

Aus der Klinik und Poliklinik für
Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie und Plastische Operationen
(Direktor Univ.-Prof. Dr. med. Dr. med. dent. Hans-Robert Metelmann)
der Universitätsmedizin der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald



Der atrophierte Unterkiefer – eine morphometrische Studie im Hinblick auf eine
mögliche Insertion bikortikaler bzw. kurzer Implantate im reduzierten
Unterkieferknochenangebot mit Hilfe der digitalen Volumentomographie

Inaugural – Dissertation

zur

Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Zahnmedizin

(Dr. med. dent.)

der Universitätsmedizin

der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald

2017

vorgelegt von

Tobias Enders

geb. am 22.03.1992

in Plauen im Vogtland

Dekan: Prof. Dr. rer. nat. Max Baur
1. Gutachter: Prof. Dr. med. Dr. med. dent. Wolfram Kaduk, Greifswald
2. Gutachter: Prof. Dr. med. habil. Dr. med. dent. Bernhard Frerich, Rostock
Ort, Raum: Greifswald, Hörsaal Zentrum Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
Tag der Disputation: 12.07.2018

Gewidmet meinem Großvater.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielstellung.....	- 1 -
2	Literaturübersicht	- 3 -
2.1	Anatomie des atrophierten menschlichen Unterkiefers.....	- 3 -
2.2	Bikortikale Plattenosteosynthese bei Unterkieferfrakturen	- 5 -
2.3	Dentale Implantate im zahnlosen Unterkiefer.....	- 7 -
2.3.1	Konzepte der Implantatprothetik im atrophierten Unterkiefer	- 7 -
2.3.1.1	Implantatgestützte Prothese auf zwei interforaminalen Implantaten ..	- 8 -
2.3.1.2	Implantatgetragene Prothese auf vier interforaminalen Implantaten .	- 9 -
2.3.1.3	Festsitzender Zahnersatz auf sechs Implantaten	- 9 -
2.3.2	Biomechanische Aspekte dentaler Implantate.....	- 10 -
2.3.3	Bikortikal verankerte Implantate	- 11 -
2.3.4	Kurze dentale Implantate im atrophierten Unterkiefer	- 13 -
2.4	Digitale Volumetomographie.....	- 15 -
2.4.1	Indikationen, Kontraindikationen & Grenzen der DVT.....	- 15 -
2.4.2	Darstellung des Alveolarknochens und Dimensionstreu der DVT	- 16 -
2.4.3	Vermessung zahnloser Unterkiefer mit Hilfe der DVT	- 17 -
3	Material und Methode	- 18 -
3.1	Patientengut und Einteilung der Untersuchungsgruppen.....	- 18 -
3.1.1	Herkunft und Erstellung der DVT-Datensätze	- 18 -
3.1.2	Gerät und Aufnahmeparameter.....	- 19 -
3.1.3	Patientenauswahl	- 20 -
3.1.4	Untersuchungsgruppen	- 21 -
3.1.5	Datenerfassung	- 21 -
3.2	Methode.....	- 22 -
3.2.1	Ausrichtung der DVT-Datensätze.....	- 22 -
3.2.1.1	Sagittalebene:	- 23 -
3.2.1.2	Koronalebene:.....	- 23 -
3.2.1.3	Axialebene.....	- 23 -
3.2.2	Darstellung der zu untersuchenden Schichtebenen.....	- 24 -
3.2.2.1	Festlegung der Kieferbogenlinie.....	- 24 -
3.2.2.2	Einstellungen & Position der zu vermessenden Cross Sections.....	- 28 -

3.2.3	Messpunkte.....	- 30 -
3.2.3.1	Vertikale Messpunkte	- 30 -
3.2.3.2	Horizontale Messpunkte	- 31 -
3.2.4	Messstrecken und -winkel	- 33 -
3.2.5	Aufbereitung und Zuordnung der Messwerte zum Knochenangebot	- 35 -
3.2.6	Ermittlung der Messfehler	- 37 -
3.3	Statistische Auswertung.....	- 38 -
4	Ergebnisse.....	- 39 -
4.1	Patientengut und Patientencharakteristika	- 39 -
4.2	Vertikale und horizontale Streckenmessungen.....	- 42 -
4.2.1	Unterkieferhöhenvermessung	- 42 -
4.2.2	Unterkieferbreitenvermessung	- 46 -
4.2.3	Unterkieferhöhe im Bezug zum Patientenalter und Geschlecht.....	- 49 -
4.3	Winkelmessungen.....	- 53 -
4.4	Implantierbares Knochenangebot.....	- 55 -
4.4.1	Frontzahnbereich Gruppe 1	- 55 -
4.4.2	Seitenzahnbereich Gruppe 1	- 61 -
4.4.3	Seitenzahnbereich Gruppe 2	- 63 -
4.5	Messfehlerbetrachtung.....	- 65 -
4.5.1	Punktfehler	- 66 -
4.5.2	Gesamtfehler.....	- 67 -
5	Diskussion	- 68 -
5.1	Unterkieferhöhen und Unterkieferbreiten.....	- 69 -
5.2	Implantierbares Knochenangebot.....	- 76 -
5.3	Fehlerbetrachtung.....	- 85 -
6	Zusammenfassung	- 88 -
7	Literaturverzeichnis	- 90 -
8	Thesen.....	- 101 -
9	Anhang	

Verwendete Abkürzungen

Abb.	Abbildung
AWMF	Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften
CT	Computertomographie
CAD/CAM	Computer Aided Design / Computer Aided Manufacturing
DGZMK	Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund-, und Kieferheilkunde
d.h.	das heißt
DVT	digitale Volumetomographie
engl.	englisch
FEA	Finite-Element-Analyse
FEM	Finite-Elemente-Methode
FRS	Fernröntgenseitenbild
FOV	Field Of View
KI	Konfidenzintervall
kV	Kilovolt
MB	Megabyte
mind.	Mindestens
M.	Musculus
N.	Nervus
o.ä.	oder ähnliches
o.g.	oben genannt
OPG	Orthopantomograph
S.	Seite
s.	siehe
SD	Standard deviation (engl. für Standardabweichung)
Tab.	Tabelle
u.a.	unter anderem
µSv	Mikrosievert
vgl.	vergleiche
z.B.	zum Beispiel
z.T.	zum Teil

1 Einleitung und Zielstellung

In der Zahnheilkunde ist die Rehabilitation zahnloser Unterkiefer stets eine Herausforderung für den behandelnden Zahnarzt. In der modernen Gesellschaft haben Menschen fortgeschrittenen Lebensalters durch die höhere Aktivität und Vitalität auch den Anspruch, einen stabil verankerten oder festsitzenden Zahnersatz zu erhalten. Seit der Entwicklung von zahnärztlichen Implantaten in den 90er Jahren etablierten sich bis heute viele Therapiemöglichkeiten zur herausnehmbaren oder festsitzenden Verankerung von Zahnersatz.

Historisch betrachtet, kamen bereits Mitte des 20. Jahrhunderts schraubenförmige Implantate mit dem Ziel der operativen Therapie von Frakturen zur Anwendung. So setzte sich in den 70er und 80er Jahren die Plattenosteosynthese als Mittel der Wahl für die Therapie des frakturierten Unterkiefers durch. Die Entwicklung begann mit bikortikalen Osteosynthesystemen und erfuhr nach erfolgreicher Anwendung eine Miniaturisierung, sodass heute Unterkieferfrakturen fast ausschließlich durch die monokortikale Osteosynthese versorgt werden. Diese gewährleistet ausreichende Stabilität und bietet Vorteile gegenüber bikortikalen Systemen. Bei entsprechender Indikation, z.B. bei der Überbrückung von Unterkiefer-Resektionsdefekten, werden heute weiterhin bikortikale Osteosyntheseschrauben in beide kortikalen Schichten des Knochens eingebracht. Betreffende Strukturen sind dünne Röhrenknochen, flache Knochen oder Knochenspannen sowie atrophierte Unterkiefer mit einer geringen Restknochenhöhe. Anhand von computerbasierten Simulationen wurde herausgefunden, dass die bikortikale Verankerung dentaler Implantate zur Steigerung der Primärstabilität beiträgt, durch bessere Kräfteverteilung die Mikrobewegungen des Implantats reduziert und somit eine Störung der initialen Einheilungsphase verhindert werden kann.

Die Entwicklungen der oralen Implantologie konzentrieren sich ungeachtet dessen in den letzten Jahren vorwiegend auf kurze Implantate, mit deren Hilfe vor allem im Unterkiefer-Seitenzahnbereich das Therapiespektrum erweitert und komplexe Augmentationen vermieden werden können. Aktuelle Publikationen zeigen, dass sie gegenüber der Implantation von Standardimplantaten mit vorangegangener Knochenaugmentation höhere Erfolgsraten bei geringerem Aufwand und Risiko aufweisen.

Trotz der heute weit verbreiteten dreidimensionalen Bildgebung wurden bisher noch keine umfassenden oder detaillierten morphometrischen Studien zur vertikalen und transversalen Vermessung zahnloser Unterkiefer durchgeführt. In der wissenschaftlichen Literatur wurden zahnlose Unterkiefer meist anhand von zweidimensionalen Panoramaschichtaufnahmen oder Fernröntgenseitenaufnahmen untersucht bzw. vermessen.

Aufgrund dessen verfolgt die vorliegende Studie das Ziel, die Möglichkeiten der digitalen Volumentomografie zu nutzen, um mit einem standardisierten Protokoll zur Ausrichtung und Vermessung des Unterkiefers das vorhandene Knochenangebot einzuschätzen und daraus abgeleitet Aussagen zu Versorgungsmöglichkeiten des atrophierten zahnlosen Unterkiefers zu treffen.

Weiterhin sollen die Messergebnisse zahnloser Patienten denen von Patienten, die ein anteriores Restgebiss haben, gegenübergestellt werden. Entgegen umfassender aktueller klinischer Forschungen zu kurzen Implantaten im Seitenzahnbereich wurde noch nicht das tatsächlich vorhandene Knochenangebot der posterioren Mandibula beschrieben. Daher liegt der vorliegenden Arbeit auch die Zielstellung zugrunde, Indikationen und die potenzielle Anwendungshäufigkeit kurzer Implantate aus Sicht des Knochenangebotes zu bewerten.

Die Genauigkeit der softwarebasierten Werkzeuge zur Vermessung der Datensätze ist nicht eindeutig geklärt, daher soll diese Arbeit einen Beitrag zur Quantifizierung bzw. Abschätzung bestehender Messtoleranzen leisten.

Der Schwerpunkt der Auswertung liegt auf dem im zahnlosen Unterkiefer bzw. Unterkiefer-Seitenzahnbereich anzutreffenden Knochenangebot. Daraus wurde abgeleitet, welche Art von Implantaten am häufigsten gesetzt werden kann, welche Auswirkungen eine mögliche bikortikale Verankerung zahnärztlicher Implantate im interforaminalen Bereich bzw. die Insertion kurzer Implantate im Seitenzahnbereich auf die prothetische Versorgung hat.

Dies könnte wegweisend für zukünftige Entwicklungen der oralen Implantologie sein.

2 Literaturübersicht

2.1 Anatomie des atrophierten menschlichen Unterkiefers

Der Unterkiefer des Menschen lässt sich in den Unterkieferkörper (Corpus mandibulae) und den aufsteigenden Unterkieferast (Ramus mandibulae) untergliedern. Das Corpus mandibulae hat eine parabelförmige Form und besteht aus der Basis (Basis mandibulae) sowie dem zahntragenden Fortsatz (Processus alveolaris mandibulae), der in den Zahnfächern (Alveoli dentales) die Zähne (Dentes) trägt (Schumacher, 1997).

Das Corpus mandibulae ist über den Kieferwinkel (Angulus mandibulae), der beim Erwachsenen ca. 100° beträgt, mit dem Ramus mandibulae verbunden. Aufgrund von Resorptionsprozessen infolge von Zahnverlust und Nichtbeanspruchung kommt es zu dessen Abflachung auf ca. 120° (Tallgren, 1972). Die pathologische Atrophie ist von der physiologischen Altersinvolution abzugrenzen. Der eher nach oben innen gerichtete Alveolarfortsatz baut sich nach unten außen ab. Somit erscheint der atrophierte Unterkiefer spangenförmig.

Währenddessen die Distanz des Mandibularkanals (Canalis mandibulae) zu den lateralen Wänden des Unterkiefers relativ konstant bleibt, schwindet der Abstand zur Oberkante in ausgeprägten Fällen so weit, dass der Unterkiefernerve (N. mandibularis) direkt unter der Schleimhaut liegt, und demzufolge dessen Austrittspunkt (Foramen mentale) auf der Oberseite des Unterkiefers lokalisiert ist. Bei fehlender oder insuffizienter prothetischer Versorgung hypertrophieren die Muskelursprünge der suprahyoidalen Muskulatur, sodass die Spina mentalis und die Linea mylohyoidea scharf hervorspringen (Schumacher, 1997; Watzek et al., 2009).

Bei mangelnder funktioneller Belastung des Knochens durch Zugkräfte existieren keine interstitiellen Flüssigkeitsströme rund um die Knochenzellen (Osteozyten), woraufhin die Mechanotransduktion, eine Signalkaskade, nicht aktiviert wird. Die Folge ist, dass die biochemische Induktion der Osteoblastenaktivität während des Knochenumbaus (Remodelling) ausbleibt. Somit wird Knochen zwar ab- aber nicht wieder aufgebaut (Young & Pavalko, 2011).

Nach der Zahnentfernung ist die Heilung der Extraktionsalveole nach ca. sechs Monaten abgeschlossen. Danach kommt es zeitlebens zu einem kontinuierlichen Abbau des Knochens an dieser Stelle. Im ersten Jahr nach der Extraktion atrophiert der Alveolarkamm des Unterkiefers um rund 1,2 mm, jedes darauffolgende Jahr um weitere 0,4 mm. In der Fachliteratur wird dieser Prozess als „Residual Ridge Resorption“ bezeichnet (Atkinson & Woodhead, 1968; Riediger, 2009; Tallgren, 1972).

Durch anatomische Studien anhand zahnloser Unterkiefer konnte demonstriert werden, dass es während des Knochenabbaus im Alveolarteil zu einer prozentualen Zunahme der kortikalen Knochenstrukturen kam. Bei genauerer Untersuchung der Kortikalis blieb deren Dicke im Frontzahnbereich annähernd gleich, dagegen wurde sie im Seitenzahnbereich poröser und nahm eher an Dicke ab, als das sie zunahm. Tatsächlich resultiert die prozentuale Zunahme an kortikalem Knochen im Frontzahnbereich aus der allgemeinen Abnahme von Spongiosa (Bertl et al., 2014). Die Kortikalis des Unterkiefers verliert mit zunehmender Atrophie an Dichte und weist mehr Porositäten auf. Dies bedeutet allerdings nicht gleichsam, dass Zahnverlust eine Dichtereduktion induziert (Atkinson & Woodhead, 1968).

Der Knochenabbau ist von funktionellen, anatomischen und lokalen Faktoren abhängig. Als anatomische Faktoren sind unter anderem Gesichtsform, ursprüngliche Größe der Mandibula, Tiefe der ehemaligen Alveolen, lokale Knochenqualität, Blutversorgung, Weichgewebe und Muskelansätze anzuführen. Inflammatorische Faktoren sind beispielsweise parodontale Infektionen, traumatische oder infizierte Extraktionen, apikale Entzündungen oder mangelhafte Mundhygiene. Letztlich sind Alter, Dauer der Zahnlosigkeit, Geschlecht und hormonelle Einflüsse die Haupteinflussfaktoren für den Knochenabbau des Unterkiefers (Kingsmill, 1999).

Sowohl in der Vergangenheit als auch in aktuellen Studien zum Verlauf der Kieferkammatrophy wurde beobachtet, dass bei zahnlosen Frauen die Atrophie schneller voranschreitet und stärker ausgeprägt ist als bei Männern (Huomonen et al., 2012; Kovacic et al., 2012; Ortman et al., 1989). Einer der Gründe hierfür ist der direkte Zusammenhang zwischen postmenopausaler Osteoporose und deren negative Auswirkung auf den Knochenumbau und dessen Volumen sowie des Mineralisationsgrades (Kribbs, 1990; Kribbs et al., 1989; Soikkonen et al., 1996).

2.2 Bikortikale Plattenosteosynthese bei Unterkieferfrakturen

Der Unterkiefer ist als exponierter Knochen des Gesichts prädestiniert für traumatische Schädigungen jeglicher Art. In Europa beträgt der Anteil der Unterkieferfrakturen gemessen an allen Frakturen im Mund- Kiefer- und Gesichtsbereich in jüngster Zeit ca. 42 % (Boffano et al., 2015). Die Therapie der Wahl ist unabhängig von der Lokalisation der Fraktur die Plattenosteosynthese. So wurde sie in Freiburg von 2000 bis 2005 bei 83 % aller Unterkieferfrakturen angewandt (Bormann et al., 2009).

Bei der Frakturversorgung sind grundsätzlich die funktionsstabile und die übungsstabile Osteosynthese zu unterscheiden. Zu letzterer zählt die Miniplattenosteosynthese, bei der der Patient postoperativ vier Wochen harte Kost bzw. stärkere funktionellere Belastungen vermeiden sollte. Bei funktionsstabilen Osteosynthesen kommen Plattensysteme zum Einsatz, die die Fragmente so fixieren, dass eine Knochenheilung trotz funktioneller Belastung vonstattengehen kann. Verwendete „Makroplatten“ oder „Rekonstruktionsplatten“ sind entsprechend stabiler konstruiert und können eingeleitete Kräfte problemlos tolerieren. Durch eine spezielle Geometrie der Schraubenlöcher kann eine Kompression der Fraktur Elemente bewirkt werden. Dies setzt eine gute Verankerung voraus, weshalb verwendete Osteosyntheseschrauben in der Regel bikortikal platziert werden (Rasse, 2011).

Die typischen Indikationen für die bikortikale Osteosynthese werden hauptsächlich in der Rekonstruktions- und Defektchirurgie gestellt, in der nach partieller bzw. vollständiger Entfernung des Unterkiefers weitspannige Rekonstruktionsplatten am Kieferstumpf befestigt oder Knochentransplantate fixiert werden müssen. Entsprechend der Architektur des Entnahmeortes ist die Morphologie der transplantierten Strukturen flach oder dünn (z.B. Scapulatransplantat) bzw. weist einen hohen kortikalen Anteil auf (z.B. Fibulatransplantat).

Eine weitere Indikation stellen mehrfache, komplizierte oder infizierte Frakturen im Unterkiefer dar. Die bikortikale Verankerung der Schrauben stellt hierbei einen starren und sicheren Verbund aller beteiligten Strukturen sicher.

Die bikortikale Verankerung von Osteosyntheseschrauben gewährleistet eine hohe Stabilität der fixierten Frakturlemente mit gleichmäßiger Verteilung von eingeleiteten Kräften auf beide Schichten der Kortikalis. Ein entscheidender Nachteil dieser Methode im Unterkiefer ist darin begründet, dass bei der Lokalisation der Schrauben zwischen den beiden Kompaktaschichten keine sensiblen anatomischen Strukturen liegen dürfen. Strikt sollten die Verletzung von Zahnwurzeln, Zahnkeimen oder dem Nervus mandibularis vermieden werden.

Als ein weiterer Nachteil ist die erhöhte Traumatisierung der Gewebe während der Operation anzuführen, die sich u.a. aus der Position und dem Vorbohren der Schraubenlöcher sowie dem Eindrehen der Schrauben ergeben können (Krüger, 1988; Rasse, 2011). Die monokortikale Plattenosteosynthese ist mit der kleiner dimensionierten Miniplatte und den graziilen monokortikalen Schrauben im geringeren Maße mechanisch belastbar (Bormann et al., 2009). Der biomechanische Vorteil besteht in der dynamischen Kompression der Frakturlemente und wird durch die Position der Platte auf der Zugseite an der Basis des Alveolarfortsatzes erzielt. Damit stabilisiert sich die Fraktur bei funktioneller Belastung und die Osteosyntheseschrauben müssen im Vergleich zur bikortikalen Osteosynthese wesentlich geringere Zugkräfte auf die trabekulären Strukturen des Unterkiefers übertragen. Ferner kann die Osteosyntheseplatte meistens von intraoral angebracht werden. Voraussetzung für eine erfolgreiche Miniplattenosteosynthese ist ein entzündungsfreier Knochen mit ausreichender Knochendichte und -höhe. Inzwischen ersetzt die Miniplattenosteosynthese die früher angewandten Kompressionsplatten zu großen Teilen. Sie kann indessen nicht die Aufgabe einer funktionsstabilen, starren Fixation bzw. Wiederherstellung von Unterkieferdefekten durch Rekonstruktionsplatten übernehmen (Rasse, 2011).

2.3 Dentale Implantate im zahnlosen Unterkiefer

2.3.1 Konzepte der Implantatprothetik im atrophierten Unterkiefer

Die orale Implantologie ist heutzutage ein elementarer Bestandteil der modernen Zahnmedizin und befasst sich mit dem Einbringen von körperfremdem, sog. „alloplastischem“, Material in den Kieferknochen oder in die Schleimhaut-Periost-Decke. Im Laufe der Zeit haben sich schraubenförmige, enossale Implantate (Synonym: „Dentale Implantate“) durchgesetzt. Sie gelten heute als etabliertes Standard – Therapiemittel, um einzelne Zähne zu ersetzen, um die Abstützung von herausnehmbarem oder feststitzendem Zahnersatz zu gewährleisten oder den gesamten Zahnersatz im zahnlosen Kiefer zu verankern. Je nach der angestrebten prothetischen Versorgung gibt es auf dem Markt eine Vielzahl von Implantatsystemen, die individuell zum Einsatz kommen (Läkamp et al., 2016; Misch, 2015; Watzek et al., 2009).

Durch die Abstützung einer herausnehmbaren Prothese auf den Implantaten kann der Knochenabbau drastisch verringert werden. Nach fünf Jahren war der Knochenverlust im Seitenzahnbereich von Totalprothesenträgern doppelt so hoch wie bei Patienten, deren herausnehmbarer Zahnersatz auf Implantaten verankert war (Kordatzis et al., 2003). Neuere Studien demonstrieren, dass der Knochenabbau nach 10 Jahren bei Abstützung auf vier Implantaten 4 % geringer ist als bei Patienten, die zwei Implantate erhalten (de Jong et al., 2010). Konträre Studien belegen wiederum, dass der Knochenabbau von Totalprothesenträgern sich nicht von Patienten unterscheidet, deren Prothese auf zwei oder vier Implantaten verankert ist (Tymstra et al., 2011). Diese Ergebnisse zeigen eine gewisse Heterogenität in der Literatur. In jedem Fall führen implantatgetragene Prothesen im Unterkiefer zur Steigerung von Zufriedenheit, Mundgesundheit und Kaeffizienz der Patienten (Awad et al., 2003; Elsyad et al., 2014; Emami et al., 2009).

Über die Jahrzehnte haben sich viele verschiedene Therapiekonzepte zur funktionellen Rehabilitation des zahnlosen Unterkiefers mit Implantaten entwickelt und etabliert. Hier anzuführen sind Standardimplantate, kurze Implantate, durchmesserreduzierte Implantate und Miniimplantate, die entweder gerade oder anguliert in den Unterkiefer eingebracht werden.

Die Verwendung verschiedener Implantatsysteme, -durchmesser und -längen helfen dem Zahnarzt, das Knochenangebot des Patienten optimal zu nutzen und ihm eine individuelle Versorgung anbieten zu können. Nicht zuletzt können dadurch augmentative chirurgische Maßnahmen vor oder während einer Implantation vermieden werden. Die Entscheidung für ein Therapiekonzept steht neben der zahnmedizinischen Indikation immer zwischen dem medizinisch Möglichen und dem wirtschaftlich Realisierbaren (Läkamp et al., 2016). Im Folgenden werden drei Therapiestrategien vorgestellt, die im deutschsprachigen Raum üblich sind und zuverlässig angewendet werden. Da die Vielfältigkeit der Therapiemöglichkeiten, insbesondere durch verschiedene Mesostrukturen (z.B. Magnete, Locatoren, Kugelkopfancker, Stege oder Teleskope) groß ist, erheben die vorgestellten Therapiekonzepte keinen Anspruch auf Vollständigkeit (Läkamp et al., 2016; Misch, 2015):

2.3.1.1 Implantatgestützte Prothese auf zwei interforaminalen Implantaten

Das erste und einfachste Therapiekonzept beschreibt, dass eine Totalprothese auf zwei interforaminalen Implantaten mittels eines Steges, zwei Kugelkopfanckern oder zweier Locator in Position gehalten wird. Die Implantatpositionen befinden sich idealerweise in Regio 33 und 43. Die Herstellung der Prothese folgt den Regeln der Totalprothetik. Sie muss distal tegumental abgestützt werden und sitzt entsprechend breitbasig auf den Kieferkämmen. Diese Therapieform ist indiziert bei stark atrophierten Unterkiefen und fehlender natürlicher Bezahnung des Oberkiefers. Als Vor- und Nachteile der Versorgung sind unter anderem anzuführen:

Vorteile	Nachteile
gute Patientenzufriedenheit	erhöhte Prothesenbeweglichkeit durch anteriore Rotationsachse
kurze Behandlungsdauer	geringeres Kauvermögen
minimalinvasiver Eingriff	fortschreitende Atrophie der Mandibula
gute Hygienefähigkeit	Extension der Prothesensättel wie bei einer Totalprothese
kostengünstigste Therapieoption	psychologische Komponente

Tabelle 1: Vor- und Nachteile der funktionellen Rehabilitation zahnloser Patienten mit zwei Implantaten (Läkamp et al., 2016; Misch, 2015)

2.3.1.2 Implantatgetragene Prothese auf vier interforaminalen Implantaten

Die optimale Versorgung des zahnlosen Unterkiefers stellt die implantatgetragene Prothese auf vier interforaminalen Implantaten in Kombination mit einer herausnehmbaren Prothese dar. Die Abstützung der Deckprothese erfolgt auf vier interforaminal gesetzten Implantaten und ermöglicht eine günstige Statik der Suprakonstruktion. Die Belastung wird durch primäre oder sekundäre Verblockung auf alle vier Implantate verteilt. Diese Therapieform eignet sich am besten für mittelgradig atrophierte Unterkiefer. Bei ausreichendem transversalen Knochenvolumen kann die Prothese, u.a. mittels eines CAD/CAM-gefrästen Steges oder durch Teleskope, kombiniert festsitzend-abnehmbar gestaltet werden. Der Zahnersatz ist stabil im Munde des Patienten verankert und kann trotzdem zur Reinigung herausgenommen werden. Alternativ kommen auch Locator oder Kugelköpfe zum Einsatz. Die Vor- und Nachteile gegenüber der Versorgung mit zwei Implantaten sind wie folgt dargelegt:

Vorteile	Nachteile
höhere Patientenzufriedenheit	chirurgisch, prothetisch und zahntechnisch aufwändiger
höherer Kaukomfort	Reinigung schwieriger, häufigerer Recall notwendig
kleiner dimensionierte Deckprothese, brückenähnliche Konstruktion möglich	kostenintensiver

Tabelle 2: Vor- und Nachteile der funktionellen Rehabilitation zahnloser Patienten mit vier Implantaten gegenüber zwei Implantaten (Läkamp et al., 2016; Misch, 2015)

2.3.1.3 Festsitzender Zahnersatz auf sechs Implantaten

Die dritte Versorgungsform stellt hohe Ansprüche an Behandler, Zahntechniker und Patient. Nach den Indikationsklassen des BDIZ benötigt es sechs Implantate, um in einem zahnlosen Unterkiefer einen festsitzenden Zahnersatz eingliedern zu können (BDIZ-EDI (Bundesverband der implantologisch tätigen Zahnärzte in Europa) et al., 2014). Dies ist nur bei leichter bis mäßiger Kieferkammatrophy realisierbar. Chirurgische Maßnahmen zur Vorbereitung des Implantatbetts oder die Verwendung kurzer Implantate können notwendig sein. Einige Vor- und Nachteile gegenüber der Versorgung mit vier Implantaten sind in Tab. 3 gegenübergestellt.

Vorteile	Nachteile
hohes Kauvermögen	chirurgisch, prothetisch und zahntechnisch aufwändigste Versorgung
grazile Gestaltung des Zahnersatzes möglich	Ästhetik durch Kieferkammatrophy u.U. schwierig
höchster Kaukomfort	Reinigung anspruchsvoll
Prävention vor weiterem Knochenverlust	engmaschiger Recall notwendig
psychologisch günstig („feste Zähne“)	kostenintensiv

Tabelle 3: Vor- und Nachteile der funktionellen Rehabilitation zahnloser Patienten mit sechs Implantaten gegenüber vier Implantaten (Läkamp et al., 2016; Misch, 2015)

2.3.2 Biomechanische Aspekte dentaler Implantate

Dentale Implantate sind starr mit dem Knochen verbunden. Sie haben im Vergleich zu einem Zahn keinen Faserapparat, der Druck- in Zugkräfte umwandelt oder durch dessen Taktilität die Konsistenz der Nahrung an das zentrale Nervensystem gemeldet wird. Da naturgemäß alle knöchernen Strukturen auf Zugbelastung ausgelegt sind, kann sich der mit dem Implantat in Kontakt stehende Knochen vergleichsweise funktionell schlechter anpassen. Aufgrund des zehnfach höheren Elastizitätsmoduls der Kortikalis gegenüber der Spongiosa konzentrieren sich horizontale und vertikal einwirkende Kräfte auf den Implantathals. Stressinduzierte Resorptionen an der Implantat-Knochen-Grenzfläche sind eine der Hauptgründe für kraterförmige Defekte bis zur ersten Windung am Implantathals (Anitua et al., 2010; Watzek et al., 2009). Um diese zu vermeiden, kann unter anderem die vertikale Implantatposition variiert werden. Die subkrestale Implantatposition beispielsweise ist zwar mit den meisten Mikrobewegungen des Implantates verbunden, aber verursacht die geringsten Spannungen im kortikalen Knochen. Dadurch können eingeleitete axiale und extraaxiale Kräfte im Vergleich zu anderen Implantatpositionen am effizientesten in trabekuläre Strukturen abgeleitet werden (Lofaj et al., 2015; Sotto-Maior et al., 2014). Dennoch ist der entscheidende Faktor hinsichtlich der Reduktion der periimplantären Kräfteverteilung der Implantat-Durchmesser. Je größer dieser ist, umso geringer sind die Belastungsspitzen im periimplantären kortikalen Knochen. Auch längere Implantate verteilen Spannungen im trabekulären Knochen gleichmäßiger (Anitua et al., 2010; Baggi et al., 2008).

2.3.3 Bikortikal verankerte Implantate

Die biomechanischen Eigenschaften bikortikaler Osteosyntheseschrauben lassen sich auf dentale Implantate übertragen. In einer experimentellen in-vivo-Studie zeigten bikortikal verankerte Implantate im Schienbein von Kaninchen sechs bzw. zwölf Wochen nach der Implantation doppelt, respektive dreifach, so hohe Ausdrehmomente und einen signifikant höheren Knochen-Implantat-Kontakt als monokortikal platzierte Implantate (Ivanoff et al., 1996).

Belastungsspitzen werden bei ihnen im Vergleich zu anderen Implantatpositionen (epikrestal, subkrestal) am besten vom krestalen Knochen abgeleitet und verteilt, zugleich weisen bikortikal verankerte Implantate die wenigsten Mikrobewegungen unter zentrischen und exzentrischen Belastungen auf (Sotto-Maior et al., 2014).

In klinischen Studien konnten dagegen keine signifikanten Unterschiede bezüglich Verlust von marginalem Knochen aufgrund möglicher krestaler Überbelastungen festgestellt werden. Das stellt die klinische Relevanz von in Computersimulationen errechneten periimplantären Belastungsspitzen monokortikaler Implantate einerseits und den biomechanischen Vorteil bikortikaler Implantate andererseits in Frage (Ivanoff et al., 2000; Malo et al., 2014). Das Implantat ist bei der bikortikalen im Vergleich zur monokortikalen Verankerung den größten Spannungen im Implantatkörper ausgesetzt (Sotto-Maior et al., 2014). Diese sind innerhalb des Implantats um 29 % und in der Abutmentschraube um 12,2 % erhöht (Pierrisnard et al., 2003). Die damit verbundene Gefahr der Fraktur des ganzen Implantats oder dessen Aufbauteilen wird in einer retrospektiven Studie aus den Jahren 1977 bis 1983 mit 207 gesetzten Implantaten beschrieben: Die Misserfolgsrate von bikortikal gesetzten Implantaten lag 4-fach höher als in der Gruppe der monokortikalen Implantate. Dabei waren 79 % der Verluste auf technisches Versagen zurückzuführen. Das entsprach drei Mal so vielen Materialbrüchen im Vergleich zur monokortikalen Gruppe. Materialermüdung wurde als Hauptgrund für alle Implantatverluste angeführt. Einflussreiche Risikofaktoren wie Bezahnung des Gegenkiefers, Parafunktionen, Rauchen oder Passung bzw. Konstruktion der Prothese sind nicht in Betracht gezogen worden, denn zwei Drittel aller Implantatverluste traten bei 2 von 37 Patienten mit o.g. Risikofaktoren auf. Die Aussagen dieser Studie sind daher kritisch zu beurteilen (Ivanoff et al., 2000).

Die wissenschaftlichen Erkenntnisse zu biomechanischen Eigenschaften, Erfolgsraten oder Komplikationen bikortikal verankerter Implantate im Unterkiefer sind bislang relativ lückenhaft. Es wurden hauptsächlich Fall-Kontroll-Studien mit kurzer Beobachtungszeit durchgeführt, deren Ergebnisse allerdings recht erfolgversprechend waren (Tawse-Smith et al., 2001). Strecha et al. haben im Jahre 2009 in einer Fallserie zahnlose Unterkiefer von 61 Patienten mit 256 bikortikalen Implantaten versorgt. Deren Belastung erfolgte bereits 10 Tage postoperativ und die Erfolgsrate lag bei 98,4 % (Strecha et al., 2010). Speziell bei Patienten mit reduziertem Knochenangebot unter 15 mm Restknochenhöhe ist die bikortikale Platzierung von Implantaten eine Möglichkeit, kompliziertere chirurgische Eingriffe zu umgehen. Anhand einer kleinen Studiengruppe wurde sogar gezeigt, dass die frühzeitige Belastung bikortikaler Implantate nach 2 Wochen problemlos durchgeführt werden kann (Payne et al., 2001).

Nach teilweiser oder vollständiger Resektion des Unterkiefers wird in der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie oft das Wadenbein (Fibula) zur Rekonstruktion verwendet. Als ein dünner, dreieckiger Röhrenknochen ähnelt es im Querschnitt einem nativen atrophierten Unterkiefer im interforaminalen Bereich. Es übersteigt dabei selten 15 mm im Durchmesser und weist morphologisch eine allseitig dicke Kortikalis auf. An den für eine Implantation geeigneten Stellen entspricht diese mehr als 50 % des Volumenanteils (Hakim et al., 2012; Reuther & Kübler, 1999). Bei Verwendung von Implantaten mit einer Länge von 10 mm bis 12 mm wird daher zwangsläufig die untere Kortikalis zur Verankerung mitbenutzt. In einer klinischen Langzeitstudie wurden Erfolgsraten für Implantationen im Fibulatransplantat von 98,6 % und der darauf verankerten Prothesen von 93,1 % angegeben (Chiapasco et al., 2006). Die Primärstabilität von Implantaten im Fibulatransplantat ist anfangs äußerst hoch und kann während der Belastungsphase noch ansteigen, sodass letztendlich keine Unterschiede zu Referenzwerten von Implantaten im nativen Unterkiefer zu verzeichnen waren (Kramer et al., 2005).

Wu et al. verglichen in einer computerbasierten Simulation die physikalischen Eigenschaften von monokortikalen Implantaten im nativen Unterkiefer mit bikortikal verankerten Implantaten im Fibulatransplantat. Ihren Berechnungen zufolge nahmen periimplantäre kortikale Stauchungskräfte im Wadenbein mit steigender Implantatlänge ab und im Unterkieferknochen zu.

Währenddessen wurde keine bikortikale Verankerung in der Mandibula simuliert. Die Mikrobewegungen bikortikaler Implantate waren in Computersimulationen im Vergleich zu monokortikalen Implantaten wiederholt geringer angegeben, an kürzeren Implantaten (6mm) war mehr Bewegung als an langen Implantaten (15mm) zu verzeichnen. Frühere Beobachtungen wurden dadurch bestätigt. Die o.g. Autoren postulieren, dass im Fibulatransplantat generell eine bikortikale Verankerung anzustreben ist und im nativen Unterkiefer kurze Implantate als Therapieoption in Betracht gezogen werden sollten (Wu et al., 2012).

2.3.4 Kurze dentale Implantate im atrophierten Unterkiefer

Im letzten Jahrzehnt befassten sich zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten mit der Entwicklung und dem klinischen Einsatz kurzer dentaler Implantate. Der Unterkiefer-Seitenzahnbereich ist aufgrund des zumeist limitierten vertikalen Knochenangebotes für die Versorgung mit Implantaten mit einer Maximallänge von 8 mm von besonderem Interesse.

Kurzen Implantaten werden in der Literatur vielversprechende Überlebensraten bei geringem chirurgischem Aufwand zugesprochen (Anitua et al., 2014; Annibali et al., 2012; Felice et al., 2014). Eine Metaanalyse zur Bewertung des Zusammenhanges zwischen frühzeitigem Implantatverlust, d.h. vor prothetischer Versorgung und der Implantatlänge kam zu dem Ergebnis, dass kurze Implantate mit einer Länge von maximal 7 mm im Unterkiefer-Seitenzahnbereich mindestens die gleiche Überlebensrate hatten wie Standardimplantate. Pommer et al. bezifferte demnach die Verlustrate mit 1,7 % nach einem Jahr (Pommer et al., 2011). Eine Studie zu „ultrakurzen“ Implantaten mit einer Länge von nur 4 mm verdeutlichte, dass nach fünf Jahren die Überlebensrate von 77 Implantaten bei 92,2 % lag. Dabei stellte sich der durchschnittliche marginale Knochenverlust auf 0,53 mm ein. Die gesetzten Implantate dienten der Rehabilitation des zahnlosen Unterkiefer-Seitenzahnbereichs. (Slotte et al., 2015). Diese Ergebnisse korrelieren mit Langzeiterfahrungen an Implantaten, welche maximal 8,5 mm lang waren (Anitua et al., 2014). In einem systematischen Review wurde die Überlebensrate für Implantate mit einer Länge unter 10 mm mit 92,3 % bis 100 % angegeben. Von allen im Review beschriebenen Misserfolgen geschahen 75,5 % vor der Belastungsperiode. Die Hauptgründe des Misserfolgs waren nach Annibali et al. eher bei chirurgischem Vorgehen bzw. schlechter lokaler Knochenqualität zu suchen (Annibali et al., 2012).

Slotte et al. beschreiben in ihrer Studie zu ultrakurzen Implantaten, dass an den Behandler hohe Anforderungen beim Umgang mit kurzen Implantaten gestellt werden (Slotte et al., 2015). Aus biomechanischen Aspekten zeigen kurze Implantate in Simulationen eine höhere Beweglichkeit im Knochen, woraus höhere krestale Stauchungskräfte entstehen. Diese werden zumeist über die ersten drei Windungen in den Knochen abgeleitet. Durch die Verlängerung des Implantats gelingt nicht deren Reduktion, sondern vielmehr durch die Steigerung des Durchmessers. Daraus schließend sollte ein ideales Implantat eher breiter statt länger sein (Pierrisnard et al., 2003).

Insbesondere das Verhältnis von Kronenhöhe zu Implantatlänge (engl. crown-to-implant-ratio, CI) wurde in der wissenschaftlichen Literatur oft diskutiert (Gulje et al., 2013). Es sind selbst bei einer Kronenhöhe, die der doppelten Implantatlänge entspricht, keine Unterschiede im marginalen Knochenverlust nach drei Jahren festzustellen. Anitua et al. bezifferten den durchschnittlichen marginalen Knochenverlust mit ungefähr 0,3 mm bis 0,4 mm bei 128 Patienten. Lediglich ein distaler Anhänger an der prothetischen Versorgung und die damit verbundene extraaxiale Belastung führten mit 0,74 mm zu einem doppelt so hohen Verlust an marginalem Knochen (Anitua et al., 2015). In Reviews und Langzeitstudien sind die Suprakonstruktionen von kurzen Implantaten hauptsächlich verblockte Einzelkronen, kurzspannige Brücken oder herausnehmbare Prothesen. Dadurch werden in die Implantate keine starken extraaxialen Kräfte eingeleitet und die Kräfte können sich über primäre bzw. sekundäre Verblockung gleichmäßig verteilen (Anitua et al., 2014; Annibali et al., 2012; Slotte et al., 2015).

2.4 Digitale Volumentomographie

Die digitale Volumentomographie (DVT), engl. „Cone Beam Computed Tomography“, ist ein in den 1990er Jahren entwickeltes dreidimensionales, digitales Bildgebungsverfahren, bei dem das zu untersuchende Objekt mit einem pyramiden- oder kegelförmigen Strahlenbündel durchstrahlt wird und die Detektion durch ein Flachpanel erfolgt. Die Untersuchungsregion ist auf den Mund-Kiefer- und Gesichtsbereich beschränkt, weshalb der Begriff „Dentale Volumentomographie“ synonym zu „Digitaler Volumentomographie“ verwendet wird. Während des mehrere Sekunden dauernden Scans fährt der Strahler um den fixierten Patientenkopf eine Kreisbahn und erzeugt mehrere hundert gepulste Projektionsaufnahmen. Diese werden anschließend in computerbasierten, mathematischen Verfahren der Rückprojektion zur Erstellung des 3D-Volumens benutzt. Dabei kann durch mehrere zweidimensionale Bildpunkte aus unterschiedlicher Perspektive ein dreidimensionaler Bildpunkt, der sogenannte Voxel, errechnet werden (Lemkamp et al., 2006). Die Software ermöglicht die nachträgliche Korrektur von Positionierungsfehlern, was die Wiederholung der Aufnahme aufgrund einer fehlerhaften Positionierung, wie beispielsweise beim Panoramaröntgen, nicht notwendig macht. (Bürklein et al., 2009; Schulze R., 2013). Die dreidimensionale Bildgebung lässt des Weiteren durch eine verzerrungs- und überlagerungsfreie Schnittbilddarstellung qualitativ und quantitativ höherwertige diagnostische Aussagen zu (Sonick et al., 1994).

2.4.1 Indikationen, Kontraindikationen & Grenzen der DVT

Es ist allgemein anerkannt, dass für viele Fragestellungen die dreidimensionale Bildgebung der Zweidimensionalen überlegen ist. Die Möglichkeit der genauen räumlichen Lokalisation empfindlicher Strukturen, wie z.B. dem Verlauf des Canalis mandibulae, lassen die DVT eine zentrale Stellung in der präoperativen Diagnostik einnehmen.

Gemäß AWMF Leitlinie vom 05.08.2013 zur Anwendung der digitalen Volumentomographie werden folgende Indikationen angeführt (Schulze, 2014):

- deutliche anatomische Abweichungen in der sagittalen und/oder transversalen und/oder vertikalen Ebene in Form und Kieferrelation
- zweifelhafter Erfolg nach Augmentation

- unsichere Darstellung anatomisch wichtiger Nachbarstrukturen in der zweidimensionalen Diagnostik, wenn in der dreidimensionalen Diagnostik eine Klärung zu erwarten ist
- Vorhandensein pathologischer Veränderungen im zweidimensionalen Röntgenbild mit weitergehendem Klärungsbedarf
- Vorerkrankungen oder Voroperationen der Kieferhöhle mit möglichem Einfluss auf die Implantatversorgung im Oberkiefer-Seitenzahnbereich
- spezielle chirurgische und / oder prothetische Therapiekonzepte z.B. Sofortversorgung, navigationsgestützte Implantologie oder komplexe interdisziplinäre Konzepte
- Komplikationen nach Implantation oder Augmentation

Ferner findet die DVT Einsatz in der Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie bzw. Oralchirurgie bei folgenden Indikationen: Planung der Entfernung von verlagerten oder retinierten Weisheitszähnen, pathologischer intraossärer Veränderungen, Tumoren im Mund-, Kiefer- und Gesichtsbereich, Speichelsteinen, Diagnostik in der Traumatologie, bei komplexen Fehlbildungen und bei therapeutischen Fragestellungen im Kiefer- und Gesichtsbereich (Schulze R., 2013).

2.4.2 Darstellung des Alveolarknochens und Dimensionstreu der DVT

Die Darstellung der Gewebe erfolgt in axialer, sagittaler und koronaler Ebene. Verschiedene Ansichten und Schnittbilder können nach vorher festgelegter Bildebene und Schnittbildverlauf auf die individuellen diagnostischen Anforderungen des Behandlers eingestellt, mit speziellen Werkzeugen ausgewertet und eindrucksvolle 3D-Rekonstruktionen erstellt werden. Durch den mathematischen Prozess der Rückprojektion entstehen Fehler wie Aufhärtungs- und Auslöschungseffekte, die besonders um strahlendichte Strukturen, beispielsweise metallische Objekte, als sogenannte „Artefakte“ ins Auge fallen. Diese verhindern eine ordnungsgemäße Befundung unmittelbar umgebender Strukturen (Schulze R., 2013).

Die Längenmessung in der Digitalen Volumentomographie ist ein akkurate, nichtinvasives und praktisches diagnostisches Hilfsmittel bei der Planung von Implantatpositionen (Kobayashi et al., 2004; Pinsky et al., 2006). In der Schnittbilddiagnostik der DVT wird die Position des Mandibularkanals im posterioren Unterkiefer zuverlässig dargestellt (Waltrick et al., 2013).

Nichtsdestotrotz sollte bei der Planung von Implantationen neben einem Sicherheitsabstand zusätzlich eine Messtoleranz von 0,5 mm einbezogen werden (Halperin-Sternfeld et al., 2014). Je höher die Auflösung des DVT, umso kleiner sind die Voxel und umso zuverlässigere Aussagen lassen sich zur Dicke des kortikalen Knochens treffen (Razavi et al., 2010). Andere Autoren beschreiben hingegen eine signifikante Vergrößerung der Dimensionen der Kortikalis mit bis zu 0,63 mm Abweichung im Vergleich zum histologischen Befund (Gerlach et al., 2013). Letztendlich unterliegen volumetomografische Messungen jedoch Schwankungen, deren Ursache zum einen in unterschiedlichen Geräten sowie angewendeter Software und deren Einstellungen und zum anderen in verschiedenen Messmethoden begründet sind (Kosalagood et al., 2015). In welchem Ausmaß softwarebasierte Werkzeuge zu Strecken- und Winkelmessung reproduzierbar eingesetzt werden und welche Fehler beim Platzieren der Messpunkte entstehen können, ist in der wissenschaftlichen Literatur nicht eindeutig geklärt.

2.4.3 Vermessung zahnloser Unterkiefer mit Hilfe der DVT

In der Literatur existieren nur begrenzt Informationen über die vertikalen und transversalen Dimensionen zahnloser Unterkiefer. Deren vertikale Vermessung wurde in der Vergangenheit hauptsächlich anhand von Panoramaschichtaufnahmen durchgeführt (Canger & Celenk, 2012; Guler et al., 2005; Panchbhai, 2013; Soikkonen et al., 1996; Xie et al., 1997). Alternativ wurden auch Fernröntgenseitenaufnahmen verwendet (Kovacic et al., 2012). Die Aussagekraft solcher zweidimensionalen Aufnahmen wird jedoch systembedingt durch Überlagerungs- und Distorsionseffekten limitiert. Erst in wenigen neueren Studien wurde die Digitale Volumetomographie zur Bestimmung vertikaler und horizontaler Dimensionen zahnloser Unterkiefer bzw. Unterkieferabschnitte angewandt. Bislang wurde jedoch keine standardisierte, reproduzierbare Methode zur Ausrichtung der DVT Datensätze, Lokalisation der Messpositionen und Definition der Messstrecken beschrieben. In bisherigen Publikationen ist die Vermessung zahnloser Unterkiefer in geringem Umfang und an wenigen Messpositionen erfolgt und die Messergebnisse wurden nicht im Zusammenhang mit der Planung einer zahnärztlichen Implantation ausgewertet (Bressan et al., 2017; de Souza et al., 2016).

3 Material und Methode

3.1 Patientengut und Einteilung der Untersuchungsgruppen

3.1.1 Herkunft und Erstellung der DVT-Datensätze

Aus der Patientenkartei der kieferchirurgischen Gemeinschaftspraxis Dr. Hentschel und Herrmann in Zwickau/Sachsen wurden freundlicherweise alle DVT-Aufnahmen seit Anschaffung des Gerätes im Jahre 2008 für die vorliegende Studie zur Verfügung gestellt. Sie wurden im Zeitraum vom 21.04.2008 bis 21.07.2014 ausschließlich in der obigen Praxis angefertigt. Die Indikationen zur Erstellung dieser DVT-Aufnahmen wurden im Rahmen der Behandlung gestellt und standen nicht im Zusammenhang mit dieser Studie. Die rein chirurgisch tätige Überweisungspraxis liegt im Zentrum der viertgrößten Stadt Sachsens und deckt das gesamte Spektrum ambulanter Behandlungen der Mund-, Kiefer- und Gesichts- bzw. Oralchirurgie ab. Die Bilddaten befanden sich auf dem praxisinternen Server und wurden zur Durchführung der vorliegenden Studie exportiert. Die Einwilligung der Praxisinhaber liegt schriftlich vor (s. Anhang). Vor Beginn der Datenerhebung wurde nach Patientenalter selektiert und alle Patienten ausgeschlossen, die zum Zeitpunkt der Aufnahme das 50. Lebensalter nicht vollendet hatten. Diese willkürlich gewählte Altersgrenze wurde begründet durch die geringe Wahrscheinlichkeit der Zahnlosigkeit unter einem Alter von 50 Jahren.

Von insgesamt 1218 vorhandenen Patienten wurden 715 DVT-Aufnahmen eingesehen und 68 Aufnahmen gemäß den Ausschlusskriterien (vgl. S. 20) für die Studie ausgewählt. Das durchschnittliche Patientenalter lag bei 68,1 Jahren, 20 Probanden waren männlich und 48 weiblich.

3.1.2 Gerät und Aufnahmeparameter

Die technischen Daten wurden aus dem Handbuch des Herstellers (KaVo, 2011) entnommen und mit den untersuchten Aufnahmen verglichen:

Gerät	KaVo 3D Exam
Röhrenspannung:	120 kV
Röntgenstromstärke:	3 mA – 7 mA
Spannungswellenform:	konstantes Potenzial
Brennpunkt:	0,5 mm
Röntgenstrahlmessungen:	rechteckiger Kegel, 23,8 cm × 5 cm × bis 19,2 cm (Breite × Höhe)
Bilddetektor:	Flachfeld, amorphes Silizium 23,8 cm × 19,2 cm (Breite × Höhe)
Graustufung:	14 Bit
Voxelgröße in mm:	0,4 / 0,3 / 0,25 / 0,2 (Kantenlänge)
Bilderfassung:	Einzelrotation um 360°
Bilderfassungsdauer:	26,9 / 8,9 Sekunden
Standard Sichtfeld:	16,5 cm (Durchmesser) × 13,5 cm (Breite × Höhe)
Erweitertes Sichtfeld:	23,2 cm (Durchmesser) × 17,0 cm (Breite × Höhe)
Einzelaufnahmen:	176 bis 544 axiale Schichtaufnahmen
Primäre Rekonstruktionszeit:	weniger als 2 Minuten für einen 26,9 Sekunden Scan bei 0,4 mm Kantenlänge des Voxels
Sekundäre Rekonstruktionszeit:	Echtzeit
Datenvolumen:	bis 700 MB pro Datensatz

Tabelle 4: Technische Daten und Aufnahmeparameter des Volumentomographen

3.1.3 Patientenauswahl

Alle Datensätze wurden in das Programm „examVision“ (Kaltenbach & Voigt GmbH, Version 1.9.3.13 Bismarckring 39, 88400 Biberach) geladen. Dieses Programm ist die mit dem DVT-Gerät „KaVo 3D Exam“ ausgelieferte Software und ermöglicht ein Sortieren der Patienten nach Geburtsdatum in aufsteigender Reihenfolge. So wurden alle Patienten mit dem Geburtsdatum vor dem 01.01.1965 eingesehen und dann entsprechend der Ausschlusskriterien ausgewählt.

Es wurden Ausschlusskriterien mit folgender Priorität festgelegt:

1. die Voxelgröße überschritt eine Kantenlänge 250 µm (zu geringe Auflösung)
2. der Patient vollendete zum Aufnahmedatum noch nicht das 50. Lebensjahr
3. es waren Bewegungsartefakte oder Aufnahmefehler erkennbar
(z.B. Strahlenschutzschürze projizierte sich in den Unterkiefer)
4. der Unterkiefer war nur teilweise oder unvollständig abgebildet
5. im Unterkiefer waren zu viele natürliche Zähne vorhanden
6. das Menton als Ausrichtungspunkt war nicht abgebildet
7. es waren pathologische Prozesse im Kieferknochen erkennbar
8. im zu untersuchenden Bereich waren retinierte oder verlagerte Zähne erkennbar
9. im zu untersuchenden Bereich waren Artefakte oder Fremdkörper vorhanden
10. im zu untersuchenden Bereich befanden sich Extraktionsalveolen, bei denen keine Verknöcherung der kranialen Kortikalis zu erkennen und damit kein oraler Messpunkt zu definieren war

3.1.4 Untersuchungsgruppen

Für diese Studie wurden zwei Untersuchungsgruppen gebildet:

Gruppe 1: Patienten mit zahnlosem Unterkiefer n=43

Gruppe 2: Patienten mit einem reduzierten Restgebiss zwischen den ersten Prämolaren (34 und 44) n=25

Dadurch konnte im Vergleich der Einfluss der anterioren Restbeziehung auf den Atrophiegrad des Unterkiefers beurteilt werden.

Die Patientengruppen setzten sich wie folgt zusammen:

	Gruppe 1	Gruppe 2
Anzahl Patienten	43	25
Männer	14	6
Frauen	29	19
Durchschnittsalter	69,8 Jahre	62,8 Jahre

Tabelle 5: Darstellung der Untersuchungsgruppen

3.1.5 Datenerfassung

Es wurden folgende Parameter für alle eingeschlossenen Patientendatensätze aufgenommen und in einer Microsoft Excel Tabelle dokumentiert:

- Geschlecht
- Identifikationsnummer
- Zahnstatus Unterkiefer
- Zahnstatus Oberkiefer
- Bemerkungen
- Geburtsdatum
- Aufnahmedatum
- Auflösung
- Field of View (Sichtfeld)

Für alle Datensätze, die zwar eingesehen, aber ausgeschlossen worden sind, wurden zusätzlich die Ausschlusskriterien dokumentiert.

3.2 Methode

3.2.1 Ausrichtung der DVT-Datensätze

Zur Bildrekonstruktion, Ausrichtung und Vermessung wurde die Software „OnDemand3D“ (Cybermed Inc. Version 1.0, Build 1.0.10.5385, x64 Version, 1382 Valencia Avenue, Unit K, Tustin, CA 92780 US) verwendet. Diese Software stellte die Firma KaVo Dental GmbH (Bismarckring 39, 88400 Biberach) zur Verfügung. Diese war aufgrund des großen diagnostischen Umfangs besonders gut für die Vermessung der Aufnahmen geeignet. Die DVT-Datensätze wurden in das Programm „OnDemand3D“ importiert und nach Datensatznummer in aufsteigender Reihenfolge sortiert. Um eine Vergleichbarkeit der DVT-Datensätze zu erreichen, wurde jede einzelne Aufnahme in der Sagittal-, Koronal- und Axialebene gleich ausgerichtet und in dieser Ausrichtung neu formatiert. Die meisten für die Studie ausgewählten DVT-Datensätze wiesen ein strahlungsoptimiertes Sichtfeld auf, sodass nur der Unterkiefer vollständig abgebildet war. Aus der Zahnmedizin bekannte Bezugsebenen, z.B. die Frankfurter Horizontale oder der knöchernen Nasenboden, eigneten sich nicht für die Ausrichtung der DVT-Datensätze (s. Abb. 1). Daher wurde in der Sagittalebene mit Menton und Gonion auf einfach zu treffende kephalometrische Orientierungspunkte zurückgegriffen. In vergleichbaren morphometrischen Studien an Unterkiefern richteten die Untersucher den Datensatz anhand von Zähnen, Zahnachsen, dem Foramen mentale (de Souza et al., 2016) oder der unteren Grenze des Unterkieferkörpers aus (Bressan et al., 2017).

Die Ausrichtung erfolgte in der vorliegenden Studie im „Dentalmodul“, Reiter „Dental“ unter der Funktion „Achse/Rückschritt“ unter Zuhilfenahme der Positionierungs-, Helligkeits-, Kontrast- und Zoom-Funktion (s. Abb. 1) Sie wurde bei jeder DVT-Aufnahme in gleicher Reihenfolge durchgeführt.

3.2.1.1 Sagittalebene:

Im Fenster „3D“ wurde die Ansicht „Röntgen“ ausgewählt. Die Ausrichtung erfolgte anhand der kephalometrischen Punkte „Menton“ und „Gonion“. Das Menton wurde definiert als am meisten anteriokaudal gelegener Punkt der Unterkiefersymphyse, das Gonion als der am weitesten kaudal und dorsal liegende Punkt des Unterkieferwinkels. Die Linie, die durch diese beiden Punkte verlief, wurde zum horizontalen Orientierungsraster ausgerichtet (s. Abb. 1b). Die Platzierung dieser Punkte unterlag einer gewissen Ungenauigkeit. Kieferorthopädischen Studien zufolge streuen die Koordinaten des Mentons in der digitalen Volumentomografie durchschnittlich 0,47 mm um den Mittelwert, beim Gonion sind es mit 1,11 mm wesentlich mehr. Im Vergleich zu 22 weiteren kephalometrischen Punkten wird ihnen ein Platz mittlerer Treffsicherheit eingeräumt (Ludlow et al., 2009).

3.2.1.2 Koronalebene:

In der „Koronal“ Ansicht wurde der kaudale Rand des Unterkieferkörpers parallel zum horizontalen Orientierungsraster eingestellt (s. Abb. 1c).

Dazu wurde von dorsal durch den Datensatz gefahren und die Schicht mit dem am meisten dorsal gelegenen Foramen mentale eingestellt, bei der zum ersten Mal die vestibuläre bzw. kraniale Kortikalis sichtbar unterbrochen war. Dieser Austrittspunkt ist ein Orientierungspunkt, bei dem die Unterkieferbasis parallel zur Horizontalen ausgerichtet wurde. Da der basale Teil des Unterkiefers weitestgehend unbetroffen von der Kieferkammatrophy ist (Bertl et al., 2014; Xie et al., 1996), wurde der am meisten kaudal gelegene Punkt des Unterkieferkörpers als verlässlich, leicht zu treffen und sicher reproduzierbar eingeschätzt.

3.2.1.3 Axialebene

Es wurde in der „Axial“ Ansicht von dorsal durch den Datensatz gescrollt und die Schicht ausgewählt, in der das Foramen mentale am weitesten kaudal lag, d.h. sichtbar die vestibuläre bzw. kraniale Kortikalis unterbrochen war. Hier erfolgte die Ausrichtung anhand des am weitesten dorsal gelegenen Punktes auf der distalen Facette des aufsteigenden Unterkieferastes. Dieser wurde parallel zum horizontalen Orientierungsraster positioniert (s. Abb.1a).

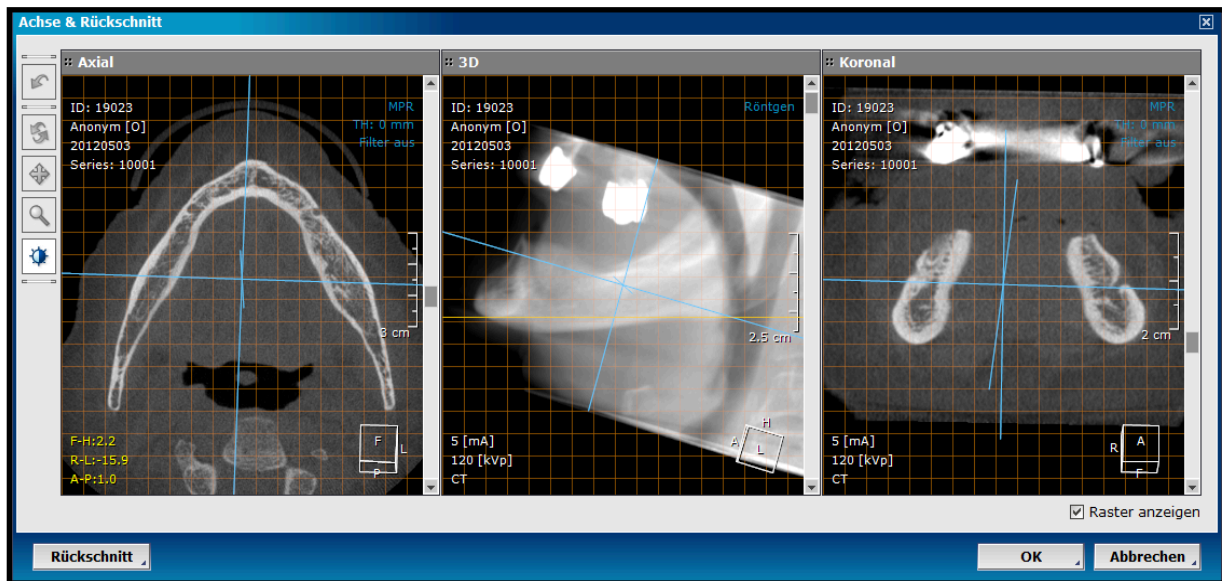


Abb. 1a: Axiale Ausrichtung Abb. 1b: Sagittale Ausrichtung Abb. 1c: Koronale Ausrichtung
 Abbildung 1: Fenster „Achse & Rückschnitt“ zur Ausrichtung des DVT-Datensatzes in drei Ebenen

3.2.2 Darstellung der zu untersuchenden Schichtebenen

3.2.2.1 Festlegung der Kieferbogenlinie

Nach der Ausrichtung des Datensatzes wurde die zu untersuchenden Schichtebenen festgelegt. Da sich hinsichtlich der Insertion dentaler Implantate im Unterkiefer Querschnittsbilder (Synonym: Cross Sections) zur Beurteilung vertikaler und transversaler Distanzen am besten eignen, wurden nur diese als Untersuchungsebene bestimmt. Um Querschnittsbilder von der Software zu erhalten, mussten in einer axialen Schichtebene erst entsprechende Darstellungparameter und anschließend eine Schnittbild-Verlaufslinie, die sog. „Kieferbogenlinie“, definiert werden.

Die Kieferbogenlinie ist eine Verlaufslinie, mit deren Hilfe die Software ein zweidimensionales Querschnittsbild erstellt. Diese Linie durchstößt dabei stets die Ebene des Bildes im allseitig rechten Winkel, ähnlich eines geometrischen Normalvektors \vec{n} .

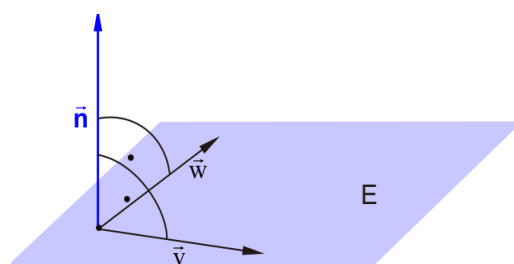


Abbildung 2: geometrischer Normalvektor

Die Kieferbogenlinie wurde in der Studie von de Souza und Kollegen anhand von elf willkürlich in der Kiefermitte platzierten Punkten festgelegt (de Souza et al., 2016). Die Genauigkeit bzw. Reproduzierbarkeit dieser Methode ist als kritisch anzusehen. Daher wurde in dieser Arbeit viel Wert auf eine möglichst standardisierte Ausrichtung gelegt. Die Kieferbogenlinie wurde bei allen vermessenen DVT-Datensätzen durch die Software anhand von vier einfach zu treffenden Punkten erstellt. Diese Punkte waren wie folgt definiert:

- der am meisten dorsal gelegene Punkt am Rand des aufsteigenden Unterkieferastes links und rechts
- Kieferkammmittelpunkte auf Höhe des Foramen mentale links und rechts

Die Punkte wurden dabei in der axialen Schicht des weiter kaudal gelegenen Foramen mentale, bei der die erste Unterbrechung der vestibulären bzw. kranialen Kortikalis zu erkennen war, platziert (Abb. 3).

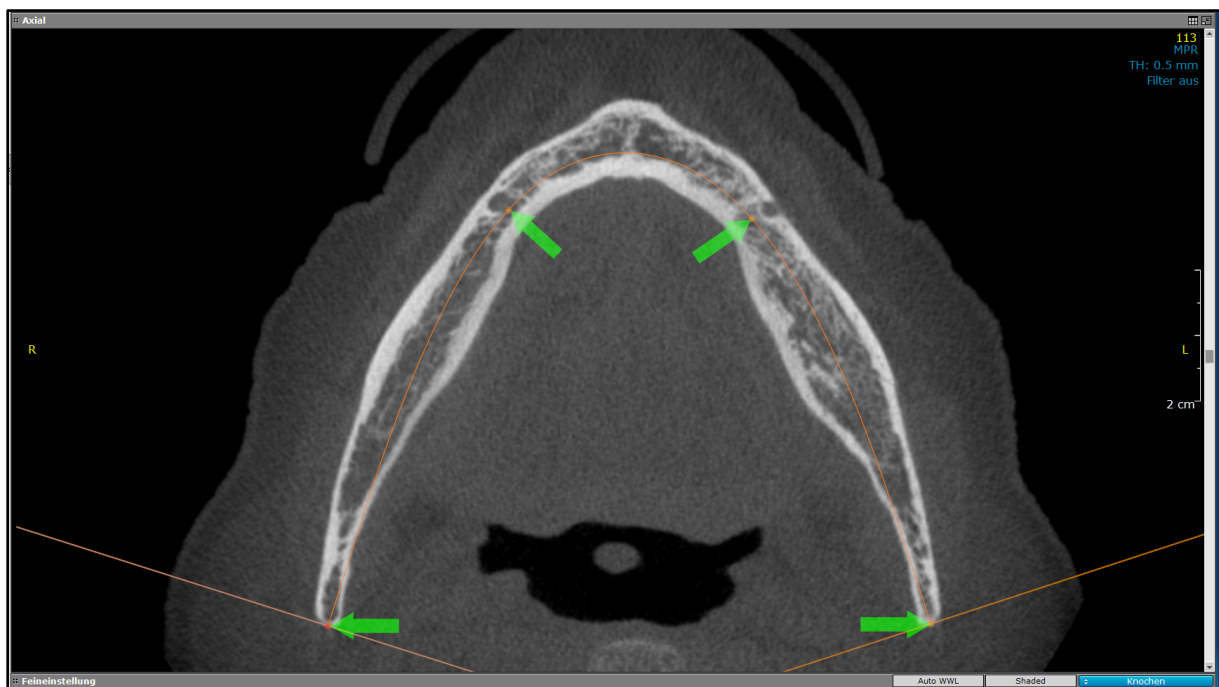


Abbildung 3: Festlegen der Punkte (rote Pfeile) für den Verlauf der Kieferbogenlinie (blaue Linie)

Nach Festlegung der Punkte errechnete das Programm eine Verbindungslinie, die harmonisch durch alle vier Punkte verlief. Dabei erstellte die Software in der Regel eine elliptische Bahn, die in einer parallelen Ebene zur Menton-Gonion-Ebene lag (s. Abb.4).

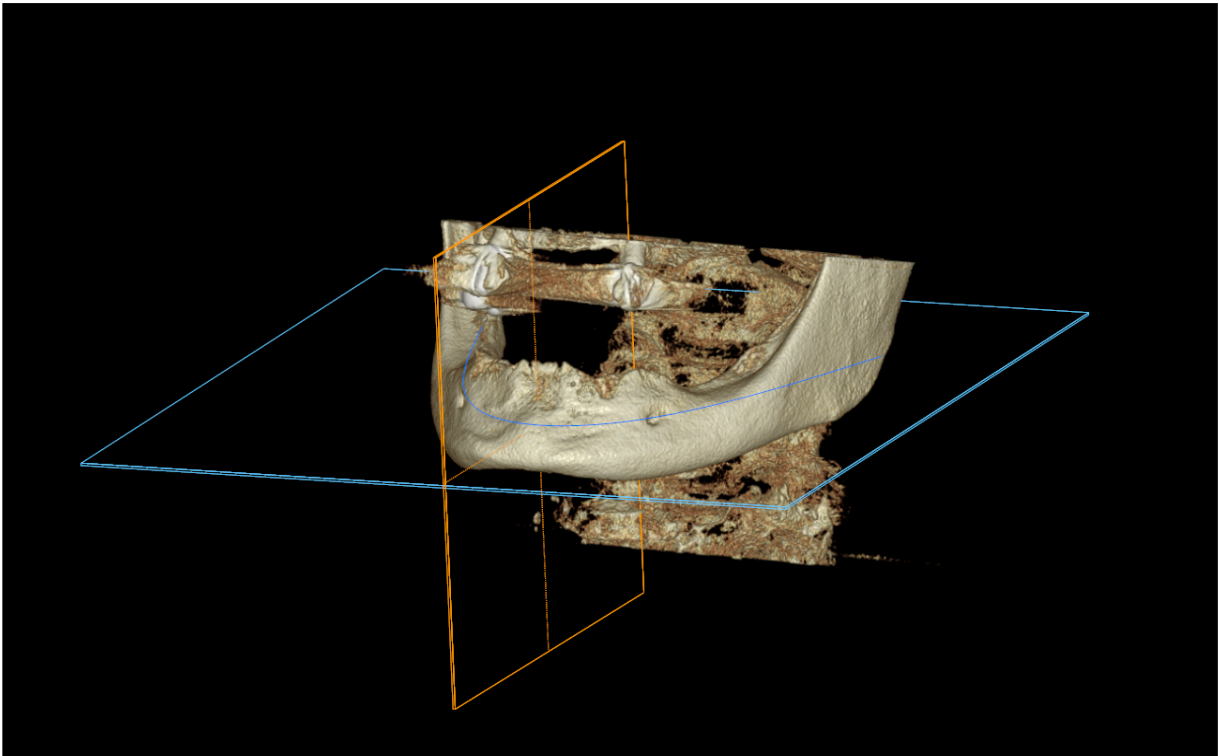


Abbildung 4: Kieferbogenlinie (blaue Linie) im 3D Modell des Unterkiefers parallel zur Menton - Gonion Ebene (blauer Rahmen) und senkrecht zur Cross Section der Unterkiefermitte (orangener Rahmen)

Diese Kurve verlief bei den oben festgelegten vier Punkten nicht immer in Kieferkammmitte. Eine Auswahl von mehreren Punkten zur genauen Positionierung der Kieferbogenlinie war zwar möglich und wurde in Betracht gezogen, jedoch aufgrund mangelnder anatomischer Orientierungspunkte als nicht reproduzierbar befunden. Individuelle Kieferbogenlinien ermöglichen einerseits das Erzeugen genauerer Querschnittsbilder, andererseits würden die Punkte zur Festlegung stark zwischen den untersuchten DVT-Aufnahmen variieren. Deshalb wurde die Zuordnung auf die oben definierten vier Punkte beschränkt.

Aufgrund der unterschiedlichen individuellen Anatomie und Atrophie des Unterkiefers war es in manchen Fällen notwendig, die Punkte alternativ festzulegen:

- öffnete sich ein Canalis mandibulae auf der Oberseite des Unterkieferkörpers, so wurde als Einstellungsebene das kontralaterale Foramen mentale ausgewählt.
- lagen beide Foramina mentalia auf der Oberseite des Unterkieferkörpers oder war das Dach des Canalis mandibulae beidseits eröffnet, wurde die am meisten kraniale Schicht ausgewählt, auf der das Foramen bzw. die Perforation noch erkennbar war. Die Punkte wurden dann in Kieferkammmitte gesetzt.
- waren beide Foramina mentalia oder die Kanalperforationen nicht in einer Schicht erkennbar, wurde die Schicht des weiter kaudal gelegenen Foramen mentale ausgewählt, die ersten beiden Punkte gesetzt, die Schichtebene gewechselt und dann die verbleibenden Punkte in der Schicht des kontralateralen Foramen mentale platziert.

In vergleichbaren volumetomographischen Studien wurde das Foramen mentale als orientierende anatomische Struktur für die Ermittlung der Messpositionen herangezogen (Bressan et al., 2017; de Souza et al., 2016). Im Gegensatz dazu wurden in der vorliegenden Arbeit die Messungen an den Lokalisationen durchgeführt, an deren Stelle ursprünglich Zähne gestanden haben. Um die Abstände der Zahnpositionen von der Mitte bestimmen zu können, wurden Mittelwerte von mesio-distalen Zahnbreiten natürlicher Zähne verwendet und miteinander verrechnet (Kraus et al., 1969). So ergab sich die Position der Mitte eines Zahnes aus der Summe der Breite vorhergehender Zähne ab der Unterkiefermitte und der Hälfte seiner eigenen Breite.

3.2.2.2 Einstellungen & Position der zu vermessenden Cross Sections

Die Software „OnDemand 3D“ erlaubt die Einstellung von Dicke eines Schnittbildes und dessen Abstand zum vorherigen bzw. nächsten im Schnittbildverlauf. Für die Querschnittsbilder wurden folgende Voreinstellungen getroffen:

Dicke der Cross Sections	0,5 mm
Abstand der Cross Sections	0,5 mm

Tabelle 6: Voreinstellungen der Cross Sections

Die Software „OnDemand3D“ wies jedem Querschnittsbild eine fortlaufende Nummer zu, beginnend mit dem ersten oben definierten Punkt der Kieferbogenlinie im 4. Quadranten. Da die Unterkiefer bei jedem Datensatz unterschiedlich lang waren, wurde die Unterkiefermitte als Ausgangspunkt für alle Positionsbestimmungen ausgewählt. Sie wurde definiert durch die Spina mentalis posterior.

Bei einem Abstand von 0,5 mm zwischen zwei Querschnittsbildern ließen sich die metrischen Abstände in Anzahl Cross Sections umrechnen. So entsprach ein Abstand von 1 mm = 2 Querschnittsbildern. Dies wurde benutzt, um eindeutig die Messpositionen festzulegen:

Zahn des Unterkiefers	Zahnbreite (Mittelwert)	Abstand der von der Kiefermitte	in Cross Sections (1 mm = 2 Cross Sect.)
Mittlerer Schneidezahn	5 mm	2,5 mm	5
Seitlicher Schneidezahn	6 mm	8,5 mm	17
Eckzahn	7 mm	14,5 mm	29
1. Prämolare	7 mm	21,5 mm	43
2. Prämolare	7 mm	28,5 mm	57
1. Molare	11 mm	37,5 mm	75
2. Molare	10 mm	48,0 mm	96

Tabelle 7: Zahnbreiten natürlicher Zähne und deren Abstand von der Unterkiefermitte (Kraus et al., 1969)

Zur Begrenzung der Datenmenge und unter dem Aspekt, dass beide Positionen nur geringe Relevanz für implantologische Überlegungen besitzen, wurde auf die Vermessungspositionen des mittleren Schneidezahns und des zweiten Molaren verzichtet.

Die Messpositionen wurden für alle DVT-Aufnahmen wie in Abb. 5 definiert.

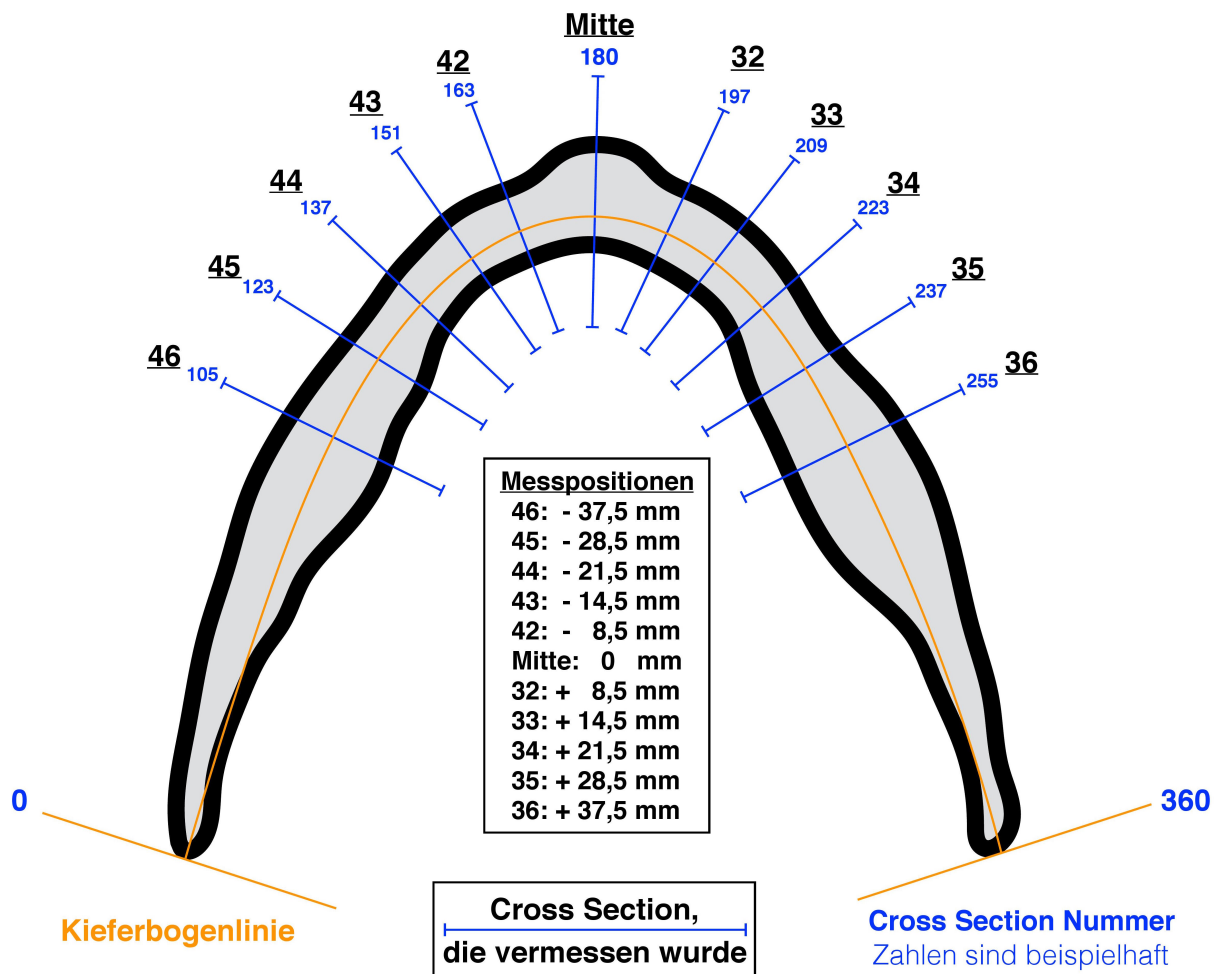


Abbildung 5: Darstellung der ausgewählten Cross Sections für die Vermessung (Blau). Die Tabelle zeigt den Abstand der Messpositionen von der Mitte aus in Millimetern entlang der Kieferbogenlinie (Orange).

3.2.3 Messpunkte

3.2.3.1 Vertikale Messpunkte

Nach Ermittlung der zu vermessenden Cross Section wurde die erste Messposition, in der Regel die Messposition 46, eingestellt. Im Querschnitt des Unterkiefers waren wenige Punkte definierbar und reproduzierbar. Aufgrund dessen mussten weitere Punkte mit Hilfe von Strecken, Schnittpunkten und Winkeln festgelegt werden (s. Tab. 8). Alle Messpunkte ergaben sich demzufolge immer aus zwei eindeutigen Messpunkten: dem am meisten kranial und dem am meisten kaudal gelegenen Punkt des Unterkiefers.

Jeder der nachfolgenden Messpunkte wurde mit Großbuchstaben in fortlaufender alphabetischer Reihenfolge bezeichnet.

Messpunkt	Erläuterung
A	kranialster Punkt des Alveolarfortsatzes
B	kaudalster Punkt des Unterkieferkörpers
C	Lot des Oberrandes des Canalis mandibulae in maximaler kraniokaudaler Ausdehnung auf die Strecke [AB]
D	Lot des kranialsten Punktes der kaudalen Kortikalis in maximaler kraniokaudaler Ausdehnung auf die Strecke [AB]

Tabelle 8: Darstellung der vertikalen Messpunkte

3.2.3.2 Horizontale Messpunkte

Aufgrund des Mangels an reproduzierbaren Messpunkten mussten die Messpunkte für die horizontalen Messungen mit Hilfe eines selbst konstruierten digitalen Übertragungsinstrumentes definiert werden. Dieses hatte die Funktion eines digitalen Geometriedreiecks und wurde durch die Kombination der Software-Tools zur Strecken- und Winkelmessung erstellt.

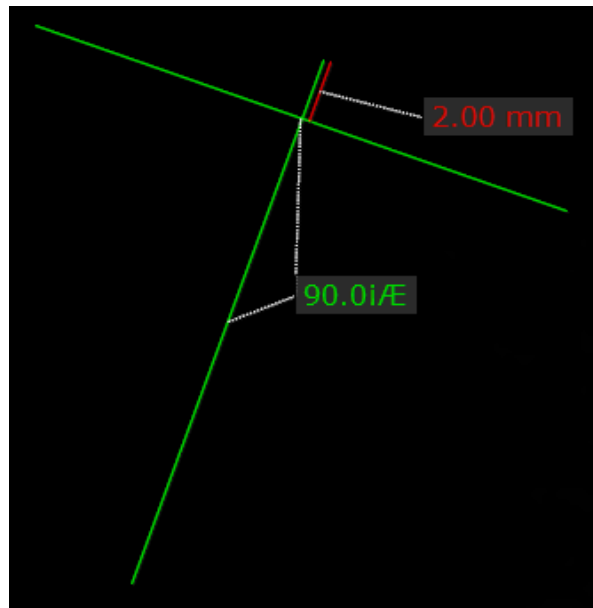


Abbildung 6: selbsterstelltes, digitales Übertragungsinstrument

Sowohl die softwarebasierten Werkzeuge als auch das erstellte Übertragungsinstrument konnten wie ein Lineal oder ein Geometriedreieck frei im Raum bewegt werden. Für jede Cross Section musste das Übertragungsinstrument neu erstellt werden.

Zuerst wurde mit dem Längenmessungswerkzeug der Software eine zur Strecke [AB] parallele Strecke von 2 mm (Abb. 6: rote Linie) abgetragen. Anschließend wurde mit Hilfe des Werkzeugs „4-Punkte-Klick-Winkel“ eine Linie, die parallel mit der Strecke [AB] war und eine zweite, die im rechten Winkel zur Strecke [AB] stand, konstruiert (Abb. 6: grüne Linien). Zur Überprüfung wurde der Winkel durch die Software in Grad ausgegeben. Dadurch entstanden zwei Geraden, die senkrecht aufeinander standen. Anschließend wurde mit der 2 mm langen Strecke, die parallel zur Strecke [AB] verlief, der kranial gerichtete Schenkel der Winkelmessung auf exakt 2 mm gekürzt. Das entstandene Übertragungsinstrument glich einem Kreuz, wobei der kurze, nach oben gerichtete Arm genau 2 mm betrug. Alle verwendeten Orientierungs- und Messpunkte für horizontale Messungen wurden in Tab. 9 aufgelistet.

Messpunkt	Erläuterung
E	Äußerster vestibulärer Schnittpunkt des Unterkiefers mit der Senkrechten der Strecke [AB], die 2 mm vom höchsten Punkt des Kieferkammes nach kaudal entlang der Strecke [AB] verschoben wurde.
F	Äußerster oraler Schnittpunkt des Unterkiefers mit der Senkrechten der Strecke [AB], die 2 mm vom höchsten Punkt des Kieferkammes nach kaudal entlang der Strecke [AB] verschoben wurde.
G	Äußerster vestibulärer Schnittpunkt des Unterkiefers mit der Senkrechten der Strecke [AB], die 4 mm vom höchsten Punkt des Kieferkammes nach kaudal entlang der Strecke [AB] verschoben wurde.
H	Äußerster oraler Schnittpunkt des Unterkiefers mit der Senkrechten der Strecke [AB], die 4 mm vom höchsten Punkt des Kieferkammes nach kaudal entlang der Strecke [AB] verschoben wurde.
I	Äußerster vestibulärer Schnittpunkt des Unterkiefers mit der Senkrechten der Strecke [AB], die 6 mm vom höchsten Punkt des Kieferkammes nach kaudal entlang der Strecke [AB] verschoben wurde.
J	Äußerster oraler Schnittpunkt des Unterkiefers mit der Senkrechten der Strecke [AB], die 6 mm vom höchsten Punkt des Kieferkammes nach kaudal entlang der Strecke [AB] verschoben wurde.
K	Äußerster vestibulärer Schnittpunkt des Unterkiefers mit der Senkrechten der Strecke [AB], die durch die maximale vestibuloorale Ausdehnung des Canalis mandibulae verläuft.
L	Äußerster vestibulärer Schnittpunkt des Canalis mandibulae mit der Senkrechten der Strecke [AB], die durch die maximale vestibuloorale Ausdehnung des Canalis mandibulae verläuft.
M	Äußerster oraler Schnittpunkt des Canalis mandibulae mit der Senkrechten der Strecke [AB], die durch die maximale vestibuloorale Ausdehnung des Canalis mandibulae verläuft.
N	Äußerster oraler Schnittpunkt des Unterkiefers mit der Senkrechten der Strecke [AB], die durch die maximale vestibuloorale Ausdehnung des Canalis mandibulae verläuft.

Tabelle 9: Definition der horizontalen Messpunkte

3.2.4 Messstrecken und -winkel

Aus den oben genannten Messpunkten ergaben sich insgesamt acht Messungen für den Seitenzahnbereich und sechs Messstrecken für den Frontzahnbereich (s. Tab. 10). In folgender Skizze (Abb. 7) sind alle Messungen unabhängig von Front- oder Seitenzahnbereich dargestellt.

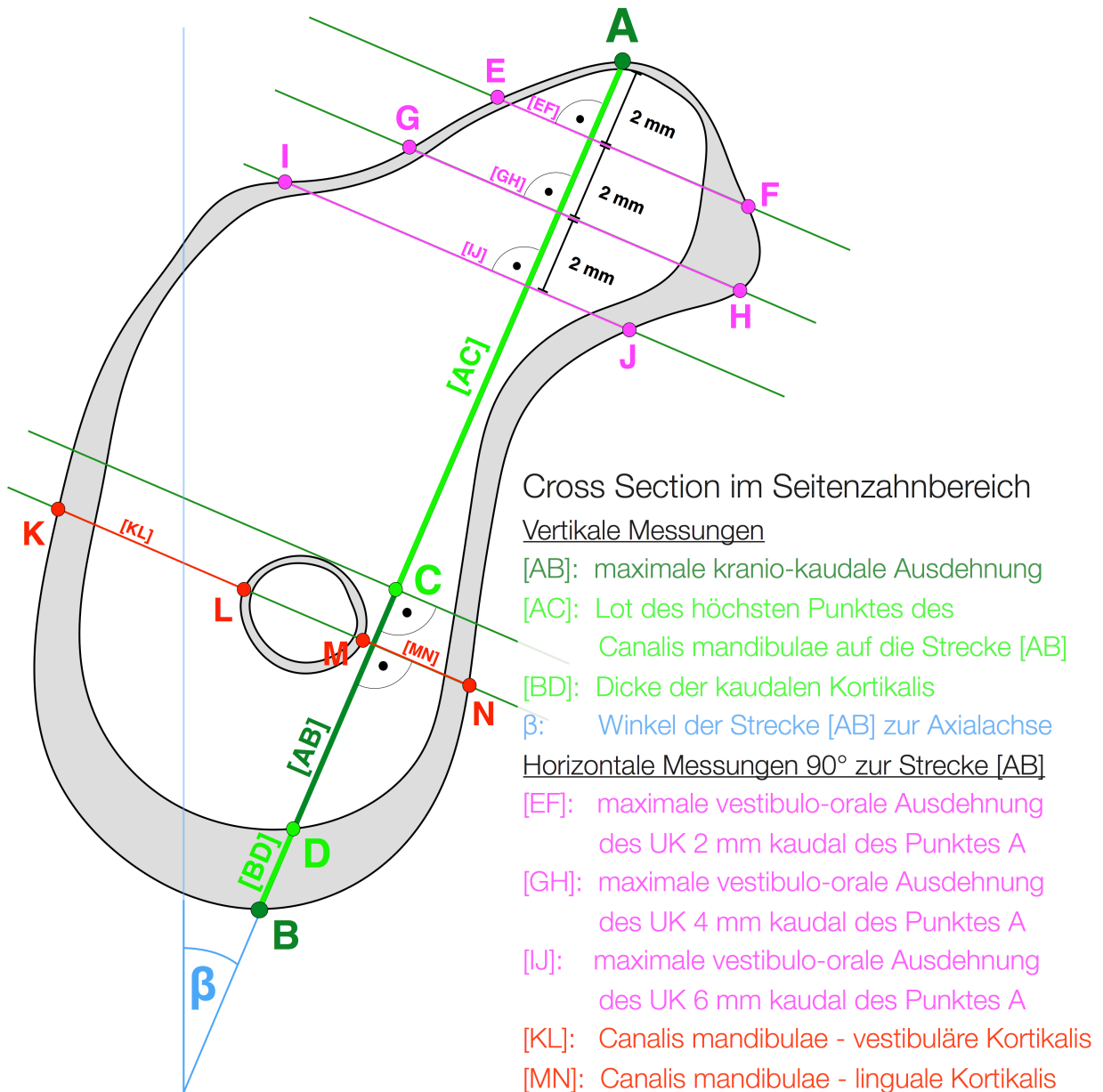


Abbildung 7: Darstellung aller Messpunkte und Messstrecken

Messung	Messpositionen	Erläuterung
Strecke [AB]	46, 45, 44, 43, 42, Mitte 32, 33, 34, 35, 36	maximale kraniokaudale Ausdehnung des Unterkiefers
Winkel β		Winkel zwischen der Strecke [AB] und der Axialachse
Strecke [AC]	46, 45, 44, 34, 35, 36	Distanz zwischen kranialstem Punkt des Unterkiefers und dem Lot des Oberrandes des Canalis mandibulae entlang der Strecke [AB]
Strecke [BD]	33, 32, Mitte, 42, 43	Dicke der kaudalen Kortikalis in maximaler kraniokaudaler Ausdehnung
Strecke [EF]	46, 45, 44, 43, 42, Mitte, 32, 33, 34, 35, 36	Unterkieferbreite 2 mm kaudal des kranialsten Punktes senkrecht zur maximalen kraniokaudalen Ausdehnung
Strecke [GH]		Unterkieferbreite 4 mm kaudal des kranialsten Punktes senkrecht zur maximalen kraniokaudalen Ausdehnung
Strecke [IJ]		Unterkieferbreite 6 mm kaudal des kranialsten Punktes senkrecht zur maximalen kraniokaudalen Ausdehnung
Strecke [KL]	46, 45, 44, 34, 35, 36	vestibuläre Distanz zwischen Canalis mandibulae und der Außenkante des Unterkieferkörpers, senkrecht zur maximalen kraniokaudalen Ausdehnung
Strecke [MN]	46, 45, 44, 34, 35, 36	orale Distanz zwischen Canalis mandibulae und der Außenkante des Unterkieferkörpers, senkrecht zur maximalen kraniokaudalen Ausdehnung

Tabelle 10: Definition der Messstrecken mit Anfangs- und Endpunkt unter Angabe, an welchen Messpositionen die Messung erfolgte

3.2.5 Aufbereitung und Zuordnung der Messwerte zum Knochenangebot

Die Messwerte wurden mit Microsoft Excel 2016® (Microsoft Corporation) tabellarisch erfasst und aufbereitet.

Zur Steigerung der klinischen Aussagefähigkeit der vorliegenden Studie wurden ermittelte Messtrecken von Unterkieferhöhen in Kombination mit Messtrecken von Unterkieferbreiten ausgewertet. Das Ziel war es, die reale Darstellung und Angabe eines Knochenangebotes zu verfolgen, welches sich hinsichtlich Höhe und Breite für eine Implantation eignen würde. Für eine erfolgreiche Implantation muss zirkulär um das dentale Implantat mindestens 1 mm kortikaler Knochen vorhanden sein (Albrektsson et al., 1986). Wird von dem kleinsten Durchmesser (\varnothing 2,1 mm) eines Miniimplantates ausgegangen, so muss die Mindestbreite für eine Implantation 4 mm betragen. War dies nicht der Fall, wurde von den Strecken [AC] im Seitenzahnbereich bzw. [AD] im Frontzahnbereich, je nach dem in welcher Tiefe die Mindestbreite von 4 mm gegeben war, entweder 2 mm, 4 mm oder 6 mm subtrahiert. Ausschlaggebend für den Betrag des Subtrahenden waren demzufolge die Beträge der Breiten [EF], [GH] und [IJ]. Die genaue Berechnung der entstehenden Strecken [A'B], [A'C] bzw. [A'D], die fortan als „für eine Implantation geeignete Knochenhöhe“ bezeichnet werden, sind in Tab. 12 ersichtlich.

Bedingungen für die Kalkulation	Strecke [A'B]: für eine Implantation geeignete Knochenhöhe im Frontzahnbereich ohne kaudale Kortikalis	Strecke [A'D]: für eine Implantation geeignete Knochenhöhe im Frontzahnbereich ohne kaudale Kortikalis	Strecke [A'C]: für eine Implantation geeignete Knochenhöhe über dem Mandibularkanal im Seitenzahnbereich
[EF] > 4 mm	[A'B] = [AB]	[A'D] = [AD]	[A'C] = [AC]
[EF] < 4 mm und [GH] > 4 mm	[A'B] = [AB] – 2 mm	[A'D] = [AD] – 2 mm	[A'C] = [AC] – 2 mm
[GH] < 4 mm und [IJ] > 4 mm	[A'B] = [AB] – 4 mm	[A'D] = [AD] – 4 mm	[A'C] = [AC] – 4 mm
[IJ] < 4 mm	[A'B] = [AB] – 6 mm	[A'D] = [AD] – 6 mm	[A'C] = [AC] – 6 mm

Tabelle 11: Berechnung der für eine Implantation geeigneten Knochenhöhe

Die vermessenen Strecken jeder Messposition wurden mit ausgewählten referenziellen Implantatgrößen zuzüglich eines allseitigen, 1 mm umfassenden Sicherheitsabstandes verglichen. So konnte dargestellt werden, wie häufig das Knochenangebot für ein Implantat bestimmter Größe vorhanden war. Die Eignung für die Insertion dieser Implantate wurde dokumentiert. Als Vorlage dienten zwei willkürlich ausgewählte Implantatsysteme, zu denen eine gute Studienlage zum Zeitpunkt der Anfertigung dieser Arbeit vorlag.

In Tab. 12 sind die festgelegten referenziellen Implantatgrößen für Front- und Seitenzahnbereich sowie die dieser Arbeit zugrunde gelegten Abmessungen des zur Implantation erforderlichen Knochenangebotes ersichtlich.

Frontzahnbereich					
Implantat				Erforderliches Knochenangebot	
Hersteller	Bezeichnung	Durchmesser	Länge	Durchmesser	Mindesthöhe
3M ESPE®	MDI	2,1 mm	10 mm	4 mm	11 mm
		2,1 mm	15 mm	4 mm	16 mm
		2,1 mm	18 mm	4 mm	19 mm
Straumann®	Standard Plus RN	4,1 mm	10 mm	6 mm	11 mm
		4,1 mm	12 mm	6 mm	13 mm
		4,1 mm	14 mm	6 mm	15 mm
Seitenzahnbereich					
Implantat				Erforderliches Knochenangebot	
Hersteller	Bezeichnung	Durchmesser	Länge	Durchmesser	Mindesthöhe
3M ESPE®	MDI	2,1 mm	10 mm	4 mm	11 mm
Straumann®	Standard Plus RN	3,3 mm	8 mm	5 mm	9 mm
		4,1 mm	4 mm	6 mm	5 mm
		4,1 mm	6 mm	6 mm	7 mm
		4,1 mm	10 mm	6 mm	11 mm

Tabelle 12: Implantatsysteme und deren Abmessungen, die als Referenz zur Berechnung des zur Implantation erforderlichen Platzbedarfs verwendet wurden.

3.2.6 Ermittlung der Messfehler

Zur Bewertung der Messfehler und der Reproduzierbarkeit der vorliegenden Studie sind fünf zufällig ausgewählte DVT-Datensätze, ähnlich dem Vorgehen von Stratemann et al., dreifach vermessen worden (Stratemann et al., 2008).

Im Gegensatz zu Stratemann et al. wurden in der vorliegenden Arbeit Messungen an fünf verschiedenen Patienten statt fünf Messungen am selben Patienten durchgeführt, um Lerneffekte zu verhindern und die Pause von einer Woche zwischen den wiederholten Messungen zu umgehen. Es wurden keine Patienten aus Gruppe 2 verwendet, da in Gruppe 2 nur Messungen im Seitenzahnbereich zur Verfügung standen. Die fünf Datensätze wurden dreifach vermessen, weil sich die Messabweichung aus zwei überlagernden Ungenauigkeiten zusammensetzt:

Der erste Messfehler begründet sich im ungenauen Platzieren der Messpunkte bei der Anwendung der Software-Tools. Er wird fortan als „Punktfehler“ bezeichnet. Der Zweite entsteht durch eine abweichende Ausrichtung des DVT-Datensatzes im dreidimensionalen Raum und wird „Ausrichtungsfehler“ genannt. Er bildet zusammen mit dem „Punktfehler“ den „Gesamtmessfehler“.

Zur Bestimmung des Punktfehlers wurde die gleiche Ausrichtung des Unterkiefers und die gleiche Kieferbogenlinie wie bei der Datenerhebung benutzt. In der zweiten Messung wurden die DVT-Datensätze vom unbearbeiteten Originaldatensatz ausgehend neu ausgerichtet und vermessen, um die Auswirkung aller Fehler (Gesamtmessfehler) einschätzen zu können.

Zur Ermittlung der Reproduzierbarkeit wurden die Messwerte voneinander subtrahiert und die entstandenen Differenzen als absolute Beträge angegeben. Es folgte die Berechnung des Mittelwertes sowie des spezifischen Konfidenzintervalls (KI = 95 %), um Aussagen zur Streuung treffen zu können. Die Messtrecken [BD] in Frontzahnbereich und [AC] im Seitenzahnbereich wurden bei der Auswertung gemeinsam betrachtet, da ihnen durch ähnliche Messpunkte (ein Messpunkt exakt am Rande der Kortikalis; ein Messpunkt am Übergang Spongiosa – Kortikalis; beide Messpunkte liegen auf einer Geraden) die gleiche Treffsicherheit eingeräumt wurde.

3.3 Statistische Auswertung

Die deskriptive statistische Auswertung und graphische Darstellung der Ergebnisse erfolgte mit dem Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel 2016® (Microsoft Corporation). Tabellen wurden mit Microsoft Word 2016® und Microsoft Excel 2016® erstellt. Die analytische statistische Auswertung wurde mit dem Statistikprogramm IBM SPSS Statistics 24 (IBM) mit der Unterstützung der medistat GmbH in Kiel durchgeführt.

Zunächst wurden alle erhobenen Messwerte im Zusammenhang mit Identifikationsnummer, Alter des Patienten und Geschlecht tabellarisch erfasst. Eingangs wurden die Patientencharakteristika auf Vergleichbarkeit untersucht. Dabei wurden die Gruppen hinsichtlich Geschlechtsunterschiede (Chi-Quadrat-Test) und Altersunterschiede (Levene-Test auf Varianzgleichheit) überprüft. Der Altersunterschied zwischen den Geschlechtern (t-Test) wurde ebenfalls analysiert.

Da viele parametrische Tests eine Normalverteilung voraussetzen, wurde bei den zu untersuchenden Messstrecken der Kolmogorov-Smirnov-Test verwendet. Zur Prüfung der Geschlechts- und Gruppenunterschiede bezüglich der Länge der Strecke [AB] wurde der t-Test für unabhängige Stichproben durchgeführt. Sind Strecken nicht normalverteilt gewesen, kam der nicht parametrische Mann-Whitney-U-Test zur Anwendung. Der Einfluss des Alters auf die Messstrecken wurde durch die Korrelationsanalyse nach Pearson bzw. der Rangkorrelation nach Spearman überprüft.

Anschließend erfolgte eine deskriptive statistische Auswertung der Daten. Je nach Fragestellung wurde der Mittelwert, die Standardabweichung, der Median und die unteren (ersten) bzw. oberen (dritten) Perzentile als Indikatoren der Streuung ermittelt. Ausgewählte Variablen wurden in Kreis-, Punkt-, Balken- und Liniendiagrammen sowie Boxplots dargestellt.

Zu den wichtigsten Diagrammen wurden die Messwerte zusätzlich tabellarisch dargelegt.

4 Ergebnisse

4.1 Patientengut und Patientencharakteristika

Für die vorliegende Studie sind insgesamt 715 Digitale Volumentomogramme eingesehen worden. Nach Anwendung der Ausschlusskriterien werden 9 % der zur Verfügung stehenden DVT-Datensätze für diese Studie ausgewählt:

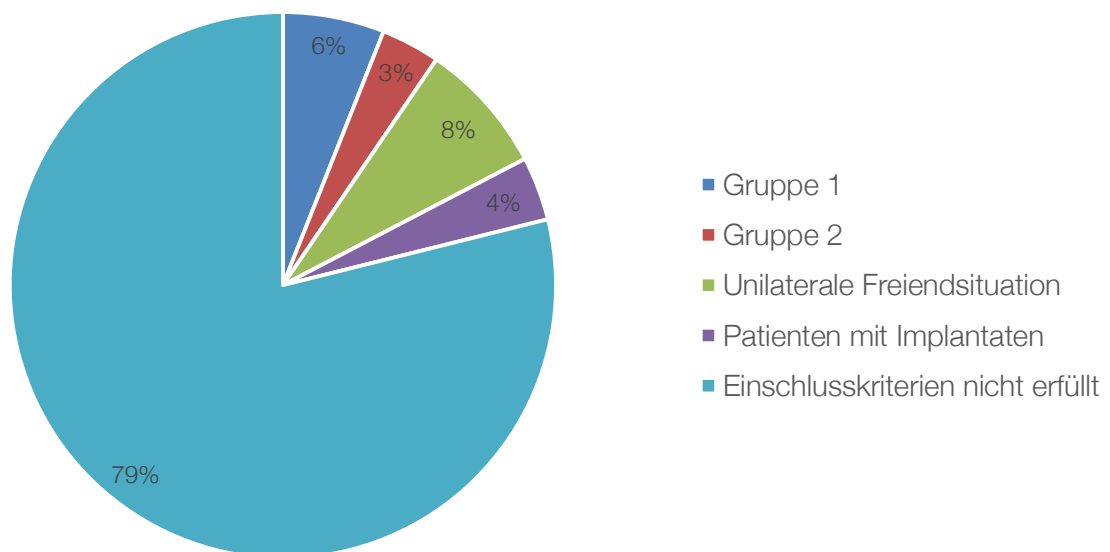


Abbildung 8: Kreisdiagramm zur Darstellung der prozentualen Verteilung des Patientenguts

Bei der Sichtung des Patientenguts ist auch der Grund des Ausschlusses nach einer Rangordnung notiert worden. So haben fast die Hälfte aller durchgesehenen DVT-Datensätze nicht die anatomischen Voraussetzungen und bei ungefähr einem Fünftel ist der Unterkiefer nicht abgebildet. Einen Überblick zu den genauen Ausschlussgründen gewährt das nachfolgende Kreisdiagramm (s. Abb. 9).

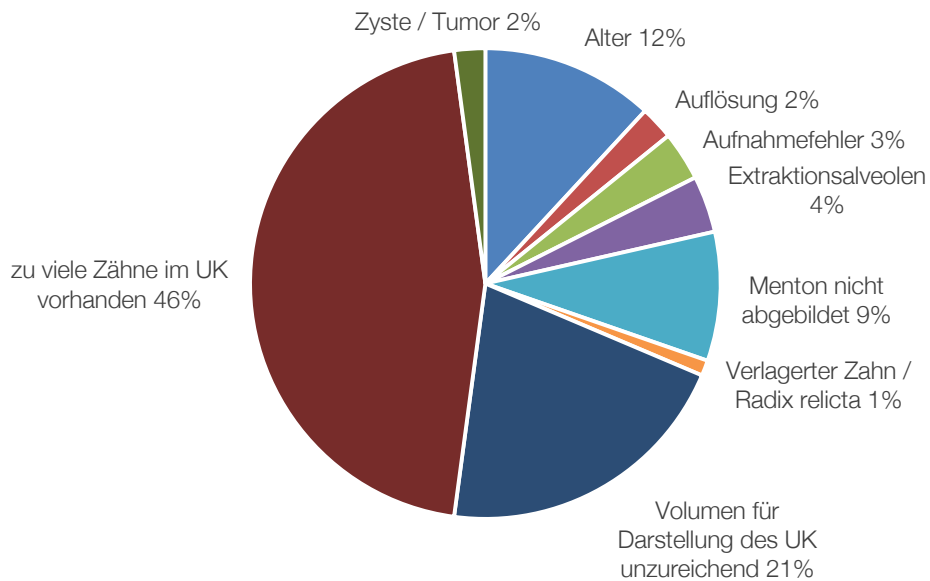


Abbildung 9: Kreisdiagramm zur prozentualen Darstellung der Ausschlussgründe

Auch bei Patienten mit zahnlosem Unterkiefer, der eigentlichen Zielgruppe dieser Studie, sind in insgesamt 31 Fällen Studienausschlüsse vorgenommen worden. Die Hauptgründe sind Aufnahmefehler, z.B. eine störende Strahlenschutzschürze oder Positionierungsfehler, sowie nicht verheilte Extraktionsalveolen oder Fremdkörper. Die prozentuale Verteilung dieser Ausschlussgründe zeigt Abb. 10:

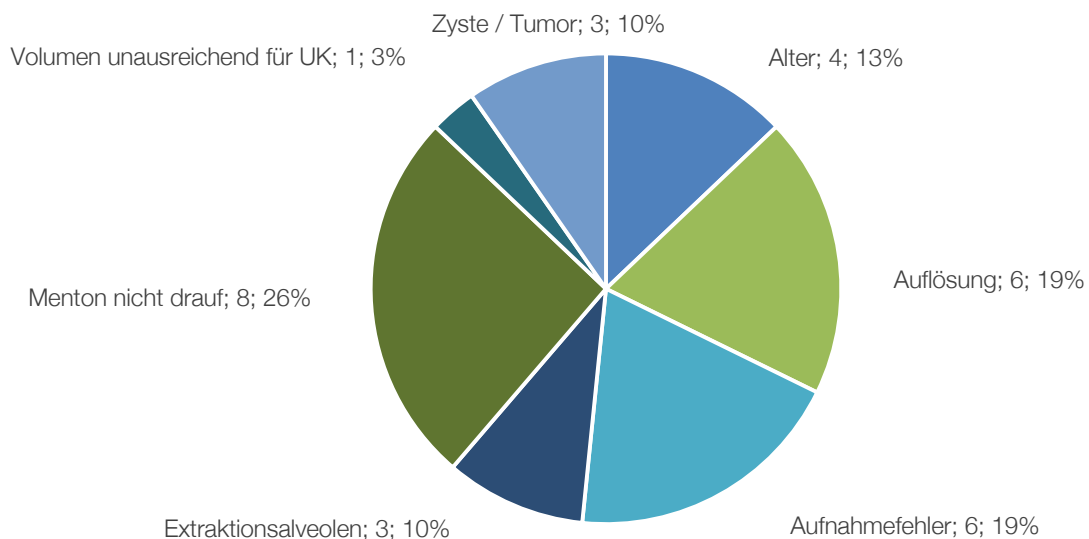


Abbildung 10: Kreisdiagramm zur Darstellung von Ausschlussgründen bei zahnlosen Patienten: Angabe von Ausschlussgrund; Anzahl der ausgeschlossenen DVT-Aufnahmen; prozentualer Anteil.

Zur Vergleichbarkeit der Gruppen werden die Patientencharakteristika hinsichtlich Alter und Geschlecht gegenübergestellt.

Ein signifikanter Geschlechtsunterschied zwischen Gruppe 1 und Gruppe 2 ist mit $p = 0,455$ im Chi-Quadrat-Test nicht nachweisbar. Bezugnehmend zum Alter erweisen sich ebenfalls keine signifikanten Unterschiede in der Altersverteilung zwischen den Gruppen 1 und 2. Dies belegt der t-Test für unabhängige Stichproben mit $p = 0,0504$.

Im Mittel sind die Patienten der Gruppe 2 fünf Jahre jünger als Patienten der Gruppe 1.

Um Aussagen über die Vergleichbarkeit der Geschlechter treffen zu können wurde der t-Test angewendet, der mit $p = 0,417$ negativ ausfällt.

Zusammenfassend sind Patienten der Gruppe 1 und 2 bezüglich Alter und Geschlecht homogen verteilt, sodass bei allen nachfolgenden Tests auf Gruppen- oder Geschlechtsunterschiede seitens der Stichprobe keine Rücksicht genommen werden muss.

4.2 Vertikale und horizontale Streckenmessungen

4.2.1 Unterkieferhöhenvermessung

Die absoluten Unterkieferhöhen entsprechen den Messstrecken [AB]. Sie werden nachfolgend sowohl für Gruppe 1 (Abb. 11) als auch für Gruppe 2 (Abb. 12) durch den Median als Mittelwert beschrieben und unterliegen einer Streuung, die durch das untere bzw. obere Quartil der Messwerte dargestellt ist. Der Mittelwert wird zusätzlich als Querstrich eingezeichnet. Er weicht bis zu 0,95 mm vom Median ab. Dagegen ist er in manchen Messpositionen nahezu identisch.

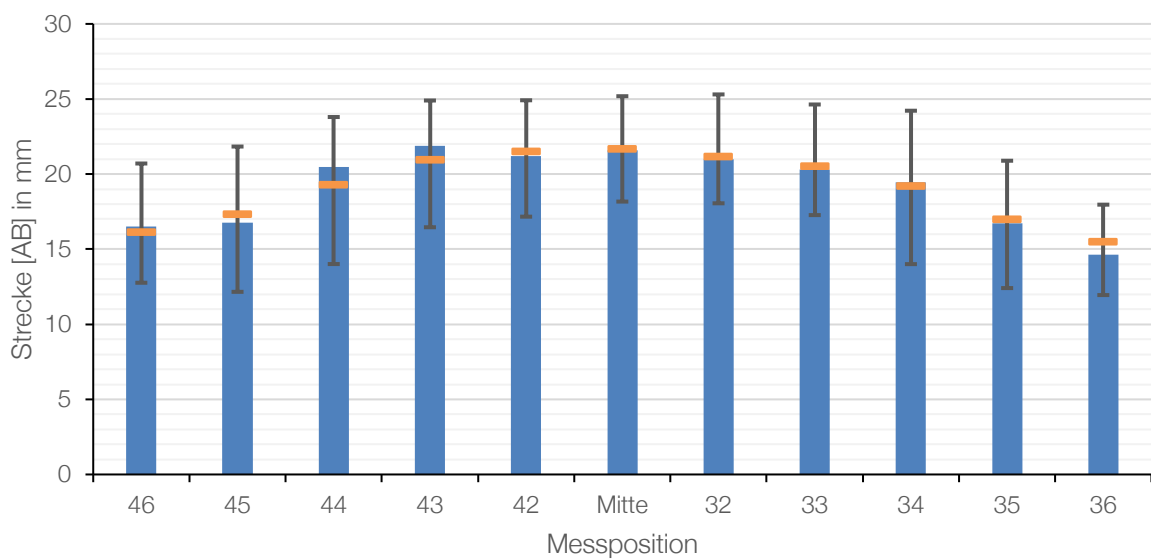


Abbildung 11 Säulendiagramme für die Längenmessung der absoluten Unterkieferhöhen (Median, Blau) von Gruppe 1 mit eingezeichnetem oberen und unteren Quartil sowie Mittelwert (Orange)

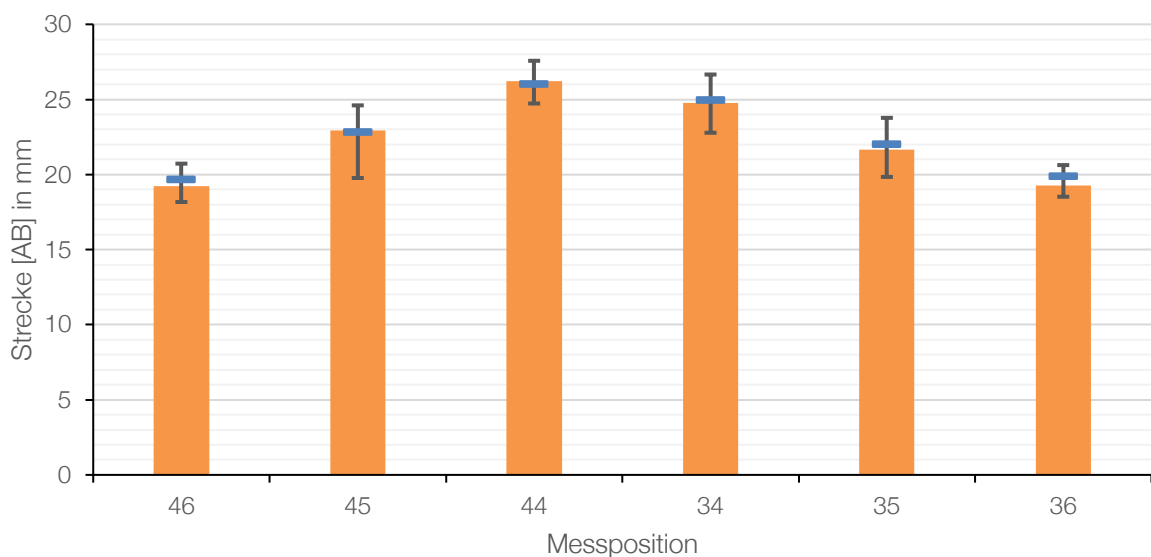


Abbildung 12: Säulendiagramme für die Längenmessung der absoluten Unterkieferhöhen (Median, Orange) von Gruppe 2 mit eingezeichnetem oberen und unteren Quartil sowie Mittelwert (Blau)

Beim Vergleich der Mittelwerte der Messungen im Seitenzahnbereich wird deutlich, dass Patienten aus Gruppe 2 stets mehr Knochenhöhe haben als Patienten aus Gruppe 1. Die durchschnittliche Differenz beträgt 5,2 mm, wobei die größten Unterschiede an der Messposition des ersten Prämolaren zu finden sind (s. Tab 13). Durch den t-Test für unabhängige Stichproben und den Mann-Whitney-U-Test für nicht normalverteilte Stichproben kann statistisch signifikant nachgewiesen werden, dass Patienten mit einem anterioren Restgebiss im Unterkiefer mehr Knochenhöhe haben als Patienten mit zahnlosem Unterkiefer:

Messposition	46	45	44	34	35	36
Mittelwert Strecke [AB] Gruppe 1 (mm)	16,14	17,32	19,27	19,20	17,00	15,48
Mittelwert Strecke [AB] Gruppe 2 (mm)	19,71	22,84	26,07	24,98	22,03	19,92
Mittlere Differenz (mm)	3,56	5,51	6,80	5,78	5,03	4,44
Signifikanz (zweiseitig)	< <i>0,01</i>	< <i>0,01</i>	< <i>0,01</i>	< <i>0,01</i>	< <i>0,01</i>	< <i>0,01</i>

Tabelle 13: Durchschnittliche Messwerte der Strecken [AB] von Gruppe 1 und Gruppe 2 sowie deren mittlere Differenz und die Ergebnisse der statistischen Tests auf Gruppenunterschiede in der Strecke [AB]. Signifikante Unterschiede sind dabei *kursiv* markiert.

Zur Einschätzung der prozentualen Verteilung von Kieferkammhöhen und -breiten werden bestimmte Höhenintervalle zusammengefasst. In den nachfolgenden Ergebnissen ist die Höhe des Unterkiefers an eine Mindestbreite von 4 mm, von kranial aus betrachtet, geknüpft (vgl. Tab. 11, S. 35). Die Häufigkeitsverteilung der Messungen wurde in Kreisdiagrammen visualisiert. Um aussagekräftigere Resultate darzustellen, werden symmetrische Messpositionen zusammen analysiert. Das implantierbare Knochenangebot im Seitenzahnbereich von Gruppe 1 ist an allen Messpositionen in der Hälfte der Fälle weniger als 6 mm, bei manchen Messpositionen bis zu 40 % weniger als 4 mm hoch. Nur bei knapp einem Drittel der Patienten können 8 mm und mehr festgestellt werden:

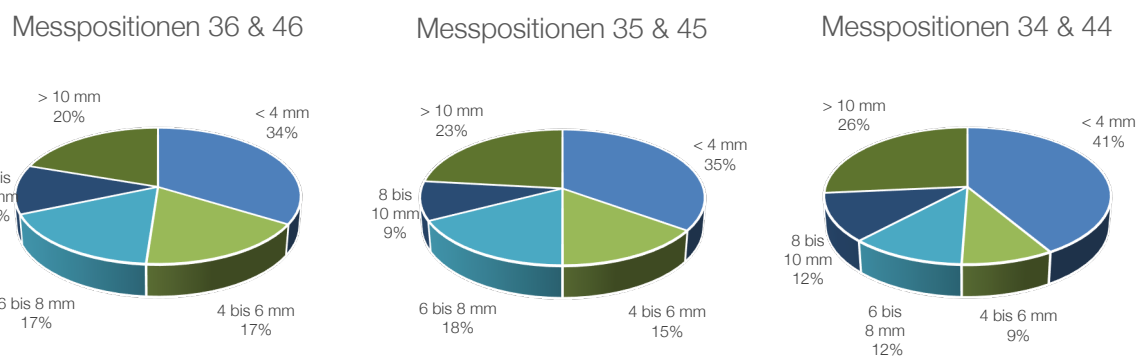


Abbildung 13: Kreisdiagramme zur Darstellung der prozentualen Verteilung der Höhe der Strecke [A\C] im Seitenzahnbereich von Gruppe 1

Die Darstellung der Ergebnisse aus Gruppe 2 erfolgt in Abb. 14.

Im Vergleich zu Gruppe 1 ist deutlich erkennbar, wie stark sich die Gruppenunterschiede auf die prozentuale Verteilung ausgewirken. So wiesen stets mehr als zwei Drittel der Messpositionen eine zur Implantation geeignete Knochenhöhe von mehr als 8 mm auf.

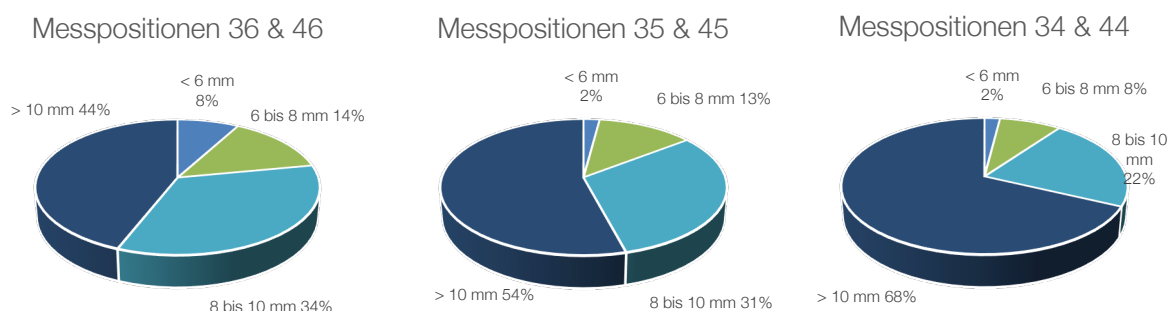


Abbildung 14: Kreisdiagramme zur Darstellung der prozentualen Verteilung der Höhe der Strecke [A\C] im Seitenzahnbereich von Gruppe 2

Im Frontzahnbereich sind die zur Implantation erforderlichen Unterkieferhöhen homogen verteilt, 60 % bis 90 % des zur Verfügung stehenden Knochenangebotes ist höher als 10 mm und in keiner Messposition sind weniger als 4 mm anzutreffen:

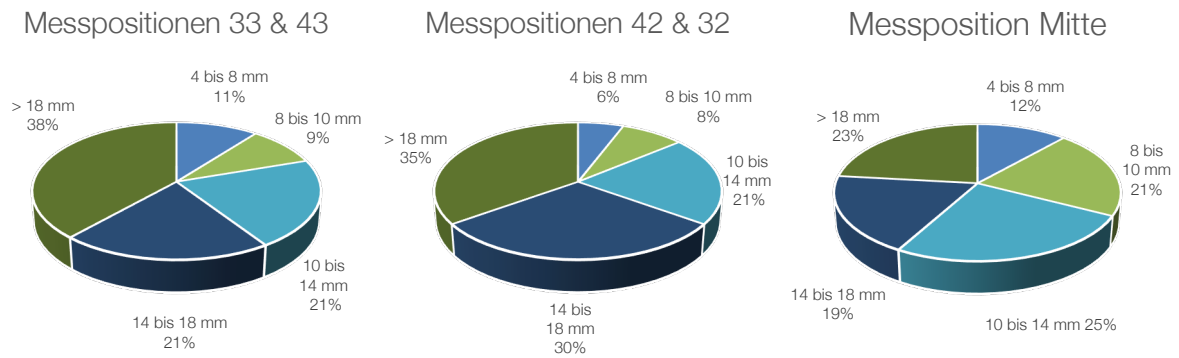


Abbildung 15: Kreisdiagramme zur Darstellung der prozentualen Verteilung der Höhe der Strecke [A`D] im Frontzahnbereich

4.2.2 Unterkieferbreitenvermessung

Die Ergebnisse der durchgeführten statistischen Tests zur Überprüfung von Gruppenunterschieden, zeigt bezüglich der Strecke [EF] keine statistische Signifikanz (Signifikanzniveau: $p < 0,05$).

Messposition	46	45	44	34	35	36
p - Wert	0,66	0,047	0,124	0,106	0,144	0,962
Mittlere Differenz	0,38 mm	0,93 mm	0,77 mm	0,93 mm	0,68 mm	0,02 mm

Tabelle 14: Mittlere Differenzen und p-Werte für Gruppenunterschiede bezüglich der Strecke [EF]

Die Kreisdiagramme in Abb. 16 und Abb. 17 stellen die Verteilung von Intervallen der Knochenbreite dar. Im Seitenzahnbereich sind die meisten Unterkiefer in 2 mm Tiefe lediglich 4 bis 6 mm breit oder sogar schmaler.

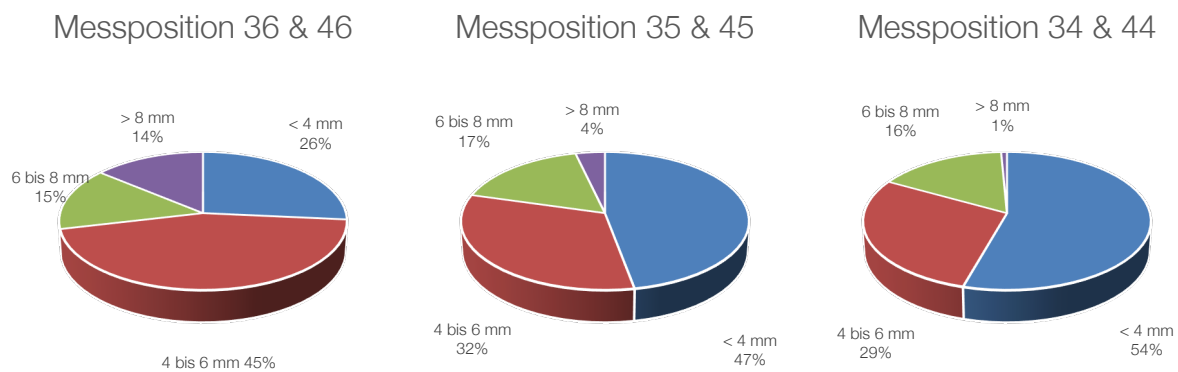


Abbildung 16: prozentuale Darstellung der Breite der Strecke [EF] im Seitenzahnbereich beider Gruppen. Der Anteil schmaler Kieferkämme erhöht sich, je weiter mesial gemessen wird. So sind in der Unterkiefermitte fast zwei Drittel der vermessenen Unterkiefer weniger als 4 mm breit. In der Unterkiefermitte sind die geringsten Breiten zu verzeichnen.

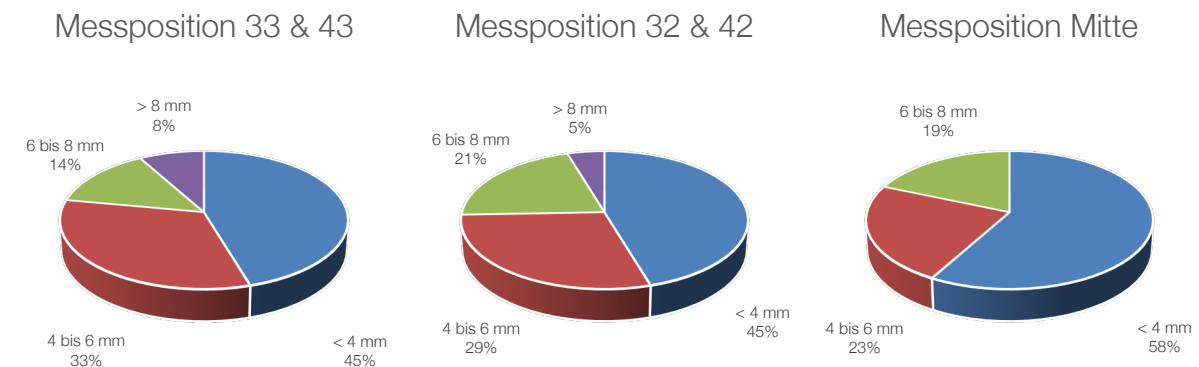


Abbildung 17: prozentuale Darstellung der Breite der Strecke [EF] im Frontzahnbereich von Gruppe 1

Die Auswertung der Messstrecken [KL] und [MN] verfolgt das Ziel, Aussagen über eine mögliche Implantation seitlich des N. mandibularis zu treffen. In Abb. 18 ist die mittlere Distanz der Strecken beider Gruppen ersichtlich. Deutlich zu erkennen, nimmt der Abstand des Mandibularkanals nach vestibulär vom ersten Prämolaren zum ersten Molaren zu und die orale Distanz ab.

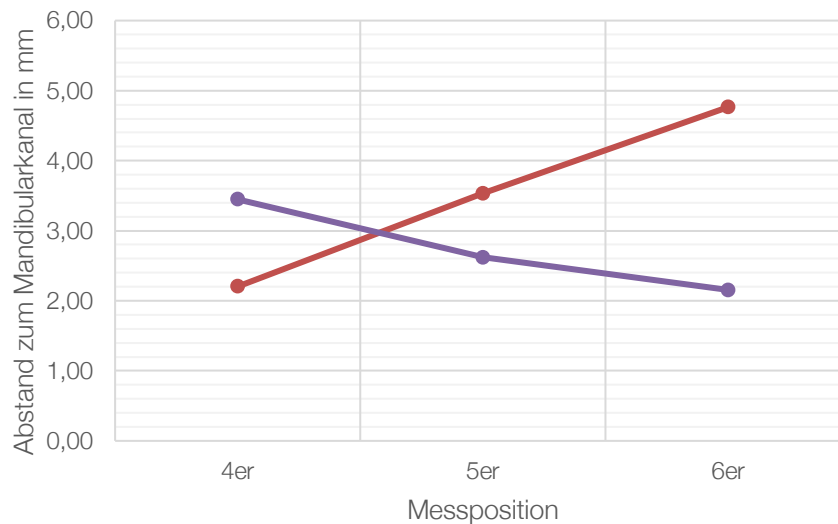


Abbildung 18: Darstellung der mittleren Distanz der Strecken [KL] (Rot) und [MN] (Purpur)

In Tab. 15 sind die detaillierten mittleren Messwerte und ihrer Standardabweichungen für Gruppe 1, Gruppe 2 und in gemeinsamer Wertung ersichtlich.

Mess- position	Gruppe 1		Gruppe 2		Gesamt	
	KL	MN	KL	MN	KL	MN
4er (mm)	2,05 ± 1,43	3,26 ± 1,71	2,36 ± 1,04	3,64 ± 1,35	2,20 ± 1,24	3,45 ± 1,53
5er (mm)	3,40 ± 1,18	2,44 ± 1,14	3,67 ± 1,03	2,79 ± 1,01	3,53 ± 1,10	2,62 ± 1,07
6er (mm)	4,57 ± 1,13	2,00 ± 1,26	4,96 ± 0,92	2,31 ± 0,80	4,77 ± 1,02	2,15 ± 1,03

Tabelle 15: Darstellung der mittleren Distanz der Strecken [KL] und [MN] ± ihrer Standardabweichungen, getrennt nach Gruppen und gesamt.

Trotz der geringen mittleren Abstände vom Mandibularkanal nach vestibulär ist dieser in bis zu 70 % der Fälle 4 bis 6 mm und in bis zu 18 % mehr als 6 mm breit. Wie in Abb. 18 ersichtlich, ist in den distalen Messpositionen stets mehr Platz nach vestibulär gegeben als nach oral. Daher kann das meiste Knochenangebot oral des Mandibularkanals am ersten Prämolaren mit bis zu 34 % (4 bis 6 mm Distanz) bzw. 6 % (mehr als 6 mm Distanz) verzeichnet werden. Zugunsten der besseren Übersicht werden symmetrische Messpositionen zusammengewertet, sodass bei Gruppe 1 (43 Patienten) 86 Messwerte und bei Gruppe 2 (25 Patienten) 50 Messwerte zur Verfügung standen:

Strecke	Gruppe 1 (n=43)								Gruppe 2 (n=25)							
	KL				MN				KL				MN			
Distanz (mm)	4 bis 6		< 6		4 bis 6		< 6		4 bis 6		< 6		4 bis 6		< 6	
4er: n und %	7	8 %	2	2 %	20	23 %	5	6 %	3	6 %	0	0 %	17	34 %	3	6 %
5er: n und %	23	27 %	2	2 %	7	8 %	0	0 %	17	34 %	1	2 %	6	12 %	0	0 %
6er: n und %	53	62 %	6	7 %	3	3 %	2	2 %	35	70 %	9	18 %	1	2 %	0	0 %

Tabelle 16: Darstellung der Anzahl und prozentualem Anteil von Streckenintervallen der Distanzen [KL] und [MN] getrennt nach Gruppen

4.2.3 Unterkieferhöhe im Bezug zum Patientenalter und Geschlecht

Der Altersunterschied zwischen den Gruppen 1 und 2 beträgt im Mittel fünf Jahre. Um den Zusammenhang zwischen dem Alter eines Patienten und seinem Knochenvolumen darzustellen, werden in Abb. 19, Abb. 20 und Abb. 21 die durchschnittliche Unterkieferhöhe pro Messposition und Patient gegen sein Alter aufgetragen. Die Werte unterliegen einer ausgeprägten Streuung. Dies wird anhand der Punktwolken ersichtlich.

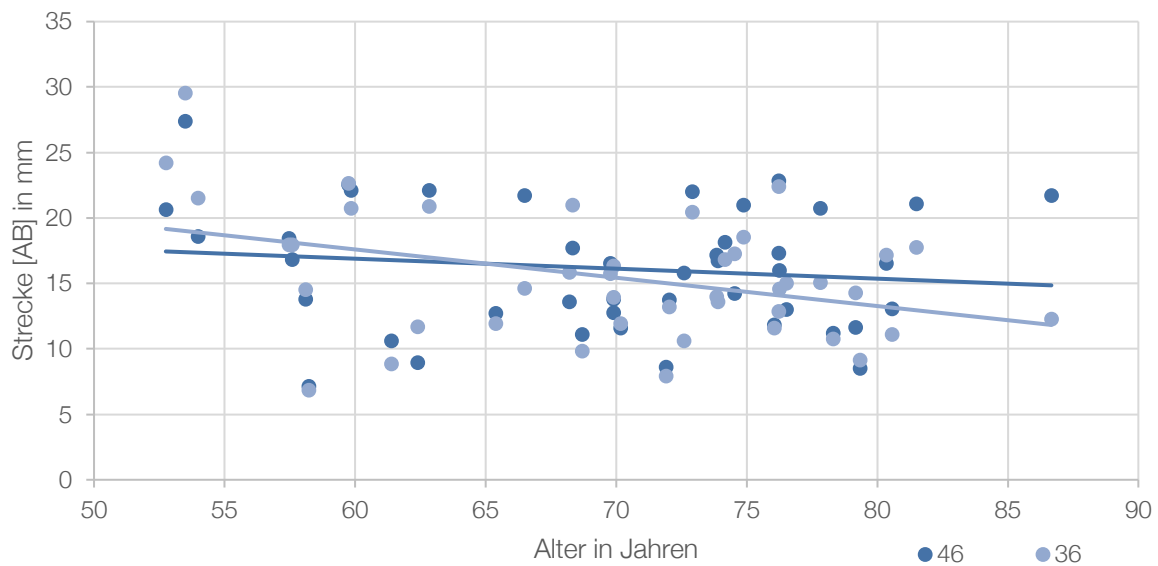


Abbildung 19: Punktediagramm zur Darstellung der Unterkieferhöhe am ersten Molaren (Gruppe 1) im Bezug zum Alter

Bei der linearen Regression der Werte aus Gruppe 1 (vgl. blaue Trendlinien, Abb. 19) ist ein Abwärtstrend erkennbar. In Gruppe 2 ist dagegen wider Erwarten ein leichter Aufwärtstrend zu sehen (vgl. orangefarbene Trendlinien, Abb. 20).

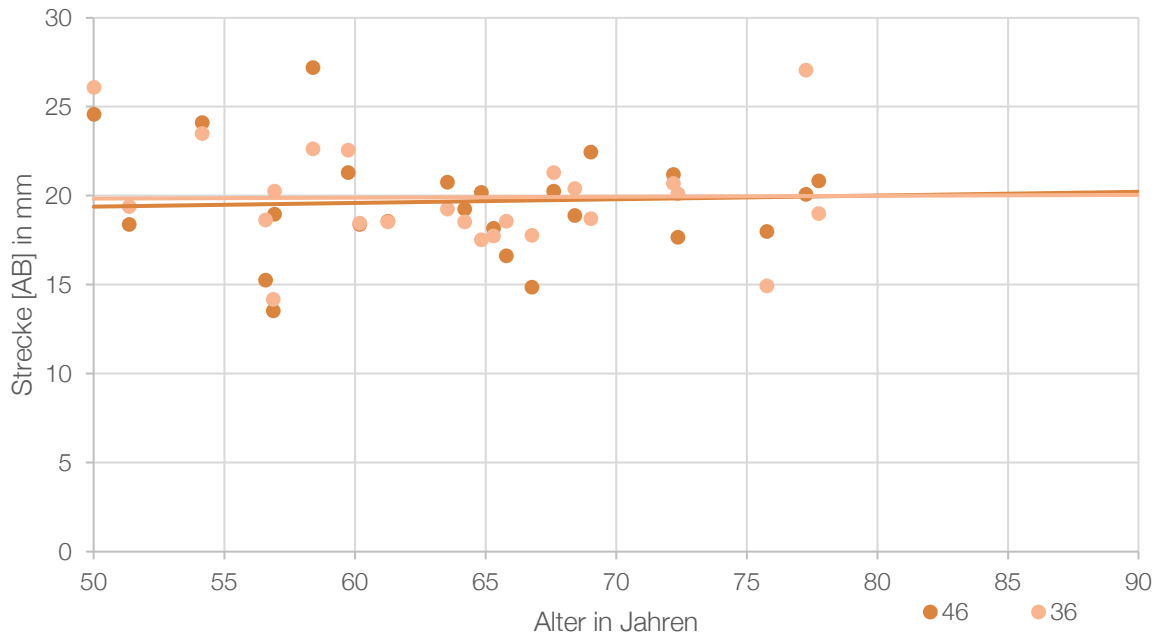


Abbildung 20: Punktediagramm zur Darstellung der Unterkieferhöhe am ersten Molaren (Gruppe 2) im Bezug zum Alter

Die im Seitenzahnbereich zu erkennende negative Korrelation zwischen Alter und Knochenhöhe zeigt sich auch im Frontzahnbereich:

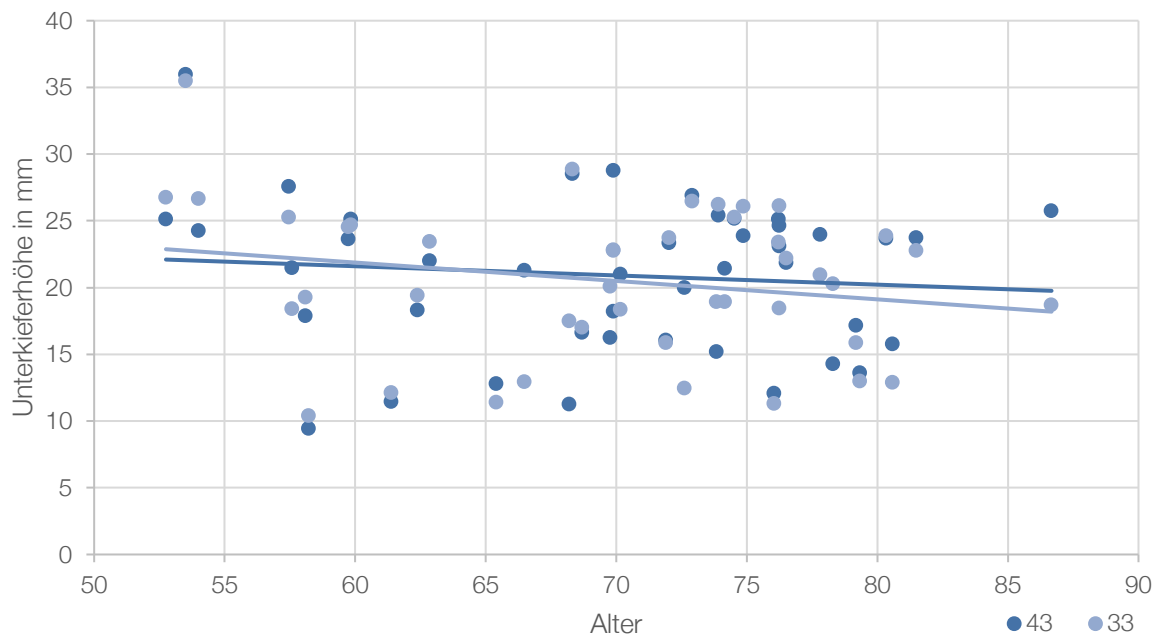


Abbildung 21: Punktediagramm zur Darstellung der Unterkieferhöhe am Eckzahn (Gruppe 1) im Bezug zum Alter

Um mögliche Zusammenhänge zwischen dem Patientenalter und dem gemessenen Betrag der Strecke [AB] zu untersuchen, wird für normalverteilte Variablen eine Korrelationsanalyse nach Pearson durchgeführt, andernfalls eine Rangkorrelation nach Spearman. Das Signifikanzniveau liegt bei $p < 0,05$. Es zeigt sich zumeist eine, wenn auch geringe, Korrelationen zwischen Alter und der Unterkieferhöhe sowohl im Frontzahnbereich (Tab. 17) als auch im Seitenzahnbereich (Tab. 18):

Messposition	43	42	Mitte	32	33
Gruppe 1	- 0,105	-0,213	-0,266	-0,207	-0,212

Tabelle 17: Darstellung der Korrelation zwischen Alter und Betrag der Strecke [AB] im Frontzahnbereich.

Ab einem Koeffizienten von $R > 0,2$ liegt eine *geringe Korrelation* vor.

Messposition	46	45	44	34	35	36
Gruppe 1	- 0,138	- 0,191	- 0,175	-0,235	-0,380	-0,388
Gruppe 2	0,065	0,2	0,129	0,008	-0,069	0,017

Tabelle 18: Darstellung der Korrelation zwischen Alter und Betrag der Strecke [AB] im Seitenzahnbereich.

Ab einem Koeffizienten von $R > 0,2$ liegt eine *geringe Korrelation* vor.

Es folgt die Überprüfung eines geschlechtsspezifischen Unterschieds in der Unterkieferhöhe (Strecke [AB]). Männliche Probanden haben stets mehr Knochenhöhe pro Messposition als weibliche. Die Standardabweichungen sind zumeist vergleichbar. Die Mittelwerte der Strecke [AB] und deren Standardabweichungen nach Geschlecht sind in Tab. 18 dargestellt.

Messposition	46	45	44	43	42	Mitte	32	33	34	35	36
Mittelwert [AB] Männer in mm	18,35	20,47	22,79	21,66	23,19	23,29	23,47	23,47	22,95	20,27	18,23
Standard- abweichung Männer in mm	4,34	5,63	6,45	6,84	5,55	5,06	5,38	5,40	5,39	5,44	5,15
Mittelwert [AB] Frauen in mm	17,08	18,88	21,34	20,57	20,67	20,86	20,03	19,11	20,64	18,25	16,65
Standard- abweichung Frauen in mm	4,53	5,58	5,58	4,82	5,06	5,10	4,70	4,97	5,96	5,27	4,38

Tabelle 19: Darstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen der Strecke [AB], getrennt nach Geschlecht

Die geschlechtsspezifischen Unterschiede im Betrag der Strecke [AB] werden durch die Gegenüberstellung von Mittelwerten graphisch in Abb. 22 dargestellt.

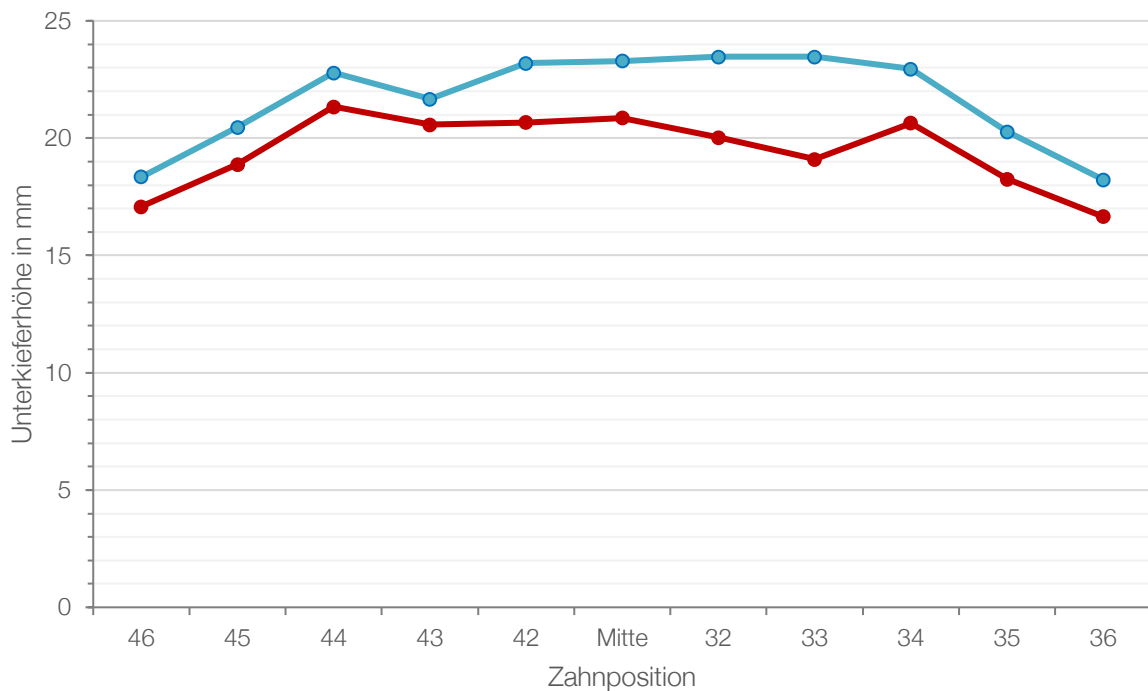


Abbildung 22: Liniendiagramm zur Darstellung der durchschnittlichen Unterkieferhöhe der Strecke [AB] je Messposition im Geschlechtervergleich; Mittelwert der Strecke [AB] für Männer (blauer Graph) und für Frauen (roter Graph).

Zur statistischen Testung wird der t-Test für normalverteilte Werte und der Mann-Whitney-U-Test für nicht normalverteilte Werte angewendet. Über die Differenz der Mittelwerte der Strecke [AB] zwischen männlichen und weiblichen Probanden und die dazugehörige statistische Signifikanz gibt Tab. 20 Aufschluss. Lediglich in den Messpositionen 32 und 33 kann ein statistisch signifikanter geschlechtsspezifischer Unterschied nachgewiesen werden. Das Signifikanzniveau liegt bei $p < 0,05$.

Messposition	46	45	44	43	42	Mitte	32	33	34	35	36
Differenz M-W in mm	1,27	1,59	1,45	1,09	2,52	2,43	3,44	4,36	2,31	2,02	1,58
Signifikanz	0,30	0,30	0,36	0,56	0,16	0,16	0,04	0,01	0,23	0,33	0,21

Tabelle 20: Darstellung der Differenz der Mittelwerte der Strecke [AB] zwischen Mann und Frau, sowie die statistische Signifikanz des ermittelten Unterschieds. Signifikante Ergebnisse sind *kursiv markiert*.

4.3 Winkelmessungen

In der vorliegenden Studie wird die Neigung der Strecke [AB] gegenüber der Axialachse im Hinblick auf eine prothetische Versorgung mit Implantaten untersucht. Die Ergebnisse sind in Abb. 23 und Tab. 21 dargestellt. Alle Werte unterliegen einer ausgeprägten Streuung, die bis zu 9,6° beträgt. Die größten Abweichungen traten im Frontzahnbereich auf, die niedrigsten im Bereich der Prämolaren:

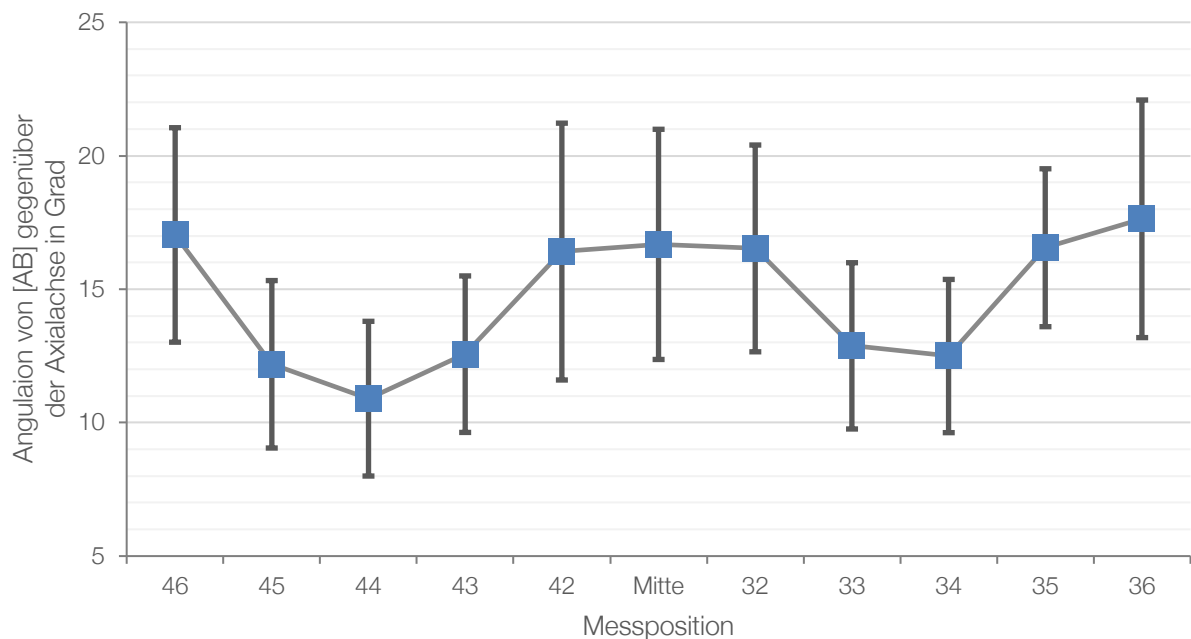


Abbildung 23: Punktediagramm mit Fehlerindikatoren zur Darstellung der Angulation der Strecke [AB] gegenüber der Axialachse beider Gruppen: Ausgabe in Mittelwert (blaues Kästchen) und Standardabweichung (graue Fehlerbalken).

Messposition	46	45	44	43	42	Mitte	32	33	34	35	36
Mittlerer Winkel in Grad	17,4	12,7	11,0	12,6	16,4	16,7	16,5	12,9	12,4	16,5	19,2
Standardabweichung in Grad	7,6	5,5	5,4	5,9	9,6	8,6	7,7	6,2	5,1	5,4	7,8

Tabelle 21: Darstellung von Mittelwerten mit Standardabweichungen der Neigung von [AB] gegenüber der Axialachse.

Die Ergebnisse zeigen, dass im Stadium fortgeschrittener Kieferatrophie die Strecke [AB] nicht nur nach oral, sondern auch nach vestibulär geneigt gewesen ist. Insbesondere im Seitenzahnbereich ist dies in bis zu 27 % der Fälle anzutreffen (s. Tab. 22).

Messposition	Neigung			
	oral (n)	in Prozent	Vestibulär (n)	in Prozent
Mitte	41	95 %	2	5 %
32 und 42	84	98 %	2	2 %
33 und 43	82	95 %	4	5 %
34 und 44	75	87 %	11	13 %
35 und 45	66	77 %	20	23 %
36 und 46	63	73 %	23	27 %

Tabelle 22: Darstellung der Neigungsrichtung der Strecke [AB] gegenüber der Axialachse

Es sind die Winkelmessungen zwischen den Gruppen verglichen worden. Dazu werden die Mittelwerte und die Differenz der Mittelwerte ausgegeben. Diese Differenzen bewegen sich, bis auf die Position 45 und 36, im Bereich der ermittelten Messtoleranzen (Tab. 34, S. 66 sowie Tab. 35, S. 67). Zur statistischen Überprüfung werden erneut t-Test und Mann-Whitney-U-Test angewendet. Die Messergebnisse und Signifikanzen sind in Tab. 23 dargestellt. In 5 von 6 Messpositionen sind keine Gruppenunterschiede statistisch belegbar bei einem Signifikanzniveau von $p < 0,05$.

Messposition	46	45	44	34	35	36
Differenz der Mittelwerte in Grad	0,98	1,43	0,23	0,24	0,18	4,31
Differenz der Standardabweichungen in Grad	1,18	2,45	1,01	1,95	1,57	4,61
Statistische Signifikanz	0,618	0,256	0,871	0,855	0,898	0,01

Tabelle 23: Darstellung der mittleren Differenzen und deren Standardabweichungen der Neigung der Strecke [AB] gegenüber der Axialachse zwischen Gruppe 1 und Gruppe 2. Signifikante Differenzen sind *kursiv* markiert.

Alle erhobenen Messwerte sind im Anhang tabellarisch dargelegt. Es erfolgt die Darstellung von Mittelwert und Standardabweichung jeder einzelnen Messung für den Frontzahnbereich von Gruppe 1 (s. Tab. 40), den Seitenzahnbereich von Gruppe 1 (s. Tab. 41) und den Seitenzahnbereich von Gruppe 2 (s. Tab. 42).

4.4 Implantierbares Knochenangebot

4.4.1 Frontzahnbereich Gruppe 1

Im Frontzahnbereich ist die für eine Implantation geeignete Knochenhöhe durch die Strecke [A'D] definiert. Diese ist ein Abschnitt der Strecke [AB] und beginnt kranial am Punkt A' (d.h. 2, 4 oder 6 mm kaudal des höchsten Punktes A, an dem eine Mindestbreite von 4 mm vorliegt) und endet an dem höchsten Punkt der kaudalen Kortikalis (vgl. Abb. 7, S. 33). Die kaudale Kortikalis wird daher nicht einberechnet. Der mittlere Messwert liegt bei ca. 15 ± 5 mm. (s. Abb. 24 und Tab. 24). Die durchschnittliche Knochenhöhe der Unterkiefermitte ist im Vergleich zu den anderen Messpositionen vermindert.

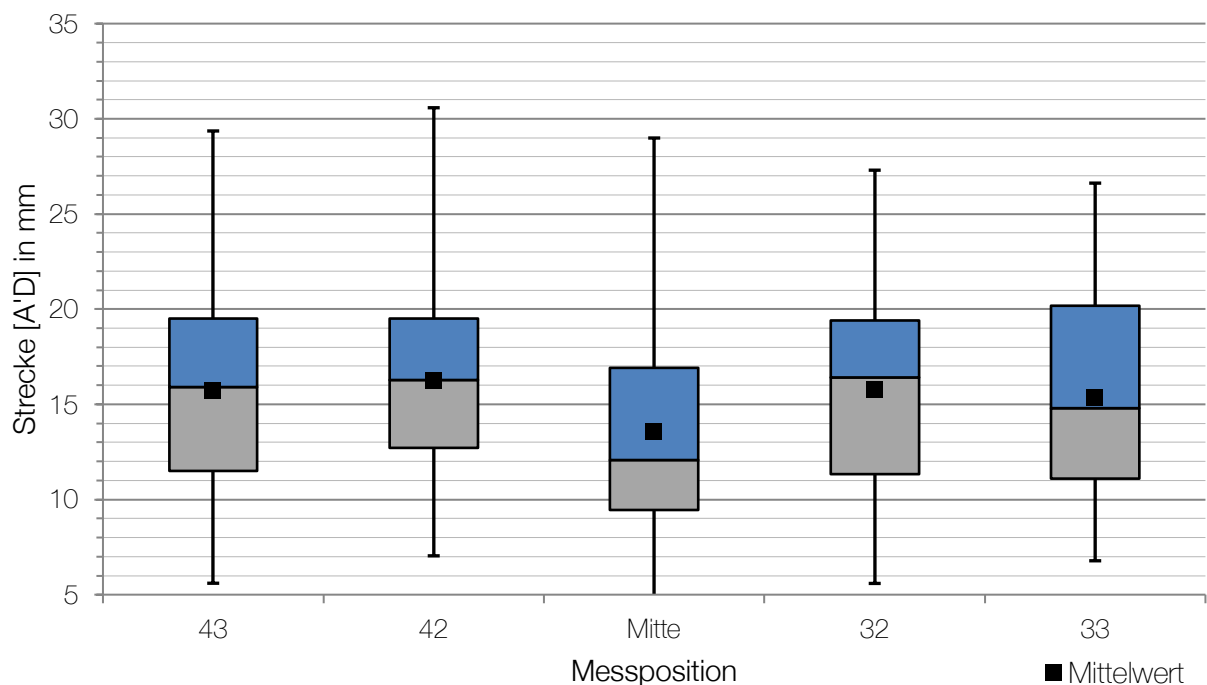


Abbildung 24: Boxplot - Darstellung der Strecke [A'D] im Frontzahnbereich ohne Einberechnung der kaudalen Kortikalis von Patienten aus Gruppe 1

Messposition	43	42	Mitte	32	33
Mittelwert	15,72	16,24	13,54	15,73	15,32
Standardabweichung	5,32	5,27	5,83	4,94	5,23
oberes Quartil	19,52	19,51	16,90	19,42	20,19
Median	15,89	16,26	12,06	16,42	14,81
unteres Quartil	11,49	12,71	9,44	11,35	11,11

Tabelle 24: Mittelwert, Standardabweichung und die Perzentile der Strecke [A'D] im Frontzahnbereich von Gruppe 1; alle Messwerte in mm

Die kaudale Kortikalis kann im Falle einer unzureichenden vertikalen Dimension in das Implantatbett einbezogen werden, das Implantat wäre somit bikortikal verankert.

Die Dicke der kaudalen Kortikalis (Strecke [BD]) liegt in den Schneide- und Eckzahnpositionen fast konstant bei $4,1 \pm 1$ mm. Auffallend variabel ist dagegen das Ergebnis der mittleren Messposition mit $6,2 \pm 2,65$ mm (Abb. 25 und Tab. 25).

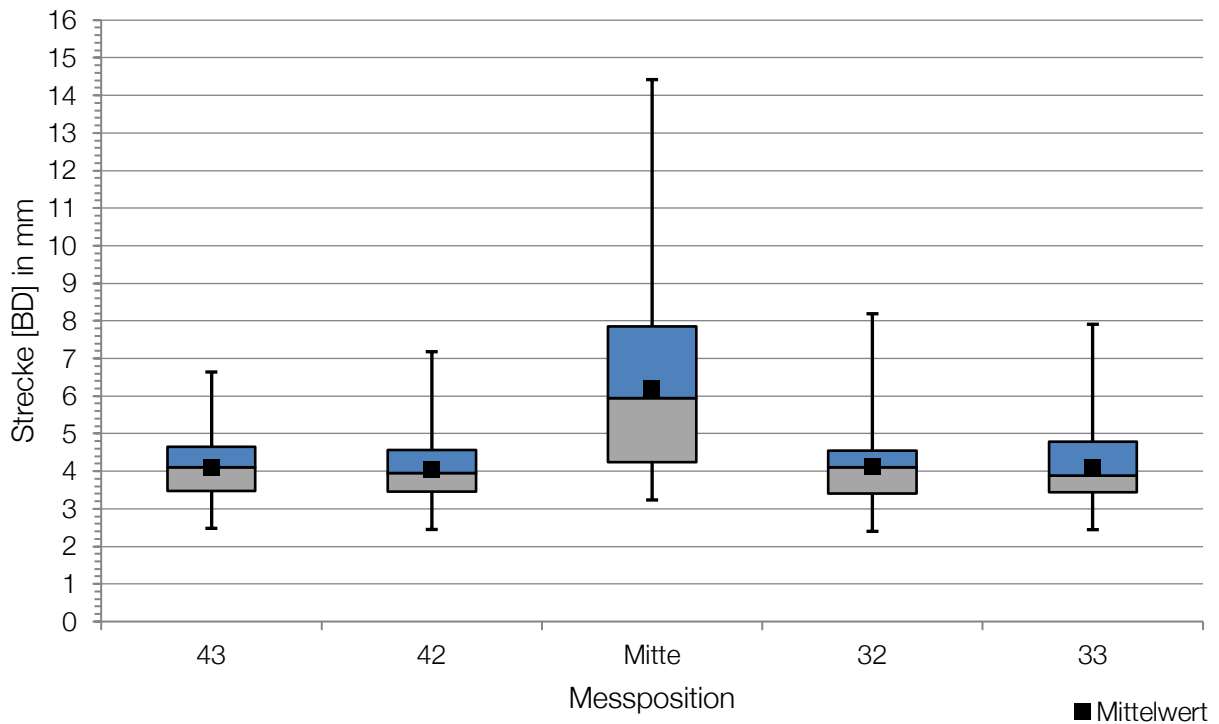


Abbildung 25: Boxplot - Darstellung der Dicke der kaudalen Kortikalis (Strecke [BD]) im Frontzahnbereich von Patienten aus Gruppe 1

Messposition	43	42	Mitte	32	33
Mittelwert (mm)	4,09	4,04	6,2	4,12	4,09
Standardabweichung (mm)	1,02	0,94	2,65	1,12	1,14

Tabelle 25: Darstellung von Mittelwert und Standardabweichung (SD) der Strecke [BD] im Frontzahnbereich von Patienten aus Gruppe 1

Die stark ausgeprägte kaudale Kortikalis im Unterkieferfrontzahnbereich spiegelt sich maßgeblich in der Analyse des zur Implantation erforderlichen Platzbedarfs wider (s. Tab. 26 sowie Abb. 26, Abb. 27 und Abb. 28).

Die vermessenen Areale eignen sich für eine Implantation umso seltener, je größer der zugrunde gelegte Platzbedarf ist. Wenn die untere Kortikalis einbezogen wird, steigert dies bei allen Messpunkten die Häufigkeit einer möglichen Implantation um ca. 24,7 %. Dabei gilt es aber klar zwischen der seitlichen Messposition und der Unterkiefermitte zu unterscheiden, da die Symphysis mandibulae einen höheren kortikalen Anteil aufweist.

Mess- position	Häufigkeit des zur Implantation erforderlichen Knochenangebotes (Durchmesser x Höhe) ohne kaudale Kortikalis					
	4 x 11 mm	4 x 16 mm	4 x 19 mm	6 x 11 mm	6 x 13 mm	6 x 15 mm
3er	74 %	40 %	26 %	52 %	40 %	27 %
2er	74 %	51 %	30 %	48 %	38 %	23 %
Mitte	65 %	37 %	19 %	35 %	42 %	12 %
Mess- position	Knochenangebot nur unter Einbezug der kaudalen Kortikalis vorhanden					
	4 x 11 mm	4 x 16 mm	4 x 19 mm	6 x 11 mm	6 x 13 mm	6 x 15 mm
3er	21 %	34 %	27 %	19 %	20 %	20 %
2er	20 %	26 %	26 %	19 %	20 %	27 %
Mitte	23 %	40 %	30 %	23 %	16 %	35 %

Tabelle 26: Darstellung der Häufigkeiten, wie oft verschiedene Knochenangebote für die Implantation von ausgewählten Implantatgrößen an den Messpositionen im Frontzahnbereich gegeben ist

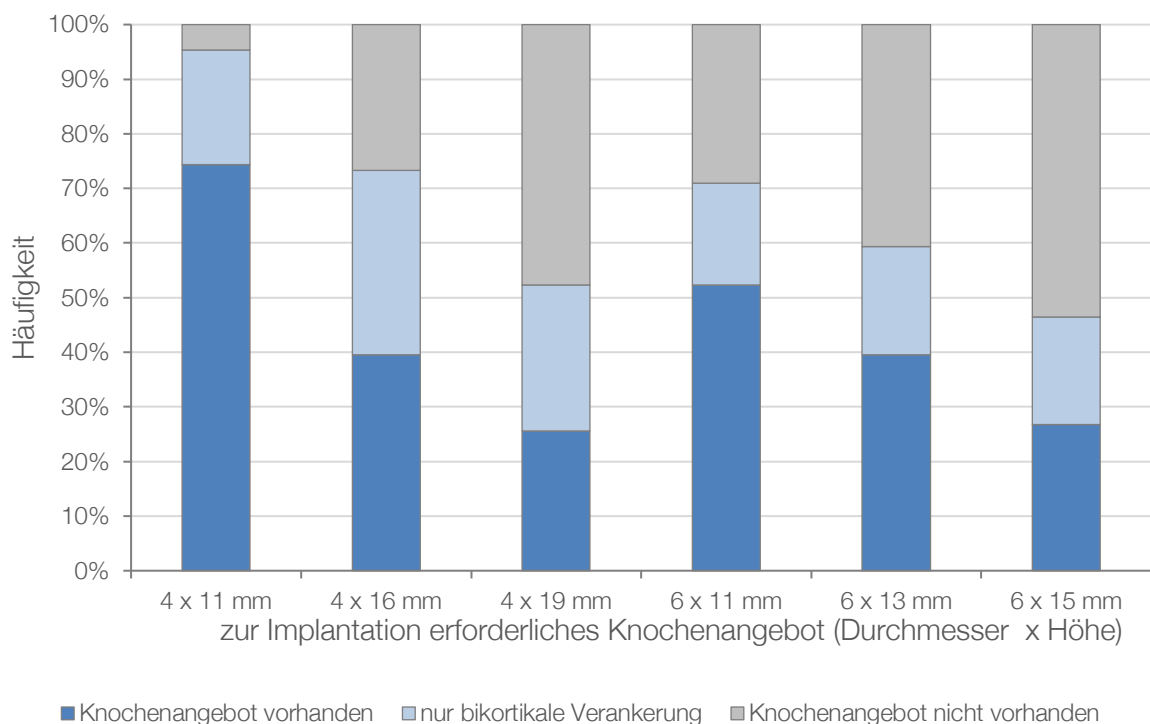


Abbildung 26: Darstellung der Häufigkeit verschiedener Knochenangebote am Eckzahn

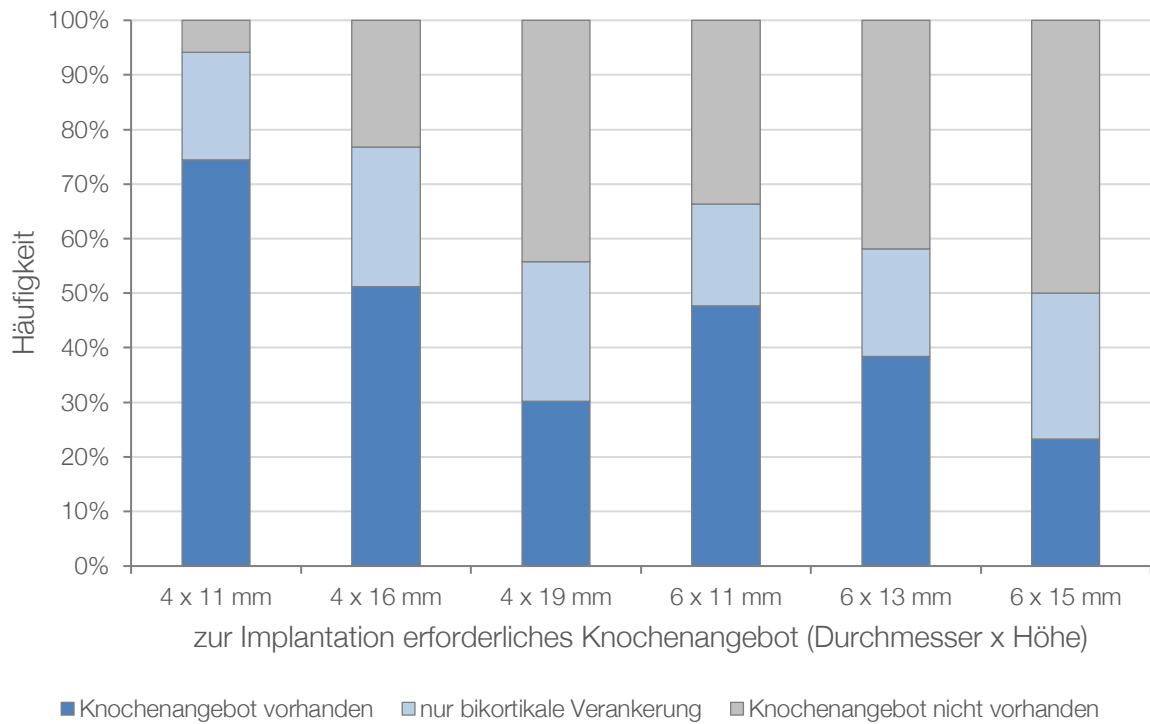


Abbildung 27: Darstellung der Häufigkeit verschiedener Knochenangebote am seitlichen Schneidezahn

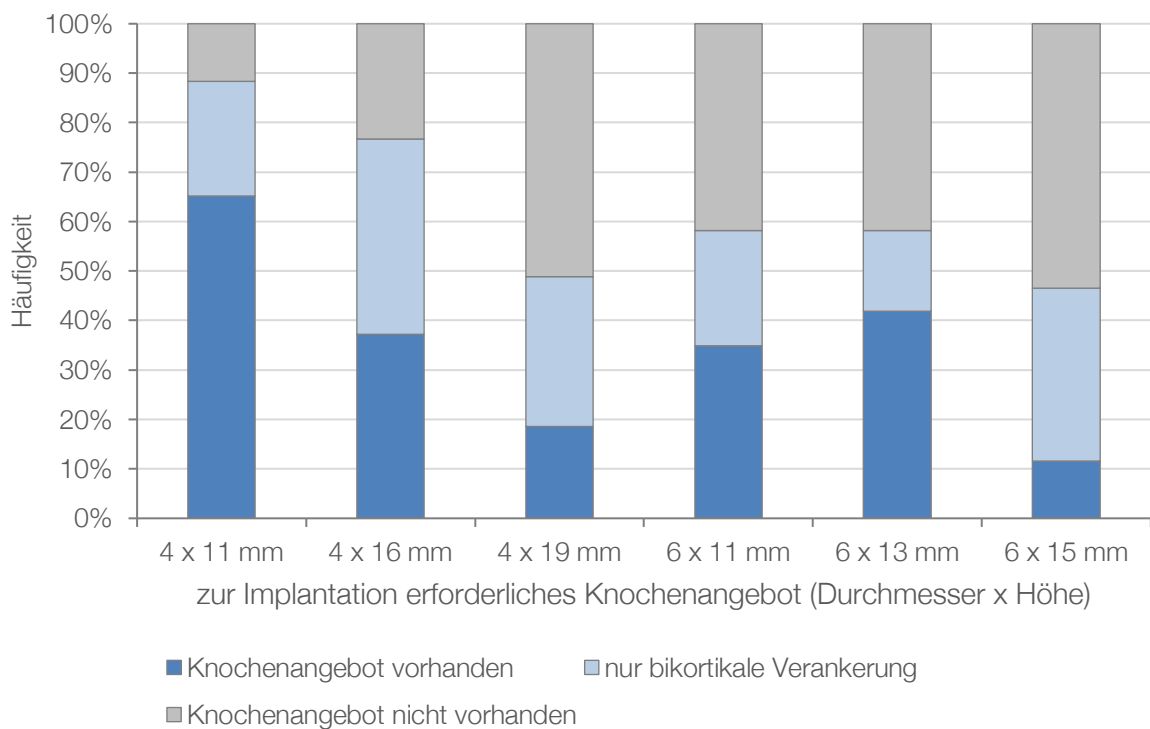


Abbildung 28: Darstellung der Häufigkeit verschiedener Knochenangebote in der Unterkiefermitte

Bei der Analyse der Messpositionen kann dennoch bei bis zu 29 von 43 Patienten im Bereich der Molaren keine Implantation erfolgen, im Frontzahnbereich waren es mit maximal 13 deutlich weniger. Eine bikortikale Verankerung der Implantate steigert die Anzahl möglicher Implantationen an bis zu 9 Messpositionen (s. Tab. 27).

Messposition	46	45	44	43	42	Mitte	32	33	34	35	36
Implantation nicht möglich (n)	24	26	27	3	8	13	12	9	29	24	29
bikortikale Implantation möglich (n)	/	/	/	1	6	9	9	8	/	/	/

Tabelle 27: Darstellung der Anzahl von Messpositionen, an denen anhand des verfügbaren Knochenangebotes eine Implantation ohne Hinzunahme der kaudalen Kortikalis nicht möglich wäre

Durch die unterschiedliche Atrophie ist die Verteilung der nicht implantierbaren Messpositionen sehr inhomogen, daher werden die nicht oder nur bikortikal implantierbaren Messpositionen pro Patient ausgewertet. Bezogen auf die eingangs aufgeführten Versorgungsstrategien mit einer unterschiedlichen Anzahl von Implantaten (zwei, vier oder sechs Implantate) können die meisten Patienten mit zwei, deutlich weniger mit vier und die wenigsten mit sechs Implantaten versorgt werden (s. Tab. 28).

Wird die kaudale Kortikalis zur Verankerung der Implantate mitbenutzt, können davon insgesamt sieben Patienten von einer Versorgung mit zwei Implantaten und 13 Patienten bei einer Versorgung mit 4 Implantaten profitieren. Das Versorgungskonzept mit sechs Implantaten stellt, aus anatomischer Sicht, die am seltensten mögliche Versorgungsform dar. Bei nur drei von 43 Patienten ist an allen Messpositionen eine monokortikale Implantation möglich. Dabei ist es von Bedeutung, dass die angegebene Anzahl von Patienten in Tab. 28 pro Messposition ausreichend Knochenangebot für ein beliebiges der in Tab. 12, S. 36 angegebenen referenziellen Implantatgrößen aufweisen.

Versorgungsart	2 Implantate	4 Implantate	6 Implantate
Anzahl Patienten, bei denen eine monokortikale Implantation möglich wäre	35	25	15
Anzahl Patienten, die nur durch eine bikortikale Implantation zu versorgen wären	7	13	1
Anzahl Patienten, die nicht mit Implantaten zu versorgen wären	1	5	27

Tabelle 28: Darstellung der Anzahl von Patienten, bei denen ausreichend Knochenangebot für eine mono- bzw. bikortikale Implantation eines beliebigen referenziellen Implantatgrößen möglich ist. In der letzten Zeile ist aufgeführt, bei wie vielen Patienten keine Implantate inseriert werden können.

Das Knochenangebot für vier Ø 4,1 x 10 mm Standardimplantate, gesetzt in Regio 33, 32, 42 und 43, ist bei sieben von 43 zahnlosen Patienten vorhanden.

Durch Hinzunahme der kaudalen Kortikalis sind bei weiteren 13 Patienten Implantate zu inserieren (s. Tab. 29), sodass das Versorgungskonzept bei 20 von 43 Patienten durchführbar ist.

Die Implantation von sechs Implantaten im Hinblick auf eine festsitzende Versorgung, bestehend aus vier kurzen Ø 4,1 x 4 mm Implantaten in Regio 36, 34, 44 und 46 sowie zwei Ø 4,1 x 10 mm Standardimplantaten in Regio 33 und 43, ist aus anatomischer Sicht bei vier von 43 Patienten möglich.

Versorgungsart und Implantatgröße sowie -lokalisierung	4 Implantate Ø 4,1 x 10 mm Regio 33, 32, 43, 42	4 Implantate bikortikal Ø 4,1 x 10 mm Regio 33, 32, 43, 42	6 Implantate Ø 4,1 x 4 mm in Regio 36, 34, 44, 46 + Ø 4,1 x 10 mm Regio 33 & 42
Anzahl Patienten	7	13	4

Tabelle 29: Darstellung der Anzahl von Patienten, die ausreichend Knochenangebot für die Versorgung von mit Ø 4,1 mm Standardimplantaten bei unterschiedlichen Versorgungsformen aufweisen

4.4.2 Seitenzahnbereich Gruppe 1

Die für eine Implantation geeignete Knochenhöhe im Seitenzahnbereich entspricht der Strecke [A'C]. Sie ist definiert durch die Knochenhöhe über dem Canalis mandibulae, bei der eine Alveolarkamm- bzw. Unterkieferbreite von mindestens 4 mm gegeben ist (vgl. S. 35). Die Ergebnisse für Messungen im Seitenzahnbereich zahnloser Patienten unterliegen einer ausgeprägten Streuung, die durch die Box und Whisker in den nachfolgenden Diagrammen zu erkennen ist.

Die Hälfte aller Ergebnisse bewegt sich im Bereich von 2 bis 10 mm:

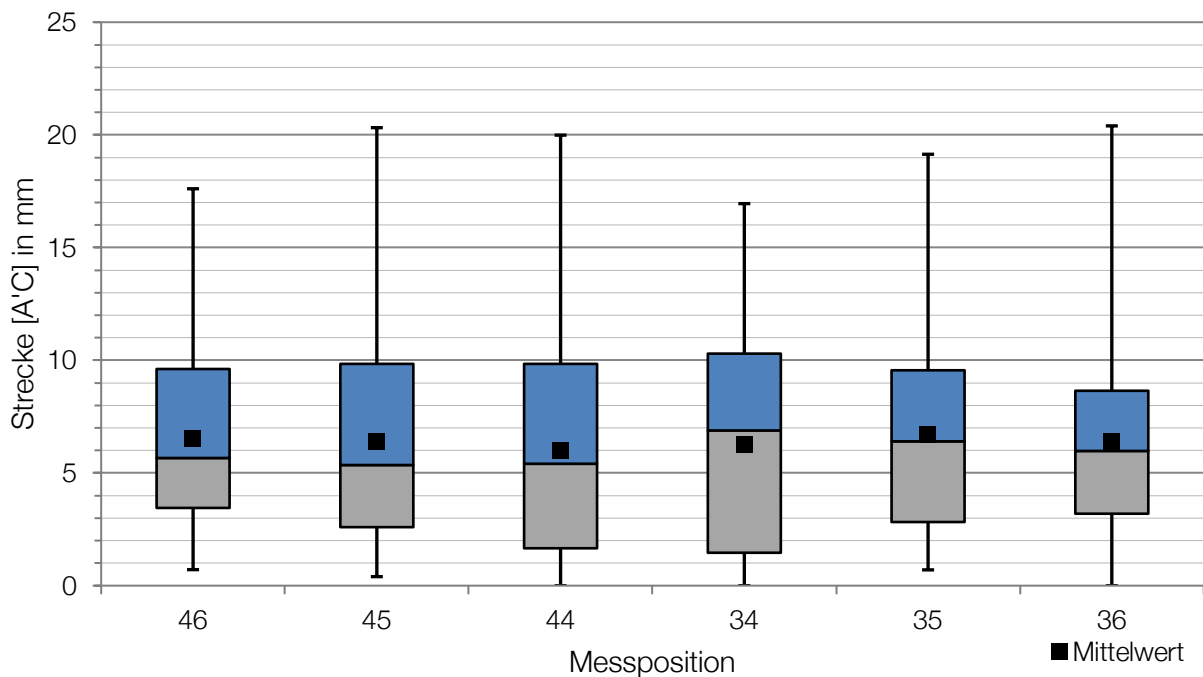


Abbildung 29: Boxplot - Darstellung der Strecke [A'C] im Seitenzahnbereich von Patienten aus Gruppe 1

Messposition	46	45	44	34	35	36
Mittelwert (mm)	6,50	6,38	5,98	6,23	6,67	6,38
Standardabweichung (mm)	3,84	4,22	4,75	4,83	4,16	4,18
oberes Quartil (mm)	9,61	9,85	9,84	10,29	9,55	8,64
Median (mm)	5,66	5,36	5,40	6,88	6,39	5,99
unteres Quartil (mm)	3,46	2,59	1,65	1,47	2,82	3,20

Tabelle 30: Mittelwert, Standardabweichung und die Perzentile der Strecke [A'C] im Seitenzahnbereich von Gruppe 1

Auch im Seitenzahnbereich wird jede Messposition im Hinblick auf das für eine Implantation erforderliche Knochenangebot verschiedener Implantatgrößen analysiert. Die referenziellen Implantatgrößen sind in Tab. 13, S. 36 ersichtlich. Die Platzverhältnisse des atrophierten Seitenzahnbereichs haben, nach den Messungen dieser Arbeit und den ausgewählten Implantatsystemen, in bis zu 48 % keine Implantation ohne Augmentation zugelassen (s. Abb. 30 und Tab. 31).

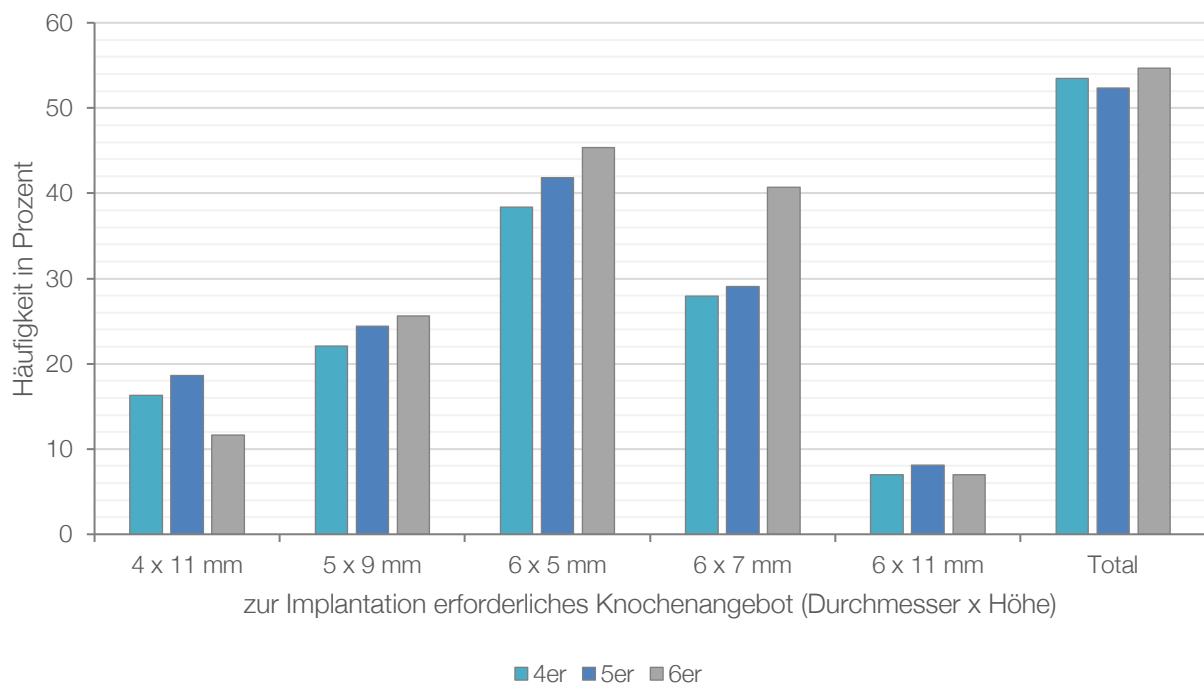


Abbildung 30: Darstellung der Häufigkeit, wie oft verschiedene Knochenangebote im Seitenzahnbereich von Gruppe 1 gegeben waren. Die Werte von rechter und linker Kieferhälfte werden zusammen abgebildet.

In folgender Tabelle ist ersichtlich, an welcher Messposition in wie vielen Fällen welche Knochenangebote vorliegen und zu welchem Prozentsatz eine Implantation, unabhängig der hier ausgewählten referenziellen Implantatgrößen, möglich ist (letzte Spalte):

Messposition	Häufigkeit des zur Implantation erforderlichen Knochenangebotes (Durchmesser x Höhe)					Implantation möglich zu
	4 x 11 mm	5 x 9 mm	6 x 5 mm	6 x 7 mm	6 x 11 mm	
4er	16 %	22 %	38 %	28 %	7 %	53 %
5er	19 %	24 %	42 %	29 %	8 %	52 %
6er	12 %	26 %	45 %	41 %	7 %	55 %

Tabelle 31: Darstellung der Häufigkeit, wie oft das für die Implantation referenzieller Implantatgrößen benötigte Knochenangebot im Seitenzahnbereich von Gruppe 1 gegeben ist. Die Werte von rechter und linker Kieferhälfte werden zusammengefasst präsentiert.

4.4.3 Seitenzahnbereich Gruppe 2

Patienten aus Gruppe 2 haben im Seitenzahnbereich mehr Knochenhöhe mit ausreichender Knochenbreite (Strecke [A'C]) als zahnlose Patienten der Gruppe 1.

Das Knochenangebot nimmt von mesial nach distal ab (Abb. 31 und Tab. 32).

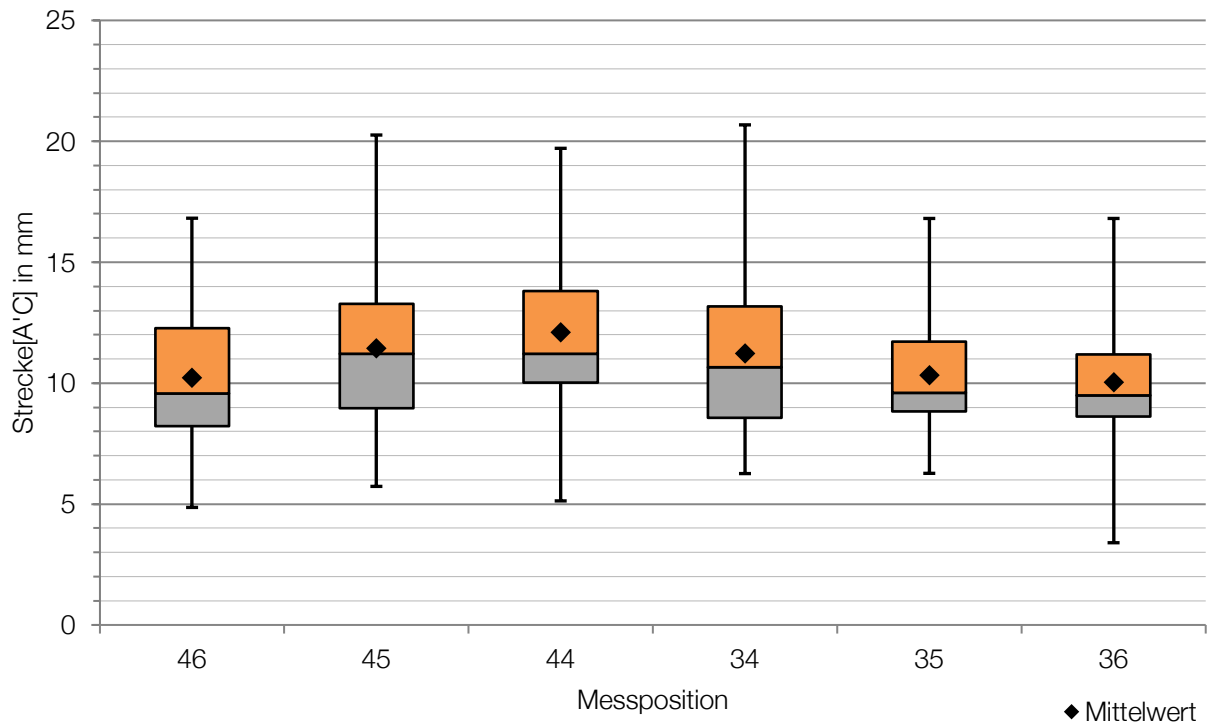


Abbildung 31: Boxplot - Darstellung der Strecke [A'C] im Seitenzahnbereich von Patienten aus Gruppe 2

Messposition	46	45	44	34	35	36
Mittelwert (mm)	10,24	11,44	12,11	11,24	10,33	10,06
Standardabweichung (mm)	3,10	3,67	3,37	3,64	2,63	3,03
oberes Quartil (mm)	12,28	13,29	13,80	13,16	11,72	11,19
Median (mm)	9,58	11,21	11,21	10,67	9,60	9,48
unteres Quartil (mm)	8,23	8,97	10,02	8,57	8,83	8,61

Tabelle 32: Mittelwert, Standardabweichung und die Perzentile der Strecke [A'C] im Seitenzahnbereich von Patienten aus Gruppe 2

Auch in Gruppe 2 nimmt die zur Implantation geeignete Knochenhöhe nach distal ab. Das Knochenangebot ist am seltensten für Standardimplantate geeignet. Insgesamt reicht der Platz zu 84 % (4er und 6er) bzw. zu 92 % (5er) für Implantate der ausgewählten Maße aus (Abb. 32 und Tab. 33).

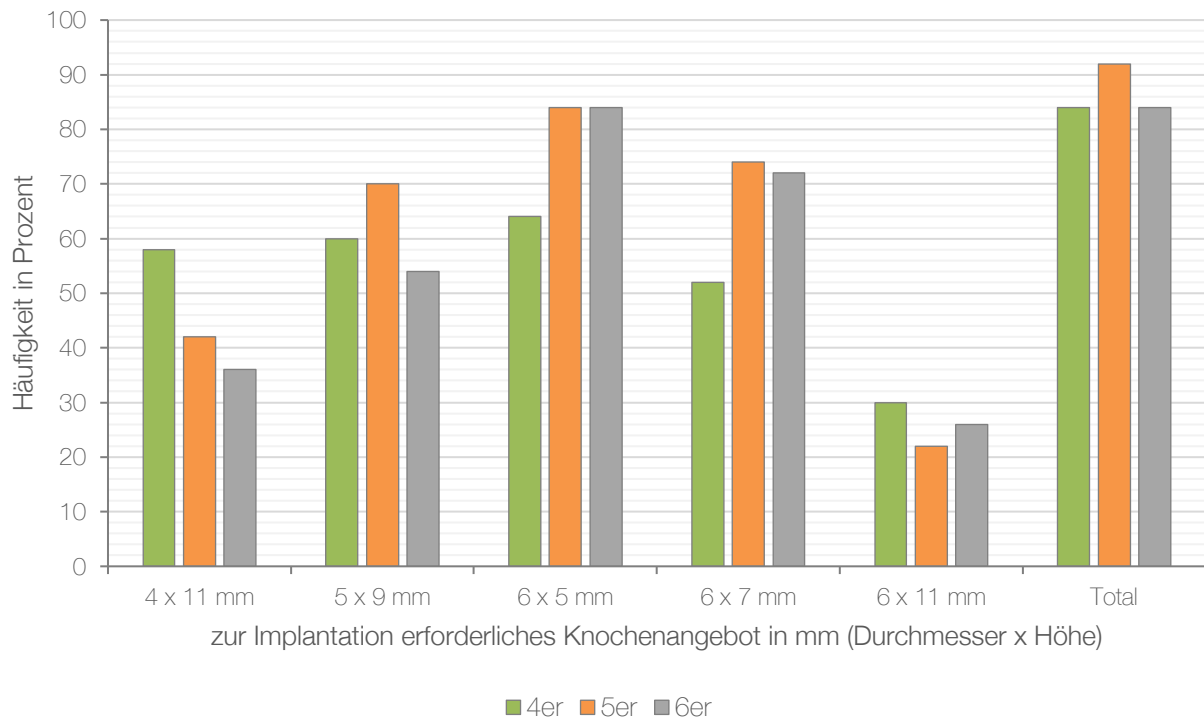


Abbildung 32: Darstellung der Häufigkeit, wie oft der zur Implantation bestimmter Implantatgrößen erforderliche Platzbedarf im Seitenzahnbereich von Gruppe 2 gegeben war. Die Werte von rechter und linker Kieferhälfte werden zusammen abgebildet.

In Tab. 33 ist ersichtlich, an welcher Messposition zu welchem Prozentsatz das Knochenangebot für die Implantation mit einer bestimmten referenziellen Implantatgröße gegeben ist. In der letzten Spalte wird angegeben, zu welchem Prozentsatz die Implantation irgendeiner der fünf Implantatgrößen möglich ist.

Mess- position	Häufigkeit des zur Implantation erforderlichen Knochenangebotes (Durchmesser x Höhe)					Implantation nicht möglich
	4 x 11 mm	5 x 9 mm	6 x 5 mm	6 x 7 mm	6 x 11 mm	
4er	58 %	60 %	64 %	52 %	30 %	84 %
5er	42 %	70 %	84 %	74 %	22 %	92 %
6er	36 %	54 %	84 %	72 %	26 %	84 %

Tabelle 33: Darstellung der Häufigkeit, wie oft das für die Implantation referenzieller Implantatgrößen benötigte Knochenangebot im Seitenzahnbereich von Gruppe 2 gegeben ist. Die Werte von rechter und linker Kieferhälfte wurden zusammengefasst präsentiert.

4.5 Messfehlerbetrachtung

Die dreifache Vermessung von fünf zufällig ausgewählten DVT-Datensätzen ergibt insgesamt 780 Messdifferenzwerte. Pro Messtrecke können 55 (Strecken: [AB], [AC] und [BD] zusammen gewertet, [EF], [GH], [IJ]) bzw. 30 Messdifferenzen (Strecken: [KL] und [MN]) berechnet werden. Die Angabe des Messfehlers erfolgt durch Mittelwerte und Konfidenzintervalle, in denen sich 95 % der Messwerte befinden.

Da die Ergebnisse der Messfehlerbetrachtung von Strecken und Winkeln heterogen sind, werden alle Variablen getrennt betrachtet.

4.5.1 Punktfehler

Die durchschnittliche Messdifferenz ist bei der Strecke [AB] mit lediglich 0,19 mm mit einem Konfidenzintervall (KI) von $\pm 0,15$ mm am geringsten. Die Messungen an den Messtrecken [EF], [GH] und [IJ] sind mit einer Mittleren Differenz von $\cong 0,23$ mm und einem KI von $\pm 0,05$ mm ähnlich genau. Anders dagegen verhielt sich die Reproduzierbarkeit von Strecken, bei denen der Mandibularkanal beteiligt ist. Hier beträgt die Ungenauigkeit mit $0,31 \text{ mm} \pm 0,11 \text{ mm}$ für die Strecken [AC]/[BD] das Doppelte und die Streuung fast das Dreifache der Strecke [AB]. Die Strecken [KL] und [MN] weisen mit bis zu $0,48 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$ die höchsten durchschnittlichen Messfehler und Streuungen auf (s. Abb. 33 und Tab. 29). Der Winkel β unterliegt auch einer durchschnittlichen Streuung von $0,95^\circ \pm 0,2^\circ$. Er wurde aber nicht in Abb. 33 einbezogen.

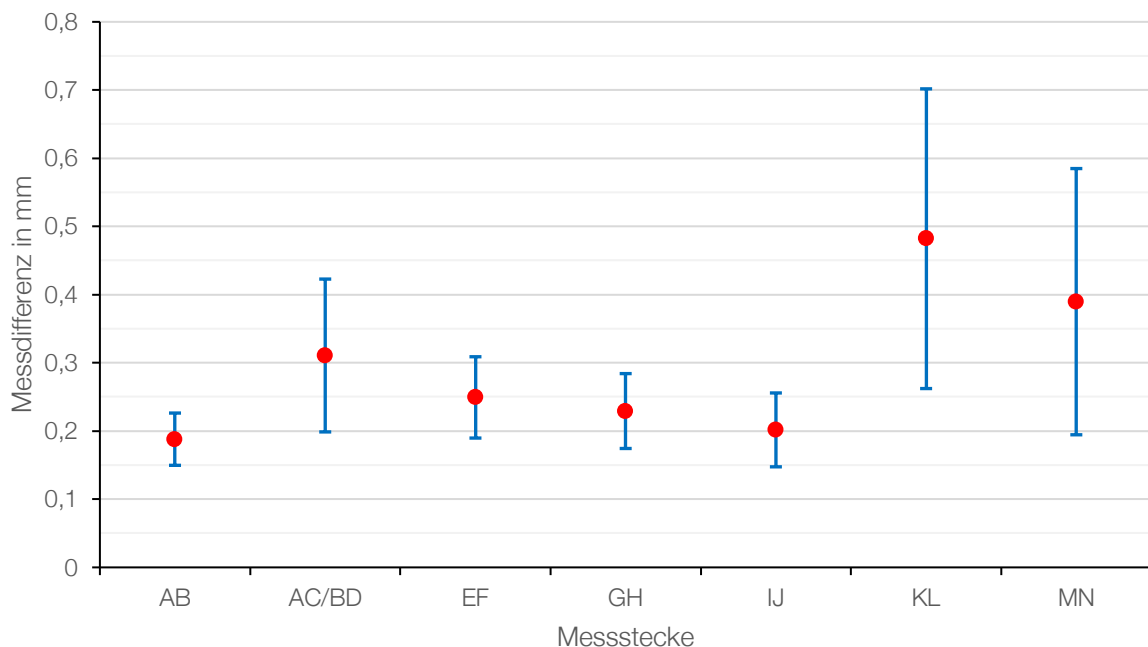


Abbildung 33: Fehlerbalkendiagramm zur Darstellung des Punktfehlers:

Ausgabe des mittleren Messfehlers (Rot) und des dazu gehörigen Konfidenzintervalls (Blau).

Messung	[AB]	[AC]/[BD]	[EF]	[GH]	[IJ]	[KL]	[MN]	β
Mittelwert	0,19	0,31	0,25	0,23	0,20	0,48	0,39	0,95
Standardabweichung	0,15	0,42	0,23	0,21	0,20	0,61	0,55	0,78
95 % Konfidenzintervall	0,04	0,11	0,06	0,05	0,05	0,22	0,20	0,21
obere Grenze	0,23	0,42	0,31	0,28	0,26	0,70	0,58	1,16
untere Grenze	0,15	0,20	0,19	0,17	0,15	0,26	0,19	0,75

Tabelle 34: Ergebnisse der Auswertung des Punktfehlers, Strecken in mm und Winkel in Grad

4.5.2 Gesamtfehler

Beim Gesamtfehler sind alle Messdifferenzen größer als die des Punktfehlers. Die Charakteristika ähnelten wiederum denen des Punktfehlers. So war bei den Strecken [AB], [EF], [GH] und [IJ] eine durchschnittliche Differenz von $\cong 0,27 \text{ mm} \pm 0,06 \text{ mm}$ im Konfidenzintervall von 95 % zu verzeichnen. Deutlich höher sind Ungenauigkeiten bei [AC] / [BD] sowie bei [KL] und [MN]. Die Reproduzierbarkeit dieser Messungen ist bei einer durchschnittlichen Differenz von 0,5 mm halb so genau wie andere Messstrecken (s. Abb. 34 und Tab. 35).

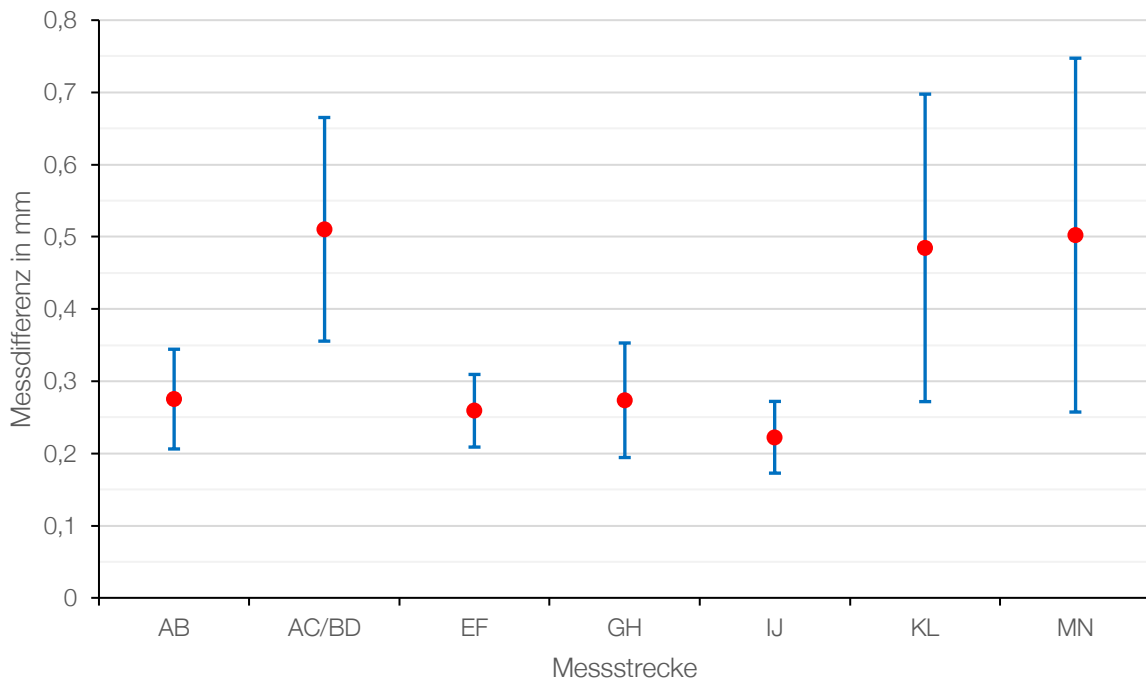


Abbildung 34: Fehlerbalkendiagramm zur Darstellung des Gesamtfehlers:

Ausgabe des mittleren Messfehlers (Rot) und des dazu gehörigen Konfidenzintervalls (Blau).

Messung	[AB]	[AC]/[BD]	[EF]	[GH]	[IJ]	[KL]	[MN]	β
Mittelwert	0,28	0,51	0,26	0,27	0,22	0,48	0,50	1,21
Standardabweichung	0,26	0,59	0,19	0,30	0,19	0,60	0,68	0,87
95 % Konfidenzintervall	0,07	0,15	0,05	0,08	0,05	0,21	0,25	0,23
obere Grenze	0,34	0,67	0,31	0,35	0,27	0,70	0,75	1,44
untere Grenze	0,21	0,36	0,21	0,19	0,17	0,27	0,26	0,98

Tabelle 35: Ergebnisse der Auswertung des Gesamtfehlers. Strecken in mm und Winkel in Grad

5 Diskussion

Von 68 Probanden sind 20 männlich und mit 48 mehr als doppelt so viele weiblich. Epidemiologische Studien in der Vergangenheit zeigen, dass die Zahnlosigkeit zwischen den Geschlechtern nahezu gleich aufgeteilt ist (Mack, Mundt, Mojon, et al., 2003). Erst neuere Publikationen zur Deutschen Mundgesundheitsstudie (DMS) bekräftigen diese Ergebnisse und belegen, dass 65- bis 75-jährige Frauen mit nur 0,4 % geringfügig häufiger im Unterkiefer zahnlos sind als Männer. Dieses Gleichgewicht scheint sich im höheren Lebensalter zugunsten der Männer zu verändern, sodass Frauen in über der Hälfte der Fälle und mit 8,5 Prozentpunkten häufiger im Unterkiefer zahnlos sind (Nitschke & Stark, 2016). Trotzdem sind in der vorliegenden Arbeit weibliche Probanden überrepräsentiert. Frauen suchten demnach häufiger die oben genannte Praxis auf und ließen ein DVT anfertigen, um ggf. fehlende Zähne mittels Implantaten ersetzen zu lassen. Einerseits können die Gründe hierfür sein, dass Frauen einen höheren Anspruch an Lebensqualität, Ästhetik und Kaukomfort haben und tendenziell mutiger gegenüber zahnärztlichen Behandlungen sind. Dies spiegelt sich im höheren Versorgungsgrad bei Frauen wieder: Laut DMS V hätten bei 65 bis 74-Jährigen Frauen durchschnittlich 5 % mehr ersetzte Zähne als Männer. Andererseits sind Männer geringfügig häufiger implantologisch versorgt als Frauen. Dies hingegen spricht dafür, dass sich Frauen zwar häufiger diagnostischen Maßnahmen unterziehen, sich dann wiederum beispielsweise aus finanziellen Gründen gegen die Therapie entscheiden oder Scheu vor der Behandlungsdauer, dem zeitlichen Aufwand oder zu erwartenden Schmerzen haben. Dagegensprechend seien nach DMS V Frauen häufiger mit feststehendem implantatgetragenen Zahnersatz versorgt als Männer (Nitschke & Stark, 2016).

Der in dieser Studie ermittelte geschlechtsspezifische Unterschied bezüglich der Unterkieferhöhe in der Strecke [AB] zwischen Männern und Frauen ist in allen Messpositionen nachweisbar, aber nur in zwei Messpositionen statistisch signifikant.

Auch in anderen vergleichbaren Studien zur Vermessung des Unterkieferknochenangebotes sind Geschlechtsunterschiede feststellbar (Bressan et al., 2017; Canger & Celenk, 2012; Guler et al., 2005; Panchbhai, 2013; Soikkonen et al., 1996; Xie et al., 1996). Denkbar wäre, dass diese in der vorliegenden Studie ebenfalls zutreffen und nur nicht statistisch gesichert werden konnten, weil die Anzahl der männlichen Patienten im Vergleich zu weiblichen geringer ist.

5.1 Unterkieferhöhen und Unterkieferbreiten

Die gemessenen Unterkieferhöhen fallen deutlich nach distal ab, was auf einen verstärkten Knochenabbau und/oder zeitigeren Zahnverlust in diesem Bereich des Unterkiefers hindeutet. Beobachtungen von früheren, zweidimensionalen Studien korrelieren mit diesen Ergebnissen. Unabhängig vom Geschlecht sind die Unterkieferhöhen in den Messpositionen des ersten Prämolaren signifikant höher als am ersten Molaren (Canger & Celenk, 2012; Guler et al., 2005; Panchbhai, 2013; Xie et al., 1997). Bei der Gegenüberstellung zahnloser und bezahnter Unterkiefer zweier gleichaltriger Untersuchungsgruppen wird gezeigt, dass sich der Alveolarkamm im Seitenzahnbereich um acht Prozentpunkte stärker resorbiert als im Frontzahnbereich (Canger & Celenk, 2012). Kontroverse Ergebnisse einer anderen Publikation beschreiben im Fünf-Jahres-Verlauf eine erhöhte Knochenabbaurate im Frontzahnbereich, die unabhängig von der Dauer der Zahnlosigkeit, des Patientenalters oder des Geschlechts sei. Diese Messungen sind jedoch anhand von Fernröntgenseitenaufnahmen erhoben worden und unterliegen daher Überlagerungseffekten (Kovacic et al., 2012).

Es kann aber auch darauf zurückgeführt werden, dass Unterkiefer Frontzähne die am längsten im Kiefer verbleibenden Zähne sind (Mack, Mundt, Budtz-Jorgensen, et al., 2003). Gemäß der fünften Deutschen Mundgesundheitsstudie weisen Eck- und Schneidezähne im Unterkiefer eine höhere Überlebensrate bei Senioren im Alter von 65- bis 100 Jahren auf als Seitenzähne. Schlussfolgernd bedeutet dies, dass Prämolaren und Molaren häufiger und früher verloren gehen. Insbesondere der erste Molar sei gemäß DMS V nach dem Weisheitszahn der am häufigsten fehlende Zahn im Unterkiefer, gefolgt vom zweiten Molaren und zweiten Prämolaren (Nitschke & Stark, 2016). Dadurch resultiert eine längere Periode der Zahnlosigkeit im Seitenzahnbereich gegenüber dem Frontzahnbereich, in der die Resorption des Alveolarkamms voranschreiten kann.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit bezüglich der Unterkieferhöhe im Seitenzahn-
bereich sind vergleichbar mit einer ähnlich angelegten Studie der Universität Padua.

Die Tabelle 36 stellt die Messungen von Bressan et al. (Messwerte aus der Studie von Bressan et al. sind *kursiv* gekennzeichnet) mit Ergebnissen der vorliegenden Studie gegenüber. Es werden die Werte der Messpositionen 35 und 45 sowie 36 und 46 zusammen gewertet dargestellt. Dabei entspricht „*Site a BH*“ der Knochenhöhe am Messpunkt A (etwa vergleichbar mit der Messposition des zweiten Prämolaren der vorliegenden Studie) und „*Site b BH*“ der Knochenhöhe am Messpunkt B (vergleichbar mit der Messposition des ersten Molaren der vorliegenden Studie) (Bressan et al., 2017).

Messposition und Messstrecke	„ <i>Site a BH</i> “	5er [AC]	„ <i>Site b BH</i> “	6er [AC]
Anzahl Messungen n	<i>136</i>	86	<i>135</i>	86
Mittelwert in mm	<i>11,20</i>	7,53	<i>10,70</i>	7,02
Standardabweichung in mm	<i>4,03</i>	4,66	<i>3,74</i>	3,89

Tabelle 36: Gegenüberstellung der Ergebnisse von *Bressan et al.* mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit (Bressan et al., 2017)

Die Mittelwerte der Ergebnisse von Bressan et al. für Knochenhöhen über dem Mandibularkanal differieren in beiden Positionen mit ca. 3,7 mm deutlich zu den Ergebnissen der Messstrecke [AC].

In der Studie von Bressan et al. ist das durchschnittliche Alter mit 67,4 Jahren nahezu identisch mit dem Alter der hier untersuchten zahnlosen Studienpopulation, das durchschnittlich 69,8 Jahre beträgt. Die in Tab. 36 ersichtlichen Unterschiede in der Unterkieferhöhe können entweder durch einen höheren Anteil von Frauen in der hier vorliegenden Arbeit oder durch methodische Unterschiede, beispielsweise eine abweichende Ausrichtung, erklärt werden. Frauen weisen im Vergleich zu Männern eine stärker progrediente Alveolarkammatrophy auf (Kribbs, 1990; Kribbs et al., 1989; Soikkonen et al., 1996). Wahrscheinlich ist der höhere Frauenanteil in der vorliegenden Studie als Ursache hierfür anzusehen. Die nach posterior gerichteten Veränderungen der durchschnittlichen Unterkieferhöhen sowie deren Standardabweichung bewegen sich beim Vergleich beider Studien in gleichen Größenordnungen. Hier scheinen Geschlechtsunterschiede eine untergeordnete Rolle zu spielen.

Beim Vergleich von Patienten mit zahnlosem Unterkiefer (Gruppe 1) und Patienten mit anteriorem Restgebiss (Gruppe 2) nimmt bei zahnlosen Patienten die Knochenhöhe von mesial nach distal stärker ab. (s. Abb. 13 und Abb. 14, S.44).

Die volumetomographischen Messungen zur Knochenhöhe zahnloser Unterkiefer-Seitenzahnbereiche von de Souza et al. werden vergleichsweise mit den Ergebnissen der Strecke [AC] von Gruppe 2 der vorliegenden Studie betrachtet (s. *kursiv* markierte Werte in Tab. 37). Obwohl die Messungen von de Souza et al. in der Messposition 5 mm hinter dem Foramen mentale (entspricht etwa der Messposition des zweiten Prämolaren der vorliegenden Studie) geringfügig kleiner sind als die Messungen am zweiten Prämolaren, sind sie 15 mm hinter dem Foramen mentale (entspricht etwa der Messposition des ersten Molaren in der vorliegenden Studie) ca. 1 mm größer.

Dies zeigt eine geringere Alveolarkammatrophy bei Patienten von de Souza et al. als bei Patienten der vorliegenden Arbeit und kann mit dem Altersunterschied von ca. 11 Jahren zwischen den Studienpopulationen begründet werden. Untersuchte Patienten mit anteriorem Restgebiss der vorliegenden Studie sind mit durchschnittlich 62,81 Jahren gegenüber 51,37 Jahren deutlich älter (de Souza et al., 2016).

Messposition und Messstrecke	<i>„Bone Height 5 mm“</i>	5er [AC]	<i>„Bone Height 15 mm“</i>	6er [AC]
Anzahl Messungen n	152	50	174	50
Mittelwert in mm	12,19	12,41	11,75	10,75
Standardabweichung in mm	3,54	4,66	3,45	3,22

Tabelle 37: Gegenüberstellung der Ergebnisse von *de Souza et al.* mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit (de Souza et al., 2016)

Bei der Betrachtung der Standardabweichungen liegen die Ergebnisse von de Souza et al. im Vergleich zu der vorliegenden Studie dichter beieinander. Dies könnte auf eine höhere Zahl von Messwerten bei einer homogeneren Altersstruktur des Patientenguts hindeuten, da Patienten mit einem Kieferkamm der Cawood & Howell Klasse „negativer Kieferkamm“ ausgeschlossen worden sind. Somit wurden die Knochenhöhen alter Patienten, die unter Umständen schon länger im Seitenzahnbereich zahnlos sind und ggf. eine Teilprothese tragen, nicht erfasst und die Ergebnisse sind dadurch nur bedingt vergleichbar.

Im Gegensatz zur Unterkieferhöhe werden die Unterkiefer zum ersten Prämolaren hin erst schmaler, dann zum ersten Molaren hin wieder breiter, bezogen auf Messungen der Strecke [EF]. So sind die Unterkiefer am seitlichen Schneidezahn in 55 %, am Eckzahn in 55 %, am ersten Prämolaren in 46 %, am zweiten Prämolaren in 53 % und am ersten Molaren in 84 % der Messpositionen mindestens 4 mm breit. Dies verdeutlichen die Abbildungen 16 und 17, S. 46. Die Zunahme der Kieferkambreite nach distal korreliert mit den Ergebnissen anderer Studien (Bressan et al., 2017; de Souza et al., 2016).

Im Umkehrschluss demonstrieren diese Ergebnisse auch, dass zahnlose Unterkiefer im Frontzahnbereich oft sehr schmal sind (s. Abb. 35) und im Falle einer geplanten Implantation die Indikation zur Implantatbettvorbereitung, z.B. in Form eines Bone Splittings, entsprechend häufiger gestellt werden müsse. Dies setze wiederum spezielle technische Voraussetzungen und oralchirurgische Kenntnisse des Behandlers voraus. Derartige Beobachtungen unterstreichen die Bedeutung des Bone Splittings als etablierte und langfristig erfolgreiche Methode, um Implantationen in schmalen Kieferkämmen zu ermöglichen und Patienten funktionell zu rehabilitieren (Ella et al., 2014; Enislidis et al., 2006; Simion et al., 1992).

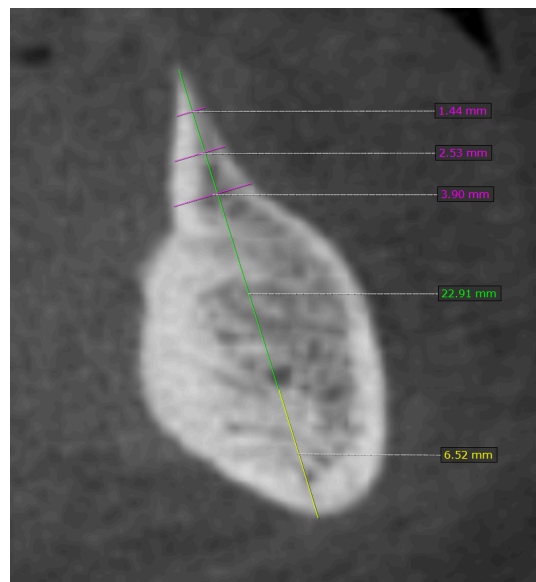


Abbildung 35: Cross Section im Unterkiefer - Frontzahnbereich mit sehr schmalen Kieferkamm, der für eine Implantation zunächst chirurgisch verändert werden müsste (z.B. Ostektomie, Bone Splitting)

Im Gruppenvergleich unterschreiten die Unterkieferhöhen des Seitenzahnbereichs in Gruppe 2 gemäß den Ergebnissen (vgl. Abb. 12, S. 42) selten eine Marke von 18 mm und sind in allen Messpositionen mit 3,5 bis 6,8 mm statistisch signifikant höher als die äquivalenten Messungen in Gruppe 1 (vgl. Tab. 13, S. 43). Die Patientencharakteristika beider Gruppen sind eingangs miteinander verglichen worden und weisen zumindest keine statistischen Unterschiede auf. Dennoch kann es möglich sein, dass der nicht signifikante Altersunterschied von durchschnittlich fünf Jahren ($p=0,0504$) einen Einfluss auf die Messergebnisse hat. Patienten aus Gruppe 2 können durch ihr jüngeres Alter mehr Knochen als Patienten der Gruppe 1 aufweisen. Epidemiologische Studien zeigen, dass die Inzidenz der Zahnlosigkeit mit dem Alter steigt. Der Anteil von zahnlosen Patienten im Alter von 55 bis 64 Jahren betrage 10 % und verfünffacht sich nahezu auf 49 % im Alter von 75 bis 79 Jahren (Mack, Mundt, Budtz-Jorgensen, et al., 2003). Der Altersunterschied ist in der vorliegenden Studie noch zu gering, um gesicherte statistische Aussagen zu treffen. Andererseits könne auch die Hypothese aufgestellt werden, dass Patienten der Gruppe 2 aufgrund der höheren Belastung des Kauorgans mehr verbleibenden Knochen im Seitenzahnbereich aufweisen.

Die Kieferkammatrophy des Unterkiefers von Patienten mit einem anterioren Restgebiss ist in der Literatur noch nicht der Atrophie zahnloser Patienten gegenübergestellt worden. Es ist aber allgemein anerkannt, dass die knöchernerne Belastung vor allem der trabekulären Strukturen des Unterkiefers bei Patienten mit implantatgetragenen Prothesen höher ist als bei zahnlosen Patienten mit schleimhautgetragenen Prothesen. Laut von Wowern und Gotfredsen käme es im Verlauf von fünf Jahren nach Insertion zweier interforaminaler Implantate zu belastungsabhängigen Anpassungen der Knochenstruktur und zu einer Minimierung des physiologischen altersbedingten Verlustes des Mineralisationsgehalts im Unterkiefer (von Wowern & Gotfredsen, 2001). Inwieweit diese Ergebnisse auf noch vorhandene natürliche Zähne übertragbar sind, ist bislang noch nicht untersucht worden. Patienten, deren Prothesen auf natürlichen Zähnen oder Implantaten verankert sind, zeigen andere Funktionsmuster mit höherer Kaumuskelaktivität als Patienten mit völliger Zahnlosigkeit (Dakhilalian et al., 2014; Elsyad et al., 2014; Raghoobar, Meijer, et al., 2000).

So könne tatsächlich die Möglichkeit bestehen, dass durch die mechanische Belastung des anterioren Unterkiefers der Knochen im Seitenzahnbereich vor weiterer Atrophie bewahrt wird. Es kann demnach postuliert werden, dass die Atrophie des Alveolarkamms im zahnlosen Unterkiefer-Seitenzahnbereich maßgeblich vom Vorhandensein eines anterioren Restgebisses abhängt. Hierzu bedarf es in Zukunft weiterer wissenschaftlicher Untersuchungen.

Bezogen auf das Patientenalter existiert in der vorliegenden Studie bei zahnlosen Patienten in fünf von elf Messpositionen eine statistisch signifikante Korrelation zwischen Alter und absoluter Unterkieferhöhe (s. Tab. 17 und Tab. 18, S. 51). Diese Ergebnisse bestätigen die Beobachtungen früherer Studien (Panchbhai, 2013). Einige andere Autoren wiederum können keine Zusammenhänge zwischen Atrophie im Unterkiefer und verschiedenen Altersgruppen feststellen (Guler et al., 2005; Soikkonen et al., 1996). Angesichts der starken Streuung der Punktwolken in Abb. 19, S. 49 und Abb. 21, S. 50 kann davon ausgegangen werden, dass sich noch zahlreiche andere Faktoren außer dem Lebensalter auf die Restknochenhöhe eines zahnlosen Patienten auswirken. Ein maßgeblicher Faktor könne die Dauer der Zahnlosigkeit sein. Der Knochenabbau des Alveolarfortsatzes verlaufe nach Tallgren nicht zeitlich proportional, sondern gehe hauptsächlich in den ersten zehn Jahren nach Eintritt der Zahnlosigkeit mit einer Resorption von 30 % bis 40 % des Alveolarfortsatzes im Unterkiefer vonstatten (Kovacic et al., 2012; Tallgren, 1972). Nach Canger und Celenk beschleunige das Tragen von Totalprothesen nachweislich den Prozess der Alveolarkammatrophie. So weisen zahnlose Patienten, die eine Totalprothese im Unterkiefer tragen, signifikant weniger Knochenhöhe auf als Patienten ohne prothetische Versorgung (Canger & Celenk, 2012). Daher könne die Art, Passung und Tragedauer des Zahnersatzes ebenfalls eine maßgebliche Rolle bei dem Grad der Atrophie spielen.

In Gruppe 2 existierten keine signifikanten Korrelationen zwischen Alter des Patienten und zunehmender Knochenhöhe im Seitenzahnbereich. Da in der vorliegenden Arbeit keine Informationen über den Zeitpunkt des Zahnverlustes im Unterkiefer eruiert werden konnten, war die Streuung der Ergebnisse möglicherweise größer.

Die Angulation der Strecke [AB] nimmt vom Frontzahnbereich (ca. 16 Grad) zur Prämolarenregion (11 bis 13 Grad) zunächst ab und dann wieder zu (vgl. Abb. 23, S. 53). Dabei ist die Streuung der Messwerte annähernd gleich verteilt. Anhand der gewonnenen Ergebnisse kann geschlussfolgert werden, dass die benötigten Aufbauelemente zur Verankerung des Zahnersatzes (Abutments) eine Angulation von 11 bis 17 Grad aufweisen sollten.

Bezugnehmend zu den vorgestellten Konzepten der prothetischen Rehabilitation zahnloser Unterkiefer (vgl. S. 8 bis 10) entspricht dies den von Implantatherstellern angebotenen Standard-Sekundärteilen. Im Straumann® Produktkatalog 2017 sind diese für die Ø 4,1 mm und Ø 3,3 mm Implantate mit einem Divergenzausgleich von bis zu 40° für eine herausnehmbare LOCATOR® basierte Versorgung und für verschraubte Sekundärteile mit einer Neigung von bis zu 30° erhältlich. Falls eine festsitzende Versorgung geplant wird, können die sog. Abutments mit einer Angulation von 15° geordert werden (Straumann-AG, 2017). Bei den referenziellen Ø 2,1 mm Implantaten erfolgt der Divergenzausgleich in den Matrizen, welche in die Prothese eingearbeitet werden. Sie gestatten eine divergierende Implantatangulation von bis zu 30° (3M-ESPE, 2011). Die in dieser Arbeit ermittelten Angulationen bestätigen somit die vom Hersteller vorgesehenen, vorhandenen und bestellbaren Standard-Sekundärteile.

5.2 Implantierbares Knochenangebot

Die Messung der Unterkieferhöhe ist in Hinblick auf eine Implantation nur sinnvoll, wenn auch die Unterkieferbreite berücksichtigt wird. Daher wird die für eine Implantation geeignete Knochenhöhe definiert durch jenen Abschnitt der Strecken [AB] (absolute Unterkieferhöhe) bzw. [AD] (Absolute Unterkieferhöhe abzüglich kaudaler Kortikalis) und [AC] (absolute Unterkieferhöhe über dem Mandibularkanal), der mindestens 4 mm Unterkieferbreite rechtwinklig zur Messrichtung aufweist (vgl. Tab. 11, S. 35).

Der Grund für diese Breitenbegrenzung und Berechnung der Strecken [A'B], [A'D] bzw. [A'C] ist, dass die kleinsten referenziellen Miniimplantate 2,1 mm im Durchmesser aufweisen und zirkulär mindestens 1 mm Knochen für eine erfolgreiche Implantation vorhanden sein soll (Albrektsson et al., 1986).

Sehr schmale Kieferkämme, wie exemplarisch in Abb. 35, S. 72 dargestellt, müssten zunächst vertikal reduziert werden, bevor ein Implantat inseriert werden kann. In der vorliegenden Studie wird aus klinischer Erfahrung davon ausgegangen, dass der Alveolarkamm um nicht mehr als 6 mm ostektomiert werden würde.

Daher sind alle Kieferkämme, deren Strecke [IJ] weniger als 4,0 mm beträgt, zunächst ohne spezielle chirurgische Maßnahmen (z.B. Bone Splitting oder augmentative Maßnahmen) für eine Implantation ungeeignet und wurden für diese Studie als „nicht implantierbar“ bewertet.

In manchen Situationen können hierdurch aus praktischer Sicht Fehlentscheidungen entstehen, weil beispielsweise die in Abb. 35, S. 72 abgebildete Cross Section eines Unterkieferfrontzahnbereiches kurz unterhalb dieser 6 mm - Marke ausreichend Knochenbreite für die Aufnahme eines dentalen Implantates aufweist. Nach den Vorgaben dieser Arbeit wird diese Implantatposition jedoch als „nicht implantierbar“ bewertet.

Bikortikal verankerte Implantate

Im Bereich des seitlichen Schneidezahns und Eckzahns, deren Ergebnisse stets dicht beieinanderliegen, lassen sich erwartungsgemäß die meisten dentalen Implantate inserieren.

Ohne die kaudale Kortikalis hinzuzunehmen, sind Standardimplantate (\varnothing 4,1 x 10 mm) bei nur 50 % aller Frontzahnpositionen geeignet. Je länger das Implantat ist, umso seltener ist das dafür erforderliche Knochenangebot vorhanden. Das \varnothing 4,1 x 12 mm Implantat habe demnach zu 39 % und das \varnothing 4,1 x 14 mm Implantat nur noch zu 26 % gesetzt werden können.

Miniimplantate (\varnothing 2,1 x 10 mm) können mit 74 % in die meisten Unterkiefer inseriert werden. Mit Zunahme der Implantatlänge nimmt hier auch die Anzahl geeigneter Implantatpositionen ab, so ist das Knochenangebot bei dem \varnothing 2,1 x 14 mm-Implantat nur in ca. 45 % der Messpositionen ausreichend. Unabhängig von der Implantatlänge sei bei Hinzunahme der kaudalen Kortikalis im Mittel 25 % häufiger eine Versorgung mit Miniimplantaten möglich (vgl. Abb. 26 & Tab. 26, S. 57 sowie Abb. 27 & 28, S. 58.)

Wenn davon ausgegangen wird, dass die Dicke der kaudalen Kortikalis im Durchschnitt 4,1 mm beträgt (vgl. Tab. 25, S. 56) und bei der Berechnung des zur Implantation erforderlichen Knochenangebotes stets 1 mm Sicherheitsabstand berücksichtigt wird, werden bei oben genannten Ergebnissen 3,1 von 4,1 mm der kaudalen Kortikalis zur bikortikalen Verankerung benutzt, das sind 75 %.

Durch die bikortikale Verankerung können somit, unabhängig von der Implantatlänge, pro einzelner Messposition durchschnittlich 21 % häufiger Implantate mit dem Durchmesser 4,1 mm und 25 % häufiger Implantate mit dem Durchmesser 2,1 mm in zahnlose Unterkiefer inseriert werden als bei der monokortikalen Implantation.

Werden diese Ergebnisse auf pro Patienten bezogen, wird deutlich, dass potenziell viele Patienten von der bikortikalen Verankerung profitieren: Entsprechend Tab. 28 können von 43 zahnlosen Patienten acht nicht mittels monokortikaler, aber davon sieben mit bikortikaler Implantation versorgt werden. Dabei würde eine Versorgung mit zwei beliebigen interforaminalen Implantaten, gesetzt im Bereich der 2er oder 3er, einer beliebigen Größe der hier zugrunde gelegten referenziellen Implantatgrößen angestrebt (vgl. Tab. 12, S.36).

Ähnlich verhielt es sich bei der Versorgungsstrategie mit vier Implantaten: Sind mit der monokortikalen Verankerung lediglich 25 von 43 Patienten zu versorgen, steigere die bikortikale Verankerung diese Zahl um 13 Patienten auf 38 Patienten. Bei einer angestrebten Versorgung mit sechs Implantaten können 15 Patienten versorgt werden. Dabei spiele aufgrund des Mandibularkanals die bikortikale Verankerung eine untergeordnete Rolle.

Im Hinblick auf die prothetische Versorgung ist das ausgewählte Implantatsystem von großer Bedeutung. Eine kombiniert festsitzend-abnehmbare Versorgung, z.B: mit einem Steg, kann aus technischen Gründen nur auf mehrteiligen Implantatsystemen erfolgen (Straumann-AG, 2012).

Da \varnothing 2,1 mm Miniimplantate einteilig sind und einen Kugelkopf als Attachment haben (3M-ESPE, 2011), können diese nicht in derartige Versorgungsarten eingebunden, sondern allenfalls zur Verankerung einer Totalprothese benutzt werden.

Wenn eine Steg-, Teleskop- oder Brückenversorgung angestrebt wird, sind somit oben genannte Zahlen nur noch bedingt zutreffend: Obwohl die Implantation von vier interforaminalen monokortikalen Implantaten einer beliebigen referenziellen Implantatgröße bei 25 Patienten möglich sei, haben lediglich sieben Patienten das ausreichende Knochenangebot zur monokortikalen Implantation von vier interforaminalen \varnothing 4,1 mm Standardimplantaten. Umso bedeutender wird es, dass durch die bikortikale Verankerung der vier \varnothing 4,1 mm Standardimplantate weitere 13 Patienten versorgt werden könnten. Dies entspricht ca. 30 % von 43 Patienten und damit einer Steigerung dieser Versorgungsform um fast das Dreifache.

Ist eine festsitzende prothetische Versorgung auf sechs Implantaten geplant, so ist die Implantation des dazugehörigen Implantatsystems nur bei vier Patienten zu realisieren. Sie haben ausreichend Knochenangebot im Front- und Seitenzahnbereich, sodass die Insertion von \varnothing 4,1 mm Standardimplantaten möglich ist. Eine bikortikale Verankerung der Implantate im Frontzahnbereich hat bis auf einen Patienten keinen Einfluss auf die Fallzahlen.

Es wird durch die Analyse der Ergebnisse auch deutlich, dass die Zusammenarbeit zwischen Implantologie und Prothetik sehr eng gestaltet werden sollte. Implantologische Entscheidungen stehen in enger Wechselwirkung mit der angestrebten prothetischen Versorgungsform.

Die bikortikale Implantation im Seitenzahnbereich ist aufgrund des Canalis mandibulae zunächst nicht ohne spezielle und risikobehaftete chirurgische Maßnahmen wie der operativen Lateralisation des N. alveolaris inferior in Erwägung zu ziehen.

Wie allerdings in Tab. 16, S. 48 ersichtlich ist, besteht bei ausreichend lateralem Abstand des Kanals nach vestibulär bzw. lingual die Möglichkeit, das Implantat am Nerv vorbei zu inserieren. Möglicherweise kann im atrophierten zahnlosen Unterkiefer am ersten Molaren aus Sicht des verfügbaren Knochenangebotes in 62 % der Fälle ein Miniimplantat (\varnothing 2,1 mm) und in 7 % der Fälle ein Standardimplantat (\varnothing 4,1 mm) vestibulär am Mandibularkanal vorbei gesetzt werden. Bei Patienten mit einem anterioren Restgebiss sind die Fallzahlen zum Teil noch höher: zu 70 % ist zwischen 4 und 6 mm und zu 18 % mehr als 6 mm Platz vestibulär des Mandibularkanals anzutreffen.

Diese Beobachtungen eröffnen auf den ersten Blick neue Möglichkeiten der Implantation im Seitenzahnbereich. Sie sollen aber klinisch sehr kritisch betrachtet werden, da es sich bei den hier diskutierten Ergebnissen lediglich um eine Platzanalyse handelt, ohne auf die Angulation des Implantates oder verbleibende Knochenbreite kaudal des Canalis mandibulae zu achten. Eine entsprechende Analyse ist in der vorliegenden Arbeit aus methodischen Gründen nicht möglich. Hierzu bedarf es weiteren Untersuchungen, um wertvolle Beiträge zu einer möglichen bikortikalen Implantation im Seitenzahnbereich zu leisten.

In der Unterkiefermitte ist durch die Symphysis mandibulae eine im Vergleich zu den seitlichen Frontzahnpositionen im Schnitt 2,2 mm dickere Kortikalis anzutreffen (vgl. Tab. 25, S. 56). Deren Ausprägung ist auch sehr variabel: die Standardabweichung war mit $\pm 2,65$ mm mehr als doppelt so hoch als bei benachbarten Positionen.

In der Literatur wird die Unterkiefermitte als Implantatposition kontrovers diskutiert. Ein Risikofaktor für eine Implantation in diesem Bereich stellen die Foramina lingualia dar, welche auch in dieser Studie bei der Untersuchung klar erkennbar waren. Durch sie treten Blutgefäße in den Unterkiefer ein, somit bestünde nach Oettle et al. die Gefahr einer intraoperativen arteriellen Blutung (Oettle et al., 2015).

In aktuellen Reviews wird einerseits das Mittellinienimplantat als eine verlässliche Therapieoption beschrieben, andererseits schwanken die Erfolgsraten zwischen 60 % und 100 % (Passia & Kern, 2014). Insbesondere bei starker Kieferkammatrophy bliebe nach Oettle nicht mehr ausreichend Sicherheitsabstand zu den Gefäßen, um ein Implantat inserieren zu können (Oettle et al., 2015).

Die biomechanischen Vorteile der bikortikalen Verankerung seien nach Pierrisnard die höheren Primärstabilitäten und geringeren Mikrobewegungen (Pierrisnard et al., 2003) sowie nach Sotto-Maior et al. die geringere Auslenkung der Implantate (Sotto-Maior et al., 2014). Daraus kann die Möglichkeit der frühzeitigen Belastung und prothetischen Versorgung des Implantats geschlussfolgert werden, die bereits im Jahre 2001 durch Payne, Tawse-Smith et al. klinisch angewandt und als vorteilhaft angesehen wurden (Payne et al., 2001). Heute ist durch zahlreiche randomisierte klinische Studien bekannt, dass auch monokortikale Implantate im Unterkiefer frühzeitig belastet werden können, ohne der Überlebens- bzw. Erfolgsrate des konventionellen, verzögerten Belastungsprotokolls nachzustehen (Schimmel et al., 2014). In der Kieferorthopädie wird die bikortikale Verankerung von Miniimplantaten genutzt, um einwirkende Kräfte bei der skelettalen Verankerung (z.B. bei der Mesialisierung von Molaren) besser auf die linguale und vestibuläre Kortikalis zu verteilen. Dadurch werde eine Verringerung der Stauchungskräfte um das Zwei- bis Dreifache erzielt, um Implantatlockerung bzw. -verlust vorzubeugen. Die Autoren gewannen diese Ergebnisse anhand von Computersimulationen, bei denen die auf die Miniimplantate wirkenden Kräfte im Winkel von 90° zur Implantatachse ansetzten (Holberg et al., 2014). Diese Belastung ist bei dentalen Implantaten, die eine prothetische Versorgung tragen, wahrscheinlich selten bzw. nie der Fall. Insofern ist es fragwürdig, ob die biomechanischen Vorteile der bikortikalen Verankerung auf die orale Implantologie übertragbar sind. Eine aktuelle computerbasierte Studie konnte zeigen, dass sowohl die von Pierrisnard im Jahre 2003 postulierte Reduzierung der kortikalen Stauchungskräfte durch bikortikale Verankerung (Pierrisnard et al., 2003) als auch die oben beschriebenen Ergebnisse der kieferorthopädischen Studie bei dentalen Implantaten lediglich 1 % bis 2 % betrage und demzufolge fast zu vernachlässigen sei. Wesentlich größeren Einfluss habe die Länge des Implantates: bei einer Längenreduktion von 14 mm auf 8,5 mm wirken 36 % bis 53 % höhere Kräfte auf die kraniale Kortikalis (Lofaj et al., 2015).

Nach den Ergebnissen dieser Arbeit ist im Eckzahnbereich in ca. 20 % und im seitlichen Schneidezahnbereich in 14 % der Fälle das implantierbare Knochenangebot im Frontzahnbereich unter 10 mm hoch (s. Abb. 15, S.45). Eine seltene, aber gefürchtete Komplikation der Implantation bei derart atrophierten Strukturen ist die Implantat-assoziierte Fraktur der Mandibula. In der wissenschaftlichen Literatur wird dies durch Fallstudien beschrieben und der Unterkiefer mit einer Höhe unter 12 mm in Hinblick auf eine Implantation als frakturgefährdet eingeschätzt. Insbesondere die Verwendung von Implantaten mit großem Durchmesser oder die Perforation der kaudalen Kortikalis beeinflusse maßgeblich die Unterkieferstatik und kann zu dessen Bruch führen (Almasri & El-Hakim, 2012; Oh et al., 2010). Andererseits traten die beschriebenen Frakturen nach einer langen, komplikationslosen Phase in Verbindung mit Explantationen, Begleiterkrankungen, Periimplantitis oder Änderung der Lebensumstände, z.B. Pflegebedürftigkeit, auf. Die Implantat-assoziierte Unterkieferfraktur ist ausgesprochen selten. Ihre Häufigkeit betrage nach Raghoobar et al. 0,2 % (Raghoobar, Stellingsma, et al., 2000). Demzufolge kann die bikortikale Verankerung auch ein Risiko für die Therapie darstellen. Bisherige Therapiekonzepte zur Versorgung zahnloser Unterkiefer durch monokortikale Implantationen im interforaminalen Bereich werden erfolgreich angewendet. Selbst Patienten mit stark atrophiertem Unterkiefer können mit festsitzendem Zahnersatz rehabilitiert werden (Krebs et al., 2013; Weinstein et al., 2012). Trotzdem kann bei entsprechend kompromittierten Kieferkämme die bikortikale Verankerung notwendig sein, um eine Implantation überhaupt zu ermöglichen.

Aus der Sicht des Autors ist kaudale Kortikalis im Unterkiefer-Frontzahnbereich nicht eindeutig von der Spongiosa abzugrenzen, da sich diese nach kaudal hin zur Kortikalis verdichtet. Unter diesen Gesichtspunkten ist es unbekannt, wie oft es zur bikortikalen Verankerung vermeintlich monokortikal platzierten Implantate im interforaminalen Unterkiefer kommt. Einerseits ist der therapeutische Nutzen der bikortikalen Verankerung dentaler Implantate im Frontzahnggebiet zahnloser Unterkiefer, dass im Durchschnitt 23 % mehr Patienten mit Implantaten versorgt werden könnten, ohne dass zusätzliche augmentative chirurgische Eingriffe erforderlich wären. Andererseits könne ein längeres Implantat verwendet werden, das eingeleitete Kräfte besser auf die knöchernen Strukturen des Unterkiefers verteilt. Dabei soll sich jedoch der Behandler stets über die biomechanischen Konsequenzen und mögliche kurz- und langfristige Komplikationen bewusst sein.

Bei der Betrachtung der Boxplot Diagramme auf den Seiten 61 und 63 fällt auf, dass der Interquartilabstand (d.h. die Länge der Box) bei den Messungen der Gruppe 2 (s. Abb. 31, S. 63) mit durchschnittlich ca. 3,85 mm wesentlich kleiner gegenüber Gruppe 1 (s. Abb. 29, S. 51) mit ca. 7 mm ist. Das bedeutet, dass die Streuungen von Gruppe 2 um die Hälfte geringer sind als die der Gruppe 1. Auch die Werte außerhalb der Box, d.h. die Länge der Whisker, zeigt bei Gruppe 1 zum Teil große Abweichungen. Daraus kann abgeleitet werden, dass das implantierbare Knochenangebot zahnloser Patienten deutlich inkonsistenter und viel variabler ist als bei Patienten mit anteriorem Restgebiss. Es existieren zahnlose Patienten, deren Unterkiefer sich nicht für eine Implantation eignen, und andere, die einen kaum atrophierten Alveolarfortsatz aufweisen. In sekundärer Instanz verdeutlicht dies allerdings auch, dass der Prozess der Alveolarkammatrophie individuell und dynamisch abläuft. Während bei zahnlosen Patienten der Anteil des implantierbaren Knochenangebotes unter 10 mm Höhe im Frontzahnbereich 14 % (2er) bzw. 20 % (3er) beträgt, war der Prozentsatz im Bereich der Prämolaren (74 % bzw. 77 %) und Molaren (80 %) wesentlich höher. Das Ø 2,1 x 10 mm Miniimplantat belegt in allen Messpositionen von Gruppe 1 den vorletzten Platz, gemessen am Vorkommen des geeigneten Knochenangebotes (16 % am 4er, 19 % am 5er und 12 % am 6er).

Die Ergebnisse dieser Arbeit unterstreichen die Problematik, dass bei beiden Gruppen im Seitenzahnbereich zwar genug Knochenbreite, aber nur mangelhaft Knochenhöhe anzutreffen ist.

Es ist ersichtlich, dass die posterioren Unterkiefer sich bevorzugt für den Einsatz von kurzen Implantaten eignen würden. Gemessen an der Indikationshäufigkeit für ein kurzes Ø 4,1 x 6 mm Implantat könnte dies in 28 % der Fälle am ersten Prämolaren, in 29 % am zweiten Prämolaren und in 41 % am ersten Molaren gesetzt werden. Das entspricht dem vier bis fünffachen eines Ø 4,1 x 10 mm Standardimplantates, dessen Platz nur in ca. 8 % der Fälle vorhanden ist (vgl. Abb. 30 & Tab. 31, S.62)

Nur das ultrakurze Straumann® Standard Plus Ø 4,1 x 4 mm Implantat könne im Vergleich zum 6-mm-Implantat an der Position des ersten Molaren weitere 4 %, am zweiten Prämolaren zu 13 % und am ersten Prämolaren zu 10 % häufiger inseriert werden. Es wird deutlich, wie bedeutsam kurze Implantate als Alternative und Erweiterung der Therapiestrategien zur Versorgung der posterioren Mandibula sind.

Auch andere aktuelle Studien zeigen, dass die meisten kurzen Implantate im Unterkiefer-Seitenzahnbereich gesetzt werden (Anitua et al., 2014; Anitua et al., 2015; Annibali et al., 2012). Die Auswertung des analysierten Knochenangebotes von Gruppe 2 (vgl. Abb. 32, S: 64 & Tab 33) zeigt zunächst, dass im Vergleich zum zahnlosen Unterkiefer (Gruppe 1) 31 % häufiger am ersten Prämolaren, 40 % häufiger am zweiten Prämolaren und 29 % häufiger am ersten Molaren der Platz für ein Implantat beliebiger oben genannter Größen (\varnothing 2,1 x 10mm, \varnothing 3,3 x 9 mm, \varnothing 4,1 x 4 mm, \varnothing 4,1 x 6 mm und \varnothing 4,1 x 10 mm) vorhanden ist. Im Prämolarenbereich sind sowohl ultrakurze \varnothing 4,1 x 4 mm als auch kurze \varnothing 4,1 x 6 mm oder durchmesserreduzierte \varnothing 3,3 x 8 mm Implantate nahezu gleich oft indiziert. In der Position des zweiten Prämolaren und ersten Molaren dagegen stellt sich eine Abstufung dar (beginnend mit der niedrigsten Häufigkeit): Standardimplantate (\varnothing 4,1 x 10 mm) > Miniimplantate (\varnothing 2,1 x 10 mm) > durchmesserreduzierte Implantate (\varnothing 3,3 x 8 mm) > kurze Implantate (\varnothing 4,1 x 6 mm) > ultrakurze Implantate (\varnothing 4,1 x 4 mm).

Für die Rehabilitation von Patienten mit einem anterioren Restgebiss sind kurze Implantate (\varnothing 4,1 x 6 mm) besonders interessant, weil durch deren Einsatz mit geringem Aufwand eine festsitzende prothetische Versorgung realisiert und eine herausnehmbare Prothese vermieden werden könnte. Diese Versorgungsmöglichkeit wurde schon oft in der Literatur beschrieben (Gulje et al., 2013; Pommer et al., 2011; Slotte et al., 2015).

Die Verwendung von kurzen (6 mm) bzw. ultrakurzen (4 mm) Implantaten setzt eine strenge Indikationsstellung und präoperative Planung voraus. So wurden in der Studie von Slotte et al. Patienten ausgeschlossen, die schwerwiegende systemische Erkrankungen oder Risikofaktoren wie Nikotin- oder Drogenabusus aufwiesen, keine gute Mundhygiene, Bruxismus, Parodontitis, orale Infektionen hatten oder eine schlechte Compliance zeigten. Angesichts der steigenden Lebenserwartungen müssen die mit dem Alter verbundenen Komorbiditäten, Einschränkungen der motorischen und kognitiven Fähigkeiten in die Indikationsstellung einbezogen werden.

Insbesondere die häusliche und professionelle Nachsorge im höheren Lebensalter stellt eine Herausforderung dar. So gesehen könnten sich langfristig die vielversprechenden Erfolgsraten kurzer Implantate aufgrund auftretender periimplantärer Infektionen und damit verbundener Misserfolge reduzieren.

Immerhin bedeuten 2 mm periimplantärer Knochenverlust bei einer Implantatlänge von 4 mm ein Drittel bzw. bei 6 mm Länge die Hälfte des Verlustes der gesamten Kontaktfläche zwischen Implantat und Knochen. Diese Überlegungen werden in anderen Studien zur implantatprothetischen Versorgung des atrophierten Unterkiefer-Seitenzahnbereiches ebenfalls diskutiert (Felice et al., 2014).

Der Hauptvorteil kurzer Implantate ist, dass auch atrophierte Unterkiefer im Seitenzahnbereich schonender, innerhalb kürzerer Zeit und nicht so risikoreich im Vergleich zu vertikalen Augmentation und anderen chirurgischen Maßnahmen (z.B. Lateralisation des N. mandibularis, Knochentransplantationen oder gesteuerte Knochenregeneration) mit Implantaten versorgt werden könnten. Patienten erfahren durch eine festsitzende bzw. gut verankerte Suprakonstruktion eine Steigerung im Kaukomfort, Wohlbefinden und Lebensqualität. Felice et al. beschrieben in einer randomisierten, klinischen Studie nach fünf Jahren, dass kurze Implantate im Unterkiefer gegenüber längeren Implantaten, deren Insertion eine vertikale Augmentation voranging, überlegen seien. Hinsichtlich Knochenverlust (1,49 mm gegenüber 2,32 mm) und Komplikationsrate (21 gegen sechs von 60 Patienten) schnitten kurze Implantate besser ab. Die Autoren schlussfolgern, dass mittels kurzer Implantate vertikale Augmentationen im Seitenzahnbereich nicht nur vermieden werden, sondern atrophierte Kieferbereiche auch erfolgreicher und komplikationsärmer versorgt werden können (Felice et al., 2014). Die Resultate der vorliegenden Arbeit verdeutlichen die Bedeutung kurzer Implantate für die orale Implantologie, da sie zuverlässig eingesetzt werden und gegenüber Standardimplantaten häufiger zum Einsatz kommen können. Mit ihrer Hilfe kann der Zahnarzt Patienten mit einem geringen Knochenangebot im Unterkiefer ohne aufwändige, kostenintensive, langwierige und risikobehaftete chirurgische Maßnahmen zur Implantatbettvorbereitung funktionell rehabilitieren und das Behandlungsspektrum erweitern.

5.3 Fehlerbetrachtung

Bei der dreidimensionalen Vermessung können Messungenauigkeiten auf verschiedenen Ebenen auftreten. Prinzipiell sind systematische von methodischen Fehlern zu unterscheiden.

Systematischer Messfehler

Bei Vermessung von DVT-Datensätzen mittels softwarebasierten Werkzeugen zur Längenmessung entstehen systematische Fehler, welche auf Diskrepanzen zwischen tatsächlichen (d.h. histologischen) und radiologischen Messwerten zurückzuführen sind. In einer Studie von Gerlach et al. wurden diese Diskrepanzen untersucht (Gerlach et al., 2013):

Messstrecke	Mittlere Differenz Histologie – DVT	Standardabweichung	äquivalente Messstrecke
Absolute Unterkieferhöhe	0,16 mm	0,15 mm	[AB]
Absolute Unterkieferbreite	0,56 mm	0,31 mm	[EF], [GH], [IJ]
Dicke der kaudalen Kortikalis	0,31 mm	0,22 mm	[BD]

Tabelle 38: Darstellung der Messergebnisse des systematischen Fehlers von Gerlach et al.

Methodischer Fehler

In der vorliegenden Studie wurden fünf zufällig ausgewählte DVT-Datensätze an elf unterschiedlichen Messpositionen vermessen. Damit soll die individuelle Festlegung der anatomischen Strukturen in den Messfehler einbezogen werden, um Aussagen zur Messtoleranz treffen zu können. Daraus resultiert allerdings, dass zu jeder einzelnen Messstrecke nur eine Kontrollmessung vorliegt und bei der Betrachtung des Messfehlers ausschließlich Messdifferenzen herangezogen werden konnten.

In der Studie von Gerlach et al. wurden zahnlose Unterkiefer an sechs Messpositionen in sechs Messstrecken acht Mal wiederholt vermessen, wobei zwischen den Messungen ein zeitlicher Versatz von sieben Tagen lag. Daraus können wie in der vorliegenden Arbeit Messdifferenzen zwischen den Messgängen ermittelt werden.

Aufgrund der Ähnlichkeit der Methodik wurden die Ergebnisse von Gerlach et al. in Tab. 39 den Messdifferenzen der vorliegenden Arbeit gegenübergestellt. Da keine Informationen über Ausrichtung der Unterkiefer und Schichtdicke angegeben sind und die Ausrichtung des DVT-Datensatzes durch die Positionierung des anatomischen Präparates festgelegt wird, können die Messwerte von Gerlach (Gerlach et al., 2013) nur mit dem in dieser Studie ermittelten Punktfehler verglichen werden.

Messstrecke	Standardabweichung der 8-fach wiederholten Messung	entsprechende Messstrecken dieser Arbeit	Mittlere Differenz des Punktfehlers
Absolute Unterkieferhöhe	0,13 mm	[AB]	0,19 mm
Absolute Unterkieferbreite	0,15 mm	[EF] [GH] [IJ]	0,25 mm 0,23 mm 0,20 mm
Dicke der kaudalen Kortikalis	0,17 mm	[BD]	0,22 mm

Tabelle 39: Vergleich der zufälligen Messfehler von Gerlach et al. mit den in dieser Arbeit ermittelten Messdifferenzen des Punktfehlers

Mit einer Kantenlänge des Voxels von maximal 250 µm ist die Auflösung der in dieser Arbeit verwendeten DVT-Aufnahmen wesentlich genauer als in der Studie von Gerlach und Kollegen mit 600 µm, daher können die Ergebnisse als vergleichbar angesehen werden (Gerlach et al., 2013). Die Ungenauigkeit von Messungen, bei denen ein Messpunkt am Mandibularkanal lag (Messstrecken [AC], [KL] und [MN]), waren teilweise doppelt so hoch als die anderer Messstrecken. Die durchschnittliche Abweichung linearer Messungen des Mandibularkanals im DVT wird mit 0,47 mm ± 0,29 mm im Vergleich zu histologischen Messungen quantifiziert und eine Tendenz zur Unterschätzung von dessen Ausmaßen beschrieben.

Gerlach et al. schlagen die Einberechnung einer Messabweichung von mindestens 0,76 mm zum Canalis mandibulae bei der Planung einer Implantation vor. Die hier verwendete Messmethode liegt mit einer mittleren Messdifferenz von $0,5 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$ für die Strecken [AC] / [BD], [KL] und [MN] im selben Bereich wie die von Gerlach et al. ermittelte Diskrepanz zwischen histologischen und volumetomographischen Messungen (Gerlach et al., 2014). Untersuchungen zur Sichtbarkeit bzw. Kortikalisierung des Mandibularkanals zeigen, dass dieser nur in der Hälfte bis zwei Drittel der Fälle eine knöcherne Ummantelung aufweist und in bis zu einem Viertel der Fälle gar nicht zu identifizieren ist (de Souza et al., 2016). Manchmal kann auch in dieser Arbeit die Lage des Canalis mandibulae schwierig bzw. nur durch dessen Verfolgung aus anderen Cross Sections gesichert werden (s. Abb. 36). Zur Steigerung der Messgenauigkeit können Cross Sections ausgeschlossen werden, auf denen der Mandibularkanal nicht eindeutig zu erkennen ist. So wurde es in der Studie der italienischen Kollegen gehandhabt (Bressan et al., 2017).

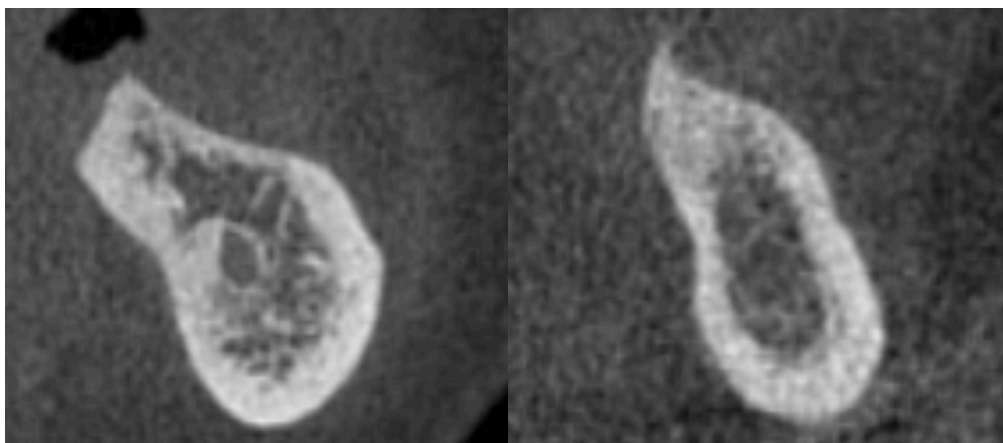


Abbildung 36: Bildschirmfotografie zweier Cross Sections im Seitenzahnbereich: links mit gut sichtbarem Canalis mandibulae; rechts wies dieser keine ummantelnde Kortikalis auf und war schwer erkennbar.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit legen erneut offen, dass bei der Planung einer Implantation im Seitenzahnbereich unter Verwendung dieses Ausrichtungs- und Vermessungsprotokolls eine Messtoleranz von ca. 0,8 mm einberechnet werden soll. Dieser Wert setzt sich aus systematischen und methodischen Messfehlern zusammen. Es empfiehlt sich, die Messtoleranz auf 1,0 mm aufzurunden und zudem mindestens einen Millimeter Sicherheitsabstand zum N. mandibularis einzuhalten.

6 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit stellt eine genaue Methode zur Vermessung des Unterkiefers anhand von digitalen Volumentomogrammen vor und beantwortet Fragen nach der Quantifizierung vertikaler und transversaler Dimensionen teilbezahnter bzw. zahnloser Unterkiefer. Es wird dargestellt, welches Knochenangebot atrophierte Unterkiefer aufweisen, um die Indikationsstellung für die funktionelle Rehabilitation durch dentale Implantate zu präzisieren.

Dafür wurden 68 Patienten aus 715 DVT-Datensätzen, die zwischen 2008 und 2014 in einer kieferchirurgischen Praxis in Zwickau/Sachsen angefertigt wurden, nach entsprechenden Kriterien ausgewählt. Es erfolgte eine Einteilung in zwei Untersuchungsgruppen, sodass einer Gruppe bestehend aus 43 im Unterkiefer zahnlosen Patienten (Alter ca. 69,8 Jahre) einer zweiten Gruppe von 25 Patienten (Alter ca. 62,8 Jahre) mit anteriorem Restgebiss gegenübergestellt werden konnte. Jedes DVT wurde durch eine standardisierte Methode zunächst dreidimensional ausgerichtet und dann an sechs Seitenzahn- sowie fünf Frontzahnpositionen in zwei vertikalen und drei bzw. fünf horizontalen Strecken vermessen. Zur Bestimmung des methodischen Messfehlers wurden fünf DVT-Datensätze dreifach vermessen und entstandene Messdifferenzen ausgewertet.

Ein nicht signifikanter durchschnittlicher Altersunterschied von ca. fünf Jahren trennt Gruppe 1 und Gruppe 2. Die Anzahl von Frauen überwiegt in beiden Gruppen. Die Knochenhöhe ist im seitlichen Frontzahnbereich zahnloser Patienten mit ca. 23 ± 1 mm am größten und die kaudale Kortikalis durchschnittlich 4,1 mm dick. In der Unterkiefermitte ist sie mit 6,2 mm 50% stärker. Nach distal fällt die Unterkieferhöhe kontinuierlich zur Position des ersten Molaren ab. Die Angulation der maximalen kranio-kaudalen Ausdehnung bewegt sich durchschnittlich zwischen 11° und 19° gegenüber der Axialachse und entspricht damit der von den Implantatherstellern vorgesehenen Standard-Sekundärteilen. Patienten mit anteriorem Restgebiss weisen in allen Messpositionen des Seitenzahnbereichs ca. 5,2 mm signifikant mehr Knochenhöhe auf als zahnlose Patienten. In allen Messungen beider Gruppen kann signifikant weniger Knochenhöhe bei Frauen als bei Männern festgestellt werden, dabei beträgt die Differenz durchschnittlich 2,2 mm. Es wird gezeigt, dass im Frontzahnbereich die Unterkieferbreite und im Seitenzahnbereich die Unterkieferhöhe reduziert ist.

Den Ergebnissen dieser Arbeit zufolge kann durch Ausnutzen von 75 % der kaudalen Kortikalis im Frontzahnbereich deutlich häufiger implantiert werden. Bezogen auf die einzelnen Messpositionen können 25 % mehr Miniimplantate (\varnothing 2,1 mm) und 21 % mehr Standardimplantate (\varnothing 4,1 mm) inseriert werden. Sieben von 43 Patienten, bei denen eine Versorgung mit zwei interforaminalen Implantaten angestrebt wird, profitieren von einer bikortikalen Verankerung, da ansonsten ihr Knochenangebot für eine monokortikale Implantation nicht ausreicht. Weiterhin kann durch die bikortikale Verankerung bei 20 statt nur sieben von 43 zahnlosen Patienten die prothetische Versorgung auf vier interforaminalen \varnothing 4,1 mm Standardimplantaten realisiert werden. Das entspricht in dieser Studie 30 % mehr Patienten, die mit Implantaten versorgt werden können.

Der therapeutische Nutzen der bikortikalen Verankerung ist zum einen die Möglichkeit der Verwendung längerer Implantate, zum anderen die Erweiterung der Indikation der Versorgung mit Implantaten bei reduziertem Knochenangebot. Bei der Analyse des Knochenangebotes im Seitenzahnbereich wird dargestellt, dass kurze Implantate mit einer Länge von unter 8 mm im Vergleich zu einer Länge von 10 mm zwei bis drei Mal bzw. bei ultrakurzen Implantaten (Länge 4 mm) sogar vier Mal so oft gesetzt werden können. Grundsätzlich gilt: Je kürzer das Implantat, umso häufiger kann es inseriert werden. Eine bikortikale Implantation im Seitenzahnbereich ist nur in Ausnahmefällen, d.h. bei ausreichendem Knochenangebot lateral des Canalis mandibulae, möglich. Auch hier wird mit der vorgelegten Arbeit gezeigt, dass dieser Platz vestibulär zu 7 % (zahnlose Unterkiefer) bzw. zu 18 % (Unterkiefer mit anteriorem Restgebiss) breiter als 6 mm ist.

In der vorliegenden Studie wird eine reproduzierbare Methode vorgestellt, deren Messfehler unter Einsatz von softwarebasierten Werkzeugen der Längen- und Winkelmessung mit den Werten vorheriger Studien zur Genauigkeit der DVT korreliert.

Angesichts der hohen Anzahl an zahnlosen Patienten, die nur durch die bikortikale Verankerung mit Implantaten versorgt werden können, sind weitere klinische Studien zum Langzeiterfolg erforderlich. Ferner sollten die genauen biomechanischen Auswirkungen der bikortikalen Verankerung verschiedener Implantatsysteme im Unterkiefer untersucht werden. Durch die wachsende klinische Bedeutung kurzer bzw. ultrakurzer Implantaten im atrophierten Unterkiefer-Seitenzahnbereich sind Langzeitstudien notwendig, um die Ergebnisse der bisherigen, maximal fünf Jahre umfassenden Beobachtungen erneut einschätzen, Komplikationen und Limitationen abwägen und verlässliche Aussagen zur Erfolgsrate treffen zu können.

7 Literaturverzeichnis

- 3M-ESPE (2011): MDI Leitfaden. [Online] 3M ESPE, ESPE Platz 82229 Seefeld, [aufgerufen am: 24.08.2017]. Verfügbar unter:
http://solutions.3mdeutschland.de/3MContentRetrievalAPI/BlobServlet?lmd=1367311852000&locale=de_DE&assetType=MMM_Image&assetId=1361595473989&blobAttribute=ImageFile
- Albrektsson, T., Zarb, G., Worthington, P., & Eriksson, A. R. (1986): The long-term efficacy of currently used dental implants: a review and proposed criteria of success. *Int J Oral Maxillofac Implants*, Vol. 1(1), S. 11-25.
- Almasri, M., & El-Hakim, M. (2012): Fracture of the anterior segment of the atrophic mandible related to dental implants. *Int J Oral Maxillofac Surg*, Vol. 41(5), S. 646-649.
- Anitua, E., Tapia, R., Luzuriaga, F., & Orive, G. (2010): Influence of implant length, diameter, and geometry on stress distribution: a finite element analysis. *Int J Periodontics Restorative Dent*, Vol. 30(1), S. 89-95.
- Anitua, E., Pinas, L., Begona, L., & Orive, G. (2014): Long-term retrospective evaluation of short implants in the posterior areas: clinical results after 10-12 years. *J Clin Periodontol*, Vol. 41(4), S. 404-411.
- Anitua, E., Pinas, L., & Orive, G. (2015): Retrospective study of short and extra-short implants placed in posterior regions: influence of crown-to-implant ratio on marginal bone loss. *Clin Implant Dent Relat Res*, Vol. 17(1), S. 102-110.
- Annibaldi, S., Cristalli, M. P., Dell'Aquila, D., Bignozzi, I., La Monaca, G., & Pilloni, A. (2012): Short dental implants: a systematic review. *J Dent Res*, Vol. 91(1), S. 25-32.
- Atkinson, P. J., & Woodhead, C. (1968): Changes in human mandibular structure with age. *Arch Oral Biol*, Vol. 13(12), S. 1453-1464.
- Awad, M. A., Lund, J. P., Dufresne, E., & Feine, J. S. (2003): Comparing the efficacy of mandibular implant-retained overdentures and conventional dentures among middle-aged edentulous patients: satisfaction and functional assessment. *Int J Prosthodont*, Vol. 16(2), S. 117-122.

- Baggi, L., Cappelloni, I., Di Girolamo, M., Maceri, F., & Vairo, G. (2008): The influence of implant diameter and length on stress distribution of osseointegrated implants related to crestal bone geometry: a three-dimensional finite element analysis. *J Prosthet Dent*, Vol. 100(6), S. 422-431.
- BDIZ-EDI (Bundesverband der implantologisch tätigen Zahnärzte in Europa), DGI (Deutsche Gesellschaft für Implantologie im Zahn-, Mund und Kieferbereich), DGZI (Deutsche Gesellschaft für zahnärztliche Implantologie), DGMKG (Deutsche Gesellschaft für Mund-, Kiefer und Gesichtschirurgie) & BDO (Berufsverband der Oralchirurgen); (2014): Konsensuskonferenz: Indikationsbeschreibung für die Regelfallversorgung in der Implantologie. [Online] Kassel, Deutschland: [aufgerufen am: 07.10.2014]. Verfügbar unter: http://www.konsensuskonferenz-implantologie.eu/wp-content/uploads/141125_Indikationsklassen.pdf
- Bertl, K., Subotic, M., Heimel, P., Schwarze, U. Y., Tangl, S., & Ulm, C. (2014): Morphometric characteristics of cortical and trabecular bone in atrophic edentulous mandibles. *Clin Oral Implants Res*, Vol., S. 1-8.
- Boffano, P., Rocchia, F., Zavatiero, E., Dediol, E., Uglesic, V., Kovacic, Z., et al. (2015): European Maxillofacial Trauma (EURMAT) project: A multicentre and prospective study. *J Craniomaxillofac Surg*, Vol. 43(1), S. 62-70.
- Bormann, K. H., Wild, S., Gellrich, N. C., Kokemuller, H., Stuhmer, C., Schmelzeisen, R., et al. (2009): Five-year retrospective study of mandibular fractures in Freiburg, Germany: incidence, etiology, treatment, and complications. *J Oral Maxillofac Surg*, Vol. 67(6), S. 1251-1255.
- Bressan, E., Ferrarese, N., Pramstraller, M., Lops, D., Farina, R., & Tomasi, C. (2017): Ridge Dimensions of the Edentulous Mandible in Posterior Sextants: An Observational Study on Cone Beam Computed Tomography Radiographs. *Implant Dent*, Vol. 26(1), S. 66-72.
- Bürklein, S., Späth, C., & Jöhren, P. (2009): Dreidimensionale Bildgebung in der Zahnheilkunde. *DENTAL_DIGITALNEWS*, Vol. 3(3/2009), S. 46-59.
- Canger, E. M., & Celenk, P. (2012): Radiographic evaluation of alveolar ridge heights of dentate and edentulous patients. *Gerodontology*, Vol. 29(1), S. 17-23.
- Champy, M., Lodde, J. P., Jaeger, J. H., Wilk, A., & Gerber, J. C. (1976): [Mandibular osteosynthesis according to the Michelet technic. Justification of new material. Results]. *Rev Stomatol Chir Maxillofac*, Vol. 77(1), S. 252-255.

- Chiapasco, M., Biglioli, F., Autelitano, L., Romeo, E., & Brusati, R. (2006): Clinical outcome of dental implants placed in fibula-free flaps used for the reconstruction of maxillo-mandibular defects following ablation for tumors or osteoradionecrosis. *Clin Oral Implants Res*, Vol. 17(2), S. 220-228.
- Dakhilalian, M., Rismanchian, M., Fazel, A., Basiri, K., Azadeh, H., Mahmoodi, M., et al. (2014): Conventional versus implant-retained overlay dentures: a pilot study of masseter and anterior temporalis electromyography. *J Oral Implantol*, Vol. 40(4), S. 418-424.
- de Jong, M. H., Wright, P. S., Meijer, H. J., & Tymstra, N. (2010): Posterior mandibular residual ridge resorption in patients with overdentures supported by two or four endosseous implants in a 10-year prospective comparative study. *Int J Oral Maxillofac Implants*, Vol. 25(6), S. 1168-1174.
- de Souza, L. A., Souza Picorelli Assis, N. M., Ribeiro, R. A., Pires Carvalho, A. C., & Devito, K. L. (2016): Assessment of mandibular posterior regional landmarks using cone-beam computed tomography in dental implant surgery. *Ann Anat*, Vol. 205, S. 53-59.
- Ella, B., Laurentjoye, M., Sedarat, C., Coutant, J. C., Masson, E., & Rouas, A. (2014): Mandibular ridge expansion using a horizontal bone-splitting technique and synthetic bone substitute: an alternative to bone block grafting? *Int J Oral Maxillofac Implants*, Vol. 29(1), S. 135-140.
- Elsyad, M. A., Hegazy, S. A., Hammouda, N. I., Al-Tonbary, G. Y., & Habib, A. A. (2014): Chewing efficiency and electromyographic activity of masseter muscle with three designs of implant-supported mandibular overdentures. A cross-over study. *Clin Oral Implants Res*, Vol. 25(6), S. 742-748.
- Emami, E., Heydecke, G., Rompre, P. H., de Grandmont, P., & Feine, J. S. (2009): Impact of implant support for mandibular dentures on satisfaction, oral and general health-related quality of life: a meta-analysis of randomized-controlled trials. *Clin Oral Implants Res*, Vol. 20(6), S. 533-544.
- Enislidis, G., Wittwer, G., & Ewers, R. (2006): Preliminary report on a staged ridge splitting technique for implant placement in the mandible: a technical note. *Int J Oral Maxillofac Implants*, Vol. 21(3), S. 445-449.

- Felice, P., Cannizzaro, G., Barausse, C., Pistilli, R., & Esposito, M. (2014): Short implants versus longer implants in vertically augmented posterior mandibles: a randomised controlled trial with 5-year after loading follow-up. *Eur J Oral Implantol*, Vol. 7(4), S. 359-369.
- Gerlach, N. L., Meijer, G. J., Borstlap, W. A., Bronkhorst, E. M., Berge, S. J., & Maal, T. J. (2013): Accuracy of bone surface size and cortical layer thickness measurements using cone beam computerized tomography. *Clin Oral Implants Res*, Vol. 24(7), S. 793-797.
- Gerlach, N. L., Ghaemina, H., Bronkhorst, E. M., Berge, S. J., Meijer, G. J., & Maal, T. J. (2014): Accuracy of assessing the mandibular canal on cone-beam computed tomography: a validation study. *J Oral Maxillofac Surg*, Vol. 72(4), S. 666-671.
- Guler, A. U., Sumer, M., Sumer, P., & Bicer, I. (2005): The evaluation of vertical heights of maxillary and mandibular bones and the location of anatomic landmarks in panoramic radiographs of edentulous patients for implant dentistry. *J Oral Rehabil*, Vol. 32(10), S. 741-746.
- Gulje, F., Abrahamsson, I., Chen, S., Stanford, C., Zadeh, H., & Palmer, R. (2013): Implants of 6 mm vs. 11 mm lengths in the posterior maxilla and mandible: a 1-year multicenter randomized controlled trial. *Clin Oral Implants Res*, Vol. 24(12), S. 1325-1331.
- Hakim, S. G., Jeske, G., Jacobsen, H. C., & Sieg, P. (2012): The eligibility of the free fibula graft for masticatory rehabilitation using monocortical implants insertion--a morphologic and biomechanical study. *Clin Oral Investig*, Vol. 16(2), S. 673-678.
- Halperin-Sternfeld, M., Machtei, E. E., & Horwitz, J. (2014): Diagnostic accuracy of cone beam computed tomography for dimensional linear measurements in the mandible. *Int J Oral Maxillofac Implants*, Vol. 29(3), S. 593-599.
- Holberg, C., Winterhalder, P., Rudzki-Janson, I., & Wichelhaus, A. (2014): Finite element analysis of mono- and bicortical mini-implant stability. *Eur J Orthod*, Vol. 36(5), S. 550-556.
- Huumonen, S., Haikola, B., Oikarinen, K., Soderholm, A. L., Remes-Lyly, T., & Sipila, K. (2012): Residual ridge resorption, lower denture stability and subjective complaints among edentulous individuals. *J Oral Rehabil*, Vol. 39(5), S. 384-390.

- Ivanoff, C. J., Sennerby, L., & Lekholm, U. (1996): Influence of mono- and bicortical anchorage on the integration of titanium implants. A study in the rabbit tibia. *Int J Oral Maxillofac Surg*, Vol. 25(3), S. 229-235.
- Ivanoff, C. J., Grondahl, K., Bergstrom, C., Lekholm, U., & Branemark, P. I. (2000): Influence of bicortical or monocortical anchorage on maxillary implant stability: a 15-year retrospective study of Branemark System implants. *Int J Oral Maxillofac Implants*, Vol. 15(1), S. 103-110.
- KaVo (2011): Produktinformationen, aus: "KaVo 3D Exam Benutzerhandbuch" (Kaltenbach & Voigt GmbH, Bismarckring 39, 88400 Biberach a. d. Riss) Kap. 14, S. 205-208
- Kingsmill, V. J. (1999): Post-extraction remodeling of the adult mandible. *Crit Rev Oral Biol Med*, Vol. 10(3), S. 384-404.
- Kobayashi, K., Shimoda, S., Nakagawa, Y., & Yamamoto, A. (2004): Accuracy in measurement of distance using limited cone-beam computerized tomography. *Int J Oral Maxillofac Implants*, Vol. 19(2), S. 228-231.
- Kordatzis, K., Wright, P. S., & Meijer, H. J. (2003): Posterior mandibular residual ridge resorption in patients with conventional dentures and implant overdentures. *Int J Oral Maxillofac Implants*, Vol. 18(3), S. 447-452.
- Kosalagood, P., Silkosessak, O. C., Pittayapat, P., Pisarnturakit, P., Pauwels, R., & Jacobs, R. (2015): Linear Measurement Accuracy of Eight Cone Beam Computed Tomography Scanners. *Clin Implant Dent Relat Res*, Vol. 17(6), S. 1217-1227.
- Kovacic, I., Celebic, A., Zlatic, D. K., Petricevic, N., Bukovic, D., Bitanga, P., et al. (2010): Decreasing of residual alveolar ridge height in complete denture wearers. A five year follow up study. *Coll Antropol*, Vol. 34(3), S. 1051-1056.
- Kovacic, I., Knezovic Zlatic, D., & Celebic, A. (2012): Residual ridge atrophy in complete denture wearers and relationship with densitometric values of a cervical spine: a hierarchical regression analysis. *Gerodontology*, Vol. 29(2), S. 935-947.
- Kramer, F. J., Dempf, R., & Bremer, B. (2005): Efficacy of dental implants placed into fibula-free flaps for orofacial reconstruction. *Clin Oral Implants Res*, Vol. 16(1), S. 80-88.

- Kraus, B. S., Jordan, R. E., & Abrams, L. (1969): Dental Anatomy and Occlusion - A study of the masticatory system (Vol. 1). Baltimore: Williams & Wilkins Company.
- Krebs, M., Schmenger, K., Neumann, K., Weigl, P., Moser, W., & Nentwig, G. H. (2013): Long-Term Evaluation of ANKYLOS(R) Dental Implants, Part I: 20-Year Life Table Analysis of a Longitudinal Study of More Than 12,500 Implants. Clin Implant Dent Relat Res, Vol., S. 275-287.
- Kribbs, P. J., Chesnut, C. H., 3rd, Ott, S. M., & Kilcoyne, R. F. (1989): Relationships between mandibular and skeletal bone in an osteoporotic population. J Prosthet Dent, Vol. 62(6), S. 703-707.
- Kribbs, P. J. (1990): Comparison of mandibular bone in normal and osteoporotic women. J Prosthet Dent, Vol. 63(2), S. 218-222.
- Krüger, E. (1988): Lehrbuch der chirurgischen Mund- und Kieferheilkunde (Vol. 2). Berlin: Quintessenz Verlag S. 134 - 146
- Läkamp, J., Läkamp, M., & Meyer, U. (2016): Planungsstrategien, aus: "Funktionelle Implantologie: Chirurgische und prothetische Versorgung zahnloser Patienten" (Vol. 1). Stuttgart, Quintessenz Verlags-GmbH, Kap. 2, S. 27-37
- Lemkamp, M., Filippi, A., Berndt, D., & Lambrecht, J. T. (2006): [Diagnostic possibilities of digital volume tomography]. Schweiz Monatsschr Zahnmed, Vol. 116(6), S. 645-653.
- Lofaj, F., Kucera, J., Nemeth, D., & Kvetkova, L. (2015): Finite element analysis of stress distributions in mono- and bi-cortical dental implants. Mater Sci Eng C Mater Biol Appl, Vol. 50, S. 85-96.
- Ludlow, J. B., Gubler, M., Cevidanes, L., & Mol, A. (2009): Precision of cephalometric landmark identification: cone-beam computed tomography vs conventional cephalometric views. Am J Orthod Dentofacial Orthop, Vol. 136(3), S. 312.
- Luhr, H. G. (1968): Zur stabilen Osteosynthese bei Unterkieferfrakturen. Deutsche Zahnärztliche Zeitung, Vol. 23, S. 745.
- Mack, F., Mundt, T., Budtz-Jorgensen, E., Mojon, P., Schwahn, C., Bernhardt, O., et al. (2003): Prosthodontic status among old adults in Pomerania, related to income, education level, and general health (results of the Study of Health in Pomerania, SHIP). Int J Prosthodont, Vol. 16(3), S. 313-318.

- Mack, F., Mundt, T., Mojon, P., Budtz-Jorgensen, E., Schwahn, C., Bernhardt, O., et al. (2003): Study of Health in Pomerania (SHIP): Relationship among socioeconomic and general health factors and dental status among elderly adults in Pomerania. *Quintessence Int*, Vol. 34(10), S. 772-778.
- Malo, P., de Araujo Nobre, M., Lopes, A., & Moss, S. (2014): Posterior maxillary implants inserted with bicortical anchorage and placed in immediate function for partial or complete edentulous rehabilitations. A retrospective clinical study with a median follow-up of 7 years. *Oral Maxillofac Surg*, Vol. 19(1), S. 19-27.
- Misch, C. E. (2015): The Edentulous Mandible: Treatment Plans for Implant Overdentures. *Dental Implant Prosthetics*, Vol. 2, S. 573-599.
- Niederdelmann, H., & Schilli, W. (1972): Zur Plattenosteosynthese bei Unterkieferfrakturen. *Deutsche Zahnärztliche Zeitung*, Vol. 27, S. 138.
- Nitschke, I., & Stark, H. (2016): Fünfte Deutsche Mundgesundheitsstudie (Vol. 35). Köln: Institut der Deutschen Zahnärzte. S. 417 - 451, 517 - 555
- Oettle, A. C., Fourie, J., Human-Baron, R., & van Zyl, A. W. (2015): The midline mandibular lingual canal: importance in implant surgery. *Clin Implant Dent Relat Res*, Vol. 17(1), S. 93-101.
- Oh, W. S., Roumanas, E. D., & Beumer, J., 3rd. (2010): Mandibular fracture in conjunction with bicortical penetration, using wide-diameter endosseous dental implants. *J Prosthodont*, Vol. 19(8), S. 625-629.
- Ortman, L. F., Hausmann, E., & Dunford, R. G. (1989): Skeletal osteopenia and residual ridge resorption. *J Prosthet Dent*, Vol. 61(3), S. 321-325.
- Panchbhai, A. S. (2013): Quantitative estimation of vertical heights of maxillary and mandibular jawbones in elderly dentate and edentulous subjects. *Spec Care Dentist*, Vol. 33(2), S. 62-69.
- Passia, N., & Kern, M. (2014): The single midline implant in the edentulous mandible: a systematic review. *Clin Oral Investig*, Vol. 18(7), S. 1719-1724.
- Payne, A. G., Tawse-Smith, A., Kumara, R., & Thomson, W. M. (2001): One-year prospective evaluation of the early loading of unsplinted conical Branemark fixtures with mandibular overdentures immediately following surgery. *Clin Implant Dent Relat Res*, Vol. 3(1), S. 9-19.

- Pierrisnard, L., Renouard, F., Renault, P., & Barquins, M. (2003): Influence of implant length and bicortical anchorage on implant stress distribution. *Clin Implant Dent Relat Res*, Vol. 5(4), S. 254-262.
- Pinsky, H. M., Dyda, S., Pinsky, R. W., Misch, K. A., & Sarment, D. P. (2006): Accuracy of three-dimensional measurements using cone-beam CT. *Dentomaxillofac Radiol*, Vol. 35(6), S. 410-416.
- Pommer, B., Frantal, S., Willer, J., Posch, M., Watzek, G., & Tepper, G. (2011): Impact of dental implant length on early failure rates: a meta-analysis of observational studies. *J Clin Periodontol*, Vol. 38(9), S. 856-863.
- Raghoobar, G. M., Meijer, H. J., Stegenga, B., van't Hof, M. A., van Oort, R. P., & Vissink, A. (2000): Effectiveness of three treatment modalities for the edentulous mandible. A five-year randomized clinical trial. *Clin Oral Implants Res*, Vol. 11(3), S. 195-201.
- Raghoobar, G. M., Stellingsma, K., Batenburg, R. H., & Vissink, A. (2000): Etiology and management of mandibular fractures associated with endosteal implants in the atrophic mandible. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, Vol. 89(5), S. 553-559.
- Rasse, M. (2011): Frakturen des Gesichtsschädels. N. Schwenzer & M. Ehrenfeld (Eds.), aus: "Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie" (Vol. 4). Stuttgart, Georg Thieme Verlag, Kap. 10, S. 304-311, 344 - 354
- Razavi, T., Palmer, R. M., Davies, J., Wilson, R., & Palmer, P. J. (2010): Accuracy of measuring the cortical bone thickness adjacent to dental implants using cone beam computed tomography. *Clin Oral Implants Res*, Vol. 21(7), S. 718-725.
- Reuther, J. F., & Kübler, N. R. (1999): Die Wiederherstellung des Unterkiefers. *Deutsches Ärzteblatt*, Vol. 96(16), S. 1056 - 1061.
- Riediger, D. (2009): Präprothetische Chirurgie, aus: "Zahnärztliche Chirurgie" (Vol. 4). Stuttgart, Georg Thieme Verlag, Kap. 8, S. 198 - 225
- Schimmel, M., Srinivasan, M., Herrmann, F. R., & Muller, F. (2014): Loading protocols for implant-supported overdentures in the edentulous jaw: a systematic review and meta-analysis. *Int J Oral Maxillofac Implants*, Vol. 29 Suppl, S. 271-286.

- Schulze R., H. S., Schulze D. (2013): s2K Leitlinie "Dentale digitale Volumentomografie".
 [Online] Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen
 Fachgesellschaften. [aufgerufen am: 09.05.2016]. Verfügbar unter:
http://www.awmf.org/uploads/tx_szleitlinien/083-005l_S2k_Dentale_Volumentomographie_2013-10.pdf
- Schulze, R. (2014): DVT in der allgemeinärztlichen Praxis. [Online] Zahnärztliche
 Mitteilungen. [aufgerufen am: 09.05.2016]. Verfügbar unter: http://www.zm-online.de/hefte/DVT-in-der-allgemeinzaerztlichen-Praxis_198974.html - 1
- Schumacher, G. H. (1997): Anatomie für Zahnmediziner (Vol. 3). Heidelberg:
 Hüthig Verlag. S. 240-241
- Simion, M., Baldoni, M., & Zaffe, D. (1992): Jawbone enlargement using immediate
 implant placement associated with a split-crest technique and guided tissue
 regeneration. *Int J Periodontics Restorative Dent*, Vol. 12(6), S. 462-473.
- Slotte, C., Gronningsaeter, A., Halmoy, A. M., Ohrnell, L. O., Mordenfeld, A., Isaksson,
 S., et al. (2015): Four-Millimeter-Long Posterior-Mandible Implants: 5-Year
 Outcomes of a Prospective Multicenter Study. *Clin Implant Dent Relat Res*,
 Vol. 17 Suppl 2, S. e385-395.
- Soikkonen, K., Ainamo, A., & Xie, Q. (1996): Height of the residual ridge and
 radiographic appearance of bony structure in the jaws of clinically edentulous
 elderly people. *J Oral Rehabil*, Vol. 23(7), S. 470-475.
- Sonick, M., Abrahams, J., & Faiella, R. A. (1994): A Comparison of the Accuracy of
 Periapical, Panoramic, and Computerized Tomographic Radiographs in Locating
 the Mandibular Canal. *Int J Oral Maxillofac Implants*, Vol. 9(4), S. 455-460.
- Sotto-Maior, B. S., Lima Cde, A., Senna, P. M., Camargos Gde, V., & Del Bel Cury, A.
 A. (2014): Biomechanical evaluation of subcrestal dental implants with different
 bone anchorages. *Braz Oral Res*, Vol. 28(1), S. 1-7.
- Stratemann, S. A., Huang, J. C., Maki, K., Miller, A. J., & Hatcher, D. C. (2008):
 Comparison of cone beam computed tomography imaging with physical
 measures. *Dentomaxillofac Radiol*, Vol. 37(2), S. 80-93.

- Straumann-AG (2012): Verankerungssysteme für Implantatfixierte Hybridprothesen. [Online] Peter Merian-Weg 12 CH-4002 Basel, Switzerland: Institut Straumann AG. [aufgerufen am: 27.08.2017]. Verfügbar unter: http://www.straumann.ch/content/dam/internet/xy/resources/brochurecatalogue/brochures/de/straumann--soft-tissue-level-implantatlinie--verankerungssysteme/151.252_low.pdf
- Straumann-AG (2017): Produktkatalog 2017. [Online] Peter Merian-Weg 12 CH-4002 Basel, Switzerland: Straumann AG. [aufgerufen am: 24.08.2017]. Verfügbar unter:http://www.straumann.de/content/dam/internet/straumann_de/resources/brochurecatalogue/product-catalogs/de/Straumann_451.200.pdf
- Strecha, J., Jurkovic, R., Siebert, T., Prachar, P., & Bartakova, S. (2010): Fixed bicortical screw and blade implants as a non-standard solution to an edentulous (toothless) mandible. *Int J Oral Sci*, Vol. 2(2), S. 105-110.
- Tallgren, A. (1972): The continuing reduction of the residual alveolar ridges in complete denture wearers: A mixed-longitudinal study covering 25 years. *J Prosthet Dent*, Vol. 27(2), S. 120-132.
- Tawse-Smith, A., Perio, C., Payne, A. G., Kumara, R., & Thomson, W. M. (2001): One-stage operative procedure using two different implant systems: a prospective study on implant overdentures in the edentulous mandible. *Clin Implant Dent Relat Res*, Vol. 3(4), S. 185-193.
- Tymstra, N., Raghoobar, G. M., Vissink, A., & Meijer, H. J. (2011): Maxillary anterior and mandibular posterior residual ridge resorption in patients wearing a mandibular implant-retained overdenture. *J Oral Rehabil*, Vol. 38(7), S. 509-516.
- von Wowern, N., & Gottfredsen, K. (2001): Implant-supported overdentures, a prevention of bone loss in edentulous mandibles? A 5-year follow-up study. *Clin Oral Implants Res*, Vol. 12(1), S. 19-25.
- Waltrick, K. B., Nunes de Abreu Junior, M. J., Correa, M., Zastrow, M. D., & Dutra, V. D. (2013): Accuracy of linear measurements and visibility of the mandibular canal of cone-beam computed tomography images with different voxel sizes: an in vitro study. *J Periodontol*, Vol. 84(1), S. 68-77.
- Watzek, G., Fürhauser, R., & Mailath-Pokorny, G. (2009): Zahnärztliche Implantate, aus: "Zahnärztliche Chirurgie" (Vol. 4). Stuttgart, Georg Thieme Verlag, Kap. 9, S. 226 - 273

- Weinstein, R., Agliardi, E., Fabbro, M. D., Romeo, D., & Francetti, L. (2012): Immediate rehabilitation of the extremely atrophic mandible with fixed full-prosthesis supported by four implants. *Clin Implant Dent Relat Res*, Vol. 14(3), S. 434-441.
- Wu, J. C., Chen, C. S., Yip, S. W., & Hsu, M. L. (2012): Stress distribution and micromotion analyses of immediately loaded implants of varying lengths in the mandible and fibular bone grafts: a three-dimensional finite element analysis. *Int J Oral Maxillofac Implants*, Vol. 27(5), S. 77-84.
- Xie, Q., Wolf, J., & Ainamo, A. (1997): Quantitative assessment of vertical heights of maxillary and mandibular bones in panoramic radiographs of elderly dentate and edentulous subjects. *Acta Odontol Scand*, Vol. 55(3), S. 155-161.
- Xie, Q., Wolf, J., Soikkonen, K., & Ainamo, A. (1996): Height of mandibular basal bone in dentate and edentulous subjects. *Acta Odontol Scand*, Vol. 54(6), S. 379-383.
- Young, S. L., & Pavalko, F. (2011): Cellular Mechanisms of Mechanotransduction in Bone. A. Kamkin & I. Kiseleva (Eds.), aus: "Mechanosensitivity and Mechanotransduction" (Vol. 4), Springer Netherlands, Kap. 12, S. 277-296

8 Thesen

1. Bisher wurde selten die dreidimensionale Bildgebung zur Vermessung zahnloser Unterkiefer oder Unterkieferabschnitte genutzt.
2. Die angewandten Methoden zur volumetomographischen Vermessung der Unterkiefer erfolgten dabei teilweise nicht reproduzierbar.
3. Für Patienten mit anteriorem Restgebiss finden sich in der Literatur bisher keine Angaben zum vorhandenen Knochenangebot im Bereich der posterioren Mandibula.
4. Bis heute ist die Genauigkeit der softwarebasierten Werkzeuge zur metrischen Längenmessung nicht eindeutig geklärt.
5. Die vorliegende Arbeit stellt eine genaue und reproduzierbare Methode zur Vermessung des Unterkiefers anhand der digitalen Volumetomographie (DVT) vor.
6. Zahnlose Patienten sind älter als Patienten mit anteriorem Restgebiss.
7. Frauen sind im Unterkiefer bzw. Unterkieferseitenzahnbereich häufiger zahnlos bzw. verlieren im Laufe des Lebens mehr Zähne als Männer.
8. Männer haben durchschnittlich mehr Knochenhöhe im Unterkiefer als Frauen, sowohl bei vollständiger Zahnlosigkeit als auch bei anteriorem Restgebiss.
9. Zahnlose Patienten haben im Frontzahnbereich durchschnittlich die größte verbliebene Restknochenhöhe, im Seitenzahnbereich ist diese stets geringer
10. Es existiert kein statistisch nachweisbarer Zusammenhang zwischen Alter und Knochenhöhe.
11. Patienten mit anteriorem Restgebiss haben im Seitenzahnbereich durchschnittlich mehr Knochenhöhe als vollständig zahnlose Patienten.
12. Unabhängig vom Vorhandensein eines anterioren Restgebisses fällt die Knochenhöhe nach distal ab.
13. Der Erhalt natürlicher Frontzähne und deren Belastung ist als Prävention zur Vermeidung einer weiteren Atrophie des Unterkiefer-Seitenzahnbereichs anzusehen.
14. Die Angulation der maximalen kraniokaudalen Ausdehnung überschreitet bewegt sich durchschnittlich im Bereich von 0° bis 19° gegenüber der Axialachse.
15. Die kaudale Kortikalis ist in der Unterkiefermitte im Vergleich zu den seitlichen Unterkiefer-Frontzahnpositionen am dicksten.
16. Aus der Sicht des Autors gibt es keine scharfe kraniale Begrenzung der kaudalen Kortikalis, da sich die Spongiosa nach kaudal hin zur Kortikalis verdichtet.

17. Eine unabsichtliche bikortikale Verankerung interforaminaler Implantate ist bei Patienten, die bereits mit Implantaten versorgt worden sind, denkbar.
18. Durch Nutzung der bikortikalen Implantatverankerung können durchschnittlich 25 % mehr Implantate (\varnothing 2,1 mm) und 21 % mehr Standardimplantate (\varnothing 4,1 mm) eingebracht werden, ohne dass spezielle chirurgische Maßnahmen durchgeführt werden müssen.
19. Die prothetische Versorgung auf zwei monokortikalen interforaminalen Implantaten ist bei 81 % der zahnlosen Patienten möglich. Werden die Implantate bikortikal verankert, sind es 97 %.
20. Bei 30 % der zahnlosen Patienten ist die prothetische Versorgung auf vier interforaminalen Standardimplantaten (\varnothing 4,1 mm) nur durch bikortikale Verankerung der Implantate realisierbar.
21. Die bikortikale Verankerung zahnärztlicher Implantate stellt eine Indikationserweiterung bei der Versorgung zahnloser Patienten dar und sollte stets in Betracht gezogen werden.
22. Durch die bikortikale Verankerung wird die Implantation oft erst möglich oder gestattet die Insertion eines längeren Implantates mit allen biomechanischen Vorteilen.
23. Die Komplikation einer Implantat-assoziierten Unterkieferfraktur infolge zu geringer Restknochenhöhe muss bei der Indikationsstellung berücksichtigt werden.
24. Das Knochenangebot des Unterkieferseitenzahnbereichs ist prädestiniert für die Versorgung mit kurzen Implantaten.
25. Im Seitenzahnbereich können auf Grund der verbliebenen Knochenhöhe kurze Implantate (Länge < 8 mm) im Vergleich zu Standard-implantaten (Länge = 10 mm) zwei bis drei Mal so oft bzw. ultrakurze Implantate (Länge = 4 mm) sogar vier Mal häufiger gesetzt werden.
26. Die hier präsentierte Methode der morphometrischen Vermessung des Unterkiefers mittels digitaler Volumentomographie weist einen geringen Messfehler auf und korrespondiert diesbezüglich mit vergleichbaren Publikationen.

9 Anhang

Gemeinschaftspraxis
Dr. med. Hentschel & Herrmann
Lothar-Streit-Straße 10b
08056 Zwickau
Tel. 0375/3035090
Fax. 0375/30350919

Tobias Enders
Max-Höra Str. 22
08645 Bad Elster

Einverständniserklärung

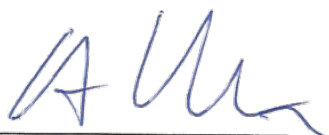
Hiermit erklären wir, Dr. med. Andreas Hentschel und Jan Herrmann uns einverstanden, dass Herr Tobias Enders, wohnhaft in Max-Höra Str. 22, 08645 Bad Elster, Zugriff auf die Patientenakte der Gemeinschaftspraxis hat und alle sich auf dem Server befindlichen DVT Datensätze, welche in unserer Praxis angefertigt wurden, für die wissenschaftliche Nutzung bei seiner Dissertation kopieren und nutzen darf.

Die Nutzungsbedingungen hierbei lauten wie folgt:


1. Jeder Datensatz, der für wissenschaftliche Zwecke verwendet wird und teilweise oder vollständig veröffentlicht wird, muss so anonymisiert werden, dass keine Rückschlüsse auf den Patienten gezogen werden können.
2. Die Daten unterliegen der zahnärztlichen Schweigepflicht.
3. Die Daten dürfen nicht vervielfältigt oder an Dritte weitergegeben werden.
4. Die nicht verwendeten Datensätze müssen nach Abschluss der Promotion so vernichtet werden, dass sie nicht wiederherstellbar sind.

Zwickau, den 10.08.16

Ort, Datum



Dr. med. Andreas Hentschel
Praxisinhaber



Jan Herrmann
Praxisinhaber

Tabelle 40: Darstellung der Messwerte im Frontzahnbereich aus Gruppe 1

Messposition	Mitte								seitlicher Schneidezahn								Eckzahn							
Messung	AB	BD	AD	A'D	EF	GH	IJ	β	AB	BD	AD	A'D	EF	GH	IJ	β	AB	BD	AD	A'D	EF	GH	IJ	β
Männer																								
N	14	14	14	14	14	14	14	14	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28
Mittelwert (mm)	23,29	5,62	17,67	15,95	3,83	5,75	7,85	20,51	23,33	4,64	18,69	17,62	4,86	6,24	7,34	19,49	22,57	4,34	18,22	17,22	5,01	7,25	8,15	14,73
Median (mm)	22,16	5,00	15,38	15,28	3,74	5,77	7,68	18,10	23,24	4,53	19,24	16,64	5,02	6,04	6,96	18,00	23,68	4,25	19,70	17,96	4,26	6,88	7,88	14,15
Standardabweichung (mm)	5,06	3,09	6,38	6,29	1,49	1,40	2,60	9,19	5,46	1,21	5,72	5,54	2,16	2,24	2,37	8,97	6,23	1,07	6,03	5,74	2,71	3,16	3,01	5,28
Minimum (mm)	16,62	1,96	9,01	7,01	0,83	2,80	3,91	6,80	12,94	2,89	9,68	7,76	0,94	2,63	3,63	3,80	11,29	2,26	7,36	7,36	1,60	2,53	3,80	4,60
Maximum (mm)	36,00	14,42	32,99	28,99	6,52	8,07	13,22	43,20	36,76	8,19	32,58	30,58	10,01	11,36	12,77	49,80	36,00	6,64	30,62	29,36	12,77	14,85	14,94	28,50
Frauen																								
N	29	29	29	29	29	29	29	29	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
Mittelwert (mm)	20,86	6,48	14,38	12,38	4,13	6,51	8,24	14,83	20,35	3,81	16,54	15,20	4,65	6,69	7,76	15,01	19,84	3,97	15,87	14,69	4,31	6,93	8,13	11,75
Median (mm)	20,78	6,11	13,34	11,23	3,54	5,26	8,78	15,50	20,90	3,73	17,25	15,46	4,01	6,72	7,76	15,55	20,48	3,89	15,99	14,19	4,03	6,53	7,91	11,40
Standardabweichung (mm)	5,10	2,37	6,46	5,21	2,49	3,49	3,66	7,68	4,89	0,81	5,05	4,70	2,28	2,41	2,26	8,23	4,95	1,07	5,19	4,83	2,01	2,31	2,08	6,16
Minimum (mm)	10,88	1,64	0,00	0,00	0,63	2,12	3,06	1,50	11,20	1,41	7,04	5,59	1,14	1,81	2,27	0,50	9,47	1,66	5,60	5,60	1,21	3,07	3,79	0,10
Maximum (mm)	30,20	10,88	27,69	21,92	9,40	14,84	15,00	35,30	30,81	5,55	29,40	27,40	10,91	13,81	12,30	39,10	28,78	7,91	27,11	25,11	10,25	12,39	11,99	23,90
Gesamt																								
N	43	43	43	43	43	43	43	43	86	86	86	86	86	86	86	86	86	86	86	86	86	86	86	86
Mittelwert (mm)	21,65	6,20	15,45	13,54	4,04	6,26	8,11	16,68	21,32	4,08	17,24	15,98	4,71	6,54	7,63	16,47	20,73	4,09	16,63	15,52	4,54	7,04	8,14	12,72
Median (mm)	21,57	5,94	14,46	12,06	3,54	5,77	8,28	16,30	21,10	4,03	17,75	16,29	4,45	6,51	7,44	16,60	21,48	4,02	17,56	15,09	4,10	6,69	7,91	12,95
Standardabweichung (mm)	5,21	2,65	6,61	5,83	2,22	3,00	3,36	8,62	5,27	1,04	5,37	5,11	2,25	2,36	2,31	8,74	5,55	1,08	5,58	5,28	2,28	2,62	2,42	6,05
Minimum (mm)	10,88	1,64	0,00	0,00	0,63	2,12	3,06	1,50	11,20	1,41	7,04	5,59	0,94	1,81	2,27	0,50	9,47	1,66	5,60	5,60	1,21	2,53	3,79	0,10
Maximum (mm)	36,00	14,42	32,99	28,99	9,40	14,84	15,00	43,20	36,76	8,19	32,58	30,58	10,91	13,81	12,77	49,80	36,00	7,91	30,62	29,36	12,77	14,85	14,94	28,50

Tabelle 41: Darstellung der Messwerte im Seitenzahnbereich aus Gruppe 1

Messposition	erster Prämolare									zweiter Prämolare									erster Molare								
Messung	AB	AC	A`C	EF	GH	IJ	KL	MN	β	AB	AC	A`C	EF	GH	IJ	KL	MN	β	AB	AC	A`C	EF	GH	IJ	KL	MN	β
Männer N = 28																											
Mittelwert (mm)	21,51	9,39	7,94	4,36	6,52	7,39	2,20	3,24	12,33	19,47	9,10	8,10	4,58	7,25	8,04	3,62	2,21	13,81	17,75	8,30	7,94	5,83	7,83	8,80	4,46	1,59	15,51
Median (mm)	23,09	10,23	7,84	4,09	6,08	7,32	1,85	3,45	11,40	19,65	7,74	6,36	4,41	7,84	8,17	3,45	2,20	13,40	16,97	7,09	6,78	6,04	7,40	8,24	4,43	1,37	15,80
Standardabweichung (mm)	6,25	5,52	5,43	2,10	2,57	2,51	1,58	1,91	5,92	5,86	4,98	4,89	1,87	2,29	2,16	1,20	1,25	5,55	5,05	4,43	4,53	2,17	2,01	1,70	1,05	1,01	7,74
Minimum (mm)	11,92	0,61	0,00	0,95	2,32	3,69	0,00	0,00	1,30	10,43	1,00	1,00	1,65	2,99	4,31	1,56	0,00	4,50	8,89	2,48	1,72	2,60	4,78	6,32	2,53	0,00	0,40
Maximum (mm)	35,36	22,95	19,99	8,88	11,01	13,91	6,87	7,86	26,40	34,38	21,14	20,32	8,47	11,33	11,56	6,63	5,70	29,90	29,57	20,40	20,40	10,42	11,58	11,58	7,82	4,97	30,20
Frauen N = 58																											
N	58	57	58	58	58	58	57	57	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
Mittelwert (mm)	18,14	6,42	5,22	4,52	6,81	7,93	1,97	3,27	11,39	16,04	6,76	5,76	4,70	7,51	8,45	3,29	2,56	14,64	14,88	6,40	5,72	5,08	7,91	9,12	4,62	2,20	18,22
Median (mm)	18,47	5,64	5,16	4,00	6,52	7,64	1,93	3,50	12,45	15,84	6,39	5,54	4,45	7,32	8,54	3,19	2,54	14,40	14,43	5,84	4,75	4,86	7,69	9,10	4,54	2,01	19,35
Standardabweichung (mm)	5,22	4,58	4,17	2,11	2,49	2,19	1,34	1,61	5,75	5,09	4,29	3,57	2,10	2,46	2,05	1,15	1,06	6,86	4,25	3,43	3,42	2,05	2,13	2,16	1,16	1,32	8,69
Minimum (mm)	7,81	0,00	0,00	1,57	2,79	3,64	0,00	0,00	0,10	7,08	0,40	0,40	0,93	2,18	3,15	0,78	0,00	0,30	6,87	0,71	0,00	1,55	4,01	3,67	1,75	0,00	3,90
Maximum (mm)	27,41	15,21	13,21	9,69	11,93	12,45	5,53	7,11	22,40	26,28	17,24	13,63	9,50	12,36	12,63	5,84	6,00	28,90	22,87	13,37	13,37	11,30	12,55	14,75	7,52	7,02	33,00
Gesamt N = 86																											
Mittelwert (mm)	19,23	7,40	6,11	4,47	6,72	7,75	2,05	3,26	11,70	17,16	7,53	6,53	4,66	7,43	8,32	3,40	2,44	14,37	15,81	7,02	6,44	5,33	7,88	9,02	4,57	2,00	17,33
Median (mm)	20,03	7,40	5,88	4,00	6,34	7,64	1,93	3,50	12,20	16,74	6,74	6,04	4,45	7,46	8,36	3,39	2,41	13,95	15,42	6,61	5,87	5,02	7,59	8,86	4,50	1,77	18,60
Standardabweichung (mm)	5,80	5,10	4,79	2,10	2,52	2,32	1,43	1,71	5,82	5,59	4,66	4,19	2,03	2,41	2,09	1,18	1,14	6,48	4,72	3,89	3,96	2,12	2,09	2,03	1,13	1,26	8,49
Minimum (mm)	7,81	0,00	0,00	0,95	2,32	3,64	0,00	0,00	0,10	7,08	0,40	0,40	0,93	2,18	3,15	0,78	0,00	0,30	6,87	0,71	0,00	1,55	4,01	3,67	1,75	0,00	0,40
Maximum (mm)	35,36	22,95	19,99	9,69	11,93	13,91	6,87	7,86	26,40	34,38	21,14	20,32	9,50	12,36	12,63	6,63	6,00	29,90	29,57	20,40	20,40	11,30	12,55	14,75	7,82	7,02	33,00

Tabelle 42: Darstellung der Messwerte aus Gruppe 2

Messposition	erster Prämolare										zweiter Prämolare										erster Molare									
Messung	AB	AC	A`C	EF	GH	IJ	KL	MN	β	AB	AC	A`C	EF	GH	IJ	KL	MN	β	AB	AC	A`C	EF	GH	IJ	KL	MN	β			
Männer N = 12																														
Mittelwert (mm)	26,06	13,14	11,48	3,59	5,38	6,97	2,67	3,22	13,47	22,47	12,52	11,35	4,13	6,06	7,62	3,67	3,20	15,00	19,55	10,61	9,94	5,49	7,75	8,66	4,69	2,10	18,88			
Median (mm)	26,45	13,61	11,91	3,60	5,31	7,21	2,47	2,68	13,95	22,64	12,53	11,09	4,12	6,52	7,71	3,88	3,22	14,90	20,46	11,48	10,92	5,60	7,96	8,43	4,67	1,98	19,75			
Standardabweichung (mm)	3,49	2,28	2,42	1,34	1,54	1,40	0,94	1,62	3,70	3,97	3,76	3,27	1,27	1,24	1,07	1,02	1,03	4,53	3,72	4,15	3,77	2,22	2,03	2,20	0,98	0,60	5,11			
Minimum (mm)	19,50	8,52	6,52	1,60	3,34	4,78	0,59	1,38	7,00	16,21	6,60	6,60	2,56	3,80	5,63	1,87	1,62	7,20	13,52	3,40	3,40	1,79	3,63	4,36	2,38	1,23	6,4			
Maximum (mm)	32,09	16,78	14,98	5,90	8,02	9,04	4,23	6,41	18,90	28,98	21,20	19,20	6,20	7,91	9,30	5,31	5,81	23,90	26,06	16,82	16,82	9,08	11,55	12,68	6,25	3,31	24,2			
Frauen N = 38																														
Mittelwert (mm)	25,35	13,58	11,73	3,62	5,14	6,60	2,26	3,77	11,13	22,42	12,37	10,74	3,78	6,09	7,82	3,67	2,66	14,99	19,90	10,80	10,22	5,51	7,99	9,52	5,04	2,37	20,32			
Median (mm)	25,50	13,03	10,99	3,48	4,73	6,23	2,36	3,73	11,30	21,98	11,01	9,75	3,46	5,93	7,41	3,57	2,45	14,35	18,97	10,50	9,41	5,05	7,50	9,47	4,92	2,22	20,95			
Standardabweichung (mm)	3,38	3,05	3,82	1,50	1,79	1,87	1,05	1,22	4,39	3,25	3,12	3,22	1,48	1,97	1,82	1,03	0,97	4,25	2,71	2,86	2,80	2,46	2,23	1,95	0,88	0,85	6,27			
Minimum (mm)	17,73	8,69	5,13	0,81	1,54	4,18	0,00	1,12	2,90	16,49	7,73	5,73	1,61	3,47	5,13	1,94	1,13	6,80	14,85	4,86	4,86	2,17	3,42	5,72	3,26	0,58	0,5			
Maximum (mm)	34,21	21,56	20,68	7,21	10,11	11,78	4,55	6,60	21,10	32,66	20,26	20,26	7,89	11,76	11,79	6,25	4,46	22,50	27,21	16,81	16,81	14,98	13,61	12,74	6,78	4,29	29,7			
Gesamt N = 50																														
Mittelwert (mm)	25,52	13,47	11,67	3,61	5,20	6,69	2,36	3,64	11,69	22,43	12,41	10,89	3,86	6,08	7,77	3,67	2,79	14,99	19,81	10,75	10,15	5,51	7,93	9,31	4,96	2,31	19,98			
Median (mm)	25,53	13,19	11,13	3,48	4,92	6,32	2,40	3,67	12,60	22,21	11,17	10,07	3,52	5,98	7,47	3,62	2,54	14,65	19,24	10,71	9,53	5,25	7,60	9,44	4,87	2,16	20,7			
Standardabweichung (mm)	3,42	2,89	3,53	1,46	1,74	1,77	1,04	1,35	4,35	3,44	3,29	3,24	1,44	1,82	1,67	1,03	1,01	4,32	2,99	3,22	3,07	2,41	2,19	2,04	0,92	0,80	6,05			
Minimum (mm)	17,73	8,52	5,13	0,81	1,54	4,18	0,00	1,12	2,90	16,21	6,60	5,73	1,61	3,47	5,13	1,87	1,13	6,80	13,52	3,40	3,40	1,79	3,42	4,36	2,38	0,58	0,5			
Maximum (mm)	34,21	21,56	20,68	7,21	10,11	11,78	4,55	6,60	21,10	32,66	21,20	20,26	7,89	11,76	11,79	6,25	5,81	23,90	27,21	16,82	16,82	14,98	13,61	12,74	6,78	4,29	29,7			

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Dissertation selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

Die Dissertation ist bisher keiner anderen Fakultät und keiner anderen wissenschaftlichen Einrichtung vorgelegt worden.

Ich erkläre, dass ich bisher kein Promotionsverfahren erfolglos beendet habe und dass eine Aberkennung eines bereits erworbenen Doktorgrades nicht vorliegt.

Bad Elster, den 25. September 2017

Tobias Enders

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich ganz herzlich

Herrn Prof. Dr. med. Dr. med. dent. Wolfram Kaduk, Klinik und Poliklinik für Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie der Universitätsmedizin Greifswald, für die Vergabe des Themas, die gute Betreuung und die Unterstützung bei der Anfertigung der vorliegenden Promotionsschrift danken.

Besonderen Dank gilt Herrn Dr. med. Dr. med. dent. Andreas Hentschel und Herrn Jan Herrmann für die Großzügigkeit der Bereitstellung aller DVT-Datensätze der kieferchirurgischen Gemeinschaftspraxis in Zwickau.

Bei Herrn Matthias Kellner und der Firma KaVo möchte ich für die Bereitstellung der Software „OnDemand 3D“ ebenfalls bedanken.

Mein weiterer Dank gilt Frau Ulrike von Hehn, Fa. Medistat GmbH in Kiel für die schnelle, nette und zielgerichtete statistische Beratung.

Vor Allem möchte ich meinen Eltern, meinen Großeltern und meiner Freundin für die Motivation und Unterstützung, für den Halt und Mut sowie den vielen investierten Stunden bei der Korrektur dieser Arbeit danken. Ohne Euch wäre mein Studium und diese Dissertation nicht möglich gewesen.