implantatpositionierungen erzielt.
Marra et al. (2017) [44]	Bei Patient*innen mit implantatgetragenen Vollprothesen wurde eine höhere Zufriedenheit erreicht als bei Patient*innen mit herausnehmbaren Prothesen.

Studie	Conclusio
Tonellini et al. (2018) [45]	Wenn eine Knochenabtragung erforderlich ist, stellt die doppeltgeführte statische CAIS eine hervorragende Möglichkeit zur Vollrehabilitation zahnloser Kiefer dar.
Venezze et al. (2018) [46]	24h nach dem chirurgischen Eingriff konnten die Implantate mit dem Provisorium sofortbelastet werden.
Baruffaldi et al. (2020) [53]	Die Implantatüberlebensrate betrug 100% und es wurden über keine Komplikationen berichtet.
Liu et al. (2021) [57]	Sowohl die gesamte klinische Behandlungszeit als auch die postoperative Stuhlzeit waren bei der volldigitalisierten Gruppe (Provisorium wurde vorab mittels CAD/CAM hergestellt) signifikant kürzer als bei der konventionellen Gruppe (Provisorium wurde nach der Implantation nicht digitalisiert hergestellt).
La Monaca et al. (2022) [5]	Mit Hilfe der statischen CAIS konnten zahnlose Kiefer effektiv und sicher rehabilitiert werden.
Manfredini et al. (2023) [60]	Durch die Verwendung von stapelbaren Schablonen konnten sowohl die Bohrschablone als auch die provisorische Prothese an der Basisschablone fixiert werden.
Jaemsuwan et al. (2023) [7]	Die Ergebnisse zeigten keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen statischer und dynamischer CAIS. Beide computergestützten Verfahren waren im Vergleich zur konventionellen Freihandmethode deutlich genauer.
Martins et al. (2024) [61]	Der digitale Workflow unter der Verwendung von stapelbaren Schablonen stellte eine geeignete Methode zur Rehabilitation von zahnlosen Kiefern mit implantatgetragenen Vollbogenprothesen dar.

*Tabelle 8: Conclusio der beschriebenen Studien zur statischen CAIS in zahnlosen Kiefern*

### 3.2.2 Ergebnisse zur dynamischen CAIS in zahnlosen Kiefern

Die dynamische CAIS stellt in zahnlosen Kiefern einige Herausforderungen dar. Denn hier müssen die Referenzpunkte, die der Genauigkeitsverifizierung des dynamischen Systems vor und jederzeit während des Eingriffs dienen, invasiv über temporäre Mini-Implantate im Knochen befestigt werden. Dafür ist ein zusätzlicher operativer Eingriff bereits vor dem DVT-Scan notwendig, sowie das Entfernen der Mini-Implantate nach Abschluss des chirurgischen Verfahrens. Das ist deutlich aufwändiger als bei teilbezahnten Kiefern, wo noch vorhandene Zähne, bereits im Mund befindliche Implantate oder auch röntgenopake Marker (z.B. Guttapercha-Marker) auf einer thermoplastischen Schiene („Clip“), die an der Teilbezahnung befestigt wird, als Referenzpunkte dienen. [11] Auch die Tracking-Marker können nicht einfach an noch vorhandenen Zähnen befestigt werden, sondern müssen über die temporären Mini-Implantate im Knochen verankert werden. [11] Im weiter oben beschriebenen Fallbericht von Wang et al. [22] wurde der Tracking-Marker zwar über ein freihändig gesetztes Implantat befestigt, dies kann jedoch zu Ungenauigkeiten und Verletzungen benachbarter anatomischer Strukturen führen.

Für die Überlagerung der DVT- sowie IOS-Bilder sind röntgenopake Marker auf einer Röntgenschablone bzw. der vorhandenen Prothese notwendig. Somit ist es unumgänglich, eine neue DVT-Aufnahme anzufertigen, selbst wenn kürzlich erst eine solche Aufnahme vom Kiefer des\*der Patient\*in gemacht wurde. Dagegen können bei teilbezahnten Kiefern auch bereits vor kurzem aufgenommene DVT-Bilder herangezogen werden, bei denen die vorhandenen Zähne zur Überlappung der Bilder genutzt werden. Folglich ist insbesondere in Bezug auf zahnlose Kiefer die Literatur zur dynamischen CAIS begrenzt. [11]

Emery et al. [3] haben im Jahr 2016 die Genauigkeit der dynamisch navigierten Implantation bestimmt, indem sie die Positionen der von einem\*einer erfahrenen Operateur\*in in teilbezahnte und zahnlose Kiefermodelle gesetzten Implantate mit den virtuell geplanten verglichen. Insgesamt wurden 22 Implantate in 21 teilbezahnte und 25 Implantate in sechs zahnlose Modelle implantiert. Bei den teilbezahnten Kiefern kam diese Gruppe zu einer globalen Eintrittspunktabweichung von  $0,37 \pm 0,21$  mm, einer globalen Apexabweichung von  $0,38 \pm 0,21$  mm und einer Winkelabweichung von  $0,89^\circ \pm 0,35^\circ$  im Vergleich zu  $0,54 \pm 0,17$  mm (globale Eintrittspunktabweichung),  $0,56 \pm 0,17$  mm (globale Apexabweichung) und  $1,26 \pm 0,66^\circ$  (Winkelabweichung) bei den zahnlosen Kiefern. [3]

Stefanelli et. al [2] haben im Jahr 2018 ebenfalls eine dynamisch navigierte Implantationsstudie durchgeführt und die Genauigkeit durch den Vergleich der prä- und postoperativen DVT-Aufnahmen untersucht. Es wurden von einem\*einer Operateur\*in 231 Implantationen an gesamt 89 Kiefern von Patient\*innen durchgeführt, von denen 28 zahnlos und 61 teilbezahnt waren. Der\*die Operateur\*in wurde zuvor zwar geschult, hatte aber noch keine Erfahrungen mit dem dynamischen Navigationssystem. Die Ergebnisse aller Implantationen ergaben eine Eintrittspunktabweichung von  $0,71 \pm 0,40$  mm, eine globale Apexabweichung von  $1,00 \pm 0,49$  mm und eine Winkelabweichung von  $2,26 \pm 1,62^\circ$ . Dabei war die Genauigkeit bei den zahnlosen Kiefern, bei denen der Marker über ein Miniimplantat im Mund verankert wurde und bei den teilbezahnten Kiefern, bei denen die Befestigung des Markers über eine thermoplastische Schiene erfolgte, fast identisch. Ebenfalls wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen Implantaten im Ober- oder im Unterkiefer und zwischen den verschiedenen Sextanten beschrieben. Signifikant genauere Ergebnisse konnten bei den vollständig geführten Implantationen im Vergleich zu den partiell geführten, wo die Implantatinsertion nicht navigiert erfolgte, erzielt werden. Die letzten 50 Implantationen waren präziser als die ersten 50, was auf die wachsende Erfahrung des\*der Operateur\*in zurückzuführen ist. [2]

Pellegrino et al. [47] führten 2019 eine klinische Pilotstudie zur dynamischen CAIS an 10 Patient\*innen durch, von denen acht teilbezahnt und zwei zahnlos waren. Bei den zahnlosen Patient\*innen wurde bereits vor der präoperativen DVT-Aufnahme ein provisorisches Implantat median am Kiefer gesetzt, das der Befestigung des Tracking-Markers während des chirurgischen Eingriffs diente. Bei einem der zahnlosen Patient\*innen wurde eine Röntgenschablone während der DVT verwendet, beim anderen wurde die Prothese virtuell geplant, wobei das provisorische Implantat als Referenzmarker diente. Insgesamt wurden 18 Implantate mittels dynamischer Navigation implantiert, wobei bei 10 ein lappenloser Ansatz verwendet wurde. Ob es sich dabei um zahnlose oder teilbezahnte Patient\*innen handelte, ist nicht erkenntlich. Laut Pellegrino et al. zeigte das verwendete Navigationssystem keine Genauigkeitsunterschiede zwischen teilbezahnten und zahnlosen Patient\*innen und die Ergebnisse wurden insgesamt für beide Gruppen zusammen angegeben. Die koronale Eintrittspunktabweichung betrug  $1,04 \pm 0,47$  mm, die Apexabweichung  $1,35 \pm 0,56$  mm und die Winkelabweichung  $6,46 \pm 3,95^\circ$ . Es wurde kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Ansätzen ohne Lappenpräparation und denen mit abpräpariertem Mukoperiostlappen festgestellt. [47]

Eine weitere Studie von Pellegrino et al. [52] untersuchte 2020 den Einfluss der Erfahrung von vier verschiedenen Operateur\*innen auf die Genauigkeit sowie die Operationszeit der dynamischen CAIS. Bei den Operateur\*innen handelte es sich um zwei Chirurg\*innen mit mehr als 10 Jahren Erfahrung in der Implantatchirurgie, wobei einer bereits Erfahrung mit dem dynamischen Navigationssystem hatte. Der\*die dritte Operateur\*in wies zwar bereits Erfahrung mit dem dynamischen Navigationssystem auf, war jedoch grundsätzlich in der Implantatchirurgie unerfahren. Der\*die vierte Operateur\*in verfügte über keinerlei Erfahrung sowohl in der Implantatchirurgie als auch im Umgang mit dem dynamischen Navigationssystem. Insgesamt wurden 112 Implantate in 16 zahnlose Oberkiefermodelle implantiert, wobei jede\*r Operateur\*in 28 Implantate in vier Modellen platzierte. Die Genauigkeitsanalyse ergab keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Operateur\*innen. Insgesamt wurde über eine globale Eintrittspunktabweichung von  $1,58 \pm 0,80$  mm, eine globale Apexabweichung von  $1,61 \pm 0,75$  mm und eine Winkelabweichung von  $4,24 \pm 2,52^\circ$  berichtet. Der\*die Operateur\*in, der bereits Erfahrungen in der Implantatchirurgie sowie mit dem dynamischen Navigationssystem hatte, benötigte weniger Zeit für die Operation als die anderen Operateur\*innen. Laut Pellegrino et al. sind diese Unterschiede jedoch klinisch nicht relevant. Somit kann zusammenfassend gesagt werden, dass auch ein\*e Operateur\*in, der zum ersten Mal ein dynamisches Navigationssystem verwendet, genaue Ergebnisse in einer akzeptablen Operationszeit erreichen kann. [52]

In einer weiteren Studie von Stefanelli et al. [54], jedoch aus dem Jahr 2020, wurden 77 Implantate bei 13 zukünftig zahnlosen Patient\*innen mittels dynamischer CAIS implantiert. Es handelte sich um Patient\*innen mit teilbezahnten Zahnbögen, die eine implantatgetragene Vollbogenprothese benötigten. Die Teilbezahnung (mindestens drei stabile Zähne) diente der Überlappung der DVT- und IOS-Aufnahmen, wodurch hier keine röntgenopaken Marker erforderlich waren. Außerdem musste keine Röntgenschablone hergestellt und auch ein bereits vor kurzem aufgenommenes DVT-Bild des jeweiligen Patient\*innen konnte herangezogen werden. In der Planungssoftware wurde ein virtuelles Wax-up der fehlenden Zähne erstellt und die Implantate prothetisch geplant. Der Tracking-Marker wurde während des chirurgischen Eingriffs an der Teilbezahnung befestigt. Die vorhandenen Zähne dienten zusätzlich als Referenzpunkte zur Genauigkeitsüberprüfung des dynamischen Systems, wodurch keine Mini-Implantate erforderlich waren. Nach der Implantation wurden die noch vorhandenen Zähne extrahiert. Es wurden Abdrücke

genommen und eine provisorische Prothese hergestellt, die nach 6 Stunden eingesetzt wurde. Als Ergebnis wurde eine Implantaterfolgsrate von 94,8% beschrieben, wobei es zu vier Implantatverlusten bereits während der Einheilphase kam. Zusätzlich kam man zu dem Ergebnis, dass bei Kiefern mit 3-4 verbleibenden Zähnen signifikant ungenauere Implantatpositionierungen erzielt wurden als bei 5-6 Zähnen. Die Relevanz dieses Unterschiedes ist jedoch vernachlässigbar, da insgesamt sehr genaue Implantatpositionierungen erzielt wurden (Tabelle 10). Jedoch ist diese Methode bei Patient\*innen, die von vornherein zahnlos sind, nicht anwendbar. [54]

Stefanelli et al. [55] haben 2020 noch eine weitere Studie zur dynamischen CAIS durchgeführt. Hier wurden bei 14 Patient\*innen je vier Implantate im Frontalbereich und zwei Implantate im Bereich des Processus Pterygoideus im zahnlosen Oberkiefer implantiert. Die Pterygoidimplantate stellten eine Alternative zur Knochenaugmentation im atrophischen Kiefer dar. Die Vollbogenimplantate wurden anschließend sofort belastet. Bei einer Patient\*in versagte ein Pterygoidimplantat auf Grund mangelnder Primärstabilität. Insgesamt ergab die Genauigkeitsanalyse eine koronale Eintrittspunktabweichung von  $0,66 \pm 0,35$  mm, eine globale Apexabweichung von  $1,01 \pm 0,46$  mm und eine Winkelabweichung von  $2,61 \pm 1,29^\circ$ . Dabei waren die jeweiligen Werte für die Pterygoidimplantate bzw. die Frontalimplantate  $0,72 \pm 0,28$  mm bzw.  $0,64 \pm 0,37$  mm (koronale Eintrittspunktabweichung),  $1,25 \pm 0,46$  mm bzw.  $0,89 \pm 0,42$  mm (globale Apexabweichung) und  $2,86 \pm 1,56^\circ$  bzw.  $2,49 \pm 1,14^\circ$  (Winkelabweichung). Statistisch signifikant unterschieden sich nur die Werte bei der globalen Apexabweichung. Schlussfolgernd kann gesagt werden, dass Pterygoidimplantate statt Knochenaugmentationen eine gute Möglichkeit darstellen, wodurch die Behandlungszeit verkürzt wird und ein minimalinvasiver Eingriff möglich ist. [55]

Pozzi et al. [4] haben 2021 im Rahmen einer prospektiven Einzelkohortenstudie insgesamt 60 Implantate bei 10 Patient\*innen mittels dynamischer CAIS implantiert, die im Anschluss mit digital designten provisorischen Vollbogenprothesen sofort belastet wurden. Dabei benötigte jede\*r Patient\*in zumindest eine implantatgetragene Vollbogenprothese. Die Patient\*innen wurden mindestens ein Jahr nach dem chirurgischen Eingriff nachgesorgt und als Ergebnisse wurden die Implantat- sowie Prothesenerfolgsraten beschrieben. Es kam nur zu einem Implantatverlust, und das noch vor dem Einsetzen der finalen prothetischen Versorgung, was einer Implantaterfolgsrate von 98,3% entsprach. Die prothetische Erfolgsrate betrug 100%. Durch den volldigitalisierten Workflow, der von der

Implantatinsertion bis hin zur prothetischen Versorgung reichte, konnten hohe Erfolgsraten bei Implantaten und Prothesen erreicht werden. Hinsichtlich der Genauigkeit der Implantatpositionierungen wurden in dieser Studie keine Aussagen gemacht. [4]

Beim weiter oben beschriebenen Fallbeispiel aus dem Jahr 2021 von Wang et al. [22], bei dem 10 Implantate mittels dynamischer Navigation in die zahnlosen Kiefer einer Patientin eingesetzt wurden, ergab die Genauigkeitsanalyse eine Eintrittspunktabweichung von  $0,85 \pm 0,39$  mm, eine Apexabweichung von  $0,91 \pm 0,44$  mm und eine Winkelabweichung von  $2,3 \pm 1,1^\circ$ . [22]

Studie	Studiendesign	Software	OK/ UK	Anzahl Implantate	Anzahl Kiefer	Anzahl Patient*innen	Anzahl Chirurg*innen
Kang et al. (2014) [34]	In-vitro	CBYON Suite	UK	40	10	10 Modelle	1
Emery et al. (2016) [3]	In-vitro	X-Guide	OK, UK	25	6	6 Modelle	1
Stefanelli et al. (2018) [2]	In-vivo, retrospektiv	Navident	OK, UK	231	89 (davon 28 zahnlos)	KA	1
Pellegrino et al. (2019) [47]	In-vivo, prospektiv, klinisch, Pilotstudie	ImplaNav	OK, UK	18 (zahnlos + teilbezahnt)	KA	10 Patient*innen (davon 2 zahnlos)	1
Pellegrino et al. (2020) [52]	In-vitro, randomisiert	ImplaNav	OK	112	16	16 Modelle	4
Stefanelli et al. (2020) - 1 [54]	In-vivo, Fallserie	Navident	OK, UK	77	KA	13	1
Stefanelli et al. (2020) - 2 [55]	In-vivo, klinisch, retrospektiv, einfach verblindet, Fallserie	Navident	OK	84	14	14	1
Pozzi et al. (2021) [4]	In-vivo, prospektiv, Einzelkohortenstudie	X-Guide	OK, UK	60	14	10	1
Wang et al. (2021) [22]	In-vivo, Fallbericht	Yizhimei	OK, UK	10	2	1	1
Jaemsuwan et al. (2023) [7]	In-vivo, nicht randomisiert, prospektiv	Iris-100	OK, UK	20	KA	KA	1

Tabelle 9: Veranschaulichung der Studien zur dynamischen CAIS in zahnlosen Kiefern. KA: Keine Angabe, OK: Oberkiefer, UK: Unterkiefer

Studie	Eintrittspunktabweichung (mm)	Apexabweichung (mm)	Winkelabweichung (°)
Kang et al. (2014) [34]	Eckzahn: 2,06 ± 1,43 (2D)	Eckzahn: 2,76 ± 1,03 (2D)	Eckzahn: 12,37 ± 4,18
	Molar: 3,03 ± 1,81 (2D)	Molar: 3,31 ± 2,07 (2D)	Molar: 8,97 ± 3,83
Emery et al. (2016) [3]	0,54 ± 0,17 (3D)	0,56 ± 0,17 (3D)	1,26 ± 0,66
Stefanelli et al. (2018) [2]	0,71 ± 0,40 (2D)	1,00 ± 0,49 (3D)	2,26 ± 1,62
Pellegrino et al. (2019) [47]	1,04 ± 0,47 (2D)	1,35 ± 0,56 (2D)	6,46 ± 3,95
Pellegrino et al. (2020) [52]	1,58 ± 0,80 (3D)	1,61 ± 0,75 (3D)	4,24 ± 2,52
Stefanelli et al. (2020) - 1 [54]	3-4 Zähne: 0,72 ± 0,32 (2D)	3-4 Zähne: 1,17 ± 0,31 (2D)	3-4 Zähne: 3,10 ± 1,02
	5-6 Zähne: 0,61 ± 0,33 (2D)	5-6 Zähne: 0,88 ± 0,37 (2D)	5-6 Zähne: 2,41 ± 0,98
Stefanelli et al. (2020) - 2 [55]	Insgesamt: 0,66 ± 0,35 (2D)	Insgesamt: 1,01 ± 0,46 (3D)	Insgesamt: 2,61 ± 1,29
	Frontalimplantate: 0,64 ± 0,37 (2D)	Frontalimplantate: 0,89 ± 0,42 (3D)	Frontalimplantate: 2,49 ± 1,14
	Pterygoidimplantate: 0,72 ± 0,28 (2D)	Pterygoidimplantate: 1,25 ± 0,46 (3D)	Pterygoidimplantate: 2,86 ± 1,56
Pozzi et al. (2021) [4]	KA	KA	KA
Wang et al. (2021) [22]	0,85 ± 0,39 (2D)	0,91 ± 0,44 (2D)	2,3 ± 1,1
Jaemsuwan et al. (2023) [7]	1,73 ± 0,43 (3D)	1,86 ± 0,82 (3D)	5,75 ± 2,09

Tabelle 10: Auflistung der Abweichungen zwischen den geplanten und tatsächlichen Implantatpositionen bei der dynamischen CAIS in zahnlosen Kiefern. KA: Keine Angabe

Studie	Sofortbelastung
Kang et al. (2014) [34]	Nein (da in-vitro)
Emery et al. (2016) [3]	Nein (da in-vitro)
Stefanelli et al. (2018) [2]	Nein
Pellegrino et al. (2019) [47]	Ja (abnehmbare Prothese mit Locator)
Pellegrino et al. (2020) [52]	Nein (da in-vitro)
Stefanelli et al. (2020) - 1 [54]	Ja
Stefanelli et al. (2020) - 2 [55]	Ja
Pozzi et al. (2021) [4]	Ja
Wang et al. (2021) [22]	Ja
Jaemsuwan et al. (2023) [7]	Nein

*Tabelle 11: Durchführung einer Sofortbelastung bei den beschriebenen Studien zur dynamischen CAIS in zahnlosen Kiefern*

Studie	Conclusio
Kang et al. (2014) [34]	Sowohl im Eckzahn- als auch im Molarenbereich war die statische CAIS genauer als die dynamische.
Emery et al. (2016) [3]	Mittels dynamischer CAIS konnten sowohl in teilbezahnten als auch in zahnlosen Kiefermodellen hohe Genauigkeiten hinsichtlich der Implantatpositionierung erreicht werden.
Stefanelli et al. (2018) [2]	Mittels dynamischer CAIS konnte eine sehr genaue Implantatpositionierung erreicht werden. Die Genauigkeit war bei zahnlosen und bei teilbezahnten Kiefern fast identisch.
Pellegrino et al. (2019) [47]	Bei den Ergebnissen wurde nicht zwischen teilbezahnten und zahnlosen Patient*innen unterteilt. Es wurde kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Ansätzen ohne Lappenpräparation und denen mit abpräpariertem Mukoperiostlappen festgestellt.
Pellegrino et al. (2020) [52]	Hinsichtlich der Genauigkeit gab es keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen Operateur*innen mit verschiedener Erfahrung.
Stefanelli et al. (2020) - 1 [54]	Implantatgetragene Vollbogenprothesen konnten sehr genau in künftig zahnlose Kiefer eingesetzt werden, wobei die Restbeziehung erst nach der Implantation extrahiert wurde.

Studie	Conclusio
Stefanelli et al. (2020) - 2 [55]	Pterygoidimplantate, die mittels dynamischer CAIS implantiert werden, stellen eine gute Alternative zu Knochenaugmentationen dar.
Pozzi et al. (2021) [4]	Durch einen volldigitalisierten Workflow, der von der Implantatinsertion bis hin zur prothetischen Versorgung reichte, konnten hohe Erfolgsraten bei Implantaten und Prothesen erreicht werden.
Wang et al. (2021) [22]	Alle Implantate konnten exakt wie virtuell geplant implantiert werden.
Jaemsuwan et al. (2023) [7]	Die Ergebnisse zeigten keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen statischer und dynamischer CAIS. Beide computergestützten Verfahren waren im Vergleich zur konventionellen Freihandmethode deutlich genauer.

*Tabelle 12: Conclusio der beschriebenen Studien zur dynamischen CAIS in zahnlosen Kiefern*

### 3.2.3 Ergebnisse zur Kombination von statischer und dynamischer CAIS in zahnlosen Kiefern

Pomares-Puig et al. [29] haben 2023 die statische und dynamische CAIS in zahnlosen Kiefern kombiniert und die Genauigkeit der sogenannten „Doppelfaktor-Technik“ analysiert. 10 zahnlose Patient\*innen wurden nach dem All-on-four-Prinzip von einem\*einer Operateur\*in behandelt und bekamen nach der Operation ein Sofortprovisorium. Insgesamt wurden 48 Implantate eingesetzt, da zwei Patient\*innen sowohl im Ober- als auch im Unterkiefer eine Behandlung erhielten. Es wurde ein lappenloser Ansatz unter der Verwendung einer schleimhautgestützten Bohrschablone durchgeführt. Als Ergebnis kam diese Gruppe zu einer Winkelabweichung von  $3,74 \pm 2,00^\circ$ , einer globalen Eintrittspunktabweichung von  $1,25 \pm 0,55$  mm und einer globalen Apexabweichung von  $1,42 \pm 0,64$  mm (Tabelle 13). Zwischen Implantaten im Ober- und Unterkiefer wurden keine statistisch signifikanten Unterschiede beobachtet. Zusätzlich wurde über eine hohe Patient\*innenzufriedenheit berichtet. Die Operationszeit betrug in etwa 30 Minuten, was ebenfalls zur Patient\*innenfreundlichkeit beigetragen hat. Pomares-Puig et al. kamen zu dem Ergebnis, dass die Kombination von statischer und dynamischer CAIS eine genaue und minimalinvasive Methode für die Behandlung von zahnlosen Patient\*innen darstellt. [29]

Studiendesign	Software	OK/ UK	Anzahl Implantate	Anzahl Kiefer	Anzahl Patient*innen	Anzahl Chirurg*innen
In-vivo, prospektiv, klinisch, keine Kontrollgruppe	DTX Studio, X-Guide	OK, UK	48	12	10	1
Bohrschablone	Eintrittspunkt- abweichung (mm)		Apexabweichung (mm)		Winkelabweichung (°)	
Schleimhautgestützt	$1,25 \pm 0,55$ (3D)		$1,42 \pm 0,64$ (3D)		$3,74 \pm 2,00$	

Tabelle 13: Tabellarische Darstellung der beschriebenen Studie zur kombinierten statischen und dynamischen CAIS

## 4 Diskussion und Schlussfolgerung

Die computergestützte Implantatchirurgie ermöglicht positionsgenaueres Einsetzen von virtuell geplanten Implantaten im tatsächlichen Operationsgebiet, entweder durch statische Bohrschablonen oder dynamische Tracking-Systeme. Nicht nur die Genauigkeit, sondern auch die minimale Invasivität sowie die Möglichkeit der sofortigen Belastung durch zuvor mittels CAD/CAM geplante und hergestellte provisorische Prothesen, bieten deutliche Vorteile im Vergleich zur konventionellen Freihandimplantation.

Obwohl der Literaturvergleich zwischen statischer und dynamischer CAIS kontroverse Ergebnisse ergab, besagten die meisten Studien, dass beide Methoden gleich genau sind. Somit waren in acht der 14 Studien, die die statische und die dynamische CAIS direkt miteinander verglichen haben, beide Methoden gleich genau (Somogyi-Ganss et al. [35], Franchina et al. [49,51], Yimarj et al. [49], Kaewsiri et al. [18], Kivovics et al. [58], Wu et al. [50], Jaemsuwan et al. [7], González Rueda et al. [23]). In einer Studie war die statische Methode genauer (Kang et al. [34]) und in drei Studien die dynamische (Guzmán et al. [48], Sun et al. [15], Zhou et al. [56]). In zwei Studien konnten zwar keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich Eintrittspunkt-, Apex- und Winkelabweichungen gefunden werden, jedoch unterschieden sich die bukkolingualen und mesiodistalen Abweichungen (Taheri Otaghsara et al. [12]) bzw. die labiopalatinalen Abweichungen (Yuzhang et al. [59]) zwischen den beiden Methoden. Die kontroversen Ergebnisse der verschiedenen Studien lassen sich auf verschiedene Bedingungen, wie unter anderem unterschiedliche Implantationsstellen, verschiedene Operateur\*innen, die Verwendung von DVT oder Intraoralscanner für postoperative Genauigkeitsvergleiche sowie in-vitro oder in-vivo Durchführungen, zurückführen. [12] Unter in-vivo Bedingungen beeinflussen Zahnfleisch, Blut, Speichel und der Grad der Mundöffnung die Ergebnisse, wohingegen diese Faktoren bei einer in-vitro Studie keine Rolle spielen. [50]

Die statische CAIS ist vor allem dadurch limitiert, dass intraoperativ keine Veränderungen von der virtuellen Planung möglich sind, da dafür die Bohrschablone entfernt und die Bohrung bzw. Implantatpositionierung freihändig fortgesetzt werden müssten. Da bei der dynamischen CAIS die Bohrung und Implantatinsertion freihändig unter gleichzeitiger Positionsverfolgung in Echtzeit am Computerbildschirm erfolgen, sind hier Anpassungen an intraoperative Gegebenheiten möglich. Jedoch stellt die dynamische Methode vor allem bei vollständig zahnlosen Patient\*innen eine große Herausforderung dar, was auch der Grund

dafür ist, dass in dieser Arbeit 21 Studien zur statischen CAIS im zahnlosen Kiefer gefunden wurden, und nur 10 zur dynamischen. Denn hier kommt es zu großem Zeitaufwand und technischen Schwierigkeiten aufgrund der nicht vorhandenen Möglichkeit, die Tracking-Marker und Referenzpunkte an noch vorhandenen Zähnen zu befestigen. Die dadurch notwendige invasive Befestigung mit Hilfe von temporären Mini-Implantaten gefährdet den eigentlichen Hauptvorteil dieser Methode – und zwar den minimalinvasiven und Stuhlzeit-sparenden Ablauf. [11] Die Kombination von statischer und dynamischer CAIS („Doppelfaktor-Technik“) stellt eine neuartige Methode dar, um diese Herausforderungen zu umgehen. Durch die doppelte Führungstechnik wird einerseits die präzise Führung des Bohrers zur geplanten Implantationsstelle sowie die Insertion des Implantats selbst durch die Führungselemente in der Bohrschablone ermöglicht. Andererseits können intraoperativ mögliche Ungenauigkeiten sofort erkannt und durch das dynamische System behoben werden. Jedoch sollten der zusätzliche zeitliche Aufwand und die hohen Kosten berücksichtigt werden, die einerseits durch die Anschaffung eines dynamischen Navigationssystems und andererseits durch die Herstellung der statischen Bohrschablone entstehen. Denn das Outcome beider separaten Methoden erzielt ähnlich genaue Ergebnisse. [29]

Die Aktualität der in dieser Arbeit verwendeten Publikationen weist eine breite Verteilung über die letzten zehn Jahre auf. Neben den neusten Publikationen wurden in dieser Arbeit auch ältere Studien einbezogen, um einen breiten Zeitraum abzudecken und die Vollständigkeit sicherzustellen. Somit wurde bereits vor Verfassung dieser Arbeit ein Veröffentlichungszeitraum von 2014 bis 2024 definiert. Die meisten in dieser Arbeit verwendeten Publikationen (acht), stammen aus dem Jahr 2014. Diese könnten jedoch auf Grund der raschen Weiterentwicklung der Technologien nicht mehr am neuesten Stand sein. Ebenfalls können die Arbeiten aus den Jahren 2015 (2), 2016 (2), 2017 (3) und 2018 (3) als eher alt angesehen werden. Dahingegen sind die drei Publikationen aus 2019 und acht Publikationen aus 2020 relativ aktuell. Am neuesten Stand sind die Arbeiten aus den Jahren 2021 (4) und 2022 (3). Ein ganz besonderes Augenmerk ist außerdem auf die fünf Publikationen aus 2023 und die eine Publikation aus 2024 zu legen, da jene die neuesten und aktuellsten Erkenntnisse liefern.

Eine Limitation dieser Arbeit ist mit Sicherheit die begrenzte Verfügbarkeit von Volltexten, insbesondere bei aktuellen Veröffentlichungen. Die meisten verwendeten Studien stammen aus dem Jahr 2014, da für ältere Arbeiten mehr Volltexte verfügbar sind. Hätte sich diese

Arbeit nicht nur auf verfügbare Volltexte beschränkt, sondern auch Studien ohne zugängliche Volltexte auf Basis der Abstracts einbezogen, wären sicherlich aktuellere Studien berücksichtigt worden. Allerdings hätte bei dieser Methode der betrachtete Zeitraum der verwendeten Literatur verkleinert werden müssen, beispielsweise auf die letzten fünf Jahre (2019-2024), um den Umfang der Arbeit nicht zu sprengen. Werden jedoch auch Publikationen einbezogen, bei denen nur Abstracts verfügbar sind, muss berücksichtigt werden, dass hier nur ein sehr kleiner Teil der Informationen zugänglich ist. Dadurch besteht die Gefahr, dass wichtige Inhalte übersehen werden. Eine weitere Einschränkung dieser Literaturrecherche ist die mangelnde Garantie auf Vollständigkeit. Wie bereits erwähnt, wurde die Literatursuche nach bestem Wissen und Gewissen durchgeführt. In verwendeten Publikationen zitierte Studien wurden gründlich durchsucht und neben dem Suchterminus wurden die definierten Schlagwörter in diversen Kombinationen in die Datenbank PubMed eingegeben. Dennoch ist es trotzdem möglich, dass einige relevante Publikationen übersehen wurden und daher nicht in diese Arbeit einbezogen werden konnten.

Wenn man die Studien bezüglich ihres Studiendesigns bewertet, kommt man auf eine Mischung unterschiedlicher Studienarten. 10 Studien wurden im Labor unter In-vitro-Bedingungen an Kiefermodellen durchgeführt. Hier hat man zwar kontrollierte Bedingungen, ihre Übertragbarkeit auf klinische Eingriffe am echten Menschen ist aber begrenzt. Denn wie bereits beschrieben, sind unter In-vitro-Bedingungen Störfaktoren wie Zahnfleisch, Blut, Speichel und der Grad der Mundöffnung nicht vorhanden. Die 31 In-vivo-Studien, welche an Patient\*innen durchgeführt wurden, bieten hingegen realistischere Einblicke und Daten. Eine Publikation beschreibt ausschließlich eine Technik, liefert jedoch keine klinische Untersuchung. Sie zeigt aber wertvolle methodische Einblicke. 34 von den verwendeten Studien wurden prospektiv durchgeführt, was eine gute Kontrolle und Aussagekraft ermöglicht. Die übrigen sieben Studien waren retrospektiv und analysierten bereits vorhandene Daten. Diese Methode ist manchmal weniger aufwendig, kann jedoch durch unkontrollierte Variablen die Datenqualität beeinträchtigen. Von den inkludierten Publikationen waren 12 randomisierte kontrollierte Studien, die als die beste Methodik gelten. Drei Studien waren zwar nicht randomisiert, dennoch aber kontrolliert, was ebenfalls einen hohen Standard darstellt. Da die Zuteilung zu den jeweiligen Gruppen aber nicht zufällig erfolgte, könnten der\*die Operateur\*in und/oder der\*die Patient\*in voreingenommen sein und die Ergebnisse beeinflussen. Außerdem wurden in diese Arbeit sieben Fallberichte oder -serien einbezogen. Diese stellen eine gute Beschreibung der

Methode dar, haben aber eine begrenzte Generalisierbarkeit. Daneben waren fünf der Studien Pilotstudien, die als Voruntersuchungen für größere klinische Studien dienten. Die geringe Stichprobengröße dieser Pilotstudien ist allerdings zu beachten. Zwei Studien waren Kohortenstudien, die oft teuer und zeitaufwendig sind, jedoch eine Gruppe von Personen über einen langen Zeitraum hinweg beobachten und somit wertvolle Daten liefern. Insgesamt zeigt diese Literaturarbeit eine breite Mischung aus experimentellen und beobachtenden Studien, mit einem starken Fokus auf prospektive und randomisierte Designs, was eine hohe Aussagekraft beinhaltet.

Hinsichtlich der Sofortversorgung, die dem\*der Patient\*in ein rasches funktionelles und ästhetisches Ergebnis bietet, ist eine präzise Übertragung der geplanten Implantatpositionen von der Software in den Patient\*innenmund äußerst wichtig. Dadurch kann die Behandlungszeit für den\*die Patient\*in deutlich herabgesetzt werden und eine höhere Akzeptanz geschaffen werden. Denn nur durch vorhersagbare und reproduzierbare Ergebnisse können beispielsweise präfabrizierte Provisorien oder auch finale prothetische Arbeiten mit Erfolg eingesetzt werden. Die in dieser Literaturrecherche erarbeiteten Publikationen zeigen, dass die computergestützte Implantatchirurgie sowie die anschließende Sofortversorgung aufgrund ihrer vielen Vorteile immer mehr an Bedeutung gewinnen. Dank der zur Verfügung stehenden modernen Technologien und einer präzisen präoperativen Planung sowie Ausführung, kann eine rasche ästhetische und funktionelle Rehabilitation des\*der Patient\*in erfolgen. Um eine erfolgreiche Umsetzung der Behandlung zu ermöglichen, ist eine sorgfältige Patient\*innenselektion sowie eine exakte Planung der Implantate und ihrer Übertragung in den Patient\*innenmund von großer Wichtigkeit. Außerdem bedarf es nicht nur einem erfahrenen Implantologen, sondern auch einem gut geschulten Team, welches mit der Technik vertraut ist.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sowohl die statische als auch die dynamische CAIS sehr gute Ergebnisse erzielen. Besonders für all jene, die eine rasche und effektive Lösung mit kurzer Stuhlzeit sowie hoher Patient\*innenzufriedenheit wünschen, stellt die computergestützte Implantatchirurgie eine hervorragende Möglichkeit dar. Durch den stetigen Fortschritt der Technik und neuen Möglichkeiten, ist davon auszugehen, dass die Bedeutung der navigierten Implantation mit anschließender Sofortversorgung immer mehr steigt.

## 5 Ausblick in die Zukunft

Die Technologie schreitet immer weiter voran. Das gilt sowohl für die Hardware als auch für die Software, wodurch Datenerfassung, Verarbeitung und Ausführung immer einfacher und schneller werden. Zusätzliche Hilfsmittel wie das digitales Wax-up der geplanten Prothese können bei der Bestimmung der Implantatposition, der voraussagbaren prothetischen Belastung, Verbesserungen sowie Korrekturen behilflich sein. Auch die stetige Entwicklung und steigende Auflösung der Resin-Drucker führt laufend zu präziseren Ergebnissen. [6]

Neue Technologien wie die Verwendung von AR- Brillen (Augmented Reality) durch den\*die Operateur\*in werden bereits in die Praxis umgesetzt. Hierbei ist in der Brille ein Bildschirm integriert, welcher Daten in das Sichtfeld des\*der Operateur\*in projiziert. Dadurch kann die reale Umgebung mit der digitalen überlagert werden oder mit ihr interagieren. Diese Brille ermöglicht somit patient\*innenbezogene Daten, Röntgenbilder, 3D-Rekonstruktionen oder einen dynamischen Navigationsbildschirm zu visualisieren. Besonders Letzteres ist von Vorteil, da hier der\*die Operateur\*in keine Kopfbewegung machen muss, um bei der dynamischen CAIS sowohl den Bildschirm als auch das Operationsgebiet im Blick zu behalten. [58,63]

Weitere Forschungen stützen sich auf die Verwendung von Robotern bei Zahnimplantationen. Von ihnen erwartet man, dass sie zuverlässiger sind, vorhersagbarere Ergebnisse und präzisere Outcomes liefern. Des Weiteren sollte das Verletzungsrisiko, welches durch irrtümliches Auslenken der Instrumente entstehe, verringert werden. Auch hierfür wird ein dynamischer Zugang gewählt, bei dem mit Hilfe von Tracking-Marker und Kameras sowohl die Position vom Kiefer des\*der Patient\*in als auch die des Roboterarms im Raum ermittelt werden. Beide Technologien sind aktuell noch in der Probephase, wobei schon über erste Einsätze und Erfolge berichtet wird. [33,64]

## 6 Literatur

- 1 *Fortin T, Coudert JL, Champleboux G et al.* Computer-assisted dental implant surgery using computed tomography. *Journal of image guided surgery* 1995; 1(1)
- 2 *Stefanelli LV, DeGroot BS, Lipton DI, Mandelaris GA.* Accuracy of a Dynamic Dental Implant Navigation System in a Private Practice. *The International journal of oral & maxillofacial implants* 2018; 34(1): 205–213
- 3 *Emery RW, Merritt SA, Lank K, Gibbs JD.* Accuracy of Dynamic Navigation for Dental Implant Placement–Model-Based Evaluation. *J Oral Implantol* 2016; 42(5): 399–405
- 4 *Pozzi A, Hansson L, Carosi P, Arcuri L.* Dynamic navigation guided surgery and prosthetics for immediate loading of complete-arch restoration. *Journal of esthetic and restorative dentistry official publication of the American Academy of Esthetic Dentistry ... [et al.]* 2021; 33(1): 224–236
- 5 *Gerardo La Monaca, Nicola Pranno, Susanna Annibali et al.* Immediate flapless full-arch rehabilitation of edentulous jaws on 4 or 6 implants according to the prosthetic-driven planning and guided implant surgery: A retrospective study on clinical and radiographic outcomes up to 10 years of follow-up. *Clinical Implant Dentistry and Related Research* 2022; 24(6): 831
- 6 *Gunalan Kalaivani, Venkateshwarapuram Rengaswami Balaji, Dhanasekaran Manikandan, Govindasamy Rohini.* Expectation and reality of guided implant surgery protocol using computer-assisted static and dynamic navigation system at present scenario: Evidence-based literature review. *Journal of Indian Society of Periodontology* 2020; 24(5): 398
- 7 *Jaemsuwan S, Arunjaroen suk S, Kaboosaya B et al.* 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. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery* 2023; 52(2): 264–271
- 8 *Elluru Venkatesh, Snehal Venkatesh Elluru.* Cone beam computed tomography: basics and applications in dentistry. *Journal of Istanbul University Faculty of Dentistry* 2017; 51(3 Suppl 1): S102

- 9 *Loubele M, Bogaerts R, Van DE et al.* Comparison between effective radiation dose of CBCT and MSCT scanners for dentomaxillofacial applications. *European journal of radiology* 2009; 71(3)
- 10 *D'haese J, Ackhurst J, Wismeijer D et al.* Current state of the art of computer-guided implant surgery. *Periodontology* 2000 2017; 73(1): 121–133
- 11 *Pomares-Puig C, Sánchez-Garcés MA, Jorba-García A.* Dynamic and static computer-guided surgery using the double-factor technique for completely edentulous patients: A dental technique. *The Journal of prosthetic dentistry* 2022; 128(5): 852–857
- 12 *Taheri Otaghsara SS, Joda T, Thieringer FM.* Accuracy of dental implant placement using static versus dynamic computer-assisted implant surgery: An in vitro study. *Journal of Dentistry* 2023; 132: 104487
- 13 *Spitta Verlag GmbH & KG C.* Navigierte Implantologie – Möglichkeiten und Grenzen; 2024.000Z. [https://www.zmk-aktuell.de/fachgebiete/implantologie/story/navigierte-implantologie-%25E2-m%25E3glichkeiten-und-grenzen\\_\\_12957.html](https://www.zmk-aktuell.de/fachgebiete/implantologie/story/navigierte-implantologie-%25E2-m%25E3glichkeiten-und-grenzen__12957.html) (07.01.2024.979Z)
- 14 *Gargallo-Albiol J, Barootchi S, Salomó-Coll O, Wang H-l.* Advantages and disadvantages of implant navigation surgery. A systematic review. *Annals of Anatomy - Anatomischer Anzeiger* 2019; 225: 1–10
- 15 *Sun T-M, Lee H-E, Lan T-H.* Comparing Accuracy of Implant Installation with a Navigation System (NS), a Laboratory Guide (LG), NS with LG, and Freehand Drilling. *International journal of environmental research and public health* 2020; 17(6)
- 16 *Rouzé l'Alzit F, Cade R, Naveau A et al.* Accuracy of commercial 3D printers for the fabrication of surgical guides in dental implantology. *Journal of Dentistry* 2022; 117: 103909
- 17 *Beretta M, Poli PP, Maiorana C.* Accuracy of computer-aided template-guided oral implant placement: a prospective clinical study. *Journal of periodontal & implant science* 2014; 44(4): 184–193
- 18 *Kaewsiri D, Panmekiate S, Subbalekha K et al.* The accuracy of static vs. dynamic computer-assisted implant surgery in single tooth space: A randomized controlled trial. *Clinical oral implants research* 2019; 30(6): 505–514

- 19 *Tallarico M, Martinolli M, Kim Y et al.* Accuracy of Computer-Assisted Template-Based Implant Placement Using Two Different Surgical Templates Designed with or without Metallic Sleeves: A Randomized Controlled Trial. *Dentistry journal* 2019; 7(2)
- 20 *Oh J-H, An X, Jeong S-M, Choi B-H.* Digital Workflow for Computer-Guided Implant Surgery in Edentulous Patients: A Case Report. *Journal of oral and maxillofacial surgery official journal of the American Association of Oral and Maxillofacial Surgeons* 2017; 75(12): 2541–2549
- 21 *Block MS, Emery RW.* Static or Dynamic Navigation for Implant Placement-Choosing the Method of Guidance. *Journal of oral and maxillofacial surgery official journal of the American Association of Oral and Maxillofacial Surgeons* 2016; 74(2)
- 22 *Wang M, Eitan M, Zhan Y et al.* Digital workflow for prosthetically driven implant navigation surgery in a fully edentulous patient: a case report. *International journal of computerized dentistry* 2021; 24(3)
- 23 *González Rueda JR, Galparsoro Catalán A, de Paz Hermoso, Víctor Manuel et al.* Accuracy of computer-aided static and dynamic navigation systems in the placement of zygomatic dental implants. *BMC Oral Health* 2023; 23(1): 1–11
- 24 *Eggers G, Mühling J, Marmulla R.* Image-to-patient registration techniques in head surgery. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery* 2006; 35(12): 1081–1095
- 25 *Nobel Biocare Österreich.* X-Guide® | Nobel Biocare Österreich; 2024.000Z.  
<https://www.nobelbiocare.com/de-at/x-guide> (12.01.2024.762Z)
- 26 *Michael S. Block, Robert W. Emery, Daniel R. Cullum, Ali Sheikh.* Implant Placement Is More Accurate Using Dynamic Navigation. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery* 2017; 75(7): 1377–1386
- 27 *Jorba-García A, González-Barnadas A, Camps-Font O et al.* Accuracy assessment of dynamic computer-aided implant placement: a systematic review and meta-analysis. *Clinical oral investigations* 2021; 25(5)
- 28 *Spille J, Jin F, Behrens E et al.* Comparison of implant placement accuracy in two different preoperative digital workflows: navigated vs. pilot-drill-guided surgery. *Int J Implant Dent* 2021; 7(1): 1–9

- 29 Pomares-Puig C, Sánchez-Garcés MA, Jorba-García A. Dynamic and static computer-assisted implant surgery for completely edentulous patients. A proof of a concept. *Journal of Dentistry* 2023; 130: 104443
- 30 Block MS, Emery RW, Lank K, Ryan J. Implant Placement Accuracy Using Dynamic Navigation. *The International journal of oral & maxillofacial implants* 2017; 32(1)
- 31 Cassetta M, Bellardini M. How much does experience in guided implant surgery play a role in accuracy? A randomized controlled pilot study. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery* 2017; 46(7)
- 32 Wang W, Zhuang M, Li S et al. Exploring training dental implant placement using static or dynamic devices among dental students. *European journal of dental education official journal of the Association for Dental Education in Europe* 2023; 27(3): 438–448
- 33 Liu C, Liu Y, Xie R et al. The evolution of robotics: research and application progress of dental implant robotic systems. *International journal of oral science* 2024; 16(1): 28
- 34 Kang S-H, Lee J-W, Lim S-H et al. Verification of the usability of a navigation method in dental implant surgery: In vitro comparison with the stereolithographic surgical guide template method. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery* 2014; 42(7): 1530–1535
- 35 Eszter Somogyi-Ganss, Howard I. Holmes, Asbjørn Jokstad. Accuracy of a novel prototype dynamic computer-assisted surgery system. *Clinical oral implants research* 2015; 26(8): 882–890
- 36 Stübinger S, Buitrago-Tellez C, Cantelmi G. Deviations between placed and planned implant positions: an accuracy pilot study of skeletally supported stereolithographic surgical templates. *Clinical Implant Dentistry and Related Research* 2014; 16(4)
- 37 Verhamme LM, Meijer GJ, Bergé SJ et al. An Accuracy Study of Computer-Planned Implant Placement in the Augmented Maxilla Using Mucosa-Supported Surgical Templates. *Clinical Implant Dentistry and Related Research* 2015; 17(6): 1154–1163
- 38 Vercryssen M, Cox C, Coucke W et al. A randomized clinical trial comparing guided implant surgery (bone- or mucosa-supported) with mental navigation or the use of a pilot-drill template. *Journal of clinical periodontology* 2014; 41(7): 717–723

- 39 *Cassetta M, Giansanti M, Di Mambro A, Stefanelli LV.* Accuracy of positioning of implants inserted using a mucosa-supported stereolithographic surgical guide in the edentulous maxilla and mandible. *The International journal of oral & maxillofacial implants* 2014; 29(5): 1071–1078
- 40 *van de Wiele G, Teughels W, Vercruyssen M et al.* The accuracy of guided surgery via mucosa-supported stereolithographic surgical templates in the hands of surgeons with little experience. *Clinical oral implants research* 2015; 26(12): 1489–1494
- 41 *Geng W, Liu C, Su Y et al.* Accuracy of different types of computer-aided design/computer-aided manufacturing surgical guides for dental implant placement. *International Journal of Clinical and Experimental Medicine* 2015; 8(6): 8442–8449
- 42 *Tallarico M, Meloni SM, Canullo L et al.* Five-Year Results of a Randomized Controlled Trial Comparing Patients Rehabilitated with Immediately Loaded Maxillary Cross-Arch Fixed Dental Prosthesis Supported by Four or Six Implants Placed Using Guided Surgery. *Clinical Implant Dentistry and Related Research* 2015; 18(5): 965–972
- 43 *Verhamme LM, Meijer GJ, Soehardi A et al.* An accuracy study of computer-planned implant placement in the augmented maxilla using osteosynthesis screws. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery* 2016; 46(4)
- 44 *Marra R, Acocella A, Alessandra R et al.* Rehabilitation of Full-Mouth Edentulism: Immediate Loading of Implants Inserted With Computer-Guided Flapless Surgery Versus Conventional Dentures: A 5-Year Multicenter Retrospective Analysis and OHIP Questionnaire. *Implant dentistry* 2017; 26(1): 54–58
- 45 *Gabriele Tonellini, Raquel Saez Vigo, Giorgio Novelli.* Double Guided Surgery in All-on-4® Concept: When Osteotomy Is Needed. *International Journal of Dentistry* 2018; 2018
- 46 *Venezze AC, Ghensi P, Stellini E et al.* Double Duplicate Technique for CAD/CAM Full-Arch Immediate Loading: A Technical Description and Case Report. *The International journal of periodontics & restorative dentistry* 2018; 38(2): 209–216
- 47 *Pellegrino G, Taraschi V, Andrea Z et al.* Dynamic navigation: a prospective clinical trial to evaluate the accuracy of implant placement. *International journal of computerized dentistry* 2019; 22(2): 139–147

- 48 *Alfonso Mediavilla Guzmán, Elena Riad Deglow, Álvaro Zubizarreta-Macho et al.* Accuracy of Computer-Aided Dynamic Navigation Compared to Computer-Aided Static Navigation for Dental Implant Placement: An In Vitro Study. *Journal of Clinical Medicine* 2019; 8(12)
- 49 *Paweena Yimarj, Keskanya Subbalekha, Kanit Dhanesuan et al.* Comparison of the accuracy of implant position for two-implants supported fixed dental prosthesis using static and dynamic computer-assisted implant surgery: A randomized controlled clinical trial. *Clinical Implant Dentistry and Related Research* 2020; 22(6): 672–678
- 50 *Wu D, Zhou L, Yang J et al.* Accuracy of dynamic navigation compared to static surgical guide for dental implant placement. *International journal of implant dentistry* 2020; 6(1)
- 51 *Franchina A, Stefanelli LV, Maltese F et al.* Validation of an Intra-Oral Scan Method Versus Cone Beam Computed Tomography Superimposition to Assess the Accuracy between Planned and Achieved Dental Implants: A Randomized In Vitro Study. *International journal of environmental research and public health* 2020; 17(24)
- 52 *Pellegrino G, Bellini P, Cavallini PF et al.* Dynamic Navigation in Dental Implantology: The Influence of Surgical Experience on Implant Placement Accuracy and Operating Time. An in Vitro Study. *International journal of environmental research and public health* 2020; 17(6)
- 53 *Baruffaldi A, Baruffaldi M, Maiorana C, Poli PP.* A suggested protocol to increase the accuracy of prosthetic phases in case of full-arch model-free fully guided computer-aided implant placement and immediate loading. *Oral and maxillofacial surgery* 2020; 24(3)
- 54 *Stefanelli LV, Mandelaris GA, Franchina A et al.* Accuracy of Dynamic Navigation System Workflow for Implant Supported Full Arch Prosthesis: A Case Series. *International journal of environmental research and public health* 2020; 17(14)
- 55 *Stefanelli LV, Mandelaris GA, Franchina A et al.* Accuracy Evaluation of 14 Maxillary Full Arch Implant Treatments Performed with Da Vinci Bridge: A Case Series. *Materials (Basel, Switzerland)* 2020; 13(12)

- 56 Zhou M, Zhou H, Li SY et al. Comparison of the accuracy of dental implant placement using static and dynamic computer-assisted systems: an in vitro study. *Journal of stomatology, oral and maxillofacial surgery* 2021; 122(4)
- 57 Liu XQ, Liu JZ, Feng HL et al. Time Efficiency of Immediate Loading of Full-arch Implant Reconstructions Using Prefabricated Prosthesis Located by an Anchor Pin: a Pilot Study. *The Chinese journal of dental research* 2021; 24(4): 257–265
- 58 Kivovics M, Takács A, Péntzes D et al. 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* 2022; 119: 104070
- 59 Yuzhang Feng, Zhenya Su, Anchun Mo, Xingmei Yang. Comparison of the accuracy of immediate implant placement using static and dynamic computer-assisted implant system in the esthetic zone of the maxilla: a prospective study. *International journal of implant dentistry* 2022; 8
- 60 Manfredini M, Poli PP, Maiorana C et al. Computer Aided Full Arch Restoration by Means of One-Piece Implants and Stackable Guide: A Technical Note. *Dentistry journal* 2023; 11(11)
- 61 João Martins, João Rangel, Miguel de Araújo Nobre et al. A New Full Digital Workflow for Fixed Prosthetic Rehabilitation of Full-Arch Edentulism Using the All-on-4 Concept. *Medicina* 2024; 60(5)
- 62 Bernard L, Vercruyssen M, Duyck J et al. A randomized controlled clinical trial comparing guided with nonguided implant placement: A 3-year follow-up of implant-centered outcomes. *The Journal of prosthetic dentistry* 2019; 121(6): 904–910
- 63 Pellegrino G, Mangano C, Mangano R et al. Augmented reality for dental implantology: a pilot clinical report of two cases. *BMC oral health* 2019; 19(1): 158
- 64 Gulati M, Anand V, Salaria SK et al. Computerized implant-dentistry: Advances toward automation. *Journal of Indian Society of Periodontology* 2015; 19(1): 5–10