

Aus dem Bereich Klinische Medizin
der Medizinischen Fakultät
der Universität des Saarlandes, Homburg/Saar

**Prospektiv analytische DVT Studie zur quantitativen Beurteilung der
Platzierung von Minischrauben zum Auffinden klinisch sichtbarer
Platzierungsmarker**

Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin
der Medizinischen Fakultät
der UNIVERSITÄT DES SAARLANDES
2010

vorgelegt von: Mark Johannes Schieren
geb. am: 15.09.1986 in Frechen.

Aus der Poliklinik für Kieferorthopädie,
Universitätsklinikum des Saarlandes, Homburg/Saar
Direktor: Prof. Dr. Jörg Lisson

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung.....	4
2. Einleitung.....	8
2.1. Das Problem der absoluten Verankerung.....	8
2.2. Alternative Verankerungsmethoden.....	9
2.3. Die Entwicklung von Minischrauben.....	10
2.4. Die Vorteile von Minischrauben.....	11
2.5. Die Verlustproblematik.....	12
2.6. Insertionsvoraussetzungen.....	12
2.7. Zielsetzung dieser Studie.....	13
3. Material und Methodik.....	15
3.1. Hauptmessung.....	15
3.1.1. Fallauswahl.....	15
3.1.2. Messmethodik und –durchführung.....	17
3.1.3. Statistische Auswertung.....	23
3.1.3.1. Eignungsklassifikationen.....	24
3.1.3.2. Mittelwertanalyse.....	25
3.2. Merkmalsabhängiger Eignungsvergleich.....	26
3.2.1. Geschlecht.....	26
3.2.2. Weisheitszahnstatus.....	26
3.2.3. Alter.....	26
3.3. Interne Vergleichsmessung.....	27
4. Ergebnisse.....	28
4.1. Oberkiefer.....	28
4.1.1. Hauptmessung.....	28
4.1.1.1. Eignungsklassifikationen.....	28
4.1.1.2. Mittelwertanalyse.....	28
4.1.2. Merkmalsabhängiger Eignungsvergleich.....	32
4.1.2.1. Geschlecht.....	32
4.1.2.2. Weisheitszahnstatus.....	33
4.1.2.3. Alter.....	35

4.1.3. Interne Vergleichsmessung.....	36
4.2. Unterkiefer.....	38
4.2.1. Hauptmessung.....	38
4.2.1.1. Eignungsklassifikationen.....	38
4.2.1.2. Mittelwertanalyse.....	38
4.2.2. Merkmalsabhängiger Eignungsvergleich.....	42
4.2.2.1. Geschlecht.....	42
4.2.2.2. Weisheitszahnstatus.....	43
4.2.2.3. Alter.....	44
4.2.3. Interne Vergleichsmessung.....	44
5. Diskussion.....	46
5.1. Hauptmessung.....	46
5.1.1. Fallauswahl.....	46
5.1.2. Messmethodik und –durchführung.....	47
5.1.3. Statistische Auswertung.....	51
5.1.3.1. Eignungsklassifikationen.....	51
5.1.3.2. Mittelwertanalyse.....	60
5.2. Merkmalsabhängiger Eignungsvergleich.....	62
5.1.1. Geschlecht.....	62
5.1.3. Weisheitszahnstatus.....	62
5.1.2. Alter.....	63
5.3. Interne Vergleichsmessung.....	64
5.4. Abschließende Bewertung.....	65
6. Literaturverzeichnis.....	67
7. Dank.....	72
8. Lebenslauf.....	73

1 Zusammenfassung

Verankerungsverlust und ungewollte Zahnbewegungen stellen ein großes Problem in der kieferorthopädischen Praxis dar. Das Therapiekonzept der Minischrauben ermöglicht die kostengünstige und minimalinvasive Schaffung eines soliden und sofort belastbaren Verankerungspunktes. Jedoch sind die Verlustraten der Implantate mit 9,5-24,6% deutlich höher als die alternativer Verankerungsmethoden. Ihre Stabilität erlangen Minischrauben hauptsächlich durch die mechanische Retention im Knochen. Hierbei ist die periimplantäre Knochenmenge von großer Bedeutung.

Das Ziel dieser Studie ist die es herauszufinden, an welchen Stellen des Kiefers das interradiäre Knochenangebot ausreichend hoch ist, um eine stabile Insertionsgrundlage für Minischrauben darzustellen. Anhand von anatomischen Platzierungsmarkern soll zudem eine klinisch leicht anwendbare Kartierung der geeigneten Implantationsorte erfolgen.

Analysiert wurden die digitalen Volumetomographien der Kiefer von 39 Patienten. In Intervallen von 0,5mm wurden die Wurzelabstände sämtlicher Zahnzwischenräume des Ober- und Unterkiefers bestimmt. Die Messungen erfolgten von dem ersten Kontaktpunkt der benachbarten Zahnkronen bis zum Ende des Zahnzwischenraumes.

Zudem erfolgte ein Vergleich der Insertionsmöglichkeiten in Abhängigkeit von Geschlecht, Alter und Weisheitszahnstatus der Patienten.

Das größte interradiäre Platzangebot der Maxilla liegt zwischen den beiden Frontschneidezähnen und zwischen dem zweiten Prämolaren und dem ersten Molaren. Die übrigen Zahnzwischenräume zeigen deutlich geringere Wurzelabstände. Vorhandene Weisheitszähne und ein Patientenalter von unter 20 Jahren haben einen limitierenden Einfluss auf die intermolare Knochenmenge.

Das mandibuläre Knochenangebot nimmt von medial nach distal stetig zu und liegt deutlich über den Spitzenwerten der maxillären Wurzelabstände. Distal des Zahnzwischenraumes 3-4 sind ausreichend hohe Knochenmengen vorhanden um solide Insertionsoptionen für Minischrauben zu bieten. Der mandibuläre Frontzahnbereich ist für eine Implantation hingegen ungeeignet.

Die Studie zeigt, dass sich die Einsatzmöglichkeiten von Minischrauben, insbesondere im Oberkiefer auf wenige Kieferareale beschränken. Für eine potentiell erfolgreiche

Schraubeninsertion spielen, neben einer stabilen Grundlage durch eine ausreichende Knochenmenge, diverse weitere anatomische, technische und patientenspezifische Einflüsse eine wichtige Rolle. Der Abgleich der ermittelten Bohrkoordinaten mit diesen limitierenden Faktoren zeigte deutlich, dass im Oberkiefer der Zahnzwischenraum 5-6 und der Mandibularbereich distal des Zahnzwischenraumes 3-4 die besten Insertionsoptionen bietet. Durch die präzise Kartierung der entsprechenden Bohrpunkte sind diese in der kieferorthopädischen Praxis mit Standardinstrumenten leicht auffindbar und können als Orientierungshilfe bei Schraubeninsertion dienen.

Summary

A prospective-analytical cone-beam-CT study for the quantitative evaluation of miniscrew placement for establishing clinical placement guidelines

The loss of anchorage and unwanted dental movements pose a major problem in orthodontic therapy. The concept of miniscrews allows the minimally invasive creation of a low-cost and instantly loadable point of solid anchorage. However, implant loss rates of 9,5-24,6% are considerably higher compared to other temporary anchorage devices. Miniscrews obtain their stability mainly through mechanical retention in the surrounding bone. The amount of periimplant bone tissue is an important factor for the implant's primary stability.

This study's aim is to evaluate which areas of the human jaw offer sufficient interradicular bone masses to securely accommodate miniimplants. By defining anatomical placement marks, the suitable insertion sites are mapped for the use in clinical practice.

The cone-beam CT-Scans of the jaws of 39 patients were analyzed in this study. The interradicular spaces were measured in intervals of 0,5mm in all interdental areas of the maxilla and the mandible. The measurements started at the first point of contact of the adjacent dental crowns and were continued towards the end of the dental roots.

Furthermore, the insertion opportunities of different patient groups, defined by gender, age and dental status, were compared to assess specific personal advantages.

In the maxilla, the most extensive interradicular spaces can be found between the front incisors and the second premolar and the first molar. The remaining maxillary regions show distinctly lower amounts of interdental bone tissue. Wisdomteeth and a patient's age of less than 20 years were identified as limiting factors for intermolar miniscrew placement.

The interdental distances increase significantly from the medial to the distal areas of the mandible and are clearly higher than those of the maxilla. Especially in the posterior regions, distal of the interdental space 3-4 the bone masses are sufficient to provide reliable bases for miniscrew insertions. The anterior section is not suitable for implantations.

The study demonstrates that the secure use of miniscrews is restricted to relatively few areas of the jaw, especially in the maxilla. Apart from an adequate quantity of periimplant bone

tissue, several other anatomical, technical and individual factors influence the success and stability of the miniimplant. Comparing the limitations resulting from these factors to the findings of this study indicates that the safest options for miniscrew placement are between the maxillary second premolar and first molar and in the posterior mandible distal of the interdental space 3-4. By precisely mapping the potential drilling locations, they may be easily identified in clinical practice with standard orthodontic instruments.

2 Einleitung

„Die idealste Verankerung wäre natürlich eine unbewegliche Basis“ (E.H. Angle, 1907)

Mit diesen Worten beschrieb Edward Hartley Angle (1855-1930), einer der Hauptbegründer der modernen Kieferorthopädie, bereits 1907 die Bedeutsamkeit einer absoluten Verankerungsmöglichkeit als optimale Grundlage einer kieferorthopädischen Therapie.

Das Erreichen dieses Behandlungsideals war seitdem eines der Hauptziele der kieferorthopädischen Forschung. Es konnte jedoch nur sehr selten verwirklicht werden.

2.1 Das Problem der absoluten Verankerung

Das Auffinden solider Fixpunkte ist von großer Bedeutung, da das 3. Newtonsche Axiom (actio = reactio) nicht nur für die Physik, sondern auch für den menschlichen Körper und die Mechanik von Zahnbewegungen gilt.

Isaac Newton stellte 1687 fest, dass jede Krafteinwirkung stets eine gleichgroße Gegenkraft erzeugt. Dieses physikalische Prinzip erklärt, warum es im Rahmen einer orthodontischen Behandlung häufig zu ungewollten Zahnbewegungen kommt.

Um einen Zahn zu bewegen, benötigt man einen Verankerungspunkt, der als Gegenpol für die einwirkenden Kräfte fungiert. Als solcher können ein weiterer Zahn oder andere anatomische Strukturen des Kopfes dienen.

Wird ein Zahn als Befestigungsgrundlage gewählt, wirken auf ihn, nach Newtons Erkenntnissen, reziprok die exakt selben Kräfte, wie auf den zu bewegenden Zahn (siehe Abb. 1). Dies führt in der Regel dazu, dass die Verankerungszähne zumindest leichtgradig mitmobilisiert werden. Das Ausmaß dieser Bewegung hängt von der eingesetzten Kraft und dem vorhandenen Widerstand des Ankerzahns ab. Eine derartige Bewegung kann im Hinblick auf

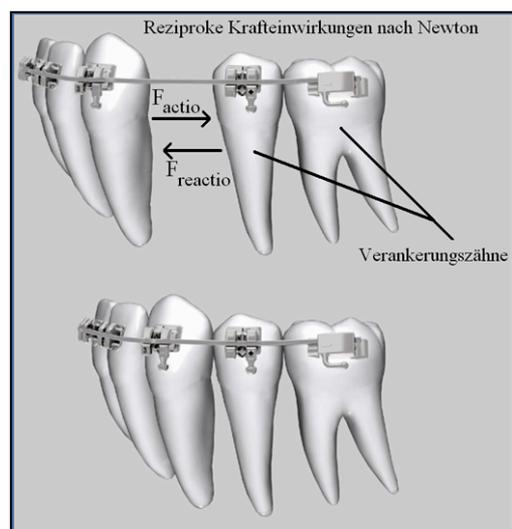


Abb. 1: Reziproke Zahnbewegungen

das therapeutische Ziel förderlich sein, wie beispielsweise beim reziproken Lückenschluss oder der sagittalen Erweiterung des Zahnbogens (Ludwig 2008). Es gibt allerdings zahlreiche

Situationen bei denen gerade diese ungewünschten Zahnbewegungen die Durchführung und das Ergebnis einer kieferorthopädischen Therapie einschränken und gefährden können.

Aus diesem Grund ist eine unbewegliche Verankerungsbasis von sehr hohem Wert für die selektive Steuerung von Zahnbewegungen.

2.2 Alternative Verankerungsmethoden

Im Laufe des wissenschaftlichen Fortschritts wurden sowohl zahlreiche intra- als auch extraorale Techniken und Apparaturen entwickelt, um das Ziel eines absoluten Fixpunktes zu erreichen.

Zu den extraoralen Verankerungsmöglichkeiten zählen vor allem das Headgear (siehe Abb. 2), ebenso wie die Delaire-Maske und die Nackenschlange. Hierbei werden die einwirkenden Kräfte auf den Nacken bzw. die Schädelknochen umgelagert und somit, wie beispielsweise beim Headgear, die molaren Verankerungszähne stabilisiert.

Der große Nachteil der extraoralen Apparaturen besteht in der meist niedrigen Compliance der Patienten, da z.B. das Headgear mindestens 12 Stunden am Tag getragen werden sollte, um den gewünschten Stabilisationseffekt zu erzielen (Ludwig 2008). Dies stellt für die Patienten sowohl aus sozialer wie auch aus kosmetischer Sicht eine erhebliche Einschränkung dar. Daraus resultiert häufig eine mangelhafte Mitarbeit der Patienten. Ferner führt das diskontinuierliche Tragen des Headgears nicht nur zu einer ineffektiven Verankerungsunterstützung, sondern

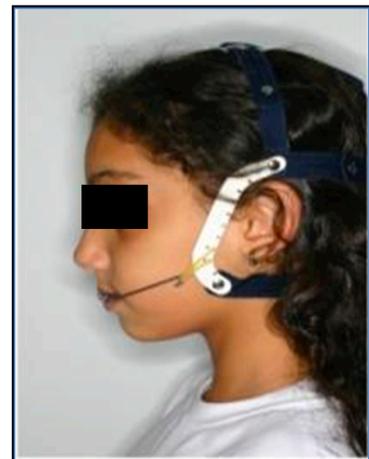


Abb. 2: Headgear-Apparatur

kann zudem zu einem desmodontalen Trauma der molaren Ankerzähne führen. Diedrich (1993) beschrieb dies als sog. Jiggling-Effekt. Das Headgear stellt ein relativ undifferenziertes Kraftsystem dar, das bei Verankerungsverlust auch eine Mesialbewegung der Ankerzähne bedingen kann. Als Folge dessen könnte die Malokklusion zusätzlich verstärkt werden (McSherry 2000).

Es wird deutlich, dass ein großer Bedarf an complianceunabhängigen Behandlungsmöglichkeiten besteht.

Zunächst wurde versucht, diesen Bedarf mithilfe von intraoralen Verankerungsgeräten zu decken. Hierzu gehören z.B. die Nance-Apparatur sowie die Transpalatal- und Lingualbögen. Vorteilhaft ist hierbei, dass keine aktive Mitarbeit des Patienten notwendig ist und die

ästhetischen Einschränkungen minimal sind. Die Hygienefähigkeit und das relative Verankerungspotential sind hingegen teilweise eingeschränkt (Ludwig 2008).

2.3 Die Entwicklung von Minischrauben

Da weder durch die intra-, noch durch die extraoralen Behandlungstechniken optimale Befestigungsmöglichkeiten erreicht werden konnten, begann ab der Mitte des 20. Jahrhunderts die Entwicklung von neuartigen Verankerungssystemen, die als Schrauben direkt im Knochen fixiert werden sollten.

Gainsforth (1945) versuchte bereits 1945 Zähne über Drähte an im Kiefer befestigten Schrauben zu belasten. Seine Versuche schlugen fehl und es dauerte nahezu vier Jahrzehnte bis sich die Forschung wieder intensiver mit der Thematik beschäftigte. Erst 1983 inserierten Creekmore & Eklund (1983) erfolgreich ein Miniimplantat unterhalb der Nasenhöhle zur Frontzahnintrusion. Ihr Implantat leitete sich von chirurgischen Minischrauben ab. Roberts et al. (1984) konnten 1984 in Tierstudien und klinischen Versuchen nachweisen, dass derartige Implantate auch bei längerer Krafteinwirkung positionsstabil blieben.

Im Jahr 1996 entwickelten Wehrbein et al. das Orthosystem. Es handelte sich um kurze Schrauben (4-6mm) für maxilläre Insertionen. Sie traumatisierten das Gewebe kaum und blieben nach einer dreimonatigen Einheilungsphase noch für mindestens 12 Wochen positionsstabil (Wehrbein et al. 1996). Die Firma Kanomi präsentierte 1997 eine Minischraube, die explizit für die kieferorthopädische Anwendung angefertigt wurde und sowohl für Insertionen im Ober- als auch im



Abb. 3: Verschiedene Minischraubensysteme

Unterkiefer geeignet war. Die Implantation war minimalinvasiv und ohne Gingivapräparationen möglich (Billen 2009). Seit Ende des 20. Jahrhunderts hat das Interesse der Wissenschaft an skelettalen Verankerungsmöglichkeiten bzw. sogenannten „Temporary Anchorage Devices“ (kurz: „TAD“), zu denen auch die Minischrauben gehören, stark zugenommen.

Heutzutage sind über 30 verschiedene Schraubensysteme verfügbar. Hierbei gibt es mannigfaltigen Variationsmöglichkeiten im Hinblick auf die Implantatsdimension, -design und ihre funktionellen Einsatzmöglichkeiten (Ludwig 2008)(siehe Abb.3).

2.4 Die Vorteile von Minischrauben

Die steigende Popularität verdanken die Minischrauben ihrem Potential als absolute Verankerungspunkte bei der complianceunabhängigen Einbindung in kieferorthopädische Therapiekonzepte (Heymann & Tulloch, 2006; Yao et al. 2008). Aufgrund ihrer geringen Größe (Durchmesser: 1,2-2,3mm; Länge: 4-15mm (Ludwig 2008)) können sie multifunktional an verschiedenen Orten des Kiefers mit nur minimalen Knochendefekten inseriert werden (Gedrange et al. 2007). Durch die atraumatische Implantation und Explantation (siehe Abb. 4) sind chirurgische Komplikationen relativ selten und die Belastung für Patienten vergleichsweise gering (Chen et al. 2007).

Da bei der simplen Implantationsdurchführung weder Weichgewebspräparationen noch komplexere chirurgische Geräte oder Techniken notwendig sind, können die kostengünstigen Eingriffe direkt von den zuständigen Kieferorthopäden selbst durchgeführt werden (Wehrbein et al. 2008; Scholz & Baumgaertel 2009). Da die Minischrauben ihre Stabilität in erster Linie durch mechanische Retention im Knochen erlangen, können sie unmittelbar nach der Insertion belastet werden. Durch dieses „instant loading“ wird die gesamte Behandlungsdauer deutlich verkürzt, da auf eine etwaige mehrmonatige Einheilungsperiode, wie sie bei rein osseointegrierten Implantaten üblich ist, verzichtet werden kann (Chen et al. 2007).



Abb. 4: Minimalinvasive
Explantation

2.5 Die Verlustproblematik

Trotz ihrer innovativen Behandlungsmöglichkeiten konnten sich die Minischrauben gegenwärtig noch nicht als kieferorthopädischer Verankerungsstandard durchsetzen. Dies liegt in erster Linie an ihren hohen Verlustraten. Diese liegen mit 9,5-24,6 % (Chen et al. 2008) deutlich über denen von alternativen TAD, wie Miniplates (Verlustrate: 1,2-4,7% (Chen et al. 2007; Chen et al. 2008)) und Gaumenimplantaten (Verlustrate: < 10% (Wehrbein & Göllner 2007)). Mit diesen alternativen skelettalen Implantaten lässt sich allerdings eine kostengünstige, sofort belastbare, minimalinvasive Verankerung nicht in demselben Maß entsprechend der Minischrauben realisieren. Der Verlust der Schrauben tritt meist 100-150 Tage nach der kieferorthopädischen Belastung auf (Wiechmann et al. 2007). Zu diesem Zeitpunkt kann es schwierig bis unmöglich sein das Therapiekonzept auf die neue Situation umzustellen (Schätzle et al. 2009). Folglich ist es von großer Bedeutung, die Gründe für Schraubenverluste zu erforschen und klinische Insertionsempfehlungen aufzustellen.

2.6 Insertionsvoraussetzungen

Während bei anderen orthodontischen Implantatsformen (z.B. Gaumenimplantaten) zur Verankerung die Osseointegration, also die Einheilung eines alloplastischen Materials in den Knochen (Brånemark 1985), im Vordergrund steht, erlangen Minischrauben ihre Positionsstabilität in erster Linie durch mechanische Retention im Knochen (Costa et al. 1998; Miyawaki et al. 2003). Folglich hat die periimplantäre Knochenquantität und -qualität des Alveolarknochens einen entscheidenden Einfluss auf den Erfolg einer Schraubenimplantation (Chen et al. 2007; Gedrange et al. 2007; Wilmes et al. 2006). Poggio et al. (2005) haben festgestellt, dass mindestens 0,5mm Knochen rund um das Implantat benötigt werden, um eine solide Befestigung einer Schraube zu ermöglichen. Studien haben gezeigt, dass Minischrauben mindestens einen Durchmesser von

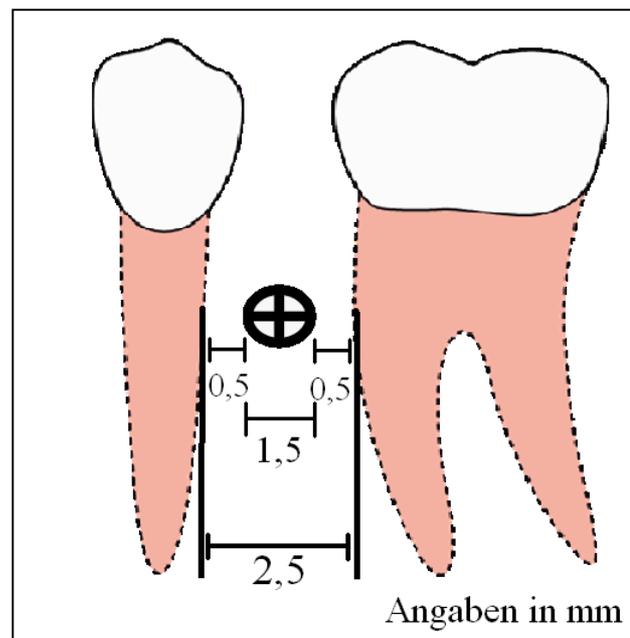


Abb. 5: Topographische Insertionsvoraussetzungen

1,5mm haben sollten, damit die Materialbeanspruchung während der Insertion und bei der späteren therapeutischen Belastung nicht zu Schraubenfrakturen und dem Verlust des Implantats führen (Sung et al. 2006). Demzufolge muss ein absoluter Mindestabstand von 2,5mm zwischen zwei Zahnwurzeln vorhanden sein, damit eine Schraubeninsertion prinzipiell erfolgreich möglich ist (siehe Abb. 5). Dies gilt allerdings nur für eine exakt mittige Platzierung der Schraube in dem Zahnzwischenraum. Da dies in der praktischen Umsetzung sehr schwierig ist, sollte mindestens ein Interdentalabstand von 2,6mm und optimalerweise von 3,2mm als Implantationsgrundlage vorliegen, um zusätzlich auch die Verletzung von angrenzenden Strukturen wie Zahnwurzeln zu vermeiden.

2.7 Zielsetzung dieser Studie

Das Ziel dieser Studie ist es, durch die Vermessung der interradiikulären Abstände des Ober- und Unterkiefers, herauszufinden, an welchen Stellen potentiell sichere Implantationsorte für Minischrauben existieren und welche Kieferareale prinzipiell als Insertionsorte geeignet sind. Hierdurch wird eine Klassifikation nach Patientengeschlecht, -alter und Kieferkonstitution ermöglicht, um prädisponierende Konstellationen für erfolgreiche Implantationsmöglichkeiten zu identifizieren. Damit diese Insertionsorte auch in der kieferorthopädischen Praxis schnell und ohne den Einsatz weiterer Diagnostik auffindbar sind, orientieren sich die Implantationsempfehlungen an eindeutigen anatomischen Platzierungsmarkern.

Bisher war die Suche nach einem geeigneten Insertionsort stets mit dem Einsatz aufwändiger Bildgebung verbunden. Der Standard der zahnärztlichen Diagnostik, die Panoramaschichtaufnahme (PSA/OPT), ist als Summationsbild nicht ausreichend präzise, um eine exakte Bestimmung von Insertionspunkten durchzuführen (Haßfeld et al. 2008). Dies ist nur mit der strahlungsintensiveren Schichtbilddiagnostik einer Computertomographie (CT) oder digitalen Volumetomographie (DVT) optimal möglich (Scholz & Baumgaertel 2009). Diese beiden Verfahren stellen den behandelnden Kieferorthopäden aufgrund ihrer hohen Kosten, ihrer teilweise eingeschränkten Verfügbarkeit und ihrer hohen Strahlenbelastung, insbesondere beim CT, bereits bei der Implantationsplanung vor Problembereiche (Haßfeld et al. 2008). Die Strahlenbelastung bei DVT-Aufnahmen ist deutlich geringer als bei CT-Untersuchungen, jedoch ist die Strahlenexposition von Kindern und Jugendlichen kritisch zu bewerten (Haßfeld et al. 2008).

Durch eine Klassifikation der Interdentalräume im Hinblick auf ihre Insertionseignung könnten ggf. einige Kieferareale prinzipiell als potentielle Einsatzgebiete von Minischrauben ausgeschlossen werden. Zukünftig könnte somit für diese Bereiche ein unnötiges Strahlenrisiko für den Patienten durch eine intensive Bildgebung vermieden werden.

Eine Arbeit in dieser Konstellation kann einen Beitrag dazu leisten, dass die bisherigen Barrieren, die der breiten Anwendung von Minischrauben noch entgegenstehen, reduziert werden. Durch eine präzise Kartierung von Bohrpunkten, die mit den skalierten Standardinstrumenten der kieferorthopädischen Praxis leicht auffindbar sind, könnte in Zukunft die Erfolgsrate der Schraubenapplikation erhöht und zudem teilweise auf die sowohl finanz- als auch strahlungsintensive Schichtbilddiagnostik verzichtet werden. Das Verfahren wird wahrscheinlich nicht bei Patienten mit ausgeprägten Kieferdeformationen zur Anwendung kommen, jedoch kann einem Großteil der Patienten der einfache und unkomplizierte Zugang zu diesem innovativen Verankerungskonzept ermöglicht werden.

3 Material und Methode

3.1. Hauptmessung

3.1.1. Fallauswahl

Für die Studie wurden digitale Volumentomografien des Kopfes von insgesamt 39 Patienten verwendet. Es wurden insgesamt 36 Oberkiefer und 38 Unterkiefer in die Studie aufgenommen.

Die Patientendatensätze wurden in digitalisierter und anonymisierter Form von der kieferorthopädischen Praxis Dr. med. dent. Heiko Goldbecher aus Halle/Saale zur Verfügung gestellt und in elektronischer Form übermittelt. Die digitalen Volumentomographien wurden mit dem Veraviewpocs 3D der Firma J.Morita Mfg. Corp. (Osaka, Japan) angefertigt (siehe Abb.6).

Dabei wurde der Kopf der Patienten so eingestellt und fixiert, dass eine optimale räumliche Position zu den Untersuchungsebenen gewährleistet und Bewegungsartefakte vermieden wurden. Es war wichtig, dass die sagittal-transversale Schnittebene parallel zur Okklusionsebene des Patienten ausgerichtet wurde. Erreicht wurde dies durch die Einstellung einer korrekten Sitzposition und Kopfhaltung des Patienten. Zusätzlich wurde bei den DVT –Aufnahmen die Kieferstellung zueinander durch ein Aufbeißmundstück optimiert.

Betrieben wurde das DVT- Gerät mit folgenden Grundeinstellungen: Röhrenstrom 5 mA, Röhrenspannung: 80 kV, Pixelgröße: 0,125 x 0,125. Sämtliche DVT-Aufnahmen lieferten Schichtdicken von 0,25 mm.

Abgebildet wurden der komplette Ober- und Unterkiefer, da die Wurzelabstände in Ihrem vollständigen Verlauf ersichtlich und vermessbar sein mussten. Nach kranial reichten die Schnittbilder bis in den Bereich der Nasennebenhöhlen.



Abb. 6: Digitaler
Volumentomograph

Auswahlkriterien

Aus dem übermittelten Patientenkollektiv wurden nicht alle Aufnahmen in die Studie eingebunden.

Patienten mit ausgeprägten Zahnfehlstellungen, permanentem Zahnersatz und multiplen zusätzlichen Zahnanlagen wurden nicht in die Studie aufgenommen.

Kategorisch wurden auch die Aufnahmen ausgeschlossen, bei denen eine offensichtliche Fehlhaltung des Patientenkopfes während der Aufnahme zu erkennen war, bzw. die Schnittebene nicht parallel zur Okklusionsebene ausgerichtet war.

Außer den oben genannten Ausschlusskriterien, die ausnahmslos auf der verminderten Aussagekraft etwaiger Bilder für den zu untersuchenden Sachverhalt beruhen, wurden bei der Auswahl der Patienten keine weiteren Faktoren berücksichtigt.

Es kam gelegentlich vor, dass bei einem Patienten ein Zahn fehlte oder ein Zahnzwischenraum aufgrund von Zahnersatz nicht vermessbar war. Eine derartige Prädisposition stellte allerdings kein obligates Ausschlusskriterium für das restliche Gebiss dar, sondern lediglich für die beteiligten Interdentalräume bzw. den betroffenen Kiefer.

Übersicht über das Patientenkollektiv

Nach Anwendung der Ausschlusskriterien konnten von den ursprünglich übermittelten 70 Patientendatensätzen 39 Patienten ausgewertet werden (siehe Tab.1). Das bedeutet, dass 44,3% aller Daten, aufgrund mangelnder Kongruenz mit den Aufnahmebedingungen dieser Studie, verworfen wurden. Es wurden insgesamt 19 männliche und 20 weibliche Patienten untersucht.

Die Patienten wurden in 3 Hauptaltersklassen unterteilt. Im Alter von 0-20 Jahren waren 14 Patienten. 21-40 Jahre alt waren 13 Patienten. Im Bereich von über 40 Jahren lagen 12 Patienten. Über die ethnische Herkunft der Patienten sind keine genauen Aussagen möglich, da es sich um anonymisierte Daten handelte. Allerdings ist aufgrund der demographischen Lage der

	männlich ♂	Weiblich ♀	Gesamt
12-20 Jahre	8	6	14
21-40 Jahre	7	6	13
> 40 Jahre	4	8	12
Gesamt	19	20	39

Praxis beim überwiegenden Anteil der

Tab. 1: Übersicht über das Patientenkollektiv

Patienten von der kaukasischen, mitteleuropäischen Bevölkerung auszugehen.

3.1.2 Messmethodik und -durchführung

Die Analyse der Patientendaten, die im DICOM-Format übermittelt wurden, erfolgte an einem MacBook 1.1 der Firma Apple mit einem 2 GHz IntelCore Duo Prozessor. Als Betriebssystem wurde Mac OS X 10.5.7 verwendet. Die eigentlichen Vermessungen und Analyse der DVT-Bilder erfolgten mit dem Open-Source Dicom-Viewer OsiriX (www.osirix-viewer.com).

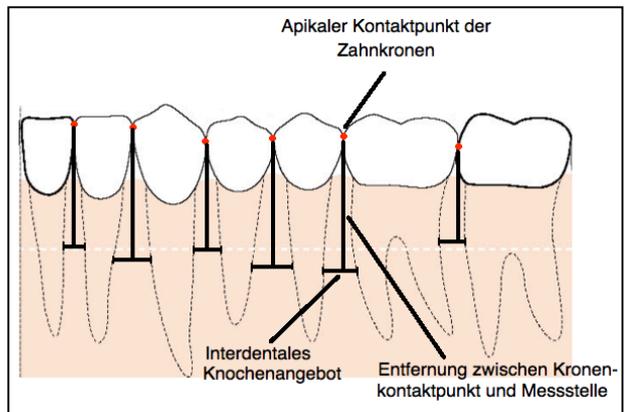


Abb. 8: Seitliche Messansicht

Das Ziel der Bildanalyse war die quantitative Bestimmung des interradikulären Knochenangebotes zwischen allen Zähnen des menschlichen Gebisses mit Ausnahme der eventuell vorhandenen Weisheitszähne. Die gemessenen Strecken wurden zudem noch mit dem ersten, apikalen Kontaktpunkt, der den interradikulären Raum seitlich begrenzenden Zahnkronen, ins Verhältnis gesetzt (siehe Abb. 8). Von diesem ersten Kontaktpunkt (siehe Abb. 9) ausgehend wurde zu den Wurzelenden hin, in den aufeinander folgenden Schnittebenen, der Abstand zwischen den benachbarten Zähnen bestimmt.

Bei den DVT-Aufnahmen wurde in jeder zweiten aufgezeichneten Schnittebene (Schichtdicke 0,25mm), d.h. in Intervallen von 0,5mm, diese Abstandsmessung durchgeführt.

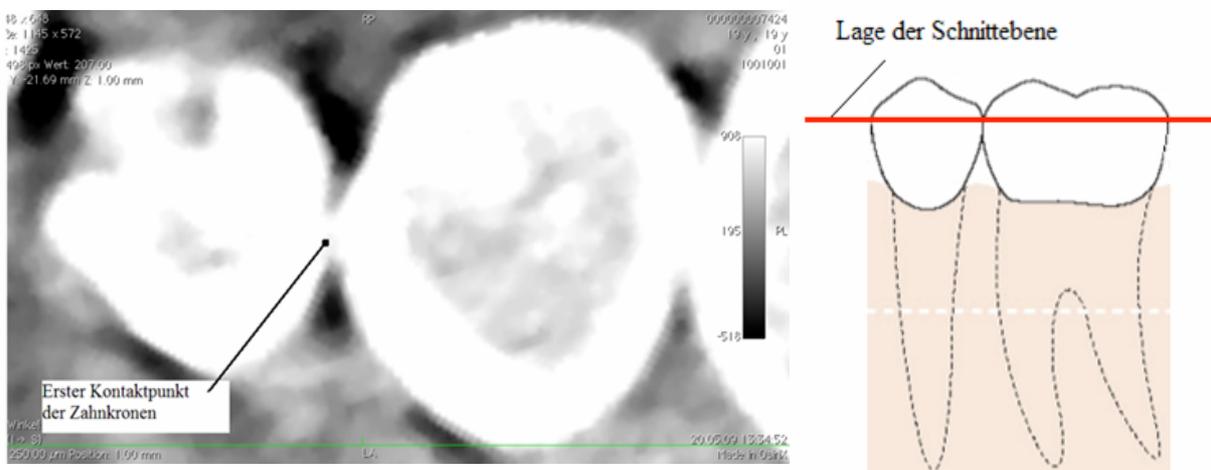


Abb. 9: Erster Kronenkontaktpunkt („KKP“)

Messdurchführung

Vor dem eigentlichen Messbeginn muss zunächst in einem ersten Übersichtsdurchlauf überprüft und sichergestellt werden, dass die vorliegenden Bilderserien den Zulassungskriterien dieser Studie entsprechen und zudem den Interradikularraum vollständig abbilden. Sofern Zweifel an der Tauglichkeit der vorliegenden Datensätze bestehen, muss in einem nächsten Schritt entschieden werden, ob bzw. inwieweit Teile der dargestellten Kieferabschnitte für die Studie verwendet werden können.

Bildkalibrierung

Sofern die Qualität der Schichtbildaufnahme ausreichend hoch ist, kommt es im nächsten Schritt zur Auswahl des ersten Zahnzwischenraumes. Dieser kann beliebig gewählt werden. Mit Hilfe der „M“-Taste kann das Bild bewegt werden, um den zu untersuchende Bereich in der Mitte des Bildschirms zu positionieren. Mittels der Lupe („L“-Taste) muss das Bild nun vergrößert werden, damit eine präzise Messung ermöglicht wird. Die Vergrößerung sollte mindestens 630 % betragen, kann allerdings je nach Bedarf und vorliegender Zahnformation bis zu dem Bereich von 1600% beliebig erhöht werden. Es gilt darauf zu achten, dass stets der gesamte Zahnzwischenraum dargestellt wird, um die optimale Messstelle zu erkennen. Die Vergrößerung sollte das Maß von 2000% nicht überschreiten, da in diesem Größenbereich zum einen der Zahnzwischenraum in der Regel nicht mehr vollständig einsichtbar ist und etwaige Messstellen übersehen werden könnten. Zum anderen ist bei einer derartigen Blickfeldeinschränkung der Knochen-Zahn-Kontrast deutlich schwerer abzugrenzen und führt gegebenenfalls zu einem inakkuraten Messansatz.

In einem nächsten Schritt muss der Bildkontrast eingestellt werden, um eine scharf erkennbare Kontur zwischen der Spongiosa des Kieferknochens und dem dichten Zahnbein zu erzeugen. Für die geplanten Messungen soll die dichte Zahnschicht möglichst hell und die angrenzende Spongiosa möglichst dunkel dargestellt werden. So wird sichergestellt, dass stets ein fest definierter Anfangs- und Endpunkt der Messstrecke vorliegt. OsiriX bietet bereits einige voreingestellte Darstellungsoptionen (z.B. „CT-Bone“), welche ein meist ausreichendes Kontrastgefüge erstellen. Bei Bedarf kann manuell nachkonfiguriert werden. Dabei muss allerdings beachtet werden, dass der dargestellte Abstand zwischen den Zähnen durch übermäßige Überblendung, bzw.

Verdunkelung nicht verändert wird. Um etwaige Wertaberrationen zu vermeiden, sollte an einer fest definierten Stelle eine Beispielmessung durchgeführt werden (siehe Abb. 11). Dieser Wert darf sich nach Manipulation des Kontrastes nicht verändert haben. Häufig kam es zu leichten Unterschieden zwischen den Dichteverhältnissen der untersuchten Kiefer. Manuelle Nachadjustierungen waren notwendig, um kontinuierlich vergleichbare Messbedingungen zu garantieren. Insgesamt wurde mit Kontrastwerten im Bereich von etwa -500 bis 1000 HE gearbeitet.

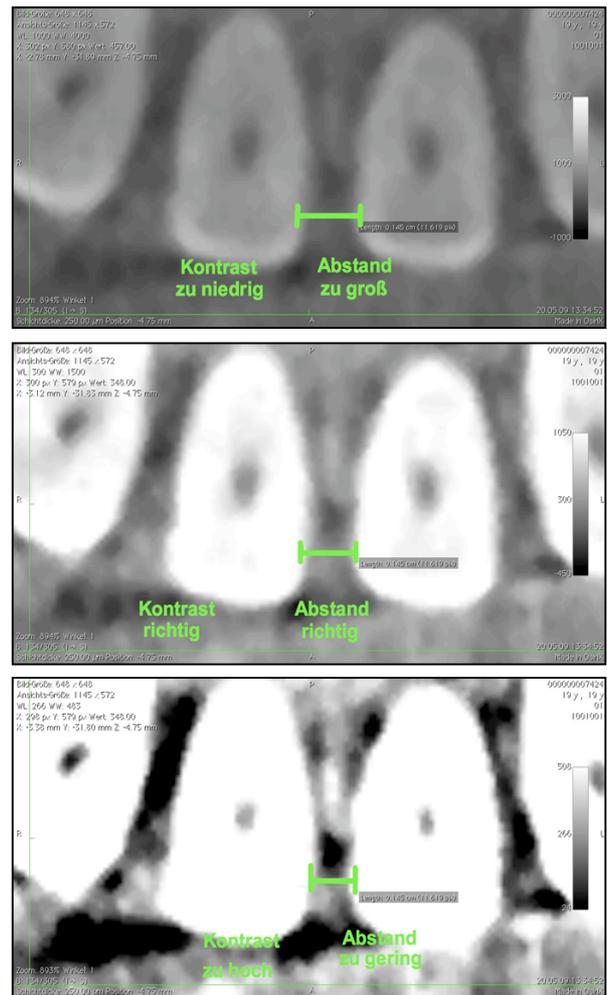


Abb. 11: Einstellung korrekter Kontrastverhältnisse

Messungsbeginn

Nachdem Position, Kontrast und Vergrößerung des zu betrachtenden Kieferbereichs eingestellt sind, beginnen die eigentlichen Messungen.

Als Voraussetzung für den weiteren Messablauf und um topographische Beziehungen zwischen den verschiedenen Messwerten zu beschreiben, muss zunächst der erste Kontaktpunkt zwischen den beiden benachbarten Zähnen bestimmt werden. Hierzu beginnt man, von den Schneidekanten der betroffenen Zähne aus, sämtliche Schichtbilder in ihrer natürlichen Reihenfolge in Richtung der Wurzelenden hin durchzusehen. Das Schnittbild, auf dem das erste Mal ein definitiver Kontakt zwischen den beiden Kronen zu erkennen ist, wird als Null- oder Ausgangspunkt definiert (siehe Abb. 9). Um genau diese Schnittebene für etwaige spätere Untersuchungen, bzw. zur Überprüfung der Einhaltung des korrekten Messintervalls wieder finden zu können, sollte die sog. „Table Position“, welche die Lage der Schnittebene im Rahmen der gesamten Untersuchung beschreibt, dokumentiert werden. Von diesem Punkt aus analysiert man, in den vorher beschriebenen Intervallen (0,5mm), die sich anschließenden Schnittbilder (siehe Abb.12). Sobald sich der erste Kontakt zwischen den Zahnkronen wieder löst, wird Knochensubstanz im Zahnzwischenraum sichtbar. Die Breite dieses Knochenareals,

bzw. der Abstand zwischen den beiden Zähnen, wird mittels der vorhandenen Messfunktion in OsiriX ermittelt. Hierzu markiert man mit Hilfe der Maus den Anfangs- und Endpunkt der zu vermessenden Strecke.

Zum Zahnwurzelende hin wird die Vermessung der aufeinander folgenden Schichten bis zu dem Schnittbild fortgeführt, bei dem die Wurzel von mindestens einem der beiden beteiligten Zähne nicht mehr zu erkennen bzw. zuverlässig zu bestimmen ist. Diese Position wurde als Endpunkt des Zahnzwischenraumes definiert und gibt in Kombination mit dem Anfangspunkt der Messung, Auskunft über die longitudinale Ausdehnung des interdentalen Gefüges.

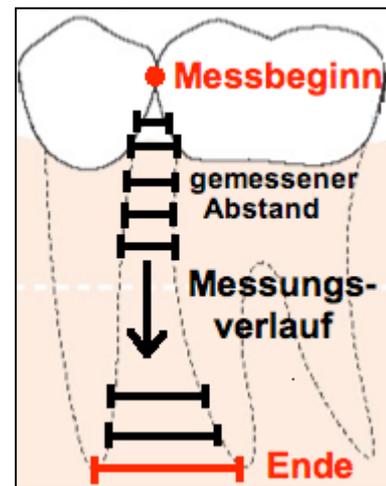


Abb.12: Messungsverlauf

Messpunktbestimmung

In einem Zahnzwischenraum wird stets der engste Abstand zwischen den beiden Zähnen bestimmt (siehe Abb. 13). Sofern diese engste Stelle nicht eindeutig zu erkennen ist, müssen gegebenenfalls an mehreren Stellen Vergleichsmessungen durchgeführt werden

(siehe Abb.14). Die Ausrichtung der Messstrecke sollte zudem parallel zur Kortikalis des Zahnbogens sein, damit das vermessene Knochenareal orthogonal zu dem Insertionswinkel der Minischraube ausgerichtet ist (Abb. 15). Durch diese Konstellation kann es zu dem Fall kommen, dass bei mittelgradig rotierten, bzw. verwinkelten Wurzelstellungen, eine potentielle Insertion unmöglich wäre, auch wenn ein gewisses Knochenangebot vorhanden ist (siehe Abb. 16).

Insbesondere im Bereich der Molaren kommt es in der Regel zur Teilung in mehrere Unterwurzeln. In dieser Situation muss mit einer Parallelkonstruktion gearbeitet werden, um auch bei einer derart komplexen Wurzelstellung eine durchgehend vorhandene

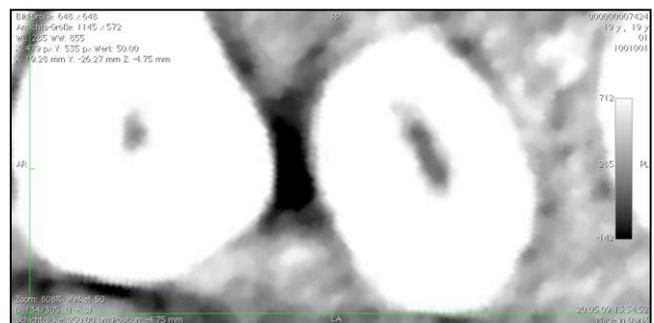


Abb. 13: kürzester interradikulärer Abstand

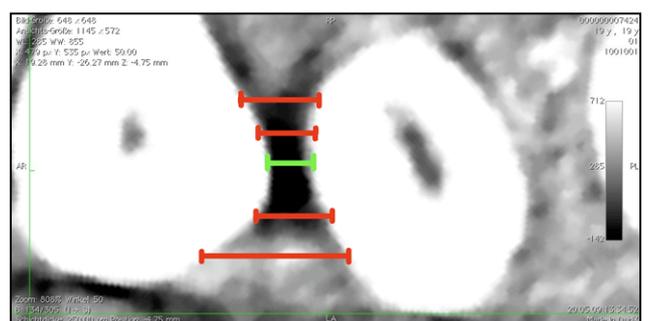


Abb. 14: Vergleichsmessungen

Knochenmenge zu bestimmen (siehe Abb. 17). Durch Anwendung von Tangenten und Parallelkonstruktionen kann bei praktisch jeder Wurzelkonstellation ein passender minimaler Knochenabstand bestimmt werden.

Unter Beachtung der vorliegenden Messrichtlinien wird die Vermessung der sich anschließenden Messebenen bis zum Ende der Wurzel durchgeführt.



Abb. 15: Lage der Messstrecke im Bezug zu dem Verlauf des Zahnbogens



Abb. 16: Verwinkelte Wurzelstellung

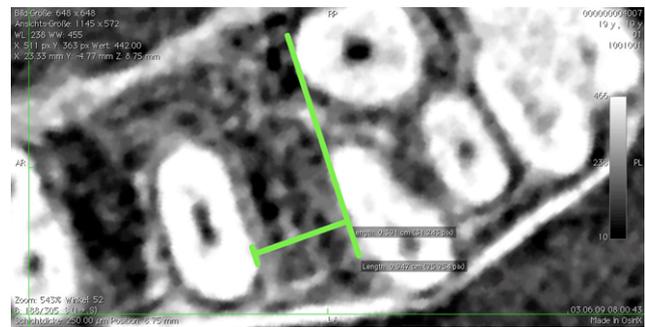


Abb. 17: Parallelkonstruktion als Hilfsmittel

3.1.3. Statistische Auswertung der Hauptmessungen

Im Rahmen der Hauptvermessungen dieser Studie wurden etwa 25.000 Messwerte erhoben. Statistische Parameter wurden software-gestützt mit dem Programm PASW Statistics 18 der Firma SPSS Inc. (Chicago, USA) berechnet und mithilfe von Bildverarbeitungsprogrammen grafisch aufbereitet.

Seitenkonsolidierung

Um die nachfolgende Ergebnispräsentation übersichtlich und strukturiert zu gestalten, wurde auf die Darstellung jedes einzelnen Zahnzwischenraumes verzichtet. Die Informationen korrespondierender Zahnzwischenräume (=ZZR) eines Kiefers (z.B. 16-17 und 26-27) wurden gemäß der gegenwärtigen wissenschaftlichen Praxis konsolidiert und gemeinsam aufbereitet (z.B. Oberkiefer ZZR 6-7)

3.1.3.1. Eignungsklassifikationen

Zum Verständnis der folgenden Ergebnispräsentation wurden folgende Grundparameter definiert. Ein „potentieller Insertionsort“ muss mindestens einen Wurzelabstand von 2,6mm aufweisen. Ein „optimaler Insertionsort“ verfügt über ein Knochenangebot von mindestens 3,2mm.

Im Rahmen der Hauptmessungen wurde überprüft, bei welchem Prozentsatz der Patienten eine potentielle bzw. optimale Insertion möglich war. Es wird von einer „Insertionsmöglichkeit“ gesprochen, wenn bei einem Untersuchten der erforderliche Wurzelabstand von 2,6mm bzw. 3,2mm aufgefunden wurde. Anhand dieses Wertes wurde der besagte Zahnzwischenraum in verschiedene Eignungskategorien eingeordnet. War bei 61-70% der Patienten der notwendige Abstand vorhanden,

so gilt der Zahnzwischenraum als „akzeptabler“ Implantationsort. Ein „guter“ Insertionsort verfügt über 71-80%, ein „sehr guter“ über 81-90% und ein „ausgezeichneter“ Ort über 91-100% Insertionswahrscheinlichkeit. Werte unter 60% gelten als „schlecht“ und ein Platzvorkommen unter 50% als „ungeeignet“ (siehe Tab.2).

Insertionsrate	Insertionseignung
< 50 %	ungeeignet
51-60 %	schlecht
61-70 %	akzeptabel
71-80 %	gut
81-90 %	sehr gut
91-100 %	ausgezeichnet

Tab. 2: Eignungsklassifikation

3.1.3.2. Mittelwertanalyse

Im Rahmen der deskriptiven Statistik wurden für sämtliche Zahnzwischenräume unter anderem Mittelwerte der einzelnen Schnittebenen ermittelt, um einen generellen Überblick über das vorhandene Knochenangebot des Patientenkonglomerats zu erhalten. Dies geschah bis zu einem Abstand von 15mm vom Kronenkontaktpunkt in Schritten zu 0,5mm.

Anhand der Mittelwertanalyse wurde aus den ermittelten Abstandswerten der Zahnwurzeln ein statistisches Universalgebiss rekonstruiert. Dieses spiegelt den durchschnittlichen Zahnabstand der untersuchten Patienten wieder. Durch eine entsprechende grafische Aufarbeitung ermöglicht diese Auswertung eine übersichtliche Darstellung der vorliegenden Platzverhältnisse (siehe Abb. 18).

Der rote Bereich kennzeichnet alle die Entfernungen vom Kronenkontaktpunkt, an denen weniger als 2,6mm Platz ist, d.h. an denen kein ausreichendes Knochenangebot für eine Insertion vorliegt. Die gelb markierten Abstände beschreiben die Bereiche, an denen ein Mindestknochenangebot von 2,6mm vorhanden ist und somit eine Insertion potentiell möglich wäre. Die grüne Zone umfasst die Territorien, die mit einem Knochenangebot von mehr als 3,2mm einen optimalen Schraubeninsertionsort darstellen.

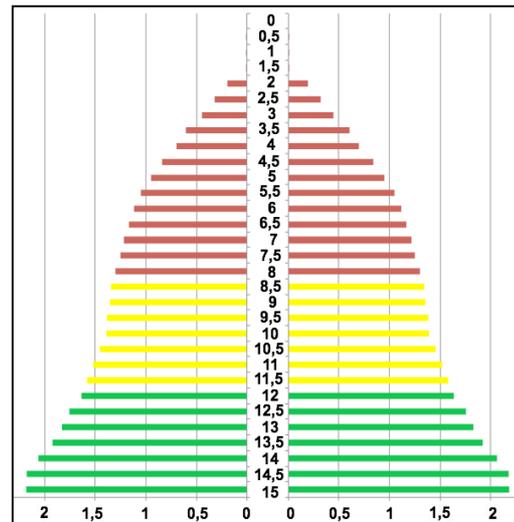


Abb. 18: Beispiel für Mittelwertanalytischegrafik

Zusätzlich wird der Begriff der „Bestätigungsrate“ eingeführt. Diese gibt an, bei welchem Prozentsatz der Probanden an einer bestimmten Position (z.B. 11,5 mm von KKP) das erforderliche Mindestknochenangebot von 2,6mm bestätigt werden konnte. Folglich gibt sie an, bei welchem Anteil der Untersuchten an einer bestimmten Position auch wirklich eine potentielle Schraubeninsertion möglich wäre.

In diesem Zusammenhang werden auch „Insertionsempfehlungen“ bestimmt. Diese zeigen den Bohrpunkt, der möglichst gut zugänglich ist, also in geringer Entfernung vom Kronenkontaktpunkt liegt, aber zusätzlich als solcher bei einem großen Anteil der Patienten aufgefunden werden kann. Die Insertionsempfehlung beruht auf der bestmöglichen Kombination dieser beiden Kriterien.

Bei der Ergebnispräsentation werden zusätzlich in übersichtlichen Tabellen die wichtigsten Eigenschaften der jeweiligen Zahnzwischenräume kurz zusammengefasst. Diese beinhalten die Insertionseignung, die potentiellen und ggf. optimalen Bohrpunkte aus der Mittelwertanalyse mit ihren Bestätigungsraten, sowie eine unverbindliche Insertionsempfehlung.

3.2. Merkmalsabhängiger Eignungsvergleich

Im Rahmen der gruppenspezifischen Eignungsanalyse werden die Insertionsraten untereinander verglichen.

Als gruppenspezifische Merkmale wurden das Geschlecht (2 Gruppen: männlich/weiblich), das Alter (3 Gruppen: 12-20 J; 21-40; >40 J.) sowie der Zahnstatus bezüglich der

Weisheitszähne (2 Gruppen: Weisheitszähne vorhanden/fehlen) festgelegt. Die Unterschiede gelten als statistisch signifikant, wenn der p-Wert $\leq 0,05$ ist.

3.3. Interne Vergleichsanalyse

Durch eine interne Analyse wird die Lage der statistisch errechneten Bohrkoordinaten aus der Mittelwertanalyse mit den tatsächlich gefundenen Bohrpunkten der vermessenen Patienten verglichen. Das bedeutet, dass für jeden Patienten der Ort dokumentiert wurde, an dem eine potentielle, bzw. optimale Insertion definitiv möglich war. Folglich werden die wirklich vorhandenen Bohrmöglichkeiten der Probanden verwendet. Aus diesen Bohrpunkten wird ein Durchschnittswert errechnet und anschließend mit den statistisch projizierten Insertionskoordinaten aus der Mittelwertanalyse verglichen.

4 Ergebnisse

4.1. Oberkiefer

4.1.1. Hauptmessungen

4.1.1.1. Eignungsklassifikation

Als Orientierungshilfe folgt eine grafische Darstellung der Insertionseignungen aller Zahnzwischenräume des Ober- und des Unterkiefers im Hinblick auf potentielle Insertionsmöglichkeiten (siehe Abb. 19). Die Grafik zeigt, dass sich die größten Insertionsmöglichkeiten im Oberkiefer am Zahnzwischenraum 1-1, 2-3 und 5-6 befinden. Im Unterkiefer zeichnet sich die gesamte Region distal des Zahnzwischenraumes 3-4 durch ein hohes Insertionspotenzial aus. Eine detaillierte Darstellung der Sachverhalte erfolgt im Rahmen der Ergebnispräsentation der Mittelwertanalyse.

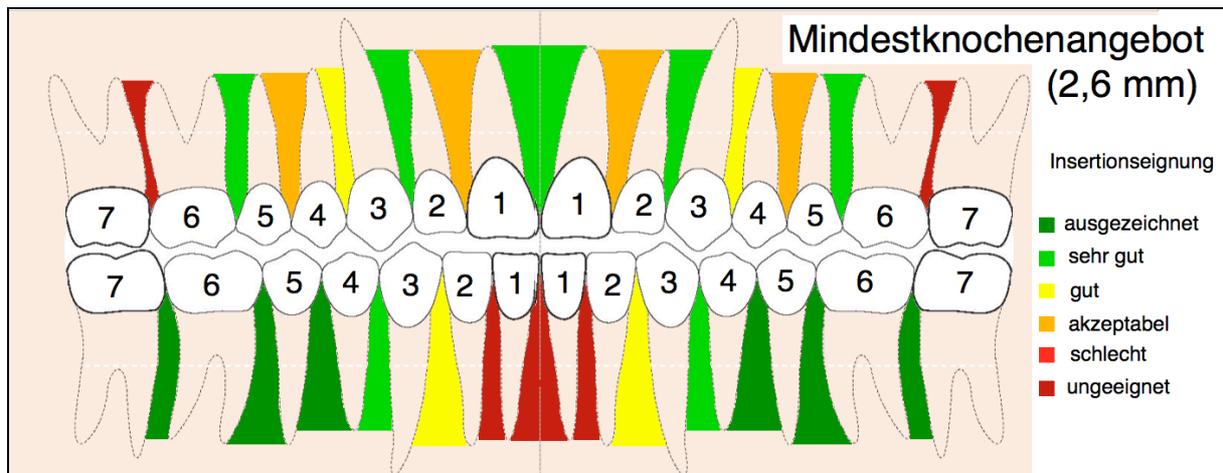


Abb. 19: Übersicht über die Insertionseignungen im Hinblick auf das Auftreten des Mindestknochenangebotes von 2,6mm

4.1.1.2. Mittelwertanalyse

Der **Zahnzwischenraum 1-1** (ZZR1-1) verfügt über ein ausgeprägtes Knochenangebot (siehe Abb. 20; Tab.3). Bei allen untersuchten Patienten konnte an diesem Interradikularraum das erforderliche Mindestknochenangebot von 2,6mm nachgewiesen werden. Der optimale Wurzelabstand von 3,2mm wurde bei 94,9% der Probanden bestätigt. Laut Mittelwertanalyse ist zwar nach 11,5mm eine potentielle Schraubeninsertion möglich, jedoch ist nach 12,5mm

mit deutlich höheren Erfolgchancen zu rechnen, da an dieser Position 70,0 % der Patienten über das erforderliche Mindestknochenangebot verfügten. Das optimale Knochenangebot ist nach 13,5mm vorhanden.

Oberkiefer ZZR 1-1	IRA 2,6 mm	IRA 3,2 mm
Insertionseignung	ausgezeichnet	ausgezeichnet
Insertion möglich ab	11,5 mm	13,5 mm
Bestätigungsrate (2,6 mm)	58,6 %	71,4%
Insertionsempfehlung	12,5 mm	
Bestätigungsrate (2,6 mm)	70,0 %	

Tab. 3: Übersichtstabelle von ZZR 1-1 (Oberkiefer)

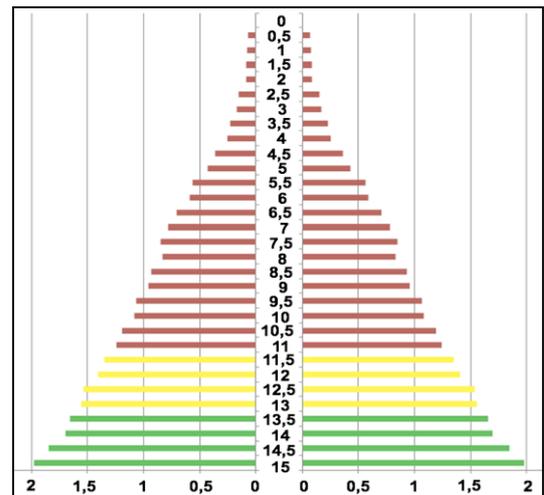


Abb. 20: Interradikuläre Abstände am ZZR1-1 (OK)

Der **Zahnzwischenraum 1-2** verfügt über ein sehr eingeschränktes Knochenangebot. Während bei 60,26% der Untersuchten prinzipiell das erforderliche Mindestknochenangebot nachgewiesen werden konnte und folglich eine „akzeptable“ Insertionseignung vorliegt (siehe Tab.4), zeigen die Ergebnisse der Mittelwertanalyse (siehe Abb.21), dass die durchschnittlichen Wurzelabstände als Stabilitätsgrundlage unzureichend sind. Für eine optimale Schraubeninsertion ist dieser ZZR ungeeignet. Es konnten lediglich bei 37,18% der Untersuchten die erforderlichen 3,2mm Knochen bestätigt werden. Aufgrund des niedrigen Knochenangebotes erfolgt keine Insertionsempfehlung.

Oberkiefer ZZR 1-2	IRA 2,6 mm	IRA 3,2 mm
Insertionseignung	akzeptabel	ungeeignet
Insertion möglich ab	-	-
Bestätigungsrate (2,6 mm)	-	-
Insertionsempfehlung	-	
Bestätigungsrate (2,6 mm)	-	

Tab. 4: Übersichtstabelle von ZZR1-2 (Oberkiefer)

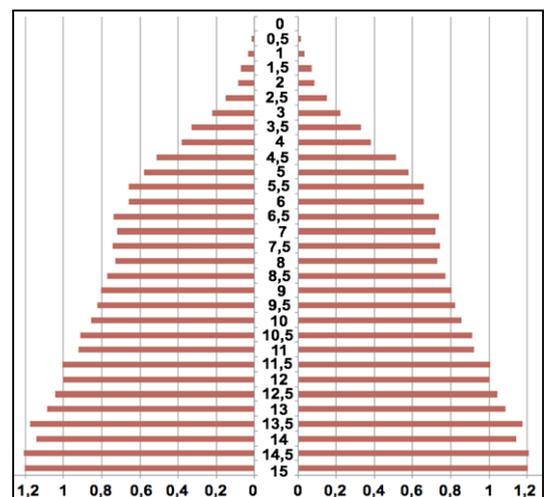


Abb. 21: Interradikuläre Abstände am ZZR1-2 (OK)

Der **Zahnzwischenraum 2-3** verfügt über eine „sehr gute“ Eignung als potentieller Implantationsort (siehe Tab.5). Bei 81,01% der Untersuchten konnte das Mindestknochenangebot von 2,6mm nachgewiesen werden. Die Mittelwertstatistik (siehe Abb.22) zeigt, dass nach einem Abstand von 11,5mm das erforderliche Knochenmaß vorliegt. Allerdings ist bei

einer Entfernung von 14,0mm vom Kronenkontaktpunkt mit einer deutlich höheren Insertionswahrscheinlichkeit zu rechnen, da an dieser Stelle 68,25% der Patienten über die benötigten 2,6mm Knochen verfügten.

Während 62,03% der Probanden das optimale Knochenangebot aufwiesen und somit definitionsgemäß eine „akzeptable“ Implantationstauglichkeit besteht, verdeutlicht die Mittelwertanalyse, dass die durchschnittlichen Wurzelabstände für eine optimale Stabilitätsgrundlage nicht ausreichen.

Oberkiefer ZZR 2-3	IRA 2,6 mm	IRA 3,2 mm
Insertionseignung	sehr gut	akzeptabel
Insertion möglich ab	10,5 mm	-
Bestätigungsrate (2,6 mm)	42,37 %	-
Insertionsempfehlung	14,0 mm	
Bestätigungsrate (2,6 mm)	68,25 %	

Tab. 5: Übersicht über den ZZR2-3 (Oberkiefer)

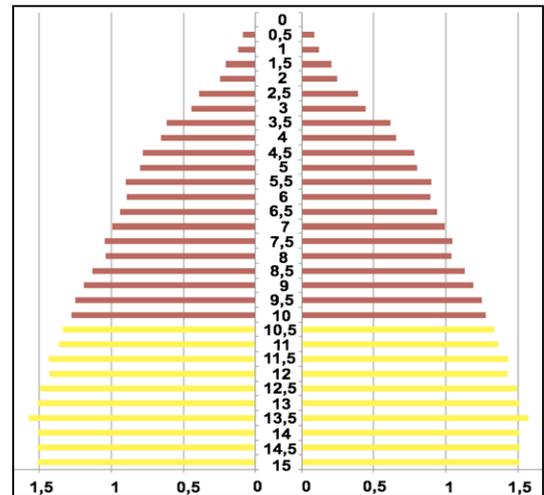


Abb. 22: Interradikuläre Abstände am ZZR2-3 (OK)

Der **Zahnzwischenraum 3-4** ist „gut“ für eine potentielle Schraubeninsertion geeignet (siehe Tab.6). Bei 71,6% der Probanden konnten 2,6mm Knochen nachgewiesen werden. Diese traten im Durchschnitt nach 14mm vom KKP auf (siehe Abb. 23). Bei einer Entfernung von 15mm war allerdings bei einem deutlich größeren Anteil der Untersuchten (57,38 %) das benötigte Mindestknochenmaß vorhanden.

Als Stabilitätsgrundlage mit optimalen Voraussetzungen ist der ZZR3-4 hingegen „schlecht“ geeignet. Es konnte lediglich bei 55,56% das optimale Knochenangebot von 3,2mm bestätigt werden. Die Mittelwertanalyse dieses ZZR verifiziert den inadäquaten Wurzelabstand.

Oberkiefer ZZR 3-4	IRA 2,6 mm	IRA 3,2 mm
Insertionseignung	gut	schlecht
Insertion möglich ab	14,0 mm	-
Bestätigungsrate (2,6 mm)	47,06 %	-
Insertionsempfehlung	15,0 mm	
Bestätigungsrate (2,6 mm)	57,38 %	

Tab. 6: Übersicht über den ZZR3-4 (Oberkiefer)

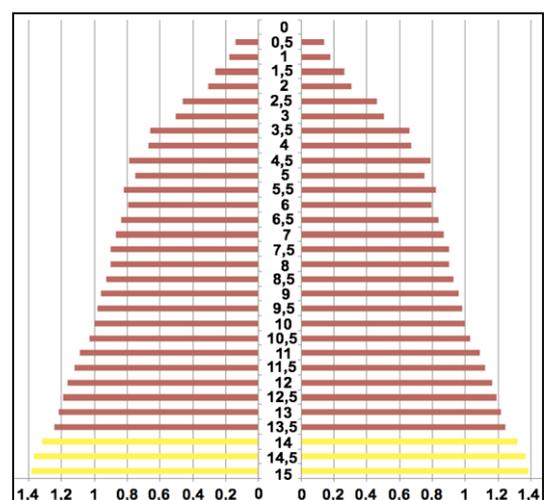


Abb. 23: Interradikuläre Abstände am ZZR3-4 (OK)

Der **Zahnzwischenraum 4-5** zeichnet sich durch „akzeptable“ Eigenschaften als potentieller Implantationsort aus (siehe Tab.7). Bei 67,53% der Patienten konnte das erforderliche Mindestknochenangebot bestätigt werden. Die Mittelwertanalyse (siehe Abb.24) zeigt deutlich, dass ab einer Entfernung von 9,5mm vom KKP eine potentielle Schraubeninsertion möglich ist. Jedoch ist bei einer Entfernung von 10,0mm häufiger mit dem benötigten Wurzelabstand zu rechnen. An dieser Stelle wurde bei 63,63% der Untersuchten ein interradikulärer Abstand von 2,6mm nachgewiesen.

Für eine Insertion mit optimalen Platzverhältnissen ist dieser ZZR jedoch nur „schlecht“ geeignet. Insgesamt 53,25% der Probanden verfügten über die hierfür benötigten Knochenquantitäten. Die Mittelwertstatistik zeigt klar auf, dass die mittleren Wurzelabstände als optimale Stabilitätsgrundlage unzureichend sind.

Oberkiefer ZZR 4-5	IRA 2,6 mm	IRA 3,2 mm
Insertionseignung	akzeptabel	schlecht
Insertion möglich ab	9,5 mm	-
Bestätigungsrate (2,6 mm)	51,7 %	-
Insertionsempfehlung	10 mm	
Bestätigungsrate (2,6 mm)	63,63 %	

Tab. 7: Übersicht über den ZZR4-5 (Oberkiefer)

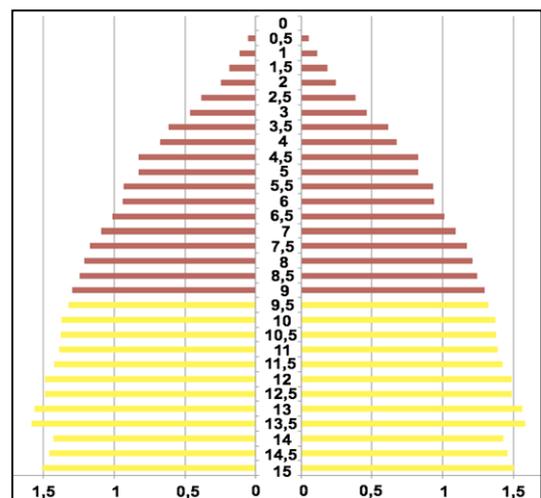


Abb. 24: Interradikuläre Abstände am ZZR4-5 (OK)

Der **Zahnzwischenraum 5-6** eignet sich „sehr gut“ zur Schraubenimplantation sowohl im Hinblick als potentielle wie auch als optimale Stabilitätsgrundlage (siehe Tab.8). Unter den Untersuchten konnten bei 89,33% das Mindest- und bei 85,33% das optimale Knochenangebot bestätigt werden. Die Mittelwertstatistik verdeutlicht, dass ab 8,5mm eine potentielle und ab 12,0mm eine optimale Insertionsmöglichkeit besteht (siehe Abb.25). Empfohlen wird jedoch ein Abstand von 12,0mm vom KKP, da an dieser Stelle ein deutlich größerer Anteil der Probanden den erforderlichen Knochenabstand von 2,6mm aufwies.

Oberkiefer ZZR 5-6	IRA 2,6 mm	IRA 3,2 mm
Insertionseignung	sehr gut	sehr gut
Insertion möglich ab	8,5mm	12 mm
Bestätigungsrate (2,6 mm)	51,7 %	69,84%
Insertionsempfehlung	12 mm	
Bestätigungsrate (2,6 mm)	69,84 %	

Tab. 8 : Übersicht über den ZZR 5-6 (Oberkiefer)

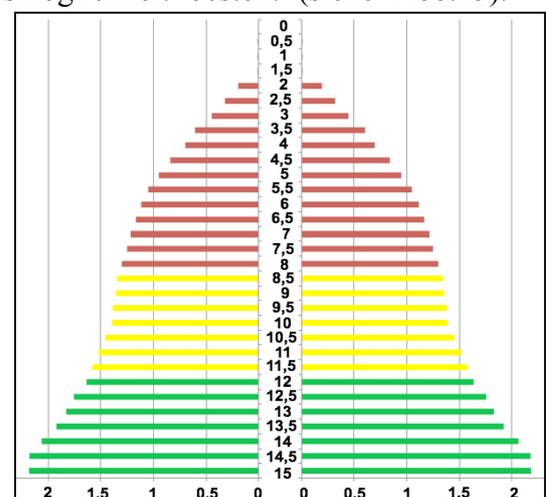


Abb. 25: Interradikuläre Abstände am ZZR5-6 (OK)

Der **Zahzwischenraum 6-7** ist als Insertionsort für Minischrauben „ungeeignet“ (siehe Tab.9). Es konnte bei 45,45% der Probanden das Mindestknochenangebot und bei 36,36% das optimale Knochenangebot gemessen werden. Die Mittelwertanalyse verdeutlicht, dass das interradikuläre Platzangebot als Implantsationsgrundlage nicht ausreicht (siehe Abb.26).

Oberkiefer ZZR 6-7	IRA 2,6 mm	IRA 3,2 mm
Insertionseignung	ungeeignet	ungeeignet
Insertion möglich ab	-	-
Bestätigungsrate (2,6 mm)	-	-
Insertionsempfehlung	-	-
Bestätigungsrate (2,6 mm)	-	-

Tab. 9 : Übersicht über den ZZR 6-7 (Oberkiefer)

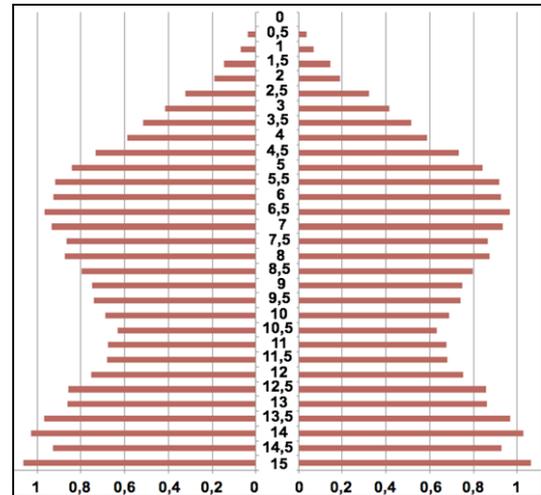


Abb. 26: Interradikuläre Abstände am ZZR6-7 (OK)

4.1.2. Merkmalsabhängige Insertionseignungen

4.1.2.1. Geschlecht

Im Hinblick auf das Auftreten des Mindestknochenangebotes wurden, mit Ausnahme vom ZZR1-1, stets unterschiedliche Insertionsraten zwischen männlichen und weiblichen Probanden festgestellt (siehe Abb. 27; Tab.10).

An je drei Zahzwischenräumen zeigten sich zu gleichen Teilen höhere Insertionsmöglichkeiten bei männlichen (ZZR2-3,3-4,5-6) und weiblichen Patienten (ZZR1-2,4-5,6-7).

Signifikante Unterschiede konnten allerdings nur zugunsten der männlichen Probanden am

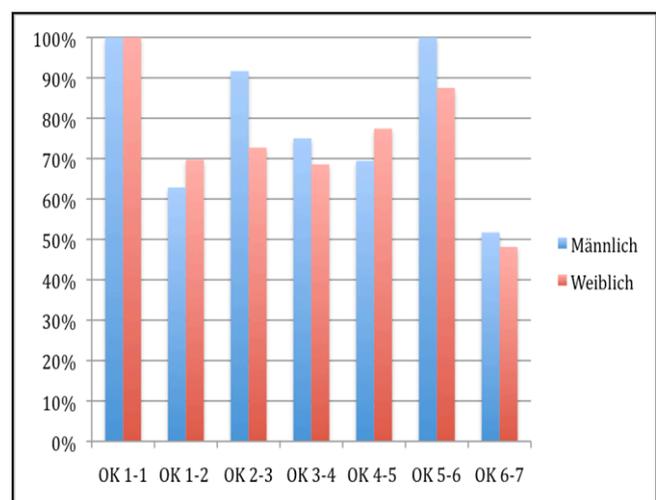


Abb. 27: Die Grafik zeigt, bei welchem Prozentsatz an männlichen und weiblichen Patientinnen das Mindestknochenangebot von 2,6mm bestätigt werden konnte.

ZZR2-3 ($p= 0,038$) und am ZZR5-6 ($p= 0,036$) festgestellt werden. An diesen beiden Interradikularräumen existieren folglich mit großer Wahrscheinlichkeit geschlechtsabhängige Unterschiede im Hinblick auf die Häufigkeit des Auftretens des Mindestknochenangebotes von 2,6mm. Die Differenzen an den übrigen Zahnzwischenräumen zeigen keine signifikanten Zusammenhänge.

<u>2,6 mm</u>	n: Männer	n: Frauen	Signifikanz
Oberkiefer	Insert.mögl./Ges.	Insert.mögl./Ges.	p
ZZR 1-1	17/17	17/17	----
ZZR 1-2	22/35	23/33	0,551
ZZR 2-3	33/36	24/33	0,038
ZZR 3-4	27/36	24/35	0,547
ZZR 4-5	25/36	24/31	0,463
ZZR 5-6	33/33	28/32	0,036
ZZR 6-7	15/29	13/27	0,789

Tab. 10: Geschlechtsabhängige Unterschiede der Insertionsraten (2,6mm Mindestknochenangebot)

Die Analyse des Vorkommens des optimalen Knochenangebotes in den beiden Geschlechtsgruppen zeigt, dass an jedem Zahnzwischenraum zumindest leichte Unterschiede bei den Insertionshäufigkeiten bestehen (siehe Abb.28; Tab.11). Die Verteilung der geschlechtsspezifischen Insertionsvorteile auf die verschiedenen Zahnzwischenräume entspricht der Analyse im Bezug auf das Auftreten des Mindestknochenangebotes. Allerdings konnte nur am ZZR5-6 weiterhin ein signifikanter Unterschied ($p= 0,041$) zugunsten der männlichen Population festgestellt werden. An den restlichen Zahnzwischenräumen konnte kein signifikanter Unterschied im Bezug auf die Häufigkeit des Auftretens eines optimalen Wurzelabstandes von 3,2mm zwischen den Geschlechtern gemessen werden.

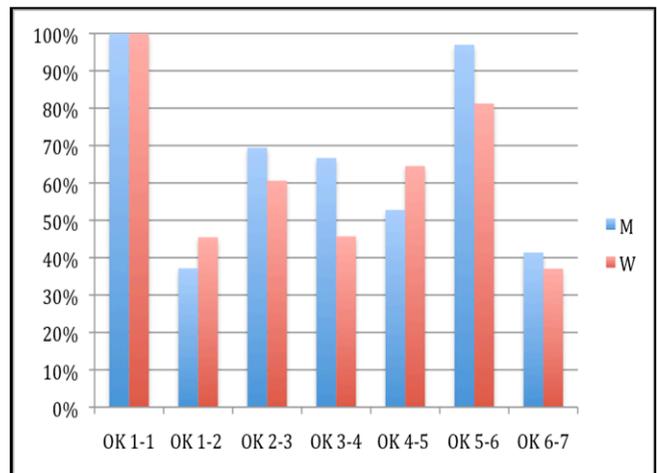


Abb. 28: Die Grafik zeigt, bei welchem Prozentsatz an männlichen und weiblichen Patientinnen das optimale Knochenangebot von 3,2mm bestätigt werden konnte.

<u>3,2 mm</u>	n: Männer	n: Frauen	Signifikanz
Oberkiefer	Insert.mögl./Ges.	Insert.mögl./Ges.	p
ZZR 1-1	17/17	16/17	0,310
ZZR 1-2	13/35	15/33	0,486
ZZR 2-3	25/36	20/33	0,441
ZZR 3-4	24/36	16/35	0,075
ZZR 4-5	19/36	20/31	0,331
ZZR 5-6	32/33	26/32	0,041
ZZR 6-7	12/29	10/27	0,740

Tab. 11: Geschlechtsabhängige Unterschiede in den Insertionsraten (3,2mm optimales Knochenangebot)

4.1.2.2. Weisheitszahnstatus

Im Bezug auf das Mindestknochenangebot treten bei allen Zahnzwischenräumen, bis auf ZZR1-1, Unterschiede in den Insertionsraten auf. Mit Ausnahme ZZR6-7 bestehen lediglich moderate Unterschiede zwischen den beiden Vergleichsgruppen (siehe Abb. 29; Tab.12). Aus Tabelle 12 geht hervor, dass am Zahnzwischenraum 6-7 ein hoch signifikanter ($p=0,000$) Zusammenhang zwischen dem Zahnstatus und den Insertionsmöglichkeiten besteht. Bei Patienten ohne Weisheitszähne ist der intermolare Wurzelabstand und folglich der potentielle Insertionserfolg deutlich größer als bei Patienten mit Weisheitszähnen.

An den übrigen Zahnzwischenräumen konnten keine signifikanten Unterschiede bestimmt werden.

Analoge Ergebnisse zeigt auch die Analyse der optimalen Insertionsmöglichkeiten (siehe Abb.30, Tab.13). Der einzige Zahnzwischenraum mit signifikanten Unterschieden zwischen den beiden Untersuchungsgruppen ist erneut der intermolare ZZR6-7. Probanden ohne Weisheitszähne verfügten hier über deutlich höhere Insertionsmöglichkeiten als die Vergleichsgruppe mit Weisheitszähnen. An den übrigen Oberkieferabschnitten sind zwar häufiger die Patienten ohne Weisheitszähne im Vorteil, allerdings besteht keine

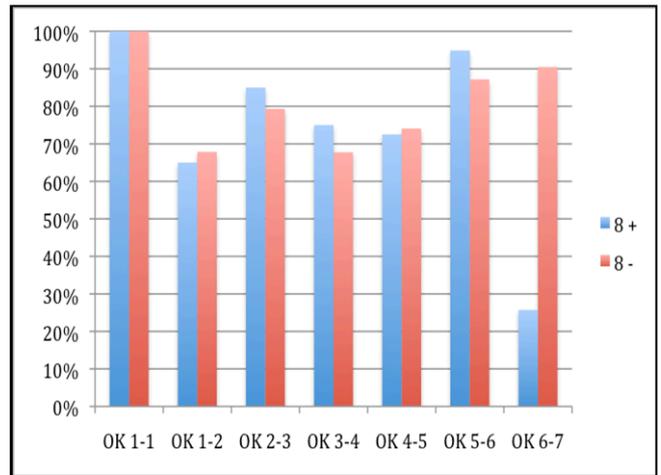


Abb. 29: Aufgeführt sind die Unterschiede beim Auftreten des Mindestknochenangebotes von 2,6mm bei Patienten mit (= 8+) sowie Patienten ohne (= 8-) Weisheitszähnen am Oberkiefer

<u>2,6 mm</u>	n: WHZ vorhand.	n: WHZ fehlen	Signifikanz
Oberkiefer	Insert. mögl./Ges.	Insert. mögl./Ges.	p
ZZR 1-1	20/20	14/14	----
ZZR 1-2	26/40	19/28	0,806
ZZR 2-3	34/40	23/29	0,538
ZZR 3-4	30/40	21/31	0,500
ZZR 4-5	29/40	20/27	0,887
ZZR 5-6	37/39	24/39	0,673
ZZR 6-7	9/35	19/21	0,000

Tab. 12: Zahnstatusabhängige Unterschiede in den Insertionsraten (2,6mm Mindestknochenangebot); WHZ= Weisheitszahn

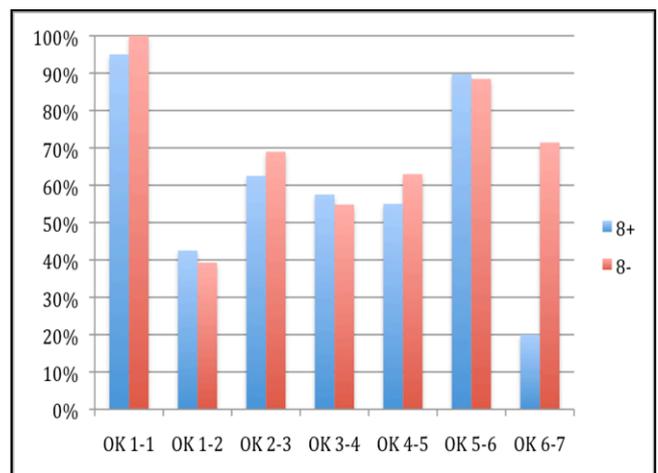


Abb. 30: Aufgeführt sind die Unterschiede beim Auftreten des optimalen Knochenangebotes von 3,2mm bei Patienten mit (= 8+) sowie Patienten ohne (= 8-) Weisheitszähnen am Oberkiefer.

statistische Relevanz.

Tab. 13: Zahnstatusabhängige Unterschiede in den Insertionsraten (3,2mm optimales Knochenangebot) WHZ= Weisheitszahn

<u>3,2 mm</u> Oberkiefer	n: WHZ vorhand. Insert. mögl./Ges.	n: WHZ fehlen Insert. mögl./Ges.	Signifikanz p
ZZR 1-1	19/20	14/14	0,396
ZZR 1-2	17/40	11/28	0,791
ZZR 2-3	25/40	20/29	0,578
ZZR 3-4	23/40	17/31	0,823
ZZR 4-5	22/40	17/27	0,517
ZZR 5-6	35/39	23/26	0,847
ZZR 6-7	7/35	15/21	0,000

4.1.2.3. Alter

Die Auswertung der erhobenen Daten zeigt deutliche Divergenzen in den Insertionsraten der drei Altersklassen bezogen auf das Vorkommen des Mindestknochenangebotes (siehe Abb.31). Statistisch relevante Unterschiede herrschen am ZZR1-2. Hier zeigen die Gruppe der über 40 Jährigen Patienten signifikant höhere Insertionsraten als die 12-20 Jährigen ($p= 0,045$) sowie die der 21-40 Jährigen ($p= 0,016$). Ein weiterer höchst signifikanter Unterschied existiert am ZZR6-7 zwischen den 12-20 Jährigen und den 21-40 Jahre alten Patienten ($p= 0.000$). Bei der mittleren Altersklasse trat das Mindestknochenangebot erheblich häufiger auf als bei den jüngeren Patienten. Die festgestellten Differenzen der restlichen Zahnzwischenräumen erreichen kein statistisch relevantes Niveau.

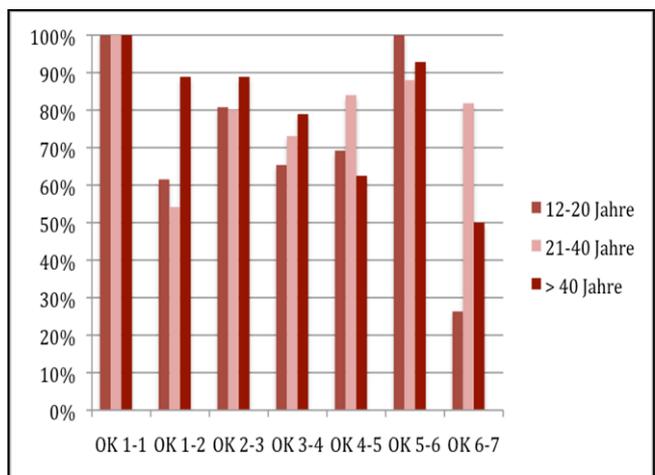


Abb. 31: Altersabhängige Unterschiede im Hinblick auf das Auftreten des Mindestknochenangebotes von 2.6mm

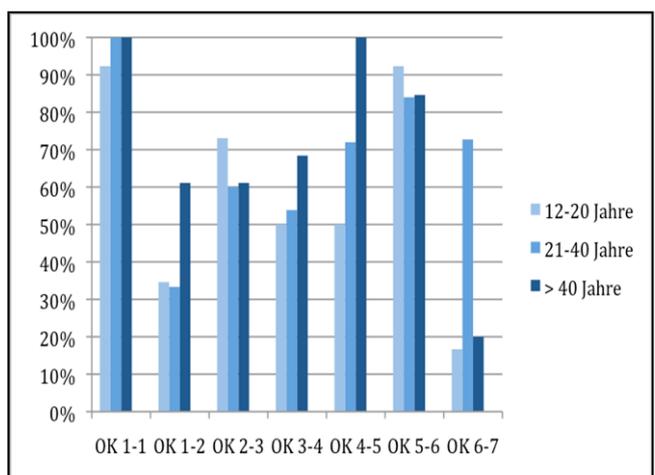


Abb. 32: Altersabhängige Unterschiede im Hinblick auf das Auftreten des optimalen Knochenangebotes von 3,2mm

Die altersabhängigen Unterschiede im Hinblick auf das Auftreten des optimalen Knochenangebotes sind in Abbildung 32 dargestellt. Der einzige hochsignifikante Unterschied existiert am ZZR6-7 zwischen den 21-40 Jährigen und den 12-20 Jährigen ($p=0,000$) sowie den über 41 Jahre alten Probanden

($p=0,005$). An den übrigen Zahnzwischenräumen konnten keine signifikanten Differenzen in der Insertionshäufigkeiten festgestellt werden.

4.1.3. Interne Vergleichsanalyse

Die dargestellte Tabelle (Tab.12) vergleicht die statistisch ermittelten Bohrpunkte aus der Mittelwertanalyse mit den Bohrpunkten, die bei den vermessenen Probanden tatsächlich festgestellt wurden. Es fällt auf, dass an Zahnzwischenräumen die bei einem Großteil der Untersuchten einen potentiellen bzw. optimalen Insertionspunkt zeigten (z.B. ZZR1-1, 4-5), die errechneten Bohrkoordinaten mit den tatsächlich vorhandenen relativ exakt übereinstimmen. Ferner wird deutlich, dass sofern in der Mittelwertanalyse ein entsprechender Insertionsort gefunden wurde, dieser von seiner Position stark mit den tatsächlichen Bohrmöglichkeiten korreliert. Mit Ausnahme von ZZR3-4 betragen die absoluten Abweichungen 0,1-0,8mm zwischen den Koordinatenpaaren. Lediglich am ZZR3-4 gibt es eine stärkere Aberration (2,1mm) zwischen den beiden Werten. Die Lage der tatsächlich vorhandenen Bohrpunkte am ZZR1-2 muss differenziert betrachtet werden.

Oberkiefer	Mittelwertanalyse		Tatsächl. Bohrpunkte	
	<u>2,6mm ab</u>	<u>3,2mm ab</u>	<u>2,6mm ab Ø</u>	<u>3,2mm ab Ø</u>
ZZR 1-1	11,5 mm	13,5 mm	12,1 mm	13,6 mm
ZZR 1-2	-	-	14,3 mm	14,9 mm
ZZR 2-3	10,5 mm	-	11,0 mm	12,5 mm
ZZR 3-4	14,0 mm	-	11,9 mm	14,3 mm
ZZR 4-5	9,5 mm	-	10,1 mm	11,5 mm
ZZR 5-6	8,5 mm	12,0 mm	9,3 mm	11,6 mm
ZZR 6-7	-	-	12,1 mm	13,2 mm

Tab.14 : Vergleich zwischen den statistisch errechneten und den tatsächlich gefundenen Bohrpunkten

An diesem Zahnzwischenraum war nur bei einem sehr geringen Anteil (2,6mm: 60,26%; 3,2mm: 37,18%) des Patientenkollektivs überhaupt eine Insertion möglich. Daher sind die ermittelten Bohrkoordinaten nicht repräsentativ für die Gesamtpopulation, die ohnehin ein sehr eingeschränktes Knochenangebot an diesem Interdentalraum zeigt (siehe Mittelwertanalyse). Die Tatsache, dass am ZZR6-7 laut Mittelwertanalyse keine Insertionen

möglich sind, aber die Werte der tatsächlichen Bohrpunkte Implantationsoptionen suggerieren ist durch die fehlende Fallauswahl bei der Bestimmung der Mittelwerte zu erklären. In die Mittelwertanalyse fließen alle Werte von allen Patienten ungeachtet ihres Geschlechts, ihres Alters und ihres Zahnstatus ein. Die bisherige Ergebnispräsentation hat gezeigt, dass am ZZR6-7 signifikante Unterschiede im Hinblick auf die Insertionsmöglichkeiten der verschiedenen Patientengruppen existieren. Deutlich im Vorteil sind Patienten ohne Weisheitszähne und Patienten im Alter von 21-40 Jahren. Folglich bestimmen die erhobenen Werte dieser Gruppen maßgeblich die Lage der tatsächlichen Bohrpunkte. Die Mittelwertanalyse ist an diesem ZZR weniger aussagekräftig, da sie ebenfalls die niedrigen Wurzelabstände der ungeeigneten Patientengruppen erfasst.

Ergebniszusammenfassung

Mit den **ZZR 1-1** und **5-6** verfügt die Maxilla über zwei universell geeignete Insertionsmöglichkeiten. Das bedeutet, dass an diesen Kieferabschnitten bei sämtlichen Patienten, unabhängig von Geschlecht, Zahnstatus oder Alter, sehr gute Implantationsmöglichkeiten bestanden.

Die **Zahnzwischenräume 2-3, 3-4** und **4-5** können mit beständig hohen Raten für potentielle Insertionen zumindest ein Mindestmaß an Knochen für sämtliche Patienten zur Verfügung stellen. Dabei bietet der **ZZR2-3** noch die konstant höchsten Insertionsmöglichkeiten. Im Hinblick auf eine optimale Insertion sind diese Kieferabschnitte allerdings tendenziell eher schlecht geeignet. Der ZZR2-3 kann ein akzeptables Knochenangebot aufbieten.

Der **ZZR 1-2** scheint ausschließlich bei Patienten im Alter von 41-60 Jahren eine adäquate Knochenmenge zu liefern. Bei Probanden dieser Gruppe war in 90% der Fälle eine Mindest- und in 60% eine Optimalinsertion möglich.

Um mit hoher Wahrscheinlichkeit einen Insertionsort im **ZZR6-7** aufzufinden, sollten die Patienten keine Weisheitszähne haben und im Alter von 21-40 Jahren sein. Sofern sie diese Kriterien erfüllen, ist in 85,71% der Fälle eine Mindest- und in 78,57% eine Optimalinsertion möglich. Bei Patienten im Alter von 12-20 Jahren, sowie mit vorhandenen Weisheitszähnen, ist nur in Ausnahmefällen eine Schraubeninsertion möglich. Eine potentielle Insertion war nur bei 19,23% und eine optimale Implantation in 15,38% der Untersuchten mit diesen Eigenschaften möglich.

4.2. Unterkiefer

4.2.1. Hauptmessungen

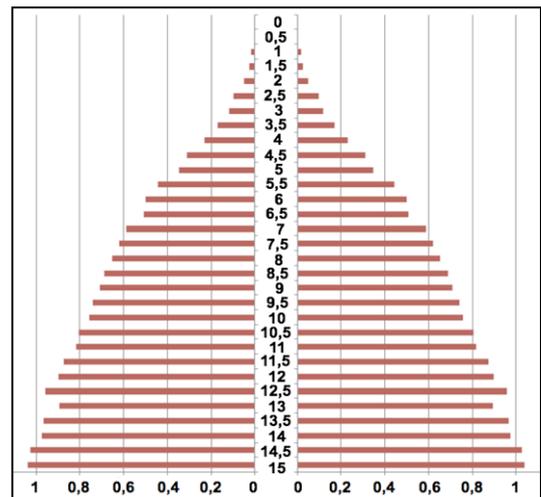
4.2.1.1. Eignungsklassifikationen

Die Insertionseignungen beider Kiefer werden gemeinsam präsentiert (siehe 4.1.1.1. Abb.19)

4.2.1.2. Mittelwertanalyse

Das interradikuläre Knochenangebot des **Zahnzwischenraumes 1-1** ist zu gering um als Insertionsmöglichkeit für Minischrauben zu dienen. Die Mittelwertanalyse (siehe Abb. 33) verdeutlicht diesen Sachverhalt. Unter den Probanden konnte nur bei 46,51% ein potentieller und bei 30,23% ein optimaler Wurzelabstand nachgewiesen werden. Dies bedingt die Klassifikation als ungeeigneter Insertionsort (siehe Tab.15). Einhergehend dessen kann für diesen Kieferabschnitt keine Implantationsempfehlung erfolgen.

Unterkiefer ZZR 1-1	IRA 2,6 mm	IRA 3,2 mm
Insertionseignung	ungeeignet	ungeeignet
Insertion möglich ab	-	-
Bestätigungsrate (2,6 mm)	-	-
Insertionsempfehlung	-	
Bestätigungsrate (2,6 mm)	-	



Tab. 15 : Übersicht über den ZZR 1-1 (Unterkiefer)

Abb. 33: Interradikuläre Abstände am ZZR1-1 (UK)

Der **Zahnzwischenraum 1-2** ist ebenfalls als Stabilitätsgrundlage für eine Schraubenimplantation „ungeeignet“ (siehe Tab.16). Die Mittelwertanalyse dieses ZZR zeigt eindeutig, dass die herrschenden Platzverhältnisse für Insertionen unzulänglich sind (siehe Abb.34). Die vermessenen Abstände sind die geringsten der gesamten Studie. Das erforderliche Mindestknochenangebot konnte bei 12,79% und die optimale Spongiosamenge bei 9,3% nachgewiesen werden. Dies sind die niedrigsten Insertionsquoten aller analysierten Zahnzwischenräume.

Unterkiefer ZZR 1-2	IRA 2,6 mm	IRA 3,2 mm
Insertionseignung	ungeeignet	ungeeignet
Insertion möglich ab	-	-
Bestätigungsrate (2,6 mm)	-	-
Insertionsempfehlung	-	-
Bestätigungsrate (2,6 mm)	-	-

Tab. 16 : Übersicht über den ZZR 1-2 (Unterkiefer)

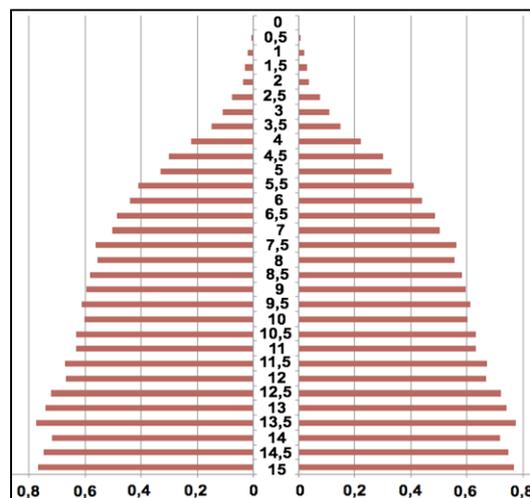


Abb. 34: Interradikuläre Abstände am ZZR1-2 (UK)

Der **Zahnzwischenraum 2-3** eignet sich „gut“ als Insertionsort mit Mindestknochenangebot (siehe Tab.17). Bei 70,11% der Untersuchten konnten die erforderlichen 2,6mm Knochen nachgewiesen werden. Anhand der Mittelwertanalyse wird deutlich, dass der benötigte Wurzelabstand nach 13,5mm Entfernung vom ersten Kontaktpunkt der Zahnkronen auftritt (siehe Abb.35). An dieser Position verfügten 54,39% der Probanden über das Mindestknochenmaß. Bei 14,5mm konnten 59,32% der Untersuchten einen potentiellen Insertionsgrund bieten. Aufgrund des moderat ausgeprägten Unterschiedes erfolgt keine explizite Insertionsempfehlung. Für eine optimale Schraubenimplantation ist der ZZR2-3 als „schlecht“ klassifiziert wurden. Es konnte bei 57,47% der erforderliche Wurzelabstand von 3,2mm nachgewiesen werden. Die Mittelwertanalyse zeigt deutlich, dass diese Spongiosamenge im Populationsdurchschnitt nicht auftritt.

Unterkiefer ZZR 2-3	IRA 2,6 mm	IRA 3,2 mm
Insertionseignung	gut	schlecht
Insertion möglich ab	13,5 mm	-
Bestätigungsrate (2,6 mm)	54,39%	-
Insertionsempfehlung	14,5mm	-
Bestätigungsrate (2,6 mm)	59,32%	-

Tab. 17 : Übersicht über den ZZR2-3 (Unterkiefer)

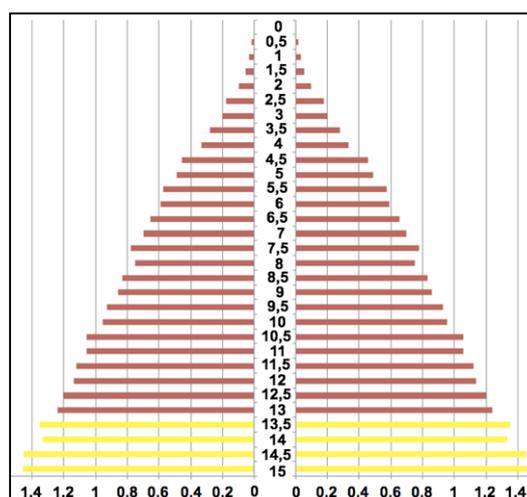


Abb. 35: Interradikuläre Abstände am ZZR2-3 (UK)

Der **Zahnzwischenraum 3-4** zeichnet sich durch „sehr gute“ Insertionsstauglichkeit im Hinblick auf das Vorkommen des Mindestknochenangebotes aus (siehe Tab.18). Die Mittelwertanalyse zeigt, dass ab einer Entfernung von 11,0mm vom KKP ein Wurzelabstand

von 2,6mm vorliegt (siehe Abb.36). An dieser Stelle konnten 55,22% der Patienten das Mindestknochenangebot bestätigen. Die Insertionsempfehlung liegt hingegen bei einem Abstand von 14,0mm, da an dieser Position bei 66,67% der Probanden eine potentielle Schraubeninsertion möglich war.

Für eine optimale Schraubeninsertion ist der ZZR3-4 gut geeignet. Bei 74,39% der Untersuchten konnte das erforderliche Knochenangebot von 3,2mm nachgewiesen werden. Laut Mittelwertanalyse befindet sich dieses bei 15,0mm.

Unterkiefer ZZR 3-4	IRA 2,6 mm	IRA 3,2 mm
Insertionseignung	sehr gut	gut
Insertion möglich ab	11,0 mm	15,0mm
Bestätigungsrate (2,6 mm)	55,22%	67,24%
Insertionsempfehlung	14,0mm	-
Bestätigungsrate (2,6 mm)	66,67%	-

Tab. 18: Übersicht über der den ZZR 3-4 (Unterkiefer)

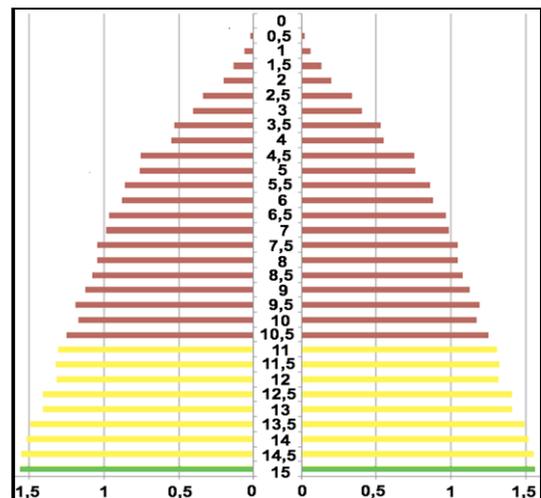


Abb. 36: Interradikuläre Abstände am ZZR3-4 (UK)

Der **Zahnzwischenraum 4-5** verzeichnet eine der höchsten Insertionsraten der gesamten Studie. Bei 98,67% der Patienten konnten potentielle und bei 94,67% optimale Insertionsorte identifiziert werden. Damit geht einher, dass dieser Interdentalraum in beiden Aspekten als „ausgezeichneter“ Implantationsort gilt (siehe Tab.19). Im Populationsdurchschnitt traten potentielle Insertionsmöglichkeiten nach 7,5mm und optimale Wurzelabstände nach 9,5mm auf (siehe Abb.37). An diesen Stellen konnte bei 59,3% bzw. 74,58% der Untersuchten das erforderliche Mindestknochenangebot gemessen werden. Sofern 11,5mm als Implantationsstelle gewählt wird, ist bei 92,86% der Patienten mit einem potentiellen Bohrpunkt zu rechnen.

Unterkiefer ZZR 4-5	IRA 2,6 mm	IRA 3,2 mm
Insertionseignung	ausgezeichnet	ausgezeichnet
Insertion möglich ab	7,5 mm	9,5 mm
Bestätigungsrate (2,6 mm)	59,3%	74,58%
Insertionsempfehlung	11,5 mm	-
Bestätigungsrate (2,6 mm)	92,86%	-

Tab.19 : Übersicht über der den ZZR 4-5 (Unterkiefer)

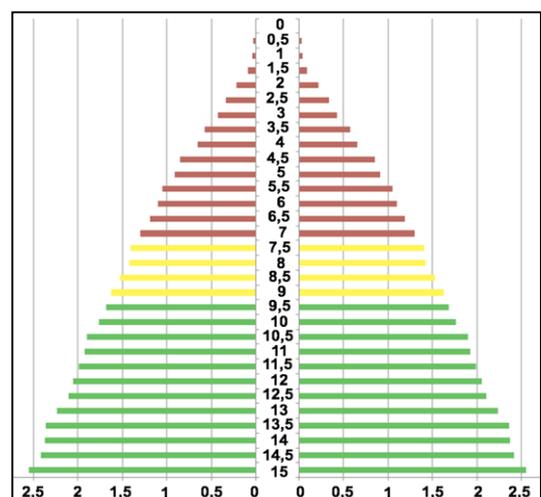


Abb. 37: Interradikuläre Abstände am ZZR4-5 (UK)

Der **Zahnzwischenraum 5-6** eignet sich ebenfalls „ausgezeichnet“ sowohl als potentieller als auch als optimaler Insertionsort von Minischrauben (siehe Tab.20). Bei 97,06% der Untersuchten konnte das Mindestknochenangebot und bei 92,65% das optimale Knochenangebot bestätigt werden. Die Mittelwertanalyse verdeutlicht, dass potentielle Insertionsorte nach 6mm und optimale Bohrpunkte nach 8,5mm auftreten. An diesen Positionen verfügten 52,63% bzw. 90,10% der Probanden über das erforderliche Mindestknochenangebot. Folglich gilt die Position 8,5mm als Insertionsempfehlung für diesen Zahnzwischenraum.

Unterkiefer ZZR 5-6	IRA 2,6 mm	IRA 3,2 mm
Insertionseignung	ausgezeichnet	ausgezeichnet
Insertion möglich ab	6 mm	8,5 mm
Bestätigungsrate (2,6 mm)	52,63%	90,19%
Insertionsempfehlung	8,5 mm	-
Bestätigungsrate (2,6 mm)	90,19%	-

Tab. 20 : Übersicht über der den ZZR5-6 (Unterkiefer)

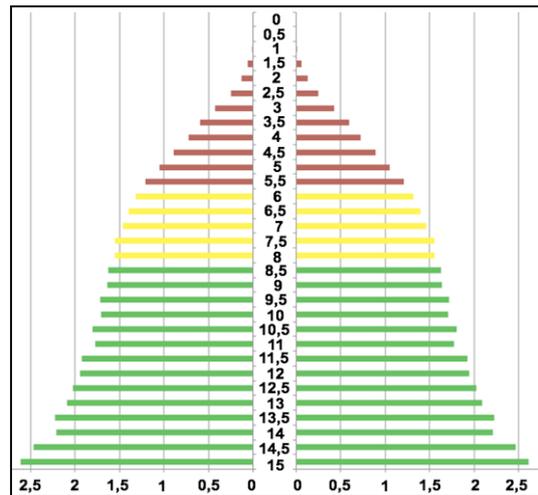


Abb. 38: Interradikuläre Abstände am ZZR5-6 (UK)

Der intermolare **Zahnzwischenraum 6-7** verfügt mit Insertionsraten von 94,12% für potentielle und 94,67% für optimale Schraubeninsertionen über „ausgezeichnete“ Insertionstauglichkeiten in beiden Kategorien (siehe Tab.21). Die potentiellen Bohrpunkte traten durchschnittlich nach 5,5mm Entfernung vom Kronenkontaktpunkt auf (siehe Abb.39). An dieser Stelle konnte bei 58,0% der Patienten das Mindestknochenangebot bestätigt werden. Das optimale Knochenangebot trat gemittelt nach 7mm auf. Diese Position gilt als Implantationsempfehlung, da bei 7mm 81,48% der Probanden über einen Wurzelabstand von 2,6mm verfügten.

Unterkiefer ZZR 6-7	IRA 2,6 mm	IRA 3,2 mm
Insertionseignung	ausgezeichnet	ausgezeichnet
Insertion möglich ab	5,5 mm	7 mm
Bestätigungsrate (2,6 mm)	58,0%	81,48%
Insertionsempfehlung	7 mm	-
Bestätigungsrate (2,6 mm)	81,48%	-

Tab.21: Übersicht über den ZZR6-7 (Unterkiefer)

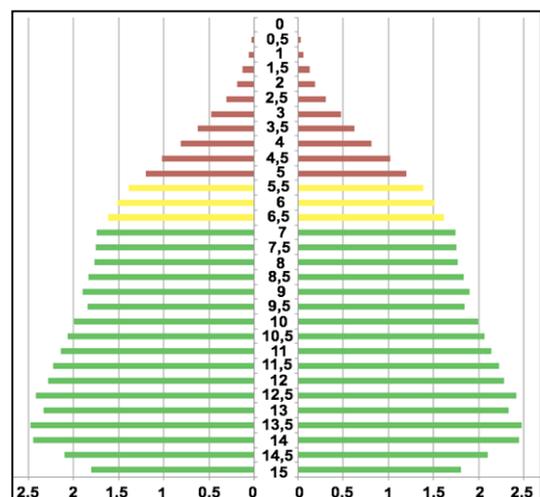


Abb. 39: Interradikuläre Abstände am ZZR6-7 (UK)

4.2.2. Merkmalsabhängige Insertionseignungen

4.2.2.1. Geschlecht

Im Bezug auf das erforderliche Mindestknochenmaß ist auffällig, dass die Abweichungen in den Insertionsmöglichkeiten bis auf eine Ausnahme (ZZR2-3) nur marginal ausgeprägt sind. (Abb.40; Tab.22). Im Gegensatz zum Oberkiefer konnten im Hinblick auf das Auftreten des Mindestknochenangebotes im Unterkiefer an keinem Zahnzwischenraum ein signifikanter geschlechtsabhängiger Unterschied festgestellt werden. Folglich ist davon auszugehen, dass das Geschlecht keinen relevanten Einfluss auf potentielle Insertionsmöglichkeiten im Unterkiefer hat.

Die Analyse des Auftretens des optimalen Knochenangebotes (siehe Abb.41; Tab.23)) zeigt, dass sich die statistischen Unterschiede in vielen Fällen etwas vergrößert haben.

Weiterhin besteht ein deutlicher Spitzenwertanteil auf Seiten der weiblichen Probanden. Die männlichen Patienten besitzen lediglich an ZZR2-3 und 3-4 einen minimalen Vorteil gegenüber den Frauen. Signifikante Unterschiede konnten zugunsten der Frauen an den Zahnzwischenräumen 4-5 ($p=0,028$) sowie 6-7 ($p=0,035$) errechnet werden.

An den übrigen Interradikularräumen konnten keine relevanten geschlechtsabhängigen Differenzen in den Auftrittshäufigkeiten des

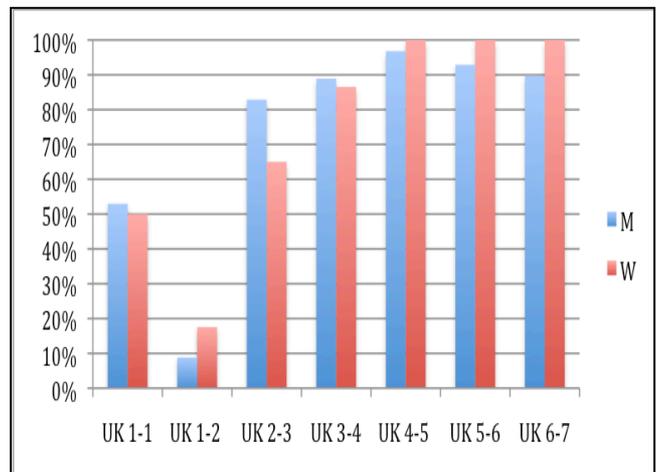


Abb. 40: Geschlechtsspezifische Unterschiede im Hinblick auf das Auftreten des Mindestknochenangebotes von 2,6mm.

<u>2,6 mm</u>	n: Männer	n: Frauen	Signifikanz
Unterkiefer	Insert. mögl./Ges.	Insert. mögl./Ges.	p
ZZR 1-1	9/17	10/20	0,858
ZZR 1-2	3/34	7/40	0,277
ZZR 2-3	29/35	26/40	0,081
ZZR 3-4	32/36	32/37	0,755
ZZR 4-5	30/31	35/35	0,284
ZZR 5-6	26/28	32/32	0,124
ZZR 6-7	26/29	31/31	0,066

Tab. 22: Geschlechtsabhängige Unterschiede der Insertionsraten (2,6mm Mindestknochenangebot)

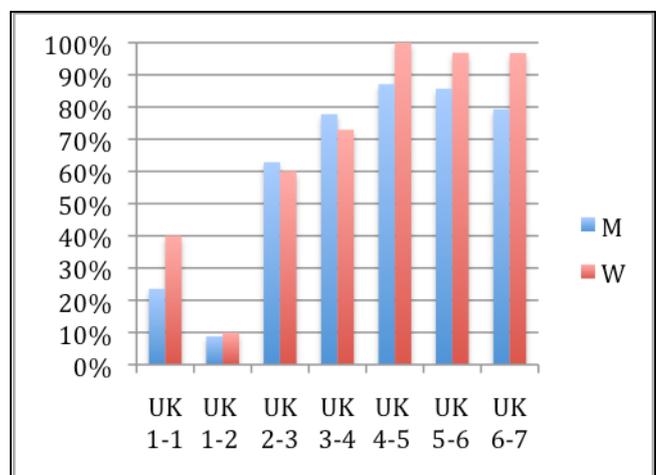


Abb. 41: Geschlechtsspezifische Unterschiede im Hinblick auf das Auftreten des optimalen Knochenangebotes von 3,2mm.

optimalen Knochenangebotes von 3,2mm nachgewiesen werden.

<u>3,2 mm</u>	n: Männer	n: Frauen	Signifikanz
Unterkiefer	Insert. mögl./Ges.	Insert. mögl./Ges.	p
ZZR 1-1	4/17	8/20	0,286
ZZR 1-2	3/34	4/40	0,863
ZZR 2-3	22/35	24/40	0,800
ZZR 3-4	28/36	27/37	0,634
ZZR 4-5	27/31	35/35	0,028
ZZR 5-6	24/28	31/32	0,119
ZZR 6-7	23/29	30/31	0,035

Tab. 23: Geschlechtsabhängige Unterschiede der Insertionsraten (3,2mm optimales Knochenangebot)

4.2.2.2. Weisheitszahnstatus

Aus den gesammelten Daten geht hervor, dass weder im Hinblick auf das Vorkommen des erforderlichen Mindestknochenangebotes noch des optimalen Wurzelabstandes im Unterkiefer kein signifikanter Unterschied zwischen Patienten mit und ohne Weisheitszähnen festgestellt werden konnte (siehe Abb.42; Tab. 24). Ein mit den Ergebnissen des Oberkiefers vergleichbarer Einfluss auf das vorhandene Platzangebot scheint für die zusätzlichen Zahnanlagen der Mandibula nicht zu existieren. Aufgrund der nur marginal ausgeprägten Differenzen wird auf eine detailliertere Darstellung des Sachverhaltes an dieser Stelle verzichtet.

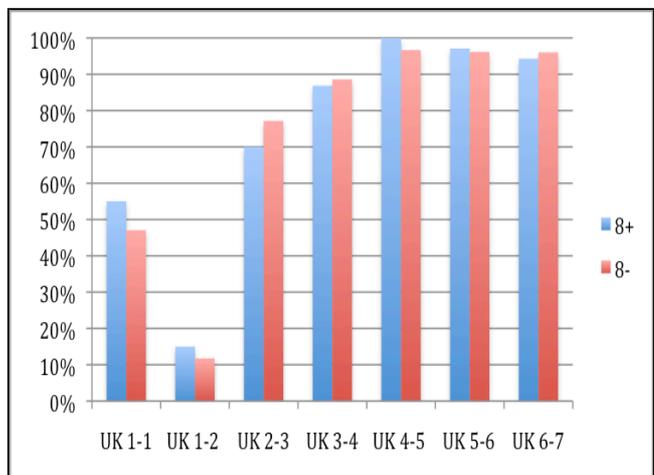


Abb. 42: Aufgeführt sind die Unterschiede beim Auftreten des Mindestknochenangebotes von 2,6mm bei Patienten mit (= 8+) sowie Patienten ohne (= 8-) Weisheitszähnen am Unterkiefer

Tab. 24: Zahnstatusabhängige Unterschiede in den Insertionsraten (2,6mm Mindestknochenangebot); WHZ= Weisheitszahn

<u>2,6 mm</u>	n: WHZ vorhand.	n: WHZ fehlen	Signifikanz
Unterkiefer	Insert. mögl./Ges.	Insert. mögl./Ges.	p
ZZR 1-1	11/20	8/17	0,630
ZZR 1-2	6/40	4/34	0,685
ZZR 2-3	28/40	27/35	0,485
ZZR 3-4	33/38	31/35	0,822
ZZR 4-5	36/36	29/30	0,270
ZZR 5-6	33/34	25/26	0,847
ZZR 6-7	33/35	24/25	0,764

4.2.2.3. Alter

Im Hinblick auf das Auftreten des Mindestknochenangebotes (siehe Abb.43) von 2,6mm wurde am Zahnzwischenraum 5-6 ein signifikanter Unterschied in den Insertionsraten der 12-20 Jährigen und den über 40 Jahre alten Patienten festgestellt ($p=0,044$). Die jungen Patienten konnten deutlich häufiger den benötigten Wurzelabstand von 2,6mm aufweisen als die älteste der drei Vergleichsgruppen. Die Divergenzen der restlichen Zahnzwischenräume erreichten kein statistisch relevantes Niveau.

Die statistische Auswertung der optimalen Insertionsorte ergab, dass es am intermolaren Zahnzwischenraum 6-7 einen signifikanten Unterschied ($p= 0,018$) zwischen den 12-20 Jährigen und den 21-40 Jahre alten Probanden gibt (siehe Abb.44). Bei den Patienten der mittleren Altersgruppe war der optimale Wurzelabstand deutlich häufiger vorhanden als in der jüngeren Vergleichsgruppe. An den übrigen Abschnitten des Unterkiefers konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden.

4.2.3. Interne Vergleichsanalyse

Die vorliegende Tabelle (siehe Tab.25) zeigt, dass eine starke Korrelation zwischen den statistisch errechneten und den tatsächlich gemessenen Bohrkoordinaten besteht. Die absoluten Abweichungen betragen 0,0-1,3mm. Eine exakte Übereinstimmung beider Wertepaare findet sich am ZZR5-6. Die größte Abweichung von 1,3mm bezüglich der Lage des optimalen Insertionsortes liegt am ZZR3-4. Die dargestellten tatsächlich vorhandenen

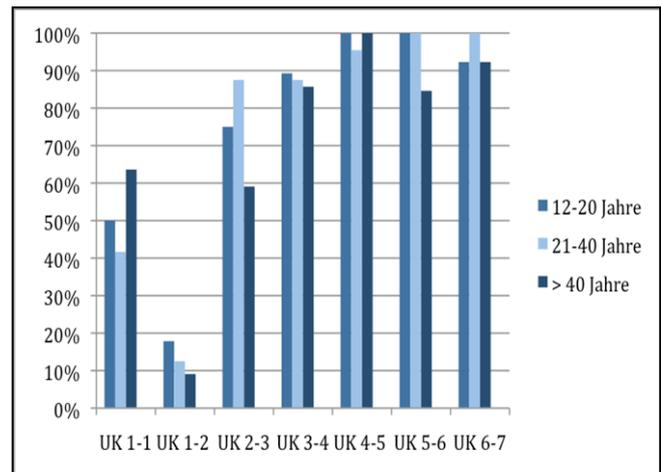


Abb. 43: Aufgeführt sind altersabhängige Unterschiede beim Auftreten des Mindestknochenangebotes von 2,6mm.

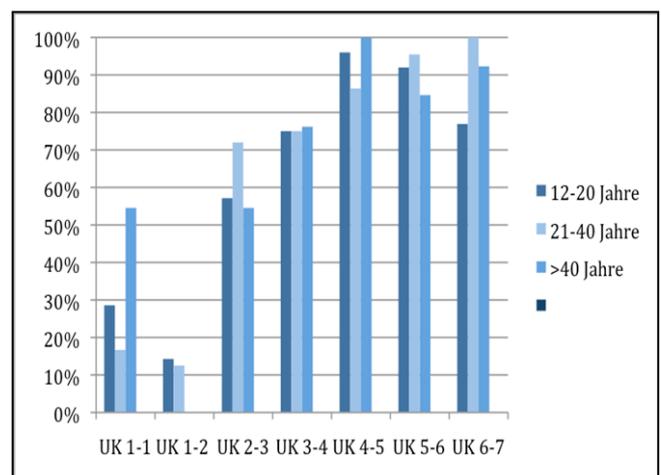


Abb. 44: Aufgeführt sind altersabhängige Unterschiede beim Auftreten des optimalen Knochenangebotes von 3,2mm.

Bohrmöglichkeiten an den ZZR1-1 und 1-2 müssen differenziert betrachtet werden. Da an diesen beiden Unterkieferabschnitten nur bei sehr wenigen Probanden überhaupt

Unterkiefer	<u>Mittelwertanalyse</u>		<u>Tatsächl. Bohrpunkte</u>	
	<u>2,6mm ab</u>	<u>3,2mm ab</u>	<u>2,6mm ab Ø</u>	<u>3,2mm ab Ø</u>
ZZR 1-1	-	-	14,3 mm	14,5 mm
ZZR 1-2	-	-	13,8 mm	15,0 mm
ZZR 2-3	13,5 mm	-	12,9 mm	14,4 mm
ZZR 3-4	11,0 mm	15,0 mm	11,8 mm	13,7 mm
ZZR 4-5	7,5 mm	9,5 mm	8,5 mm	10,0 mm
ZZR 5-6	6,0 mm	8,5 mm	6,0 mm	8,5 mm
ZZR 6-7	5,5 mm	7,0 mm	6,4 mm	8,0 mm

Tab.25 : Vergleich zwischen den statistisch errechneten und den tatsächlich gefundenen Bohrpunkten

entsprechende Wurzelabstände auftraten (ZZR1-1: 46,51% bzw. 30,23%; ZZR1-2: 12,79% bzw. 9,3%), spiegeln diese Werte nicht die durchschnittlichen Platzverhältnisse der Gesamtpopulation wieder.

Abschließend zeigt dieser Vergleich, dass die anhand der Mittelwerte errechneten Bohrpunkte verlässlich die Lage der tatsächlichen Bohrpunkte anzeigen. Von einer gruppenspezifischen Verzerrung der Ergebnisse im Bezug auf individuelle Extremwerte ist nicht auszugehen

Ergebniszusammenfassung

Der Unterkiefer bietet zahlreiche qualitativ hochwertige Insertionsregionen, bei denen unabhängig vom Patientengeschlecht, -alter und Zahnstatus mit einem hohen Implantationserfolg zu rechnen ist. Diese Abschnitte liegen distal der Eckzähne, also an den **Zahnzwischenräumen 3-4, 4-5, 5-6 und 6-7**. Ungeeignete Insertionsstellen sind die **ZZR 1-1 und 1-2**. In diesem Kieferbereich war nur vereinzelt das erforderliche Mindestknochenangebot aufzufinden. Von einer etwaigen Schraubenimplantation ist in diesem Abschnitt der Mandibula abzuraten. Für eine potentielle Insertion gut geeignet ist der Interdentalraum **ZZR2-3**. Jedoch ist die erforderliche Knochenmenge für eine optimale Implantation relativ selten zu finden, was diesbezüglich eine Eignungsrestriktion darstellt.

5 Diskussion

Temporäre Verankerungssysteme, insbesondere Minischrauben (siehe Abb. 45), haben in den letzten Jahren in der kieferorthopädischen Praxis zunehmend an Bedeutung gewonnen. Durch ihre unkomplizierte Implantationstechnik, ihre verhältnismäßig niedrigen Kosten, ihre direkte Belastbarkeit und dem meist komplikationsfreien Verlauf für die Patienten zeichnet sich dieses innovative Behandlungskonzept durch steigende Popularität auch unter niedergelassenen Kieferorthopäden aus. In der praktischen Anwendung zeigten sich allerdings Verlustraten der Minischrauben von 9,5-24,6 % (Chen et al. 2008), was darauf schließen lässt, dass die Faktoren, die unmittelbaren Einfluss auf den Erfolg und das Ergebnis einer schraubengestützten orthodontischen Behandlung haben, komplexer sind als zunächst angenommen. In den letzten Jahren wurde anhand von zahlreichen Studien ein Großteil dieser Faktoren entdeckt und ihre Bedeutung für das Verhalten von Minischrauben analysiert. Konkrete und praktisch anwendbare Insertionsleitlinien für eine erfolgreiche Schraubenimplantation sind allerdings nur für relativ wenige dieser Faktoren bekannt. Die vorliegende Studie wurde zur näheren Aufklärung dieser Problematik durchgeführt.



Abb. 45:
Minischraube

5.1. Hauptmessung

5.1.1. Fallauswahl

Bei der Fallauswahl wurden zahlreiche Ausschlusskriterien wie mangelnde Bildqualität, falsche Positionierung des Kopfes oder atypische anatomische Verhältnisse angewendet. Eine derartige Selektion des Bildmaterials ist notwendig, da vor allem bei Patienten mit ausgeprägten Kieferanomalien die vorliegenden Wurzelabstände nicht repräsentativ für die der Allgemeinbevölkerung sind. Dadurch könnten die errechneten Mittelwerte der Wurzelabstände in besonderem Maße zu individuellen Sonderfällen hin verzerrt werden. Die korrekte Einstellung der Untersuchungsebene zur Okklusionsebene ist relevant, damit bei der späteren Vermessung definitiv der tatsächliche Abstand zwischen den Wurzeln gemessen werden konnte und projektionsbedingte Messwertverzerrungen vermieden wurden.

Letztendlich entstand ein Patientenkollektiv, das bezüglich der verschiedenen Persönlichkeitsfaktoren (Geschlecht, Alter, Zahnstatus) aus ausgeglichen großen Gruppen bestand. Problematisch zu sehen ist, dass aufgrund der Ausschlussfaktoren nur sehr wenige Patienten (insgesamt zwei) über 60 Jahren mit in die Studie aufgenommen wurden. Insbesondere bei älteren Patienten ergab sich im Grossteil der Fälle, aufgrund von Interferenzen mit permanentem Zahnersatz, eine mangelhafte Bildqualität,

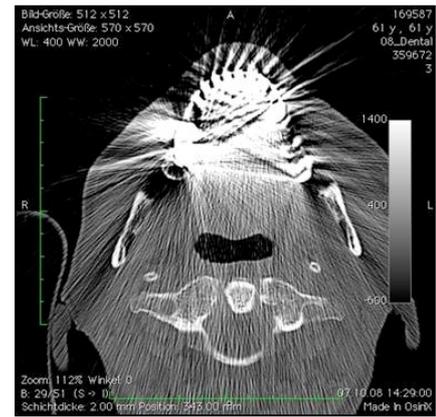


Abb. 7: Zahnersatz im CT

sodass eine valide und zuverlässige Auswertung nicht durchzuführen war (siehe Abb. 7). Zusätzlich fehlten bei Probanden im Alter von über 60 Jahren in der Regel zahlreiche Zähne, wodurch Vermessungen in diesen Kieferabschnitten nicht durchgeführt werden konnten. Damit geht einher, dass die Erkenntnisse dieser Studie nicht repräsentativ für diese Altersklasse sind. Allerdings muss festgehalten werden, dass das Konzept der Minischrauben primär für jüngere Patienten relevant ist, die noch keine kieferorthopädische Behandlung abgeschlossen haben. Folglich stellt der Ausschluss der älteren Patienten kein Hindernis für die praktische Anwendbarkeit der Ergebnisse dieser Studie dar.

5.1.2. Messmethodik und –durchführung

Verwendung von DVT-Aufnahmen

Als Untersuchungsgrundlage dieser Studie wurden digitale Volumentomographien gewählt. Alternative Bildgebungsverfahren wie eine klassische PSA/OPT-Aufnahme oder Schnittbilder der Computertomographie wären für diese Studie nicht geeignet gewesen.

Aufgrund der Krümmung des Zahnbogens kommt es bei dem Summationsbild einer OPT-Aufnahme zwangsläufig zu inakkuraten Darstellungen der tatsächlichen Platzverhältnisse. Verfahrensbedingt erfolgt eine vergrößerte Abbildung der anatomischen Strukturen. Messungen sind zwar anhand von Schablonen möglich, jedoch ist diese Methode aufwendig und nicht ausreichend präzise. Aus diesem Grund sind OPT-Aufnahmen für eine derartige Studie ungeeignet, auch wenn sie die niedrigste Strahlenbelastung der diskutierten Bildgebungsverfahren für den Patienten aufweisen.

Die DVT-Technik zeigt auch im Vergleich zum CT zahlreiche Vorteile im Hinblick auf die Implantationsplanung. Bei der kostengünstigeren DVT-Aufnahme wird im Gegensatz zum CT ein kegelförmiges Strahlenbündel erzeugt („cone beam CT“). Im letztendlichen Bild

erfolgt eine detailliertere Darstellung mit höherer Auflösung von kontrastreichen Strukturen (z.B. Zähnen, Kieferknochen) als in vergleichbaren CT-Bildern (Arai et al. 1999; Honda et al. 2001; Hashimoto et al. 2003). Diese metrisch exakte Abbildung ist vorteilhaft für die Durchführung von Abstandsmessungen. Die DVT-Technik ist zudem weniger anfällig für Interferenzen mit permanentem Zahnersatz (Schulze et al. 2005). Ein Vorteil von CT-Geräten ist die bessere Darstellung von Weichgewebsstrukturen. Dies ist jedoch im Zusammenhang mit dieser Studie nicht relevant. Ein weiterer entscheidender Vorteil gegenüber dem CT ist die deutlich niedrigere Strahlendosis, die bei einer DVT Aufnahme verwendet wird. Sie liegt in der Regel zwischen der einer OPT- und einer CT-Aufnahme (Möbes et al. 2000; Goch et al. 2001). Die effektive Strahlendosis einer DVT-Untersuchung beträgt je nach DVT- bzw. CT-Gerät nur 1/100 - 1/400 der Dosis einer konventionellen CT-Aufnahme (Arai et al. 2001; Hashimoto et al. 2003). Dies allein ist bei der Behandlung von jungen Patienten ein bedeutender Grund, DVT- Untersuchungen gegenüber CT-Aufnahmen zu bevorzugen. Berücksichtigt man den erheblich detaillierteren Informationsgehalt einer überlagerungsfreien Schnitt-bilddiagnostik, ist die DVT-Aufnahme derzeit das Mittel der Wahl zur Bildgebung bei geplanten kieferorthopädische Implantationseingriffen.

Bestimmung des erforderlichen Knochenangebotes

Für diese Studie wurden als Grenzwerte für eine potentielle bzw. optimale Schraubeninsertion die Wurzelabstände von 2,6mm bzw. 3,2mm festgelegt. Diese erforderlichen Knochenmengen ergeben sich aus der Kombination von Stabilitäts-, Sicherheits- und Funktionalitätsaspekten.

Anders als bei vielen anderen kieferorthopädischen Implantaten wie z.B. bei Gaumenimplantaten oder Onplants findet bei Minischrauben aufgrund ihrer Oberflächenstruktur vergleichsweise wenig Osseointegration statt (Costa et al. 1998; Yamada & Shibasaki 2001; Huja et al. 2006). Sie erhalten ihre Stabilität weitestgehend durch mechanische Retention im Kieferknochen (Costa et al 1998, Miyawaki et al. 2003). Das periimplantäre Knochenangebot hat somit, neben der Dicke der Kortikalis, einen entscheidenden Einfluss auf die Stabilität der Schraube, ihre Belastbarkeit und letztendlich auf den Erfolg der orthodontischen Behandlung



Abb.46: Topografische Lage einer Minischraube zur Kortikalis und Spongiosa der Mandibula.

(siehe Abb.46). Hu et al. (2009) konstatierten, dass für eine stabile Schraubenimplantation ein interdentaler Abstand von mindestens 3 mm erforderlich sei. Poggio et al. (2005) sahen in einem Knochenangebot von 1 mm rund um das Implantat das erforderliche Mindestmaß. Bei der Wahl des Insertionsortes bzw. des benötigten Interdentalabstandes muss allerdings auch der eingesetzte Schraubendurchmesser berücksichtigt werden. Während Morris et al. (2001) herausgefunden haben, dass das Verankerungspotential positiv mit dem Schraubendurchmesser korreliert, wäre für den behandelnden Kieferorthopäden eine möglichst geringe Schraubendimension wünschenswert. Dadurch stünde vergleichsweise mehr Knochenmasse als Stabilitätsgrundlage zur Verfügung und eine implantationsbedingte Verletzung von angrenzenden anatomischen Strukturen wie Zahnwurzeln könnte leichter vermieden werden. Während der Insertion werden die Schrauben allerdings erheblichen mechanischen Belastungen ($>20\text{Ncm}$) ausgesetzt, die insbesondere bei geringem Implantatsdurchmesser ($<1,4\text{mm}$) überproportional häufig zu einer Fraktur der Schraube führen können. Ab einem Drehmoment von 20-25 Ncm (Billen 2009; Wilmes & Drescher 2009) erhöht sich die Gefahr von Implantatsfrakturen sowie von Nekrosen und lokaler Ischämie im Insertionsgebiet (Meredith 1998). Studien (Sung et al. 2006) haben bestätigt, dass die Drehmomentbelastung von mehr als 20Ncm während der Insertion erst ab einem Schraubendurchmesser von 1,5-1,6 mm problemlos toleriert wird (siehe Abb. 47).

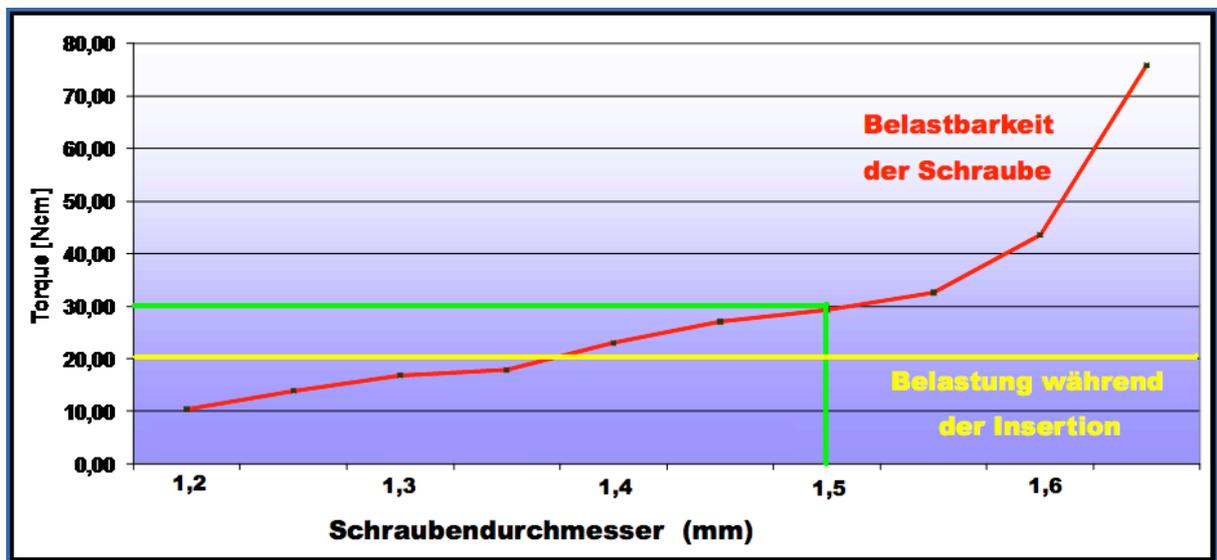


Abb. 47: Diese Grafik verdeutlicht die Drehmomentsbelastbarkeit (= Torque) in Abhängigkeit zum jeweiligen Schraubendurchmesser. Die gelbe Linie stellt die Schraubenbelastung während der Insertion dar. Die grüne Markierung zeigt die optimale Kombination von ausreichender Schraubenstabilität und geringer Implantatsgröße.

Ein Zahnzwischenraum muss folglich mindestens einen Abstand von 2,5mm haben um zum einen den benötigten Schraubendurchmesser (1,5mm) und zum anderen das obligate Knochenangebot (1 mm) als Stabilitätsgrundlage zu beherbergen. Damit bei minimalen lateralen Abweichungen von der optimalen Insertionsposition Stabilitätseinbußen und Wurzelschäden vermieden werden, sollte ein Interdentalraum jedoch mindestens einen radikulären Abstand von 2,6 mm und optimalerweise von 3,2 mm aufweisen.

Eine Verletzung der angrenzenden Zahnwurzel und des dentoalveolären Halteapparates gilt es zu vermeiden. In zwei Tierstudien (Asscherickx et al. 2005; Chen et al. 2008) und einem Bericht über zwei Patienten (Maino et al. 2007) wurde zwar eine posttraumatische Wurzelrehabilitation dokumentiert, jedoch fehlen Erkenntnisse über Langzeitergebnisse, weswegen radikuläre Verletzungen weiterhin zu vermeiden sind. Über Probleme wie Hypersensitivität der Wurzel sowie Frakturen sowohl des Alveolarknochens als auch der Wurzel, werden in diesem Zusammenhang berichtet (Hu et al. 2009). Diese Komplikationen können entweder direkt während der Implantation oder durch therapiebedingte Zahnbewegungen bzw. Implantatsmobilisationen entstehen (Liou et al. 2004). Aus diesem Grund suggerierte Liou einen Sicherheitsabstand von 1mm zwischen dem Implantat und der angrenzenden Zahnwurzel. Deguchi et al. (2006) haben in einem Tierversuch festgestellt, dass eine Verletzungswahrscheinlichkeit von Wurzel- oder Nervengewebe von 5-7% besteht. Um unter anderem dieser Problematik entgegenzuwirken, wurde die Vermessung des interradiikulären Abstandes mittels dieser Studie durchgeführt.

Zudem sollte die sichere Einbringung des Implantates in den Zahnzwischenraum nicht das alleinige Primärziel einer Schraubenbehandlung sein. Anschließend sollte auch eine funktionelle kieferorthopädische Belastbarkeit gewährleistet werden. Dies kann dazu führen, dass sich die direkt an die Schraube angrenzenden Zähne in Richtung des Implantats bewegen. Derartige Zahnbewegungen müssen bei der Wahl des Wurzelabstandes mitberücksichtigt werden und folglich mehr Platz eingeplant werden.

Es zeigt sich, dass ein Wurzelabstand von 2,6mm das Mindestmaß für eine potentiell erfolgreiche Schraubeninsertion darstellt. Er erfüllt ausschließlich die elementaren Anforderungen an einen stabilen Insertionsort, lässt aber kaum Spielraum für angrenzende Zahnbewegungen und laterale Abweichungen bei der Schraubeninsertion. Daher ist ein größerer Wurzelabstand von 3,2mm als optimale Insertionsgrundlage anzusehen.

Auf Grundlage dieser anatomischen Gegebenheiten, die als Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Schraubeninsertion angesehen werden, wurden im Rahmen dieser Studie

sämtliche Interdentalräume vermessen, kartiert und abschließend auf ihre Eignung als Insertionsort bewertet.

In einem Zahnzwischenraum wurde stets der engste Abstand zwischen den beiden Zähnen bestimmt (siehe Abb. 13). Ein derartiger Versuchsaufbau ist notwendig, um die Stellen im Kiefer zu identifizieren, die auf ganzer Länge dem Implantat ein ausreichendes Knochenangebot zur Verfügung stellen können.

Limitationen der Messpräzision

Die Tatsache, dass nach dem heutigen Stand der Technik nur mit fest definierten Schichtdicken und -intervallen gearbeitet werden kann, bedingt eine unausweichliche Fehlerquelle bei der Bestimmung des Kronenkontaktpunktes („KKP“). Jede Schnittebene hat immer eine vorher festgelegte Schichtdicke (siehe Abb. 10). In welcher räumlichen Lage innerhalb dieser Schicht der Kontaktpunkt exakt liegt, kann jedoch nicht definiert werden.

Da mit sich nicht überlappenden Schnittebenen gearbeitet wurde, muss berücksichtigt werden, dass bei jeder Nullpunktbestimmung ein Fehler von maximal 0,249mm auftreten kann, wenn der tatsächliche Kontaktpunkt an dem basalen Ende der Schnittebene lokalisiert ist (siehe Abb. 10). Im Gegenzug kann der wirkliche Kontaktpunkt ebenso exakt auf den Beginn der Schnittebene fallen und folglich fehlerfrei mit der Positionsangabe der Schnittebene übereinstimmen (siehe Abb. 10). Für die praktische Anwendung der Messergebnisse, als

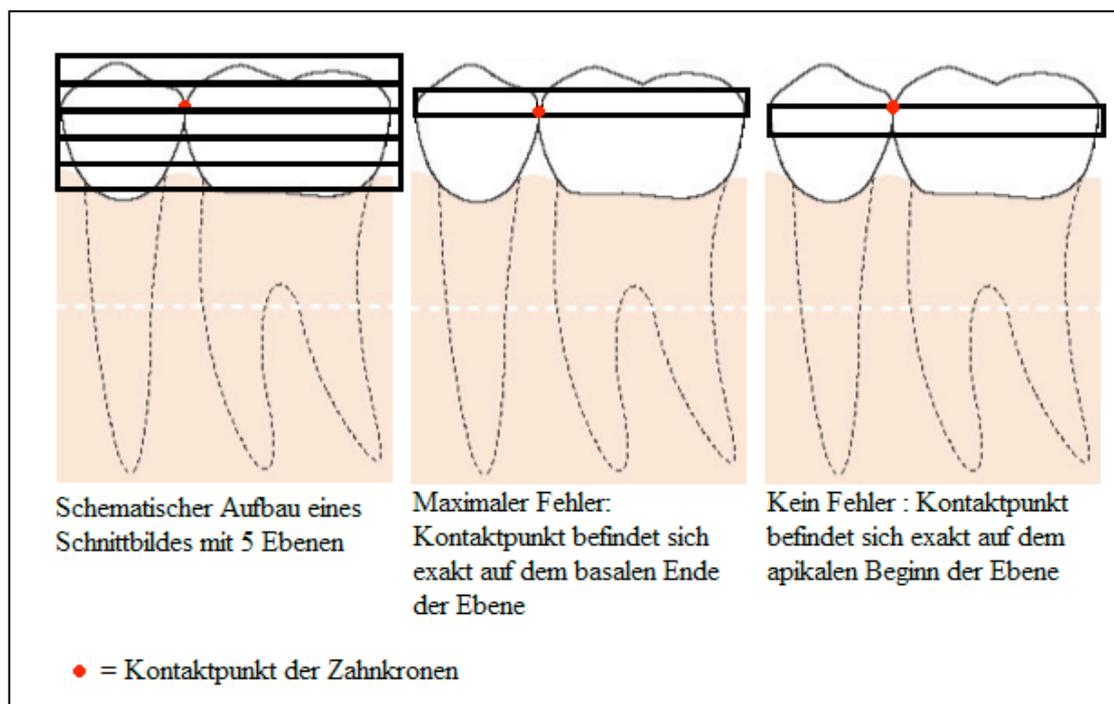


Abb. 10: Einfluss der Schichtdicke auf die Messpräzision

Koordinaten für Schraubeninsertionen in der klinischen Praxis, dürfte allerdings auch ein maximaler Messfehler von 0,249mm keine sonderliche Relevanz haben. Bei der manuellen Implantation von Minischrauben ist eine derartige Präzision bei der Auswahl des Insertionsortes und endgültigen Platzierung der Schraube kaum zu erreichen.

Das OsiriX-Messwerkzeug bestimmt Strecken auf ein tausendstel Millimeter genau. Allerdings ist zu beachten, dass aufgrund der manuellen Einstellung der Messstrecke und der Abhängigkeit von weiteren Faktoren eine derartige Präzision nicht zu erreichen ist. Die Bestimmung des Start- und Endpunktes der Messung wird letztendlich visuell von dem Untersucher definiert, und hängt zusätzlich noch von den Kontrastverhältnissen, der Vergrößerung, der vorliegenden Bildqualität und schließlich auch von dem Auflösungsvermögen des Computermonitors ab. Aus diesen potentiellen Quellen für minimale Messungenauigkeiten resultiert ein verminderter Absolutheitsanspruch der bestimmten Messdistanz im Mikrometerbereich. Diese leichten Messwertvariationen, die unvermeidbar sind, erlauben somit nur Angaben der Messwerte auf ein zehntel bis hundertstel Millimeter genau. In diesem Bereich sind Ergebnisse reproduzierbar und besitzen eine ausreichende Präzision, um als wissenschaftliche Basis für die Beantwortung der vorliegenden Fragestellung dieser Studie zu dienen.

Ein weiterer potentiell limitierender Faktor für die Messpräzision liegt in der Einstellung der korrekten Kontrastverhältnisse. Das menschliche Auge ist lediglich in der Lage etwa 20 verschiedene Graustufen zu unterscheiden. Die Aufnahmen aus DVT-Geräten enthalten an sich allerdings weitaus umfassendere Informationen, die auf der Grundlage von Dichteunterschieden bei der Bestrahlung mit Röntgenstrahlen detektiert und digital gespeichert werden. Am Computer kann nun manuell festgelegt werden, welche Graustufe welchem Dichtewert entsprechen soll. Diese Zuordnung erfolgt über sog. „HE-Werte“. Dabei muss beachtet werden, dass der dargestellte Abstand zwischen den Zähnen durch übermäßige Überblendung, bzw. Verdunkelung nicht verändert wird. Dies stellt einen sehr sensiblen Punkt für die spätere Validität der Messergebnisse dar. Es wurden zwar stets Vergleichsmessungen bei der Kontrastkorrektur durchgeführt (siehe Abb. 11), jedoch beruht die endgültige Einstellung der Kontrastverhältnisse auf der visuellen Beurteilung des Untersuchers innerhalb des definierten Kontrastspektrums. Hieraus können etwaige Messwertaberrationen im Mikrometerbereich resultieren. Diese haben für die praktische Anwendbarkeit der Messergebnisse wahrscheinlich keine klinische Relevanz.

Besonderheiten im Vergleich zu anderen Studien

Die Messmethodik und ihre Durchführungsrichtlinien wurden eigens für diese Studie entwickelt und wurden in dieser Form bisher noch in keiner vergleichbaren Studie durchgeführt. Prinzipiell wurden Abstandsmessungen von Zahnwurzeln im Hinblick auf Schraubenimplantationen bereits von einigen Autoren (Lee et al. 2009, Hu et al. 2009, Poggio et al. 2005, Kim et al. 2009) vorgenommen. Jedoch unterscheidet sich der Aufbau dieser Studie von den in der Literatur genannten Studienkonzepten.

Zum einen wurden bei dieser Studie die Wurzelabstände an allen Zahnzwischenräumen des Ober- und des Unterkiefers vermessen und waren nicht wie bei Kim et al. auf die hintere Maxillarregion beschränkt.

Die Messintervalle mit Schritten von 0,5mm (bis 15mm) und die Messdurchführung mit Parallelkonstruktionen, Vergleichsmessungen (siehe Material und Methode) waren deutlich präziser und detaillierter als in vergleichbaren Arbeiten. Poggio et al. vermaßen die Abstände in 3mm Intervallen (bis 11mm) und Lee et al. in 2mm Schritten (bis 8mm).

Als wichtigster Unterscheidungspunkt ist allerdings die erstmalige Schaffung eines klinisch leicht auffindbaren Platzierungsmarkers zu nennen. Durch die Bestimmung des ersten Kronenkontaktpunktes wird ein fester Bezugspunkt geschaffen, mit dem die übrigen Messwerte in Relation gesetzt werden können. Erst durch diesen Fixpunkt ist es möglich, eine praktisch anwendbare Kartierung der Bohrkoordinaten durchzuführen. Die übrigen Studien gingen entweder von der CEJ („cemento enamel junction“) (Lee et al. 2009, Hu et al. 2009) oder von dem Alveolarkamm (Poggio et al. 2005) aus.

Diese Abweichung von der Messdurchführung der übrigen Studien hat einen starken Einfluss auf die praktische Umsetzbarkeit der Ergebnisse. Ziel dieser Studie ist es, konkrete und leicht anwendbare Implantationsmarker zu ermitteln, die als eindeutige Orientierungsgrundlage beim Auffinden von geeigneten Insertionsorten dienen können. Hierfür sind die CEJ und der Alveolarkamm unzureichend, da sie nicht unmittelbar ersichtlich und als Ausgangspunkt für eine Präzisionsmessung im Millimeterbereich ungeeignet sind. Der erste Kontaktpunkt zwischen zwei Zahnkronen ist hingegen ein eindeutiger und leicht zugänglicher Platzierungsmarker von dem mit einer skalierten Parodontalsonde exakt und unkompliziert der geeignete Insertionsort identifiziert werden kann.

5.1.3. Statistische Auswertung

Seitenkonsolidierung

Die Informationen korrespondierender Zahnzwischenräume eines Kiefers (z.B. 17-16 und 27-26) wurden gemäß der gegenwärtigen wissenschaftlichen Praxis konsolidiert und gemeinsam aufbereitet.

Da der Kiefer symmetrisch aufgebaut ist und sich demnach gegenüberliegende Zahnzwischenräume topografisch entsprechen sollten, erlangt die Studie durch diese Zusammenlegung eine größere Messpräzision, da die statistisch verwendbaren Fallzahlen für die Zahnzwischenräume unter Umständen sogar verdoppelt werden. Durch einen direkten Vergleich der Messwerte korrespondierender interradikulärer Räume konnte dieser Sachverhalt bestätigt werden. Es kommen gelegentlich minimale Abberationen vor, die allerdings keinen relevanten Einfluss auf die Aussagekraft der Ergebnisse haben.

5.1.3.1. Eignungsklassifikation

Die durchgeführte Eignungsklassifikation dient zur prinzipiellen Einschätzung der herrschenden Platzverhältnisse und ermöglicht es, die Insertionsmöglichkeiten und folglich indirekt das vorhandene Knochenangebot an einem Zahnzwischenraum, in klar strukturierte Eignungsklassen einzuordnen. Da dieses Klassifikationssystem speziell für diese Studie entwickelt wurde, ist ein direkter Vergleich der Ergebnisse mit anderen Studien äußerst schwierig. Ein Vergleich der prinzipiellen Lage von Bohrmöglichkeiten zeigt jedoch, dass die Erkenntnisse dieser Studie mit der bereits etablierten Literatur weitestgehend kongruent sind (siehe auch 5.1.3.2). Durch die Eignungsklassifikation sind die Insertionshäufigkeiten und indirekt die lokalen Platzverhältnisse an den Zahnzwischenräumen beurteilbar, jedoch lassen sich anhand dieses Systems keine definitiven Aussagen über den endgültigen Erfolg einer Schraubenimplantation treffen.

Selbst wenn die Grundvoraussetzung für eine Schraubeninsertion durch eine Stabilitätsgrundlage mit adäquatem Knochenangebot gegeben ist, existieren weitere Faktoren, die dennoch zu dem Verlust bzw. Misserfolg einer Minischraubenimplantation führen können. Diese Faktoren lassen sich in anatomische, technische sowie anwender- und patientenspezifische Einflüsse unterteilen. Einen hohen Stellenwert muss den anatomischen (z.B. Kortikalisdicke, Spongiosadichte, etc.) und den patientenbezogenen Aspekten (Alter, Zahnstatus, etc.) zugeschrieben werden, da diese im Gegensatz zu den technischen und

anwenderspezifischen Gegebenheiten fest vorgegeben und unveränderlich sind. In Zukunft wird der wissenschaftliche Fortschritt mit neuartigen Schraubendesigns, innovativen Insertionsverfahren und Implantationsschulungen die Erfolgsquoten von Minischrauben erhöhen. Die grundlegende Anatomie des Kiefers, die individuellen Konstitutionen des Patienten und die Limitationen, die sich daraus für die Anwendungsmöglichkeiten von Minischrauben ergeben, bleiben konstant und unterliegen keinem derartigen Wandel. Sie bilden vielmehr eine unveränderliche Basis, an der sich die künftige Forschung und Entwicklung von Miniimplantaten orientieren wird, um den Fortschritt und die feste Etablierung dieses innovativen Therapiekonzeptes zu ermöglichen. Diese Tatsache verdeutlicht die Bedeutung von Studien wie dieser für das grundsätzliche Verständnis der Einsatzmöglichkeiten von temporären Verankerungssystemen.

Letztendlich wird durch die Ergebnisse dieser Studie, der Kartierung des interradikulären Knochenangebotes, nur einer der wichtigen Stabilitätsfaktoren untersucht. Die wichtigsten dieser weiteren Einflüsse werden in den folgenden Absätzen diskutiert, um die Erkenntnisse dieser Studie in einen übergreifenden Kontext einzuordnen.

Einfluss der Spongiosadichte

Während sich diese Studie im Wesentlichen auf die quantitativen Beschaffenheiten des interradikulären Knochenangebotes des Kiefers konzentriert, haben sich Chun & Lim (2009) vermehrt mit der Dichte der Spongiosa und somit mit den qualitativen Aspekten der Kieferknochen beschäftigt. Sowohl Chun & Lim (2009), als auch Chen et al. (2008) konstatierten, dass Minischrauben höhere Erfolgsquoten aufweisen, wenn sie in einem Gebiet eingebracht werden, welches über eine dichte Spongiosa verfügt.

Sie stellten fest, dass die posterioren Abschnitte der Mandibula signifikant höhere Knochendichten aufweisen als die der Maxilla. Hier liegen selbst die niedrigsten mandibulären Werte in der Regel stets über den maxillären Maximalwerten. Die anterioren Abschnitte unterschieden sich von den Dichtewerten nicht sonderlich.

Die für eine Schraubenimplantation günstigste Kombination aus großem Inter-radikularabstand und hoher Knochendichte befindet sich im Oberkiefer zwischen dem zweiten Prämolaren und dem ersten Molaren. Er verbleibt demnach weiterhin als Ort der ersten Wahl für maxilläre Schraubeninsertionen. Obwohl der tiefere Alveolarraum zwischen den beiden Molaren die dichteste Spongiosa dieser Messposition aufweist, ist der Wurzelabstand in den meisten Fällen für eine Schraubeninsertion zu gering. Im Gegensatz

dazu konnte für den Zahnzwischenraum 2-3, zumindest in den meisten Fällen, das obligate Mindestknochenangebot bestätigt werden, jedoch weist dieser Alveolarabschnitt eine der niedrigsten Knochendichten auf (Chun & Lim 2009). Die höchste Knochendichte der Maxilla befindet sich im kronennahen Bereich zwischen dem ersten und zweiten Schneidezahn, allerdings ist die vorhandene Knochenmenge nicht ausreichend für eine Schraubeninsertion. Bei diesen letztgenannten Interradikularräumen ist demnach mit eingeschränkter Stabilität des Implantats zu rechnen.

In der Mandibula liegen Maximalwerte der Spongiosadichten zwischen den beiden Molaren. Analog zur Maxilla nimmt die Knochendichte in der Mandibula erst im hinteren Bereich, distal des ersten Prämolaren, zu. Dies ist vorteilhaft, da exakt in diesem Kieferbereich die für Schraubenimplantationen gewünschten Knochenmengen vorhanden sind und somit ein prognostisch günstiges Implantationsresultat zu erwarten ist. Dies gilt insbesondere für die Zahnzwischenräume zwischen den beiden Molaren und zwischen dem zweiten Prämolaren und dem ersten Molaren. Theoretisch sind dies die beiden sichersten Insertionsorte, da diese sowohl quantitativ im Hinblick auf die Knochenmenge, als auch qualitativ im Hinblick auf die Knochendichte die jeweils höchsten Werte des gesamten Gebisses aufweisen. Während der Alveolarraum zwischen dem Eckzahn und dem ersten Prämolaren zwar eine akzeptable interradiäre Knochenmenge aufweist, liegt die Knochendichte eindeutig unter den Spitzenwerten im molaren Bereich der Mandibula. Dieser Interdentalraum kann dennoch als Insertionsort in Erwägung gezogen werden, da die ermittelten Dichtewerte vergleichbar mit den Maximalwerten des Oberkiefers sind.

Auch wenn eine gewisse Knochendichte essentiell für eine zuverlässige Schraubenretention ist, kann ein überproportional dichter Knochen auch negative Einflüsse auf die Erfolgsrate einer Schraubenimplantation haben. Studien haben bestätigt, dass es, insbesondere im posterioren Mandibularabschnitt, häufiger zu Schraubenbrüchen und -verlusten kommt (Chen et al. 2007; Wu et al. (2009)). Theorien besagen, dass durch den erhöhten Widerstand, welche die Schraube bei dichtem Knochen überwinden muss, ein größeres Drehmoment notwendig ist (Billen 2009). Dadurch entsteht eine höhere Belastung sowohl für die Schraube, als auch für den periimplantären Knochen (Wu et al. 2009; Wilmes & Drescher 2009). Das größere Drehmoment führt im Insertionsgebiet zu einer überproportional großen Hitzeentwicklung während der Implantation (Cheng et al. 2004; Park et al. 2006). Dies kann die Entstehung von Osteonekrosen begünstigen und folglich die Primärstabilität der Schrauben mindern. Dem Auftreten von Schraubenfrakturen kann durch die Wahl von Implantaten mit einem erhöhten Durchmesser (Morris et al. 2001) oder durch Vorbohrungen entgegengewirkt werden

(Wilmes & Drescher 2009). Die interradikulären Zahnzwischenräume des Unterkiefers sind vor allem im molaren Bereich ausreichend groß, um auch dickeren Implantaten ein adäquates Knochenangebot zur Verfügung zu stellen.

Diese Darstellung verdeutlicht, dass auch in anatomisch geeigneten Implantationsregionen der Erfolg einer Schraubeninsertion nicht garantiert werden kann.

Einfluss der Kortikalisdicke

Ähnliche Problematiken treten auch im Hinblick auf den Einfluss der Kortikalisdicke auf. Baumgaertel & Hans (2009) konstatieren, dass die Dicke der Kortikalis positiv mit der mechanischen Retention des Implantats korreliert. Billen (2009) fand heraus, dass insbesondere bei der direkten Verankerung der überwiegende Kraftanteil auf die Kortikalis übertragen wird. Studien haben bestätigt, dass eine Kortikalisdicke von mindestens 1 mm wichtig für den mechanischen Halt einer Schraube ist (Motoyoshi et al. 2007). Die Dicke der Kortikalis folgt ähnlichen Verteilungsmustern wie auch der Dichte der Spongiosa. Studien konnten zeigen, dass der Unterkiefer, insbesondere in molaren Regionen, über eine dickere Kortikalis verfügt als der Oberkiefer (Deguchi et al. 2006). Die Dicke nahm ebenfalls von anterioren zu posterioren Kieferabschnitten zu (Baumgaertel & Hans 2009).

Im maxillären Frontzahnbereich ist die Kortikalis ausgesprochen dünn und dürfte demnach für die Schraubenretention in diesem Kieferabschnitt nur eine untergeordnete Rolle spielen (Baumgaertel & Hans 2009). Einen begünstigenden Einfluss auf die Stabilität der Implantate hat sie hingegen im bukkalen Oberkieferabschnitt. Somit gilt der Interdentalraum zwischen dem zweiten Prämolaren und dem ersten Molaren im Hinblick auf die bisher diskutierten Eignungsanforderungen weiterhin als theoretisch sicherster Implantationsort in der Maxilla. Obwohl für den Zahnzwischenraum 1-1 im Rahmen dieser Studie ein adäquates Spongiosavorkommen bestätigt werden konnte, stellt die Auswertung der Kortikalisdicke eine klare Limitation der Implantationstauglichkeit dieses Interdentalraums dar.

Die Kortikalisdicke der Mandibula folgt einem analogen Verteilungsmuster. Die Minimalwerte befinden sich im Frontzahnbereich und die hinteren Abschnitte zeichnen sich durch Höchstwerte aus (Baumgaertel & Hans 2009). Die Analyse dieses Faktors bestätigt erneut das ausgeprägte Stabilitätspotential für Minischrauben im hinteren Mandibularbereich. Allerdings konnte analog zur Spongiosadichte in Studien aufgezeigt werden, dass eine massive Kortikalis zu erhöhten Schraubenverlusten führen kann (Wu et al. 2009). Als

Hauptgründe sind erneut häufige Implantatsbrüche, insbesondere bei Schrauben mit vergleichsweise geringem Durchmesser, zu nennen (Wu et al. 2009).

Einfluss benachbarter anatomischer Strukturen

Penetration des Sinus maxillaris

Eine weitere Gefahrenzone existiert im Hinblick auf die Perforation des Sinus maxillaris bei Schraubeninsertionen im Oberkiefer (siehe Abb. 48). Da Titanimplantate von der Schleimhaut gut toleriert werden, sehen Wehrbein et al. (2008) hierin keine relevante klinische Problematik. Andere Autoren wie Poggio (2005) oder Carrano (2005) beurteilen diese Situation etwas kritischer. Poggio et

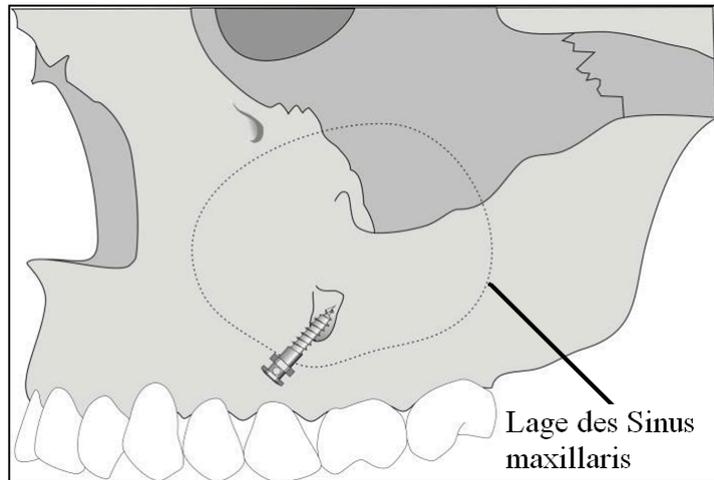


Abb. 48: Schematische Darstellung der Lage des Sinus maxillaris.

al. (2005) haben zur Vermeidung dieses Problems die topographische Lage der Kieferhöhle im Bezug zu potentiellen Schraubenimplantationsorten analysiert und Sicherheitszonen markiert. Sie fanden heraus, dass, sofern die Implantation in einem Bereich von 8mm Entfernung von der „CEJ“ (=cementoenamel junction) stattfindet, eine Schraubenpenetration in den Sinus eher unwahrscheinlich ist. Carano et al. (2005) konstatierten, dass ab einem Abstand von 11mm von dem alveolären Knochenkamm eine große Penetrationsgefahr besteht. In Kombination mit den in dieser Studie erhobenen Interdentalabständen kann nun ansatzweise überprüft werden, ob die ermittelten Implantationsstellen auch bezogen auf die Sicherheitsanforderungen zur Prävention der Sinusperforation geeignet sind. Es ist wichtig an dieser Stelle zu erwähnen, dass in dieser Studie und bei Poggio et al. (2005) und Carano et al. (2005) von verschiedenen Ausgangspunkten gemessen wurde. Während sich diese Studie an dem ersten Kontaktpunkt der Zahnkronen orientiert, begannen Poggio et al. (2005) und Carano et al. (2005) ihre Messungen ab der CEJ bzw. des alveolären Knochenkamms. Die daraus resultierende Differenz ist nur schwer abzuschätzen und variiert in Abhängigkeit von den verschiedenen Zahntypen. Das extensivste maxilläre Knochenangebot liegt zwischen den

beiden ersten Schneidezähnen und zwischen dem zweiten Prämolaren und dem ersten Molaren. Für den frontalen Oberkiefer spielt diese Problematik aufgrund der isolierten Lage ohne Nähe zu den Kieferhöhlen keine Rolle. Interessant ist hingegen die Beziehung zwischen den beiden Sicherheitsaspekten an dem Zahnzwischenraum 5-6. Im Mittel war nach 8,5mm das Mindestknochenangebot und nach 12mm Abstand vom Kronenkontaktpunkt der optimale interradikuläre Abstand vorhanden. Geht man nun von einer Differenz von mindestens 1-2mm zwischen CEJ und KKP aus, liegt das Mindestknochenangebot mit 6,5-7,5mm noch innerhalb der Sicherheitszone von 8mm. Das optimale Knochenangebot tritt allerdings erst nach 10-11mm Entfernung vom CEJ auf und liegt somit an der Grenze zum erhöhten Gefahrenbereich für Sinuspenetrationen. Diese Tatsache ist, insbesondere im Zusammenhang mit Implantationen bei angewinkelten Insertionsachsen, wichtig. Es ergeben sich zwei prinzipielle Bohrpunktkonzepte für diesen Zahnzwischenraum. Zum einen besteht bei einer Platzierung der Schraube außerhalb des von Poggio et al. deklarierten Sicherheitsbereiches eine erhöhte Wahrscheinlichkeit, dass die Schraube in die Kieferhöhle eintritt, allerdings liegt dort auch ein deutlich höheres periimplantäres Knochenangebot vor. Der breitere Interdentalraum bietet ein größeres Stabilitätspotential, ermöglicht ausgedehntere therapeutische Zahnbewegungen und vermindert die Gefahr von implantatsbedingten Verletzungen der Zahnwurzel. Im Gegensatz dazu ist bei der Wahl einer Schraubenposition innerhalb der von Poggio et al. aufgestellten Sicherheitszone die Sinuspenetration unwahrscheinlicher, allerdings ist durch das geringere alveoläre Knochenmaß die Stabilitätsgrundlage der Schraube eingeschränkt. Hier gilt zu bedenken, dass die Primärstabilität nicht ausschließlich durch die implantatangrenzende Knochenquantität, sondern auch von der Dicke der Kortikalis, als auch von der Dichte der Spongiosa bestimmt wird.

Die endgültige Entscheidung über die Wahl des Insertionsortes liegt auf der Seite des Operateurs und ist aufgrund der aufgezeigten Problematik an dieser Stelle nicht abschließend zu klären.

Implantationslimitationen durch neuronale Strukturen

Ein weiterer Aspekt, der sowohl den Ober- als auch Unterkiefer betrifft, ist die potentielle Verletzung neuronaler Strukturen durch eine Schraubeninsertion.

Eine Läsion des N. incivus zwischen den beiden maxillären Frontschneidezähnen ist aufgrund der topographischen Entfernung und den kurzen Schraubenlängen sehr unwahrscheinlich.

Hingegen ist eine Verletzung des N.alveolaris inferior bei sehr tiefer Schraubenplatzierung zwischen den beiden Prämolaren des Unterkiefers durchaus möglich. Obwohl dieser Zahnzwischenraum von seinem Platzangebot sehr gut als Insertionsort geeignet ist, sollte die Gefahr von neuronalen Läsionen bei der Wahl des Implantationsortes beachtet werden. Wehrbein et al. (2008) erwähnen, dass derartige Zwischenfälle bei korrekter Insertionsdurchführung selten sind und hauptsächlich aus medikolegalen Gründen von Bedeutung sind.

Weichgewebslimitationen

Frenulum labii superior bzw. inferior

Eine weitere anatomische Limitation, die für die medianen Insertionsräume von Ober- und Unterkiefer gilt, ist die räumliche Nähe zum Frenulum labii superior bzw. inferior (siehe Abb. 49). Da der mandibuläre Zahnzwischenraum 1-1 wegen des unzureichenden interradikulären Abstands ohnehin als potentieller



Abb. 49: Lage des Frenulum labii superior.

Implantationsort entfällt, wird er an dieser Stelle nicht weitergehend behandelt. Im Oberkiefer ist es kaum möglich, eine Schraube zwischen den zwei ersten Schneidezähnen in einer Lage mit ausreichendem Knochenangebot (ab 11,5mm vom KKP) zu platzieren, ohne das Gewebekontakt zwischen dem Frenulum und dem Implantat entsteht. Eine solche funktionelle Einschränkung des Bändchens kann neben schmerzhaften Restriktionen der labialen Mobilität zu inflammatorischen Veränderungen in der Umgebung der Schraube führen. Dieser Prozess bedingt häufig den Verlust der Schraube und unter Umständen den Abbruch des therapeutischen Konzeptes. Demnach ist bei einer Insertion in den maxillären Zahnzwischenraum 1-1 abzusehen, da mit funktionellen und neuronalen Risiken zu rechnen ist. Prinzipiell wäre es möglich, durch einen chirurgischen Eingriff die Lage des Frenulums zu verändern, jedoch widerspricht dies dem atraumatischen Behandlungskonzeptes von Minischrauben.

Einfluss der mukogingivalen Grenzlinie

Eine ähnliche Problematik besteht auch bezüglich Schraubeninsertionen in das bewegliche Zahnfleisch jenseits der mukogingivalen Grenzlinie (siehe Abb.50). Studien (Deguchi et al. 2006; Wu et al. 2009; Wehrbein et al. 2008) haben bestätigt, dass die Platzierung von Implantaten in diesem Schleimhautbereich im überwiegenden Teil der Fälle zum



Abb. 50: Verlauf der mukogingivalen Grenzlinien

endgültigen Verlust der Schraube führt und mit Schmerzen und Infektionsgefahr für den Patienten einhergeht. Dies geschieht in der Regel durch inflammatorische Veränderungen des periimplantären Gewebes (Deguchi et al. 2006) sowie durch Schleimhautüberwucherungen des Schraubenkopfes (Wehrbein et al. 2008). Folglich ist von einer Implantation in diesen Schleimhautarealen abzusehen. Die ermittelten Bohrpunkte dieser Studie müssen vor der Insertion mit der individuellen Lage der mukogingivalen Grenze des Patienten abgeglichen werden. Die Lage der mukogingivalen Grenzlinie im Bezug zu den Kronenkontaktpunkten wird von Glasl et al. (2010) beschrieben (siehe Abb.51).

Mukogingivallinie (Maxilla)	8,3	8,1	7,9	8,1	8,1	8,0	7,9	7,6
Insertion möglich ab (Maxil.)	-	8,5	9,5	14,0	14,0	9,5	8,5	-
Interdentalraum	6/7	5/6	4/5	3/4	3/4	4/5	5/6	6/7
Insertion möglich ab (Mand.)	5,5	6,0	7,5	11,0	11,0	7,5	6,0	5,5
Mukogingivallinie (Mandibula)	7,3	7,4	7,3	7,2	7,4	7,3	7,2	7,5

Abb. 51: Lage der Mukogingivalen Grenzlinie im Bezug zu den ermittelten Insertionsorten. Ein rotes Feld zeigt an, dass eine Implantation aufgrund des Verlaufs der Gingivagrenze nicht möglich ist. Ein grünes Feld verdeutlicht, dass eine Insertion innerhalb der befestigten Gingiva möglich ist.

Somit kann ein theoretischer Abgleich der Ergebnisse beider Studien erfolgen. Durch Abbildung 51 wird deutlich, dass von den relevanten Bohrpunkten des Oberkiefers lediglich der Zahnzwischenraum 5-6 Implantationen ansatzweise unterhalb dieser Grenze zulassen.

Da der mögliche Insertionspunkt nah an der Grenzlinie liegt, können durch angewinkelte Insertionsachsen bessere Knochenkontaktraten erzielt werden, selbst wenn minimal vor der optimalen Implantationsposition die Schraubeninsertion stattfindet (Abb. 52). Dies bestätigt erneut die adäquate Tauglichkeit des ZZR5-6 als optimale maxilläre Insertionsgrundlage.

In der Mandibula sind Insertionen mit idealem Knochenangebot im unbeweglichen Zahnfleisch an den Zahnzwischenräumen 4-5, 5-6 und 6-7 möglich. Obwohl der ZZR3-4 über einen adäquaten Interdentalabstand verfügt, können Insertionen in diesem Bereich problematisch sein, da sich die Stelle des optimalen Knochenangebotes 3mm jenseits der mukogingivalen Grenzlinie befindet. Durch eine angewinkelte Insertionsachse wäre es ggf. möglich dennoch eine adäquate mechanische Retention zu erlangen.

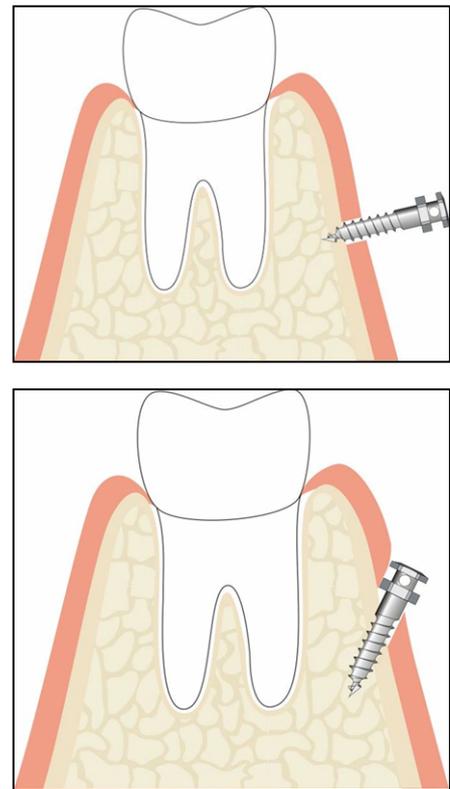


Abb. 52: Veränderung der Insertionsachse.

Diese anatomischen Begleitfaktoren haben eine Filterwirkung auf die geeigneten Insertionsorte, die im Rahmen dieser Studie ermittelt wurden. Es wurde deutlich, dass in der Maxilla lediglich der ZZR5-6 in sämtlichen Kategorien positive Eigenschaften aufweisen kann. In der Mandibula befinden sich adäquate Insertionsmöglichkeiten distal der Eckzähne, aber vor allem im Molarbereich.

5.1.3.2. Mittelwertanalyse

Die Mittelwertanalyse wurde bis zu einem Abstand von 15mm von Kronenkontaktpunkt durchgeführt. Darüber hinaus war es aufgrund der abnehmenden Menge von Messwerten nicht möglich, repräsentative Aussagen über das mittlere Knochenangebot des Patientenkollektivs zu treffen. Um den Einfluss von individuellen Extremwerten zu vermeiden, wurde an diesem Punkt die statistische Auswertung abgebrochen.

Durch die Bestimmung der „Bestätigungsrate“ lässt sich zum einen eine präzise Aussage über die Eignung eines Zahnzwischenraumes als potentieller Insertionsort formulieren, da individuelle Extremwerte, anders als bei der Mittelwertbestimmung, weniger stark ins Gewicht fallen. Zum anderen wird das komplette Patientenkollektiv berücksichtigt und erlaubt Äußerungen über die Allgemeingültigkeit der Ergebnisse. Somit kann die Validität der statistisch errechneten potentiellen und optimalen Insertionsorte der Mittelwertanalyse im Kontext mit der klinischen Realität der Insertionsmöglichkeiten verglichen werden. Es lässt sich folglich ableiten, ob der errechnete Bohrpunkt der Mittelwertanalyse eher als statistisches Konstrukt zu werten ist, oder ob er tatsächlich für große Teile des Patientenkollektivs zutrifft. Durch die Übersichtstabellen wird dem Leser ein schnelles Einordnen der Insertionstauglichkeit des Zahnzwischenraumes ermöglicht und zusätzlich werden genormte Vergleichsmöglichkeiten mit weiteren Kieferabschnitten geschaffen.

Sowohl im Ober- als auch im Unterkiefer konnten klare Verteilungstendenzen der Wurzelabstände festgestellt werden (siehe Abb. 53). Das interdentale Knochenangebot nimmt entlang des Zahnbogens von den anterioren zu den posterioren Kieferbereichen, als auch in vertikaler Richtung von der Zahnkrone zur Wurzelspitze hin, nahezu durchgängig zu. In vergleichbaren Studien (Hu et al. 2009, Lee et al. 2009) wurden identische Verteilungsmuster festgestellt.

Von minimalen Abweichungen abgesehen, stimmen die ermittelten Daten dieser Studie stark mit den Vergleichswerten ähnlicher Studien überein. Diese Tatsache bekräftigt die Validität und die Aussagekraft der Ergebnisse dieser Studie. Es ist an dieser Stelle allerdings darauf hinzuweisen, dass dieser Vergleich sich auf die relativen Platzverhältnisse des Kiefers konzentriert. Die Bestimmung der Korrelation der absoluten Abstandswerte

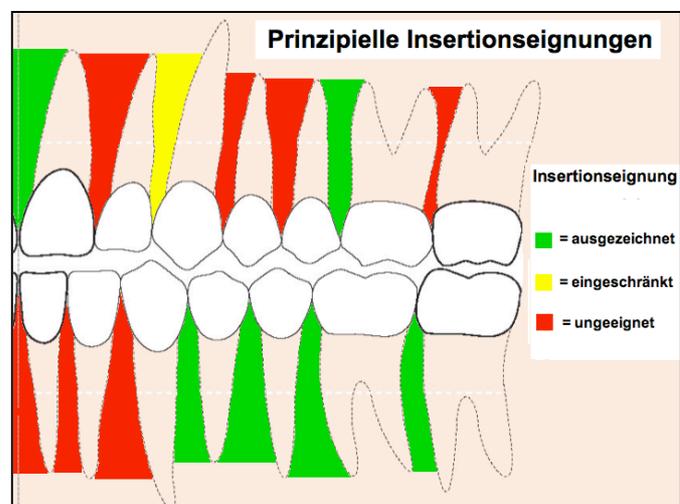


Abb. 53: Die Grafik zeigt die prinzipielle Verteilung von Insertionsmöglichkeiten für Minischrauben im menschlichen Gebiss.

der verschiedenen Studien ist äußerst schwierig, da die Autoren ihre Messungen von unterschiedlichen Ausgangspunkten aus durchgeführt haben. Während sich diese Studie auf die ersten Kontaktpunkte der Zahnkronen festgelegt hat, gingen Lee et al. (2009) von der CEJ, Hu et al. (2009) von der Zahnhalblinie und Poggio et al. (2005) vom Alveolarkamm aus.

Diese Abweichungen der Messmethodik erschweren einen direkten Ergebnisabgleich, da aufgrund der verschiedenen Ausgangspunkte ein neutraler vertikaler Bezugspunkt fehlt. Da grobe Abgleichungen dennoch möglich sind, wird anhand der bereits etablierten Literatur deutlich, dass die ausgeprägtesten Insertionsmöglichkeiten im Oberkiefer am ZZR1-1 sowie am ZZR5-6 liegen. Am Unterkiefer befinden sich die günstigen Areale distal des ZZR3-4 (siehe auch Abb. 53).

Maxilläre Implantationsmöglichkeiten

In der Maxilla befindet sich der größte interradikuläre Abstand zwischen dem zweiten Prämolaren und dem ersten Molaren. Der nächstkleinere Zahnzwischenraum liegt zwischen den beiden ersten Schneidezähnen und ist, ebenso wie der ZZR5-6, im Hinblick auf das Knochenangebot ein Prädilektionsort für maxilläre Schraubenimplantationen. Diese Ergebnisse können durch zahlreiche aktuelle Studien von Kim et al. (2009), Lee et al. (2009) und Hu et al. (2009) bestätigt werden. Sofern eine Implantation in diesen Zahnzwischenräumen nicht möglich sein sollte, bietet der ZZR2-3 noch die beste Alternative im Oberkiefer. Allerdings liegt das Knochenangebot deutlich unter dem der beiden Vorzugsstellen und weist in der Regel meist nur das obligate Mindestknochenangebot auf. Die übrigen Kieferareale eignen sich zunehmend schlechter als potentielle Insertionsorte, wobei der durchschnittliche interdentale Raum zwischen den beiden Molaren im Durchschnitt das geringste Knochenangebot des Oberkiefers aufweist. Diese Feststellung konnte durch die Studien von Lee et al. (2009) und Hu et al. (2009) jedoch nicht bestätigt werden. Dies ist allerdings durch Unterschiede in dem untersuchten Patientengut der Studien erklärbar. Während in dieser Studie ein relativ großer Anteil der Datensätze (34,78%) von jugendlichen Patienten (12-20 Jahre) bzw. von Patienten mit Weisheitszähnen stammt, beginnt das Altersspektrum bei Lee et al. (2009) erst bei 19 Jahren und bei Hu et al. (2009) erst bei 29 Jahren. Es konnte in dieser Studie herausgefunden werden, dass gerade bei jungen Patienten das Platzangebot in dem intermolaren Zahnzwischenraum erheblich eingeschränkt ist. Folglich haben diese niedrigen Abstände einen limitierenden Einfluss auf die ermittelten Durchschnittswerte des gesamten Patientenkollektivs. Da bei den beiden Vergleichsstudien die Werte der älteren Patienten überwiegen, sind die ermittelten Abstände dementsprechend größer.

5.2.2. Mandibuläre Implantationsmöglichkeiten

In der Mandibula befinden sich die größten Wurzelabstände zwischen den beiden Molaren und zwischen dem zweiten Prämolaren und dem ersten Molaren. Sie sind im Hinblick auf das vorhandene Ausmaß an Knochen die am besten geeigneten Orte des Unterkiefers für eine stabile Schraubenimplantation. Zu diesen Ergebnissen gelangten auch Poggio et al. (2005), Hu et al. (2009) sowie Lee et al. (2009). Die Zahnzwischenräume distal der Eckzähne, d.h. zwischen den Zähnen 3-4 und 4-5 bieten ebenfalls geeignete Insertionsmöglichkeiten, allerdings liegt der Wurzelabstand eindeutig unter dem der molaren Regionen. Sie bieten dennoch akzeptable Alternativen, bei denen nicht nur mit dem absoluten Mindestknochenangebot zu rechnen ist. Diese Erkenntnisse konnten ebenfalls durch Lee et al. (2009) sowie Hu et al. (2009) konfirmiert werden. Erwartungsgemäß sind die Wurzelabstände im Frontzahnbereich unzureichend um eine solide mechanische Schraubenretention zu gewährleisten. Der geringste Wurzelabstand bestand zwischen den ersten und zweiten Schneidezähnen. Das interradikuläre Knochenangebot wird von dort aus nach distal zu den Molaren zunehmend größer. Diese Tendenz wurde ebenfalls auch von Lee et al. (2009) sowie von Hu et al. (2009) festgestellt.

5.2. Merkmalsabhängiger Eignungsvergleich

Dieser Vergleich ermöglicht eine Aussage darüber, ob eine bestimmte Patientengruppe mit festgelegten Charakteristika eventuell bessere Grundvoraussetzungen für geplante Schraubenimplantationen an entsprechenden Kieferabschnitten besitzt als eine andere.

Die drei Charakteristika (Geschlecht, Alter, Zahnstatus) sind in der klinischen Praxis leicht zu erheben und können je nach der individuellen Merkmalskonstellation des Patienten die Entscheidung für oder gegen eine geplante Schraubeninsertion erleichtern, bzw. einen besonders geeigneten Implantationsort suggerieren oder kategorisch ausschließen.

Eine differenzierte Aufteilung der Studienergebnisse ist wichtig, da es nicht möglich ist aus der diesbezüglich relativ unselektiven Mittelwertanalyse entsprechende Zusammenhänge abzuleiten.

5.2.1. Geschlecht

Die vorliegende Studie konnte sowohl im Oberkiefer (ZZR2-3,5-6) als auch im Unterkiefer

(ZZR4-5,6-7) signifikante geschlechtsabhängige Variationen des interdentalen Knochenangebotes feststellen. In bisherigen Studien konnten weder in der für die Schraubeninsertion relevanten anatomischen Hinsicht, noch in Analysen über Verlustraten von Schrauben signifikante Korrelationen zwischen dem Geschlecht und dem Erfolg der Implantationstherapie festgestellt werden (nach Reynders et al. 2009.). Chun & Lim (2009) beschreiben einen Zusammenhang zwischen dem Patientengeschlecht in Kombination mit dem Alter und der Veränderung der alveolären Knochendichte. Während bei männlichen Patienten die Dichte der interdentalen Spongiosa nach einem Maximum im Alter von 35 Lebensjahren linear abnimmt, findet sich bei Frauen ab dem Alter von 35 Jahren ein leichter und nach Erreichen des 50. Lebensjahres ein deutlich beschleunigter Rückgang der Spongiosadichte. Dies ist auf den Eintritt der Menopause und den damit veränderten Hormonhaushalt mit erhöhter Knochenresorption bei Frauen zurückzuführen. Diese Analyse wurde allerdings ausschließlich an koreanischen Patienten durchgeführt. Durch die Assoziation mit der Menopause sollten für die mitteleuropäische Bevölkerung vergleichbare Tendenzen vorliegen.

Folglich ist die Deutung der festgestellten Erkenntnisse schwierig. Eine Überprüfung der Ergebnisse anhand einer größeren Populationsstichprobe könnte helfen diese Zusammenhänge zu verifizieren bzw. zu widerlegen.

5.2.2. Weisheitszahnstatus

Wie bereits aufgeführt haben Weisheitszähne einen entscheidenden Einfluss auf die Insertionstauglichkeit bestimmter Kieferregionen. Für den maxillären Zahnzwischenraum zwischen den beiden Molaren konnte eine starke Korrelation zwischen dem Vorhandensein von Weisheitszähnen und der Einschränkung des Knochenangebotes festgestellt werden. Ein potentieller negativer Einfluss des Alters kann diesbezüglich allerdings nicht ausgeschlossen werden. Bei Patienten im Alter von 12-20 Jahre mit Weisheitszähnen wurde nur in 19,23% der Fälle das obligate Mindestknochenangebot von 2,6mm gefunden. Bei Patienten im Alter von 21-40 Jahre und ohne Weisheitszähne konnte in 85,71% der Fälle das benötigte Mindestknochenangebot bestätigt werden. Somit stellt dieser Zahnzwischenraum für Patienten mit exakt diesen Konstellationen eine geeignete Insertionsalternative im Oberkiefer dar, obwohl die Lage der mukogingivalen Grenzlinie in diesem Bereich problematisch ist (siehe Abb.51). Der Weisheitszahnstatus hat bisher in der gängigen Literatur über Minischrauben bisher kaum Einzug erhalten. Lediglich Poggio et al. (2005) erwähnen in

ihrer Studie den negativen Einfluss von Weisheitszähnen. Ihrer Ansicht nach kann die Einschränkung des Platzangebotes nach Weisheitszahnextraktionen aufgehoben werden. Ein derartiger Eingriff würde allerdings dem Konzept der Minischrauben als minimalinvasives Implantationsverfahren widersprechen und ist folglich kritisch zu bewerten.

5.2.3. Alter

Die Ergebnisse suggerieren, dass das Patientenalter eine Rolle für die Primärstabilität des Implantats spielt. Dies konnte in der vorliegenden Studie im Hinblick auf das interradikuläre Knochenangebot festgestellt werden. Hauptsächlich betrifft dieser Faktor die Tauglichkeit der intermolaren Zahnzwischenräume in der Maxilla. Bei den Patienten im Alter von 12-20 Jahren wurde ein signifikant niedrigerer Wurzelabstand gemessen als bei den übrigen Altersklassen. Da jedoch der überwiegende Anteil (92,86 %) der untersuchten Patienten im Alter von 12-20 Jahren noch über ihre Weisheitszähne verfügte, ist es auch möglich, dass diese Zahnanlagen der primäre Grund für die eingeschränkten Platzverhältnisse sind. In der fachspezifischen Literatur wurde dieser Zusammenhang bisher nicht weitergehend untersucht, wodurch eine abschließende Klärung dieser Fragestellung nicht ohne Weiteres möglich ist.

Die relativ niedrigen Gruppengrößen der verschiedenen Altersklassen innerhalb dieser Studie bieten eine gewisse Anfälligkeit für Fehlinterpretationen auf der Basis von Zufallsbefunden. Aufgrund dieser Tatsache ist eine definitive Beantwortung der genannten offenen Fragestellungen, anhand des vorliegenden Studienmaterials, nicht eindeutig möglich. Demnach wäre es interessant diese Problematik in künftigen Studien zu klären.

Chun & Lim (2009) konnten neben dem geschlechtsspezifischen Einfluss auf die Spongiosadichte beim Eintritt in die Menopause (siehe oben) eine Altersdivergenz bei jüngeren Patienten feststellen. Während das Dichtemaximum im Alter von 35 Jahren geschlechtsunabhängig erreicht wird, bedeutet dies, dass bei jüngeren Patienten mit verminderter Dichte und folglich mit geringerem Verankerungspotential zu rechnen ist.

Motoyoshi et al. (2007) haben festgestellt, dass die Primärstabilität von Implantaten altersabhängige Variationen zeigt. Wie bereits dargestellt, hängt sie unter anderem von der vorhandenen Knochenmenge, -dichte und -dicke ab. Die niedrigsten Werte und folglich die geringsten Verankerungsmöglichkeiten finden sich hier bei Kindern und Jugendlichen. Erneut ist davon auszugehen, dass bei jungen Patienten die anatomische Kieferkonstitution, zumindest in einigen Kieferarealen, als Stabilitätsgrundlage für Minischrauben schlechter geeignet ist. Eine altersbezogene Analyse der Schraubenverlusten konnte diese Tatsache

bestätigen (Wu et al. 2009). Dies ist einschränkend, da ein großer Teil der kieferorthopädischen Behandlungen in einem jugendlichen Alter begonnen werden und dementsprechend zahlreiche Einsatzmöglichkeiten für Miniimplantate bestehen würden. Andererseits gilt es zu beachten, dass sich die grundlegende schlechtere Eignung hauptsächlich im Hinblick auf die Spongiosadichte und die Kortikalisdicke bezieht (Chen et al. 2007). Im Rahmen dieser Studie konnten, mit Ausnahme der maxillären intermolaren Zahnzwischenräume, im restlichen Gebiss, bezogen auf das Knochenangebot, keine weiteren signifikanten altersabhängigen Insertionsvorteile festgestellt werden. Somit besteht dort zumindest prinzipiell eine Verankerungsmöglichkeit mit einer gewissen Basisstabilität. Die für eine Schraubenimplantation günstigsten Eigenschaften besitzen Patienten vom frühen Erwachsenenalter bis etwa 45 Lebensjahre, bevor die altersbedingte Osteoporose die Knocheneigenschaften negativ beeinflusst. In diesem Zeitraum werden bei sämtlichen Stabilitätsaspekten hohe Werte erreicht. Folglich sind die Insertionsbedingungen günstig. Dies konnte durch die Analyse von Verlustraten (Wu et al. 2009; Chen et al. 2007) bestätigt werden.

5.3. Interne Vergleichsanalyse

Durch dieses interne Verfahren wurde die Validität und Genauigkeit der Ergebnisse der Mittelwertanalyse zum einen kritisch hinterfragt und ihre Gültigkeit differenziert überprüft. Prinzipiell bestand die Möglichkeit, dass durch die unselektive Aufnahme verschiedener Patientengruppen mit unterschiedlichen persönlichen Charakteristika (z.B. Geschlecht, Alter, Zahnstatus) in eine gemeinsame Analyse die errechneten Mittelwerte zu einem gruppenspezifischen Extrem hin verzerrt werden. Daher ist es möglich, dass sich anhand der Mittelwertanalyse für den Einzelnen keine definitive Aussage über die exakte Lage des Bohrpunktes treffen lässt. In den meisten Fällen zeigten sich kongruente Ergebnisse zwischen den statistisch errechneten und den tatsächliche vorhandenen Bohrpunkten. Dies spricht für eine hohe Integrität und Zuverlässigkeit der Studiendurchführung. Die marginalen Abweichungen in der exakten Lokalisation von etwaigen Bohrpunkten entstehen aus dem grundsätzlich unterschiedlichen Ansatz der beiden Auswertungsverfahren und lassen sich bei einer Datenmenge dieser Größenordnung nicht vermeiden. Diese Vergleichsuntersuchung wurde explizit für diese Studie entworfen und weicht somit von der wissenschaftlichen Praxis in vergleichbaren Studien ab.

Am maxillären Zahnzwischenraum 6-7 konnte mit Hilfe dieses internen Prüfungsverfahrens festgestellt werden, dass die Ergebnisse der Mittelwertanalyse durch den relativ hohen Anteil an jungen Patienten mit Weisheitszähnen zu einem geringeren Wurzelabstand hin verzerrt wurden und einhergehend dessen an diesem Kieferabschnitt für die übrigen Patientenkollektive nicht repräsentativ sind.

Ohne dieses Verfahren wäre eine differenzierte Ergebnisinterpretation und -überprüfung nicht möglich gewesen. Es bestätigt zudem die Allgemeingültigkeit der restlichen Erkenntnisse der Mittelwertanalyse für das gesamte untersuchte Patientenkollektiv.

5.4. Abschließende Bewertung

Im Laufe dieser klinische Studie wurden sowohl Maxilla als auch Mandibula vollständig im Hinblick auf ihre Tauglichkeit als Einsatzgebiete von kieferorthopädischen Minischrauben vermessen, analysiert und abschließend bewertet.

Sowohl um Ober- als auch im Unterkiefer wurden gute, schlechte und bedingt geeignete Implantationsmöglichkeiten entdeckt. Zudem wurden die ermittelten Bohrpunkte erstmalig systematisch kartiert, damit sie in der kieferorthopädischen Praxis im Rahmen der Therapieplanung und der Implantationsdurchführung leicht und ohne zusätzliche Diagnostik als prinzipielle Orientierungshilfe dienen können.

In der Diskussion hat sich herausgestellt, dass die erhaltenen Ergebnisse von diversen bereits etablierten wissenschaftlichen Arbeiten bestätigt werden. Es gibt allerdings auch neue Erkenntnisse, die bisher kaum erforscht wurden, wie beispielsweise der Zusammenhang zwischen den Insertionsmöglichkeiten und dem Zahnstatus bzw. dem Alter.

Durch die Erkenntnisse der Studie konnte der Einfluss weiterer Faktoren für den Erfolg einer schraubengestützten orthodontischen Behandlung präzisiert und in den Kontext der Implantationstauglichkeit verschiedener Kieferabschnitte eingefügt werden.

Es hat sich herausgestellt, dass bei der Insertion von Minischrauben, trotz des relativ simpel konzipierten Systems, ein komplexer Verbund aus anatomischen, technischen und patientenbezogenen Variablen die Stabilität des Implantats und schließlich den Erfolg der Therapie beeinflusst. Auf Grundlage der Literaturanalyse in Verknüpfung mit den Erkenntnissen dieser Studie hat sich herausgestellt, dass nahezu ausschließlich die hinteren Kieferabschnitte als Platzierungsmöglichkeiten von Minischrauben klinische Relevanz besitzen. Diese Einschränkung des Implantationsspektrums stellt unter Umständen eine Limitation des künftigen Erfolgspotentials der Minischrauben dar. Allerdings bietet diese

Konkretisierung der prinzipiell geeigneten Implantationsorte die Möglichkeit, die zukünftige Forschung und Entwicklung der kieferorthopädischen Minischrauben explizit auf die Erfordernisse und lokalen Gegebenheiten der entdeckten potentiellen Insertionsstellen zu konzentrieren.

Der medizinische Fortschritt bringt, neben innovativen Therapieoptionen, auch stets neue Herausforderungen und Probleme mit sich, welche die praktische Umsetzung der theoretischen Möglichkeiten erschweren können. Dies gilt zweifelsohne auch für die Entdeckung und klinische Einführung der kieferorthopädischen Miniimplantate. Sicherlich ist eine praktische Umsetzung von E.H. Angle's Vision eines festen Fixpunktes (siehe S.5) in der Kieferorthopädie heute noch nicht problemlos möglich, allerdings können Studien wie diese einen Beitrag dazu leisten, die gegenwärtigen Herausforderungen bei der Verwirklichung dieses therapeutischen Ideals zu überwinden.

6 Literaturverzeichnis

Angle E. (1907) Treatment of malocclusion of teeth. 7th ed. S.S. White Dental Manufacturing Company, Philadelphia

Arai Y, Tammissalo E, Iwai K, Hashimoto K, Shinoda K (1999) Development of compact computed tomographic apparatus for dental use. *Dentomaxillofac Radiol* 28:245-248

Arai Y, Honda K, Iwai K, Shinoda K (2001) Practical model "3DX" of limited cone-beam X-ray CT for dental use. *International Congress Series* 1230:713-718

Asscherickx K, Vannet BV, Wehrbein H, Sabzevar MM (2005) Root repair after injury from mini-screw. *Clin Oral Implants Res* 16:575-8

Baumgaertel S, Hans MG (2009) Buccal cortical bone thickness for mini-implant placement. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 136(2):230-5

Billen S. (2009) Numerische Simulation der Knochenbelastung um orthodontische Mini-Implantate. Dissertationsschrift, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

Brånemark PI, Zarb GA, Albrektsson T (1985) *Tissue-Integrated Protheses*. Quintessence Publ C., Chicago

Carano A, Velo S, Leone P, Siciliani G (2005) Clinical s of the miniscrew anchorage system. *J Clin Orthod* 39:9-24

Chen YH, Chang HH, Chen YJ, Lee D, Chiang HH, Yao CC (2007) Root contact during insertion of miniscrews for orthodontic anchorage increases the failure rate: an animal study. *Clin Oral Implants Res* 19:99-106

Chen YJ, Chang HH, Huang CY, Hung HC, Lai EH, Yao CC (2007) A retrospective analysis of the failure rate of three different orthodontic skeletal anchorage systems. *Clin Oral Implants Res*. 18(6):768-75

Chen YJ, Chang HH, Lin HY, Lai EH, Hung HC, Yao CC (2008) Stabiliy of miniplates and miniscrews used for othodontic anchorage: experience with 492 temporary anchorage devices. *Clin Oral Impl Res* 19:1188-1196

Cheng SJ, Tseng IY, Lee JJ, Kok SH (2004) A prospective study of the risk factors associated with failure of mini-implants used for orthodontic anchorage. *Int J Oral Maxillofac Implants* 19:100-6

Chun YS, Lim WH (2009) Bone density at interradicular sites: implications for orthodontic mini-implant placement. *Orthod Craniofac Res* 12(1):25-32

Costa A, Raffaini M, Melsen B (1998) Miniscrews as orthodontic anchorage: a preliminary report. *Int J Adult Orthod Orthognath Surg* 13:201-9

Creekmore TD, Eklund MK (1983) The possibility of skeletal anchorage. *J Clin Orthod* 17:266-269

Deguchi T, Nasu M, Murakami K, Yabuuchi T, Kamioka H, Takano-Yamamoto T (2006) Quantitative evaluation of cortical bone thickness with computed tomographic scanning for orthodontic implants. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 129(6):721.e7-12

Diedrich P. (1993) Verschiedene orthodontische Verankerungssysteme. Eine kritische Betrachtung. *Fortschr. Kieferorthop* 54: 156-176

Gainsforth BL, Higley LB (1945) A study of orthodontic anchorage possibility in basal bone. *Am J Orthod Oral Surg* 31:406-417

Gedrange T, Mai R, Weingaertner J, Ryszard Koczorowski, Fanghänel J, Proff P (2007) Untersuchung der Regeneration von Knochen nach Implantation und Verbindung mit kieferorthopädischen Minischrauben. *Dental Forum* 2(35):7-13

Glasl B, Ludwig B, Kinzinger G, Zipprich H, Lisson J (2010) Aktuelle Übersicht zum Risikopotential von Wurzelverletzungen bei interradikulärer Insertion orthodontischer Miniimplantate/Minischrauben. *Kieferorthopädie* 24(1):?-?

Goch I (2005) Vergleich metrischer Genauigkeit von Computertomographie, digitaler Volumetomographie und Orthopantomographie in der modernen Implantologie. Dissertation Universität Düsseldorf (Prof. Dr. Becker)

Haßfeld S, Kunkel M, Ulrich HP, Wagner W, Zöller JE (2008) Stellungnahme: Indikation zur Schnittbilddiagnostik in der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie (CT/DVT). *Der MKG-Chirurg* 1:148-151

Hashimoto K, Arai Y, Iwai K, Araki M, Kawashima S, Terakado M (2003) A comparison of new limited cone beam computed tomography machine for dental use with a multidetector row helical CT machine. *Oral Surg Ora Med Oral Pthol Oral Radil Endod* 95:371-377

Heymann GC, Tulloch JF (2006) Implantable devices as orthodontic anchorage: a review of current treatment modalities. *J Esthet Restor Dent* 18(2):68-79

Honda K, Arai Y, Iwai K, Hashimoto K, Saitou T, Shinoda K (2001) Fundamental efficiency of new-style limited-cone-beam CT (3DX)- comparison with helical CT. *Jpn J Tomogr* 27:193-198

Hu KS, Kang MK, Kim TW, Kim KH, Kim HJ (2009) Relationships between dental roots and surrounding tissues for orthodontic miniscrew installation. *Angle Orthod* 79(1):37-45

Huja SS, Rao J, Struckhoff JA, Beck FM, Litsky AS (2006) Biomechanical and histomorphometric analysis of monocortical screws at placement and 6 weeks postinsertion. *J Oral Impl* 32:110-116

Kim SH, Yoon HG, Choi YS, Hwang EH, Kook YA, Nelson G (2009) Evaluation of interdental space of the maxillary posterior area for orthodontic mini-implants with cone-beam computed tomography. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 135(5):635-41

Lee KJ, Joo E, Kim KD, Lee JS, Park YC, Yu HS (2009) Computed tomographic analysis of tooth-bearing alveolar bone for orthodontic miniscrew placement. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 135(4):486-94

Liou EJW, Pai BC, Lin JC (2004) Do miniscrews remain stationary under orthodontic forces? *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 126:42-7

Ludwig B. (2008) *Mini-Implantate in der Kieferorthopädie*. 1. Auflage. Quintessenz, Berlin

Maino BG, Weiland F, Attanasi A, Zachrisson BU, Buyukyilmaz T (2007) Root damage and repair after contact with miniscrews. *J Clin Orthod* 41:762-6

McSherry PF, Bradley H. (2000) Class II correction-reducing patient compliance: a review of the available techniques. *J Orthod* 27:219-225

Meredith N (1998) Assessment of implant stability as a prognostic determinant. *Int J Prosthodont* 11:491-501

Miyawaki S, Koyama I, Inoue M, Mishima K, Sugahara T, Takano-Yamamoto T (2003) Factors associated with the stability of titanium screws placed in the posterior region for orthodontic anchorage. *Am J orthod Dentofacial* 124:373-8

Möbes O, Becker J, Schnelle C, Ewen K, Kemper J, Cohnen M (2000) Strahlenexposition bei der digitalen Volumentomographie, Panoramaschichtaufnahme und Computertomographie. *DZZ* 55 (5)

Morris HF, Winkler S, Ochi S, Kanaan A (2001) A new implant design to maximize contact with trabecular bone: survival to 18 months. *J Oral Implantol* 27:164-173

Motoyoshi M, Matsuoka M, Shimizu N (2007) Application of orthodontic mini-implants in adolescents. *Int J Oral Maxillofac Surg* 36:695-9

Motoyoshi M, Yoshida T, Ono A, Shimizu N (2007) Effect of cortical bone thickness and implant placement torque on stability of orthodontic mini-implants. *Int J Oral Maxillofac Implants* 22(5):779-84

Park HS, Jeong SH, Kwon OW (2006) Factors affecting the clinical success of screw implants used as orthodontic anchorage. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 130:18-25

Poggio PM, Incorvati C, Velo S, Carano A (2005) "Safe Zones": a guide for miniscrew positioning in the maxillary and mandibular arch. *Angle Orthod* 76(2):191-197

Reynders R, Ronchi L, Bipat S (2009) Mini-implants in orthodontics: a systematic review of the literature. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 135:564.e1-564.e19

Roberts WE, Smith RK, Zilberman Y, Mozsary PG, Smith RS (1984) Osseous adaptation to continuous loading of rigid endosseous implants. *Am J Orthod* 86:95-111

Schätzle M, Männchen R, Zwahlen M, Lang NP (2009) Survival and failure rates of orthodontic temporary anchorage devices: a systematic review. *Clin Oral Implants Res* xx: 000-000 (Epub ahead of print)

Scholz RP, Baumgaertel S (2009) State of the art of miniscrew implants: An interview with Sebastian Baumgaertel. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 136:277-81

Schulze D, Heiland M, Blake F, Rother U, Schmelze R (2005) Evaluation of quality of reformatted images from two cone-beam computed tomography systems. *J Craniomaxillofac Surg* 33:19-23

Sung JH, Kyung HM, Bae SM, Park HS, Kwon OW, McNamara JA (2006) *Microimplants in Orthodontics*. 3. Auflage Dentos Inc., Daegu, Korea

Wawrzinek C, Sommer T, Fischer-Brandies H (2008) Microdamage in cortical bone due to the overtightening of orthodontic microscrews. *J Orofac Orthop* 69:121-134

Wehrbein H, Feifel H, Diedrich P, Glatzmaier J (1996) The use of palatal implants for orthodontic anchorage. Design and clinical application of the Orthosystem. *Clin Oral Implant Res* 7:410-416

Wehrbein H, Göllner P (2007) Skeletal anchorage in Orthodontics - basics and clinical application. *J Orofac Orthop* 68:443-461

Wehrbein H, Jung BA, Kunkel M (2008) Wissenschaftliche Stellungnahme zur kieferorthopädischen Verankerung mit Kortikalisschrauben und Gaumenimplantaten

Wiechmann D, Meyer U, Büchter A (2007) Success rate of mini- and micro-implants used for orthodontic anchorage: a prospective clinical study. *Clin Oral Impl Res* 18:263-267

Wilmes B, Ottenstreuer S, Su YY, Drescher D (2006) Parameters affecting primary stability of orthodontic mini-implants. *J Orofac Orthop* 69:51-58

Wilmes B, Drescher D (2009) Impact of insertion depth and predrilling diameter on primary stability of orthodontic mini-implants. *Angle Orthod* 79:609-614

Wu TY, Kuang SH, Wu CH (2009) Factors associated with the stability of mini-implants for orthodontic anchorage: a study of 414 samples in Taiwan. *J Oral Maxillofac Surg* 67(8):1595-9

Yamada S, Shibasaki Y (2001) A clinical and histological evaluation of titanium mini-implants as anchors for orthodontic intrusion in the beagle dog. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 119:489-497

Yao CC, Lai EH, Chang JZ, Chen I, Chen YJ (2008) Comparison of treatment outcomes between skeletal anchorage and extraoral anchorage in adults with maxillary dentoalveolar protrusion. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 134(5):615-24

7 Dank

Ein ganz besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Lisson für die engagierte und kompetente Betreuung dieser Arbeit. Weiterhin bedanke ich mich herzlich bei Herrn Dr. Goldbecher für die freundliche Bereitstellung des Bildmaterials. Meinem Doktorarbeitsbetreuer Herrn Dr. Ludwig danke ich für seine stete Motivation und sein großes Engagement bei der Betreuung dieser Promotionsschrift.

Abschließend bedanke ich mich bei meiner Familie, Frau Hellen Langebach und Herrn Florian Siedek für die freundlichen Worte auf diesem Weg.

8 Lebenslauf

Mark Johannes Schieren

15.09.1986 geboren, als Sohn der Eheleute Dr. med. Herbert Schieren und Dr. med. Marianne Schieren, in Frechen.

1993-1997 Burgschule Frechen

1997-2003 Erzbischöfliches Gymnasium Liebfrauen Schule Köln

2003-2004 Stanstead College, Québec, Kanada

2004-2006 Friedrich-Willhelm-Gymnasium Köln

Juni 2006 Abitur (1,1) am Friedrich-Willhelm-Gymnasium Köln

WS 06/07 Beginn des Studiums der Humanmedizin an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn

Sep. 2008 Teilnahme am 1. Abschnitt der ärztlichen Prüfung an der Universität Bonn. Bestanden mit der Note: "gut"

WS 08/09 Beginn des klinischen Abschnitts des Medizinstudiums