

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

Positionierungsvergleich virtuell platzierter Minischrauben in 2D- und 3D- Röntgenaufnahmen in Relation zu den Frontzahnwurzeln

Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Zahnheilkunde

der Medizinischen Fakultät

der UNIVERSITÄT DES SAARLANDES

2021

vorgelegt von Kevin Ralph Flaig
geb. am 14.03.1989 in Charleston/ USA

Tag der Promotion: 04.11.2021

Dekan: Prof. Dr. M. Menger

1. Berichterstatter: PD Dr. B. Ludwig

2. Berichterstatter: Prof. Dr. M. Karl

Widmung

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung	
1.1 Zusammenfassung	6
1.2 Abstract.....	7
2 Einleitung und Fragestellung	8
2.1 Miniimplantate allgemein.....	8
2.1.1 Insertionsorte	10
2.1.2 Risiken.....	11
2.1.3 Überlebensraten von Miniimplantaten	12
2.2 Röntgen- und digitale Planung der Miniimplantat-Position.....	12
2.2.1 Virtuelle Miniimplantatpositionierungsplanung	13
2.3 Gaumenfalten-Methode zur Insertion.....	13
2.4 Digitale Verfahren zur Insertion.....	15
2.5 Fragestellung	18
3 Material und Methoden	19
3.1 Ein- und Ausschlusskriterien.....	19
3.2 Software und digitale Daten	20
3.3 Überlagerung der Datensätze.....	22
3.4 Miniimplantatpositionierung	24
3.5 Messungen.....	26
3.5.1 Prinzip der Distanzmessung (Software OnyxCeph 3D).....	28
3.6 Statistische Methoden.....	29
3.6.1 Datenerhebung und Datenverarbeitung.....	29
3.6.2 Wiederholbarkeit	29
3.6.3 Test auf Normalverteilung	29
3.6.4 Deskriptive Statistik	30

3.6.5	Einfaktorielle ANOVA mit Messwiederholung.....	30
3.6.6	Post-hoc-Poweranalyse	30
3.7	Arbeitsschritte.....	31
4	Ergebnisse.....	34
4.1	Gesamtzahl der Perforationen des Nasenbodens/der Zahnwurzeln	34
4.2	Wiederholbarkeit anhand verbundener T-Tests	35
4.3	Vorauswertung für die einfaktorielle ANOVA	36
4.4	Einfaktorielle ANOVA.....	39
4.5	Post-hoc-Poweranalyse.....	39
4.6	Ergebnisse.....	40
5	Diskussion.....	41
5.1	Studienpopulation.....	41
5.2	Methode	42
5.2.1	Messungen.....	43
5.3	Miniimplantate.....	45
5.4	Gaumen als Insertionsregion	46
5.5	Dritte Gaumenfaltenmethode	47
5.6	Software.....	50
5.7	Vergleich der Ergebnisse mit vorhandener Literatur	51
5.8	Schlussfolgerung	52
6	Literaturverzeichnis	53
7	Tabellen	63
7.1	Messwerte.....	63
8	Danksagung.....	66
9	Curriculum Vitae.....	67

1.1 Zusammenfassung

Einleitung: Im anterioren Gaumen bietet sich die Möglichkeit einer sicheren Implantation von Miniimplantaten mit den geringsten Verlustraten aller möglichen Insertionsregionen. Die Insertion der Miniimplantate und die Eingliederung der Behandlungsapparaturen ist bislang ein zweizeitiges Vorgehen. Die Überlagerung von Intraoralscans und korrespondierenden Röntgenaufnahmen zur Behandlungsplanung ermöglicht ein einzeitiges Vorgehen. In dieser Studie werden die Unterschiede zwischen einer 2D-Fernröntgenseitenaufnahme (FRS) und einer 3D-digitalen-Volumentomographie (DVT) zur virtuellen Miniimplantatplatzierung ermittelt.

Material und Methoden: Bei 20 diagnostischen Unterlagen von Patienten wurden mit der Planungssoftware OnyxCeph Fernröntgenseitenbilder und die dazugehörigen gescannten Oberkiefermodelle überlagert und Miniimplantate im anterioren Gaumen standardisiert virtuell platziert. Dazu wurden zwei digitale Miniimplantate mit einem Durchmesser von 1,7 mm und einer Länge von 8,0 mm paramedian, symmetrisch, mit einem Abstand von 8,0 mm zueinander implantiert. Anschließend wurde der geringste Abstand zwischen den Miniimplantaten und den Wurzelspitzen der Frontzähne im Fernröntgenseitenbild gemessen. Die korrespondierenden digitalen Volumentomographieaufnahmen wurden eingeblendet und der geringste Abstand der Miniimplantate zu den Frontzahnwurzeln vermessen sowie deren Lage zu weiteren anatomischen Strukturen beurteilt.

Ergebnisse: Die Unterschiede der Abstandsmessungen, der Miniimplantate zu den Frontzahnwurzeln, waren im Vergleich der 2D- (Fernröntgenseitenbild) und 3D-Aufnahmen (digitale Volumentomographie) statistisch nicht signifikant; es wurden weder Zahnwurzeln noch Cava nasi perforiert.

Schlussfolgerung: 2D-Fernröntgenseitenaufnahmen sind zur paramedianen virtuellen Platzierung von Miniimplantaten am anterioren Gaumen im Bereich der dritten Gaumenfalte ausreichend genau. Dies gilt unter der Voraussetzung, dass keine strukturellen Anomalien wie zum Beispiel verlagerte Eckzähne oder Lippen-Kiefer-Gaumenspalten vorliegen.

1.2 Abstract

Introduction: In orthodontics miniimplants are used for maximum anchorage of orthodontic devices. In the anterior palate there is a safe possibility for implantation with the lowest loss rates of all regions. Yet the insertion of miniimplants and fixation of orthodontic devices was a two-staged procedure. The superimposition of intraoral scans and corresponding x-rays for treatment planning allows for a one-staged procedure. In this study the differences between 2D- (lateral cephalogram) and 3D- (cone beam CT) x-rays for virtual screw positioning are ascertained.

Methods: Diagnostic data (scanned maxilla and corresponding lateral cephalogram) of 20 patients were superimposed with the planning software OnyxCeph and miniimplants were virtually and standardized placed in the anterior palate. Digital miniimplants (Forestadent OrthoEasy Pal) with a diameter of 1,7 mm and a length of 8,0 mm were used.

The miniimplants were implanted paramedian, symmetrically with a distance of 8,0 mm to each other. Afterwards the shortest distance between the miniimplants and the roots of the maxillary anterior teeth was measured in the lateral cephalogram. The corresponding cone beam CT was displayed and the shortest distance between the miniimplants and the roots of the maxillary anterior teeth was measured. Also, the proximity of the miniimplants to further anatomical structures was assessed.

Results: Using this method no root was penetrated and the Cavum nasi was not perforated. There were no significant differences of the distance measurement between the miniimplants and the anterior roots compared in 2D- and 3D- X-rays.

Conclusion: For paramedian virtual placement of miniimplants in the region of the third palate-fold, 2D lateral cephalograms are accurate enough – except at the suspicion of structural anomalies such as displaced canines or cleft lip and palate.

2 Einleitung und Fragestellung

2.1 Miniimplantate allgemein

In der Kieferorthopädie werden Miniimplantate zur maximalen Verankerung [9] von kieferorthopädischen Behandlungsapparaturen (zum Beispiel Gaumennahterweiterungsapparaturen) angewendet, wobei Kräfte direkt von den Miniimplantaten, welche an verschiedenen Orten inseriert werden können [34], auf Zähne übertragen werden [72]. Diverse Hersteller bieten sie für verschiedene Anwendungsgebiete in unterschiedlichen Variationen bezüglich Durchmesser, Länge und Design an, wobei kein Miniimplantatsystem dem anderen überlegen scheint [31, 106]. Speziell am anterioren Gaumen werden heute Miniimplantate mit austauschbaren Abutments angewandt [3, 39, 46, 89, 113, 120]. Dies bietet die Möglichkeit, sie über austauschbare Komponenten schnell an verschiedene mechanische Anforderungen anzupassen [90].

In der Literatur werden zahlreiche Synonyme für Miniimplantate verwendet. Einer der ersten Autoren, der über die kleinen Schrauben berichtete, benutzte den Begriff „Miniscrew“ [21]. Um den fachfremden Leser nicht zu verwirren, wird im folgenden Text ausschließlich der Begriff „Miniimplantat“ verwendet. Aktuell sind dies die kleinsten Implantate, die es zur temporären skelettalen Verankerung gibt [80].

Anatomische Strukturen, wie der inter- und extraradikuläre Alveolarfortsatz [63] oder der mediane und paramediane Gaumen (Abbildung 1) eignen sich zur Insertion. Miniimplantate werden temporär eingebracht und absorbieren reaktive Kräfte nach dem 3.Newtonschen Gesetz (*actio est reactio*) bei schwierigen Verankerungsaufgaben wie dem Distalisieren [95, 100, 112], Mesialisieren [35, 43] und Extrudieren [89] von Zähnen oder der Verankerung einer Gaumennahterweiterungsapparatur (Abbildung 2) [73, 111].

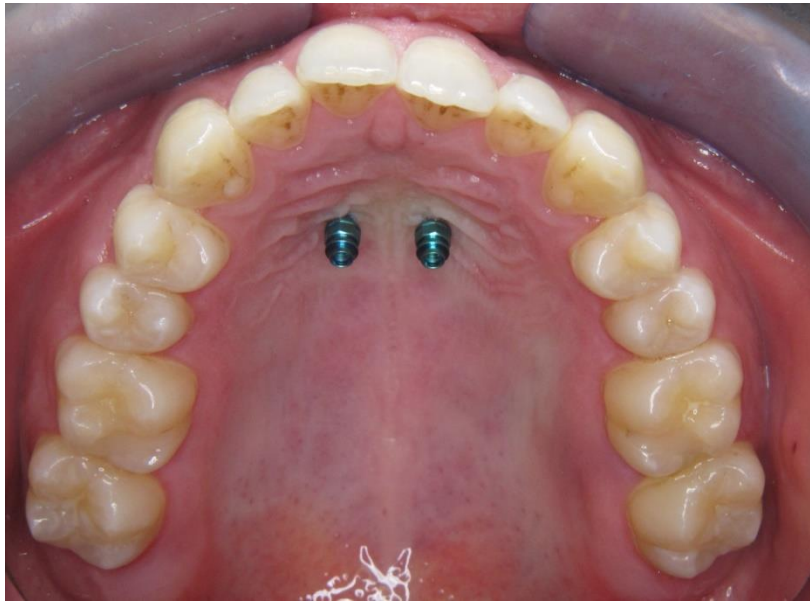


Abbildung 1: Paramedian inserierte Miniimplantate



Abbildung 2: Miniimplantat-getragene Gaumennahterweiterungsapparatur

Der risikoärmste und heute am meisten genutzte Insertionsort, mit der geringsten Verlustrate von Miniimplantaten, befindet sich paramedian im anterioren Gaumen (Abbildung 1) [48, 70]. Nach der Insertion können die Miniimplantate entweder direkt belastet oder erst nach einer Einheilungsphase mit der Behandlungsapparatur bestückt werden.

Einige Autoren empfehlen eine Einheilungsphase von zwei bis sechs Wochen [27, 65, 93, 94, 116]. Jedoch führten Untersuchungen auch zu dem Schluss, dass eine sofortige Belastung sinnvoll ist und keinen Faktor für ein erhöhtes Risiko darstellt [17, 76].

Miniimplantate bleiben nur während der Nutzungsphase in situ und werden nach Abschluss der Behandlung wieder entfernt [80]. Sie lassen sich unkompliziert ohne Lokalanästhesie explantieren [21, 30, 94]. Dies stellt für den Patienten keine größere Belastung dar [60].

2.1.1 Insertionsorte

Als mögliche Insertionsregionen für Miniimplantate werden im Einzelnen der Unter- und der Oberkiefer interradikulär von bukkal und lingual [110], palatinal (median/ paramedian) [68] oder retromolar [75, 92] aufgeführt.

Aufgrund der deutlich höheren Erfolgsrate von bis zu 100% [23, 53, 108] -bietet sich der anteriore Gaumen als Insertionsregion gut an. Die Implantation am Gaumen setzt die Schonung von Zahnwurzeln, verlagerten Zähnen, der Nasenhöhle sowie von Nerven und Blutgefäßen voraus und bietet ein ausreichendes vertikales Knochenangebot [39] in Kombination mit einer dünnen, befestigten Mukosa [70]. Das Risiko, eine Zahnwurzel, einen Nerv oder ein Blutgefäß zu verletzen, ist dort aufgrund der anatomischen Gegebenheiten sehr gering [70]. Miniimplantate, die am anterioren Gaumen platziert werden, erweitern die kieferorthopädischen Verankerungsmöglichkeiten. Im Vergleich zu dentalen Verankerungen treten weniger unerwünschte Nebenwirkungen auf, da sie die reaktiven Kräfte (3. *Newtonsches Gesetz*) absorbieren [109].

2.1.2 Risiken

Zu den Faktoren, die einen Misserfolg der Implantation nach sich ziehen können, gehören:

- Insertionsort [55]
- Insertionstiefe [107]
- Sofortbelastung / verspätete Belastung
- Sichtverhältnisse beim Implantieren [97]
- Knochendichte und somit Primärstabilität [59, 71]
- Eindrehmoment [103, 115]
- Falsches chirurgisches Vorgehen [76]
- Typ des Miniimplantats (Querschnitt, Länge, Gewinde) [13, 32, 71, 103, 115]
- Nasenhöhlenpenetration [4, 22]
- Wurzelnähe / Wurzelkontakt [5, 61, 81, 104]

Bei der Nutzung von Miniimplantaten in der Kieferorthopädie gilt der Verlust der Stabilität als Misserfolg, da dadurch meist das Behandlungsziel nicht erreicht wird. Ein Hauptfaktor für den Verlust eines Miniimplantats ist der Kontakt mit einer Zahnwurzel [85], da dies mit einem verminderten Verankerungswert einhergeht [105]. Weiter konnte nachgewiesen werden, dass die Erfolgsrate von Miniimplantaten von der Nähe zu den Zahnwurzeln abhängt [81]. Bei lateralem Kontakt des Miniimplantats und der dabei herbeigeführten Verletzung des Wurzelzement-/Dentinbereichs gibt es keine klinischen Konsequenzen für die Gesundheit des traumatisierten Zahnes [16, 38]. Zwar geht das Miniimplantat bei Wurzelkontakt verloren, jedoch gibt es Reparaturmechanismen des Parodonts, die nach einem Kontakt aktiviert werden und einen etwaigen Wurzelschaden reparieren [57].

2.1.3 Überlebensraten von Miniimplantaten

Die Überlebensraten von Miniimplantaten variieren je nach Insertionsregion. Die geringste Erfolgsrate haben Miniimplantate lingual im Unterkiefer. Nach Wiesmann beträgt die Erfolgsrate dort 0% [110]. Der Unterkiefer wird von Berens et al. deshalb als inadäquate Insertionsregion beschrieben [13]. Im Ober- und Unterkiefer liegen die Erfolgsraten für bukkal inserierte Miniimplantate zwischen 71% [44] und 92,9% [77]. Retromolar inserierte Miniimplantate weisen im Ober- und Unterkiefer eine Überlebensrate von 90% auf [76]. Die höchste Erfolgsrate liegt mit 90% [23] bis 100% [42, 44] am anterioren Gaumen.

2.2 Röntgen- und digitale Planung der Miniimplantat-Position

Zur Risikominimierung bei einer Implantation am anterioren Gaumen eignet sich eine präoperative Knochendichtemessung [14] sowie die Vermessung des vertikalen Knochenangebots in einer Fernröntgenseitenaufnahme [50].

Bei kieferorthopädischen Behandlungen wird im klinischen Alltag zur Behandlungsplanung eine Fernröntgenseitenaufnahme erstellt, mit der sich Winkel und Strecken in knöchernen Strukturen messen oder Veränderungen des Weichgewebeprofiles bewerten lassen [66]. Auf den Röntgenbildern sind Zentimeterskalen abgebildet, die sich im Cephalostat der Röntgengeräte befinden. Dadurch lassen sich der tatsächliche Maßstab errechnen und die gewünschten Strecken und Winkel zwischen gegebenen anatomischen Strukturen messen.

Die dreidimensionale digitale Volumentomographie, die in der allgemeinen und chirurgischen Zahnheilkunde Anwendung findet [102], eignet sich auch zur Planung von Miniimplantatinsertionen [2, 62, 64]. Vor einer Insertion am anterioren Gaumen könnte somit das vertikale Knochenangebot über eine zweidimensionale Fernröntgenseitenaufnahme oder über eine dreidimensionale digitale Volumentomographie ermittelt werden [46, 50]. In der Literatur wird beschrieben, dass Fernröntgenseitenaufnahmen dafür prinzipiell ausreichend sind. Jung et al. vergleichen dazu Messungen des vertikalen Knochenangebots in Fernröntgenseiten- und digitalen Volumentomographieaufnahmen [51].

2.2.1 Virtuelle Miniimplantatpositionierungsplanung

2D- und 3D-Datensätze können in der digitalen Kieferorthopädie am Computer überlagert werden.

Dies ermöglicht zum Beispiel:

- Prä- und postoperative Vergleiche [18]
- Vergleiche von Behandlungsergebnissen mit und ohne Miniimplantate [117]
- Vergleiche der Messgenauigkeit verschiedener Aufnahmen [86, 101]
- Präoperative Planungen zur Positionierung von Miniimplantaten [48, 58]

2.3 Gaumenfalten-Methode zur Insertion

Bevor die Technik der softwaregestützten Miniimplantatpositionierung zur Verfügung stand, wurden die anatomischen Gegebenheiten vom Behandler intraoral und über Diagnostikmodelle eingeschätzt, die Fernröntgenseitenaufnahme bewertet, der Patient anästhesiert und die Miniimplantate entsprechend implantiert. Es wurde die Region der dritten Gaumenfalte paramedian gewählt, da dort ein großes Knochenangebot vorliegt [46, 48]. Anschließend fand eine Abformung statt, ein Arbeitsmodell wurde hergestellt und darauf die Apparatur angefertigt. In einem zweiten Schritt wurde die Apparatur eingegliedert. Hierbei handelt es sich um ein zweizeitiges Verfahren.

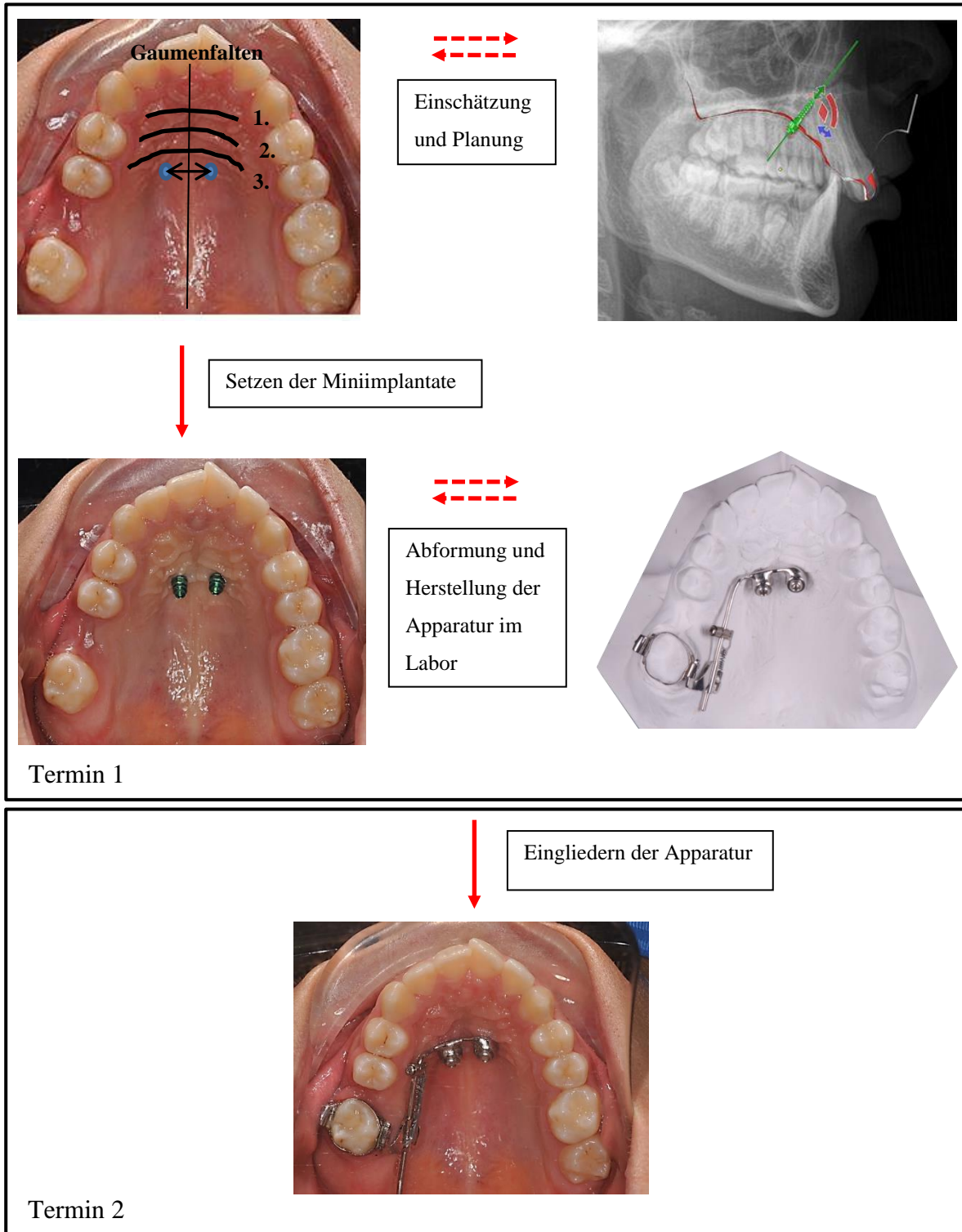


Abbildung 3: Zweizeitiges Verfahren

2.4 Digitale Verfahren zur Insertion

Durch die softwaregestützte Miniimplantatpositionierung kann die intraorale Situation mit digitalen Röntgenaufnahmen überlagert und am Computer betrachtet werden. Hierzu werden ein intraoraler Scan oder ein Scan eines Gipsmodells durchgeführt und eine *.STL-Datei erzeugt. Dieses 3D-Bild kann mithilfe der Software (zum Beispiel *OnyxCeph* der Firma Image-Instruments, Chemnitz) mit einem Fernröntgenseitenbild oder einer digitalen Volumentomographie überlagert werden. Das Verfahren wird von De Gabriele et al. auch als „Easy-Driver Methode“ beschrieben [25]. Maino et al. beschreiben dieses Vorgehen als „MAPA-Guide“ [78].

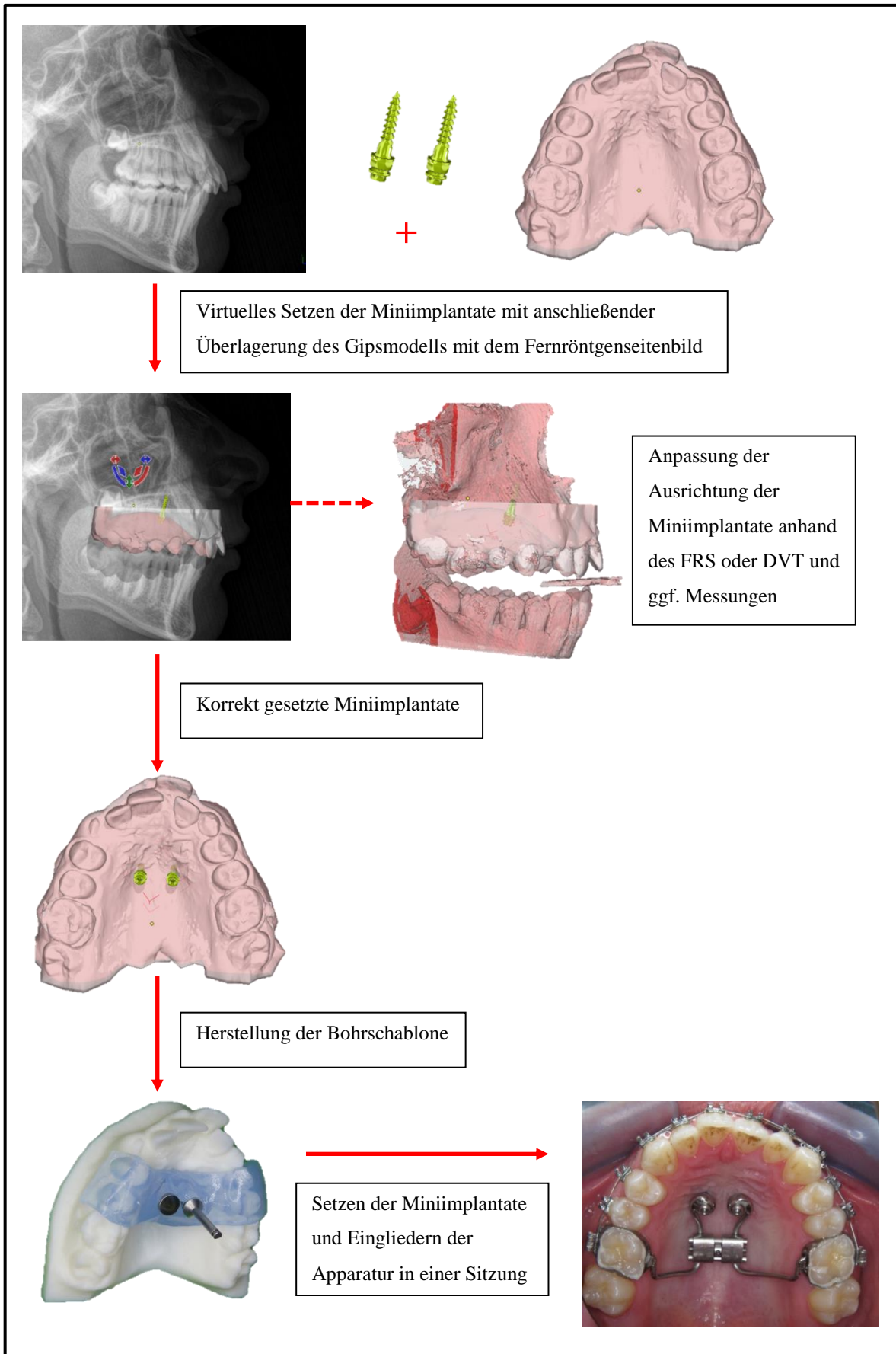


Abbildung 4: Einzeitiges Verfahren

Durch eine digitale präoperative Planung könnten die Erfolgsrate erhöht [47] und Komplikationen wie beispielsweise eine iatrogene oronasale Verbindung sowie Wurzelverletzungen der Frontzähne [67] vermieden werden. Zweidimensionale Aufnahmen erlauben Streckenmessungen ausschließlich in der Sagittalebene, weshalb in Fernröntgenseitenbildern keine Aussagen über Strecken in der Transversalebene getroffen werden können.

In 3D-Aufnahmen können die Lage der Zahnwurzeln hingegen in einer weiteren Dimension vermessen und der Abstand von Miniimplantaten zu Wurzelspitzen prospektiv virtuell geplant werden. Miniimplantate können dadurch auch bei Patienten mit verlagerten Eckzähnen oder Lippen-Kiefer-Gaumenspalten akkurater gesetzt und die Behandlungsprognose somit verbessert werden [6].

Bei diesem Verfahren wird eine Bohrschablone und die kieferorthopädische Apparatur schon vor der Miniimplantatinsertion angefertigt, damit diese am Tag der Implantation eingesetzt werden kann. Hierbei handelt es sich um ein einzeitiges Verfahren.

2.5 Fragestellung

Der Abstand der Miniimplantate zu den Zahnwurzeln spielt eine wesentliche Rolle für den Erfolg einer solchen Insertion [4, 70, 104]. Steht ein Implantat zu nah an oder in Kontakt mit einer Zahnwurzel, kann es zu externen Wurzelresorptionen und zum Verlust des Miniimplantats kommen [104]. Es gibt zwar Reparaturmechanismen, die das geschädigte Parodont nach Explantation wieder herstellen [57], dennoch gilt die Implantation als fehlgeschlagen. Deshalb ist eine präzise digitale präoperative Planung der Implantatpositionierung sinnvoll. Ergründet werden soll, ob ein Fernröntgenseitenbild für diese Aufgabe ausreichend ist oder eine 3D-Aufnahme hinzugezogen werden sollte.

Ergibt sich in der Streckenmessung von im anterioren Gaumen virtuell platzierten Miniimplantaten zu Wurzelspitzen und anatomisch relevanten Strukturen ein Unterschied zwischen der Messung in einem Fernröntgenseitenbild einerseits und in einer korrespondierenden digitalen Volumentomographie andererseits?

3 Material und Methoden

Datenerhebung

Bei dieser Studie handelt es sich um eine retrospektive, konsekutive Kohortenstudie. Die verwendeten Patientendaten (Fernröntgenseitenaufnahmen, digitale Volumentomographien und Modellscans) stammen aus einer kieferorthopädischen Praxis (PD Dr. Björn Ludwig und Dr. Bettina Glasl, Traben-Trarbach). Die Aufnahmen wurden entsprechend der rechtfertigenden Indikationen erstellt (beispielsweise verlagerte Eckzähne, Umstellungsosteotomie, Transplantation, Kinnplastik). Vorhandene Datensätze wurden zusammengesetzt, virtuell implantiert und retrospektiv ausgewertet.

3.1 Ein- und Ausschlusskriterien

Einschlusskriterien

- Vollständige diagnostische Unterlagen wurden zeitgleich erstellt (Fernröntgenseitenaufnahmen, digitale Volumentomographien und Scans der Oberkiefer)
- Keine Vorbehandlung mit Miniimplantaten
- Spätes Wechselgebiss und bleibende Dentition
- Die Zähne 13 bis 23 sind angelegt und klinisch sichtbar
- Identische Parameter bei Fernröntgenseitenbildern und digitalen Volumentomographien bei allen Patienten

Ausschlusskriterien

- Bereits erfolgte kieferorthopädische Behandlungen
- Hypo- oder Hyperdontie und Zahnverlusten
- Patienten mit Syndromen oder Lippen-Kiefer-Gaumenspalten

Patientenkollektiv

In der unizentrischen Pilotstudie wurden Patientendaten von neun weiblichen und elf männlichen Personen herangezogen.

Das Alter der Patienten lag bei Behandlungsbeginn zwischen 10,5 und 25,3 Jahren.

Die weiblichen Teilnehmer waren im Durchschnitt 14,0 Jahre, die männlichen 13,9 Jahre alt.

3.2 Software und digitale Daten

Zur virtuellen Platzierung der Miniimplantate wurde die Software *OnyxCeph 3D Lab*, der Firma Image Instruments GmbH in Chemnitz in der Version 3.2.46 verwendet. Die Basissoftware wurde mit dem Modul „TADMatch/ Register3D“ erweitert, das sich zur virtuellen Insertion eignet.

Die Miniimplantate wurden als virtuelles Analogon platziert. Das verwendete Modell ist das *OrthoEasy Pal* mit 8,0 mm Länge und 1,7 mm Gewindedurchmesser.



Abbildung 5: Digitales Forestadent OrthoEasy Pal Analogon und reales OrthoEasy Pal

Hierbei handelt es sich um ein selbstschneidendes und selbstbohrendes Miniimplantat der Firma Forestadent, welches speziell für den palatinalen Einsatz entwickelt wurde.

Bei den verwendeten digitalen Daten handelt es sich um

- Fernröntgenseitenaufnahmen,
- Intraorale Scans des Oberkiefers,
- Digitale Volumentomographien und
- Digitale *OrthoEasy Pal*-Miniimplantatanaloga.

Fernröntgenseitenaufnahmen

Die Fernröntgenseitenaufnahmen wurden mit dem Röntgengerät *Orthophos SL 3D* der Firma Sirona mit 77 kV bei 14 mA erstellt. Die Bilder wurden als *.DICOM- oder *.JPEG-Dateien in *OnyxCeph 3D Lab* importiert.

Digitale Volumentomographie

Die digitalen Volumentomographien wurden mit dem Röntgengerät *Orthophos SL 3D* der Firma Sirona mit 85 kV und 6-10 mA erstellt. Die Aufnahmedauer belief sich auf 5000 ms bis 14.180 ms. Die Aufnahmen wurden im *.DICOM-Dateiformat gespeichert und in *OnyxCeph 3D Lab* importiert.

Intraoralscans

Als Intraoralscanner kam der Scanner *Trios 3 Mono* der Firma 3Shape zum Einsatz. Die entstandenen dreidimensionalen Aufnahmen der Oberkiefer wurden im Dateiformat *.stl gespeichert und in *OnyxCeph* importiert.

3.3 Überlagerung der Datensätze

Als Hilfestellung zur Überlagerung der digitalen Daten wurde eine Funktion in *OnyxCeph* verwendet, bei der korrespondierende Referenzpunkte in Röntgenaufnahmen manuell gewählt werden können. Anhand dieser überlagert die Software automatisch die Datensätze. Für 3D-Bilder werden mindestens drei Referenzpunkte benötigt; für 2D-Bilder mindestens zwei. Bei Bedarf kann zusätzlich eine manuelle Feinjustierung vorgenommen werden.

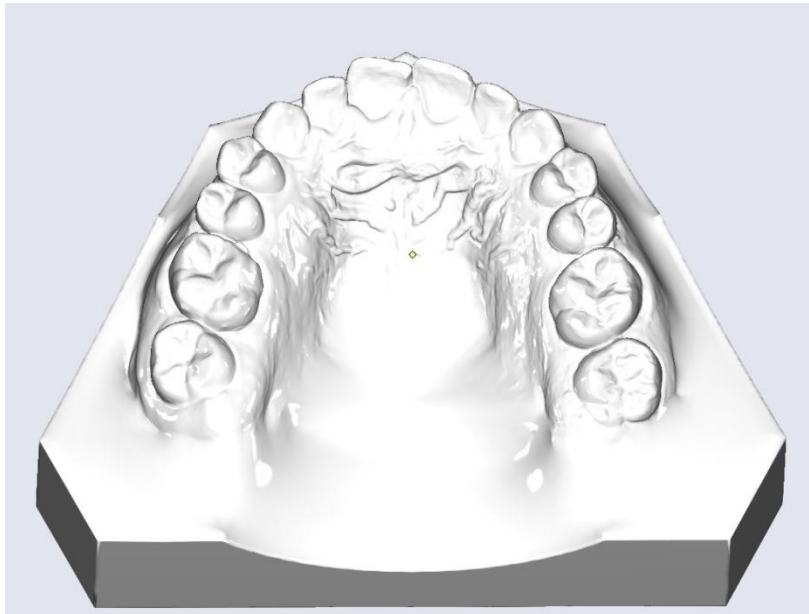


Abbildung 6: Oberkieferscan

Die 2D- und 3D-Röntgenaufnahmen sowie ein Scan des Oberkiefers wurden anhand anatomischer Strukturen deckungsgleich überlagert. Die digitale Volumentomographie wurde für die Versuche ausgeblendet.

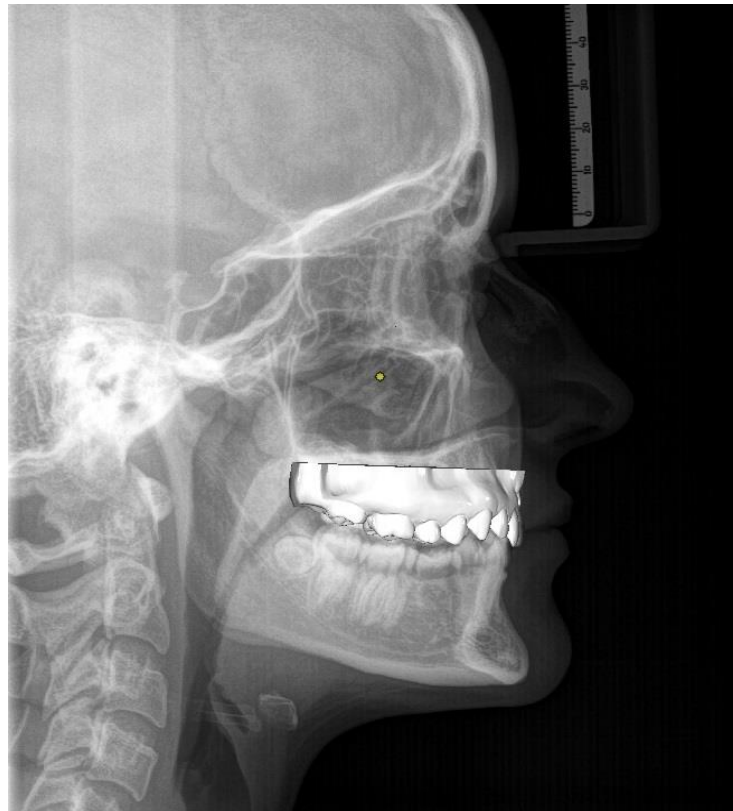


Abbildung 7: Fernröntgenseitenaufnahme überlagert mit Oberkieferscan

3.4 Miniimplantatpositionierung

Die Miniimplantate wurden symmetrisch lateral der *Raphe palatina mediana* auf Höhe der dritten *Plicae palatinae transversae* virtuell implantiert. Der Abstand der Implantate zueinander betrug 8,0 mm.

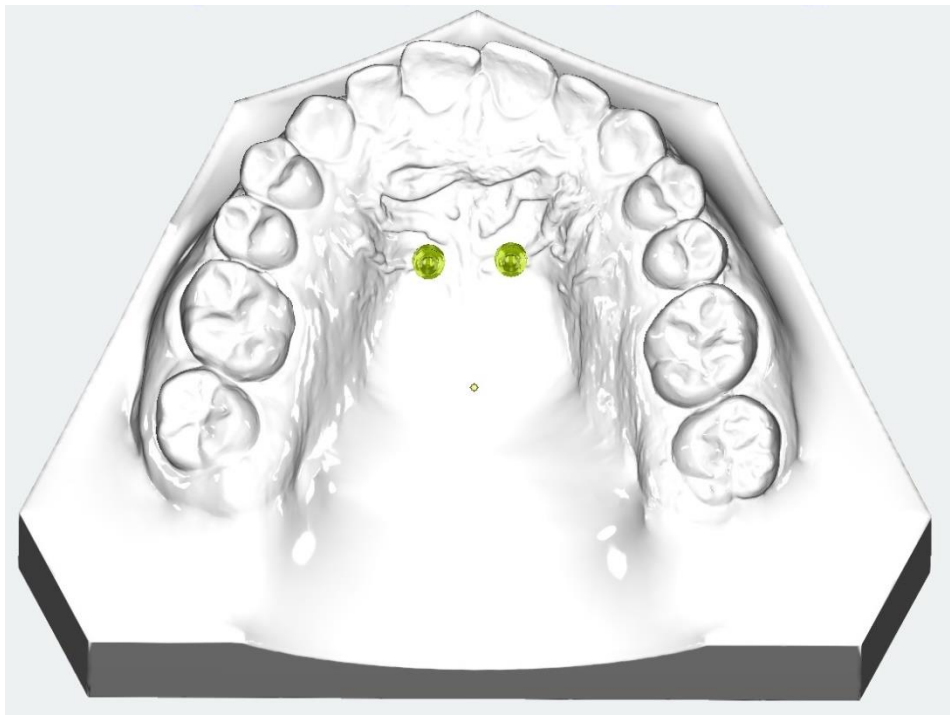


Abbildung 8: Anhand der Gaumenfaltenmethode und überlagertem Fernröntgenseitenbild virtuell gesetzte Miniimplantate

Im Fernröntgenseitenbild wurde daraufhin die Position gesichtet (orthogonal zum Knochen) und geprüft, ob eine mögliche Perforation der Inzisivi oder des Nasenbodens vorlag. Im Falle einer Überlagerung und somit einer möglichen Perforation wurde die Position der Miniimplantate und deren Angulation entsprechend angepasst.

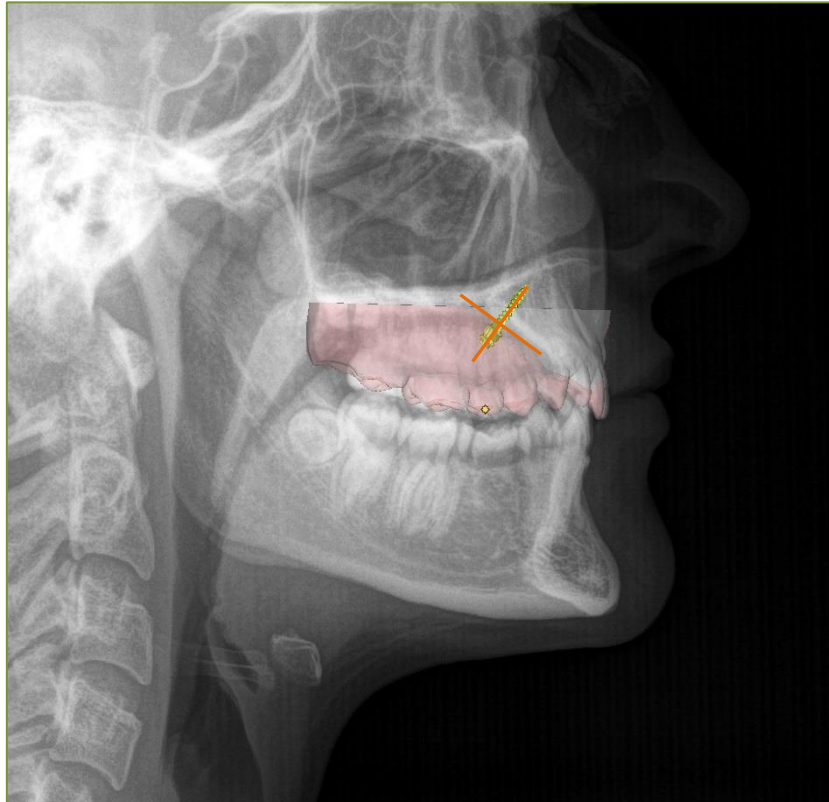


Abbildung 9: Platzierung der Miniimplantate anhand des Oberkieferscans und der Fernröntgenseitenaufnahme

3.5 Messungen

Messstrecken M1 bis M5

M1: Inzisivi – Miniimplantate im Fernröntgenseitenbild (Abbildung 8)

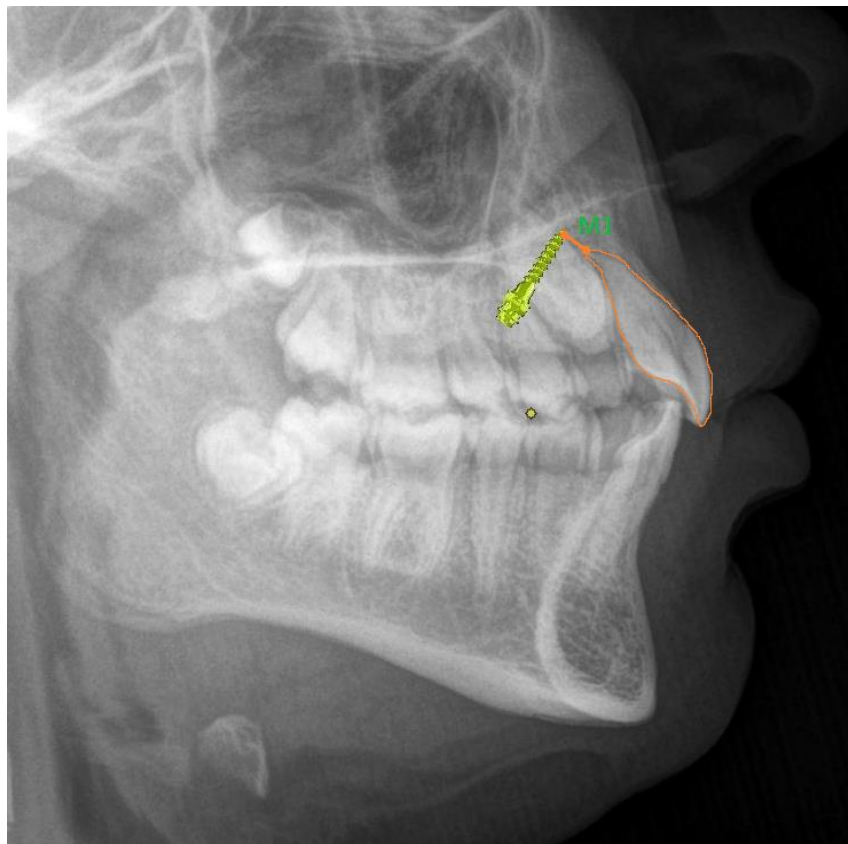
M2: Zahn 12 – Miniimplantat rechts im digitalen Volumentomogramm

M3: Zahn 11 – Miniimplantat rechts im digitalen Volumentomogramm

M4: Zahn 21 – Miniimplantat links im digitalen Volumentomogramm

M5: Zahn 22 – Miniimplantat links im digitalen Volumentomogramm

War die Positionierung erfolgreich, wurde das Auswertungsmodul geöffnet und die geringsten Abstände der Zahnwurzeln der Zähne 11 / 21 zu den Miniimplantaten im Fernröntgenseitenbild gemessen.



*Abbildung 10: Vermessung des Abstands M1
Miniimplantate – Frontzahnwurzeln im Fernröntgenseitenbild*

Zur Kontrolle und für die weiteren Messungen M2 bis M5 wurde die digitale Volumentomographie wieder eingeblendet. Anhand der in dieser 3D-Aufnahme im Vergleich zur Fernröntgenseitenaufnahme zusätzlich erkennbaren anatomischen Strukturen wurde kontrolliert, ob die Positionierung erfolgreich war. Im Anschluss wurden die Abstände zwischen Frontzähnen und Miniimplantaten gemessen.

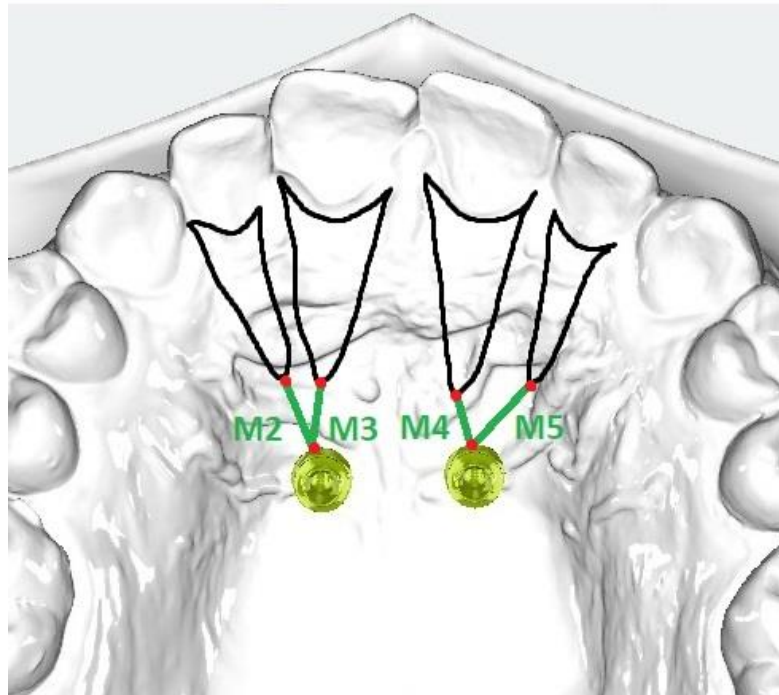


Abbildung 11 : Messstrecken M2 bis M5

Durch teilweises Ausblenden der digitalen Volumentomographie konnten Zähne angeschnitten, ihr Apex bestimmt und die Miniimplantate sichtbar gemacht werden. Mittels der in *OnyxCeph* integrierten Auswertungsfunktion konnten so die geringsten Distanzen zwischen Zahnwurzeln und Miniimplantaten gemessen werden.

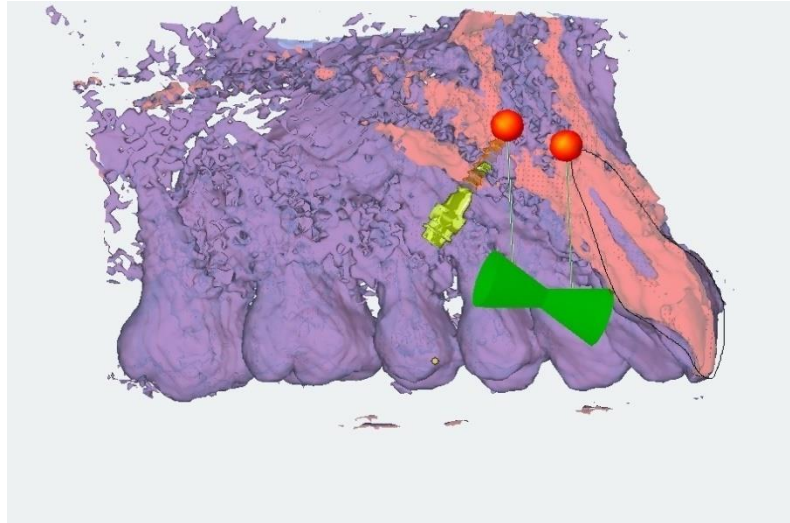


Abbildung 12: Software *OnyxCeph*, Modul Auswertung 3D:
Streckenmessung M4

3.5.1 Prinzip der Distanzmessung (Software *OnyxCeph 3D*)

Zwei Punkte $P(p_1|p_2|p_3)$ und $Q(q_1|q_2|q_3)$ im dreidimensionalen Raum haben den Abstand d . Durch Setzen eines Punktes im Auswertungsmodul werden automatisch dreidimensionale Lageinformationen des Punktes erstellt. Nach Angaben der Firma Image Instruments GmbH errechnet die Software die Distanz der Punkte durch folgende Vektorgeometrie:

$$d(P,Q) = \sqrt{(q_1-p_1)^2 + (q_2-p_2)^2 + (q_3-p_3)^2}$$

3.6 Statistische Methoden

3.6.1 Datenerhebung und Datenverarbeitung

Die ermittelten Messwerte der Versuchsreihen 1 und 2 wurden zunächst handschriftlich festgehalten und anschließend in eine Tabelle (Excel 2010, Microsoft) übertragen. Die statistische Auswertung der Messergebnisse erfolgte mit dem Programm *SPSS* (Version 25, IBM) sowie auf einer webbasierten Statistikplattform <https://statistikguru.de/> (Version 1.96, Wanja Hemmerich, Alexandrastraße 17, 65187 Wiesbaden)

3.6.2 Wiederholbarkeit

Beide Versuchsreihen wurden im Abstand von wenigen Tagen durchgeführt und erfolgten durch denselben Behandler. Um die Wiederholbarkeit zu bestimmen, wurden in 20 diagnostischen Modellen die Miniimplantate in zwei Versuchsreihen implantiert und jeweils die Abstände gemessen.

- Versuchsreihe 1 (15.01.2018)
- Versuchsreihe 2 (08.02.2018)

Zur Überprüfung der Wiederholbarkeit wurden verbundene t-Tests zwischen den Versuchsreihen 1 und 2 erstellt.

3.6.3 Test auf Normalverteilung

Es wurden zwei Tests durchgeführt, welche die Normalverteilung der Messergebnisse überprüfen. Dafür wurden der Kolmogorov-Smirnov-Test und der Shapiro-Wilk-Test angewandt, wobei letzterer wegen der größeren statistischen Aussagekraft bevorzugt wurde. Die Überprüfung auf Normalverteilung ist eine Voraussetzung für die darauf folgende einfaktorielle analysis of variance (einfaktorielle ANOVA).

3.6.4 Deskriptive Statistik

Ein 95%-Konfidenzintervall bedeutet, dass der wahre (gemessene) Wert mit 95-prozentiger Wahrscheinlichkeit innerhalb des entsprechenden Intervalls (Untergrenze-Obergrenze) liegt. Die auf diese Weise erfolgte Überprüfung auf Ausreißer nach oben oder unten zwischen den Messungen ist eine Voraussetzung für die folgende einfaktorielle ANOVA.

3.6.5 Einfaktorielle ANOVA mit Messwiederholung

Es wurde eine einfaktorielle ANOVA durchgeführt, um herauszufinden, ob es einen statistischen Unterschied zwischen den Messmethoden M1 bis M5 gibt. Dabei wurde die Messmethode M1 (gemessen im Fernröntgenseitenbild) jeweils mit den Messungen M2 bis M5 (gemessen in digitaler Volumentomographie) und die Messungen M1 bis M5 untereinander verglichen.

3.6.6 Post-hoc-Poweranalyse

Zur Überprüfung einer ausreichenden Fallzahl wurde eine Post-hoc-Poweranalyse durchgeführt. Für dieses statistische Verfahren wurde:

- Die Korrelation der fünf Datenpaare aus Versuchsreihe 1 und 2 anhand von deren Mittelwerte bestimmt
- Ein Signifikanzniveau von 5% festgelegt
- Eine hohe statistische *power* von 1,0 gewählt.

3.7 Arbeitsschritte

Arbeitsschritte: Intraoralscan importieren

1. Öffnen von *OnyxCeph 3D Lab*
2. Patienten anlegen
3. Neues Bild hinzufügen
4. Bildserie erstellen
5. *.stl-Datei per *drag & drop* in die Bildserie ziehen
6. Gebisstyp (bleibend oder Wechselgebiss) wählen
7. Bild erneut auswählen
8. Modul „Modellausrichtung“ öffnen
9. Weichgewebe des Scans entfernen und das Modell sockeln werden

Arbeitsschritte: Gipsmodell digitalisieren und importieren

1. Öffnen von *OnyxCeph 3D Lab*
2. Patienten anlegen
3. Neues Bild hinzufügen
4. Bildserie erstellen
5. Scan-Modul öffnen
6. OK/UK auswählen
7. Scan starten
8. *.stl-Datei per *drag & drop* in die Bildserie ziehen
9. Gebisstyp (bleibend oder Wechselgebiss) wählen
10. Bild erneut auswählen
11. Modul „Modellausrichtung“ öffnen
12. Gegipsten Sockel beschneiden

Arbeitsschritte: Fernröntgenseitenaufnahmen importieren

1. Öffnen von *OnyxCeph 3D Lab*
2. Patienten anlegen
3. Neues Bild hinzufügen
4. Bildserie erstellen
5. Datei per *drag & drop* in die Bildserie ziehen
6. Auswertungsmodul öffnen
7. Normierungspunkte A und B auf die Skalierung im Fernröntgenseitenbild legen
8. Die tatsächliche Strecke eingeben, um den Maßstab anzupassen

Arbeitsschritte: Digitale Volumentomographie importieren

1. Öffnen von *OnyxCeph 3D Lab*
2. Patienten anlegen
3. Neues Bild hinzufügen
4. Bildserie erstellen
5. Datei per *drag & drop* in die Bildserie ziehen

Arbeitsschritte: Überlagerung von 2D- und 3D-Bildern

1. Öffnen von *OnyxCeph 3D Lab*
2. Patienten auswählen
3. Modul „Register 3D“ öffnen
4. Datensätze zusammenführen
 - a. Fernröntgenseitenbild median mit dem Modell überlagern
 - b. Digitale Volumentomographie und Modell überlagern
 - c. Speichern als „Komplett Datensatz“

Arbeitsschritte: Strecken messen

1. Öffnen von *OnyxCeph 3D Lab*
2. Patienten auswählen
3. Datensatz im Auswertungsmodul öffnen
4. Punkt A (Zahnwurzel) und Punkt B (Miniimplantat) setzen
5. Distanz AB ablesen

4 Ergebnisse

4.1 Gesamtzahl der Perforationen des Nasenbodens / der Zahnwurzeln

Die Gesamtzahl der virtuell implantierten Miniimplantate lag bei 80. Bei 20 Patienten wurden virtuell je zwei Miniimplantate symmetrisch im anterioren Gaumen implantiert. Die Gesamtzahl der Perforationen in das Cavum nasi lag bei 0. Die Gesamtzahl der perforierten Zahnwurzeln lag bei 0.

Messwerte

Im Anhang befinden sich die Messwerte der Versuchsreihen 1 (Tabelle 9) und 2 (Tabelle 10), die als Grundlage für die Auswertungen und Statistiken dienen.

4.2 Wiederholbarkeit anhand verbundener t-Tests

Es wurden jeweils die Messungen M1 bis M5 der Versuchsreihe 1 mit den korrelierenden Messungen M1 bis M5 der Versuchsreihe 2 miteinander verglichen.

Tabelle 1 : Korrelation bei gepaarten Stichproben

	N	Korrelation	Signifikanz
Paare 1 M1 _{v1} & M1 _{v2}	20	,576	,008
Paare 2 M2 _{v1} & M2 _{v2}	20	,667	,001
Paare 3 M3 _{v1} & M3 _{v2}	20	,641	,002
Paare 4 M4 _{v1} & M4 _{v2}	20	,484	,031
Paare 5 M5 _{v1} & M5 _{v2}	20	,643	,002

Bei der Erstellung der verbundenen t-Tests (um die Wiederholbarkeit zu prüfen ($p < ,05$)) konnte gezeigt werden, dass es keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den paarweise verglichenen Messungen M1 bis M5 gibt. Es zeigt sich somit, dass die Methode wiederholbar ist.

4.3 Vorauswertung für die einfaktorielle ANOVA

1. Normalverteilung gegeben

Anhand des Shapiro-Wilk-Tests wurde die Normalverteilung der Messwerte überprüft.

Tabelle 2: Test auf Normalverteilung Versuchsreihe 1

Versuchsreihe	Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz
1			
M1	,962	20	,579
M2	,952	20	,394
M3	,949	20	,358
M4	,956	20	,466
M5	,947	20	,320

Tabelle 3: Test auf Normalverteilung Versuchsreihe 2

Versuchsreihe	Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz
2			
M21	,972	20	,792
M22	,963	20	,606
M23	,951	20	,383
M24	,947	20	,330
M25	,946	20	,307

Der Shapiro-Wilk-Test wurde durchgeführt, um die Normalverteilung der Abstände der Messungen zu prüfen. Die Abstände zwischen den Zahnwurzeln und den Miniimplantaten waren für alle Abstandsmessungen M1 bis M5 der Versuchsreihen 1 und 2 normalverteilt (Signifikanzniveau von 5 %).

2. Deskriptive Statistik ohne Ausreißer

Versuchsreihe 1

Der geringste Abstand der Messungen der Versuchsreihe 1 beträgt 1,50 mm, der größte Abstand 12,20 mm.

Tabelle 4: Deskriptive Statistik der Versuchsreihe 1

	N	Mittelwert	Standard- abweichung	95%-Konfidenzintervall für den Mittelwert		Minimum	Maximum
				Unter- grenze	Ober- grenze		
M1	20	5,2700	2,05096	4,3101	6,2299	1,90	9,90
M2	20	6,1650	2,12015	5,1727	7,1573	2,70	11,50
M3	20	5,1200	2,41194	3,9912	6,2488	1,60	11,00
M4	20	5,2250	2,24098	4,1762	6,2738	1,50	8,80
M5	20	6,2100	2,10985	5,2226	7,1974	2,40	12,20

Minima, Maxima sowie Unter- und Obergrenze des Konfidenzintervalls der Versuchsreihe 1.

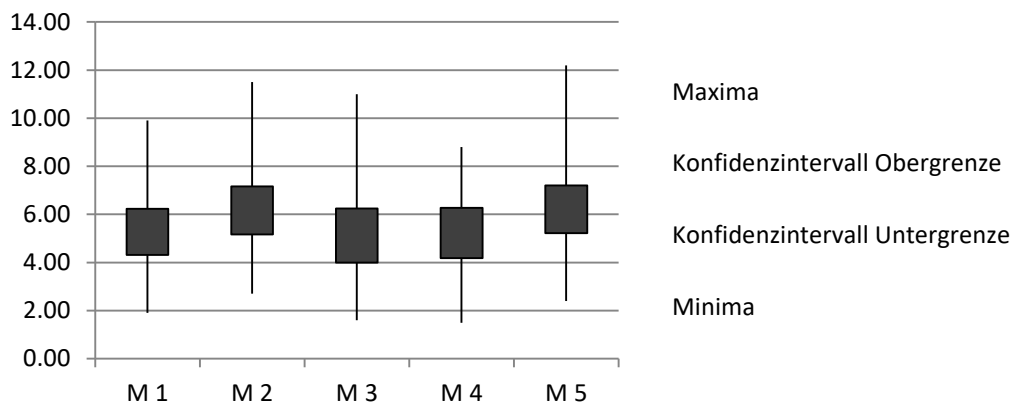


Diagramm 1: Konfidenzintervalle 95% mit jeweiligen Minima und Maxima der Versuchsreihe 1

Versuchsreihe 2

Der geringste Abstand der Messungen der Versuchsreihe 1 beträgt 1,50 mm, der größte Abstand 12,50 mm.

Tabelle 5: Deskriptive Statistik der Versuchsreihe 2

	N	Mittelwert	Standardabweichung	95%-Konfidenzintervall für den Mittelwert		Minimum	Maximum
				Untergrenze	Obergrenze		
M12	20	5,435	1,8556	4,5665	6,3034	2,20	8,80
M22	20	6,265	2,5604	5,0666	7,4633	1,90	12,50
M32	20	5,620	2,5324	4,4347	6,8052	1,80	9,80
M42	20	5,910	2,2287	4,8669	6,9530	2,40	9,90
M52	20	6,45	2,3000	5,3735	7,5264	1,50	11,90

Minima, Maxima sowie Unter- und Obergrenze des Konfidenzintervalls der Versuchsreihe 2.

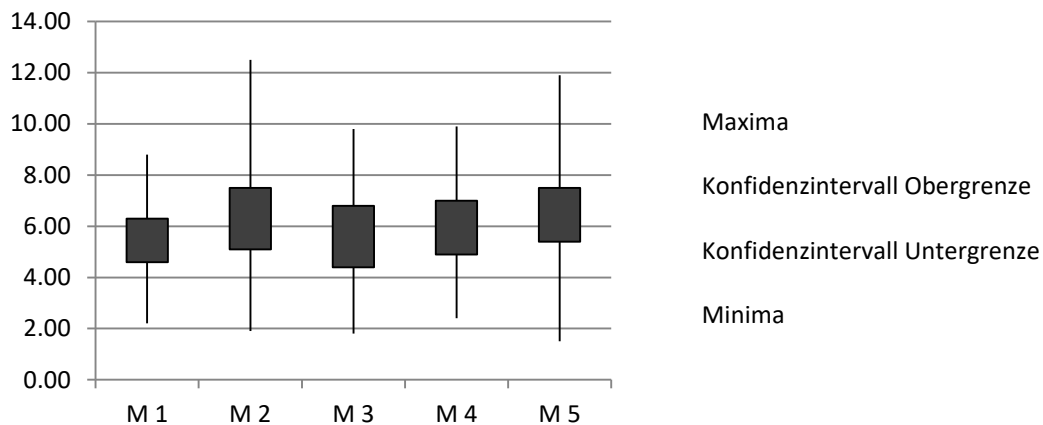


Diagramm 2: Konfidenzintervalle 95% mit jeweiligen Minima und Maxima der Versuchsreihe 2

Die Konfidenzintervalle der Messungen M1 bis M5 liegen bei näherer Betrachtung alle in einem sehr ähnlichen Rahmen. So kann man bei einem Vergleich erkennen, dass sich alle Konfidenzintervalle überschneiden. Dies zeigt, dass sich die Werte nicht signifikant voneinander unterscheiden.

Das 95%-Konfidenzintervall bedeutet, dass der wahre (gemessene) Wert mit 95-prozentiger Wahrscheinlichkeit in dem entsprechenden Intervall (Untergrenze-Obergrenze) liegt.

4.4 Einfaktorielle ANOVA

ANalysis Of VAriance

Der Abstand zu den Miniimplantaten (gemessen in Millimeter) unterscheidet sich nicht signifikant (innerhalb der Versuchsreihe 1) zwischen den Messungen M1 bis M5. Die Signifikanz zwischen den Messungen M1 bis M5 beträgt $p=,307$. Hierbei wurden alle Messungen M1 bis M5 miteinander verglichen.

Tabelle 6: Einfaktorielle ANOVA

	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Zwischen den Gruppen M1 – M5	23,425	4	5,856	1,220	,307

4.5 Post-hoc-Poweranalyse

Zur Bestimmung einer ausreichenden Stichprobengröße wurde abschließend eine Post-hoc-Poweranalyse erstellt. Hierfür wurde die Korrelation der Mittelwerte der jeweiligen Messpaare errechnet (Pearson-Produkt-Moment-Korrelationskoeffizient r'). Abschließend wurde eine Poweranalyse mit einer *power* von 0,999 und einem Alphaniveau von 5 % durchgeführt.

Tabelle 7: Pearson-Produkt-Moment-Korrelationskoeffizient

Korrelation für Poweranalyse			
	Versuchsreihen	Mittelwerte M1	Mittelwerte M2
Paar 1	M1 & M21	5,270	5,435
Paar 2	M2 & M22	6,165	6,265
Paar 3	M3 & M23	5,120	5,620
Paar 4	M4 & M24	5,225	5,910
Paar 5	M5 & M25	6,210	6,450

Pearson-Produkt-Moment-Korrelationskoeffizient (r)	0,897
---	--------------

Tabelle 8: Post-hoc-Poweranalyse

Poweranalyse			
Power		0,999	sehr hoch
Alphaniveau		.05	Signifikantes Ergebnis bei 5%
Pearson-Produkt-Moment-Korrelationskoeffizient		0,897	(großer Effekt)

Ausreichende Stichprobengröße	N = 18
--------------------------------------	---------------

Die Post-hoc-Poweranalyse ergab, dass eine Studienpopulation von 18 ausreichend ist, um eine hohe statistische *power* aufzuweisen.

4.6 Ergebnisse

Bei Abstandsmessungen von Frontzahnwurzeln und virtuell platzierten Miniimplantaten gibt es keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen 2D-Fernröntgenseitenaufnahmen und 3D-Volumentomographien. Es lagen keine Perforationen in des *Cavum nasi* oder der Zahnwurzeln vor.

5 Diskussion

Der Abstand von Miniimplantaten zu anatomischen Strukturen wie Nerven und Gefäßen, der Nasenhöhle oder auch insbesondere den Zahnwurzeln spielt eine große Rolle für den Erfolg der Implantation. In dieser Studie wurden Miniimplantate an der dritten Gaumenfalte standardisiert unter Zuhilfenahme einer überlagerten Fernröntgenseitenaufnahme virtuell am anterioren Gaumen implantiert. Im Anschluss wurde das korrespondierende digitale Volumentomogramm überlagernd eingeblendet. Es wurde in beiden Bildgebungsverfahren jeweils die geringste Distanz zwischen Miniimplantat und den Frontzähnen gemessen und darauf überprüft, ob sich die Distanzen in 2D- und 3D-Röntgenaufnahmen signifikant unterscheiden oder eine Perforation ins *Cavum nasi* oder eines Zahnes vorlag.

5.1 Studienpopulation

Es wurden Datensätze von 20 Patienten retrospektiv analysiert. Das Patientenkollektiv beinhaltet Datensätze sowohl von Patienten im Wachstum als auch von ausgewachsenen Menschen. Die Aufnahmen, aus denen die jeweiligen überlagerten Datensätze generiert wurden, wurden jeweils zum selben Zeitpunkt erstellt. Somit wurden die Messungen nicht durch das Wachstum der Patienten beeinflusst [40], denn zu unterschiedlichen Zeitpunkten erstellte Datensätze könnten durch das Oberkieferwachstum nicht mehr deckungsgleich superpositioniert werden, weil sich die Lage der Molaren und Inzisiven im Vergleich zum ersten Aufnahmezeitpunkt verändert haben könnte [40]. Durch die entsprechend gewählten Ein- und Ausschlusskriterien (siehe Abschnitt 3 zu Material und Methoden) wurde eine Standardisierung gewährleistet.

Wegen des geringen Stichprobenumfangs kann die Studie als Pilotstudie bezeichnet werden [28] und ist damit in der Evidenzpyramide im unteren Drittel angesiedelt [29]. Sie dient dazu, die Durchführbarkeit des Studiendesigns zu überprüfen. Ein Schwachpunkt der Patientenselektion dieser Studie könnte sein, dass nicht zwischen Mundatmern und Nasenatmern unterschieden wurde, da bei Mundatmern paramedian am anterioren Gaumen ein geringeres Knochenangebot zu erwarten ist [52].

5.2 Methode

Messverfahren

Um die Reliabilität der Studie zu gewährleisten, wurden Ein- und Ausschlusskriterien (siehe Abschnitt 3.1) für Patientendaten definiert sowie ein standardisiertes Vorgehen (siehe Abschnitt 3.7) festgelegt.

Messmethodik

Die Messungen der Versuchsreihen 1 und 2 fanden jeweils innerhalb von kurzen Abständen statt. Sie wurden jedes Mal von dem selben Untersucher (Promovend K. Flaig) durchgeführt. Alle Aufnahmen wurden standardisiert am selben Röntgengerät erstellt.

Power / Signifikanzniveau

Die in dieser Pilotstudie durchgeführte Post-hoc-Poweranalyse ergab, dass ein Stichprobenumfang von 18 Patienten ausreichend ist, um ein statistisch signifikantes Ergebnis zu erzielen. Eine größere Anzahl an ausgewerteten Patientendatensätzen würde die Aussagekraft dieser Studie also nur unwesentlich beeinflussen. Zudem ist die Fallzahl vergleichbar mit ähnlichen Studien, die Messungen im anterioren Gaumen durchführten [50, 84, 118].

5.2.1 Messungen

Diverse Studien haben sich bereits der Unterschiede zwischen digitalen und analogen Messungen gewidmet [49, 98]. Streckenmessungen und deren Vergleich in digitalen Volumentomogrammen ergaben, dass die Messergebnisse sehr akkurat und verlässlich sind [11, 33, 56] und digitale Volumentomographen genaue und verlässliche Datensätze generieren [56].

Die Vermessung des anterioren Gaumens zur Planung von Miniimplantaten anhand von Fernröntgenseitenbildern und digitalen Volumentomographien wurde bereits dediziert verglichen. De Rezende Barbosas und Zamoras Untersuchungen ergaben, dass keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Messmethoden festzustellen waren [26, 119].

Izgi belegt die Verlässlichkeit der digital gemessenen Strecken und Winkel im für diese Studie verwendeten Programm *OnyxCeph* (Image Instruments, Chemnitz) und beschreibt sie als effiziente Methode, um die händische Messung zu ersetzen [49].

Die Genauigkeit der in dieser Studie verwendeten Software, Aufnahmearten und Streckenmessungen wurde somit bereits hinreichend bewiesen.

Hinsichtlich der Abstandsmessung zwischen Frontzahnwurzeln und Miniimplantaten sollte man kritisch betrachten, dass Referenzpunkte für die kürzeste Distanz händisch durch den Operator und nicht automatisch gesetzt wurden. Hierbei könnten, abhängig vom Behandler, zufällige Messabweichungen entstehen. Diese können verursacht werden durch:

- Die gewählte optische Vergrößerung des Datensatzes ‚zoom‘
- Die inkorrekte räumliche Positionierung des Datensatzes, bei der Parallaxefehler entstehen können
- Das Ein- und Ausblenden verschiedener Schichten des digitalen Volumentomogramms und damit einer besseren oder schlechteren Darstellung

Eine Erweiterung der Software um eine Funktion, die den geringsten Abstand zweier Oberflächen zueinander bestimmt, wäre sinnvoll.

Des Weiteren können durch Kopfbewegungen während der der Fernröntgenseitenaufnahme Projektionsfehler entstehen. Solche Fehler entstehen durch eine Rotation des Kopfes entlang der z-Achse. Dies führt zu Folgefehlern linearer Messungen in der Horizontalen [87].

Dieser Fehler lässt sich durch richtiges Positionieren des Patienten vermeiden. Da die Aufnahmen von professionell geschulten Praxismitarbeiterinnen erstellt und von den Praxisinhabern gesichtet wurden, sind sie in der vorliegenden Arbeit unwahrscheinlich.

Voraussetzung für genaue Messdaten in überlagertem Bildmaterial ist die genaue Superpositionierung. Die hier angewandte semiautomatische Überlagerungstechnik (*3P' bzw. three-point-registration*) hängt maßgeblich vom Bediener ab, da er die richtigen Bezugspunkte identifizieren und markieren muss. Das Programm setzt dann das Bildmaterial zusammen. Der Behandler sollte die Überlagerung stets kontrollieren, denn im Vergleich zu anderen Überlagerungsmethoden ist die Genauigkeit von 3P-Überlagerungen geringer [36]. Trotz allem ist sie einfach zu verstehen und durchzuführen und liefert als Standardmethode ausreichend genaue und reproduzierbare Ergebnisse [37].

5.3 Miniimplantate

Um eine möglichst hohe Primärstabilität zu erzielen, erscheint es sinnvoll, eine große Kontaktfläche zwischen Miniimplantat und Knochen herzustellen. Dabei hat die Implantatlänge weniger Auswirkungen auf die Stabilität als die Stärke der Kortikalis und der Miniimplantatdurchmesser [1, 19, 24, 83].

Bei großzügigem Knochenangebot würde es sich anbieten, möglichst große Durchmesser und Miniimplantatlängen zu wählen. Jedoch erhöht sich das Risiko einer Perforation der Nasenhöhle oder einer Penetration von Zahnwurzeln, je größer die Dimensionen gewählt werden [20, 96]. Generell ist es sinnvoll, eine Pilotbohrung durchzuführen. Je größer man den Durchmesser wählt, desto wichtiger wird die Pilotbohrung (welche mindestens die Kortikalis durchbrechen sollte), um die Erfolgsrate zu erhöhen und postoperative Beschwerden zu vermindern [12, 69]. Auf dem Markt werden Miniimplantate mit Durchmessern zwischen 1,2 mm und 2,3 mm und Längen zwischen 4,0 mm und 16,0 mm angeboten.

Um Schraubenfrakturen zu vermeiden, aber in der Praxis dennoch vielfältige Einsatzmöglichkeiten von Miniimplantaten zu gewährleisten, empfiehlt sich ein Mindestdurchmesser von 1,5 mm [69].

In dieser Studie wurden Miniimplantate mit einem Durchmesser von 1,7 mm gewählt. Der Durchmesser beeinflusst die virtuelle Implantation am anterioren Gaumen insofern, als bei einem größeren Durchmesser auch ein geringerer Abstand zu den Zahnwurzeln zu erwarten ist. Ab 10 mm Länge erhöht sich die Wahrscheinlichkeit einer ungewollten Perforation oder einer Schraubenfraktur [20]. Ein Miniimplantat sollte aber mindestens 4,0 mm im Knochen gefasst sein [69] und zusätzlich eine im Durchschnitt 3,0 mm dicke Mukosa durchdringen [7].

Entgegen der Annahme ‚Je länger, desto besser der Halt‘ zeigen Miyamoto, Nkenke und Wilmes, dass die Dicke der Kortikalis die wichtigste Rolle spielt [82, 91, 114]. Daraus ergibt sich eine sinnvolle Länge für palatinal inserierte Implantate von 7,0 mm bis 10,0 mm sowie ein Mindestdurchmesser von 1,5 mm.

Die in dieser Studie verwendeten Miniimplantate waren 8,0 mm lang. Der Mindestabstand von 1,5 mm von Zahnwurzel zu Miniimplantat konnte stets eingehalten werden.

Um einer Wurzelperforation durch zusätzlichen Sicherheitsabstand vorzubeugen, könnten die Dimensionen des Implantats überdacht werden.

Für diese Studie wurden ausschließlich Miniimplantate der Firma Forestadent mit den Maßen 1,7 mm x 8,0 mm verwendet.

Es sollte bedacht werden, dass es auf dem Markt auch Miniimplantate mit anderen Designs gibt. So können sich der Durchmesser und das Gewindedesign unterscheiden. Hierbei sollte auf die Herstellerangaben geachtet werden, da einige den Innen- und andere den Außendurchmesser angeben. Die in dieser Studie gewonnenen Erkenntnisse gelten nur für Miniimplantate, deren Außendurchmesser bekannt sind.

5.4 Gaumen als Insertionsregion

Am anterioren Gaumen ist in vertikaler Richtung auf Höhe der ersten Gaumenfalte mit dem größten Knochenangebot zu rechnen; danach absteigend an der zweiten und dann an der dritten Gaumenfalte [15]. Obwohl es sinnvoll erscheint, in der Region der ersten oder zweiten Gaumenfalte zu implantieren, bergen diese Regionen Risiken, unter anderem der schlechte Zugang für den Behandler, die Nähe zum *Foramen incisivum* und die Gefahr einer Schädigung der Zahnwurzeln [15]. Der anteriore Gaumen wurde als geeignete Insertionsregion für paramedian eingebrachte Miniimplantate hinreichend untersucht [68, 74, 88] und weist die höchsten Erfolgsraten auf [44, 54]. Besonders geeignet ist der Bereich paramedian der dritten Gaumenfalte [44, 46, 52].

5.5 Dritte-Gaumenfalten-Methode

Manuelle Anleitung

Im Hinblick auf einen geeigneten Insertionsort für Miniimplantate empfiehlt Baumgaertel im *TAD clinical reference guide* als Referenzpunkt den ersten oder zweiten Prämolaren, paramedian am anterioren Gaumen [10]. Hourfar beschreibt die zweite Gaumenfalte bereits als sichere Insertionsregion. Da nach den Implantationen aber teilweise Sensibilitätsverluste auftraten, empfiehlt er, Miniimplantate weiter distal auf Höhe der dritten Gaumenfalte zu platzieren [45]. Es konnte festgestellt werden, dass das Knochenangebot paramedian auf Höhe der dritten Gaumenfalte ausreichend groß ist, um Miniimplantate erfolgreich zu inserieren [45, 46]. Bei Mundatmern empfiehlt Kang allerdings eine Insertion etwas dorsal der dritten Gaumenfalte [52]. Die dritte Gaumenfalte gibt dem Behandler einen sicheren Anhaltspunkt, ohne die anatomischen Gegebenheiten genauestens studieren oder weitere diagnostische Röntgenaufnahmen anfertigen zu müssen.

Die Methode gerät an ihre Grenzen, sobald zum Beispiel verlagerte Eckzähne vermutet werden oder ein sehr geringes Knochenangebot vorhanden ist. In diesen Fällen sollte eine Planung mit 3D-Aufnahmen in Betracht gezogen werden.

Softwarebasierte Erweiterung der Anleitung

Überlagerung Intraoralscan mit Fernröntgenseitenbild

Um den Erfolg der Implantation zu steigern, können weitere Unterlagen hinzugezogen werden. Diagnostische Basisunterlagen wie ein Intraoralscan, ein Gipsmodell und ein Fernröntgenseitenbild, die ohnehin bei den meisten kieferorthopädischen Behandlungen erstellt werden, kommen an dieser Stelle zum Einsatz. Das digitalisierte Oberkiefermodell kann so aus verschiedenen Perspektiven betrachtet und die digitalen Miniimplantatanaloga können nach der Dritten-Gaumenfalten-Methode inseriert werden. Wird das Fernröntgenseitenbild im Verlauf eingeblendet, kann sehr genau bestimmt werden, ob sich die Miniimplantate mit den Frontzahnwurzelspitzen überlagern. Ist dies der Fall, besteht die Gefahr einer Wurzelperforation, welche durch Anpassen der Implantatposition verhindert werden kann. Der Vorteil dieser Methode ist, dass keine weiteren Röntgenbilder angefertigt werden müssen und trotzdem ein Gewinn an zusätzlichen Informationen entsteht. Doch auch hier gibt es Grenzen, da keine Informationen über die transversale Ebene vorhanden sind. Diese sind bei Patienten mit sehr geringem Knochenangebot oder verlagerten Zähnen wichtig, um die Prognose zu verbessern [51].

Aus praxisökonomischer Sicht darf die Dauer der virtuellen Implantation und die Überlagerung nicht vernachlässigt werden.

Bei der Erstellung des Fernröntgenseitenbildes werden die posterioren Zähne deckungsgleich überlagert. Entsteht hierbei ein Fehler, wird dieser in den Planungsdatensatz übertragen [99].

Wird zur Erstellung eines digitalen Oberkiefermodells ein Gipsmodell herangezogen, sollte in Erwägung gezogen werden, dass bei dessen Herstellung Fehler unterlaufen sein könnten [41].

Überlagerung Intraoralscan mit digitaler Volumentomographie

Um die beste Position für zwei Miniimplantate paramedian am anterioren Gaumen zu ermitteln, ist es möglich, ein digitales Volumentomogramm zu recyceln oder bei gegebener Indikation zu erstellen.

Wird dieses mit dem digitalen Oberkiefermodell überlagert, lässt sich genau ermitteln, ob das virtuelle Miniimplantat korrekt platziert ist oder ob unerwünschte Komplikationen auftreten könnten. Dementsprechend kann dann die Position in allen Richtungen korrigiert und die Lage neu bewertet werden.

Der Nachteil dieser Methode liegt im hohen zeitlichen Aufwand und den oft nicht vorhandenen 3D-Röntgenaufnahmen.

5.6 Software

Die in dieser Studie verwendete Software zur Überlagerung der diagnostischen Unterlagen und zur virtuellen Implantation war *OnyxCeph 3D LAB* in der Version 3.2.46. Erworben wurde die Software vom Hersteller Image-Instruments in Chemnitz. Sie wurde um das kostenpflichtige Modul TADMatch/Register3D und die Miniimplantatanaloga der Firma Forestadent erweitert. Der Funktionsumfang der Software kann mit weiteren kostenpflichtigen Modulen erweitert werden, deren Umfang die für diese Studie verwendeten Funktionen übertrifft. Die Software lässt sich bedingt durch die zahlreichen Funktionen, nur umständlich und daher nicht intuitiv bedienen. Die Nutzung bedarf einiger Übung oder einer ausführlichen Unterweisung.

Sehr hilfreich ist die semiautomatische Überlagerung von 2D- und 3D-Bildmaterial, welche aber noch durch eine vollautomatische Superpositionierung verbessert werden könnte.

Vergleichbare Software auf dem Markt ist ebenfalls lizenziert. Zur Verfügung stehen beispielsweise:

- *Easy Driver* (PSM Medical Solutions)
- *Romexis* (Planmeca Oy, Finnland)
- *Implanner* (Dolphin Imaging & Management Solutions, U.S.A.)
- *Implant Studio* (3Shape, Dänemark)

Über andere Software als *OnyxCeph* kann in dieser Doktorarbeit keine Aussage getroffen werden; die Studie müsste dazu mit verschiedener Software wiederholt werden.

5.7 Vergleich der Ergebnisse mit vorhandener Literatur

Eine am humanen Leichenpräparat durchgeführte Studie von Mohllhenrich vergleicht die Übertragungsgenauigkeit gingivagetragener und zahngetragener Bohrschablonen von Miniimplantaten am anterioren Gaumen. Die Planung erfolgte dabei ebenfalls durch Überlagerung eines digitalen Gipsmodells und eines Fernröntgenseitenbildes. Mohllhenrich kam zu dem Schluss, dass mit dieser Methode Miniimplantate ausreichend genau paramedian am anterioren Gaumen inseriert werden können und diese Methode zusätzlich eine geringere Strahlenbelastung für den Patienten bedeutet [84]. Auch Kang beschreibt ein ähnliches Vorgehen. Dabei überlagert Kang digitale Oberkiefermodelle einerseits mit digitalen Volumentomographien andererseits mit Fernröntgenseitenaufnahmen. Dabei vergleicht er das Knochenangebot im anterioren Gaumen zwischen Mund- und Nasenatmern. Kang kommt zu dem Schluss, dass die Überlagerung von digitalen Volumentomographien und digitalen Oberkiefermodellen akkurate Ergebnisse zur Einschätzung der Knochenverhältnisse bei Mundatmern und Nasenatmern erzielt [52]. Young-Jae vergleicht ebenfalls Messungen zwischen den beiden Aufnahmen und kommt zu dem Ergebnis, dass die Knochendicke 5,0 mm paramedian zwischen den Prämolaren und den beiden ersten Molaren die einzige Region sei, bei der es keine statistisch signifikanten Unterschiede gebe [118]. De Rezende Barbosa vermisst in einer Studie das palatinale Knochenangebot auf Höhe der ersten Prämolaren zur Planung von Miniimplantaten. Dabei vergleicht er Messungen im anterioren Gaumen zwischen Fernröntgenseitenaufnahmen und digitalen Volumentomographien. Die Ergebnisse weichen nicht signifikant voneinander ab [26]. Jung vergleicht das vertikale Knochenangebot im anterioren Gaumen in Fernröntgenseitenbildern und digitalen Volumentomographien und kommt zu dem Ergebnis, dass sich Erstere zur akkuraten Bestimmung des vertikalen Knochenangebots vor einer paramedianen Implantation eignen [50]. De Gabriele bezeichnet dieses Verfahren als „Easy-Driver-Methode“ und beschreibt es als ein sicheres und präzises Vorgehen [25]. Das Vorgehen von Maino et al., welches als „MAPA-Guide“ beschrieben wird, unterscheidet sich durch die Herstellung einer Tiefziehschiene mit einem radioopaken Material entlang der tiefsten Stelle des harten Gaumens. Diese Schiene wird vor der Erstellung des Fernröntgenseitenbildes oder der digitalen Volumentomographie eingesetzt, um anschließend die Dicke der Mukosa zu bestimmen [78, 79].

5.8 Schlussfolgerung

Es ergibt sich kein signifikanter Unterschied bezüglich einer Streckenmessung von im anterioren Gaumen virtuell platzierten Miniimplantaten zu den Wurzelspitzen, gemessen in sowohl einem Fernröntgenseitenbild als auch der korrespondierenden digitalen Volumentomographie.

2D-Fernröntgenseitenaufnahmen gepaart mit Oberkieferscans sind zum paramedianen virtuellen Platzieren von Miniimplantaten am anterioren Gaumen im Bereich der dritten Gaumenfalte ausreichend genau - außer beim Verdacht auf Strukturanomalien wie z. B. verlagerte Eckzähne oder einem sehr limitierten Knochenangebot.

6 Literaturverzeichnis

1. Abdelgader, I., et al., [P] *Numerical and experimental investigation of different types of mini implants for orthodontic anchorage*. World J Orthod, 2005. **6**(Supplement): p. 314-315.
2. Al-Suleiman, M. and M. Shehadah, *AUSOM: A 3D Placement Guide For Orthodontic Mini-Implants*. Orthodontics (Chic.), 2011. **12**(1): p. 28-37.
3. Amm, E.W., et al., *Shear bond strength of orthodontic brackets bonded with self-etching primer to intact and pre-conditioned human enamel*. J Orofac Orthop, 2008. **69**(5): p. 383-92.
4. Asscherickx, K., et al., *Success rate of miniscrews relative to their position to adjacent roots*. Eur J Orthod, 2008. **30**(4): p. 330-5.
5. Asscherickx, K., et al., *Root repair after injury from mini-screw*. Clin Oral Implants Res, 2005. **16**(5): p. 575-8.
6. Bae, M.J., et al., *Accuracy of miniscrew surgical guides assessed from cone-beam computed tomography and digital models*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2013. **143**(6): p. 893-901.
7. Barriviera, M., et al., *A new method to assess and measure palatal masticatory mucosa by cone-beam computerized tomography*. J Clin Periodontol, 2009. **36**(7): p. 564-8.
8. Baumgaertel, S., *Quantitative investigation of palatal bone depth and cortical bone thickness for mini-implant placement in adults*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2009. **136**(1): p. 104-8.
9. Baumgaertel, S., *Temporary skeletal anchorage devices: the case for miniscrews*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2014. **145**(5): p. 558-64.
10. Baumgaertel, S., et al., *TAD Clinical Reference Guide. A Case Study in Successful TAD Placement & Efficient Biomechanics*. 3rd Version ed. TAD Clinical Reference Guide, ed. D. Inc. 2011, Newtown PA: Dentaaurum Inc. 26.
11. Baumgaertel, S., et al., *Reliability and accuracy of cone-beam computed tomography dental measurements*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2009. **136**(1): p. 19-25; discussion 25-8.

12. Berens, A. and D. Wiechmann, *Mini- und Mikroschrauben als skelettale Verankerung in der Kieferorthopädie. Optimierung des klinischen Vorgehens*. Kieferorthop, 2006. **20**(3): p. 167-174.
13. Berens, A., D. Wiechmann, and R. Dempf, *Mini- and Micro-screws for Temporary Skeletal Anchorage in Orthodontic Therapy*. J Orofac Orthop, 2006. **67**(6): p. 450-458.
14. Birkner, S., et al. *[O] Human Bone density profiles on the surface of tomas pins*. in *DGKFO - Lecture*. 2007. Berlin.
15. Braun, A.K., *Anatomische Studie über das Knochenangebot des Gaumens im Bereich der dorsalsten Gaumenfalte zur Insertion von Minischrauben*. 2015.
16. Brisceno, C.E., et al., *Healing of the roots and surrounding structures after intentional damage with miniscrew implants*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2009. **135**(3): p. 292-301.
17. Büchter, A., et al., *Tierexperimentelle Untersuchung von sofort belasteten Mikroimplantaten*. Z Zahnärztl Impl, 2006. **22**(3): p. 238-250.
18. Cevidane, L.H., et al., *Cranial base superimposition for 3-dimensional evaluation of soft-tissue changes*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2010. **137**(4 Suppl): p. S120-9.
19. Cheng, S.J., et al., *A prospective study of the risk factors associated with failure of mini-implants used for orthodontic anchorage*. Int J Oral Maxillofac Implants, 2004. **19**(1): p. 100-6.
20. Costa, A., G. Pasta, and G. Bergamaschi, *Intraoral hard and soft tissue depths for temprary anchorage devices*. Semin Orthod, 2005. **11**(1): p. 10-15.
21. Costa, A., M. Raffainl, and B. Melsen, *Miniscrews as orthodontic anchorage: a preliminary report*. Int J Adult Orthodon Orthognath Surg, 1998. **13**(3): p. 201-9.
22. Crismani, A.G., et al., *Nasal cavity perforation by palatal implants: false-positive records on the lateral cephalogram*. Int J Oral Maxillofac Implants, 2005. **20**(2): p. 267-73.
23. Crismani, A.G., et al., *Miniscrews in orthodontic treatment: review and analysis of published clinical trials*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2010. **137**(1): p. 108-13.
24. Dalstra, M., P.M. Cattaneo, and B. Melsen, *Load transfer of miniscrews for orthodontic anchorage*. Orthodontics, 2004. **1**(1): p. 53 - 62.
25. De Gabriele, O., et al., *The easy driver for placement of palatal mini-implants and a maxillary expander in a single appointment*. J Clin Orthod, 2017. **51**(11): p. 728-737.

26. de Rezende Barbosa, G.L., et al., *Vertical measurements for planning palatal mini-implants in lateral radiography and cone beam computed tomography*. *Implant Dent*, 2014. **23**(5): p. 588-92.
27. Deguchi, T., et al., *The use of small titanium screws for orthodontic anchorage*. *J Dent Res*, 2003. **82**(5): p. 377-81.
28. Deutsche Forschungsgemeinschaft: Klinische Studien – Stellungnahme der Arbeitsgruppe „Klinische Studien“ der DFG-Senatskommission für Grundsatzfragen in der Klinischen Forschung, B., *Empfehlungen zu Klinischen Studien*. Gemeinsame Erklärung des Ausschusses Medizin des Wissenschaftsrates und der AG Klinische Studien der DFG-Senatskommission für Grundsatzfragen in der Klinischen Forschung zu Klinischen Studien, 2018: p. 103.
29. EUPATI, *klinische Studienergebnisse: Veröffentlichung*. 2015.
30. Favero, L., P. Brollo, and E. Bressan, *Orthodontic anchorage with specific fixtures: related study analysis*. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2002. **122**(1): p. 84-94.
31. Finke, H., *Biokompatibilität von Kieferorthopädischen Minischrauben: Eine In-Vitro-Studie an humanen Gingivafibroblasten und der etablierten Osteoblastenzelllinie Saos-2*, in *Medizinischen Faku*. 2013, Christian-Albrechts-Universität: Kiel. p. 61.
32. Florvaag, B., et al., *Biomechanical properties of orthodontic miniscrews. An in-vitro study*. *J Orofac Orthop*, 2010. **71**(1): p. 53-67.
33. Fourie, Z., et al., *Accuracy and repeatability of anthropometric facial measurements using cone beam computed tomography*. *Cleft Palate Craniofac J*, 2011. **48**(5): p. 623-30.
34. Fritz, U., A. Ehmer, and P. Diedrich, *Klinische Eignung von Mikrotitanschrauben zur orthodontischen Verankerung - erste Erfahrungen*. *J Orofac Orthop*, 2004. **65**(5): p. 410-8.
35. Gedrange, T., K. Boening, and W. Harzer, *Orthodontic implants as anchorage appliances for unilateral mesialization: a case report*. *Quintessence Int*, 2006. **37**(6): p. 485-91.
36. Gkantidis, N., et al., *Evaluation of 3-Dimensional Superimposition Techniques on Various Skeletal Structures of the Head Using Surface Models*. Vol. 10. 2015.
37. Gkantidis, N., et al., *Evaluation of 3-dimensional superimposition techniques on various skeletal structures of the head using surface models*. *PLoS One*, 2015. **10**(2): p. e0118810.

38. Glasl, B., et al., *Aktuelle Übersicht zum Risikopotenzial von Wurzelverletzungen bei interrädikulärer Insertion orthodontischer Miniimplantate/Minischrauben. Experimentelle Ergebnisse und Literaturrecherche.* Kieferorthop, 2010. **24**(1): p. 7-15.
39. Gracco, A., et al., *Quantitative cone-beam computed tomography evaluation of palatal bone thickness for orthodontic miniscrew placement.* Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2008. **134**(3): p. 361-9.
40. Heinz, J., K. Stewart, and A. Ghoneima, *Evaluation of two-dimensional lateral cephalogram and three-dimensional cone beam computed tomography superimpositions: a comparative study.* Int J Oral Maxillofac Surg, 2018. **48**(4): p. 519-525.
41. Hennies, M.O., *Zur Korrelation von Werten der Frontzahninklination bestimmt an Modell und Fernröntgenseitenbild.* 2006.
42. Herman, R.J., G.F. Currier, and A. Miyake, *Mini-implant anchorage for maxillary canine retraction: a pilot study.* Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2006. **130**(2): p. 228-35.
43. Holberg, C., et al., *Indirekte Minischrauben-Verankerung: biomechanische Belastung der dentalen Verankerung bei Mesialisierung eines unteren Molaren – eine FEM Studie.* J Orofac Orthop, 2014. **75**(1): p. 16-24.
44. Hourfar, J., et al., *Influence of interradicular and palatal placement of orthodontic mini-implants on the success (survival) rate.* Head Face Med, 2017. **13**(1): p. 14.
45. Hourfar, J., et al., *Incidence of pulp sensibility loss of anterior teeth after paramedian insertion of orthodontic mini-implants in the anterior maxilla.* Head Face Med, 2017. **13**(1): p. 1.
46. Hourfar, J., et al., *Three dimensional anatomical exploration of the anterior hard palate at the level of the third ruga for the placement of mini-implants--a cone-beam CT study.* Eur J Orthod, 2015. **37**(6): p. 589-95.
47. Hourfar, J., et al., *Fully customized placement of orthodontic miniplates: a novel clinical technique.* Head Face Med, 2014. **10**(14).
48. Hourfar, J., et al., *The most distal palatal ruga for placement of orthodontic mini-implants.* Eur J Orthod, 2015. **37**(4): p. 373-8.
49. Izgi, E. and F.N. Pekiner, *Comparative Evaluation of Conventional and OnyxCeph Dental Software Measurements on Cephalometric Radiography.* Turk J Orthod, 2019. **32**(2): p. 87-95.

50. Jung, B.A., et al., *Vertical palatal bone dimensions on lateral cephalometry and cone-beam computed tomography: implications for palatal implant placement*. Clin Oral Implants Res, 2011. **22**(6): p. 664-8.
51. Jung, B.A., et al., *Preoperative diagnostic for palatal implants: Is CT or CBCT necessary?* Clin Implant Dent Relat Res, 2012. **14**(3): p. 400-5.
52. Kang, Q., et al., *Evaluation of palatal support tissues for placement of orthodontic mini-implants in mouth breathers with high-narrow palates versus nose breathers with normal palates: a retrospective study*. Clin Oral Investig, 2019.
53. Kanomi, R., *Mini-implant for orthodontic anchorage*. J Clin Orthod, 1997. **31**(11): p. 763-7.
54. Karagiolidou, A., et al., *Survival of palatal miniscrews used for orthodontic appliance anchorage: a retrospective cohort study*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2013. **143**(6): p. 767-72.
55. Keim, R.G., *The best places for miniscrews. The editor's corner*. J Clin Orthod, 2011. **45**(8): p. 421-422.
56. Kim, G., et al., *Accuracy and reliability of length measurements on three-dimensional computed tomography using open-source OsiriX software*. J Digit Imaging, 2012. **25**(4): p. 486-91.
57. Kim, H. and T.W. Kim, *Histologic evaluation of root-surface healing after root contact or approximation during placement of mini-implants*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2011. **139**(6): p. 752-60.
58. Kim, S.H., et al., *Surgical positioning of orthodontic mini-implants with guides fabricated on models replicated with cone-beam computed tomography*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2007. **131**(4 Suppl): p. S82-S89.
59. Kravitz, N.D. and B. Kusnoto, *Risks and complications of orthodontic miniscrews*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2007. **131**(4 Suppl): p. S43-51.
60. Kuroda, S., et al., *Clinical use of miniscrew implants as orthodontic anchorage: success rates and postoperative discomfort*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2007. **131**(1): p. 9-15.
61. Kuroda, S., et al., *Root proximity is a major factor for screw failure in orthodontic anchorage*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2007. **131**(4): p. 68-73.
62. Laursen, M.G., B. Melsen, and P.M. Cattaneo, *An evaluation of insertion sites for mini-implants: a micro - CT study of human autopsy material*. Angle Orthod, 2013. **83**(2): p. 222-9.

63. Lee, K.J., et al., *Computed tomographic analysis of tooth-bearing alveolar bone for orthodontic miniscrew placement*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2009. **135**(4): p. 486-94.
64. Liou, E.J., et al., *A computed tomographic image study on the thickness of the infrazygomatic crest of the maxilla and its clinical implications for miniscrew insertion*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2007. **131**(3): p. 352-6.
65. Liou, E.J., B.C. Pai, and J.C. Lin, *Do miniscrews remain stationary under orthodontic forces?* Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2004. **126**(1): p. 42-7.
66. Lisson, J.A., et al., *Veränderungen des Weichgewebeprofiles nach Klasse-II,1-Therapie mit Doppelvorschubplatten*. J Orofac Orthop, 2013. **74**(2): p. 113-23.
67. Ludwig, B., *Oronasale Verbindung durch im anterioren Gaumen parasagittal inserierte Miniimplantate*. Kieferorthop, 2016. **30**(3): p. 309-311.
68. Ludwig, B., et al., *Successrate of mini-implants depends on insertion site: Inter-radicular versus palatal placement* Clin Oral Impl Res, 2013. **Manuscript submitted**.
69. Ludwig, B., et al., *Mini-Implantate in der Kieferorthopädie. Innovative Verankerungskonzepte*. 2007.
70. Ludwig, B., et al., *Anatomical guidelines for miniscrew insertion: palatal sites*. J Clin Orthod, 2011. **45**(8): p. 433-41; quiz 467.
71. Ludwig, B., B. Glasl, and S. Kopp. *[O] Experimental study on the reduction of loss-rates of mini-screws*. in *DGKFO - Lecture*. 2007. Berlin.
72. Ludwig, B., et al., *Techniques for attaching orthodontic wires to miniscrews*. J Clin Orthod, 2010. **44**(1): p. 36-40.
73. Ludwig, B., et al., *Forcierte Gaumennahterweiterung mit skelettalem Kraftansatz: Die Hybrid-GNE*. Kieferorthop, 2009. **23**(4): p. 267-274.
74. Ludwig, B. and B. Wilmes, *[O] Mini-Implants: Increasing Success - the Anterior Palate*. Oral presentation at the AAO, 2013.
75. Luzi, C., C. Verna, and B. Melsen. *[O] The failure rate of immediately loaded mini-implants: A prospective study*. in *EOS - Vortrag*. 2007. Berlin.
76. Luzi, C., C. Verna, and B. Melsen, *A prospective clinical investigation of the failure rate of immediately loaded mini-implants used for orthodontic anchorage*. Prog Orthod, 2007. **8**(1): p. 192-201.
77. Luzi, C., C. Verna, and B. Melsen, *Guidelines for success in placement of orthodontic mini-implants*. J Clin Orthod, 2009. **43**(1): p. 39-44.

78. Maino, G., *MAPA: a New High-precision 3D Method of Palatal Miniscrew Placement*. EJCO, 2015. **3**(2): p. 41-47.
79. Maino, G., *A Three-Dimensional Digital Insertion Guide for Palatal Miniscrew Placement*. JCO, 2016. **L**(1): p. 12-22.
80. McGuire, M.K., E.T. Scheyer, and R.L. Gallerano, *Temporary anchorage devices for tooth movement: a review and case reports*. J Periodontol, 2006. **77**(10): p. 1613-24.
81. Min, K.I., et al., *Root proximity and cortical bone thickness effects on the success rate of orthodontic micro-implants using cone beam computed tomography*. Angle Orthod, 2012. **82**(6): p. 1014-21.
82. Miyamoto, I., et al., *Influence of cortical bone thickness and implant length on implant stability at the time of surgery--clinical, prospective, biomechanical, and imaging study*. Bone, 2005. **37**(6): p. 776-80.
83. Miyawaki, S., et al., *Factors associated with the stability of titanium screws placed in the posterior region for orthodontic anchorage*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2003. **124**(4): p. 373-8.
84. Mohlhenrich, S.C., et al., *Accuracy of orthodontic mini-implants placed at the anterior palate by tooth-borne or gingiva-borne guide support: a cadaveric study*. Clin Oral Investig, 2019.
85. Motoyoshi, M., et al., *Bone stress for a mini-implant close to the roots of adjacent teeth--3D finite element analysis*. Int J Oral Maxillofac Surg, 2009. **38**(4): p. 363-8.
86. Nada, R.M., et al., *Accuracy and reproducibility of voxel based superimposition of cone beam computed tomography models on the anterior cranial base and the zygomatic arches*. PLoS One, 2011. **6**(2): p. e16520.
87. Naresh, V., et al., *Cephalometric assessment of effect of head rotation toward focal spot on lateral cephalometric radiographs*. J Contemp Dent Pract, 2013. **14**(2): p. 202-7.
88. Nienkemper, M., et al., *Stability of paramedian inserted palatal mini-implants at the initial healing period: a controlled clinical study*. Clin Oral Impl Res, 2015. **26**(8): p. 870-5.
89. Nienkemper, M., et al., *Extrusion of impacted teeth using mini-implant mechanics*. J Clin Orthod, 2012. **46**(3): p. 150-155.
90. Nienkemper, M., et al., *[Improvement of mini-implant stability in orthodontics]*. Orthod Fr, 2012. **83**(3): p. 201-7.

91. Nkenke, E., et al., *Implant stability and histomorphometry: a correlation study in human cadavers using stepped cylinder implants*. Clin Oral Implants Res, 2003. **14**(5): p. 601-9.
92. Oh, Y.H., H.S. Park, and T.G. Kwon, *Treatment effects of microimplant-aided sliding mechanics on distal retraction of posterior teeth*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2011. **139**(4): p. 470-81.
93. Ohashi, E., et al., *Implant vs Screw Loading Protocols in Orthodontics*. Angle Orthod, 2006. **76**(4): p. 721-7.
94. Ohmae, M., et al., *A clinical and histological evaluation of titanium mini-implants as anchors for orthodontic intrusion in the beagle dog*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2001. **119**(5): p. 489-97.
95. Oncag, G., et al., *Osseointegrated implants with pendulum springs for maxillary molar distalization: a cephalometric study*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2007. **131**(1): p. 16-26.
96. Poggio, P.M., et al., *"Safe zones": a guide for miniscrew positioning in the maxillary and mandibular arch*. Angle Orthod, 2006. **76**(2): p. 191-7.
97. Rabe, N., [T] *Wurzelverletzungen durch orthodontische Mini-Implantate.*, in *Medizinischen Fakultät Charité*. 2013: Berlin. p. 115.
98. Radeke, J., C. von der Wense, and B.G. Lapatki, *Comparison of orthodontic measurements on dental plaster casts and 3D scans*. J Orofac Orthop, 2014. **75**(4): p. 264-74.
99. Sakima, M.T., C.G. Sakima, and B. Melsen, *The validity of superimposing oblique cephalometric radiographs to assess tooth movement: an implant study*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2004. **126**(3): p. 344-53.
100. Sar, C., et al., *Comparison of two implant-supported molar distalization systems*. Angle Orthod, 2012.
101. Sauppe, S., et al., *Automatic fusion of lateral cephalograms and digital volume tomography data-perspective for combining two modalities in the future*. Dentomaxillofac Radiol, 2015. **44**(9): p. 20150073.
102. Scherer, P., et al., *Indikationen für die 3-dimensionale Bildgebung in der Zahnheilkunde*. ZWR, 2007. **116**(5): p. 219-230.
103. Schmid, M.R., H.J. Schiel, and J.T. Lambrecht, *Untersuchungen über Drehmomente enossaler oraler Schraubenimplantate*. Schweiz Monatsschr Zahnmed, 2002. **112**(8): p. 804-13.

104. Shinohara, A., et al., *Root proximity and inclination of orthodontic mini-implants after placement: cone-beam computed tomography evaluation*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2013. **144**(1): p. 50-6.
105. Son, S., et al., *Comparative study of the primary stability of self-drilling and self-tapping orthodontic miniscrews*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2014. **145**(4): p. 480-5.
106. Treml, T.G., P.G. Jost-Brinkmann, and R. Müller-Hartwich. *[P] Temporary anchorage devices (TAD) for orthodontic purposes - a systematic review*. in EOS - Poster. 2007. Berlin.
107. Tsaousidis, G. and O. Bauss, *Einfluss der Insertionsstelle auf die Misserfolgsraten kieferorthopädischer Verankerungsschrauben*. J Orofac Orthop, 2008. **69**(5): p. 349-56.
108. Tsui, W.K., H.D. Chua, and L.K. Cheung, *Bone anchor systems for orthodontic application: a systematic review*. Int J Oral Maxillofac Surg, 2012. **41**(11): p. 1427-38.
109. Wehrbein, H. and P. Gollner, *Skelettale Verankerung in der Kieferorthopädie – Grundlagen und klinische Anwendung*. J Orofac Orthop, 2007. **68**(6): p. 443-461.
110. Wiechmann, D., U. Meyer, and A. Buchter, *Success rate of mini- and micro-implants used for orthodontic anchorage: a prospective clinical study*. Clin Oral Implants Res, 2007. **18**(2): p. 263-7.
111. Wilmes, B., M. Nienkemper, and D. Drescher, *Application and effectiveness of a mini-implant- and tooth-borne rapid palatal expansion device: the hybrid hyrax*. World J Orthod, 2010. **11**(4): p. 323-30.
112. Wilmes, B., M. Nienkemper, and D. Drescher, *Der Beneslider zur Distalisierung im Oberkiefer*. Inf Orthod Kieferorthop, 2013. **45**(1): p. 42-50.
113. Wilmes, B., M. Nienkemper, and D. Drescher, *Maxillary Molar Distalisation with the Beneslider*. Inf Orthod Kieferorthop, 2013. **45**(1): p. 42-50.
114. Wilmes, B., et al. *[P SP5-98] Impact of bone quality on primary stability of orthodontic mini-implants*. in EOS Congress. 2006. Wien: EOS.
115. Wilmes, B., et al., *[P 458] Primärstabilität von kieferorthopädischen Miniimplantaten*. Dtsch Zahnärztl Z, 2005. **60**(supplement 2005): p. A 115.
116. Yamaguchi, M., et al., *Mini-implants in the anchorage armamentarium: new paradigms in the orthodontics*. Int J Biomater, 2012. **2012**: p. 394121.

117. Yao, C.C., et al., *Comparison of treatment outcomes between skeletal anchorage and extraoral anchorage in adults with maxillary dentoalveolar protrusion*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2008. **134**(5): p. 615-24.
118. Young-Jae Kim, a.S.-H.L., b and Sung-Nam Gangc, *Comparison of cephalometric measurements and cone-beam computed tomography-based measurements of palatal bone thickness*. AJO-DO, 2014.
119. Zamora, N., et al., *Cephalometric measurements from 3D reconstructed images compared with conventional 2D images*. Angle Orthod, 2011. **81**(5): p. 856-64.
120. Ziebura, T., S. Flieger, and D. Wiechmann, *Mini-implants in the palatal slope - a retrospective analysis of implant survival and tissue reaction*. Head Face Med, 2012. **8**(32): p. 32.

7 Tabellen

7.1 Messwerte

Messwerte Versuchsreihe 1

Tabelle 9: Messungen Versuchsreihe 1

Patient Nr.	Geschlecht	Alter bei 2D-/3D-Aufnahmen	Messungen Versuchsreihe 1				
			M1	M2	M3	M4	M5
1	w	13,2	4,4	7,0	4,9	6,5	7,4
2	w	11,6	4,0	4,0	3,8	4,4	4,7
3	m	25,3	6,8	7,8	4,2	3,5	8,7
4	w	20,5	6,8	7,5	6,6	4,8	6,5
5	w	12,1	6,1	9,7	5,9	6,4	7,7
6	m	11,6	1,9	2,7	2,3	1,5	6,0
7	w	10,5	3,0	5,6	2,8	2,8	4,5
8	m	13,4	4,8	2,7	2,4	2,0	3,5
9	w	11,8	4,3	4,8	5,9	3,9	5,2
10	m	14,3	6,3	6,3	9,0	8,7	12,2
11	w	14	5,1	6,8	4,5	5,1	7,9
12	w	15,8	6,0	6,9	3,1	2,9	5,8
13	m	12,6	3,7	5,9	8,5	7,0	6,9
14	m	11,3	7,3	11,5	11,0	8,8	5,0
15	m	11,4	9,9	6,9	6,1	8,4	6,8
16	m	15,7	5,8	6,7	5,4	7,5	5,9
17	m	15,7	3,1	4,1	6,3	6,1	6,8
18	m	10,8	3,7	6,2	4,8	3,9	4,0
19	m	11,2	3,4	5,0	3,3	3,5	2,4
20	w	17	9,0	5,2	1,6	6,8	6,3

Messwerte Versuchsreihe 2

Tabelle 10: Messungen Versuchsreihe 2

Patient Nr.	Geschlecht	Alter bei 2D-/3D-Aufnahmen	Messungen Versuchsreihe 2				
			M21	M22	M23	M24	M25
1	w	13,2	4,4	4,4	5,3	5,9	6,5
2	w	11,6	5,9	7,0	7,6	8,4	6,5
3	m	25,3	8,1	12,5	9,8	8,3	11,9
4	w	20,5	3,9	6,7	4,9	5,8	4,8
5	w	12,1	6,4	9,3	5,7	6,0	7,8
6	m	11,6	2,2	2,9	2,2	2,4	5,2
7	w	10,5	3,1	5,9	3,4	3,7	4,9
8	m	13,4	5,6	1,9	3,7	2,4	4,2
9	w	11,8	8,8	8,0	9,8	9,9	10,4
10	m	14,3	7,1	5,7	8,0	6,8	9,5
11	w	14	6,1	7,1	4,5	5,3	4,8
12	w	15,8	4,2	5,7	3,1	2,5	5,9
13	m	12,6	4,5	5,9	7,2	6,4	7,9
14	m	11,3	6,2	8,3	8,9	8,9	5,5
15	m	11,4	8,0	8,3	7,4	5,3	6,3
16	m	15,7	5,1	7,5	6,9	7,6	6,8
17	m	15,7	3,0	2,6	3,5	5,7	7,1
18	m	10,8	6,7	7,6	6,4	7,7	5,4
19	m	11,2	3,2	3,0	2,3	3,0	1,5
20	w	17	6,3	5,0	1,8	6,2	6,1

Strahlendosen DVT

Tabelle 11: Strahlendosen DVT

Patient Nr.	Bestrahlungsdauer DVT in ms	Dosisflächenprodukt in mGy*cm ²	Spannung in kV	Stromstärke in mA
1	5000	214	85	6
2	14.180	1175	85	6
3	5000	781	85	10
4	14.800	1535	85	6
5	14.800	1176	85	6
6	14.800	1535	85	6
7	14.800	421	85	6
8	14.800	1176	85	6
9	14.800	1175	85	6
10	14.800	1176	85	6
11	14.800	1175	85	6
12	14.800	334	85	6
13	14.800	1176	85	6
14	14.800	1176	85	6
15	14.800	1176	85	6
16	5000	334	85	10
17	5000	598	85	10
18	5000	480	85	10
19	5000	236	85	10
20	5000	334	85	10

8 Danksagung

Hiermit möchte ich mich bei PD Dr. Björn Ludwig für die dauerhafte Unterstützung bei dieser Arbeit bedanken. Des Weiteren möchte ich PD Dr. Manuel Nienkemper für die statistische Auswertung der Messergebnisse danken.

9 Curriculum Vitae

Aus datenschutzrechtlichen Gründen wird der Lebenslauf in der elektronischen Fassung der Dissertation nicht veröffentlicht