

Aus der Abteilung für Kieferorthopädie, Orthodontie und Kinderzahnmedizin,  
CharitéCentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der Medizinischen Fakultät  
Charité - Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

**Wurzelverletzungen durch orthodontische  
Mini-Implantate. Ein Vergleich zwischen  
Positionierung auf einem Modell und  
klinischer Situation.  
- Eine Pilotstudie -**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doctor medicinae dentariae  
(Dr. med. dent.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät  
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von  
Norman Rabe  
aus Wernigerode

Gutachter: 1. Prof. Dr. P.-G. Jost-Brinkmann  
2. Prof. Dr. G. Kinzinger  
3. Prof. Dr. E. Keeve

eingereicht: 14.03.2012

Datum der Promotion: 01.02.2013

Inhaltsverzeichnis	I
<b>1 EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>2 LITERATURÜBERSICHT .....</b>	<b>2</b>
<b>2.1 Entwicklung von Methoden zur Etablierung stationärer Verankerung .....</b>	<b>2</b>
2.1.1 Verankerung .....	2
2.1.2 Verankerungsprobleme.....	2
2.1.3 Temporäre Verankerungen .....	3
<b>2.2 Übersicht über den derzeitigen Wissensstand beim Einsatz von orthodontischen</b>	
<b>Mini-Implantaten .....</b>	<b>4</b>
2.2.1 Zur Nomenklatur.....	4
2.2.2 Vorteile und Indikationen.....	5
2.2.3 Implantatbeschreibung.....	5
2.2.4 Insertionsorte.....	6
2.2.5 Insertionstechnik .....	9
2.2.6 Risiken und Fehlerquellen .....	11
2.2.7 Problematik der Wurzelschädigung .....	13
<b>2.3 Übersicht verschiedener Positionierungshilfen zur Insertion von orthodontischen</b>	
<b>Mini-Implantaten .....</b>	<b>16</b>
<b>3 FRAGESTELLUNGEN.....</b>	<b>27</b>
<b>4 MATERIAL UND METHODE.....</b>	<b>28</b>
<b>4.1 Vorbereitung.....</b>	<b>28</b>
4.1.1 Probanden .....	28
4.1.2 Versuchsunterlagen .....	28
<b>4.2 Navigationssystem.....</b>	<b>30</b>
<b>4.3 Versuchsdurchführung.....</b>	<b>32</b>
<b>4.4 Auswertung .....</b>	<b>36</b>
<b>4.5 Bestimmung des Methodenfehlers.....</b>	<b>38</b>
4.5.1 Fehler durch das Navigationssystem.....	39
4.5.2 Fehler bei der Auswertung .....	42
<b>5 ERGEBNISSE .....</b>	<b>44</b>
<b>5.1 Vermessung der Zahnzwischenräume.....</b>	<b>44</b>
<b>5.2 Übersicht über die Implantatpositionen der einzelnen Behandler .....</b>	<b>45</b>
5.2.1 Behandler 1 .....	46
5.2.2 Behandler 2 .....	47
5.2.3 Behandler 3 .....	48

<b>5.3</b>	<b>Vergleich der Ergebnisse an den zur Insertion geeigneten Zahnzwischenräumen zwischen intraoral und dem Modell .....</b>	<b>49</b>
5.3.1	Ergebnisse der einzelnen Behandler je Kiefer .....	49
5.3.1.1	Oberkiefer (Probandin 1).....	49
5.3.1.2	Unterkiefer (Probandin 2).....	52
5.3.2	Gesamtübersicht.....	55
<b>5.4</b>	<b>Vergleich zwischen den Behandlern.....</b>	<b>56</b>
5.4.1	Oberkiefer (Proband 1), intraoral.....	56
5.4.2	Oberkiefermodell .....	58
5.4.3	Unterkiefer (Probandin 2), intraoral.....	59
5.4.4	Unterkiefermodell .....	60
5.4.5	Oberkiefer (Probandin 1) und Unterkiefer (Probandin 2) gemeinsam .....	61
5.4.6	Zahnzwischenräume mesial von 11 und 13.....	63
<b>5.5</b>	<b>Vergleich zwischen Ober- und Unterkiefer.....</b>	<b>65</b>
<b>5.6</b>	<b>Vergleich zwischen Mini-Implantaten verschiedener Länge und Durchmesser .....</b>	<b>67</b>
<b>5.7</b>	<b>Ermittlung einer Lernkurve durch den Vergleich der ersten mit der zweiten Versuchshälfte .....</b>	<b>69</b>
<b>6</b>	<b>DISKUSSION .....</b>	<b>71</b>
<b>6.1</b>	<b>Diskussion der Fragestellung .....</b>	<b>71</b>
6.1.1.1	Frage 1 (Planungsmethode).....	71
6.1.1.2	Frage 2 (Behandlererfahrung) .....	72
6.1.1.3	Frage 3 (Lokalisation) .....	73
6.1.1.4	Frage 4 (Implantatdesign).....	73
6.1.1.5	Frage 5 (Röntgendiagnostik) .....	74
<b>6.2</b>	<b>Diskussion von Material und Methode .....</b>	<b>76</b>
6.2.1	Diskussion der Versuchsvorbereitung .....	76
6.2.1.1	Probanden.....	76
6.2.1.2	Versuchsunterlagen.....	76
6.2.2	Diskussion des Messverfahrens .....	77
6.2.3	Diskussion der Durchführung .....	78
6.2.4	Diskussion der Datenanalyse .....	79
6.2.5	Diskussion des Methodenfehlers.....	81
<b>6.3</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse.....</b>	<b>83</b>
6.3.1	Interradikuläres Platzangebot.....	83
6.3.2	Implantatpositionen der einzelnen Behandler .....	86
6.3.3	Vergleich der Mini-Implantatpositionen bei Platzierung am Modell versus intraoral.....	89
6.3.4	Vergleich zwischen den Behandlern .....	91

Inhaltsverzeichnis	III
6.3.5 Vergleich zwischen Oberkiefer und Unterkiefer .....	94
6.3.6 Vergleich zwischen Mini-Implantaten verschiedener Längen und Durchmesser.....	95
6.3.7 Lernkurve.....	96
<b>7 ZUSAMMENFASSUNGEN .....</b>	<b>98</b>
7.1 Zusammenfassung .....	98
7.2 Summary .....	100
<b>8 LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>102</b>
<b>9 ANHANG .....</b>	<b>112</b>
9.1 Abbildungsverzeichnis.....	112
9.2 Tabellenverzeichnis.....	114
9.3 Danksagung .....	115
9.4 Lebenslauf .....	116
9.5 Eidesstattliche Erklärung.....	117

## 1 Einleitung

Die temporäre skelettale Verankerung hat das kieferorthopädische Behandlungsspektrum deutlich erweitert [9, 26, 43, 63, 159, 160]. Zusehends etabliert hat sich die Verwendung von Mini-Implantaten, deren Einsatz in beiden Kiefern möglich ist [15, 26, 63, 101]. Sie bieten maximale Verankerung und sind dabei von der Patientenmitarbeit weitgehend unabhängig [54, 119]. Mini-Implantate erweisen sich vor allem dort als sinnvolles therapeutisches Mittel, wo der übliche kieferorthopädische Kraftangriff zu unerwünschtem Verankerungsverlust führen würde. Des Weiteren werden sie als Alternative zur Chirurgie und bei der Behandlung erwachsener Patienten [101] - auch mit vorgeschädigtem parodontalem Halteapparat [35, 127] - sowie bei fehlender Bereitschaft zum Tragen extraoraler Apparaturen angewendet [7, 34, 87].

Ihr Einsatz ist in den Hochschullehrplan aufgenommen und auch ein Typodont für Studentenkurse wurde entwickelt [83]. Die in der Literatur beschriebenen Erfolgsraten sind jedoch bislang nicht zufrieden stellend und liegen hinter denen anderer temporärer Verankerungssysteme [116, 138]. Probleme sind vor allem ein frühzeitiger Implantatverlust [21, 32, 81, 109, 110], Implantatfrakturen [14, 15, 101, 120] und die Beschädigung anatomischer Strukturen [26, 41, 67, 74, 89, 97, 105, 148]. Die Gefahr einer Wurzelschädigung ist aufgrund des geringen Platzangebotes hoch [92, 123, 141]. Nicht zuletzt können gerade bei interradikulärer Insertion nicht diagnostizierte Wurzelkontakte Ursache für frühzeitige Implantatverluste sein [32, 77]. Einige Studien belegen zwar relativ geringe klinische Auswirkungen bei einem Wurzelkontakt [13, 18, 42, 51, 74, 98], dennoch sollte jegliche Form von Wurzelschädigung vermieden werden. Dabei kann es hilfreich sein, dreidimensionale bildgebende Verfahren zu nutzen [43, 67, 68, 71, 89, 105] oder Hilfsmittel zu entwickeln, die, egal ob im Patientenmund oder auf einem Modell geplant, ein kontrolliertes Platzieren der Mini-Implantate gewährleisten. Trotz der mittlerweile breiten Palette solcher Positionierungshilfen wurde in den großen klinischen Mini-Implantat-Studien darauf verzichtet [20, 21, 76, 104, 109, 113, 114, 120, 153]. Derzeit gibt es kaum aussagekräftige Daten, die eine Risikominimierung durch Positionierungshilfen oder Übertragungssplints aufzeigen. Bislang wurde in keiner Studie untersucht, ob auf einem Modell, in Kombination mit Röntgendaten, eine Mini-Implantatposition ebenso präzise festgelegt werden kann wie im Mund eines Patienten.

## **2 Literaturübersicht**

### **2.1 Entwicklung von Methoden zur Etablierung stationärer Verankerung**

#### 2.1.1 Verankerung

Als Verankerung wird der Widerstand bezeichnet, den ein Zahn oder eine anatomische Einheit einer Bewegung entgegensetzt, wenn sie als Widerlager einer Kraft zur Bewegung von anderen Zähnen herangezogen werden [61]. Eine stabile Verankerung zu schaffen und diese aufrecht zu halten, gilt als Schlüssel einer erfolgreichen kieferorthopädischen Behandlung [6]. Die Möglichkeiten hierzu sind stark begrenzt. Bereits Kräfte unter 0,05 N genügen, um einen Zahn zu bewegen [147, 161]. Bei rein dentaler Verankerung führt dies immer auch zu einer Bewegung der Verankerungszähne. Diese ist meist unerwünscht und wird als Verankerungsverlust bezeichnet. Es gilt das dritte Newtonsche Axiom, wonach jeder Kraft eine gleich große Gegenkraft gegenübersteht. Um den Verankerungsverlust möglichst gering zu halten, muss der Widerstand einer Verankerung größer sein als der eines zu bewegenden Zahnes [2]. Angestrebt wird eine maximale Verankerung. Dabei bleibt die Verankerungseinheit stationär.

#### 2.1.2 Verankerungsprobleme

Eine maximale Verankerung ist nur schwer zu erreichen. Ankylosierte Zähne können als maximale Verankerung herangezogen werden. Diese anatomische Besonderheit findet sich aber selten und ist zudem häufig problembehaftet [100]. Sie kann auch chirurgisch induziert werden und wird in Einzelfällen in der ersten Dentition angewendet [72], jedoch ist die Patientenbelastung erheblich.

Auf der Suche nach einer stabilen orthodontischen Verankerung scheiterten GAINSFORTH und HIGLEY in einem ersten tierexperimentellen Versuch, bei dem sie Schrauben im Unterkiefer von Hunden platzierten [44]. Keine der Schrauben blieb länger als einen Monat stabil. Gründe für den Misserfolg sind in der Art und Weise des chirurgischen Eingriffes, dem Fehlen einer Einheilphase und dem damals üblichen Werkstoff der Wahl, Vitallium, zu suchen. Eine intraorale stationäre Verankerung erschien aufgrund dieser Versuche nicht möglich [137]. In späteren tierexperimentellen und klinischen Studien wurde versucht, Implantate unterschiedlichster Art für den kieferorthopädischen Einsatz zu nutzen. LINKOW

nutzte Blattimplantate [87]. Vorrangig wurden aber zylindrische Implantate wurzelanaloger Form verschiedenster Materialien und Oberflächen verwendet [48, 134, 144, 154]. Das erste zu rein kieferorthopädischen Zwecken verwendete Implantat setzten 1982 ROBERTS *et al.* [133]. Es blieb im retromolaren Unterkiefer über vier Jahre stabil. 1983 verwendeten CREEKMORE und EKLUND erstmals eine chirurgische Knochenschraube, die einem Mini-Implantat ähnlich war, erfolgreich zur Verankerung [29]. In ihrem Patientenbericht wurden keine Angaben zur genauen Dimension der Schraube gegeben, doch konnte sie ohne Wurzelschädigung unterhalb der *Spina nasalis anterior* zwischen den oberen mittleren Schneidezähnen platziert werden. Die nach zehn Tagen Einheilungszeit belastete Schraube aus Vitallium blieb über den Behandlungszeitraum von etwa einem Jahr stabil und es wurde weder von Infektion noch von Schmerz berichtet.

### 2.1.3 Temporäre Verankerungen

Unter der Vorgabe einer ausschließlich orthodontischen Nutzung und nur temporärer Einsatzzeit bei einfacher Handhabung, flexibler Einsetzbarkeit und geringer Patientenbelastung, entwickelten sich die *Temporary Anchorage Devices* (TAD). Zahlreiche Systeme wurden entwickelt und klinisch erfolgreich eingesetzt, etliche jedoch ausschließlich zur Implantation im Oberkiefer. Dabei handelt es sich um Titan-Flachschraubenimplantate [151], die diskusartigen, auf der Unterseite mit Hydroxylapatit beschichteten Onplants [10], spezielle Gaumenimplantate [159, 160] und kurze epithetische Implantate für den paramedianen anterioren Gaumen [9]. Ebenso fanden im Jochbeinfortsatz befestigte Zygomadrähte Anwendung [103]. In einer vorklinischen Studie waren auch resorbierbare Implantate aus Polylaktid erfolgreich [47]. Ein klinischer Einsatz ist bisher aber nicht beschrieben. Der relativ große chirurgische Eingriff bei den vorstehend erwähnten Systemen sowie die relativ lange Einheilzeit sind von Nachteil.

In einem Patientenbericht wurde von BOUSQUET *et al.* ein dünner Titanpfosten beschrieben, der nach interdentaler Insertion zur Verankerung im Oberkiefer genutzt wurde, dessen Verwendung jedoch in beiden Kiefern möglich schien [12]. Studien sind für diese Verankerungsart jedoch nicht beschrieben. KANOMI war 1997 der erste, der ein System für beide Kiefer einsetzte und in einem Patientenbericht beschrieb [63]. Er verwendete erfolgreich Miniknochenschrauben, wie sie in der Kieferchirurgie zur Fixierung von Osteosyntheseplatten zum Einsatz kommen. Sie konnten zwischen den Wurzeln der oberen und unteren mittleren Schneidezähne inseriert werden und dienten erfolgreich zur Intrusion

der Frontzähne. Etwa zeitgleich modifizierten COSTA *et al.* ebenfalls Miniplattenosteosyntheseschrauben in der Art, dass sie sich zur Aufnahme von Ligaturen eigneten und setzten sie in einer Studie erfolgreich ein [26]. Die verwendeten Knochenschrauben wurden von den Autoren als Mini-Implantat (KANOMI) beziehungsweise als Minischraube (COSTA *et al.*) bezeichnet. Dabei machten sich die Autoren dieser Studien zunutze, dass eine vollständige Osseointegration zwecks besserer Entfernbarkeit unerwünscht ist und verwendeten daher Schrauben, die aufgrund ihrer glatten Oberflächenstruktur zur Osseointegration ungeeignet sind [152].

Modifizierungen der von KANOMI sowie COSTA *et al.* beschriebenen Systeme stellen das *Skeletal Anchorage System* (SAS) [155], der *Orthodontic Bone Anchor* (OBA) [107] und die *Zygomatic Anchorage* [38] dar. Dabei dienen Mini-Implantate der Befestigung verschiedenartig modifizierter Miniplatten aus der Kiefertraumatologie, die dann zur Verankerung herangezogen werden. Der ins Vestibulum ragende Anteil dieser Verankerungsart kann noch größeren Kräften widerstehen als einzeln stehende Mini-Implantate, ist aber mit einem größeren chirurgischen Aufwand beim Setzen und Entfernen verbunden. Ein abgewandeltes Mini-Implantat stellt das *C-Orthodontic Micro-Implant* dar, welches in den Dimensionen einem Mini-Implantat entspricht, jedoch eine Oberflächenkonditionierung wie prothetische Implantate besitzt [25]. Daher ist es zur vollständigen Osseointegration fähig, was Vorteile bei verringerter Knochenmineralisation verspricht. Probleme bei der Entfernung wurden nicht beschrieben.

## **2.2 Übersicht über den derzeitigen Wissensstand beim Einsatz von orthodontischen Mini-Implantaten**

### **2.2.1 Zur Nomenklatur**

Die Folgen des großen Interesses an Mini-Implantaten waren die rasche Einführung einer großen Produktpalette, zahllose Veröffentlichungen und eine verwirrende Anzahl verschiedenster Bezeichnungen. So werden sie trotz nur marginaler Unterschiede als „*mini-implant*“ [63], „*miniscrew*“ [26], „*micro-implant*“ [119], „*titanium screw for orthodontic anchorage*“ [104], „*microscrew*“ [135], „*screw-implant*“ [122], „*microscrew-implant*“ [121], „*mini-screw implant*“ [117], „*orthodontic mini-implant*“ [45], „*orthodontic anchorage screw*“ [125] oder „*orthodontic miniscrew implant*“ [109] bezeichnet. Selbst innerhalb einer Veröffentlichung wechseln häufig die Bezeichnungen zwischen

Schraube und Implantat. Auf dem Kongress der *American Association of Orthodontists* 2004 in Orlando wurde versucht, eine gemeinsame Nomenklatur zu finden. Man einigte sich auf „*mini-implant*“ als sinnvollste Bezeichnung [96]. Durchgesetzt hat sich auch dieser Begriff bislang noch nicht.

### 2.2.2 Vorteile und Indikationen

Vorteile der Mini-Implantate gegenüber anderen intraoralen extradentalen Verankerungen sind ihre geringeren Kosten, die Eignung für beide Kiefer, nur wenige anatomische Limitationen, die kurze Einheilzeit mit der Möglichkeit zur Sofortbelastung, einfache Insertion sowie Entfernbareit und dadurch geringere Patientenbelastung und bessere Akzeptanz [116]. Bis auf die erforderliche Mundhygiene sind sie unabhängig von der Patientenmitarbeit [54, 119]. Die Entfernung ist meist ohne Lokalanästhesie möglich und ein Antibiotikum wird nur bei besonderer Indikation benötigt [96].

Hauptindikationen für Mini-Implantate sind Behandlungen, bei denen die gerichteten Kräfte zu unerwünschten Verankerungsverlusten führen würden, bei insuffizienten oder fehlenden Zähnen, bei asymmetrischen Zahnbewegungen oder als Alternative zur chirurgischen Umstellungsosteotomie [101]. Auch eine temporäre Verankerung von Zahnersatz wegen Nichtanlagen oder nach Trauma bei jugendlichen Patienten ist möglich [93, 164].

### 2.2.3 Implantatbeschreibung

Die meisten Mini-Implantate bestehen aus reinem Titan oder der Titanlegierung Ti-6Al-4V, wobei die Legierung weniger frakturgefährdet ist [86]. Bezüglich der Osseointegration sind keine Unterschiede bekannt. Mini-Implantate bestehen aus einem Schaft mit Gewinde, einem transgingivalen Anteil und dem Implantatkopf (Abbildung 1). Die angebotenen Durchmesser betragen 1,0 bis 2,3 mm [131]. Empfohlen werden jedoch Kerndurchmesser von mindestens 1,2 [96] beziehungsweise 1,3 mm [131]. Als ein guter Kompromiss zwischen Stabilität und Größe werden 1,6 bis 1,7 mm angesehen [92]. Die Länge beträgt zwischen 5,0 und 17,0 mm [131], wobei eine Insertionstiefe von 5,0 - 6,0 mm empfohlen wird [131]. Zum Platzieren im Alveolarfortsatz eignen sich Durchmesser unter 2,0 mm, retromolar oder im Jochfortsatz sind auch größere Durchmesser möglich.

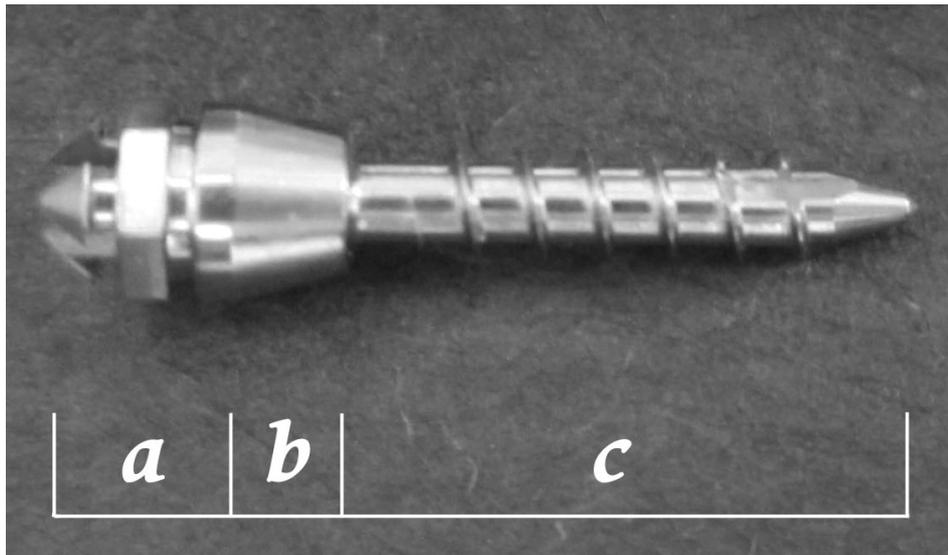


Abbildung 1: **Mini-Implantat**

Ein Mini-Implantat besteht aus dem Implantatkopf (a), einem transgingivalen Anteil (b) und dem Schaft mit Gewinde und Spitze (c). Abgebildet ist der tomas-pin N 06, ein selbstschneidendes Mini-Implantat mit einem Durchmesser (inklusive Gewinde) von 1,6 mm, einer Schaftlänge (inklusive Spitze) von 6,0 mm und einer Gesamtlänge von 10,1 mm.

Es gibt konische und zylindrische Formen. Sie können selbstschneidend (*self-tapping*) oder selbstbohend (*self-drilling*) sein. Konische Implantate haben den Vorteil, dass der apikale, und somit in Wurzelnähe befindliche, Anteil einen geringeren Durchmesser hat, die Stabilität an der stark frakturgefährdeten Implantatschulter jedoch nicht beeinträchtigt ist [60, 101, 102].

Es stehen für die unterschiedlichen Behandlungssituationen verschieden gestaltete Implantatkopfdesigns zur Verfügung [85, 97]. Mini-Implantate mit austauschbaren Aufsätzen (Abutments) wurden ebenfalls entwickelt [164].

#### 2.2.4 Insertionsorte

Als Insertionsorte bieten sich in beiden Kiefern bukkal und palatinal die interradikulären Septen des Alveolarfortsatzes, Extraktionslücken und zahnlose Kieferabschnitte an [15, 26, 101]. Im Oberkiefer sind zudem die untere Fläche der *Spina nasalis* [63], der Bereich der mittleren Gaumennaht [26, 101] und der Jochbeinfortsatz mit der *Crista infrazygomica* [26, 101] geeignet, im Unterkiefer die Retromolar- und die Symphysenregion [15, 26, 101] (Abbildung 2).

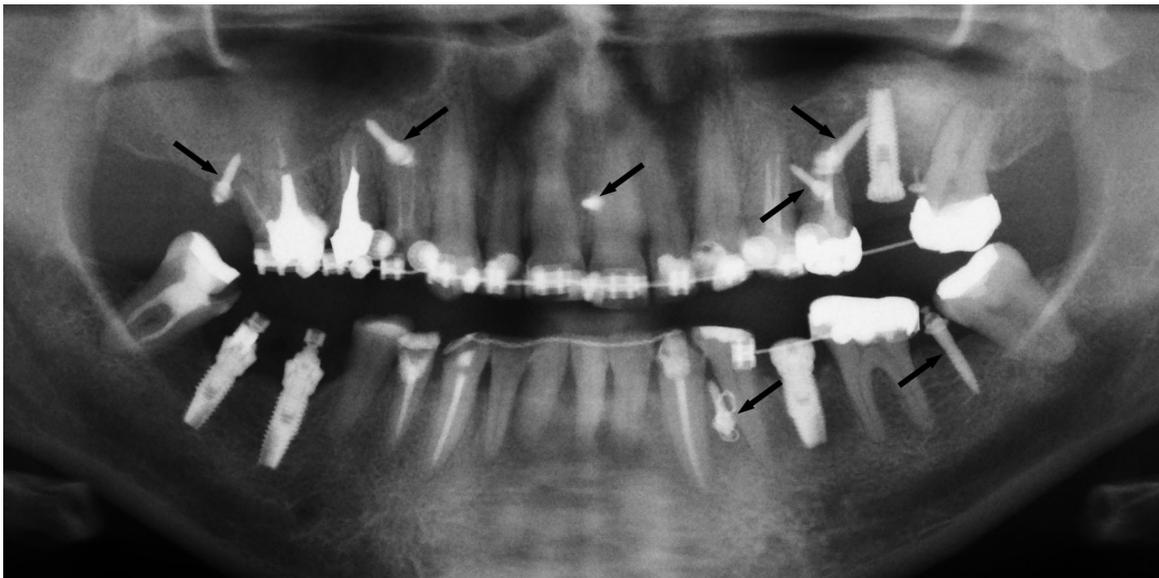


Abbildung 2: **Patientenbeispiel mit zahlreichen Mini-Implantaten**

Ausschnitt einer Panoramaschichtaufnahme mit Mini-Implantaten an verschiedenen möglichen Insertionsorten (schwarze Pfeile). (Bildquelle: CharitéCentrum für Zahnmedizin).

Um Irritationen der Mundschleimhaut zu vermeiden [16, 21, 76, 101] und zur besseren Gewebeadaptation am Implantathals [96], gilt die Empfehlung, die Implantate im Bereich der befestigten Gingiva zu inserieren. Aufgrund des räumlichen Konfliktes zwischen Durchmesser des Mini-Implantates und dem interradiikulären Platzangebot erscheint eine Insertion überall dort schwierig, wo der Streifen befestigter Gingiva schmäler als 7,0 mm ist [46]. Hinsichtlich einer interradiikulären Insertion im Alveolarfortsatz haben verschiedene, zumeist röntgenologische, Studien versucht, das Platzangebot darzustellen und geeignete Orte zu lokalisieren. Die Ergebnisse für den Bereich der befestigten Gingiva lauten:

1. Implantate von 2,0 mm Durchmesser können von vestibulär nirgends sicher interradiikulär platziert werden [31, 53, 56, 59, 108, 123, 141]. Lediglich palatinal zwischen zweitem Prämolaren und erstem Molaren ist das Platzangebot ausreichend [59, 123].
2. Für Mini-Implantate mit einem Durchmesser von weniger als 2,0 mm scheint im Oberkiefer zwischen den beiden mittleren Inzisivi [53, 141] und im Unterkiefer zwischen erstem und zweitem Molaren [53, 56, 92, 108, 124, 141] eine Platzierung möglich.
3. Zwischen oberem zweitem Prämolaren und erstem Molaren ist eine sichere Insertion nur möglich, wenn Implantate mit maximal 6,0 mm intraossärem Anteil verwendet und mit einem Winkel von weniger als  $45^\circ$  zur Zahnachse implantiert werden [70].

Demgegenüber stehen die hohen Erfolgsquoten mehrerer größerer klinischer Studien mit

vorwiegend in befestigter Gingiva inserierten Mini-Implantaten [8, 45, 52, 76, 104, 109, 114, 120]. Häufig wird dabei von einer Implantation im Oberkiefer zwischen zweitem Prämolaren und erstem Molaren berichtet [8, 45, 52, 109, 114].

Ein in der Literatur viel diskutiertes Thema ist der Sicherheitsabstand zu Zahnwurzeln. Begründet wird dieser anhand einer Studie von LIOU *et al.* aus dem Jahre 2004 [88]. In dieser Studie wies am Behandlungsende die Hälfte aller Implantate eine geringfügig veränderte Position auf, sie waren also nicht stationär. In einer Folgestudie der gleichen Autoren aus dem Jahr 2008 wurde diese Feststellung erneut bekräftigt [157]. Darin wurde eine Positionsveränderung für 87,5 % der verwendeten Implantate beschrieben, wobei das Ausmaß abhängig vom Belastungszeitraum der Mini-Implantate war. Als Ursache für die Bewegung der Implantate vermuteten die Autoren eine dünne fibröse Weichgewebsschicht zwischen Knochen und Implantat. Deshalb empfahlen sie zwischen der Zahnwurzel und dem Implantat einen Sicherheitsabstand von 2,0 mm. Die in beiden Studien verwendeten Untersuchungsmethoden sind jedoch kritisch zu betrachten. Einerseits waren die Implantate im Jochbeinfortsatz, und somit in Gebieten mit beweglicher Schleimhaut, lokalisiert. Dadurch sind Irritationen und Entzündungen der Schleimhaut möglich [20, 74]. Andererseits wurde die Positionsveränderung der Mini-Implantate durch das Überlagern von Fernröntgenseitenbildern festgestellt, was laut HUJA *et al.* mit Fehlern von 0,7 bis 0,9 mm behaftet ist [57], die in Einzelfällen gar über 2,0 mm betragen können. Dennoch deuten die Studien darauf hin, dass ein Sicherheitsabstand sinnvoll ist. Da die Knochendichte im Jochbeinfortsatz hoch ist, vermuten LIOU *et al.* in Gebieten des Alveolarfortsatzes mit geringerer Knochendichte eine noch größere Dislokation [88]. Andere Autoren haben daraus eigene Empfehlungen abgeleitet. So empfehlen LIN *et al.* 1,5 mm umgebenden Knochen plus 0,25 mm für das Parodont [86], LUDWIG *et al.* halten 0,5 mm Knochen plus 0,25 mm für das Parodont [92] für ausreichend. MAINO *et al.* fordern mindestens 1,0 mm [98], während LEE *et al.* 0,6 mm genügen [82]. Ein Fazit lässt sich daraus nur schwer ableiten.

Hinsichtlich einer Lageveränderung von Mini-Implantaten im Alveolarfortsatz liegen bislang zwei Untersuchungen vor. EL-BEIALY *et al.* werteten hierzu dreidimensionale Röntgenaufnahmen aus [36]. Dabei wurden bei 33 in der befestigten Gingiva befindlichen Mini-Implantaten über einen Zeitraum von sechs Monaten eine Verlagerung von durchschnittlich 1,08 mm am Implantatkopf, von 0,83 mm an der Spitze sowie eine Extrusion von 0,55 mm festgestellt. Die Verlagerung trat in Kraftrichtung auf und war bei den Mini-Implantaten mit Wurzelkontakt größer als bei denen ohne. Zu einem Sicherheitsabstand

werden von den Autoren jedoch keine Empfehlungen gegeben. Von ALVES et al. wurde nach 5-monatiger Belastung mit 2 N anhand von dreidimensionalen Röntgendaten eine Implantatwanderung von maximal 0,78 mm festgestellt [1]. Die bukkal im Alveolarfortsatz platzierten Implantate waren dabei außerhalb der befestigten Gingiva platziert. Die Autoren selbst schätzen die Ergebnisse aufgrund des geringen Ausmaßes als nur von geringer klinischer Relevanz ein. Hinsichtlich des Verankerungsverlustes hätte eine Implantatwanderung nur bei der indirekten Verankerung eine Auswirkung, nicht aber bei der direkten Verankerung [163].

Da die individuelle Anatomie eine große Variationsbreite aufweist und Faktoren wie die Dysgnathieform [17], kieferorthopädische Vorbehandlungen, Engstand oder Extraktionslücken eine Rolle spielen, und zudem ein gewisser Sicherheitsabstand angestrebt werden sollte, sind generelle Aussagen über die günstigsten Insertionsorte schwierig [53]. Es muss also immer individuell entschieden werden.

### 2.2.5 Insertionstechnik

Die Wahl des Implantattyps hat zwar einen Einfluss auf den Erfolg [86, 115, 145], jedoch entscheidet vor allem die Technik des chirurgischen Eingriffes [21, 52]. So scheint es sinnvoll, mit einem Implantattyp Erfahrung zu sammeln, die Insertionstechnik kritisch zu überprüfen und im Sinne einer Lernkurve zu optimieren und zu perfektionieren [8, 45, 52].

Von den meisten Autoren wird eine Implantation unter Lokalanästhesie favorisiert, jedoch ist die alleinige Anästhesie der Schleimhaut ausreichend [78, 95, 106]. Tritt ein Wurzelkontakt auf, ist der Patient so in der Lage, eine Rückmeldung zu geben. Bei Schleimhautdicken unter drei Millimetern kann dies durch Auftragen eines Oberflächenanästhetikums geschehen [73, 75].

Eine Insertion ist mit und ohne Lappen-Operation möglich [76, 104, 109]. Im Bereich der beweglichen Mukosa verbessert eine Lappen-Operation die Sicht im Operationsgebiet und verhindert, dass die Schleimhaut durch den Bohrer traumatisiert wird [52]. Durch Stanzen kann eine Schleimhauttraumatisierung ebenfalls verhindert werden [27]. Auch wenn sich die Erfolgsraten einer Vorgehensweise mit und ohne Lappen-Operation kaum unterscheiden, werden postoperativer Schmerz und Schwellung ohne Lappen-Operation als geringer angegeben [76, 95, 104, 109].

Beim Setzen selbstbohrender Mini-Implantate kann, bei selbstschneidenden Mini-Implantaten muss eine Pilotbohrung erfolgen. Der Durchmesser des Pilotbohrers sollte laut

WILMES *et al.* 0,5 mm geringer sein als der Implantatdurchmesser [165] und laut HEIDEMANN *et al.* 80 % des Implantatdurchmessers nicht übersteigen [49]. Eine Pilotbohrung sollte erfolgen, wenn die Kortikalisstärke mehr als 2,0 mm beträgt, das heißt vor allem im Unterkiefer [50, 101]. WILMES *et al.* empfehlen jedoch, Kortikalis immer vorzubohren, um zu hohe Eindrehmomente zu verhindern [168]. Wird die Pilotbohrung auf die Kortikalis beschränkt und dann mit einem Handschraubendreher inseriert, ist ein erhöhter Widerstand spürbar sobald ein Wurzelkontakt auftritt [15, 18, 101, 169, 170]. Im Tierversuch wurden sogar während der Pilotbohrung hochsignifikante Widerstandsunterschiede zwischen den einzelnen Geweben festgestellt [169]. Jedoch sind diese klinisch so gering, dass große Erfahrung notwendig ist, um einen eventuellen Wurzelkontakt zu bemerken. Wichtig ist das Arbeiten mit geringer Drehzahl und wenig Druck [96], auch um eine Überhitzung des Knochens zu vermeiden [50, 86, 120].

Als Insertionswinkel werden im Oberkiefer bukkal wie palatinal  $30^\circ - 40^\circ$  zur Zahnachse empfohlen, um nicht in Wurzelnähe zu geraten und um ausreichend Kortikalis zur Verfügung zu haben [31, 78, 80]. Im Unterkiefer empfehlen PARK *et al.*  $60^\circ$  zur Knochenoberfläche [119], KYUNG *et al.*  $10^\circ - 20^\circ$  zur Zahnachse [78] und MELSEN empfiehlt so parallel zur Zahnachse wie möglich zu inserieren [101]. MOON *et al.* dagegen platzieren in beiden Kiefern mit  $70^\circ - 80^\circ$  zur Zahnachse [109] und auch ESTELITA *et al.* empfehlen  $90^\circ$  zur Zahnachse [39]. Daraus lässt sich ableiten, dass sowohl horizontale als auch eher vertikale Insertionen möglich sind.

Voraussetzung für einen erfolgreichen Einsatz ist die Primärstabilität des Implantates [102, 165]. Ideale Bedingungen dafür bietet ein gut mineralisierter Knochen, überzogen von einer dünnen Schicht keratinisierter Gingiva [74]. Das Implantatlager muss entsprechend der Form und dem Durchmesser des Mini-Implantates gestaltet sein [168, 169]. Jedoch genügt ein Implantat-Knochenkontakt von knapp zehn Prozent um orthodontischen Kräften widerstehen zu können [132]. Einige Autoren beschreiben, dass sie zunächst ein konisches Implantat mit geringem Durchmesser einsetzen und bei fehlender Primärstabilität ein Implantat größeren Durchmessers verwenden [50, 78]. Bei konischen Mini-Implantaten entstehen höhere Eindrehmomente als bei zylindrischen [60, 66, 167], die Größe ist dabei abhängig von der Kortikalisstärke [145]. Bei zylindrischen Implantaten scheinen die Drehmomente von der Kortikalisstärke relativ unabhängig [158], jedoch steigen sie stark an, sobald die Implantatschulter die Knochenoberfläche berührt und die Insertion nicht beendet wird. Das optimale Insertionsdrehmoment liegt laut MOTOYOSHI *et al.* in einem Bereich zwischen

fünf und zehn Newton [113]. Bei kleineren Werten ist die Primärstabilität nicht gewährleistet, zu große Werte können Mikrorisse und Nekrosen verursachen [113]. Behandlern mit mehr als 20 Insertionen gelingt es häufiger bei der Insertion Primärstabilität zu erzielen als Behandlern mit weniger Erfahrung [84].

Ist die Implantation in befestigter Gingiva nicht möglich, können Schleimhautirritationen vermindert werden, indem das Implantat komplett unter die Schleimhaut gelegt wird und nur eine Drahtligatur herausführt [101]. Bei palatinaler Insertion müssen in der Regel auf Grund der dickeren Weichteilbedeckung längere Implantate verwendet werden [78, 80].

Generell ist der Vorgang einer Mini-Implantatinsertion mit Hilfe von Übertragungsschablonen (Tabelle 1), mit Positionierungshilfen (Tabelle 2), mit Hilfe von Navigationssystemen [125] und ohne derartige Hilfsmittel durchführbar. Vor allem erfahrene Behandler bevorzugen die Insertion ohne aufwändige Hilfsmittel.

### 2.2.6 Risiken und Fehlerquellen

Für mögliche Misserfolge beim Mini-Implantateinsatz kommen unterschiedliche Faktoren in Frage. Fehlerquellen können beim Implantat selbst, beim Operateur, aber auch auf Patientenseite liegen [74, 95, 101].

Implantatverluste machen meist eine erneute Insertion nötig. Bei den Implantatverlusten konzentrieren sich zwei Drittel der Verluste auf die Einheilphase und den ersten Monat der Belastung [21, 32, 81, 109, 110]. Ein großes Risiko, und somit auch eine mögliche Ursache für Misserfolge, besteht in der Verletzung anatomischer Strukturen während der Insertion [15, 24, 26, 28, 39, 41, 67, 68, 71, 74, 75, 89, 94, 97]. Vor allem bei der Platzierung in den zahntragenden Alveolarfortsatz besteht die Gefahr, Zahnwurzeln zu verletzen [15, 26, 28, 39, 41, 58, 71, 74, 75, 78, 97, 98, 105, 111, 128, 148, 149, 170]. Die Routine der Behandler und die Implantationsregion sind Faktoren, die die Häufigkeit von Wurzelkontakten beeinflussen [23]. Posterior treten Wurzelverletzungen häufiger auf als anterior. Die Auswirkungen werden in Kapitel 2.2.7 näher beschrieben. Auch eine Penetration von Kiefer- und Nasenhöhle ist möglich [28, 39, 64, 67, 68, 71, 74, 97]. Komplikationen, die in solch einem Fall die sofortige Entfernung des Implantates indizieren sind jedoch nicht beschrieben [74]. Ebenso ist eine Nervschädigung im Oberkiefer palatinal und im Unterkiefer retromolar und bukkal möglich [24, 26, 28, 74, 97]. Daher sollte im Oberkiefer palatinal nicht distal der zweiten Molaren implantiert werden, und im Unterkiefer nicht in den aufsteigenden Ast. Der Verlauf des

*Nervus alveolaris inferior* und die Austrittsstelle des *Nervus mentalis* sollten röntgenologisch eruiert worden sein, bevor im Unterkiefer im Bereich der Prämolaren inseriert wird [74].

Die Möglichkeit, dass Mini-Implantate beim Setzen abrutschen und in den Submandibular- oder den Pharyngealraum eindringen, besteht vor allem in schlecht zugänglichen Regionen (zum Beispiel retromolar oder am Jochbeinfortsatz) und bei sehr steilem Insertionswinkel mit zu starkem Druck [74]. Nach einer Pilotbohrung oder Schleimhautstanzung sollte der Einsatz einer Multifunktionsspritze vermieden werden, da die Gefahr einer subkutanen Emphysembildung besteht [74]. Aufgrund der geringen Osseointegration widerstehen Mini-Implantate laut COSTA *et al.* keiner Rotationsbelastung [26]. Dies muss bei der Art der Kopplung zwischen Mini-Implantat und Behandlungsapparatur beachtet werden.

Die Gefahr einer Implantatfraktur besteht vor allem bei Implantatdurchmessern von weniger als 1,2 mm [14, 15, 101, 120]. Die Fraktur findet meist im Kopf- oder Halsbereich des Implantates statt [168]. Verbiegungen sind ebenfalls möglich [129]. Auch die Herstellungsqualität der Mini-Implantate wird als Misserfolgsgrund diskutiert [22, 95]. Keinen Einfluss scheinen die Implantatlänge und der Zeitpunkt der Belastung zu haben [21, 32, 104]. Ein zu langer Hebelarm, wie er sich in Bereichen mit dicker Schleimhaut ergibt, kann im Knochen zu hohen Kippmomenten und leicht zu einer Überlastung führen [14].

Durch bakterielle Beläge oder mechanische Irritationen können periimplantär Entzündungen auftreten [15, 20, 73, 74, 104, 153]. Dadurch kann die Misserfolgsrate um bis zu 30 Prozent erhöht sein [74]. APEL *et al.* konnten jedoch keine Unterschiede in der absoluten Menge und in der Zusammensetzung der Bakterienflora auf den Oberflächen stabiler und mobiler Mini-Implantate feststellen [3].

Als weitere Misserfolgskriterien gelten die Verletzung des parodontalen Ligaments [156], eine Platzierung in Extraktionswundennähe [117] und fehlende Primärstabilität [102, 168]. Auch Wurzelnähe wurde nach der Auswertung von zweidimensionalen Röntgenbildern als Misserfolgskriterium beschrieben [77], was jedoch anhand von dreidimensionalen Röntgendaten nicht bestätigt werden konnte [69]. Mobile Implantate sollten entfernt werden, da auch sie bei benachbarten Wurzeln zu Resorptionen führen können [18]. Bei fehlender befestigter Gingiva ist die Misserfolgsrate höher [21]. Und bei sehr dicker Kortikalis kann die thermische Belastung im Knochen erhöht sein, so dass dort Nekrosen möglich sind [113]. Auf Patientenseite können neben der Mundhygiene Faktoren wie Allergien, Habits, Allgemeinerkrankungen und Medikamente den Erfolg beeinflussen [95].

Ein Hauptfaktor konnte bislang nicht ermittelt werden, so dass man bei einem Misserfolg immer von einem Zusammenspiel mehrerer Faktoren ausgehen kann.

### 2.2.7 Problematik der Wurzelschädigung

Die klinische Bedeutung von Wurzelkontakten wird unterschiedlich bewertet. ROBERTS *et al.* belegten bereits 1989 im Tierversuch die Reparatur einer Wurzelschädigung mit Zement und Ligament ohne Ankylose [132]. Ebenfalls im Tierexperiment wiesen ASSCHERICKX *et al.* nach, dass kleinere Wurzeldefekte nach 18 Wochen nahezu vollständig mit Reparaturzement und Ligament wieder hergestellt waren [4]. Zum gleichen Ergebnis kamen CHEN *et al.*, ebenfalls im Tierexperiment. Allerdings erfolgte das Auffüllen der Defekte vor allem knöchern, woraus sie ableiten, dass die Osteoblasten eine größere Aktivität aufweisen als die Zementoblasten [18]. In aktuelleren Studien wurde auch mehrfach ein Ankylosespot in Form von Knochen-Dentin-Kontakten nachgewiesen [13, 30, 62, 82, 130]. Diese traten bei Wurzelkontakt mit mehr als 4 mm<sup>2</sup> [62], Wurzelfragmentabsprengungen oder Pulpakontakt auf [30, 130]. In Tierstudien wurden von LEE *et al.* bei einem Wurzel-Implantat-Abstand von weniger als 0,6 mm [82] sowie von KIM und KIM bei weniger als 1,0 mm [65] mikroskopisch Resorptionen von Wurzelzement und Dentin nachgewiesen.

Eine klinische Studie zu den Auswirkungen von Wurzelschädigungen durch Mini-Implantate führten MAINO *et al.* durch [98]. Mini-Implantate wurden dabei direkt bei der Insertion in Kontakt mit Wurzeln von zur Extraktion vorgesehenen Prämolaren gebracht, oder die Prämolaren wurden in Implantate in ihrer unmittelbaren Nachbarschaft hineinbewegt. An den Zähnen, die gegen Mini-Implantate bewegt wurden, erfolgte eine Resorption der Wurzel an der Kontaktfläche zum Implantat. Entzündungszeichen im Parodont wurden dabei nicht beobachtet. Nachdem die Implantate entfernt wurden, erfolgte innerhalb der nächsten zwei Monate die vollständige Reparatur des Defektes durch zellulären Wurzelzement, ohne dass es zu einer Ankylose kam. An den Zähnen, wo die Wurzel durch einen Pilotbohrer beschädigt worden war, erfolgte eine nur unvollständige Defektauffüllung mit zellulärem Wurzelzement. Dort konnten mikroskopisch eindeutige Entzündungszeichen im Parodont nachgewiesen werden. Dies war unabhängig davon, ob nach der Pilotbohrung ein Mini-Implantat gesetzt wurde oder nicht. Von den Patienten klagte keiner über Beschwerden.

Als ein Risikofaktor wurde das Thema Wurzelverletzungen zwar bereits häufig erwähnt, doch als ein möglicher Misserfolgsgrund wird es erst in jüngerer Zeit diskutiert [5, 18, 62, 156]. So

liefern vor allem ältere Studien zahlreiche in Kapitel 2.2.6 aufgeführte Faktoren als mögliche Misserfolgsursachen, ohne auf das Thema Wurzelverletzungen einzugehen.

Häufig wird zum Thema Risikofaktoren beim Einsatz von Mini-Implantaten die Studie von MIYAWAKI *et al.* zitiert [104]. Wurzelkontakte wurden von den Autoren jedoch nicht als mögliche Misserfolgsursache in Betracht gezogen. In anderen Studien verhält es sich ähnlich. In einer von CHENG *et al.* durchgeführten prospektiven Studie gingen von 120 in befestigter Gingiva platzierten Mini-Implantaten neun Implantate verloren, wobei zwei Drittel der Verluste auf den ersten Monat nach der Insertion entfielen [21]. Die Möglichkeit einer Wurzelschädigung wurde nicht aufgeführt. Allerdings wurde erwähnt, ohne näher auf die Art und Weise einzugehen, dass jegliche Anstrengung unternommen wurde, einen Wurzelkontakt zu verhindern. In einer Studie von MOTOYOSHI *et al.* gingen in den ersten sechs Monaten 18 von 124 Mini-Implantaten verloren [113], die Möglichkeit von Wurzelkontakten wurde nicht erwähnt. Eine große Studie von PARK *et al.* mit nur wenigen Verlusten vermutet als Ursache für die Misserfolge aber die Insertionstechnik, Entzündungen und das Patientenverhalten [120]. Die hohe Verlustrate in ihrer Studie über die Retraktion von Eckzähnen mit Hilfe von Mini-Implantaten führten HERMAN *et al.* nach Rücksprache mit dem ausführenden Chirurgen auf eine falsche Angulation der Implantate zur Zahnachse, Traumatisierung der Schleimhaut und zu kurze Implantate zurück [52]. Obwohl auch einige Patienten über Schmerzen berichteten, wurde Wurzelkontakt nicht in Erwägung gezogen. Dass Wurzelkontakte aber durchaus vorkommen, ist allein aus der Tatsache zu schlussfolgern, dass von verschiedenen Autoren berichtet wird, wie im Falle eines Wurzelkontaktes weiter verfahren werden sollte [15, 18, 78, 121]. Auch in anderen Studien werden die Gründe für frühzeitige Verluste in der Lokalisation [19, 76, 109, 153], schlechter Mundhygiene [76, 153], einer zu kurzen Einheilphase [114], im Alter des Patienten [19] oder in der Beweglichkeit der Schleimhaut [16] gesucht. In einer Tierstudie von DEGUCHI *et al.* wurde zwar auch kein Wurzelkontakt nachgewiesen [32]. Aber es wird die Möglichkeit eingeräumt, dass bei zwei der drei während der Einheilphase verloren gegangenen Mini-Implantate ein Wurzelkontakt die Ursache gewesen sein könnte.

Von KURODA *et al.* wurde erstmals in einer größeren Studie der Einfluss der Wurzelnähe auf den Erfolg untersucht [77]. 216 Mini-Implantate wurden hinsichtlich ihrer Lage zu den benachbarten Wurzeln begutachtet. Und obwohl scheinbar nirgends ein direkter Kontakt zwischen Wurzel und Implantat vorlag, war die Misserfolgsrate in jener Gruppe am höchsten, wo eine Überlappung von Implantat und *Lamina dura* der Alveole zu erkennen war. Im

Unterkiefer war dieser Effekt stärker ausgeprägt als im Oberkiefer. Allerdings erfolgte die Auswertung hauptsächlich anhand von Zahnfilmen, nur in wenigen Fällen durch dreidimensionale Röntgenaufnahmen. Da Wurzelkontakt am Zahnfilm nicht eindeutig auszuschließen ist [5, 18, 67, 68, 89], wäre bei einer Überlappung von *Lamina dura* und Implantat auch Wurzelkontakt möglich. In einer weiteren Studie von KURODA *et al.* wurden postchirurgische Schmerzen in Abhängigkeit von der Insertionsmethode und vom Mini-Implantatdurchmesser untersucht [76]. Darin berichtete eine Woche nach Insertion keiner der Patienten, bei denen Mini-Implantate mit 1,3 mm Durchmesser verwendet wurden, von Schmerzen. Bei denjenigen Patienten, wo Implantate mit 2,0 mm Durchmesser verwendet wurden, klagte jedoch knapp die Hälfte noch über Schmerzen. Von den Autoren der Studie wird auf das Thema Wurzelkontakt nicht weiter eingegangen, obwohl in zahlreichen Studien darauf hingewiesen wird, dass für Implantate mit 2,0 mm Durchmesser im Bereich der befestigten Gingiva kaum geeignete Insertionsstellen vorhanden sind [31, 53, 56, 59, 108, 123, 141].

Studien zur Wurzelschädigung liegen unter anderem aus der Kieferchirurgie vor. Eine Studie von BORAH und ASHMEAD bezieht sich auf Osteosyntheseschrauben, die im zahntragenden Alveolarfortsatz zur Fixierung von Miniplatten gesetzt wurden [11]. Die Auswertung postchirurgisch angefertigter Panoramaschichtaufnahmen ergab einen Wurzelkontakt bei 0,47 % der Schrauben. Im Unterkiefer wurden Wurzelschädigungen dreimal häufiger festgestellt als im Oberkiefer. Der Grund wird im dickeren Knochen und dem dadurch kaum palpierbaren Wurzelverlauf vermutet.

In einer Untersuchung durch FABBRONI *et al.*, bei der periapikale Aufnahmen mit intraoralen Zahnfilmen direkt nach der Entfernung der Osteosyntheseschrauben angefertigt und ausgewertet wurden, lag die Häufigkeit eines Wurzelkontaktes deutlich höher als in der Untersuchung von BORAH und ASHMEAD [42]. Bei 15,9 % der Schrauben wurde ein geringer Wurzelkontakt mit weniger als 50 % des Schraubendurchmessers und bei 11,2 % ein großer Wurzelkontakt mit mehr als 50 % des Schraubendurchmessers erkannt. Ein Vitalitätsverlust wurde jedoch nur bei 2,6 % der Zähne festgestellt.

In einer aktuellen kieferorthopädischen Untersuchung von Kau *et al.* waren von vornehmlich posterior gesetzten Mini-Implantaten 65,2 % im Kontakt mit dem Parodont [64]. Beurteilt wurde die Lage der Implantate zu den umgebenden Strukturen anhand von dentalen Volumentomographien, die direkt nach der Implantation angefertigt worden waren. Neben den schwierigeren Sichtverhältnissen bei einer posterioren Insertion wird die Nutzung

dreidimensionaler Daten als Hauptgrund für das Auffinden so zahlreicher Parodontalkontakte angesehen.

Bislang gibt es kaum Langzeitstudien über die Folgen von Kontakten zwischen Wurzeln und Mini-Implantaten. Tierstudien untersuchten Zeiträume von sechs bis zwölf Wochen [4, 13, 18, 30, 62], klinische Studien überblickten meist maximal ein Jahr [42, 98]. Auch bei der einzigen klinischen Studie über einen längeren Untersuchungszeitraum von BORAH und ASHMEAD mit bis zu fünf Jahren, wurde keine Zunahme der Anzahl der Zähne mit Vitalitätsverlust festgestellt [11]. Von Bedeutung kann ein Wurzelkontakt jedoch werden, wenn ein Mini-Implantat in die Pulpa eindringt oder zu einer Fraktur des Zahnes oder der Wurzel führt, wie in Abbildung 3 dargestellt [30, 51]. Dies verschlechtert die Prognose für den betroffenen Zahn erheblich. Bei einwurzeligen Zähnen kann es eher zu einer Pulpanekrose kommen [11].

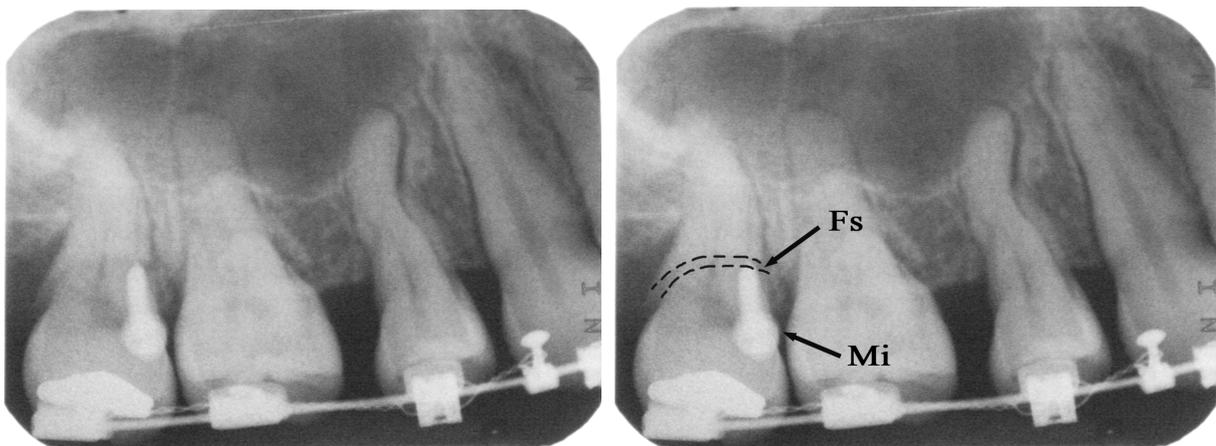


Abbildung 3: **Horizontalfraktur, verursacht durch ein Mini-Implantat**

Die Penetration des Dentins durch ein Mini-Implantat führte zur Horizontalfraktur des Zahnes 17. Auf dem rechten Röntgen-Einzelbild kennzeichnet Mi das verursachende Mini-Implantat und Fs den Frakturspalt (Quelle: Privat; Druck mit freundlicher Genehmigung von Krekeler, 2009.).

### 2.3 Übersicht verschiedener Positionierungshilfen zur Insertion von orthodontischen Mini-Implantaten

Vor der Insertion eines Mini-Implantates erfolgt die klinische Beurteilung der Implantationsregion in Kombination mit einer Panoramaschichtaufnahme, periapikalen Einzelbildern oder einem dreidimensionalen bildgebenden Verfahren. Die geplante Insertionsstelle kann markiert werden. Die einfachste Methode dafür ist ein Separierdraht aus Messing, der an der geplanten Stelle gerade oder zu einer Schlaufe geformt endet [52, 78, 80, 97, 101]. Eine vorgefertigte Schlaufe zur Platzierung ihrer Mini-Implantae wird von einigen Firmen, wie von der Firma Dentaureum (Ispringen, Deutschland) in Form des tomas-locators,

mit angeboten. Das Retentionsende der Schlaufe muss dazu temporär mit Silikon oder Kunststoff an der Zahnreihe befestigt werden, um eine Röntgenkontrollaufnahme und die Insertion durchführen zu können. Mit diesen Methoden kann die ungefähre Implantationsstelle markiert werden, aber der anteroposteriore Insertionswinkel und die vertikale Inklination sind weiterhin sehr variabel [28]. Daher wurden in den letzten Jahren alternative Verfahren entwickelt, um die Insertionsrichtung zu präzisieren und somit die Implantation sicherer zu gestalten. Dabei lassen sich zwei Gruppen unterscheiden. Zum einen Übertragungssplints, die eine auf einem Modell geplante Insertionsposition in den Patientenmund übertragen, zum anderen Röntgen- oder Positionierungshilfen, die den Ort und die Ausrichtung direkt intraoral festlegen.

Die meisten Übertragungssplints und Positionierungshilfen wurden bislang nur deskriptiv oder im Rahmen von Kasuistiken erwähnt. Über deren routinemäßige Anwendung ist wenig veröffentlicht [94]. Die Tabellen 1 (für Übertragungssplints) und 2 (für Positionierungshilfen) geben eine chronologische Übersicht über die bislang entwickelten Systeme.

Eine Studie zu diesem Thema von SUZUKI und SUZUKI vergleicht den von Ihnen 2007 vorgestellten modifizierten „3-D Guide“ mit einem interdental befestigten Messingdraht als Positionierungshilfe sowie einer Insertion ohne Hilfsmittel [150]. Die Abweichung der Mini-Implantatpositionen von der idealen Platzierung betrug dabei im Durchschnitt bei der Verwendung des „3-D Guide“ weniger als  $2,0^\circ$ , während sie beim Messingdraht über  $15^\circ$  und ohne Hilfsmittel gar über  $20^\circ$  lag [150]. Mit den beiden letztgenannten Varianten wurden nur je 20 Insertionen durchgeführt, mit dem „3-D Guide“ jedoch 180.

Eine Studie von LIU *et al.* untersucht die Ergebnisse mit einer virtuell geplanten und in CAD/CAM-Technik gefrästen Übertragungsschablone [89]. Dabei betrug die Abweichung für 34 Mini-Implantate von der geplanten Position an der Implantatspitze  $0,42 \text{ mm} \pm 0,13$  und  $1,2^\circ \pm 0,43$  in distomesialer Auslenkung,  $0,47 \text{ mm} \pm 0,12$  und  $1,3^\circ \pm 0,41$  vertikal und  $0,59 \text{ mm} \pm 0,26$  und  $1,6^\circ \pm 0,79$  bukkopalatinal/bukkolingual sowie  $0,10 \text{ mm} \pm 0,012$  am Insertionspunkt. ESTELITA *et al.* haben für eine von ihnen vorstellte Positionierungshilfe anhand von zehn Implantationen einen sehr kleinen Ungenauigkeitsgrad von  $0,17 \text{ mm} \pm 0,11$  errechnet [41]. MIYAZAWA und Mitarbeiter führten mit ihrem DVT-kontrolliertem Übertragungssplint 44 Implantationen jeweils zwischen zweitem Prämolare und erstem Molare durch, ohne dass Wurzelkontakt auftrat [105].

Zuletzt haben ESTELITA *et al.* eine einfache und splintfreie Methode entwickelt, bei der die Septummitte allein als Referenz aus dem Kontaktpunkt der Zähne und den durch

---

Zahnseideimpressionen markierten mesialen und distalen Septumbegrenzungen ermittelt wird [40]. Eine korrekte Angulation und Inklination während der Insertion wird allerdings ausschließlich durch zusätzliche Hilfsmittel erreicht.

Tabelle 1: **Übersicht Übertragungssplints**

Die Tabelle fasst die bislang in der Literatur beschriebenen Übertragungssplints, die eine auf dem Modell geplante Mini-Implantatposition in den Patientenmund übertragen, zusammen. Als Röntgendiagnostik werden intraorale Zahnfilme (ZF), Panoramaschichtaufnahmen (PSA), Fernröntgenseitenbilder (FRS), Computertomographien (CT) und dentale Volumetomographien (DVT) beschrieben. War keine Information zu erhalten, ist es als n. b. (nicht beschrieben) gekennzeichnet.

Referenz	kurze Beschreibung			
	Diagnostik	Röntgenkontrolle vor Insertion	Richtungskontrolle bei Insertion	Röntgenkontrolle nach Insertion
FREUDEN- THALER <i>et al.</i> (2001) [43]	Druckformfolie, an der zur Führung der Pilotbohrung mit Autopolymerisat eine Titanhülse von 3,0 mm Durchmesser befestigt ist.			
	PSA und FRS	CT	ja	n. b.
KITAI <i>et al.</i> (2002) [71]	Ein stereolithographisches Modell wird erstellt. Auf diesem wird die Mini-Implantatposition festgelegt. Aus Acryl wird darauf eine Übertragungshilfe für die Pilotbohrung hergestellt.			
	CT mit Diagnostikschiene	nein	ja	n. b.
MAINO <i>et al.</i> (2003) [97]	Okklusal fixierte Acrylschablone mit inkorporiertem Draht, der an der Insertionsstelle endet.			
	PSA und ZF	ZF	nein	n. b.
KYUNG <i>et al.</i> (2003) [79]	Anhand eines FRS wird unter Berücksichtigung des gewünschten Kraftvektors die Insertionsstelle festgelegt. An einer Acrylschablone, deren Rand bis zur Insertionsstelle verlängert ist, wird die anteroposteriore Position mit einem Folienschreiber markiert.			
	FRS	nein	nein	drei ZF (parallel, mesial- und distal-exzentrisch)
MAJUMDAR <i>et al.</i> (2005) [99]	Gaumenplatte aus Acryl, mit Adamsklammern befestigt. Ausschließlich zur Platzierung in die mediane Gaumennaht. Zur Röntgenkontrolle wird ein Edelstahlröhrchen eingelassen, um die Angulation zu bestimmen. Vor der Insertion wird dieses wieder entfernt und nur ein dünner Metalldraht befestigt, der die gewünschte Angulation anzeigt.			
	FRS	FRS	nein	n. b.
MOREA <i>et al.</i> (2005) [111]	Okklusal fixierte Acrylschablone mit vestibulär eingelassener Stahlhülse (Innendurchmesser 1,3 mm für 1,2 mm Pilotbohrer).			
	PSA	nein	ja	ZF

Referenz	kurze Beschreibung			
	Diagnostik	Röntgenkontrolle vor Insertion	Richtungskontrolle bei Insertion	Röntgenkontrolle nach Insertion
WU <i>et al.</i> (2006) [170]	Okklusaler Acrylblock mit drei in bukkolingualer Richtung parallel zum Approximalraum ausgerichteten Drähten. In Kombination mit einem Filmhalter dient der Acrylblock als Röntgenschablone. Ein Einzelbild in Rechtwinkeltechnik wird erstellt. Daraus wird eine Wurzelschablone geschnitten, diese wird an den Drähten fixiert und dann bei der Insertion als Referenz verwendet.			
	ZF	ZF	nein	CT
COUSLEY und PARBERRY (2006) [28]	Druckformfolie, an der mit Acryl ein Metallröhrchen (Länge 5,0 mm) für die Pilotbohrung fixiert werden kann (Innendurchmesser 1,5 mm für 1,3 mm Pilotbohrer), oder es wird direkt im Acryl ein Tunnel für selbstbohrende Mini-Implantate gebohrt (Durchmesser 4,0 mm für Implantat).			
	PSA oder ZF	nein	ja	PSA oder ZF
KIM <i>et al.</i> (2007) [67]	Ein stereolithographisches Modell wird erstellt und darauf die Insertionsposition festgelegt. Auf einem Gipsmodell wird eine Acrylschablone gefertigt, diese auf das stereolithographische Modell gesetzt, und anschließend ein Tunnel in gewünschter Position und Richtung durch die Schablone gebohrt (Innendurchmesser mit Bohrkäppchen 1,6 mm für 1,5 mm Pilotbohrung und 2,7 mm für 1,8 mm Mini-Implantat).			
	DVT	nein	ja	DVT
KIM <i>et al.</i> (2008) [68]	Anhand von DVT-Daten wird mit einer Software die Implantatposition virtuell festgelegt. Die Daten und ein Gipsmodell werden zum Labor geschickt. Ein stereolithographisches Modell mit den Implantatpositionen wird erstellt, darauf werden dann aus lichthärtendem Kunststoff und Metallhülsen zwei Übertragungshilfen mit verschiedenen Hülsendurchmessern gefertigt. Eine Übertragungshilfe dient dann zur Stanzung der Schleimhaut und der Mini-Implantatinsertion, die andere zum Vorbohren (Innendurchmesser 2,7 mm zum Stanzen der Schleimhaut und zur Insertion des Mini-Implantates mit 1,8 mm Durchmesser, 1,7 mm für Pilotbohrer mit 1,5 mm).			
	DVT	nein	ja	DVT

Referenz	kurze Beschreibung			
	Diagnostik	Röntgenkontrolle vor Insertion	Richtungskontrolle bei Insertion	Röntgenkontrolle nach Insertion
COUSLEY (2009) [27]	Auf einem Gipsmodell wird ein Mini-Implantat-Analog in optimaler Position platziert und darauf ein Abutment fixiert. Über dieses wird dann ein Führungszylinder mit 4,0 mm Innendurchmesser gesetzt, und dieser mit Hilfe einer Druckformfolie eingefasst (Führungszylinder und Folie bilden den Übertragungssplint).			
	PSA oder ZF	nein	ja	n. b.
MIYAZAWA <i>et al.</i> (2010) [105]	Auf einem Gipsmodell wird die Position geplant, aus lichthärtendem Material ein okklusal fixierter Übertragungssplint gefertigt, in den eine Führungshülse aus Edelstahl inkorporiert ist. Ein Kontroll-DVT wird mit Splint <i>in situ</i> angefertigt und gegebenenfalls korrigiert. Der Innendurchmesser der Hülse ist 0,2 mm größer als der des Mini-Implantats, die Länge der Hülse beträgt circa 3,0 mm.			
	n. b.	DVT	ja	DVT
LIU <i>et al.</i> (2010) [89]	Am CT werden die Interproximalräume vermessen und die optimale Mini-Implantatposition wird festgelegt. Daraufhin wird virtuell eine Übertragungsschablone modelliert und diese dann in CAD/CAM-Technik (computer-aided design and computer-aided manufacturing) stereolithographisch erstellt.			
	CT	nein	ja	CT
QIU <i>et al.</i> (2011) [126]	Am DVT wird die optimale Mini-Implantatposition festgelegt. Daraufhin wird virtuell eine Übertragungsschablone modelliert und diese dann in CAD/CAM-Technik stereolithographisch erstellt. Inkorporiert sind an den Insertionsstellen Führungshülsen, in die zur Pilotbohrung ein Führungsschlüssel mit 4,0 mm Innendurchmesser und zur Insertion ein Führungsschlüssel mit 4,4 mm Innendurchmesser gesteckt werden kann.			
	DVT	nein	ja	DVT
MOREA <i>et al.</i> (2011) [112]	Mit einer Software wird anhand von DVT-Daten die Mini-Implantatposition festgelegt. Im CAD-Verfahren wird dann virtuell eine Übertragungsschablone entworfen, die anschließend stereolithographisch erstellt wird. Darin wird eine Führungshülse aus Stahl mit einem Innendurchmesser von 1,12 mm eingelassen. Der Pilotbohrer hat einen Durchmesser von 1,1 mm.			
	DVT	nein	ja	(DVT)

Tabelle 2: **Übersicht Positionierungshilfen**

Die Tabelle fasst die bislang in der Literatur beschriebenen Positionierungshilfen, die die Insertionsposition direkt im Patientenmund festlegen, zusammen. Als Röntgendiagnostik werden intraorale Zahnfilme (ZF), Panoramaschichtaufnahmen (PSA), Fernröntgenseitenbilder (FRS), Computertomographien (CT) und dentale Volumentomographien (DVT) beschrieben. War keine Information zu erhalten, ist es als n. b. (nicht beschrieben) gekennzeichnet.

Referenz	kurze Beschreibung			
	Diagnostik	Röntgenkontrolle vor Insertion	Richtungskontrolle bei Insertion	Röntgenkontrolle nach Insertion
CARANO <i>et al.</i> (2005) [15]	An Brackets befestigte Schlaufe aus Vierkantdraht.			
	PSA und ZF	ZF	nein	PSA oder ZF
SUZUKI und BURANAS-TIDPORN (2005) [148]	Edelstahlröhrchen von 5,0 mm Länge, das über eine volljustierbare dreidimensionale Vorrichtung am Bogen einer Multibandapparatur befestigt wird (Innendurchmesser 3,0 mm für 1,5 mm Pilotbohrer).			
	PSA oder ZF	ZF	ja	ZF
ESTELITA <i>et al.</i> (2006) [39]	Über ein Gurin Lock an der Multibandapparatur befestigter Vierkantdraht mit angelötetem Röhrchen. Das Röhrchen dient zunächst als Röntgenhalter für ein Einzelbild in Rechtwinkeltechnik. Nach Kontrolle der Positionierung wird die Pilotbohrung durchgeführt (Innendurchmesser 1,15 mm für 1,0 mm Pilotbohrer).			
	n. b.	ZF	ja	ZF
KRAVITZ <i>et al.</i> (2007) [75]	Zwei L-förmige an Brackets befestigte Vierkantdrähte werden im Vestibulum entlang dem Verlauf der mesialen und distalen Wurzel des Approximalraums ausgerichtet und grenzen somit den Korridor für eine Insertion ein.			
	n. b.	ZF	nein	n. b.
CHOI <i>et al.</i> (2007) [24]	Zwei Vierkantdrähte werden mesial und distal der Insertionsstelle an Brackets befestigt. Einer führt über den Approximalraum nach lingual und dient der Richtungskontrolle, der andere mit aufgelöteter Skala verläuft horizontal in mesiodistaler Richtung im Vestibulum und legt die Insertionsstelle fest.			
	ZF	ZF	bedingt	ZF
SUZUKI und SUZUKI (2007) [149]	Vereinfachte Version ihrer Positionierungshilfe von 2005, aber mit weniger Schraubverbindungen. Ist dadurch weniger adjustierbar, aber besser zu fixieren. Wird in drei verschiedenen Längen angeboten.			
	PSA oder ZF	ZF	ja	ZF

Referenz	kurze Beschreibung			
	Diagnostik	Röntgenkontrolle vor Insertion	Richtungskontrolle bei Insertion	Röntgenkontrolle nach Insertion
LUDWIG <i>et al.</i> (2008) [94]	Einfacher kurzer (3,5 mm Länge) Röntgen-Pin von 0,75 mm Durchmesser mit konischem Schaft. Dieser wird bis maximal 2,5 mm in die Gingiva eingebracht und ein Einzelbild erstellt. Nach dem Entfernen markiert der Blutungspunkt die Insertionsstelle.			
	n. b.	ZF	nein	n. b.
REDDY <i>et al.</i> (2008) [128]	Über ein Gurin Lock wird ein Gitter aus 16 x 22 Stahldraht mit einem Raster aus 18 Feldern von je 1 x 1 mm am Bogen einer Multibracketapparatur befestigt. Ein Einzelbild wird erstellt, auf diesem dann das passende Rasterfeld zur Insertion gewählt und die Pilotbohrung durchgeführt.			
	n. b.	ZF	nein	ZF
ESTELITA <i>et al.</i> (2009) [41]	Modifizierte Version ihrer 2006 vorgestellten Positionierungshilfe, bei der die Pilotbohrung nicht mehr durch das Röhrchen hindurch erfolgt, sondern das Röhrchen eine auf den Schraubendreher aufgesteckte Hülse mit einem daran befestigtem Führungsdraht aufnimmt. Ein kurzer horizontaler Arm gibt den Insertionspunkt vor. So kann ein selbstbohrendes Mini-Implantat in identischer Richtung zum Röntgenstrahlengang platziert werden.			
	n. b.	ZF	ja	ZF
YU <i>et al.</i> (2011) [171]	Eine aus Teflon-PFA vorgefertigte Positionierungshilfe mit okklusaler und vestibulärer Fläche wird mit Silikon in situ fixiert. Ein CBCT wird erstellt, und daraufhin mit Hilfe einer Software die Implantatposition festgelegt. Auf die skalierte Lateralfläche der Positionierungshilfe wird der Eintrittspunkt übertragen, und in einer geometrischen Vermessungsapparatur die Inklination eingestellt. Die Positionierungshilfe wird mit 2,7 mm Durchmesser vorgebohrt, um später ein Mini-Implantat mit 1,8 mm zu inserieren. (Bislang ausschließlich im Tierversuch.)			
	n. b.	DVT	ja	DVT

Die in den Tabellen aufgeführten Systeme unterscheiden sich zum Teil erheblich. Dies betrifft den zeitlichen und finanziellen Aufwand ebenso wie Patientenbelastung und Genauigkeit. Folgende Nachteile werden bei den verschiedenen Methoden deutlich:

#### 1. Hohe Strahlenbelastung der Patienten

Die hohe Strahlenbelastung gilt insbesondere für die Methoden, bei denen eine oder mehrere Computertomographien oder dentale Volumentomographien angewendet werden [43, 67, 68, 71, 89, 105, 126, 170, 171].

#### 2. Kostenintensiv

Dies gilt besonders für die Herstellung stereolithographischer Modelle oder Übertragungsschablonen in Kombination mit dreidimensionaler Röntgendiagnostik [67, 68, 71, 89].

#### 3. Zeitaufwändig

Neben den auf stereolithographischen Modellen gefertigten Übertragungshilfen ist die Herstellung aller in einem zahntechnischen Labor gefertigten Übertragungshilfen aus Acryl oder Druckformfolien zeitaufwändig [27, 28, 43, 67, 68, 71, 79, 89, 97, 99, 111, 170]. Ebenso können einige an Multibracketapparaturen befestigte Positionierungshilfen in der Vorbereitung zeitintensiv sein [24, 41, 128, 148]. Da sie aber sterilisierbar sind, können sie mehrfach eingesetzt werden. Viel Aufwand bedeutet auch die Übertragung digitaler Daten mit Hilfe analoger Vermessungsgeräte [171].

#### 4. Übertragungsungenauigkeiten

Bei der Lokalisation der Insertionsposition [75, 79, 97, 99, 170] legen einige Systeme lediglich einen Bereich, aber nicht die genaue Position fest. Bei der Führung der Inklination erscheinen einige Übertragungsmethoden nicht ausreichend präzise [15, 24, 75, 79, 94, 97, 126, 128, 170], da der Durchmesser der Führungshülsen nicht kongruent zu Bohrer und Implantat ist.

Stereolithographische Modelle weisen durch Polymerisationsschrumpfung Ungenauigkeiten auf, stellen zum Teil Weichgewebe nicht dar und geben die Okklusalfächen häufig nicht

exakt wieder [67]. Druckformfolien sind flexibel, dadurch sind Ungenauigkeiten möglich [28, 43]. Diese sind ebenfalls durch Bewegungsspiel bei den an Brackets oder Vierkantbögen befestigten Positionierungshilfen denkbar [15, 24, 39, 75, 128, 148, 149].

#### 5. Fehlende röntgenologische Kontrolle

Vor allem dort, wo die Planung ausschließlich auf dem Modell erfolgt, wird vor der Insertion keine röntgenologische Kontrolle zur Absicherung der geplanten Position vorgenommen [28, 67, 68, 71, 79, 111]. Die Möglichkeit zu einer eventuellen Korrektur, auch nach möglichen Übertragungsfehlern, ist somit nicht gegeben.

Wichtig erscheint ebenfalls die röntgenologische Kontrolle nach der Implantation [39, 41, 67, 79, 105, 149, 156]. Diese wird häufig nicht beschrieben [27, 43, 71, 75, 94, 97, 99] oder lediglich durch einen einzelnen Zahnfilm oder ein Panoramaschichtaufnahme durchgeführt [15, 24, 28, 39, 111, 128, 148, 149].

#### 6. Splints kommen ausschließlich bei der Pilotbohrung zum Einsatz

Sofern mit den Positionierungshilfen und Übertragungssplints ausschließlich die Pilotbohrung durchgeführt werden kann, ist die Insertion von selbstbohrenden Mini-Implantaten nicht möglich [39, 43, 71, 99, 111, 112, 128].

#### 7. Positionierungshilfen sind auf das Vorhandensein einer Multibracketapparatur angewiesen

Meist kommen die Mini-Implantate im Verlauf einer Multibracketbehandlung zum Einsatz. Ist eine Multibracketbehandlung jedoch nicht vorgesehen, sind die Positionierungshilfen, die an Brackets oder Vierkantbögen befestigt werden [15, 24, 41, 75, 128, 148, 149], nicht verwendbar.

#### 8. Schwierige Handhabung

Die Konstruktionen behindern die Einsicht in das Operationsgebiet. Muss sich der Behandler sehr auf das Ausrichten des Pilotbohrers in Relation zur Übertragungshilfe konzentrieren, stellen sie kaum eine Erleichterung dar [24, 170]. Inwieweit sich - wie bei WU *et al.* [170] - ein beschnittenes Röntgenbild im Patientenmund als Positionierungshilfe eignet, ist ebenfalls fraglich.

Es lässt sich feststellen, dass eine Vielzahl möglicher Probleme dem Nutzen der zum Teil recht aufwändigen Hilfsmittel gegenübersteht. Übertragungsfehler vom Modell in den Patientenmund, Inkongruenz zwischen Implantatbohrer und Führungshülse, Fehlen einer Richtungsführung, schlechtere Einsehbarkeit des Operationsgebietes und der Mehraufwand sind Argumente, die vor allem erfahrene Behandler anführen. Eine gute Sicht im Implantationsgebiet und die Möglichkeit zur taktilen Kontrolle der Schleimhaut sind ebenfalls wichtige Voraussetzungen, um ein Mini-Implantat erfolgreich und ohne Wurzelkontakt zu inserieren.

Unter der Voraussetzung, dass die gewünschte Mini-Implantatposition optimal lokalisiert ist, sind die Vorteile einer sicher geführten Insertion unbestreitbar. Solange jedoch unklar ist, ob auf einem Modell geplante Positionen auch zur Insertion eines Mini-Implantates geeignet sind, erscheint der Mehraufwand einer Herstellung von Übertragungssplints fraglich.

### **3 Fragestellungen**

Das Ziel der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Pilotstudie war es, das Risiko einer Schädigung von Zahnwurzeln bei der Insertion von Mini-Implantaten zu bewerten und eventuell zu verringern.

Die zu untersuchenden Fragestellungen waren:

1. Kann die optimale Position eines Mini-Implantates auf einem Gipsmodell ebenso präzise festgelegt werden wie anhand des klinischen Befundes im Patientenmund?
2. Welchen Einfluss hat die Erfahrung des Behandlers auf die Häufigkeit von Wurzelschädigungen?
3. Ergeben sich Unterschiede in den Ergebnissen zwischen Ober- und Unterkiefer?
4. Welchen Einfluss hat das Implantatdesign auf die Ergebnisse?
5. Sind Panoramaschichtaufnahmen zur Beurteilung des interradikulären Abstandes ausreichend?

## 4 Material und Methode

Für diese Pilotstudie wurde ein computergestütztes optisches Navigationssystem (Lapdoc, Berliner Zentrum für Mechatronische Medizintechnik, Deutschland) verwendet. Mit dem System ist eine noninvasive, rein virtuelle Implantation möglich. So konnten die Versuche ohne Trauma durchgeführt und beliebig oft wiederholt werden, ohne dass sich die einzelnen Messungen gegenseitig beeinflussten. Voraussetzung dafür war ein dreidimensionaler Röntgendatensatz inklusive eines Navigationsbogens.

### 4.1 Vorbereitung

#### 4.1.1 Probanden

Als Probanden stellten sich freiwillig zwei Mitarbeiterinnen der Charité - Universitätsmedizin Berlin zur Verfügung, bei denen wegen retinierter dritter Molaren eine dentale Volumentomographie angefertigt werden sollte. Sie erfüllten folgende Kriterien zur Studienteilnahme:

- vollständige Zahnanlage,
- keine größeren Restaurationen, die zu Artefakten bei den Bilddaten führen können,
- keine laufende kieferorthopädische Behandlung und somit keine Positionsänderung von Zahnwurzeln oder Kronen während des Versuchszeitraums.

#### 4.1.2 Versuchsunterlagen

Zur Vorbereitung der Versuche wurden folgende Schritte durchgeführt:

1. Abformung und Modellherstellung
2. Anfertigung von Planungsschienen
3. Erstellung einer dentalen Volumentomographie
4. Einlesen der Bilddatensätze als DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) in das Navigationssystem
5. Erstellen der Mini-Implantatkörper

Nach Abformung der Kiefer mit Alginat (*Tetrachrom super*; Kaniedenta, Herford, Deutschland) wurden Modelle aus Hartgips (*Kanistone KFO-Spezial Typ 3*; Kaniedenta, Herford, Deutschland) erstellt. Auf diesen wurden im Druckformverfahren Schienen aus

*Duran* 1,0 mm (Scheu-Dental, Iserlohn, Deutschland), einer hartelastischen transparenten Druckformfolie, angefertigt.

Da die späteren Versuche ausschließlich in dem Kiefer stattfinden konnten, in dem die Planungsschiene inkorporiert war, erhielt eine Probandin eine Schiene für den Oberkiefer, die andere Probandin eine für den Unterkiefer. So standen für die Studie ein Oberkiefer und ein Unterkiefer zur Verfügung. An diese Schienen wurde mit Hilfe von transparentem Autopolymerisat (*Orthocryl*, Dentaaurum, Ispringen, Deutschland) je ein Navigationsbogen befestigt (Abbildung 4). Der Navigationsbogen (BZMM, Berlin, Deutschland) wurde auf der Schiene okklusal und leicht retral platziert. Dies sorgte während der Anfertigung der dentalen Volumentomographie für eine Bissperre, die okklusale Artefakte vermeidet. Durch die retrale Position war keine zusätzliche Vergrößerung des „Field of view“ zur Erfassung aller Titanzylinder im Navigationsbogen erforderlich und bei den späteren Versuchen war dadurch gewährleistet, dass die Labialflächen der Zahnkronen eingesehen werden konnten.

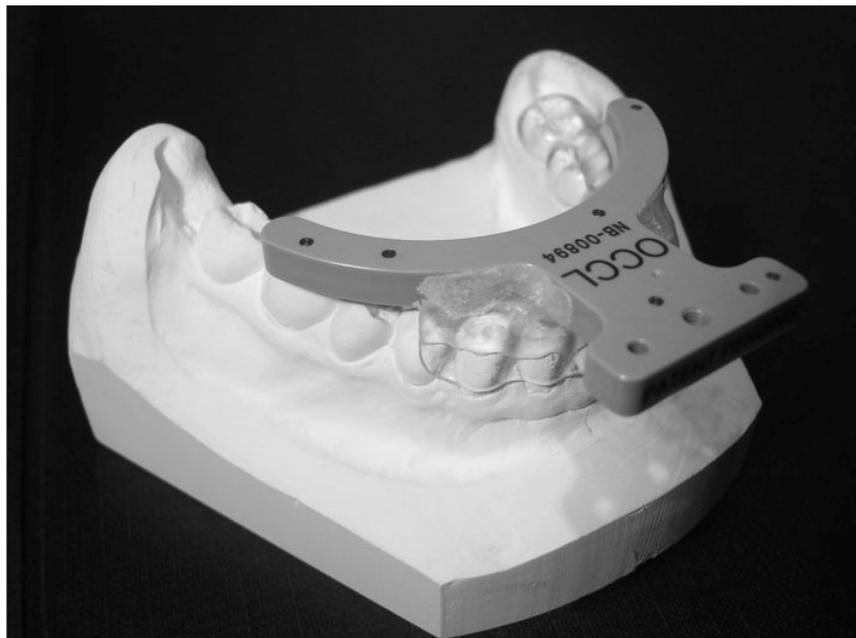


Abbildung 4: **Planungsschiene mit Navigationsbogen**

Unterkiefermodell mit dem okklusal und nach retral verschoben an der Schiene befestigten Navigationsbogen. Die Schiene endet sagittal bei Zahn 44 sowie oberhalb der Gingiva.

Die dentale Volumentomographie wurde mit dem 3-D-Röntgensystem GALILEOS Compact (Sirona, Bensheim, Deutschland) mit Standardeinstellung und einer Auflösung von 0,3 mm isotroper Voxelkantenlänge angefertigt.

Für die Versuche sollten Mini-Implantate verschiedener Hersteller und verschiedener Dimensionen verwendet werden, um herauszufinden, welchen Einfluss die Implantatgeometrie auf die Ergebnisse hat. Alle Mini-Implantate die für die Versuchsreihe

verwendet wurden, wurden vorher zur Überprüfung der Herstellerangaben mit einer auf Hundertstelmillimeter skalierten digitalen Schieblehre drei Mal vermessen und der Mittelwert anschließend auf Zehntelmillimeter gerundet (Tabelle 3). Als Durchmesser ist der Außendurchmesser inklusive Gewinde angegeben. Es handelte sich ausschließlich um zylindrische Implantate. Anschließend wurden anhand der Daten durch einen Mitarbeiter des Berliner Zentrums für mechatronische Medizintechnik (BZMM) aus der Abteilung für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie (MKG) – Klinische Navigation der Charité – Universitätsmedizin Berlin mit Hilfe der Lapdoc-Software virtuelle dreidimensionale Implantatkörper zum Einfügen in den Datensatz erstellt.

Tabelle 3: Verwendete Mini-Implantate und deren Dimensionen

Bezeichnung	Gesamtlänge	Schaftlänge	Durchmesser
tomas-pin N 06	10,1 mm	6,0 mm	1,6 mm
tomas-pin N 08	12,1 mm	8,0 mm	1,6 mm
tomas-pin N 10	14,1 mm	10,0 mm	1,6 mm
Aarhus mini-implant „short“	9,6 mm	7,6 mm	2,0 mm
Aarhus mini-implant „long“	11,6 mm	9,6 mm	2,0 mm

Als Standardimplantat für alle Versuchsreihen wurde zunächst der tomas-pin N 08 festgelegt. Anschließend konnte jedoch für jede festgelegte Implantatposition ein beliebiger Implantatkörper aus Tabelle 3 eingesetzt werden.

## 4.2 Navigationssystem

Das Navigationssystem Lapdoc ist ein eigenständiges klinisches Navigationsgerät, das vom Berliner Zentrum für Mechatronische Medizintechnik (BZMM), einem Verbund der Klinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie – Klinische Navigation und Robotik der Charité – Universitätsmedizin Berlin und dem Fraunhofer Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik (IPK) entwickelt wurde. Das System gehört zu den optisch passiven Navigationssystemen, da es mit reflektiertem Infrarotlicht arbeitet. Die einzelnen Komponenten sind die Navigationssoftware, ein Bildschirm, eine stereoskope

Navigationenkamera (Polaris VICRA, NDI, Ontario, Kanada) (Abbildung 5) sowie die zum System zugehörigen Tracker (Reflexionskörper) und Navigationsbögen (Abbildung 6).

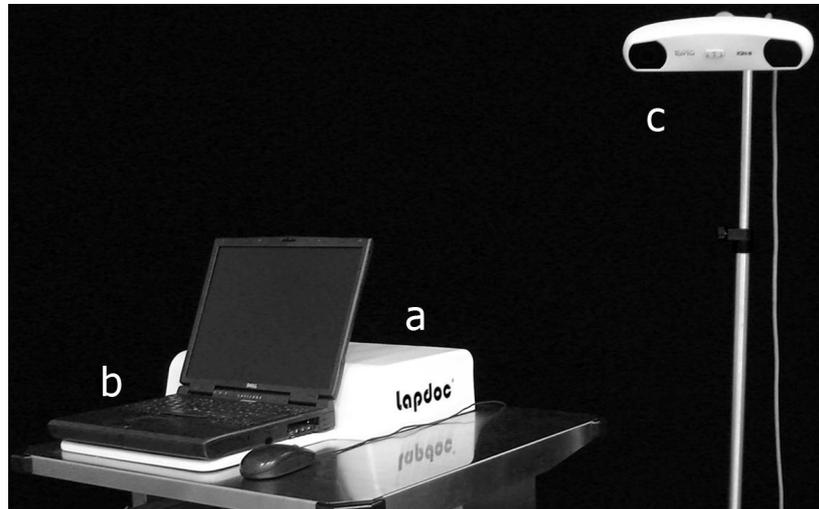


Abbildung 5: **Komponenten des mobilen Navigationssystems Lapdoc**

(a) Navigationsstation mit der Navigationssoftware, (b) Bildschirm und Laptop mit den Patientendaten und (c) stereoskopische Navigationskamera Polaris.

Die Tracker bestehen aus einem Grundkörper und drei hochpräzise geschliffenen Glaskugeln, den Micro-Sphere-Reflektoren, und lassen sich reproduzierbar mit einem Handstück und mit einer Navigationsschiene verbinden. Die Fertigungsgenauigkeit der Tracker liegt bei 0,05 mm. Das System arbeitet mit Infrarotlicht, welches von der stereoskopischen Kamera ausgesendet und von den Glaskugeln reflektiert wird. Die stereoskopische Kamera besteht aus zwei Positionssensoren sowie der Emissionsquelle für das Infrarotlicht. Da die Lage der Positionssensoren sowie die der Reflektoren zueinander jeweils bekannt sind, kann die Position der Tracker im Raum mittels Triangulation bestimmt werden. Dies geschieht 20-mal pro Sekunde.

Die räumliche Zuordnung der dreidimensionalen Röntgendaten zum Patienten und zum Gipsmodell erfolgt über die Planungsschiene, die während der röntgenologischen Diagnostik und den Versuchen gleichermaßen an der Zahnreihe fixiert ist. Im Navigationsbogen der Planungsschiene sind sechs Titanzylinder in einer bekannten Geometrie und bekanntem Grauwertbereich angeordnet, so dass sie über einen Rechenalgorithmus durch den Computer aus dem DVT-Datensatz automatisch detektiert werden können. Dadurch kann die Position des Handstücks zu jedem beliebigen Zeitpunkt mit dem dreidimensionalen Datensatz des jeweiligen Probanden überlagert werden [139].

Für das virtuelle Setzen der Implantate wurde kein chirurgisches Winkelstück, sondern ein Handstück verwendet. So war bei den Versuchen die Ausrichtung der Tracker zur Kamera besser möglich. Zur Vermeidung einer Gingivatraumatisierung bei den Probanden wurde in das Handstück ein Bohrerschaft mit abgerundetem Ende eingespannt (Abbildung 6). Eine Längskalibrierung des Bohrerschaftes vor jeder Versuchsreihe war nötig, um auf der virtuellen Implantatachse den Berührungspunkt mit der Gingiva zu definieren. Beim Einsetzen der virtuellen Mini-Implantatkörper in den Datensatz stellte dieser Punkt die Mitte des Implantathalses dar.

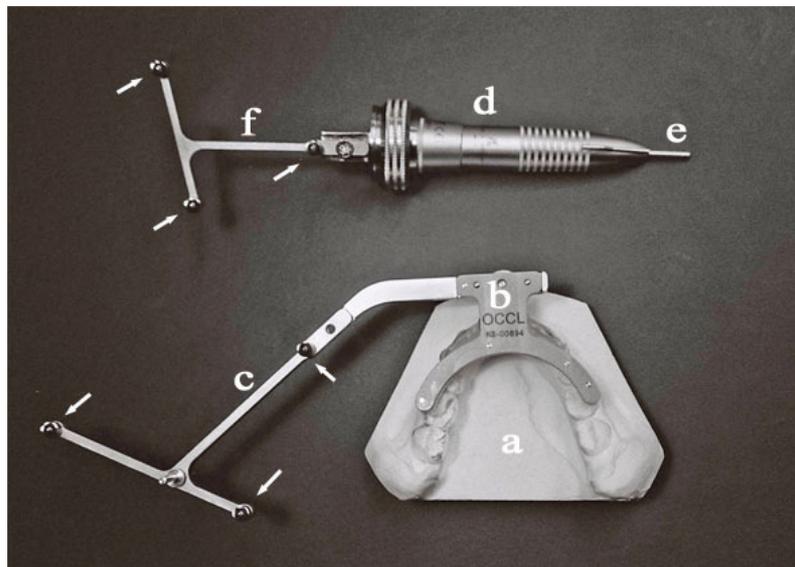


Abbildung 6: **Registrierungskomponenten**

Unterkiefermodell (a) mit Planungsschiene (b) (inklusive Navigationsbogen) und dem daran befestigten Patienten-Tracker (c). Chirurgisches Handstück (d) mit Bohrerschaft (e) und dem daran befestigten Tracker (f) für chirurgische Hand- oder Winkelstücke. Die Tracker bestehen jeweils aus einem speziell geformten Grundkörper und den drei Reflektoren (Pfeile). Sie werden über eine Schraubverbindung mit dem Navigationsbogen beziehungsweise dem Handstück verbunden.

### 4.3 Versuchsdurchführung

Alle Versuche fanden an insgesamt fünf Versuchstagen in einem Zeitraum von 18 Wochen in der Abteilung für klinische Navigation und Robotik der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie im Campus Virchow-Klinikum der Charité – Universitätsmedizin Berlin statt.

Als Behandler wirkten zwei Kieferorthopäden aus der Abteilung für Kieferorthopädie der Charité – Universitätsmedizin Berlin sowie der Autor dieser Studie mit. Sie wiesen zum Zeitpunkt der Studie einen unterschiedlich großen Erfahrungsschatz bei der Insertion von kieferorthopädischen Mini-Implantaten auf (Tabelle 4). Die Behandler 1 und 2 haben die Erfahrung von über 100 Insertionen von Mini-Implantaten, wobei davon auszugehen ist, dass

Behandler 1 zum Zeitpunkt der Untersuchung mehr Insertionen vorgenommen hatte als Behandler 2. Behandler 3 hatte noch keine Erfahrung mit dem Setzen von Mini-Implantaten.

Tabelle 4: **Behandlererfahrung**

Angegeben ist die Anzahl der bislang inserierten Mini-Implantate.

	Behandler 1	Behandler 2	Behandler 3
Insertionserfahrung	> 100 > Behandler 2	> 100 < Behandler 1	0

Vor den Versuchen hatte jeder Behandler die Aufgabe, für die beiden Probandinnen jene Zahnzwischenräume festzulegen, bei denen seiner Meinung nach ausreichend Platz zur Implantation zwischen den Wurzeln vorhanden ist (Tabelle 5). Dies geschah anhand von Panoramaschichtdarstellungen, die mittels der Software GALILEOS-Viewer (Sirona Dental Systems GmbH, Bensheim, Deutschland) aus den DVT-Datensätzen errechnet wurden. Alle Mini-Implantate sollten im Bereich der befestigten Gingiva platziert werden. Dabei standen nur der 1. und 4. Quadrant zur Verfügung, da die optischen Tracker von Handstück und Planungsschiene im 2. und 3. Quadranten miteinander hätten kollidieren können. Dadurch wären der Bewegungsfreiraum für das Handstück stark eingeschränkt und die Reflexionswege der Kamera versperrt gewesen.

Tabelle 5: **Zur Insertion geeignete Zahnzwischenräume nach Begutachtung der Panoramaschichtdarstellungen**

Die Zahnzwischenräume im ersten Quadranten beziehen sich auf Probandin 1, die Zahnzwischenräume im vierten Quadranten beziehen sich auf Probandin 2.

\* Nach klinischer Beurteilung wurde gegen eine Insertion entschieden, obschon laut Panoramaschichtaufnahme interradikulär ausreichend Platz vorhanden war.

\*\* Aus technischen Gründen war eine Insertion nicht möglich.

**Fett** gedruckt sind die Zwischenräume, die von allen Behandlern als geeignet angesehen wurden.

	Zur Insertion geeignete Zahnzwischenräume
Behandler 1	jeweils mesial von: 11*, 13, <b>15, 16, 45, 46</b> , 47**
Behandler 2	jeweils mesial von: 11*, <b>15, 16, 45, 46</b> , 47**
Behandler 3	jeweils mesial von: 11*, <b>15, 16, 45, 46</b> , 47**

Nach der röntgenologischen Beurteilung erfolgte die klinische Bewertung, und hier entschieden sich alle Behandler aufgrund eines ausgeprägten, hoch ansetzenden Lippenbändchens bei Probandin 1 gegen eine Insertion zwischen den mittleren oberen Inzisivi. Der Zwischenraum mesial von Zahn 13 wurde nur von einem Behandler als geeignet

angesehen, so dass dieser später separat ausgewertet wurde. Im Unterkiefer entschied man sich, von einer Insertion mesial des Zahnes 47 abzusehen, da die Lippenspannung wegen des geraden Handstücks für Probandin 2 nicht zumutbar gewesen wäre. Somit standen für die Versuchsauswertung je zwei Zwischenräume pro Kiefer zur Verfügung, die allen Behandlern für eine interradiäre Insertion von vestibulär geeignet erschienen. Im Oberkiefer waren dies die Zwischenräume mesial von Zahn 15 und von Zahn 16, im Unterkiefer mesial der Zähne 45 und 46. Die Versuche sollten aber zunächst an allen gut erreichbaren Zwischenräumen durchgeführt werden, um auch diese Ergebnisse später vergleichen zu können. Nicht gut erreichbar, da vom Tracker und der Kopplungsschraube zur Schiene verdeckt, waren die Zwischenräume mesial von 42 und von 41. In der Literatur werden diese Zwischenräume als wenig geeignet angesehen [53, 56, 92, 141], so dass hier auf die Versuche verzichtet wurde.

Während der Versuche hatten die Behandler keine Einsicht auf den Bildschirm mit der Lapdoc-Arbeitsoberfläche und der Darstellung der Implantatposition (Abbildung 7). Die an dem Notebook sitzende Person kontrollierte die Navigationsampel, welche anzeigt, ob alle Reflektoren von der Kamera erfasst werden. Zudem hatte sie die Aufgabe, auf ein Kommando der Behandler mit Hilfe einer Stop-Funktion die als günstig erachtete Insertionsrichtung „einzufrieren“. Daraufhin wurde diese jeweils als Datensatz abgespeichert. Um eine Beeinflussung im Sinne eines Lerneffektes oder die Möglichkeit zur Korrektur einer weniger guten Implantatposition zu verhindern, wurden den Behandlern während des gesamten Versuchszeitraumes keinerlei Ergebnisse mitgeteilt.

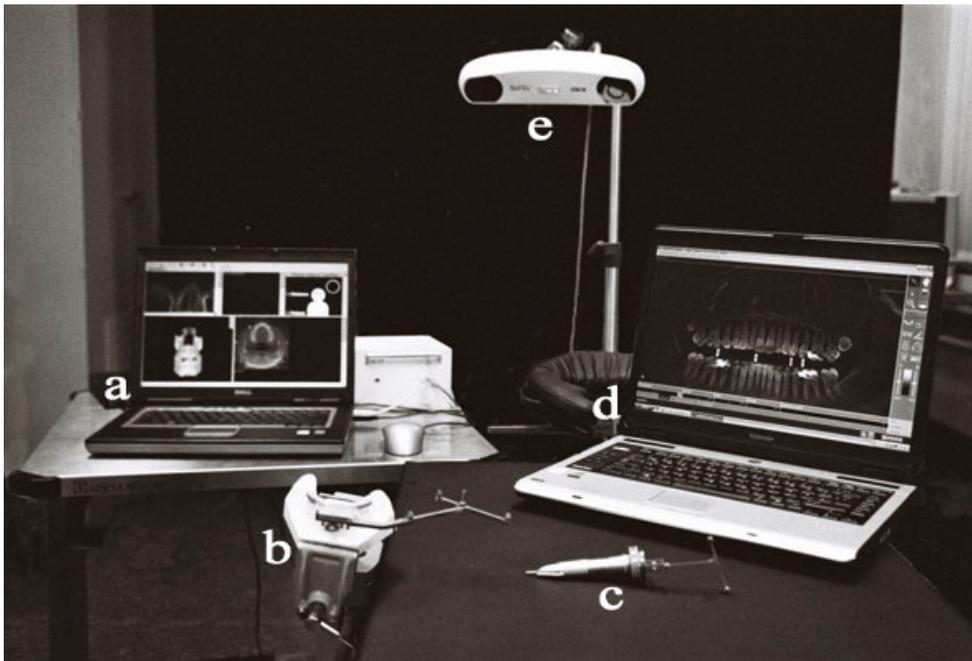


Abbildung 7: **Versuchsaufbau**

Das Notebook auf der linken Seite (a) zeigt die Lapdoc-Arbeitsoberfläche. Während der Versuche war dieser Bildschirm für die Behandler nicht einsehbar. Außerdem zu erkennen: (b) Modell (zur besseren Fixierung in einem Schraubstock befestigt) mit Planungsschiene, Navigationsbogen und Patienten-Tracker, (c) chirurgisches Handstück mit Tracker, (d) Notebook mit Panoramaschichtaufnahme darstellung und (e) die Navigationskamera.

Pro Behandler und Probandin wurden jeweils zehn Versuchsreihen am Modell und intraoral durchgeführt (Abbildung 8). Zur optimalen Ausrichtung zur Kamera wurde das Gipsmodell während der Versuche mit einem Schraubstock fixiert.

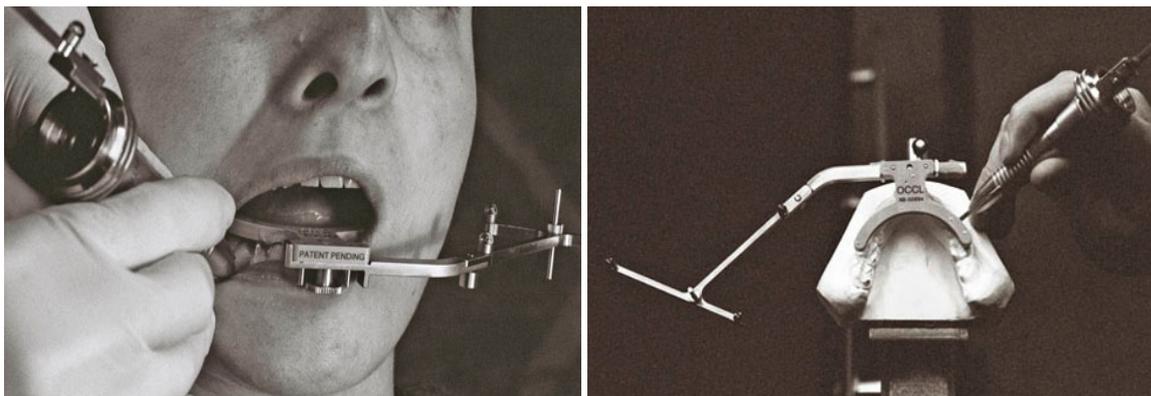


Abbildung 8: **Versuchsdurchführung**

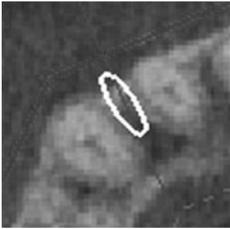
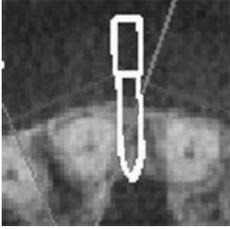
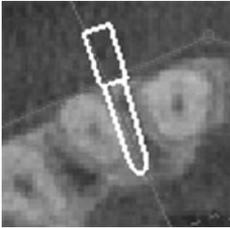
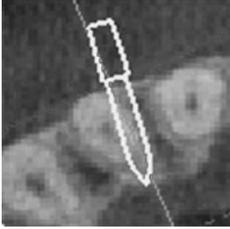
Intraoral (links) und am Modell (rechts) jeweils im Unterkiefer.

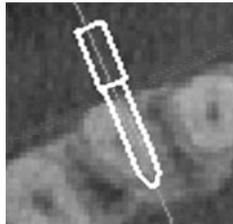
#### 4.4 Auswertung

Die Auswertung der Ergebnisse fand erst nach Beendigung aller Versuchsreihen statt, um keine der Versuchsreihen durch Vorkenntnisse zu beeinflussen. Durchgeführt wurde sie ausschließlich durch den Verfasser der vorliegenden Arbeit.

Die Auswertung der Mini-Implantatpositionen erfolgte zunächst für den als Standardimplantat festgelegten tomas-pin N 08 nach einem fünfgradigen Schema, das in Tabelle 6 dargestellt ist. Dieses Schema entspricht einer Einteilung, wie sie von FABBRONI *et al.* in einer Untersuchung zur Beurteilung von Wurzelverletzungen verwendet wurde [42]. Für die übrigen Mini-Implantatkörper aus Tabelle 3 erfolgte die Unterteilung in drei Kategorien. Dabei wurden die Kategorien „geringer Wurzelkontakt“, „großer Wurzelkontakt“ und „Pulpakontakt“ als „Wurzelkontakt“ zusammengefasst.

Tabelle 6: Auswertungsschema für das Standardimplantat (tomas-pin N 08).

	Kategorie	Beschreibung	Darstellung
1	kein Kontakt	Eindeutig kein Kontakt zwischen Implantatkörper und Zahnwurzel sowie Implantatkörper und Parodontium erkennbar.	
2	unklar	Der Implantatkörper befindet sich in der Nähe der Zahnwurzel. Aufgrund der Bildauflösung ist der Parodontalspalt nicht immer eindeutig dargestellt. Wenn eine Überlagerung mit dem Parodontium weder auszuschließen war noch eindeutig vorlag, wurde diese Kategorie gewählt.	
3	geringer Wurzelkontakt	Neben der Überlagerung des Parodontiums liegt zusätzlich eindeutig Wurzelkontakt vor. Dieser ist geringer als der halbe Implantatdurchmesser.	
4	großer Wurzelkontakt	Wurzelkontakt mit mehr als dem halben Implantatdurchmesser, jedoch kein Pulpakontakt.	

5	Pulpakontakt	Der Implantatkörper hat Kontakt zur Pulpa.	
---	--------------	--------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------

Zur Bewertung der räumlichen Beziehung zwischen Mini-Implantat und benachbarten Zahnwurzeln wurde mit der Lapdoc-Software der jeweilige DVT-Datensatz geöffnet, der sich dann wie in Abbildung 9 darstellte. In jedem Datensatz waren die entsprechenden Mini-Implantatpositionen einer Versuchsreihe abgespeichert (sechs Positionen für den Oberkiefer, vier für den Unterkiefer). Über die Bedienoberfläche war es möglich, sich durch die einzelnen Ebenen des Datensatzes zu navigieren. Die Lage der Implantatkörper wurde so visuell in jeder Schicht in Beziehung zu den Zahnwurzeln bewertet. Im Anschluss konnten die verschiedenen Mini-Implantatkörper über die Funktion „Exchange Implant“ ausgetauscht werden (Abbildung 10).

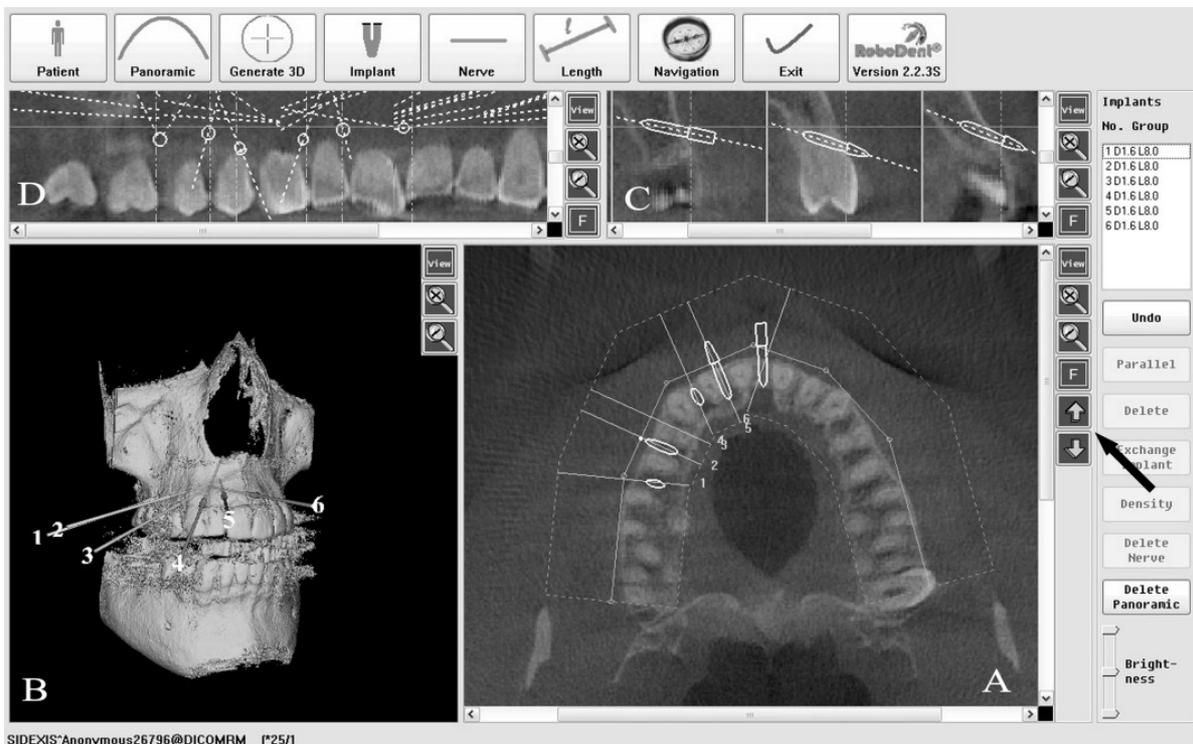


Abbildung 9: Oberfläche der Lapdoc-Software zur Auswertung

Die Auswertung erfolgte hauptsächlich über das Fenster unten rechts auf der Arbeitsoberfläche (A). Mit den Pfeilen an der rechten Seite (siehe schwarzer Pfeil) war es möglich, sich durch die verschiedenen Ebenen des Datensatzes zu navigieren. In der Abbildung weisen in der dargestellten Ebene die Implantate 1, 2, 4 und 6 keinen Kontakt und Implantat 5 geringen Wurzelkontakt auf. Implantat 3 ist in dieser Ebene nicht dargestellt.

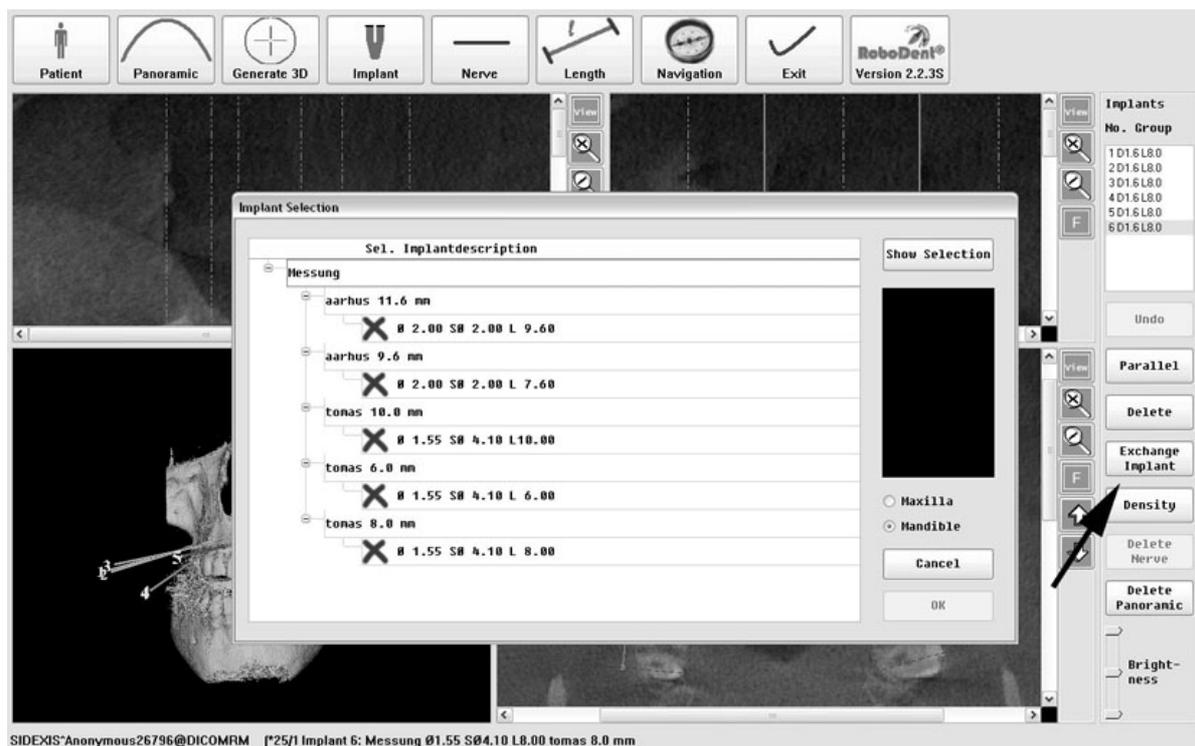


Abbildung 10: Oberfläche zum Austausch der Mini-Implantatkörper

Aktiviert wird die Oberfläche über den Button „Exchange Implant“ auf der rechten Menüleiste (siehe schwarzer Pfeil). Das gewünschte Mini-Implantat kann dann aus der sich öffnenden Liste ausgewählt werden.

Da das Datenmaterial nur von zwei Probanden stammt und somit nur je ein Ober- und ein Unterkiefer zur Verfügung standen, erfolgte die Auswertung rein deskriptiv. Es wurden Häufigkeiten erstellt und diese mit Hilfe von Balkendiagrammen grafisch dargestellt. Verglichen wurden die Ergebnisse zwischen Modell und intraoral, zwischen den jeweiligen Behandlern, zwischen Ober- und Unterkiefer sowie zwischen den verschiedenen Implantatdesigns. Eine metrische Auswertung der Implantatpositionen zueinander erfolgte nicht.

#### 4.5 Bestimmung des Methodenfehlers

Der Methodenfehler setzt sich zusammen aus Abweichungen im Winkel und räumlicher Diskrepanz der vom Navigationssystem abgespeicherten Implantatpositionen sowie abweichenden Ergebnissen bei mehrfacher Auswertung der abgespeicherten Implantatpositionen.

#### 4.5.1 Fehler durch das Navigationssystem

Zur Bestimmung der Ungenauigkeit des Navigationssystems wurde ein Modell angefertigt, in das im interradikulären Bereich in regio 15/16 aus Autopolymerisat eine Matrize zur Aufnahme des Bohrerschaftes eingearbeitet wurde, die den Bohrerschaft exakt aufnahm (Abbildung 11). Der Bohrerschaft wurde fünfmal in die Matrize eingeführt und jeweils die Position gespeichert. Anschließend wurde die Modellposition in Höhe und Ausrichtung zur Kamera verändert und es wurden erneut fünf Durchgänge registriert. So standen zehn Datensätze zur Verfügung, die eine „identische“ Position darstellten.

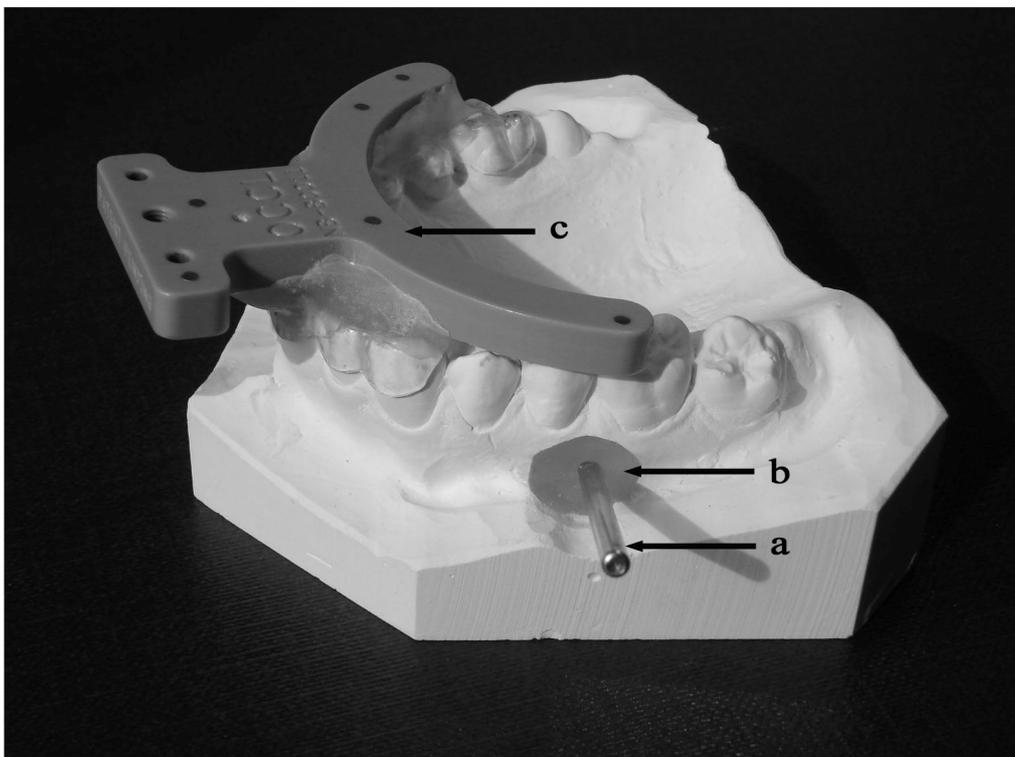


Abbildung 11: **Modell zur Bestimmung des Methodenfehlers**

Der Bohrerschaft (a) (hier ohne das Handstück) wird von der Matrize (b) aus Autopolymerisat exakt aufgenommen. Auf das Modell ist die Planungsschiene mit Navigationsbogen (c) aufgesetzt.

Der Fehler ergab sich als Abweichung vom Median dieser zehn Wiederholungsmessungen. Dazu wurden die als Matrix gespeicherten Bohrerschaftspositionen in ihre Vektoren aufgelöst. Mit Hilfe des Scalarproduktes konnten so die Winkel und Abstände zwischen den Vektoren errechnet werden (Abbildung 12).

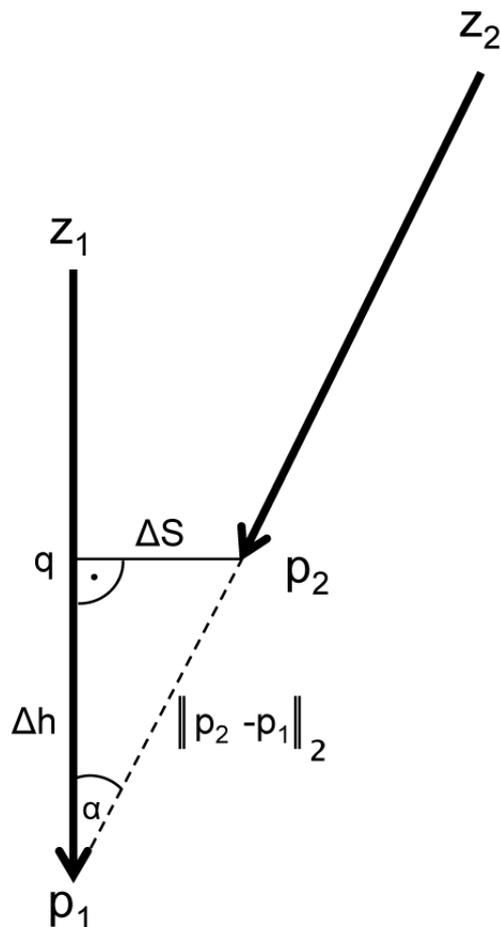


Abbildung 12: **Skizze zur Darstellung der Methodenfehlerberechnung**

Abgebildet sind die Implantatachsen  $z_1$  und  $z_2$ , die Implantatspitzen  $p_1$  und  $p_2$ , die Neigungswinkeldifferenz  $\alpha$ , die Insertionstiefendifferenz  $\Delta h$ , der euklidischer Abstand  $\Delta p$  ( $\|p_2 - p_1\|$ ) und der seitliche Abstand  $\Delta s$ .

Der Methodenfehler in der Winkelabweichung der Implantatachsen wurde nach der Formel

$$\alpha(z_1, z_2) = \arccos\left(\frac{z_1 \cdot z_2}{|z_1| \cdot |z_2|}\right)$$

berechnet. Zudem wurde noch der euklidische Abstand der Implantatspitzen, das heißt der Abstand im Raum, nach

$$\Delta p = \|p_1 - p_2\|_2$$

sowie die Differenz in der Insertionstiefe nach

$$\Delta h = (p_2 - p_1) \cdot z_1$$

berechnet.

Der seitliche Abstand der Spitze eines Implantates zur Implantatachse des Referenzimplantates berechnet sich aus den Formeln:

$$q = \Delta h \cdot z_1 + p_1 \text{ und}$$

$$\Delta s = |q - p_2|.$$

Die Ergebnisse der Bestimmung des Methodenfehlers aus 10 Wiederholungsmessungen sind in Tabelle 7 aufgeführt und in Abbildung 13 als Boxplots grafisch dargestellt.

Tabelle 7: **Ergebnisse der Methodenfehlerbestimmung**

Angegeben sind minimale (Min.) und maximale (Max.) Abweichung sowie der Median der Abweichung ( $\tilde{x}$ ).

	Min.	Max.	$\tilde{x}$
Winkelabweichung der Implantatachsen $\alpha$ [°]	0,039	0,825	<b>0,380</b>
Euklidischer Abstand $\Delta p$ [mm]	0,304	1,510	<b>0,665</b>
Differenz der Insertionstiefe $\Delta h$ [mm]	0,024	0,491	<b>0,234</b>
Seitlicher Abstand der Implantatspitze zur Referenzimplantatachse $\Delta s$ [mm]	0,219	1,427	<b>0,605</b>

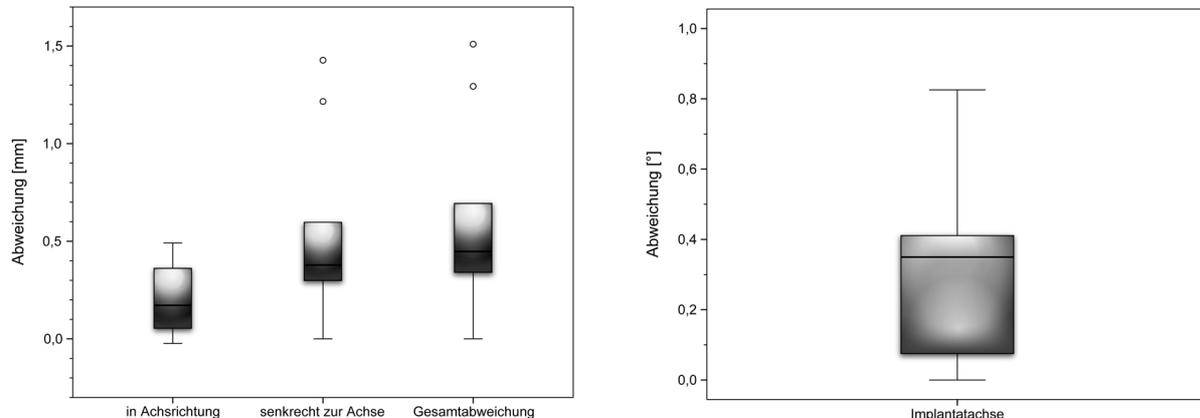


Abbildung 13: **Darstellung des Methodenfehlers als Boxplot**

Auf der linken Seite sind euklidischer und seitlicher Abstand sowie Insertionstiefendifferenz der Implantatspitzen in Millimetern dargestellt ( $\circ$  bezeichnet die Ausreißer), auf der rechten Seite die Implantatachsenabweichung in Grad.

Die Systemgenauigkeit des Lapdoc-Systems wird vom Hersteller mit 0,5 mm mittlerem seitlichem Abstand und 0,6° mittlerer Implantatachsenabweichung angegeben [140]. Das wird durch diese Messungen größtenteils bestätigt. Die Achsenabweichung fällt mit 0,38° geringer aus, jedoch beträgt der mittlere euklidische Abstand über 0,6 mm. In der Diskussion wird auf die Konsequenz daraus eingegangen.

### 4.5.2 Fehler bei der Auswertung

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte rein visuell. Die abgespeicherten Datensätze wurden dabei einer der jeweils fünf möglichen Kategorien zugeordnet. Hierbei sind Beurteilungsfehler möglich. Um das Ausmaß dieser Fehlermöglichkeit herauszufinden, wurde eine zufällig gewählte Datenreihe (Behandler 1 am Oberkiefermodell) sechs Monate nach der Erstbegutachtung vom Verfasser ein zweites Mal ausgewertet. Das Ergebnis ist in Abbildung 14 grafisch und in Tabelle 8 als Kreuztabelle dargestellt.

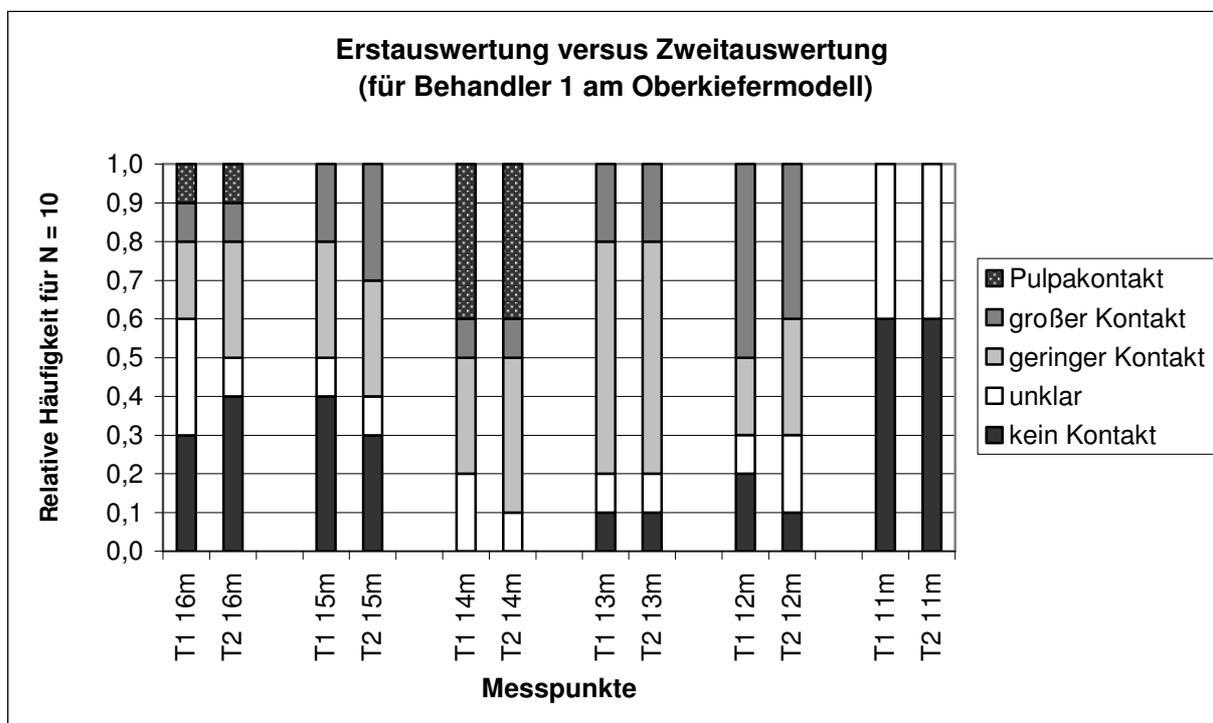


Abbildung 14: Ergebnisse für die zweifache Auswertung einer Datenreihe

Für die Ergebnisse von Behandler 1 am Oberkiefermodell wurde eine Zweitauswertung durchgeführt. Dargestellt sind für alle sechs Interdentalräume (mesial [m] von Zahn 16 bis mesial von Zahn 11) die Ergebnisse der Erst- (T1) und Zweitauswertung (T2).

Tabelle 8: **Kreuztabelle der Erst- und Zweitauswertung**

Daten von Behandler 1 am Oberkiefermodell unter Zusammenfassung aller Zahnzwischenräume, an denen virtuell inseriert worden ist.

		Zweitauswertung					gesamt
		kein Kontakt	unklar	geringer Kontakt	großer Kontakt	Pulpakontakt	
Erstauswertung	kein Kontakt	14	2	0	0	0	16
	unklar	1	8	3	0	0	12
	geringer Kontakt	0	0	16	1	0	17
	großer Kontakt	0	0	1	9	0	10
	Pulpakontakt	0	0	0	0	5	5
gesamt		15	10	20	10	5	60

Es ist ersichtlich, dass sich kein Ergebnis um mehr als eine Kategorie verschoben hat. Das Maß der Übereinstimmung Kappa weist einen Wert von 0,827 auf. Es liegt eine hohe Signifikanz vor (Tabelle 9).

Tabelle 9: **Übereinstimmung der Zweitauswertung mit der Erstauswertung**

	Wert	asymptotischer Standardfehler SE	näherungsweise Signifikanz
Maß der Übereinstimmung: <b>Kappa</b>	<b>0,827</b>	0,057	<b>p &lt; 0,001</b>
Anzahl der gültigen Fälle	60		

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Vermessung der Zahnzwischenräume

Um die Ergebnisse der vorliegenden Studie hinsichtlich des tatsächlich verfügbaren Knochenlagers beurteilen zu können, wurden nach Beendigung aller Versuchsreihen die interradikulären Distanzen aller verwendeten Zahnzwischenräume vermessen. Dies geschah anhand der dreidimensionalen Röntgendatensätze der Probandinnen unter Zuhilfenahme der Längenmessungsfunktion der Software GALILEOS-Viewer. Gemessen wurde jeweils im Abstand von 4,0 mm vom oberen Rand des Alveolarkammes, um im Bereich der befestigten Gingiva zu bleiben. Die Distanzen sind in Tabelle 10 dargestellt.

Die von den Behandlern anhand der Panoramadarstellungen als zur Insertion geeignet eingestuften Zahnzwischenräume (mesial der Zähne 16, 15, 46 und 45, sowie 13 und 11) wiesen ein Platzangebot zwischen 2,85 mm und 3,35 mm auf, während das interradikulär verfügbare Knochenlager an den als ungeeignet eingestuften Zahnzwischenräumen (mesial der Zähne 14, 12, 44 und 43) maximal 2,25 mm betrug. Der von Behandler 1 als geeignet angesehene Zahnzwischenraum mesial von Zahn 13 hatte mit 2,85 mm ebenso viel verfügbaren Knochen wie Zahn 46. Somit scheint er ebenso geeignet oder ungeeignet.

Anhand der Panoramadarstellungen der DVTs ist es den Behandlern gelungen, die Zahnzwischenräume mit der größten interradikulären Distanz zu diagnostizieren. Über das absolute Maß des zur Verfügung stehenden Platzes gaben die zweidimensionalen Aufnahmen jedoch keine Auskunft. Darauf, und wie viel Platz für eine sichere Insertion benötigt wird, wird in der Diskussion eingegangen.

Tabelle 10: **Interradikuläre Distanzen der Probandinnen 1 und 2**

Angegeben sind die Werte in mm; gemessen wurde 4,0 mm vom Oberrand des Alveolarkammes.

Zahnzwischenraum	mesial 16	mesial 15	mesial 14	mesial 13	mesial 12	mesial 11
Oberkiefer	3,35	3,05	2,05	2,85	2,05	3,25
Zahnzwischenraum	mesial 46	mesial 45	mesial 44	mesial 43	-	-
Unterkiefer	2,85	3,30	2,10	2,25	-	-

## **5.2 Übersicht über die Implantatpositionen der einzelnen Behandler**

Zunächst werden in Übersichten die ausgewerteten Daten aller Behandler dargestellt (Abbildungen 15-20). Die Darstellung erfolgt dabei für das Mini-Implantat tomas-pin N 08, das als Standardimplantat festgelegt wurde. Für jeden Behandler sind in einer Abbildung die Ergebnisse für den Oberkiefer (Probandin 1) und in einer weiteren die Ergebnisse für den Unterkiefer (Probandin 2) dargestellt. So ergibt sich eine Übersicht über die von den jeweiligen Behandlern erzielten Ergebnisse. Innerhalb der Abbildungen sind links die Daten der intraoralen Versuche an den Probandinnen dargestellt, rechts die Daten am Gipsmodell. Zur besseren Übersicht erfolgte hier zunächst die Einteilung in nur jeweils drei Kategorien. Alle Ergebnisse geben die relative Häufigkeit für jeweils zehn Versuchsreihen an. Die Daten sind Grundlage aller später durchgeführten Vergleiche.

Im Unterkiefer ist ersichtlich, dass die Behandler die Interdentalräume bezüglich ihrer Eignung zur Implantation richtig eingeschätzt haben. In den als ungeeignet erscheinenden Interdentalregionen mesial der Zähne 43 und 44 konnte lediglich ein einziges Implantat (Behandler 2 am Modell) ohne Kontakt platziert werden (Abbildung 18).

Im Oberkiefer ist zu erkennen, dass mesial der Zähne 14 und 12 eine Implantation kaum möglich war. Aber auch in den für geeignet gehaltenen Zwischenräumen mesial von 15 und 16 traten Wurzelkontakte sehr häufig auf. Intraoral erreichte beim Zwischenraum mesial von 15 kein Behandler in der Kategorie „kein Kontakt“ eine größere relative Häufigkeit als 0,20. Sehr häufig konnte Wurzelkontakt in den Zwischenräumen mesial von 13, den nicht alle Behandler als günstig ansahen, und mesial von 11, der aufgrund des bei der Probandin hoch ansetzenden Lippenbändchens klinisch Probleme bereiten würde, vermieden werden.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Anzahl der Wurzelkontakte bei allen drei Behandlern sehr hoch war.

## 5.2.1 Behandler 1

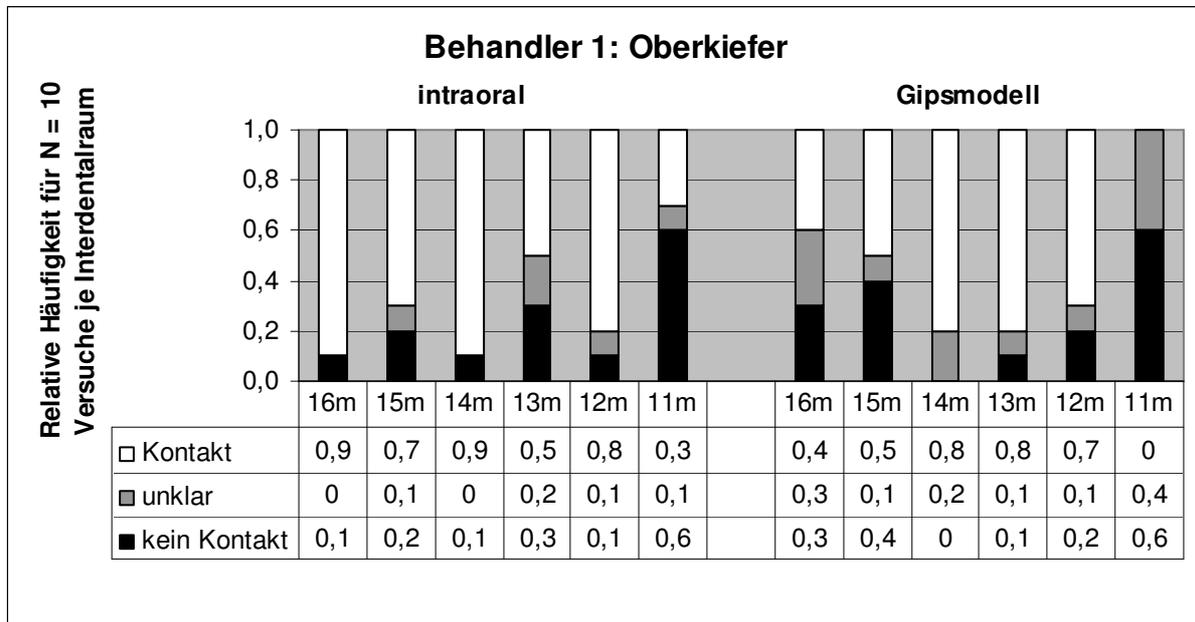


Abbildung 15: **Ergebnisse von Behandler 1 im Oberkiefer**  
nach jeweils zehn Versuchsreihen an Probandin 1 intraoral und am Gipsmodell.  
m = mesial

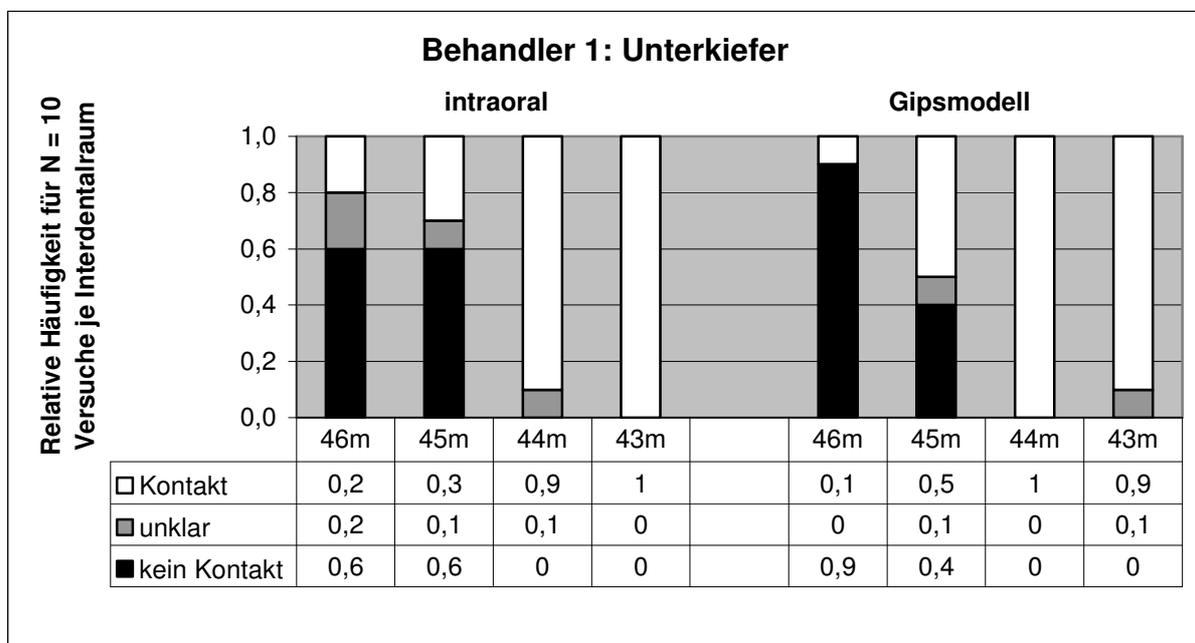


Abbildung 16: **Ergebnisse von Behandler 1 im Unterkiefer**  
nach jeweils zehn Versuchsreihen an Probandin 2 intraoral und am Gipsmodell.  
m = mesial

## 5.2.2 Behandler 2

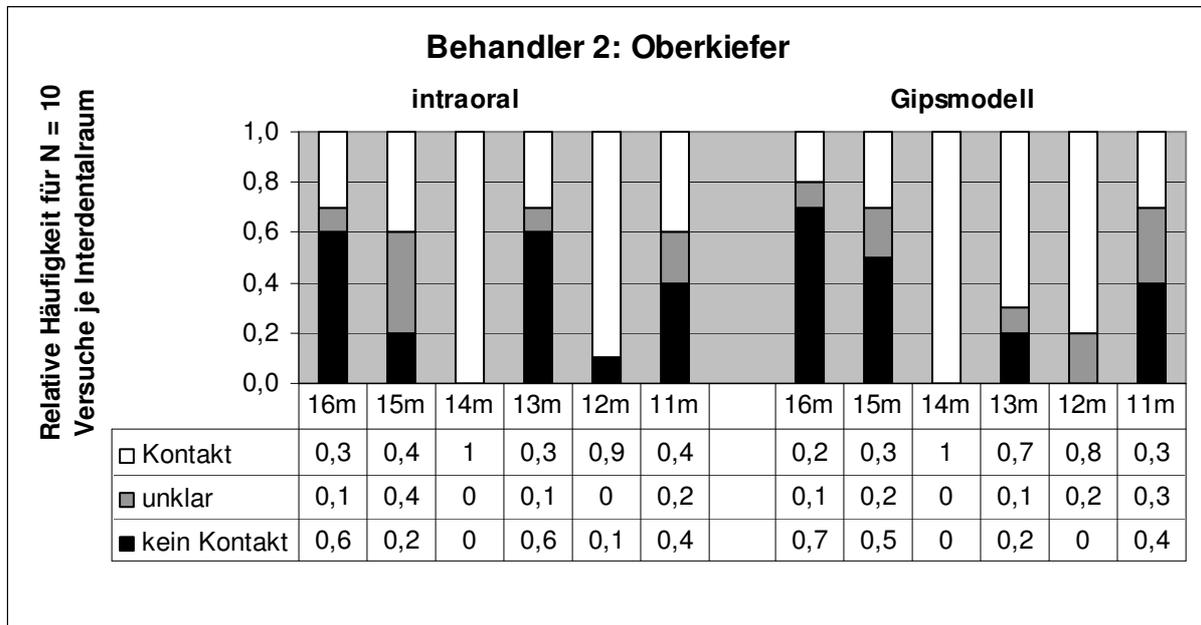


Abbildung 17: **Ergebnisse von Behandler 2 im Oberkiefer**  
nach jeweils zehn Versuchsreihen an Probandin 1 intraoral und am Gipsmodell.  
m = mesial

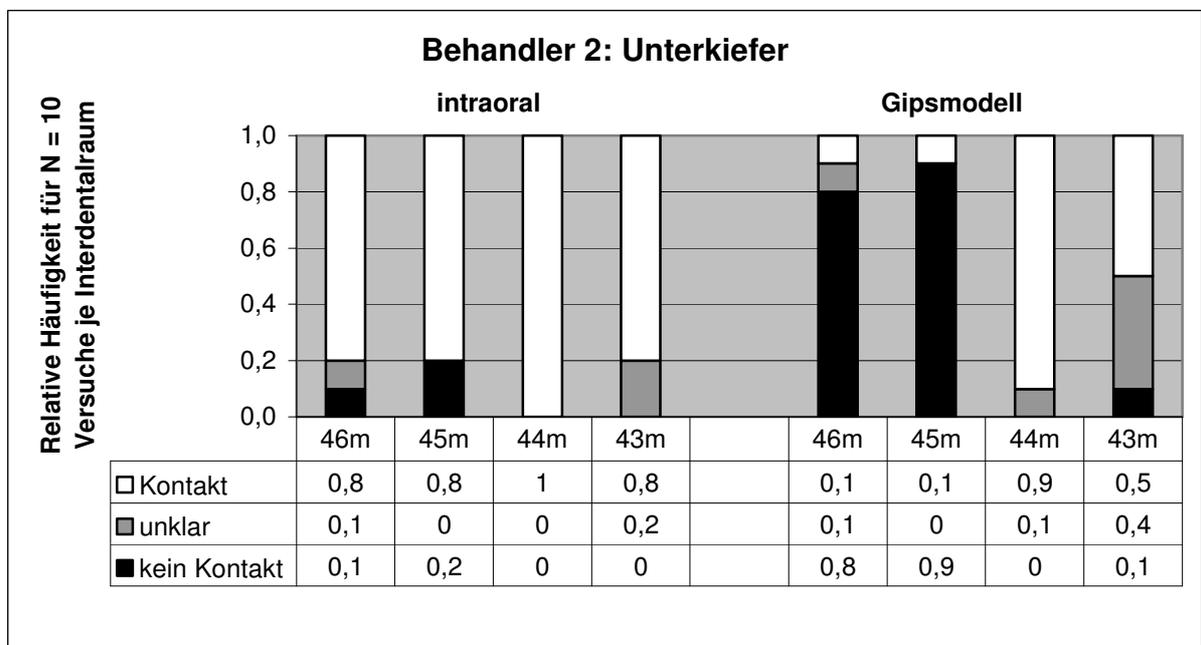


Abbildung 18: **Ergebnisse von Behandler 2 im Unterkiefer**  
nach jeweils zehn Versuchsreihen an Probandin 2 intraoral und am Gipsmodell.  
m = mesial

## 5.2.3 Behandler 3

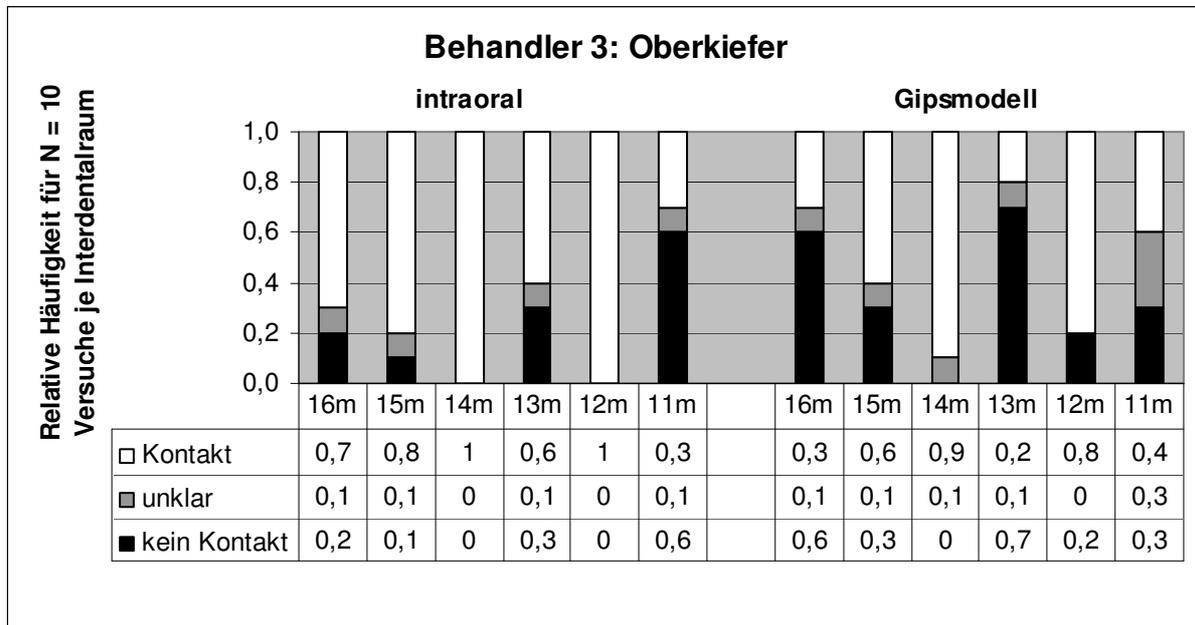


Abbildung 19: **Ergebnisse von Behandler 3 im Oberkiefer**  
nach jeweils zehn Versuchsreihen an Probandin 1 intraoral und am Gipsmodell.  
m = mesial

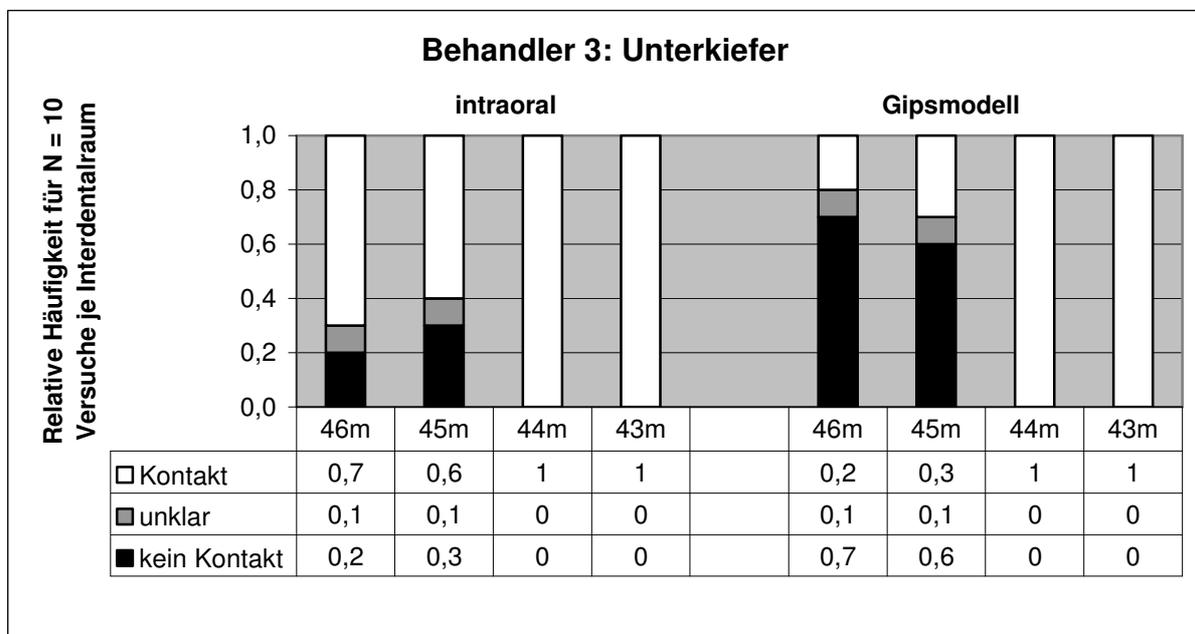


Abbildung 20: **Ergebnisse von Behandler 3 im Unterkiefer**  
nach jeweils zehn Versuchsreihen an Probandin 2 intraoral und am Gipsmodell.  
m = mesial

### **5.3 Vergleich der Ergebnisse an den zur Insertion geeigneten Zahnzwischenräumen zwischen intraoral und dem Modell**

Der Vergleich der Ergebnisse zwischen den intraoralen Versuchen und denen am Modell war eine der Hauptfragestellungen der Untersuchung. Es wurden dafür ausschließlich die Zahnzwischenräume verglichen, die von allen Behandlern als geeignet angesehen wurden (siehe Tabelle 5). Die Einteilung der Ergebnisse erfolgte nach den fünf in Tabelle 6 beschriebenen Kategorien, da bei einem möglichen Wurzelkontakt auch dessen Ausmaß von Interesse war.

#### **5.3.1 Ergebnisse der einzelnen Behandler je Kiefer**

##### *5.3.1.1 Oberkiefer (Probandin 1)*

Im Oberkiefer wurden die Zahnzwischenräume mesial der Zähne 15 und 16 für die Auswertung herangezogen. Beide Zwischenräume wurden zusammengefasst (Abbildungen 21-23), so dass sich die relative Häufigkeit auf jeweils 20 Versuche bezieht.

Unabhängig von der Größe der relativen Häufigkeit wurde von allen Behandlern „kein Kontakt“ am Modell häufiger erreicht als intraoral. Am häufigsten sowohl am Modell als auch intraoral erreichte Behandler 2 die Kategorie „kein Kontakt“ (Abbildung 22). Die größte Differenz für „kein Kontakt“ zwischen intraoral und Modell ergab sich bei Behandler 3 mit einer relativen Häufigkeit von 0,30 (Abbildung 23).

Die Anzahl der Wurzelkontakte war am Modell geringer als an der Probandin. Bei Behandler 1 waren in allen drei Kategorien für Wurzelkontakt („geringer Kontakt“, „großer Kontakt“ und „Pulpakontakt“) die relativen Häufigkeiten am Modell kleiner als intraoral (Abbildung 21). Auch bei Behandler 3 waren die relativen Häufigkeiten für „großer Kontakt“ und „Pulpakontakt“ am Modell kleiner als intraoral (Abbildung 23). Bei Behandler 2 trat „großer Kontakt“ und „Pulpakontakt“ insgesamt nur jeweils einmal auf, der einzige „Pulpakontakt“ allerdings am Modell. „Geringer Kontakt“ trat auch bei Behandler 2 am Modell seltener auf als an der Probandin (Abbildung 22).

„Pulpakontakt“ trat bei Behandler 3 am Modell nicht auf, bei den Behandlern 1 und 2 je einmal. Intraoral dagegen war die Pulpakontakthäufigkeit bei den Behandlern 1 (Abbildung 21) und 3 (Abbildung 23) mit 0,25 extrem hoch, wobei sie bei Behandler 1 ausschließlich mesial von Zahn 16, bei Behandler 3 ausschließlich mesial von Zahn 15 auftrat. Behandler 2 hatte an der Probandin keinen „Pulpakontakt“ (Abbildung 22).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass im Oberkiefer (Probandin 1) alle drei Behandler die Mini-Implantate am Gipsmodell erfolgreicher platzierten als intraoral.

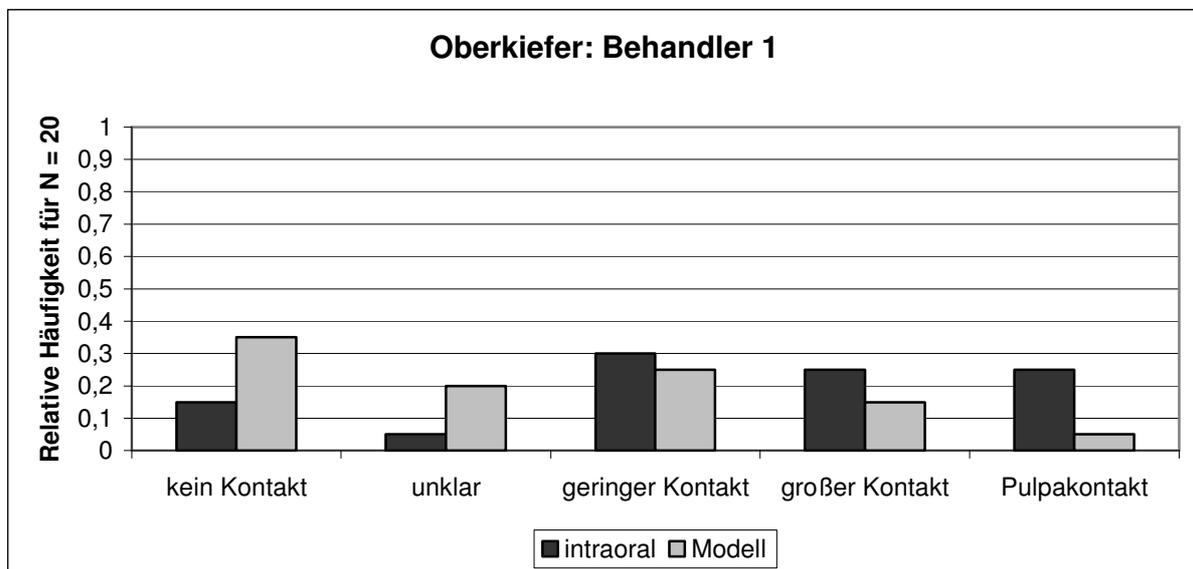


Abbildung 21: **Ergebnisse der Versuche für Behandler 1 im Oberkiefer**

Vergleich zwischen Modell und intraoral für die Zahnzwischenräume mesial der Zähne 15 und 16 zusammengefasst.

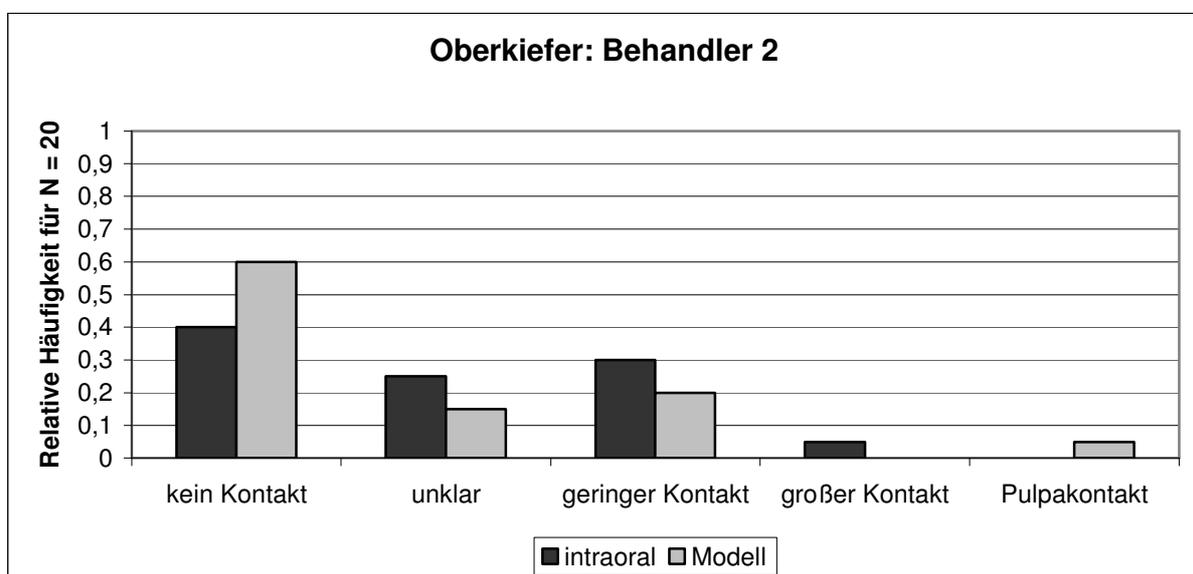


Abbildung 22: **Ergebnisse der Versuche für Behandler 2 im Oberkiefer**

Vergleich zwischen Modell und intraoral für die Zahnzwischenräume mesial der Zähne 15 und 16 zusammengefasst.

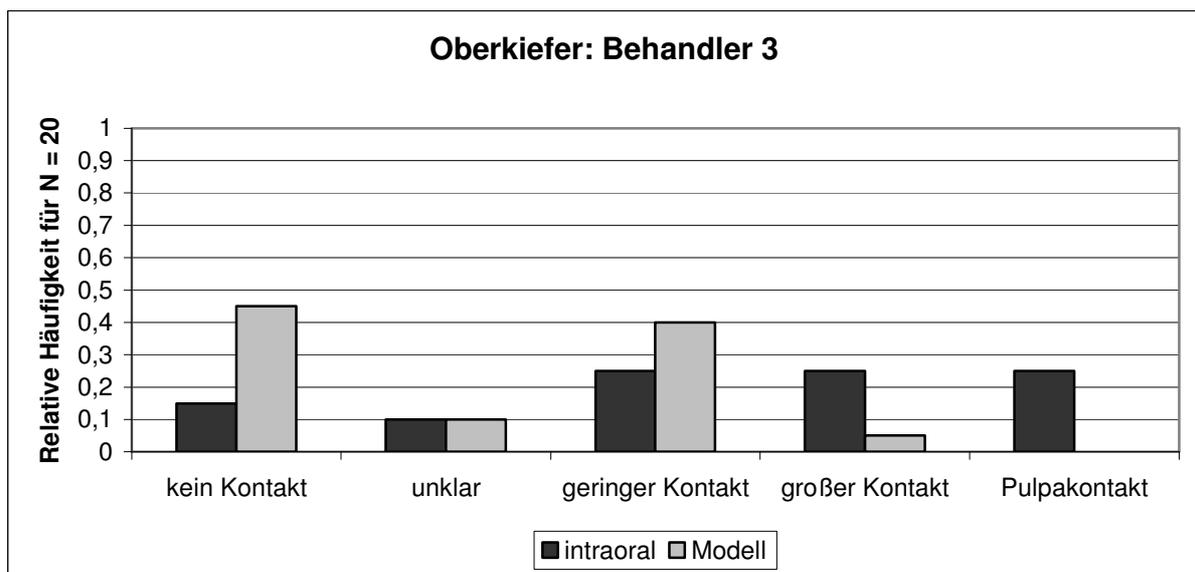


Abbildung 23: **Ergebnisse der Versuche für Behandler 3 im Oberkiefer**

Vergleich zwischen Modell und intraoral für die Zahnzwischenräume mesial der Zähne 15 und 16 zusammengefasst.

### 5.3.1.2 Unterkiefer (Probandin 2)

Im Unterkiefer wurden die Zahnzwischenräume mesial der Zähne 45 und 46 von allen Behandlern für geeignet gehalten und daher für die Auswertung herangezogen. Beide Zwischenräume sind wie im Oberkiefer in den Abbildungen 24-26 zusammengefasst, so dass sich die relative Häufigkeit auf jeweils 20 Versuche bezieht.

Die Ergebnisse im Unterkiefer ergaben zwischen den Behandlern deutliche Unterschiede. Bei Behandler 1 waren die Ergebnisse an Probandin und Modell nahezu identisch (Abbildung 24). Dabei fällt auf, dass die relativen Häufigkeiten für „kein Kontakt“ sowohl intraoral als auch am Modell mit 0,60 beziehungsweise 0,65 vergleichsweise groß waren und auch die Wurzelkontakte ausschließlich in der Kategorie „geringer Kontakt“ auftraten. Bei den Behandlern 2 und 3 waren die Unterschiede zwischen den intraoralen Ergebnissen und denen am Modell stark ausgeprägt, am deutlichsten bei Behandler 2 (Abbildung 25). Dort ergab sich eine relative Häufigkeit für „kein Kontakt“ am Modell von 0,85, während von ihm an der Probandin intraoral nur eine relative Häufigkeit von 0,15 erreicht wurde. Entsprechend wirkte sich dies auf die Wurzelkontakte aus, wo am Modell ausschließlich „geringer Kontakt“ auftrat, intraoral aber alle Kategorien bis zum „Pulpakontakt“. Die Ergebnisse von Behandler 3 (Abbildung 26) waren mit denen von Behandler 2 vergleichbar, jedoch, was die Unterschiede zwischen Modell und intraoral anbelangt, weniger stark ausgeprägt. Der Unterschied bei „kein Kontakt“ ergab eine Differenz in der relativen Häufigkeit von 0,40 und war somit ebenfalls sehr deutlich. Die Wurzelkontakte am Modell waren auf die Kategorie „geringer Kontakt“ beschränkt, während sie intraoral in allen Kategorien vorkamen. Am Modell konnte bei keinem der Behandler ein „Pulpakontakt“ festgestellt werden, während er bei Behandler 2 und Behandler 3 intraoral mit einer relativen Häufigkeit von 0,15 beziehungsweise 0,20 auftrat.

Insgesamt zeigte sich, dass im Unterkiefer (Probandin 2) zwei der drei Behandler die Mini-Implantate am Modell erfolgreicher platzierten als intraoral. Bei einem Behandler ergaben sich keine Unterschiede.

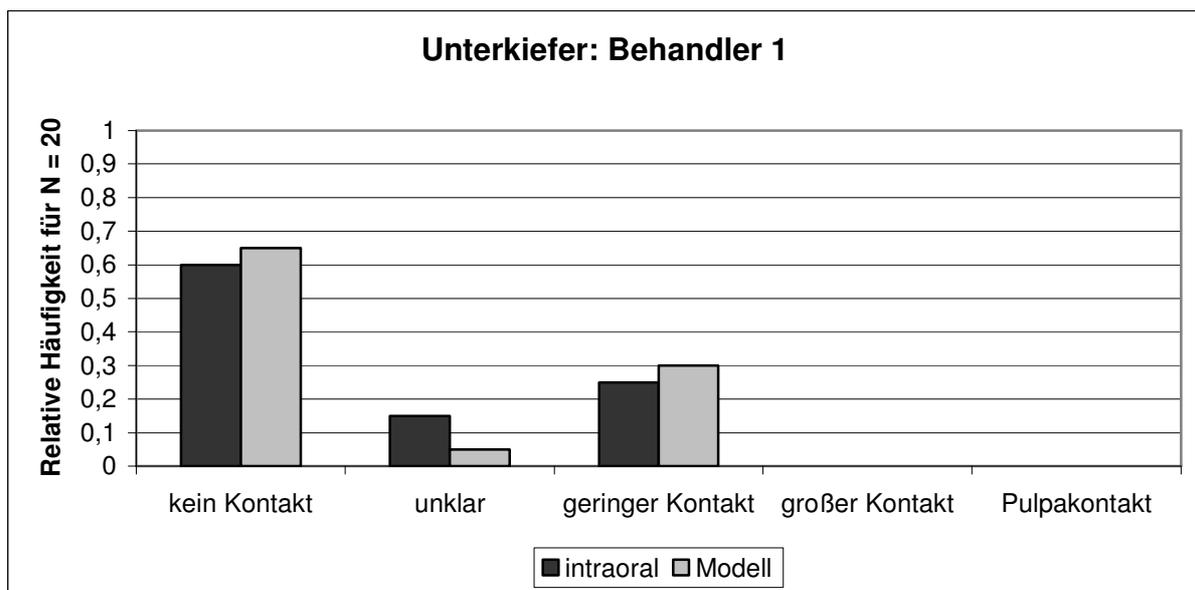


Abbildung 24: **Ergebnisse der Versuche für Behandler 1 im Unterkiefer**

Vergleich zwischen Modell und intraoral für die Zahnzwischenräume mesial der Zähne 45 und 46 zusammengefasst.

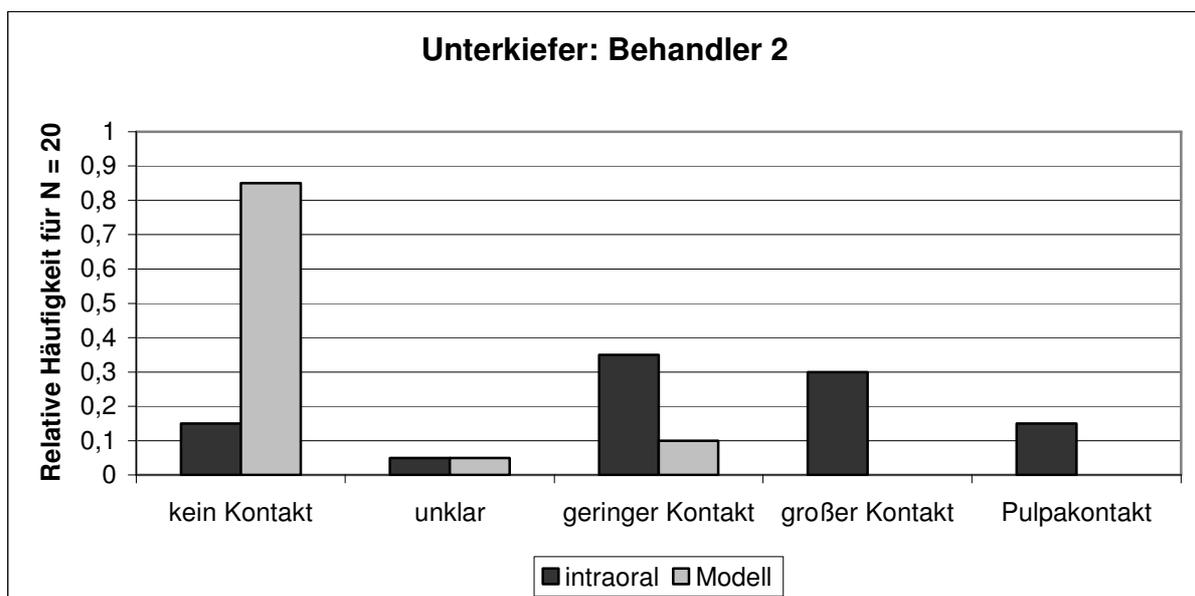


Abbildung 25: **Ergebnisse der Versuche für Behandler 2 im Unterkiefer**

Vergleich zwischen Modell und intraoral für die Zahnzwischenräume mesial der Zähne 45 und 46 zusammengefasst.

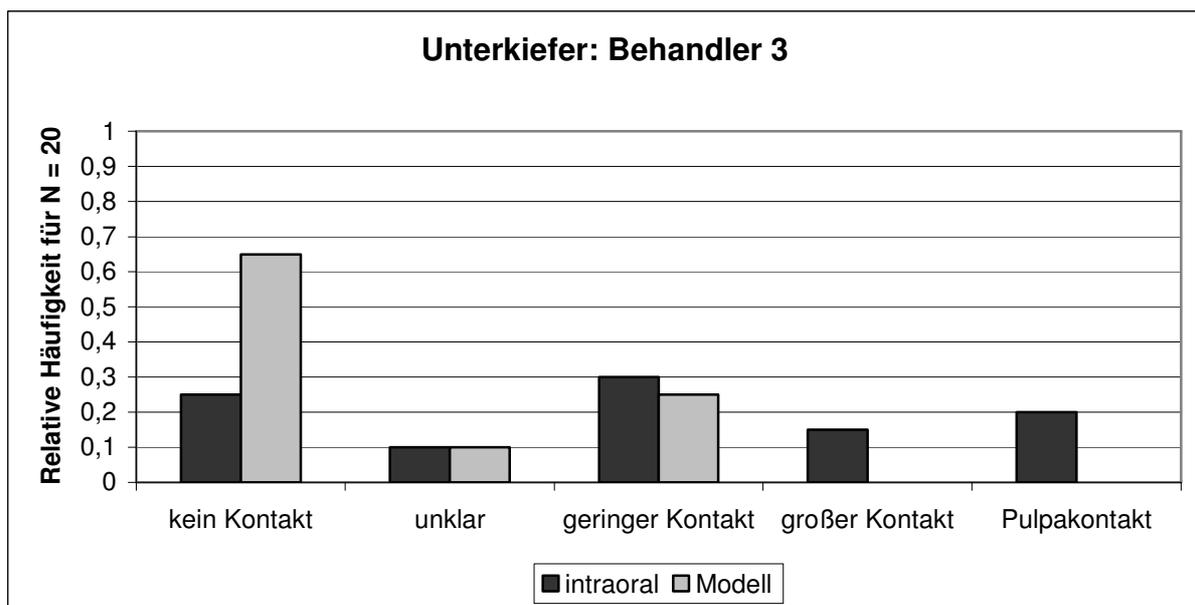


Abbildung 26: **Ergebnisse der Versuche für Behandler 3 im Unterkiefer**

Vergleich zwischen Modell und intraoral für die Zahnzwischenräume mesial der Zähne 45 und 46 zusammengefasst.

### 5.3.2 Gesamtübersicht

Für eine Gesamtübersicht wurden die Daten aller drei Behandler für die vier Interproximalräume aus Tabelle 5 herangezogen. So ergaben sich relative Häufigkeiten auf der Basis von 120 Versuchen (Abbildung 27). Zur besseren Übersicht, und da in der Untersuchung die Vermeidung von Wurzelkontakten im Focus stand, sind jeweils nur die Ergebnisse dargestellt, bei denen ein Wurzelkontakt vermieden werden konnte.

Nach Zusammenführung aller Ergebnisse ergibt sich eine eindeutige Darstellung. Die relative Häufigkeit für „kein Wurzelkontakt“ war am Modell mit 0,58 mehr als doppelt so groß wie intraoral (0,28). Somit lässt sich zusammenfassend feststellen, ohne hierbei auf die unterschiedliche Behandlererfahrung einzugehen, dass die optimale Positionierung eines Mini-Implantates zum Vermeiden von Wurzelkontakten unter den hier vorliegenden Bedingungen auf einem Modell einfacher erscheint als intraoral.

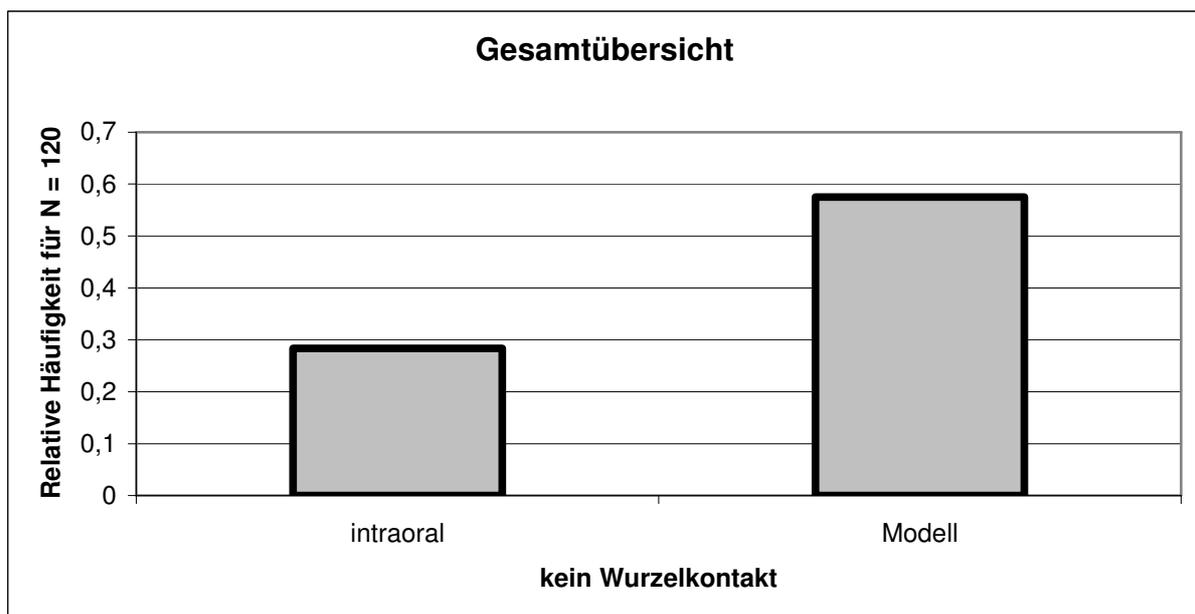


Abbildung 27: **Gesamtübersicht „kein Wurzelkontakt“ für alle Behandler**

Intraoral im Vergleich zum Modell. Die Versuche aller Behandler an beiden Probandinnen wurden zusammengefasst.

## 5.4 Vergleich zwischen den Behandlern

Die Versuche wurden von Behandlern mit jeweils unterschiedlichem Erfahrungsschatz in Bezug auf Mini-Implantatinsertionen durchgeführt. Da sich auch ein Aufschluss darüber ergeben sollte, welche Rolle die Erfahrung des jeweiligen Behandlers spielt, wurden die Ergebnisse daraufhin miteinander verglichen. Zur besseren Übersicht wird dabei ausschließlich nach „kein Kontakt“ und „Wurzelkontakt“ unterschieden. Die Werte der Kategorie „unklar“ wurden in den Darstellungen ausgenommen. Die Ergebnisse beziehen sich auf die gleichen Zahnzwischenräume wie in Kapitel 5.3. Die angegebenen relativen Häufigkeiten basieren auf jeweils 20 Versuchen.

### 5.4.1 Oberkiefer (Proband 1), intraoral

Betrachtet man die Ergebnisse für den Oberkiefer intraoral, zeigten sich dort für die Behandler 1 und 3 jeweils hohe Quoten an Wurzelkontakten (Abbildung 28). Die relative Häufigkeit von „kein Kontakt“ war bei Behandler 1 und 3 mit 0,15 identisch, die für „Wurzelkontakt“ mit 0,80 bzw. 0,75 vergleichbar. Behandler 2 dagegen konnte mehr als doppelt so oft einen Wurzelkontakt verhindern und hatte nur halb so viele Wurzelkontakte. Somit ergaben sich für den Behandler mit der geringsten Erfahrung (Behandler 3) und den Behandler mit der größten Erfahrung (Behandler 1) bei den intraoralen Versuchen im Oberkiefer nahezu identische Ergebnisse.

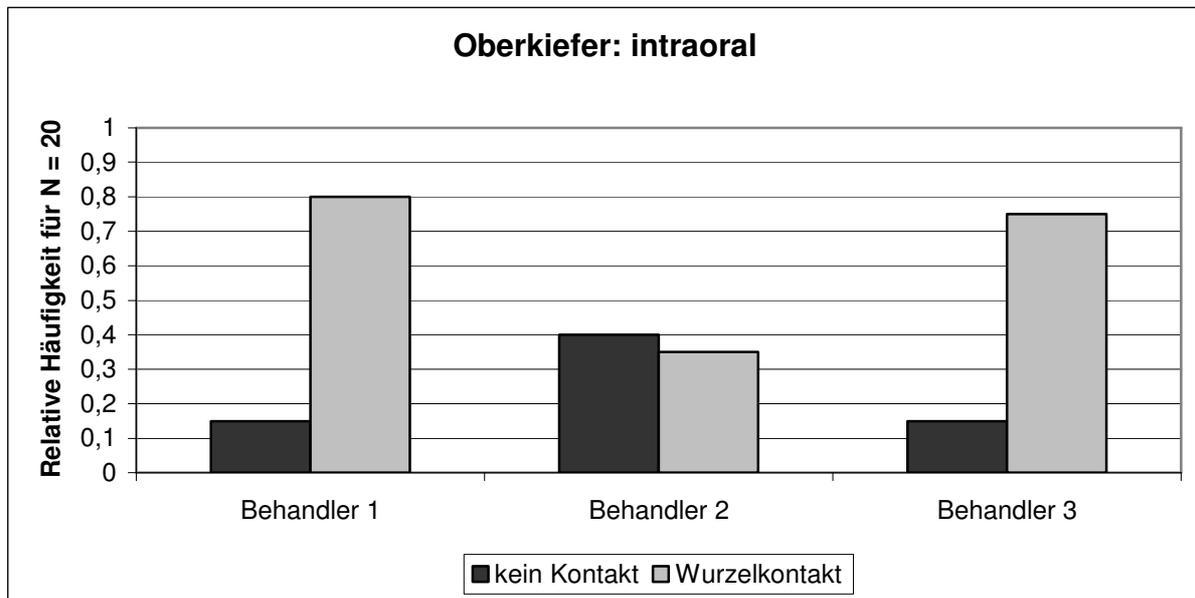


Abbildung 28: **Vergleich zwischen den verschiedenen Behandlern im Oberkiefer intraoral**

Die Kategorie „unklar“ ist nicht dargestellt. Die Ergebnisse beziehen sich auf die Zahnzwischenräume mesial der Zähne 15 und 16.

### 5.4.2 Oberkiefermodell

Auch am Gipsmodell des Oberkiefers (von Probandin 1) waren die Ergebnisse von Behandler 2 erfolgreicher als bei den anderen beiden Behandlern (Abbildung 29). Er erreichte „kein Kontakt“ mit einer relativen Häufigkeit von 0,60, während dies den Behandlern 1 und 3 nur jeweils mit 0,35 gelang. Bei den Wurzelkontakten war die relative Häufigkeit von Behandler 1 mit 0,45 geringer als bei Behandler 3 mit 0,55. Bei Behandler 2 betrug sie 0,25. Die in Tabelle 4 aufgeführte Behandlererfahrung in Bezug auf Mini-Implantatinsertionen fand somit keinen Niederschlag in der Häufigkeit, mit der am Oberkiefermodell Wurzelkontakte vermieden wurden. Behandler 2, dessen Erfahrungsschatz zwischen denen von Behandler 1 und 3 einzuschätzen ist, wies die besten Ergebnisse auf. Bei Behandler 1 und 3, das heißt dem Behandler mit der größten und dem Behandler mit der geringsten Erfahrung, ergaben sich nur geringe Unterschiede. Jedoch konnte von Behandler 1 häufiger ein Wurzelkontakt vermieden werden.

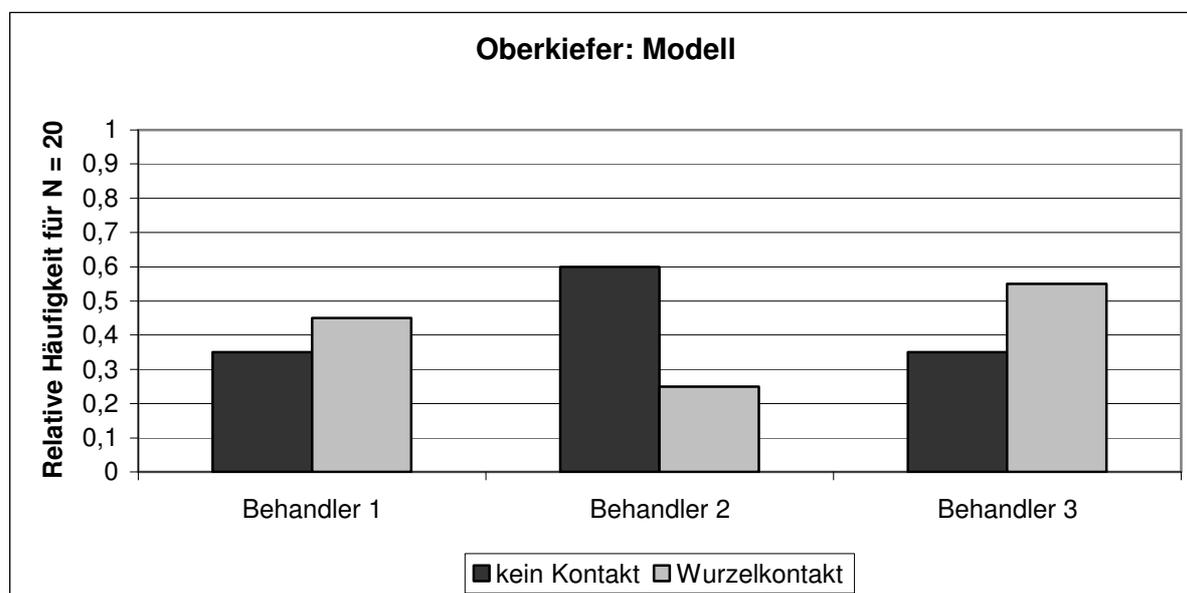


Abbildung 29: **Vergleich zwischen den verschiedenen Behandlern am Oberkiefermodell**

Die Kategorie „unklar“ ist nicht dargestellt. Die Ergebnisse beziehen sich auf die Zahnzwischenräume mesial der Zähne 15 und 16.

### 5.4.3 Unterkiefer (Probandin 2), intraoral

Im Unterkiefer wichen die Ergebnisse der intraoralen Versuche von Behandler 1 stark von den anderen Behandlern ab (Abbildung 30). Während Behandler 1 mit einer relativen Häufigkeit von 0,60 „kein Kontakt“ erreichte und „Wurzelkontakt“ nur bei 0,25 auftrat, war das Verhältnis bei den beiden anderen Behandlern nahezu umgekehrt. „Wurzelkontakt“ trat bei ihnen mit einer relativen Häufigkeit von mehr als 0,60 auf (0,80 bei Behandler 2 und 0,65 bei Behandler 3).

Behandler 1, der Behandler mit der größten Erfahrung, wies hier die besten Ergebnisse auf. Dennoch ist auch hier keine Abhängigkeit von der Erfahrung erkennbar. Denn obwohl Behandler 3 die geringste Erfahrung aufweist, erreichte er häufiger „kein Kontakt“ und trat seltener „Wurzelkontakt“ auf als bei Behandler 2, der bereits mehr als 100 Insertionen durchgeführt hat.

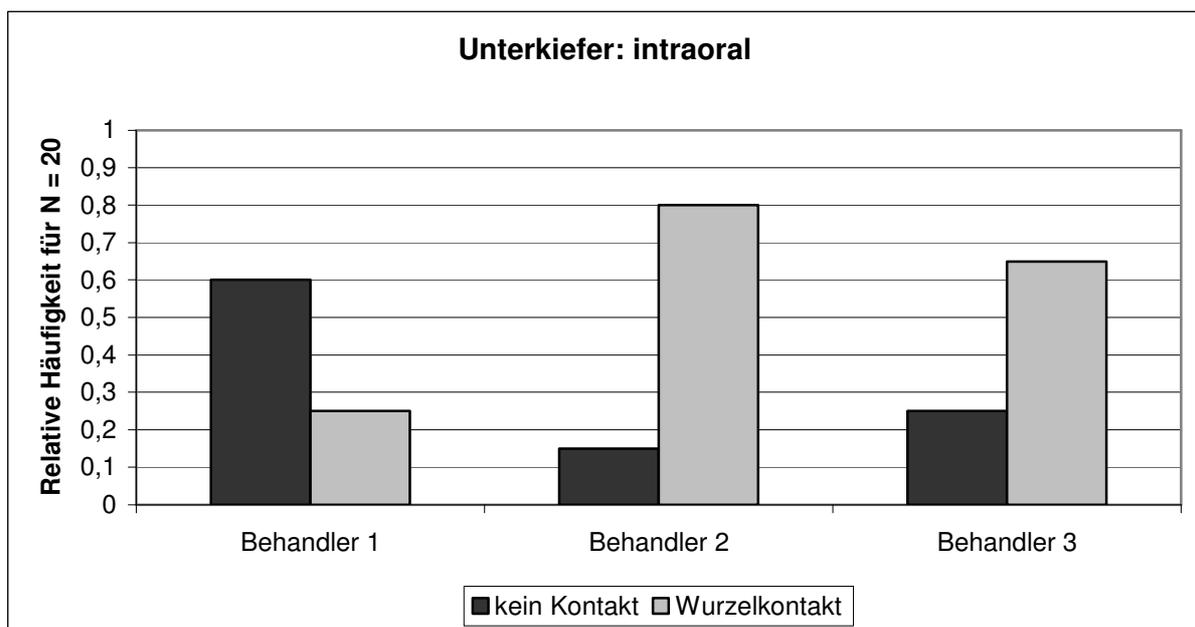


Abbildung 30: Vergleich zwischen den verschiedenen Behandlern im Unterkiefer intraoral

Die Kategorie „unklar“ ist nicht dargestellt. Die Ergebnisse beziehen sich auf die Zahnzwischenräume mesial der Zähne 45 und 46.

#### 5.4.4 Unterkiefermodell

Am Gipsmodell des Unterkiefers (Probandin 2) erreichten alle Behandler für „kein Kontakt“ eine relative Häufigkeit von mindestens 0,65 (Behandler 1 und 3), Behandler 2 gar 0,85 (Abbildung 31). Dabei wurde von Behandler 1 für den Zwischenraum mesial von Zahn 46 und von Behandler 2 mesial von Zahn 45 mit einer relativen Häufigkeit von 0,90 „Wurzelkontakt“ klar vermieden (Abbildungen 16 und 18). „Wurzelkontakt“ trat insgesamt sehr wenig auf. Von Behandler 2 wurde er mit einer relativen Häufigkeit von 0,10 am seltensten verursacht, bei den Behandlern 1 und 3 trat er etwas häufiger auf (Behandler 1 mit einer relativen Häufigkeit von 0,30, Behandler 3 mit einer relativen Häufigkeit von 0,25).

Intraoral wiesen die Behandler 1 und 3 am Unterkiefermodell vergleichbare Ergebnisse auf. Somit war auch hier kein Zusammenhang zwischen den Ergebnissen und der Behandlererfahrung erkennbar.

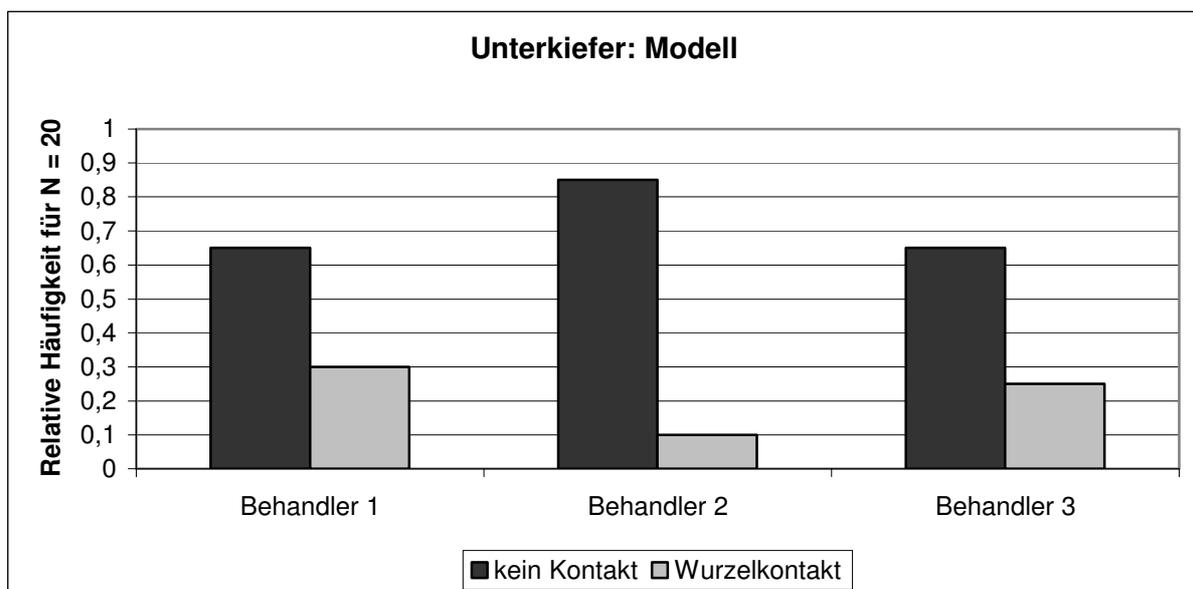


Abbildung 31: Vergleich zwischen den verschiedenen Behandlern am Unterkiefermodell

Die Kategorie „unklar“ ist nicht dargestellt. Die Ergebnisse beziehen sich auf die Zahnzwischenräume mesial der Zähne 45 und 46.

#### 5.4.5 Oberkiefer (Probandin 1) und Unterkiefer (Probandin 2) gemeinsam

Nachdem zunächst ein Vergleich zwischen den Behandlern an allen vier Untersuchungsobjekten einzeln vorgenommen wurde (Oberkiefermodell, Oberkiefer intraoral, Unterkiefermodell, Unterkiefer intraoral), sollte noch der Unterschied zwischen Modell und intraoral als Gesamtes herausgestellt werden. Daher wurden jeweils beide Modelle und beide intraoralen Versuchsreihen zusammengefasst. Herangezogen wurden wiederum die vier Interproximalräume aus Tabelle 5, so dass sich die relativen Häufigkeiten auf der Basis von 40 Versuchen ergaben. Zur besseren Übersicht sind jeweils nur die Ergebnisse dargestellt, bei denen ein Wurzelkontakt vermieden werden konnte.

Es ist erkennbar, dass alle drei Behandler am Modell häufiger einen Wurzelkontakt verhindern konnten als bei den intraoralen Versuchen. Eine Abhängigkeit von der Behandlererfahrung ist für die Ergebnisse am Modell nicht erkennbar, da der Behandler mit der größten Erfahrung (Behandler 1) mit einer relativen Häufigkeit von 0,50 für „kein Wurzelkontakt“ identische Ergebnisse aufweist wie der Behandler mit der geringsten Erfahrung (Behandler 3). Am häufigsten konnte ein Wurzelkontakt von Behandler 2 verhindert werden.

Die Ergebnisse der intraoralen Versuche lassen eine Abhängigkeit von der in Tabelle 4 angegebenen Behandlererfahrung vermuten, denn dort ist ein Zusammenhang deutlich erkennbar. Parallel zur abnehmenden Erfahrung der Behandler sank die relative Häufigkeit für „kein Wurzelkontakt“. Bei Behandler 1, dem Behandler mit den meisten Mini-Implantatinsertionen im Vorfeld, betrug sie 0,38, für Behandler 2, der ebenfalls bereits über 100 Insertionen selbst durchgeführt hatte, betrug sie 0,28, während Behandler 3, bislang noch ohne Insertion, nur eine relative Häufigkeit von 0,20 erreichte. Bei Behandler 1 war weiterhin der Unterschied zwischen intraoral und Modell am geringsten ausgeprägt.

Die Gesamtübersicht lässt erkennen, dass in der hier durchgeführten Pilotstudie bei der intraoralen Platzierung der Mini-Implantate die klinische Erfahrung der Behandler von größerer Bedeutung war als bei einer Positionierung am Modell.

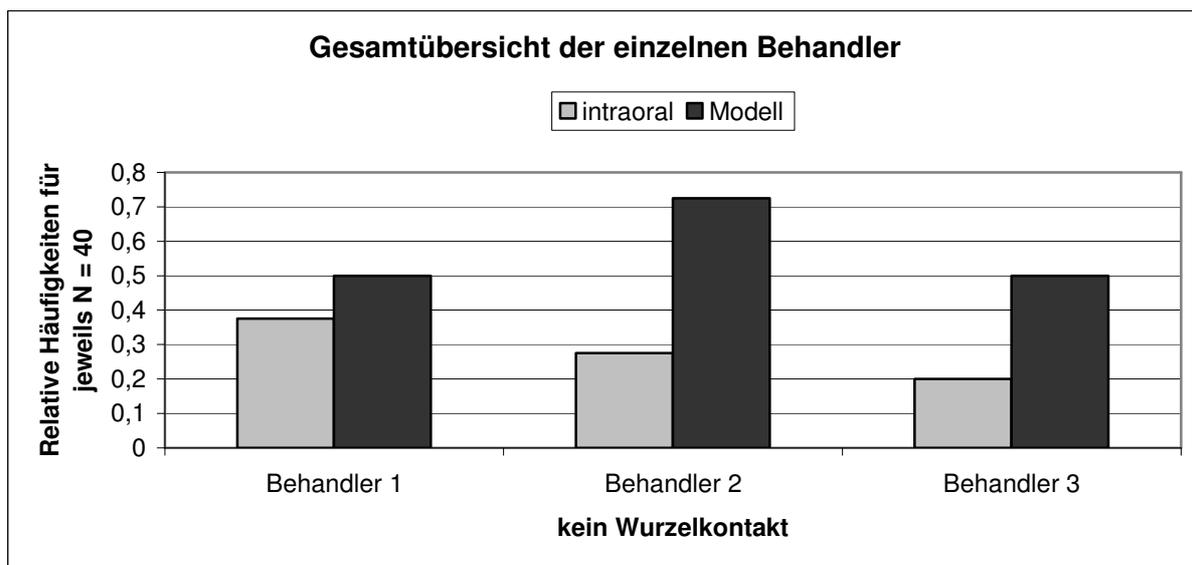


Abbildung 32: **Gesamtübersicht „kein Wurzelkontakt“ für die einzelnen Behandler**

Die Ergebnisse beziehen sich auf die Versuche an den Zahnzwischenräumen mesial der Zähne 15 und 16 sowie 45 und 46.

#### 5.4.6 Zahnzwischenräume mesial von 11 und 13

Die Zwischenräume mesial der Zähne 11 und 13 wurden aus unterschiedlichen Gründen von der bisherigen Auswertung ausgeschlossen. Zwischen Zahn 11 und 21 erschien röntgenologisch ausreichend Platz, um dort ein Mini-Implantat zu inserieren. Jedoch imponierte klinisch ein sehr ausgeprägtes, hoch ansetzendes Lippenbändchen, so dass sich daraufhin alle Behandler gegen eine Insertion an dieser Stelle ausgesprochen haben. Mesial von Zahn 13 hielt Behandler 1 die Insertion eines Mini-Implantates für möglich, die Behandler 2 und 3 beurteilten diesen Zahnzwischenraum als weniger geeignet. Somit gehörte er nicht zu den Zwischenräumen, die alle Behandler als geeignet ansahen. Dennoch ergaben die Versuche dort interessante Ergebnisse.

Mesial von Zahn 11 erreichten die Behandler 1 und 3 intraoral identische Ergebnisse (Abbildung 33). „Kein Kontakt“ wurde mit einer relativen Häufigkeit von 0,60 erreicht. Bei Behandler 2 war sie mit 0,40 geringer. Somit lag kein Zusammenhang zwischen Behandlererfahrung und der Verhinderung von Wurzelkontakten vor. Am Modell wurde dagegen eine Abhängigkeit von der Erfahrung der Behandler deutlich. Erwähnenswert ist, dass Behandler 1 dabei keinen einzigen eindeutigen „Wurzelkontakt“ aufwies. Während sich für die Behandler 1 und 2 intraoral vergleichbare Ergebnisse ergaben wie am Modell, wurden bei Behandler 3 am Modell mehr Wurzelkontakte gefunden als intraoral. Im Gegensatz zu den vier Zahnzwischenräumen die alle Behandler für zur Insertion geeignet fanden, und der Darstellung in Kapitel 5.4.5, war eine mögliche Abhängigkeit von der Behandlererfahrung mesial von Zahn 11 nicht intraoral sondern am Modell erkennbar.

Mesial von Zahn 13 konnte Behandler 2 mit einer relativen Häufigkeit von 0,60 intraoral doppelt so oft einen Wurzelkontakt vermeiden wie die Behandler 1 und 3 mit jeweils 0,30 (Abbildung 34). Am Modell erreichte mesial von Zahn 13 Behandler 3 mit einer relativen Häufigkeit von 0,70 „kein Kontakt“ die besten Ergebnisse. Den erfahrenen Behandlern 1 und 2 gelang dies dagegen nur mit einer relativen Häufigkeit von 0,10 und 0,20. Behandler 1, der diesen Zwischenraum als einziger für geeignet befand, wies mit einer relativen Häufigkeit von 0,80 die meisten Wurzelkontakte auf. Eine Abhängigkeit von der Behandlererfahrung war somit mesial von 13 weder intraoral noch am Modell erkennbar.

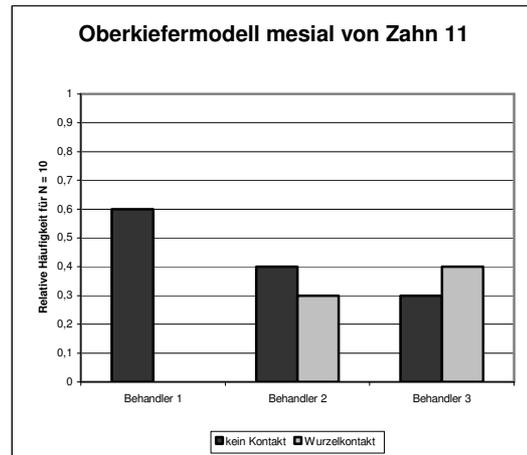
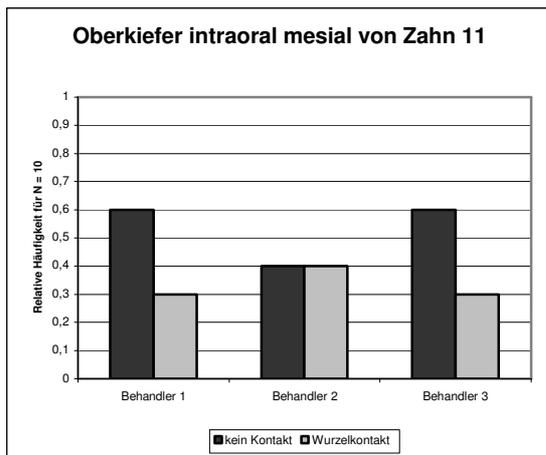


Abbildung 33: Behandlervergleich am Zwischenraum mesial von Zahn 11

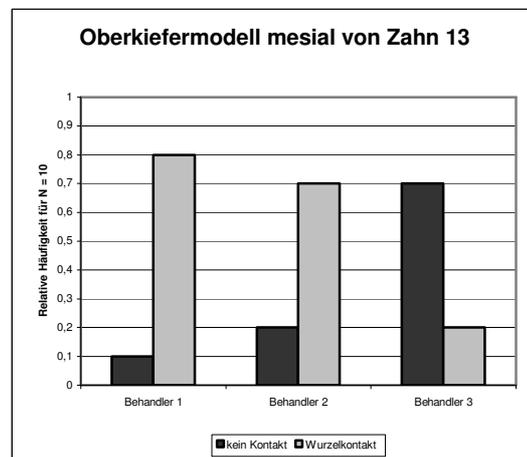
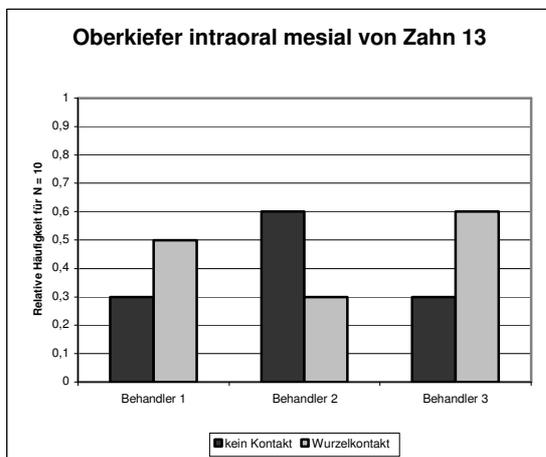


Abbildung 34: Behandlervergleich am Zwischenraum mesial von Zahn 13

## 5.5 Vergleich zwischen Ober- und Unterkiefer

Die Ergebnisse von Ober- und Unterkiefer wurden miteinander verglichen, da Wurzelschädigungen laut einer Studie von BORAH und ASHMEAD [11] im Unterkiefer dreimal häufiger festgestellt wurden als im Oberkiefer. Für die vorliegende Arbeit bedeutet dies, dass die Ergebnisse an Probandin 1 (Oberkiefer) mit denen an Probandin 2 (Unterkiefer) verglichen wurden. In den Abbildungen sind jeweils die Versuche aller Behandler an den in jedem Kiefer untersuchten Zwischenräumen (mesial der Zähne 15 und 16 für den Oberkiefer und mesial der Zähne 45 und 46 für den Unterkiefer) zusammengefasst, so dass die relative Häufigkeit auf je 60 Versuchen basiert.

Intraoral unterschieden sich die Ergebnisse zwischen Ober- und Unterkiefer kaum (). Im Oberkiefer war die relative Häufigkeit für „kein Kontakt“ mit 0,23 zwar niedrig, aber im Unterkiefer war sie mit 0,33 ebenfalls gering. Am Modell traten dagegen größere Unterschiede zwischen den beiden Kiefern auf (Abbildung 36), wobei im Oberkiefer seltener ein Wurzelkontakt verhindert werden konnte als im Unterkiefer. Mit einer relativen Häufigkeit von 0,71 für „kein Kontakt“ lag diese im Unterkiefer um 0,28 höher als im Oberkiefer (0,43).

Somit konnte die These, dass sich im Unterkiefer häufiger Wurzelkontakte ereignen als im Oberkiefer, anhand der hier vorliegenden Ergebnisse nicht bestätigt werden. Sowohl am Modell als auch intraoral ergab sich seltener „Wurzelkontakt“ für den Unterkiefer, wobei die Unterschiede intraoral gering ausfielen.

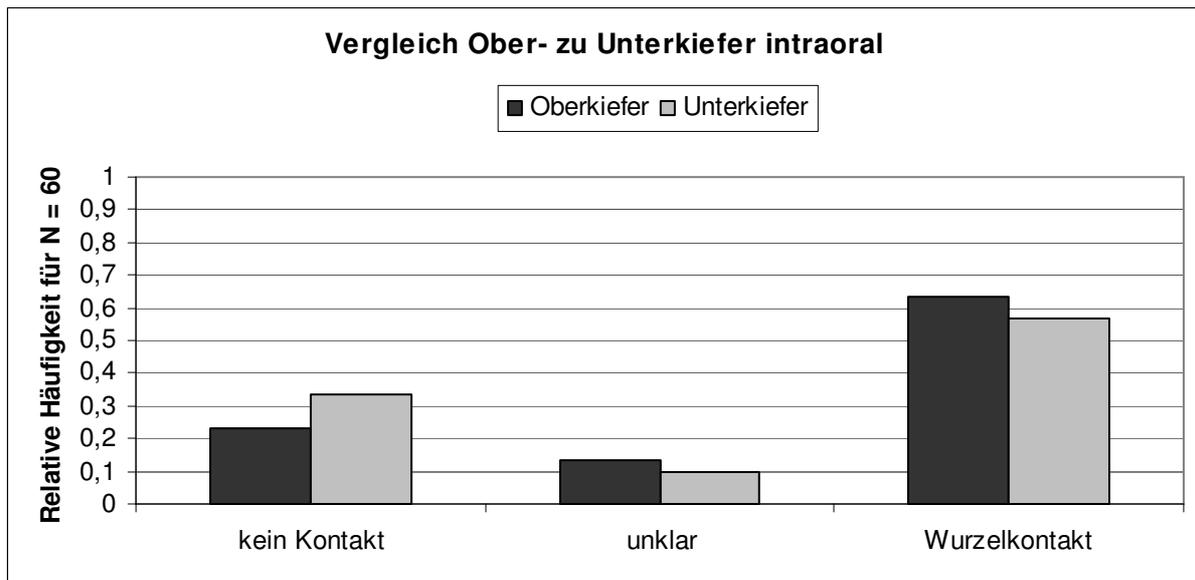


Abbildung 35: **Vergleich aller Behandler zwischen Oberkiefer und Unterkiefer intraoral**

Dargestellt sind die zusammengefassten Ergebnisse aller Behandler für die Zahnzwischenräume mesial von 15 und 16 für den Oberkiefer sowie 45 und 46 für den Unterkiefer.

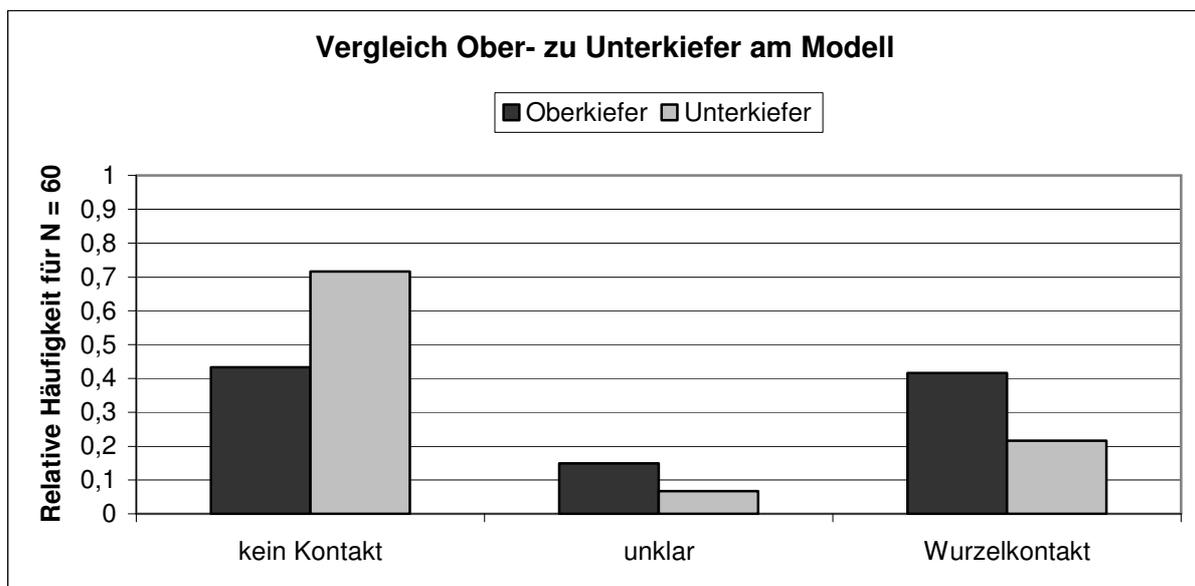


Abbildung 36: **Vergleich aller Behandler zwischen Oberkiefer und Unterkiefer am Modell**

Dargestellt sind die zusammengefassten Ergebnisse aller Behandler für die Zahnzwischenräume mesial von 15 und 16 für den Oberkiefer sowie 45 und 46 für den Unterkiefer.

## 5.6 Vergleich zwischen Mini-Implantaten verschiedener Länge und Durchmesser

Sowohl die Länge als auch der Durchmesser eines Mini-Implantates können den Erfolg einer Positionierung beeinflussen. Aufgrund der Möglichkeit, das Standardimplantat tomas-pin N 08 durch andere Mini-Implantatkörper zu ersetzen, wurde der Einfluss von Länge und Durchmesser auf die Ergebnisse untersucht. Dazu wurden die in Tabelle 3 beschriebenen Mini-Implantate verwendet. Somit standen zwei verschiedene Implantatdurchmesser (1,6 mm und 2,0 mm) sowie fünf verschiedene Implantatlängen (6,0 mm, 7,6 mm, 8,0 mm, 9,6 mm und 10 mm) zur Verfügung. In der Abbildung sind jeweils die Versuche aller Behandler an beiden Probandinnen (also Oberkiefer und Unterkiefer) sowohl am Modell als auch intraoral für die vier in Tabelle 5 beschriebenen Zahnzwischenräume zusammengefasst, so dass die relative Häufigkeit auf je 240 Versuchen basiert.

Dabei zeigte sich, dass eine geringe Veränderung von Länge und/oder Durchmesser einen erheblichen Einfluss auf den Positionierungserfolg haben kann (). Die besten Ergebnisse, mit einer relativen Häufigkeit von 0,5 für „kein Kontakt“, erzielte der tomas-pin N 06. Dies war das Implantat mit der kürzesten Schaftlänge und mit dem geringeren Durchmesser (1,6 mm). Die häufigsten Wurzelkontakte ergaben sich für das Aarhus mini-implant „long“ mit einer Schaftlänge von 9,6 mm und dem größeren der beiden Durchmesser (2,0 mm). Die relative Häufigkeit für „kein Kontakt“ betrug nur 0,28. Bei vergleichbarer Schaftlänge des Aarhus mini-implant „short“ mit 7,6 mm und dem tomas pin N 08 mit 8,0 mm, betrug für das Aarhus mini-implant mit 2,0 mm Durchmesser für „kein Kontakt“ die relative Häufigkeit nur 0,32, während sie für den tomas-pin mit 1,6 mm Durchmesser 0,43 betrug. Auch bei dem im Vergleich zum Aarhus mini-implant „short“ um 2,4 mm längeren Schaft des tomas-pin N 10 betrug die relative Häufigkeit für „kein Kontakt“ 0,39 und war somit größer. In drei Fällen (je einmal pro Behandler) ergab sich bei den langen Mini-Implantaten (Aarhus mini-implant „long“ und tomas-pin N 10) eine Perforation der Kieferhöhlenwand.

Die Erhöhung des Durchmessers hatte einen größeren negativen Effekt auf die Ergebnisse als die Erhöhung der Implantatlänge. Dies äußert sich in den schlechteren Ergebnissen für die Mini-Implantate mit dem größeren Durchmesser (Aarhus mini-implant).

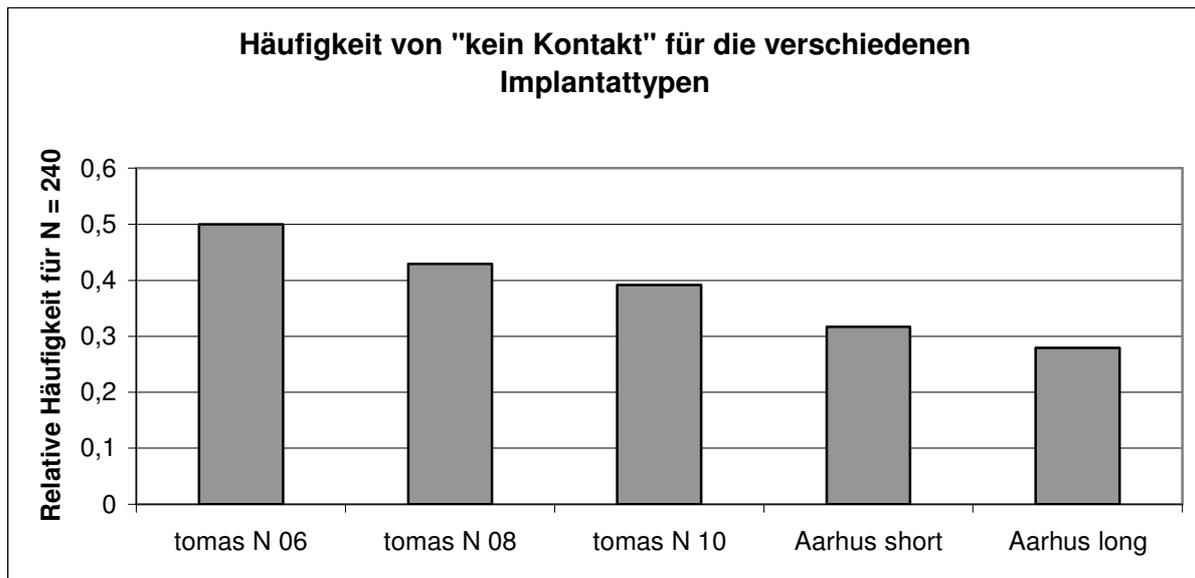


Abbildung 37: **Darstellung der relativen Häufigkeiten für die Mini-Implantatpositionen ohne Wurzelkontakt in Abhängigkeit vom Implantattyp**

Die Implantatpositionen aller drei Behandler am Modell und intraoral an den Zahnzwischenräumen mesial von 15 und 16 sowie 45 und 46 sind zusammengefasst.

## **5.7 Ermittlung einer Lernkurve durch den Vergleich der ersten mit der zweiten Versuchshälfte**

Um mögliche Lerneffekte mit der für alle Behandler neuen Technik des Navigationssystems zu erkennen, wurden die zehn Versuchsdurchläufe je Behandler und je Kiefer in eine erste Versuchshälfte (die Versuchsreihen eins bis fünf) und eine zweite Versuchshälfte (die Versuchsreihen sechs bis zehn) unterteilt. Dabei basieren die relativen Häufigkeiten in der Einzelübersicht auf 10 Versuchen je Behandler und Untersuchungsobjekt (Abbildung 38) sowie auf 120 Versuche in der Gesamtübersicht (Abbildung 39).

Bei der Betrachtung der Lernkurven der einzelnen Behandler (Abbildung 38) fällt auf, dass die Behandler 2 und 3 an allen vier Untersuchungsobjekten (intraoral und am Modell jeweils an Ober- und Unterkiefer) eine positive Lernkurve aufweisen. Dagegen war bei Behandler 1 im Oberkiefer bei den intraoralen Versuchen und im Unterkiefer am Modell ein negativer Kurvenverlauf erkennbar. Der Anstieg der Lernkurven von Behandler 2 und 3 war für den Unterkiefer jeweils identisch. Am Modell betrug er 0,2, intraoral 0,3. Im Oberkiefer wies Behandler 2 jeweils einen größeren Anstieg auf als Behandler 3. Bei den intraoralen Versuchen stieg die Kurve mit einer relativen Häufigkeit von 0,3 bis 0,4 jeweils geringfügig stärker an als bei den Versuchen am Modell. Dort betrug der Anstieg für die Behandler 2 und 3 jeweils 0,1 bis 0,2. Für Behandler 1 ergab sich im Oberkiefer intraoral eine stark negative Lernkurve, die relative Häufigkeit für „kein Kontakt“ fiel von 0,3 auf 0. Ebenfalls negativ war sie am Unterkiefermodell, jedoch mit 0,1 weniger stark ausgeprägt. In der Gesamtübersicht aller drei Behandler (Abbildung 39) ist zu erkennen, dass die relative Häufigkeit für „kein Kontakt“ von 0,35 in der ersten Versuchshälfte auf 0,51 in der zweiten Versuchshälfte anstieg, während die relative Häufigkeit für „Wurzelkontakt“ von 0,51 auf 0,41 abfiel.

In Anbetracht der vorliegenden Ergebnisse kann davon ausgegangen werden, dass die Resultate der zweiten Versuchshälfte die Folge eines sichereren Umgangs mit dem System und somit Folge einer Lernkurve sein können.

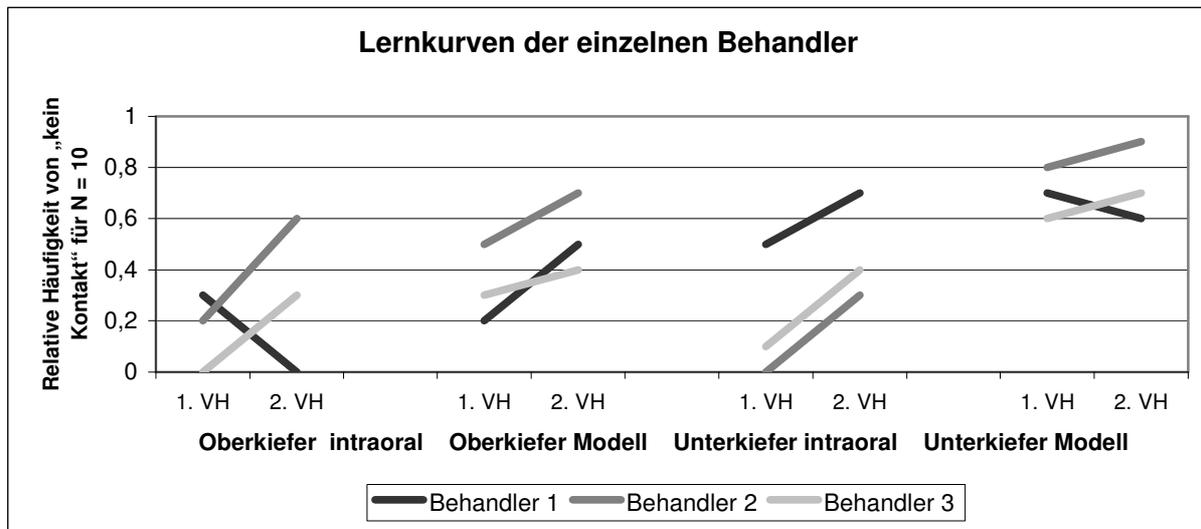


Abbildung 38: **Lernkurven der einzelnen Behandler für die verschiedenen Untersuchungsobjekte**

Die jeweils linke Seite jeder Kurve stellt den Wert für die erste Versuchshälfte (1. VH) für „kein Kontakt“ dar, die rechte Seite den jeweiligen Wert für die zweite Versuchshälfte (2.VH). Die beiden untersuchten Zahnzwischenräume je Kiefer (mesial der Zähne 15 und 16 für den Oberkiefer sowie mesial der Zähne 45 und 46 für den Unterkiefer) sind wiederum zusammen dargestellt.

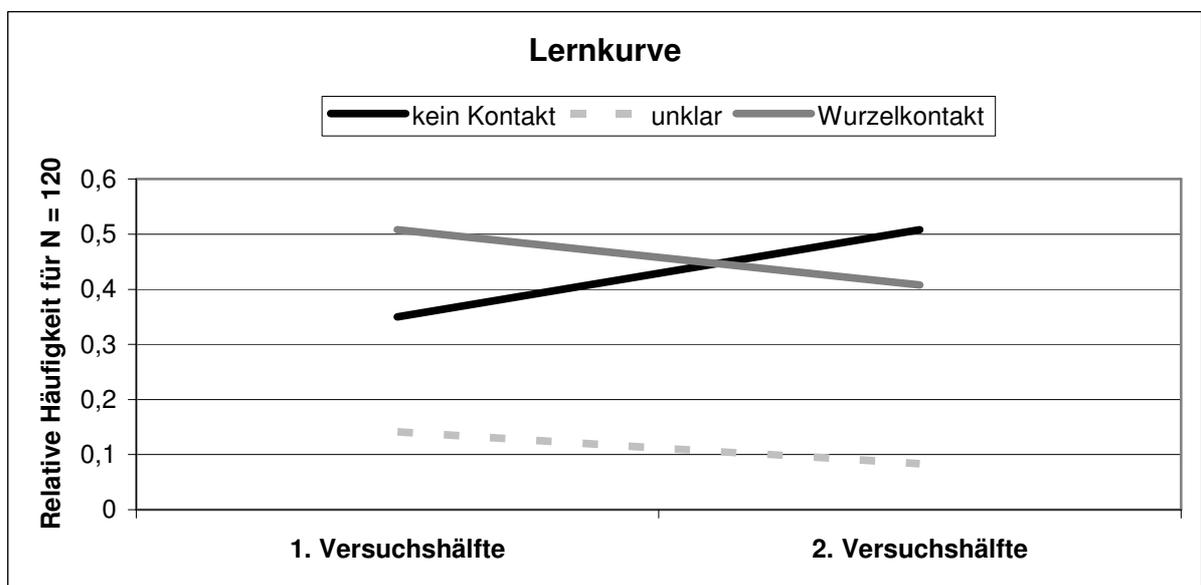


Abbildung 39: **Lernkurve Gesamtübersicht**

Alle Versuche der Behandler 1, 2 und 3, unterteilt in die jeweils erste und zweite Versuchshälfte für die vier Zahnzwischenräume mesial der Zähne 15 und 16 sowie 45 und 46 jeweils am Modell und intraoral.

## 6 Diskussion

### 6.1 Diskussion der Fragestellung

In der vorliegenden Arbeit sollte untersucht werden, ob Wurzelverletzungen durch orthodontische Mini-Implantate häufiger vermieden werden können, indem ihre Position auf einem Gipsmodell geplant wird oder aber bei einer direkten Platzierung im Patientenmund. Dies sollte zudem vor dem Hintergrund unterschiedlicher Behandlererfahrung in Bezug auf Mini-Implantatinsertionen betrachtet werden.

#### 6.1.1.1 Frage 1 (Planungsmethode)

Ausschlaggebend für die Untersuchungen war die Vielzahl der bislang entwickelten Hilfsmittel, die einer Insertion von orthodontischen Mini-Implantaten dienen. Diese verschiedenartigen Hilfsmittel lassen sich in zwei große Gruppen zusammenfassen. Eine Gruppe legt die Mini-Implantatposition auf einem Modell fest und überträgt sie anschließend mit Hilfe einer Vorrichtung in den Patientenmund [27, 28, 43, 67, 68, 71, 79, 89, 97, 99, 105, 111, 112, 126, 170]. Bei der zweiten Gruppe wird die Position dagegen direkt im Mund festgelegt und anschließend mit einer Positionierungshilfe markiert [15, 24, 39, 75, 94, 128, 148, 149, 171].

In erster Linie haben diese Hilfsmittel das Ziel, Schädigungen anatomischer Strukturen wie Zahnwurzeln, Nerven und Blutgefäße zu verhindern. Diese Schädigungen anatomischer Strukturen sind ein viel diskutierter Punkt [15, 24, 26, 28, 39, 41, 67, 68, 71, 74, 75, 89, 94, 97], denn gerade bei der interradikulären Insertion sind Schädigungen von Zahnwurzel und Parodont durch Implantat-Wurzel-Kontakt möglich [11, 42, 98]. Zumeist werden die Auswirkungen auf die anatomischen Strukturen als gering bezeichnet, da durch Wurzelzement eine Reparatur der Zahnwurzel erfolgt [4, 18, 42, 132]. Jedoch bei großem Wurzelkontakt, wenn Wurzelfragmente abgesprengt werden oder bei Pulpakontakt, sind Ankylospot [13, 30, 62], Vitalitätsverlust [11, 42, 58] und Wurzelfrakturen [30, 51, 82] möglich.

Ein weiterer, nicht zu vernachlässigender Aspekt, auf den sich die Positionierungsgenauigkeit auswirkt, ist die Problematik der hohen Verlustraten beim Einsatz von orthodontischen Mini-Implantaten [116, 138]. Meist konzentrieren sich diese Verluste auf die ersten Wochen nach der Insertion. Neben den dafür häufig erwähnten Gründen, wie fehlender Primärstabilität [102, 168] und periimplantären Entzündungen aufgrund schlechter Mundhygiene und lokalen

Irritationen [15, 20, 73, 74, 104, 153], wurde einem Implantat-Wurzel-Kontakt als eine mögliche Ursache bislang wenig Beachtung geschenkt [18, 32, 156]. Doch die physiologische Mikrobeweglichkeit der Zähne, wie beispielsweise während der Mastikation, kann dann auf das Mini-Implantat übertragen werden und zu dessen Lockerung führen [5, 62].

Aus diesem Grund sollte diese Studie nicht nur dazu dienen, den Einsatz von Mini-Implantaten sicherer zu gestalten, sondern auch ihre Erfolgsquote zu erhöhen.

#### 6.1.1.2 Frage 2 (Behandlererfahrung)

Vor allem in großen Mini-Implantatstudien mit mehreren hundert Insertionen wird entweder nicht auf Positionierungshilfen eingegangen oder explizit erwähnt, dass keinerlei Insertionshilfen verwendet wurden [20, 21, 76, 104, 109, 113, 114, 120, 153]. Man kann davon ausgehen, dass es sich bei den mitwirkenden Behandlern dieser Studien um Personen mit einem relativ großen Erfahrungsschatz bei der Platzierung von Mini-Implantaten handelt. In einer Untersuchung von LIM *et al.* zeigte sich, dass die Behandlererfahrung einen großen Einfluss auf die erzielte Primärstabilität hatte [84]. Von Behandlern mit mehr als 20 Insertionen wurde 3,6-mal häufiger Primärstabilität erzielt. Ebenso lag die Erfolgsrate der erfahrenen Behandler um 7,1 % höher als die der Behandler mit weniger als 20 durchgeführten Insertionen. So war ein Ziel dieser Studie herauszufinden, ob sich bei einer Positionierung ohne Insertionshilfe Unterschiede zwischen den verschiedenen erfahrenen Behandlern ergeben. Hauptsächlich galt das Interesse dabei den intraoralen Versuchen, da die Ausrichtung des Bohrschaftes bei dieser Untersuchung dem Moment eines wirklichen Insertionsbeginns gleichgesetzt werden kann. Die Ergebnisse am Gipsmodell wurden verglichen, da dort womöglich ein Unterschied in der Behandlererfahrung weniger oder nicht zum Tragen kommt. Denn ein Gipsmodell hat den Vorteil, dass es von allen Seiten betrachtet werden kann. Man kann es vermessen, die gewünschte Position kann eingezeichnet und die Angulation festgelegt werden. An Modellen ist wiederum nicht zu erkennen, wo der Übergang von befestigter Gingiva zu beweglicher Mukosa verläuft und wie weit die Ausdehnung einstrahlender Bändchen ist. Die Palpation der Wurzelkontur und somit eine zusätzliche Information über den Verlauf der Wurzel ist ebenfalls ausschließlich intraoral möglich.

### *6.1.1.3 Frage 3 (Lokalisation)*

In einigen klinischen Studien, die Kiefer- und Zahnregionen bezüglich ihrer Eignung zur Mini-Implantatinsertion beurteilen, wurde auf Unterschiede zwischen Ober- und Unterkiefer hingewiesen [77, 96, 120]. Anatomische Studien wiederum, die ausschließlich das zur Verfügung stehende Knochenlager beurteilen, können weder für den Ober- noch für den Unterkiefer Vorteile erkennen [31, 53, 56, 59, 108, 123, 141]. Sie weisen lediglich auf die große individuelle Variationsbreite hin, so dass bei jedem Patienten individuell über die geeignete Lokalisation für ein Mini-Implantat entschieden werden muss. Die vorliegende Studie beurteilt ausschließlich die Lage eines Mini-Implantates zu den benachbarten Wurzeln. Klinische Parameter wie Kortikalisstärke, Gingivabeschaffenheit und periimplantäre Entzündungen spielen keine Rolle. Unter diesen Bedingungen sollte untersucht werden, inwiefern sich die Ergebnisse zwischen Ober- und Unterkiefer unterscheiden.

### *6.1.1.4 Frage 4 (Implantatdesign)*

Nutzt man orthodontische Mini-Implantate zur vestibulären interradikulären Insertion im zahntragenden Alveolarfortsatz, ist der zur Verfügung stehende Platz dort stark limitiert. Folglich geben zahlreiche Studien Empfehlungen für geeignete Insertionsorte [31, 53, 56, 59, 108, 123, 141] sowie für entsprechende Insertionstechniken mit besonderem Augenmerk auf die Angulation zu den Zahnwurzeln [31, 39, 78, 101, 109, 119]. Obwohl sich die angebotenen Implantate in Länge und Durchmesser erheblich unterscheiden [131], liegt der Fokus bei Insertionen mehr auf der Art der Insertionstechnik [86, 115, 145]. Es ist jedoch zu erwarten, dass aufgrund der eng umrissenen anatomischen Grenzen eine Veränderung des Implantatdurchmessers auch einen Einfluss auf das Risiko von Wurzelverletzungen hat. Gleiches gilt für die Implantatlänge, da abhängig von der Angulation der Implantatachse bei längeren Implantaten auch die Gefahr zunimmt Wurzeln oder die Kieferhöhle zu verletzen. Deshalb wurden in dieser Studie zwei handelsübliche Mini-Implantate unterschiedlichen Durchmessers in jeweils verschiedenen Längen gewählt, um sie in die abgespeicherten Positionen einzusetzen. Es sollte dabei untersucht werden, ob die verschiedenen Implantate den Erfolg beeinflussen, und ob dabei der Durchmesser oder die Länge eine größere Rolle spielt.

### 6.1.1.5 Frage 5 (Röntgendiagnostik)

Als Basisdiagnostik zur Planung einer Mini-Implantatposition gelten bislang zweidimensionale Röntgenaufnahmen [53]. Auch die verschiedenen beschriebenen Hilfsmittel nutzen zum größten Teil zweidimensionale Röntgenaufnahmen [15, 24, 27, 28, 39, 41, 43, 75, 79, 94, 97, 99, 111, 128, 148, 149, 170]. Das interradikulär verfügbare Knochenlager ist so jedoch nur durch eine in Rechtwinkeltechnik zum Approximalraum durchgeführte Zahnfilmaufnahme relativ genau darstellbar [39, 148, 149]. Die anatomischen Gegebenheiten lassen solch eine optimale röntgentechnische Ausrichtung jedoch mitunter nicht zu [94]. Häufig werden ausschließlich Panoramaschichtaufnahmen zur Planung herangezogen [27, 28, 111]. Diese Aufnahmen sind gekennzeichnet durch vertikale Vergrößerung sowie Verzerrungen im Bereich der Eckzähne und Prämolaren, so dass sie für diese Region nach Auffassung von SCHNELLE *et al.* nicht herangezogen werden können [141]. Ein orthoradialer Strahlengang durch den Approximalraum ist nicht gewährleistet. Andere Autoren vertrauen gleichwohl auf Panoramaschichtaufnahmen, indem sie die Bilder entsprechend zurückhaltend bewerten und im Zweifelsfall auf eine Insertion verzichten.

Die einzige Möglichkeit, den zur Verfügung stehenden Raum für eine sichere Platzierung mit Sicherheitsabstand genau zu diagnostizieren, besteht in dreidimensionalen Röntgenaufnahmen [67, 68, 89]. Hier sind jedoch die erhöhte Strahlenbelastung und die Kosten mit dem Nutzen abzuwägen. So beträgt die effektive Dosis einer dentalen Volumentomographie derzeit im Mittelwert  $221 \pm 275$  Mikrosievert ( $\mu\text{Sv}$ ), für eine Computertomographie  $788 \pm 334$   $\mu\text{Sv}$  [33], während sie für ein Panoramaschichtaufnahme  $14,3$   $\mu\text{Sv}$  bis  $24,2$   $\mu\text{Sv}$  und für ein Fernröntgenseitenbild  $5,6$   $\mu\text{Sv}$  beträgt [90]. Für eine einzelne Zahnfilmaufnahme gibt es keinen aktuellen Wert, jedoch beträgt die effektive Dosis für einen aus 18 Aufnahmen bestehenden Zahnstatus laut den aktuellen Gewebe-Wichtungsfaktoren für Zahnfilme vom Typ F mit einem Rechtecktubus  $34,9$   $\mu\text{Sv}$  und steigt bei Verwendung eines Rundtubus und Filmen vom Typ D auf bis zu  $388$   $\mu\text{Sv}$  an [90]. Die European Academy of Dental and Maxillofacial Radiology (EADMFR) und die Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde (DGZMK) sehen derzeit noch keine ausreichende Evidenz für einen generell erhöhten Nutzen dentaler Volumentomographien und haben in dieser Hinsicht strenge Kriterien für deren Indikationsstellung angesetzt [33, 55]. Jedoch wird auch darauf hingewiesen, dass dentale Volumentomographien vorteilhaft bei der Darstellung des peridental Knochenangebotes sind und sich speziell für die Implantologie eine computergestützte Planung anbietet [33]. Unter besonderer Berücksichtigung des

---

Strahlenschutzes bei jugendlicher Patientenlientel sollen alle Möglichkeiten zur Dosisreduktion ausgeschöpft werden [33].

## **6.2 Diskussion von Material und Methode**

### 6.2.1 Diskussion der Versuchsvorbereitung

#### *6.2.1.1 Probanden*

Bei der vorliegenden Studie handelt es sich um eine Pilotstudie. Sie wurde an lediglich zwei Probandinnen durchgeführt. Aus technischen Gründen war eine Versuchsdurchführung ausschließlich in dem Kiefer möglich, in dem die Schiene mit dem Navigationsbogen eingesetzt war. Da dadurch nur zwei Kiefer zur Verfügung standen, aber auch ein Vergleich zwischen Oberkiefer und Unterkiefer erfolgen sollte, wurden die Versuche an je einer Probandin im Oberkiefer und einer im Unterkiefer durchgeführt. Die Inkorporation des Navigationsbogens in einen Bissblock, mit Fixierung an beiden Kiefern, hätte die Nutzung beider Kiefer ermöglichen können. Jedoch wäre die Sichtbehinderung dadurch noch größer gewesen und versprach daher keinen Vorteil. Die ausgewählten Probandinnen entsprechen nicht dem Patientengut, welches für das Setzen von Mini-Implantaten infrage kommt, da keine kieferorthopädische Behandlungsnotwendigkeit im Sinne eines Engstandes oder ähnlichem vorlag. Wichtig war jedoch, dass sich die Probanden während des Versuchszeitraums in keiner kieferorthopädischen Behandlung befanden, um konstante Verhältnisse zu gewährleisten. Um möglichst viele Approximalräume zur Verfügung zu haben, sollte ein vollständiges bleibendes Gebiss vorliegen.

#### *6.2.1.2 Versuchsunterlagen*

Bei der Platzierung des Navigationsbogens musste im Vorfeld entschieden werden, ob er, wie in der Implantatprothetik üblich, an der Vestibulärfläche der Zähne befestigt wird oder okklusal. Vestibuläre Befestigung hat den Vorteil, dass die Zähne und somit auch der Approximalraum, von okklusal einsehbar bleiben. Ein Nachteil wäre, dass so die Zahnkronen von vestibulär bis einschließlich der Prämolaren verdeckt sind. Ausschlaggebend für die Entscheidung gegen diese Platzierung war die Tatsache, dass bei einer Ausschnittgröße von 12x15x15 cm der vordere Bereich des Navigationsbogens und somit einige der in ihm befindlichen Titanstifte nicht vom Scan erfasst worden wäre. Beim Fehlen von bis zu zwei Titanstiften können diese zwar nachträglich rekonstruiert werden [139]. Aber die Gefahr wäre groß, dass mehr als zwei Titanstifte nicht erfasst worden wären und die Daten somit nicht verwendbar gewesen wären. Der Navigationsbogen wurde daher weiter retral, direkt über den

Inzisal- und Okklusalfächen, auf der Schiene positioniert. Dadurch waren diese Flächen bis einschließlich der ersten Molaren nicht einsehbar. Ebenso ist der Approximalraum nicht einsehbar, was als Nachteil angesehen werden kann.

### 6.2.2 Diskussion des Messverfahrens

Optische Navigationssysteme haben ihre Leistungsfähigkeit in der Implantatprothetik bereits seit einigen Jahren unter Beweis gestellt [136]. Auch zum Setzen von Mini-Implantaten scheinen sie laut einer *Ex-vivo*-Untersuchung von PRÄGER *et al.* geeignet [125], jedoch liegen klinische Daten bislang nicht vor. Das in der vorliegenden Studie verwendete Navigationssystem ist ein Nachfolgesystem des von PRÄGER *et al.* verwendeten Systems. Es handelt sich um das Lapdoc-System, welches für diese Studie zweckentfremdet wurde. Dazu wurde die normale Funktionsweise des Navigationssystems, bei der eine Implantatposition am Rechner präzise festgelegt und anschließend in einen Patientenmund übertragen wird, umgekehrt. Denn zunächst wurde virtuell am Modell oder an einer Probandin „implantiert“ um im Anschluss zu schauen, wo das Implantat in Beziehung zu den Wurzeln steht.

Die Tracker sind auf 0,05 mm genau gefertigte Präzisionsinstrumente [139], die an einer Planungsschiene beziehungsweise einem Handstück durch Schraubverbindung befestigt werden. Die vom Hersteller für das System angegebene, *in vivo* unter idealen Bedingungen ermittelte Genauigkeit liegt bei  $0,5 \pm 0,2$  mm und  $0,6 \pm 0,5^\circ$  [140]. In klinischen Studien, vor allem aus der prothetischen Chirurgie, konnte dieser Wert jedoch nie ganz erreicht werden. Der Messfehler wird für *In-vivo*- wie *In-vitro*-Studien mit einer Achsabweichung zwischen weniger als drei Grad bis maximal zehn Grad und einer Abweichung des Apexpunktes von 1,0 mm bis 1,5 mm angegeben [136], wobei schon allein bis zu 0,25 mm beziehungsweise  $0,5^\circ$  auf den Handtremor des Operateurs entfallen können [140]. Für prothetische Implantationen sind dies durchaus akzeptable Werte, deren Größenordnung mit der Übertragung durch Splints vergleichbar ist.

Zu den intrinsischen Fehlern, wie Registrier- und Trackingfehler, können weitere Fehlerquellen, wie Ungenauigkeiten bei der Herstellung und Platzierung der Schiene, durch die räumliche Auflösung der Bilddaten, die Bildverarbeitung und die Planungssoftware hinzukommen [136]. Durch die in dieser Studie übliche Insertionsrichtung von vestibulär hätten bei den Versuchen auf der linken Probandenseite das Handstück und der dazugehörige Tracker den Patiententracker teilweise verdeckt. Ist die Sichtverbindung zwischen der als Messsensor fungierenden stereoskopischen Kamera und den Trackern unterbrochen, so wird keine

Navigationsinformation geliefert. Da dies auf der linken Probandenseite häufig der Fall gewesen wäre, konnten in der vorliegenden Studie im zweiten und dritten Quadranten keine Versuche durchgeführt werden. Die Anzahl der zur Verfügung stehenden Zahnzwischenräume, an denen die Versuche durchgeführt werden konnten, wurde dadurch halbiert. Die Möglichkeit, mit Hilfe des Systems die Versuche beliebig oft durchführen zu können, ohne an den Probandinnen Gewebe zu traumatisieren, relativierte dieses Problem allerdings wieder.

### 6.2.3 Diskussion der Durchführung

Das Arbeiten mit dem Navigationssystem war für alle Behandler neu. So ist für diese Studie davon auszugehen, dass unabhängig von Vorversuchen, bei allen Behandlern im Laufe der Versuche die Routine im Umgang mit dem System zunahm. Aus diesem Grunde wurde eine mögliche Lernkurve darauf untersucht, ob in Bezug auf die Positionierung der Mini-Implantate eine Lernkurve auszuschließen war. Eine andere Möglichkeit wäre gewesen, eine Art Training an einem Phantomkopf durchzuführen, ähnlich wie es von WIDMANN *et al.* für prothetische Implantate vorgeschlagen wurde [162].

Die Durchführung der Versuche fand nur teilweise unter realen klinischen Bedingungen statt. So waren alle zur Durchführung und Aufzeichnung der Versuche benötigten Geräte vorhanden, ebenso ein Operationstisch sowie ein Stuhl für den jeweiligen Behandler. Doch insbesondere die Lichtverhältnisse in der Versuchsregion erwiesen sich durch die zur Verfügung stehende Leuchte nicht als optimal, da keine Operationsleuchte zur Verfügung stand. Eine Stuhlassistenz wäre klinisch sicher üblich, in diesem Fall hätte sie jedoch keinen Vorteil versprochen. So wurde darauf verzichtet. Da die Versuche auf einem chirurgischen Operationstisch stattfanden, wurden alle Versuche an den horizontal liegenden Probandinnen ausgeführt, während klinisch sicher zumindest für die Insertion im Unterkiefer eine mehr aufrecht sitzende Position denkbar gewesen wäre.

Die Problematik der Trackingfehler auf der linken Probandenseite wurde bereits in Kapitel 6.2.2 erwähnt. Trotzdem musste auch auf der rechten Probandenseite darauf geachtet werden, dass die Reflexionswege zwischen Tracker und Kamera nicht verdeckt waren. Dies wurde daher zusätzlich von der Person an der Lapdoc-Arbeitsoberfläche kontrolliert, die während der Versuche die gewünschten Insertionspositionen „einfro“.

Nach den Vorversuchen wurden die Druckformschienen, auf denen der Navigationsbogen befestigt war, jeweils einseitig (rechte Probandinnenseite) bis zum Eckzahn gekürzt, da sich

ihre Ausdehnung im posterioren Bereich als zusätzliche Sichtbehinderung erwies. Somit war ein guter Kompromiss aus stabilem Sitz und bestmöglichen Sichtverhältnissen erreicht. Im Frontzahnggebiet begrenzte die Kopplung des Patienten-Trackers mit dem Navigationbogen die vertikale Angulation des Handstücks, so dass nur eine weitestgehend horizontale Insertionsrichtung möglich gewesen wäre. Daraufhin wurde entschieden, im Unterkiefer die Implantation nur bis mesial des Eckzahnes zu simulieren, da horizontale Insertionen innerhalb der befestigten Gingiva in der Unterkieferfront in der Literatur nicht beschrieben sind. Zudem wurde in den posterioren Regionen auf eine Insertion distal der ersten Molaren verzichtet, da die Lippen- und Wangenspannung für die Probandinnen nicht zumutbar gewesen wären. Dadurch entfiel im Unterkiefer der Zwischenraum zwischen erstem und zweitem Molaren, der in der Literatur als gut geeignet aufgeführt wird [53, 56, 92, 108, 141].

Die virtuelle Insertion der Mini-Implantate sollte den klinischen Bedingungen bei der realen Insertion möglichst nahe kommen. Dies ist vor allem insofern schwierig, als das Wissen um die Nichtinvasivität und die damit fehlenden Konsequenzen bei einer möglichen Fehlbeurteilung nicht die Stresssituation mit der entsprechenden Konzentration aufbaut, wie es im Realfall geschehen würde. Andererseits fehlte die Möglichkeit, die Implantation abzurechnen und die Achse bei festgestelltem Wurzelkontakt neu auszurichten, wie von einigen Autoren beschrieben [15, 18, 78, 121]. Gewebespezifisch unterschiedliche Widerstände, die von CHEN *et al.* in einer Tierstudie und von WILMES *et al.* in einer *In-vitro*-Studie [18, 169] nachgewiesen wurden, konnten nicht simuliert werden. Ferner war es den Probanden nicht möglich, bei „virtuellem Wurzelkontakt“ eine Rückmeldung zu geben. Insbesondere die durch die Versuchsapparatur stark eingeschränkten Sichtverhältnisse verhinderten, dass ein freier Zugang zur Insertionsregion möglich war, wie er sich etwa den Operateuren darstellt, die ohne eine Insertionshilfe arbeiten. Es entsprach eher dem Arbeiten mit einer Insertionshilfe, wo man die schlechtere Einsicht in das Insertionsgebiet in Kauf nimmt, da man sich auf eine vermeintlich sichere Führung durch die Insertionshilfe verlassen kann. Die fehlende okklusale Aufsicht erhöhte sicher die Schwierigkeit der mesiodistalen Angulation. Diese durch ein Aufsichtsfoto zu ersetzen, versprach aber keinen zusätzlichen Vorteil, zumal die Modelle zur Verfügung standen.

#### 6.2.4 Diskussion der Datenanalyse

Als Datensätze standen die dentalen Volumentomographien zweier Probandinnen und die abgespeicherten Mini-Implantatpositionen zur Verfügung. Die dentale Volumentomographie

liefert eine der Computertomographie vergleichbare Hartgewebstdarstellung bei reduzierter Strahlenexposition [33]. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte rein visuell. Entsprechend der Lage der abgespeicherten Implantatpositionen zu den benachbarten Zahnwurzeln wurden diese in fünf Kategorien eingeteilt. Hierbei sind Beurteilungsfehler möglich, weshalb zur Überprüfung der Reliabilität der Auswertung circa ein halbes Jahr nach der Erstauswertung eine Zweitauswertung erfolgte (siehe Kapitel 6.2.5).

Zunächst interessierte vor allem, ob ein Wurzelkontakt vorlag, oder nicht. Aufgrund der Auflösung der Bilddaten mit einer Voxelkantenlänge von 0,3 mm war es häufig jedoch nicht möglich, eine eindeutige Zuordnung zu den Kategorien „Kontakt“ oder „kein Kontakt“ zu finden. Bei einer Desmodontalspaltbreite von 0,15 mm bis 0,2 mm [142] ist teilweise nicht ersichtlich, ob das Mini-Implantat noch einen geringen Abstand zum Parodont hat, es das Parodont tangiert, im Parodontalspalt liegt oder ein geringer Wurzelkontakt vorliegt. Daher wurde eine weitere Kategorie eingeführt, die eine Position als „unklar“ bezeichnet, wenn Implantatpositionen nicht eindeutig einer der beiden ersten Kategorien zuzuordnen waren (Kapitel 4.4 und Tabelle 6). Dadurch erhöhte sich zudem die Reliabilität der Ergebnisse. Die Wurzelkontakte wurden zusätzlich unterteilt, da sich das Ausmaß der Wurzelschädigung in nicht unerheblichem Maße auf die jeweiligen Reparaturmechanismen auswirken würde. So ist, wie bereits erwähnt, nicht nur die Reparatur durch Wurzelzement möglich [4, 18, 42, 132], sondern es kann auch zur Absprengung von Wurzelfragmenten, Ankylosespts [13, 30, 62], Vitalitätsverlust [11, 42] und Wurzelfrakturen [30, 51, 82] kommen. Entsprechend einer Einteilung, wie sie FABBRONI *et al.* in ihrer Studie zu Wurzelverletzungen nutzten [42], wurde der Wurzelkontakt in „geringer Kontakt“ und „großer Kontakt“ unterschieden. Zusätzlich wurde die Kategorie „Pulpakontakt“ eingeführt, da in diesem Fall die Prognose für den betroffenen Zahn am schlechtesten wäre.

Die Datenauswertung erfolgte ausschließlich durch den Verfasser dieser Studie. Eine Interrater-Reliabilität musste somit nicht bestimmt werden. Aufgrund der Tatsache, dass es sich bei den Ergebnissen um Summen von Ordinaldaten handelt, die pro Kiefer nur auf jeweils einer Probandin beruhen, erfolgte die Auswertung rein deskriptiv. Die Ergebnisse wurden dafür grafisch als Liniendiagramm dargestellt und zahlenmäßig beschrieben. Da die in den Diagrammen dargestellten Ergebnisse meist weniger als 100 Ereignisse betreffen, wurden die Häufigkeiten daraufhin auch jeweils in Abbildung und Text als relative Häufigkeiten angegeben. Die vorliegenden Ergebnisse auf eine größere Grundgesamtheit zu übertragen, ist schwierig.

### 6.2.5 Diskussion des Methodenfehlers

Die Fehlermöglichkeiten bei der Anwendung eines optischen Navigationssystems liegen in der Passung der Navigationsschiene, dem bildgebenden Verfahren, bei der Patientenregistrierung, der Kalibrierung, der Lokalisation von Patient und Instrument, dem Bohrerschaftspiel und in der Ausrichtung des Operateurs zur Kamera. Allein die Platzierung der Schiene im Patientenmund und auf dem Modell ist eine große Fehlerquelle, so dass sie vor jedem Arbeitsschritt gründlich visuell und taktil kontrolliert werden musste. Eine fehlerhafte Platzierung der Schiene während der Röntgendiagnostik hätte fehlerhafte Ergebnisse bei allen folgenden Versuchen zur Folge, deren Fehler im Nachhinein nicht mehr hätte quantifiziert werden können. Gleiches gilt für eine nicht korrekte Schraubverbindung zwischen Tracker und Navigationsbogen.

Die von SCHERMEIER *et al.* unter idealen Bedingungen an Modellkiefern für das verwendete Navigationssystem ermittelte Systemgenauigkeit von  $0,5 \pm 0,2$  mm für die Position und  $0,6 \pm 0,5^\circ$  für die Ausrichtung (maximal 1,2 mm sowie  $1,5^\circ$ ) [140], konnte für diese Pilotstudie im Vorfeld mit 0,66 mm und  $0,38^\circ$  für den intrinsischen Fehler bestätigt werden. Die Richtung der Abweichung ist dabei aus den Daten aufgrund der Rotationssymmetrie des z-Vektors nicht eindeutig ableitbar, da diese auch abhängig von der Mesiodistalklination der Wurzeln ist. Somit ist eine Abweichung nach zervikal oder apikal ebenso möglich wie nach mesial oder distal. Wahrscheinlicher ist eine Kombination der Richtungen, so dass eine rein mesio-distale Abweichung in dieser Größenordnung eher unwahrscheinlich erscheint. Die klinische Gesamtgenauigkeit des Systems konnte in diesem Fall nicht ermittelt werden, da nicht tatsächlich inseriert wurde. Die Werte entsprechen allerdings der drei- bis vierfachen Breite des Parodontalspaltes, welcher zwischen zirka 0,14 mm im Bereich der Wurzelmitte und über 0,20 mm in der Nähe des Alveolarkammes schwankt [142]. Somit ist es theoretisch möglich, dass bei der Auswertung der Ergebnisse ein Implantat um bis zu zwei Kategorien falsch eingeordnet wurde. Es wäre durchaus vorstellbar, dass eine Implantatposition als knapp ohne Wurzelkontakt dargestellt wurde, sie tatsächlich aber einen geringen Wurzelkontakt verursacht. Ebenso umgekehrt. In allen anderen Kategorien ist theoretisch die Verschiebung um eine Kategorie und somit eine Fehldarstellung der Ergebnisse möglich. Aus diesem Grund bedarf es einer weiteren Verbesserung der optischen Navigationssysteme, um durch Verringern des Systemfehlers die Genauigkeit und, wie für die vorliegende Studie, die Aussagekraft der Ergebnisse zu erhöhen. Sollte dies gelingen, ist auch vorstellbar, dass Navigationssysteme in Zukunft, unter kritischer

Überprüfung der Indikation zur entsprechenden Röntgendiagnostik, eine Alternative zu den gegenwärtigen Übertragungssystemen werden.

Durch die Fixierung der Modelle in einem Schraubstock war eine optimale Ausrichtung der Tracker zur Kamera gewährleistet, ähnlich den intraoralen Versuchen. Dadurch wurde gegenüber den intraoralen Versuchen eine mögliche Quelle für den intrinsischen Fehler, die Patientenbewegung während der Registrierung, beseitigt. Somit kann nicht ausgeschlossen werden, dass der Methodenfehler bei den intraoralen Versuchen größer war als am Modell.

Bei der zur Bestimmung der Reliabilität durchgeführten Zweitauswertung einer Versuchsreihe zeigte sich eine hohe Zuverlässigkeit. Die in diesem Fall zu bestimmende Intrarater-Reliabilität ergab bei einem Kappa von 0,827 eine hohe Signifikanz von  $p < 0,001$  (Tabelle 9). Zwar waren nur bei zwei der sechs begutachteten Zahnzwischenräume die Ergebnisse der Erst- und Zweitauswertung identisch, doch betrug der Ergebniswechsel in den wenigen Fällen maximal eine Kategorie (Abbildung 14, Tabelle 8). Durch eine höhere Auflösung der dreidimensionalen Röntgendaten könnte die Signifikanz noch zusätzlich erhöht werden. Dafür bestand jedoch keine Indikation, da die DVTs angefertigt wurden, um die Lage retinierter dritter Molaren zu den umgebenden Strukturen darzustellen.

## 6.3 Diskussion der Ergebnisse

### 6.3.1 Interradikuläres Platzangebot

Von den Behandlern wurden anhand der Panoramaschichtaufnahmen die Interdentalräume mit dem größten verfügbaren Platzangebot sicher erkannt. Das tatsächlich verfügbare Knochenlager betrug dabei interradi­kulär allerdings nur 2,85 – 3,35 mm. An den als ungeeignet angesehenen Zwischenräumen mesial der Zähne 43 und 44 im Unterkiefer sowie mesial der Zähne 14 und 12 im Oberkiefer betrug das Knochenlager nirgends mehr als 2,25 mm. Somit wurden auch diese Zwischenräume von allen Behandlern korrekt bewertet, auch wenn vereinzelt sogar eine Platzierung ohne Wurzelkontakt gelang. Die Panoramaschichtaufnahmen erschienen geeignet, die Platzverhältnisse darzustellen. Jedoch haben sie sich für die hier untersuchten Probandinnen nicht als zuverlässiges prognostisches Mittel für das Vermeiden von Kontakten zwischen Mini-Implantaten und Zahnwurzeln erwiesen. Sie gaben keine Auskunft über das tatsächlich verfügbare Knochenlager. Als Konsequenz für eine Folgestudie ergibt sich jedoch, dass lediglich dort virtuell Implantiert werden sollte, wo für die Behandler eine Insertion auch realistisch erscheint.

Ein weiteres Problem besteht darin, die Größe eines sicheren Knochenlagers zu definieren. Die Meinungen zur Größe eines sicheren Implantationslagers variieren in der Literatur sehr stark. Betrachtet man diesbezüglich Studien [31, 53, 56, 59, 92, 108, 123, 124, 141], so lässt sich feststellen, dass tatsächlich meist nur sehr wenige Zahn- beziehungsweise Wurzelzwischenräume für eine Insertion von vestibulär geeignet scheinen. Eine Auswahl dieser Studien zum tatsächlich vorhandenen Platzangebot gibt Tabelle 11 wieder. Die dort aufgeführten Werte werden durch die Ergebnisse der vorliegenden Studie bezüglich der Distanzmessungen (Tabelle 10) weitestgehend gestützt. So ist laut POGGIO *et al.* eine Platzierung von Mini-Implantaten mit einem Durchmesser von 2,0 mm im Bereich der befestigten Gingiva außer palatinal zwischen dem oberen zweiten Prämolaren und ersten Molaren nirgends sicher möglich [123]. Demzufolge fanden die Versuche der vorliegenden Studie für das Aarhus mini-implant ausschließlich in Gebieten unsicherer Insertion statt, wobei POGGIO *et al.* jeweils ein Sicherheitsabstand von 1,0 mm zur Wurzel mit einberechnet haben. Auch SCHNELLE *et al.* verweisen darauf, dass sie lediglich an einem Zahnzwischenraum je Kiefer (im Oberkiefer zwischen den mittleren Inzisivi, im Unterkiefer zwischen erstem und zweitem Molaren) eine Mini-Implantatinsertion für möglich halten [141]. Sie betrachten ebenfalls ein minimales Platzangebot von 4,0 mm als Basis für eine sichere Insertion. Dieser Wert stand in der vorliegenden Studie in keinem Zahnzwischenraum

zur Verfügung. Zudem wurden diese beiden Zwischenräume aus den in Kapitel 4.3 aufgeführten Gründen nicht berücksichtigt. Als Konsequenz der engen anatomischen Grenzen wird zum Teil zumindest für den Oberkiefer, anstatt einer Insertion von vestibulär, eine Insertion von palatinal vorgezogen. Laut PARK *et al.* ist dort die Gefahr einer Wurzelschädigung geringer [123]. Der Gaumen ist von befestigter keratinisierter Gingiva überzogen, wodurch die Gefahr der periimplantären Entzündung verringert ist [74]. Allerdings ist die palatinale Schleimhaut sehr dick. Dadurch müssen längere Implantate verwendet werden [78, 80], was wiederum zu einem langen Hebelarm und somit zu größeren Kippmomenten und eher zu einer Überlastung führen kann [14]. WILMES *et al.* begegnen diesem Umstand, indem sie median zwei Mini-Implantate unmittelbar nebeneinander inserieren und anschließend miteinander verblocken [166]. Dadurch erhöht sich jedoch der chirurgische und labortechnische Aufwand erheblich, Wurzelverletzungen sind bei unsachgemäßem Vorgehen trotzdem möglich [37]. Für eine Insertion im Unterkiefer stellt dieses Verfahren ebenfalls keine Alternative dar. Die palatinale Insertion stand in der vorliegenden Studie jedoch nicht im Mittelpunkt des Interesses. Einzig die vestibuläre Insertion sollte durchgeführt werden. Es gab zudem keine Vorgabe für einen speziellen Sicherheitsabstand zu den umgebenden Strukturen.

Ein größerer Sicherheitsabstand, der zumeist mit einer möglichen Implantatwanderung begründet wird, wird auch nicht von allen Autoren als zwingend notwendig erachtet. Entsprechend halten einige Autoren 3,0 mm [56] beziehungsweise 3,1 mm [92] interradikulären Abstand zur sicheren Insertion für ausreichend. So fordern Ludwig *et al.* lediglich je 0,5 mm für den Knochen zur Sicherheit bei der Insertion und rechnen je 0,25 mm für das Parodont hinzu [92]. Da sie als besten Kompromiss zwischen Stabilität und Größe Mini-Implantate mit einem Durchmesser von 1,6 mm ansehen, genügt ihnen somit ein Knochenlager von lediglich 3,1 mm. Dementsprechend wären in der vorliegenden Studie mit dem Standardimplantat (tomas-pin N 08) im Oberkiefer mesial von 16 und von 11 sowie im Unterkiefer mesial von 45 Implantationen möglich. Das bedeutet aber letztlich, dass selbst bei maximal optimistischer Auslegung des minimalen Platzbedarfs für eine Insertion, lediglich zwei der in dieser Studie untersuchten Zahnzwischenräume (mesial 16 und mesial 45) für eine Mini-Implantatinsertion geeignet zu sein scheinen. Folglich ist offenbar unter anderem Platzmangel für die hohe Zahl an Wurzelkontakten in der vorliegenden Studie verantwortlich.

Tabelle 11: **Ergebnisse verschiedener Studien zum interradikulären Platzangebot für die interradikuläre Insertion von Mini-Implantaten von bukkal**

Aufgeführt werden ausschließlich die Angaben für Bereiche innerhalb der befestigten Gingiva jeweils für Ober- und Unterkiefer. Die Zahnzwischenräume sind dargestellt als zwei mit einem Bindestrich verbundene Zahlen für die jeweiligen Zähne. Teilweise sind Minimum und Maximum angegeben. Nicht berücksichtigt sind Kortikalisdicke und der Abstand von Kortikalis zur Zahnwurzel.

Autor	Datenmaterial	Methode	Oberkiefer	Unterkiefer
SCHNELLE <i>et al.</i> (2004) [141]	60 Panorama-schichtaufnahmen	Zwischenräume mit mehr als 3,0 und 4,0 mm Platzangebot werden gekennzeichnet	mehr als 4,0 mm: kein Zahn-zwischenraum mehr als 3,0 mm: 1-1	mehr als 4,0 mm: kein Zahn-zwischenraum mehr als 3,0 mm: 7-6
POGGIO <i>et al.</i> (2006) [123]	je 25 dentale Volumentomographien pro Kiefer (keine Informationen zur Voxelgröße)	vermessen des mesiodistalen und bukkolingualen Knochenlagers in 4 verschiedenen Höhen vom Alveolarkamm	7-6: 2,3-2,5 mm 6-5: 2,7-2,9 mm 5-4: 2,9-3,2 mm 4-3: 3,0-3,4 mm	7-6: 3,0-3,2 mm 6-5: 2,9-3,0 mm 5-4: 3,2-3,7 mm 4-3: 2,7-2,8 mm
DEGUCHI <i>et al.</i> (2006) [31]	10 Computertomographien mit 0,5 mm Schichtstärke (keine Informationen zur Voxelgröße)	vermessen der Zahnzwischenräume jeweils mesial und distal des ersten Molaren	6-5: 2,1 mm 7-6: 1,5 mm	6-5: 1,5 mm 7-6: 1,7 mm
HERNÁNDEZ <i>et al.</i> (2008) [53]	21 Computertomographien mit 0,5 mm Schichtstärke (keine Informationen zur Voxelgröße)	vermessen aller Zahnzwischenräume in drei verschiedenen Entfernungen vom Alveolarkamm	7-6: 3,0-4,0 mm 6-5: 3,0 mm 5-4: 3,0-3,5 mm 4-3: 3,0 mm 3-2: 2,0-3,0 mm 2-1: 2,0-2,5 mm 1-1: 4,0 mm	7-6: 4,0-5,0 mm 6-5: 3,0-4,0 mm 5-4: 2,5-3,0 mm 4-3: 2,5-3,0 mm 3-2: 2,5-3,0 mm 2-1: 2,0-2,5 mm 1-1: 2,0-2,5 mm
HU <i>et al.</i> (2009) [56]	1 mm dicke Scheiben aus in Kunststoff eingebetteten Kieferknochen von je 20 Ober- und Unterkiefern	Scheiben werden eingescannt und am Computer vermessen	7-6: 2,5-2,8 mm 6-5: 2,9-3,5 mm 5-4: 3,0-3,3 mm 4-3: 2,4-2,9 mm 3-2: 1,9-2,8 mm 2-1: 1,8-2,9 mm	7-6: 3,2-4,1 mm 6-5: 2,6-3,0 mm 5-4: 2,6-3,6 mm 4-3: 2,1-2,7 mm 3-2: 1,8-2,7 mm 2-1: 1,8-2,2 mm

### 6.3.2 Implantatpositionen der einzelnen Behandler

Anhand der Ergebnisübersichten der einzelnen Behandler (Abbildungen 15 bis 20) mit der Darstellung aller getesteten Versuchszwischenräume ist zu erkennen, dass die Anzahl an Wurzelkontakten sehr hoch war. Jedoch war das tatsächlich vorhandene Platzangebot äußerst gering (Kapitel 5.1). Zudem wurden von den Behandlern von vornherein auch nicht alle Zahnzwischenräume als geeignet angesehen.

Wie in Tabelle 10 dargestellt, verfügten die Zahnzwischenräume mesial der Zähne 16, 11 und 45 über das größte Knochenlager. Die Insertionsergebnisse dort unterscheiden sich jedoch extrem. Die wenigsten Wurzelkontakte traten dabei mesial von Zahn 11 auf, was sicher mit der anterioren Lage und der damit begründeten besseren Zugänglichkeit und besseren Sicht zu erklären ist. Den Platz mesial von Zahn 16 wusste dagegen nur ein Behandler (Behandler 2) auszunutzen. Er konnte sowohl intraoral als auch am Modell häufig, jedoch nicht immer, einen Wurzelkontakt verhindern. Behandler 3 gelang dies zumindest am Modell, Behandler 1 gar nicht. Die schlechten Ergebnisse von Behandler 1 in diesem Zahnzwischenraum sowohl intraoral als auch am Modell sprechen für eine Fehlbeurteilung der Situation. Mesial von 45 konnte bei den intraoralen Versuchen auch nur ein Behandler häufig einen Wurzelkontakt verhindern (Behandler 1). Am Modell gelang es den Behandlern 2 und 3 jedoch sehr oft. Dies kann durchaus als ein Anzeichen für die intraoral schlechteren Sichtverhältnisse gesehen werden. Interessant ist, dass Behandler 1 mesial vom weiter posterior gelegenen Zahn 46, bei dem das Platzangebot mit 2,85 mm sogar deutlich geringer war, intraoral ebenso häufig ohne Wurzelkontakt blieb wie mesial von Zahn 45. Am Modell konnten dort alle Behandler sehr häufig einen Wurzelkontakt verhindern. Daraus lässt sich schließen, dass auch bei einem minimalen Platzangebot von 2,85 mm eine Insertion durchaus möglich sein kann, sofern die anatomischen Verhältnisse richtig eingeschätzt werden und die Sicht entsprechend gut ist.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass in der vorliegenden Studie die Gesamtquote der erfolgreichen Insertionen nicht den Erwartungen entsprach. An keinem als zur Insertion geeignet angesehenen Zahnzwischenraum konnte von allen Behandlern mehrheitlich ein Wurzelkontakt vermieden werden. Tatsächlich lag dort intraoral der Anteil der ohne Wurzelkontakt inserierten Mini-Implantate nur bei knapp 30 % (Abbildung 27). Das ist deutlich weniger als die Erfolgsquoten klinischer Studien, die mit über 83 % angegeben werden [118, 138]. Auch wenn sich die Erfolgskriterien in anderen Studien zum Teil stark unterscheiden, war diese Diskrepanz für eine *In-vitro*-Studie nicht zu erwarten. Beispielsweise wird eine Mini-Implantat-Lockerung in manchen Studien als Misserfolg gewertet, in anderen,

wenn damit noch Verankerung zu erzielen ist, nicht [131]. Doch klinische Einflussfaktoren wie Primärstabilität, periimplantäre Entzündung oder Kraftvektoren spielten in der vorliegenden Arbeit keine Rolle. Zu erwarten gewesen wäre eine im Vergleich zu den klinischen Studien ähnliche oder größere Erfolgsquote.

Einen Einfluss auf die Ergebnisse kann sicher neben dem geringen Platzangebot der in Kapitel 6.2.5 diskutierte Methodenfehler haben. Dieser kann sich zwar hinsichtlich der Ergebnisse sowohl in Richtung falsch positiv als auch in Richtung falsch negativ auswirken. In Anbetracht des geringen zur Verfügung stehenden Platzangebots kann der Methodenfehler jedoch die Ergebnisse vor allem in Richtung „Wurzelkontakt“ verfälschen. Mit großer Wahrscheinlichkeit hatte auch die Art der Durchführung einen Einfluss auf die Ergebnisse. Denn der Vorteil der Noninvasivität birgt in dieser Studie den Nachteil, dass der Behandler keinerlei Rückmeldung erhält. Er erhielt für den Fall eines Wurzelkontaktes weder Informationen über die jeweilige Gewebebeschaffenheit noch irgendeine Rückmeldung von den Probandinnen (wie in Kapitel 6.2.3 erwähnt). Bei den entsprechenden Rückmeldungen hätte zumindest ein großer Wurzelkontakt und Pulpakontakt vermieden werden können. So wird von GLASL *et al.* betont, dass laterale Wurzelverletzungen über taktile Rückmeldung nicht sicher auszuschließen sind, eine zentrale Insertion in die Wurzel jedoch unwahrscheinlich und nur bei sehr unsensiblem Vorgehen möglich ist [46]. Als weitere Gründe können die nicht optimalen Sichtverhältnisse, vor allem im posterioren Bereich aufgrund der ungewohnten Versuchsapparatur und der fehlenden Operationsleuchte, angeführt werden. Andererseits waren die Ergebnisse auf dem Gipsmodell auch schlechter als erwartet. Häufig wird beschrieben, dass der Insertionspunkt im Vorfeld markiert wird. Diese Möglichkeit war aufgrund der zahlreichen Wiederholungen in der hier vorliegenden Studie nicht möglich. Für jeden Versuch ein neues Modell herzustellen wäre denkbar gewesen, hätte aber für die Probandinnen noch keine Lösung dargestellt. Von ESTELITA *et al.* wurde eine Methode beschrieben, wie intraoral die Septummitte und somit der Insertionspunkt rasch mit Hilfe von Zahnseideimpressionen markiert werden kann [40]. Als Referenz dienen dabei die mesiale und distale Septumbegrenzung sowie der Kontaktpunkt der Zahnkronen. Bei der Markierung durch Zahnseide werden jedoch Gingiva und Parodont traumatisiert, so dass dieses Vorgehen im vorliegenden Fall bei den Probandinnen keine Alternative gewesen wäre. Ein weiterer Aspekt, der in dieser Studie zum Tragen kam, war die Auswertung der Positionen anhand dreidimensionaler Röntgendaten. Wurzelkontakte durch Mini-Implantate sind in der Literatur generell sehr selten beschrieben. Die meisten klinischen Studien nutzten lediglich

zweidimensionale Bilder [20, 21, 76, 104, 109, 113, 114, 120, 153]. Auf diesen können Kontakte mit der Wurzel oder dem Parodont nur schlecht erkannt werden [5, 18, 67, 68, 89], so dass die Anzahl an Wurzelverletzungen klinisch möglicherweise größer ist als beschrieben. Durch dreidimensionale bildgebende Verfahren kann postoperativ die Lage von Mini-Implantat zu Zahnwurzel präzise dargestellt werden. So zeigten auch DVT-basierte Nachuntersuchungen von KAU *et al.* und WANG *et al.* eine hohe Anzahl von Kontakten ihrer Mini-Implantate mit dem Parodont [64, 156]. In der Untersuchung von KAU *et al.* betraf dies zwei Drittel aller Implantate. Bei einer Dicke der Alveolenwand von zum Teil nur 0,1 Millimeter [143] besteht allerdings auch die Möglichkeit einer falsch positiven Einordnung, das heißt es wird ein Kontakt dargestellt wo keiner ist. Auf diese Möglichkeit wurde in der hier vorliegenden Studie bereits eingegangen (Kapitel 6.2.4). Dem großen Nutzen dreidimensionaler Röntgendaten steht allerdings die erhöhte Strahlenbelastung gegenüber, die vor allem bei einem jugendlichen Patientengut als kritisch zu betrachten ist [33, 55]. Nicht zuletzt hinsichtlich der aktuellen Gewebewichtungsfaktoren, die einen Anstieg der effektiven Strahlendosis zur Folge hatte [91], sollte die Indikation für eine dreidimensionale Diagnostik weiterhin strengen Richtlinien unterliegen.

Ein Punkt, der in der vorliegenden Studie bei der Auswertung der Ergebnisse nicht berücksichtigt wurde, ist die Forderung einiger Autoren nach einem Mindestabstand zu Zahnwurzeln [86, 88, 98]. Diese Forderung hat ihren Ursprung in Ergebnissen der Studien von LIOU *et al.* sowie WANG und LIOU bei Insertionen im Jochbeinfortsatz, wonach sie teilweise Bewegungen der Mini-Implantate bei Belastung feststellten [88, 157]. Da bislang zu bukkal platzierten Implantaten diesbezüglich nur wenige Daten vorliegen [1, 36], und zudem die Empfehlungen bezüglich der Größe eines Sicherheitsabstandes stark variieren, wurde einzig die Lage der Implantate bewertet, aber kein zusätzlicher Sicherheitsabstand einberechnet. Wie in Tabelle 10 erkennbar ist, wäre ein Sicherheitsabstand kaum möglich gewesen. Die in Tierstudien mikroskopisch nachgewiesenen Resorptionen von Wurzelzement und Dentin bei Nähe zum Parodontalspalt [65, 82] wurden bislang in klinischen Studien anhand von Röntgendaten nicht bestätigt und scheinen somit von geringer klinischer Bedeutung.

### 6.3.3 Vergleich der Mini-Implantatpositionen bei Platzierung am Modell versus intraoral

Ziel der Untersuchung war es, herauszufinden, ob eine Mini-Implantatposition auf einem Gipsmodell ebenso präzise festgelegt werden kann wie im Mund eines Patienten. Aufgrund der Literaturlage sowie der klinischen Erfahrungen der Behandler 1 und 2, bestand die Annahme, dass man die geeignete Stelle zur Insertion eines Mini-Implantates unter Zuhilfenahme von Röntgendaten besser im Mund eines Patienten festlegen kann als auf einem Gipsmodell. So wird von den Behandler 1 und 2 die Möglichkeit zur klinischen Beurteilung des Übergangs von beweglicher Schleimhaut zu befestigter Gingiva und die taktile Kontrolle des Wurzelverlaufs als enorm wichtig eingeschätzt. Beides ist auf einem Modell nicht möglich. Ferner sprechen zahlreiche größere Mini-Implantat-Studien, in denen Insertionshilfen nicht erwähnt werden [20, 21, 76, 104, 109, 113, 114, 120, 153], dafür, dass die Beurteilung der intraoralen Situation gegenüber der Modellsituation von Vorteil ist.

Bei allen drei Behandlern waren jedoch, im Widerspruch zu dieser Erwartung, in beiden Kiefern die Ergebnisse am Modell besser als intraoral an den Probandinnen (Abbildung 32). Erstaunlich war vor allem, dass bei den intraoralen Versuchen mehr als doppelt so häufig ein Wurzelkontakt auftrat als am Modell. Somit erscheint es durchaus möglich, durch Positionierung auf einem Gipsmodell Wurzelverletzungen verhindern zu können. Anhand von Studien konnte dies bislang nicht belegt werden. Aus den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit lässt sich aber schließen, dass auf einem Modell, insbesondere wenn noch der Verlauf der befestigten Gingiva eingezeichnet wird, ausreichend Informationen sichtbar sind um eine genaue Planung zu ermöglichen. Dies würde einige Empfehlungen für Übertragungshilfen bestärken [27, 28, 43, 67, 68, 71, 79, 97, 99, 105, 111, 170]. Unbestreitbar ist, dass man auf einem Modell einfacher und schneller einen Überblick über die Situation erhält, mit besserer Einsicht von allen Seiten. Dabei verspricht vor allem die ungehinderte Aufsicht von okklusal bei der mesiodistalen Angulation einen Vorteil [28]. Um letztlich eine Position vom Modell in den Patientenmund zu übertragen, bedarf es einer sehr exakten Übertragungshilfe. Da für die meisten der bisherigen Vorschläge (siehe Tabelle 1) die klinische Genauigkeit bislang nicht nachgewiesen wurde, scheint auf diesem Gebiet weitere Forschungsarbeit notwendig.

Es kann davon ausgegangen werden, dass der Methodenfehler in der vorliegenden Studie intraoral identisch dem am Modell ist. Somit lassen sich die großen Unterschiede bei den Ergebnissen darauf nicht zurückführen. Jedoch können andere methodisch bedingte Faktoren einen Einfluss haben. Möglicherweise hat dabei die durch die Versuchsanordnung stark

eingeschränkte Sicht bei den intraoralen Versuchen einen größeren Einfluss als erwartet. Denn die Ergebnisse der intraoralen Versuche verschlechterten sich von anterior nach posterior. Die Sichtbehinderung betraf vor allem posterior die für den Behandler wichtige Blickrichtung von anterior und schräg von vorn. Am Modell konnte dagegen die Insertionsregion auch von lateral, posterior, okklusal oder von der Gegenseite eingesehen werden. Dadurch war dieser Nachteil leichter kompensierbar. Die Blickrichtung von lateral wurde bei den intraoralen Versuchen eventuell nicht voll ausgeschöpft, da den Probandinnen unnötige Schmerzen durch übermäßiges Spannen des Mundwinkels erspart werden sollte. Zumal es sich um zahlreiche Versuchswiederholungen handelte. Erkennen lässt sich dies teilweise an den geringeren Unterschieden zwischen Modell und intraoral bei den Ergebnissen im anterioren Oberkiefer (Abbildungen 15, 17 und 19), wo die Weichteile kaum störten und die Sicht ähnlich der am Modell war. Posterior hätte man hingegen, um an der Apparatur vorbei ähnliche Sichtverhältnisse wie am Modell zu erhalten, die Wange über Maßen spannen müssen. In dieser Hinsicht kann es ein Nachteil gewesen sein, aufgrund des beschriebenen Versuchsaufbaus anstatt eines Winkelstücks ein Handstück zu verwenden. Da die Wange im Idealfall den Winkelstückkopf überdeckt hätte, wäre das extreme Spannen der Wange vermeidbar gewesen. Die Sicht von lateral wäre aber so nur indirekt über einen Spiegel möglich. Vor allem hätte so die Ausrichtung der Tracker zur Kamera erheblich größere Schwierigkeiten bereitet. Die Sicht im Insertionsgebiet hätte darunter ebenfalls gelitten. Bei schlechter Sicht kann es aber eher zu einer Fehlbeurteilung der Bohrrichtung kommen. Das wiederum kann zur Folge haben, dass diese statt senkrecht zum Approximalraum leicht in Richtung Behandler geneigt ist, wie es von KRAVITZ und KUSNOTO beschrieben wurde [74]. Dadurch kann es eher zu einer Verletzung der mesialen Wurzelfläche des distal stehenden Zahnes kommen [69].

Zusätzlich könnte, wie klinisch üblich, eine Stuhlassistenz den Lichteinfall jederzeit nach Wunsch optimieren, ohne dass der Behandler in seiner eigentlichen Tätigkeit unterbrochen würde. Für die Platzierung auf einem Gipsmodell erscheinen weder das Nichtvorhandensein einer Operationsleuchte noch eine fehlende Assistenz von Nachteil.

Die Mini-Implantate sollten von den Behandlern möglichst im Bereich der befestigten Gingiva platziert werden. Da auf einem Modell jedoch der Übergang von beweglicher Mundschleimhaut zu befestigter Gingiva nur bedingt erkennbar ist, erscheint es zumindest theoretisch möglich, dass einige der auf dem Modell positionierten Implantate im Bereich der

beweglichen Mundschleimhaut lokalisiert sind. Das Einzeichnen der mukogingivalen Grenzlinie hätte dieser Möglichkeit vorbeugen können.

#### 6.3.4 Vergleich zwischen den Behandlern

Dass die Erfahrung des jeweiligen Behandlers eine Rolle für den Erfolg spielt und beim Vorgehen eine Lernkurve erkennbar ist, wurde bereits von anderen Autoren beschrieben [8, 23, 45, 52]. Ebenfalls bestätigt wird diese Aussage anhand einer In-vitro-Studie von CHO *et al.* [23] und einer Nachuntersuchung von LIM und Mitarbeitern [84]. Daraufhin wurden die Ergebnisse der vorliegenden Studie für jeden Kiefer jeweils am Modell und an der jeweiligen Probandin hinsichtlich der unterschiedlichen Behandlererfahrung untersucht. Die Formulierung einer eindeutigen Aussage war anhand der Ergebnisse jedoch schwer möglich.

Im Unterkiefer, bei den Zwischenräumen mesial der Zähne 45 und 46, sind die intraoralen Ergebnisse von Behandler 1 deutlich besser als die der anderen beiden Behandler. Großer Wurzel- und Pulpakontakt wurde von ihm vollständig vermieden, und mit einer relativen Häufigkeit von 0,60 konnte er mehr als doppelt so häufig einen Wurzelkontakt vermeiden wie die Behandler 2 und 3. Im posterioren Oberkiefer wiederum wies intraoral Behandler 2 die besten Ergebnisse auf. Dort hatten die Behandler 1 und 3 mehr als doppelt so häufig einen Wurzelkontakt als Behandler 2. Behandler 3 blieb intraoral, mit Ausnahme des extra ausgewerteten Zwischenraumes zwischen den beiden mittleren oberen Schneidezähnen, nur mit einer relativen Häufigkeit von maximal 0,30 ohne Wurzelkontakt. Allerdings sind seine Ergebnisse im posterioren Oberkiefer nahezu identisch mit denen von Behandler 1 und im posterioren Unterkiefer sogar gering besser als die von Behandler 2. Somit ist nicht erkennbar, ob es Unterschiede in der jeweiligen Erfahrung bei der Mini-Implantatinsertion gibt.

In einer Nachuntersuchung von LIM *et al.* bei 407 Mini-Implantaten traten Unterschiede aufgrund der jeweiligen Behandlererfahrung auf [84]. Dabei wurde unterschieden, ob die Behandler bereits mehr als 20 Insertionen durchgeführt hatten oder weniger. Die erfahrenen Behandler erzielten signifikant häufiger Primärstabilität und eine um 7,1 % höhere Erfolgsrate. Als Ursache für die häufigere Primärstabilität wurde von Ihnen vermutet, dass unerfahrene Behandler beim Inserieren mehr schlingern, und so das Implantatbett eher etwas zu groß ist. Die Primärstabilität konnte in der vorliegenden Studie allerdings aufgrund der rein virtuellen Insertion nicht untersucht werden. Die höhere Erfolgsrate wurde von LIM *et al.* auf die Vermeidung von Wurzelnähe zurückgeführt, was in der Untersuchung den Behandlern mit

der größeren Erfahrung besser gelungen sein könnte. Sie beriefen sich dabei auf eine Aussage von KURODA *et al.* [77], wonach Wurzelnähe häufiger zu Implantatverlusten führen soll. Obwohl in der vorliegenden Studie der Unterschied zwischen den erfahrenen Behandlern und dem unerfahrenen Behandler über 100 Insertionen betrug, war an den einzelnen Insertionsstellen kein Zusammenhang zwischen Erfahrung und Platzierung erkennbar. Betrachtet man allerdings die Ergebnisse von Ober- und Unterkiefer zusammen, so ist intraoral eine deutliche Abstufung entsprechend der Behandlererfahrung erkennbar.

An den Modellen waren die Unterschiede zwischen den Behandlern geringer (siehe Abbildungen 29 und 31). Behandler 2 konnte jeweils etwas häufiger einen Wurzelkontakt verhindern, aber zwischen Behandler 1 und Behandler 3 bestand kein Unterschied. Somit geben die Ergebnisse der Versuche an den Modellen in keiner Weise die Unterschiede in der Behandlererfahrung wieder.

Von einigen Autoren werden zur Vermeidung von Wurzelkontakten Empfehlungen für die jeweils günstigsten Insertionswinkel gegeben. Häufig wird ein Winkel kleiner als  $45^\circ$  zur Zahnachse empfohlen [70, 78, 80]. Dadurch dringen die Implantatspitzen weniger weit in den Approximalraum vor als bei einer eher horizontalen Insertion. Laut KIM *et al.* kommt es bei einer horizontalen Insertion auch eher zu einer distalen Inklination des Implantates [69]. Dies erhöht die Gefahr eines mesiobukkalen Wurzelkontaktes am distalen Zahn des Approximalraumes. Um mögliche Zusammenhänge zwischen dem Winkel der Implantatachse zur Zahnachse und den vermiedenen Wurzelkontakten festzustellen, und um eventuell verschiedene Techniken bei den Behandlern zu erkennen, wurden diese Winkel jeweils gemessen (Tabelle 12). Genutzt wurde dazu auf der Arbeitsoberfläche der BZMM-Dental-Software (siehe Abbildung 9) die Darstellung links unten. Dort wird der Winkel der Implantatachse visualisiert. Die Messung der Zahnachse erwies sich dabei etwas schwierig, da mesial und distal stehender Zahn teilweise unterschiedliche Angulationen aufwies. In diesen Fällen wurde der Winkel gemittelt. Dabei wurde festgestellt, dass sich die Ausrichtung der Implantatachse hinsichtlich der vertikalen Inklination bei den drei Behandlern nicht wesentlich unterschied. Einzig im Oberkiefer intraoral betrug der Unterschied zwischen Behandler 1 und 3 durchschnittlich  $13^\circ$ .

Tabelle 12: **Übersicht der Insertionswinkel zur Zahnachse [°]**  
 Angegeben sind jeweils Mittelwert und Standardabweichung.

	Behandler 1	Behandler 2	Behandler 3
Oberkiefer Proband	55±5	48±3	42±6
Oberkiefermodell	57±3	57±5	53±4
Unterkiefer Proband	77±7	80±6	72±9
Unterkiefermodell	75±3	72±4	72±3

Im Oberkiefer waren die Winkel zur Zahnachse mit circa 42 bis 55° kleiner als im Unterkiefer, wo sie 72 bis 80° Grad betragen. Im Unterkiefer lagen die Winkel somit in dem von MOON *et al.* empfohlenen Bereich [109]. Bei Behandler 3 waren sie im Durchschnitt jeweils um wenige Grad kleiner als bei den anderen beiden Behandlern, so dass er etwas steiler inserierte, die Behandler 1 und 2 eher etwas horizontaler. Die Unterschiede waren jedoch gering. Erstaunlicherweise traten bei Behandler 2 in beiden Kiefern und bei Behandler 3 im Oberkiefer Unterschiede in der Inklination zwischen der intraoralen und der Modellsituation von bis zu 10° auf. Im Oberkiefer waren die Angulationen zur Zahnachse jeweils auf dem Modell größer, im Unterkiefer intraoral. Trotz der mehr horizontalen Ausrichtung traten auch im Oberkiefer weniger Wurzelkontakte auf dem Modell auf. Im Oberkiefer an der Probandin waren bei Behandler 3 die Winkel kleiner als 45°, die Ergebnisse jedoch ähnlich denen von Behandler 1 mit 55°. Bei beiden trat aber häufiger ein Wurzelkontakt auf als bei Behandler 2, dessen Inklination mit durchschnittlich 48° genau dazwischen lag. Im Unterkiefer am Modell wurden trotz des großen Winkels zur Zahnachse von allen Behandlern mit einer relativen Häufigkeit von mindestens 0,65 Wurzelkontakte vermieden. Zusammenhänge zwischen den Insertionswinkeln und dem Vermeiden von Wurzelkontakten ließen sich somit in der vorliegenden Studie nicht feststellen.

Überraschende Ergebnisse lieferten die Zahnzwischenräume im Oberkiefer mesial von 11 und von 13, die aus den in Kapitel 4.3 beschriebenen Gründen nicht in die Gesamtauswertung eingingen. Zwischen den beiden mittleren Inzisivi waren die Ergebnisse intraoral bei den erfahrenen Behandlern (Behandler 1 und 2) gleich denen am Modell. Behandler 3 konnte intraoral sogar häufiger Wurzelkontakt vermeiden als auf dem Modell. Aufgrund der guten Einsicht in das Insertionsgebiet ist es gut möglich, dass die in Kapitel 6.2.3 beschriebenen Nachteile bei den intraoralen Versuchen hier keine Rolle spielten. Zudem scheint für unerfahrene Behandler, wie in der hier vorliegenden Studie Behandler 3, die Ausrichtung eines Implantates zwischen den mittleren Inzisivi weniger schwierig als weiter posterior.

Mesial von 13 fällt auf, dass vor allem Behandler 1, der diesen Zwischenraum als gut geeignet bewertete, am Modell mit 0,80 die höchste Quote an Wurzelkontakten aufwies (siehe Abbildung 34). Intraoral erreichte er wie Behandler 3 „kein Kontakt“ auch nur mit einer relativen Häufigkeit von 0,30. Auf die Schwierigkeit, anhand einer Panoramaschichtaufnahme, die Eckzahnregion ob ihrer Eignung zur Mini-Implantatinsertion zu beurteilen, haben bereits SCHNELLE *et al.* hingewiesen [141]. Dass aber in der vorliegenden Studie eine Insertion an diesem Zahnzwischenraum möglich war, zeigen die Ergebnisse von Behandler 2 intraoral und von Behandler 3 am Modell.

Da in dieser Studie keine Versuche auf der linken Probandenseite durchgeführt werden konnten, war es nicht möglich, die Ergebnisse hinsichtlich der Unterschiede zwischen der linken und rechten Probandinnenseite zu untersuchen. Unterschiede zwischen den Insertionsseiten wurden von PARK *et al.* [120] sowie von CHO *et al.*, dabei speziell in Abhängigkeit von der Behandlererfahrung [23], bereits beschrieben.

### 6.3.5 Vergleich zwischen Oberkiefer und Unterkiefer

Zahlreiche Mini-Implantatstudien kommen zu dem Ergebnis, dass Ober- oder der Unterkiefer nicht gleichermaßen gut für eine Min-Implantatinsertion geeignet sind. Häufig finden sich geringere Verlustraten im Oberkiefer [32, 76, 77, 96, 120]. So scheinen für den Unterkiefer der posterior nur sehr schmale Streifen an befestigter Gingiva [19, 21, 77] und die Überhitzungsgefahr bei der Pilotbohrung aufgrund der dickeren Kortikalis von Nachteil zu sein [120]. BORAH und ASHMEAD behaupten, im Unterkiefer käme es häufiger zu Wurzelkontakten als im Oberkiefer [11]. Ursache dafür soll die dickere Kortikalis und der dadurch schlechter erkennbare Wurzelverlauf sein. Dabei handelt es sich allerdings nicht um eine kieferorthopädische Studie. Andere Arbeiten beschreiben für Ober- und Unterkiefer jedoch weitgehend identische Ergebnisse [84, 109, 114]. Untersucht wurde die Eignung der Kiefer dabei zwar nicht hinsichtlich möglicher Wurzelkontakte, sondern lediglich im Zusammenhang mit Implantatverlusten. Da aber Wurzelkontakt und Implantatverluste durchaus auch in Zusammenhang stehen, erschien es sinnvoll, die Ergebnisse der vorliegenden Studie in Abhängigkeit vom jeweiligen Kiefer zu untersuchen.

In der vorliegenden Arbeit wurden keine Unterschiede zwischen den beiden Kiefern erwartet, da in beiden Kiefern geeignete Implantationsstellen vorlagen und weder Knochen- noch Gingivabeschaffenheit eine Rolle spielten. Dennoch traten sowohl intraoral als auch am Modell im Unterkiefer weniger Kontakte zwischen Zahnwurzel und Mini-Implantat auf. Zwar

gibt die Position eines Implantates noch keinen Aufschluss über einen späteren Behandlungserfolg, dennoch stehen die Ergebnisse zumindest der Behauptung von BORAH und ASHMEAD entgegen. Auf einem Modell ist die Palpation der Schleimhaut und der darunter befindlichen Strukturen nicht möglich. Somit spielt die Schleimhautbeschaffenheit dort keine Rolle. Wurzelkonturen sind sowohl im Ober- als auch im Unterkiefer auf einem Modell nur schwer zu erkennen. Umso mehr überrascht, dass auf dem Unterkiefermodell Wurzelkontakt um 30 % seltener auftrat als auf dem Oberkiefermodell. Daraus kann man zumindest ableiten, dass der Wurzelverlauf im Unterkiefer nicht schlechter erkennbar war als im Oberkiefer.

Da es technisch mit der hier verwendeten Methode nicht möglich war, beide Kiefer der jeweiligen Probandinnen zu nutzen, standen zum Vergleich nur die Unterlagen von je einem Unter- und einem Oberkiefer zur Verfügung. Insofern sollten die hier gewonnenen Ergebnisse nicht verallgemeinert werden.

### 6.3.6 Vergleich zwischen Mini-Implantaten verschiedener Längen und Durchmesser

Die Bandbreite der im Handel erhältlichen Mini-Implantate ist groß. Dabei variieren Größe und Design zum Teil sehr stark. Aufgrund des limitierten Platzangebotes bei der vestibulären Insertion ist davon auszugehen, dass die Gefahr einer Wurzelschädigung je nach Länge und Durchmesser unterschiedlich groß ist. Je kürzer das Implantat und je geringer der Durchmesser, umso niedriger ist das Risiko einer Wurzelschädigung. Ob sich die Wurzelkontakte aber bei zunehmendem Durchmesser oder bei zunehmender Länge häufen, und in welcher Abhängigkeit, sollte in dieser Studie untersucht werden.

Das Mini-Implantat mit den geringsten Dimensionen der in Tabelle 3 aufgeführten Implantate war der tomas-pin N 06. Er erzielte mit einer relativen Häufigkeit von 0,50 für „kein Kontakt“ die besten Ergebnisse. Dass fast 50 % der virtuell gesetzten Mini-Implantate einen Wurzelkontakt aufwiesen ist zwar nicht als gut einzuschätzen, die Gründe hierfür wurden aber bereits in den Kapiteln 6.2 und 6.3.1 diskutiert. Die Schaftlänge bei diesem Implantat beträgt 6,0 mm. Somit scheint es am besten geeignet, um eine sichere Platzierung zu gewährleisten, da der im Knochen befindliche Anteil laut DEGUCHI *et al.* vier Millimeter nicht überschreiten sollte [31]. Für die Primärstabilität der Implantate scheinen ohnehin ausschließlich der Implantatdurchmesser [167, 168] und die Dicke der Kortikalis entscheidend [104, 145, 146]. Demzufolge ist die Länge des in der Spongiosa befindlichen

Anteils vom Implantatschaft unerheblich, so dass zur Wurzelschonung daher möglichst kurze Mini-Implantate verwendet werden könnten. Längere Implantate werden lediglich bei dicker Schleimhaut empfohlen, wie sie im Oberkiefer palatinal vorkommt [78, 80].

Anhand der Ergebnisse in ist zu erkennen, dass in der vorliegenden Studie der Durchmesser einen größeren Einfluss auf einen möglichen Wurzelkontakt hatte als die Implantatlänge. Geringere Durchmesser senken demnach die Gefahr eines Wurzelkontaktes. In der Literatur wird aber darauf hingewiesen, dass zu geringe Durchmesser häufiger zu Implantatfrakturen und Lockerungen führen [14, 15, 101, 120]. Von Durchmessern unter 1,2 mm wird daher abgeraten [14, 96, 104, 120]. Im Alveolarfortsatz finden Mini-Implantate bis zu 2,0 mm Durchmesser, so genannte „Notfallschrauben“ auch bis zu 2,3 mm, ihren Einsatz [138]. Als bester Kompromiss zwischen Stabilität und Dimensionierung wird laut LUDWIG *et al.* ein Durchmesser von 1,6 -1,7 mm angesehen [92]. Wurzelnähe kann aufgrund der anatomischen Verhältnisse jedoch auch damit nicht vermieden werden. Einige Autoren halten es für sinnvoll, konische Mini-Implantate mit einem geringen Durchmesser zu verwenden und nur bei fehlender Primärstabilität den nächst größeren Durchmesser zu wählen [50, 78]. So ist die für Frakturen besonders gefährdete Implantatschulter ausreichend stabil, während die Reduzierung des Durchmessers Richtung Implantatspitze die Gefahr einer Wurzelverletzung deutlich verringert. Dies erscheint anhand der vorliegenden Ergebnisse eine sinnvolle Möglichkeit, da bei steigendem Durchmesser eine deutliche Zunahme an Wurzelkontakten erkennbar war. Als Beispiel kann die bei den verschiedenen Implantattypen vergleichbare Schaftlänge von 8,0 mm für den tomas-pin N 08 sowie 7,6 mm für das Aarhus mini-implant „short“ angeführt werden. Während für den tomas-pin N 08 mit 1,6 mm Durchmesser die relative Häufigkeit für „kein Kontakt“ 0,43 betrug, war sie für das Aarhus mini-implant „short“ bei 2,0 mm Durchmesser mit 0,32 deutlich geringer.

### 6.3.7 Lernkurve

Das verwendete Navigationssystem war für alle mitwirkenden Behandler unbekannt. Die Ergebnisse zeigten eine Lernkurve bei allen drei Behandlern (Abbildungen 38 und 39). Da die Behandler keine zusätzlichen Informationen über die Ergebnisse aus den vorherigen Versuchen erhielten, ist die Lernkurve ausschließlich in der Gewöhnung und der daraus resultierenden Sicherheit im Umgang mit dem Navigationssystem begründet. Neben der eigentlichen Handhabung sind damit ebenso die Art der Kommandos zum „Einfrieren“ einer gewünschten Implantatposition, das kurzzeitige Aufrechterhalten dieser Position sowie der

ständige Blick auf die Systemampeln gemeint. Dieser Ablauf verselbstständigte sich erst im Laufe der Versuche. Die synchrone Abarbeitung aller Gruppen stellte dabei sicher, dass Lerneffekte nicht zum Verzerrern der Ergebnisse, und somit zu einem Bias führten. Dies hätte der Fall sein können, wenn man die beiden Probandinnen und die entsprechenden Unterlagen (zum einen am Modell, zum anderen intraoral), jeweils mit allen zehn Versuchsdurchgängen nacheinander abgearbeitet hätte.

Die Nutzung eines für alle Behandler bekannten Systems, oder aber eine längere Übungs- oder Trainingphase mit dem beschriebenen System, hätten eine Lernkurve dahingehend beeinflussen können, dass zwischen erster und zweiter Versuchshälfte keine signifikanten oder nur sehr geringe Unterschiede entstehen. Es lässt sich daher vermuten, dass bei einer Fortführung der Versuche bei allen Behandlern die relative Häufigkeit der Wurzelverletzungen weiter abgenommen hätte.

## 7 Zusammenfassungen

### 7.1 Zusammenfassung

Mini-Implantate haben sich in der Kieferorthopädie vor allem dort als Verankerungsalternative bewährt, wo die Behandlung eine sichere Verankerung erfordert. Ideal für die Biomechanik der Apparaturen und die Stabilität der Mini-Implantate ist eine Insertion in den zahntragenden Alveolarfortsatz im Bereich der befestigten Gingiva. Diese Lokalisation stellt jedoch eine Gefahr für die benachbarten Zahnwurzeln dar, zudem steigt bei einem Wurzelkontakt die Misserfolgswahrscheinlichkeit. In der Literatur werden zahlreiche Verfahren zur Übertragung einer auf einem Modell geplanten Implantatposition sowie Hilfsvorrichtungen zur sicheren intraoralen Positionierung von Mini-Implantaten beschrieben, ohne dass die Tauglichkeit dieser Verfahren bisher nachgewiesen wurde. In der vorliegenden Studie wurde untersucht, ob Wurzelverletzungen vermieden werden können, wenn die Implantatposition unter Zuhilfenahme einer Panoramaschichtdarstellung an einem Gipsmodell geplant wird. Dabei lag auch ein Augenmerk auf der Erfahrung der Behandler.

Dazu wurde im Rahmen dieser Pilotstudie ein optisches Navigationssystem (Lapdoc, BZMM) genutzt, mit dessen Hilfe Mini-Implantat-Insertionen simuliert werden konnten. Hierdurch konnten mehrere Behandler an denselben Probandinnen und deren Modellen Insertionen simulieren. Die räumliche Beziehung zwischen Zähnen, Knochen und Weichteilen wurden über eine dentale Volumetomographie und einen Navigationsbogen mit optischen Markierungselementen hergestellt. Der Methodenfehler des Systems wurde im Vorfeld mit einer Abweichung von 0,66 mm und 0,38° bestimmt. Die „Insertion“ wurde mit einem chirurgischen Handstück simuliert. Jeder der drei teilnehmenden Behandler legte im Vorfeld anhand einer Panoramaschichtdarstellung die zur Insertion geeigneten Zahnzwischenräume fest. Anschließend wurden an den Gipsmodellen und an den Probandinnen pro Zahnzwischenraum jeweils zehn Insertionen durchgeführt. Die Implantatpositionen wurden als Datensätze abgespeichert. Nach der Auswertung der Ergebnisse konnten dann die verschiedenen Behandler, deren Techniken, die Unterschiede zwischen Modell und intraoral sowie die verschiedenen Kiefer miteinander verglichen werden. Zudem war es möglich, für die abgespeicherten Positionen Mini-Implantate verschiedener Größen einzusetzen.

Untersucht wurden die Ergebnisse dieser Studie jeweils auf Häufigkeit und Ausmaß von Wurzelverletzungen. Zunächst haben sich die Panoramaschichtdarstellungen für die hier untersuchten Probandinnen nicht als zuverlässiges prognostisches Mittel für das Vermeiden

von Kontakten zwischen Mini-Implantaten und Zahnwurzeln erwiesen. Die von den Behandlern anhand der Panoramaschichtdarstellungen ausgewählten Insertionsstellen erwiesen sich als die bestmöglichen. Jedoch war das zur Verfügung stehende Knochenlager mit 2,85 mm bis 3,35 mm geringer, als es für eine sichere Insertion notwendig gewesen wäre. Die Anzahl der Wurzelverletzungen war dementsprechend höher als erwartet. Es zeigte sich, dass alle Behandler am Gipsmodell häufiger einen Wurzelkontakt vermeiden konnten als intraoral. Insgesamt konnte an den Modellen mit einer relativen Häufigkeit von 0,58 mehr als doppelt so häufig ein Wurzelkontakt vermieden werden wie bei den intraoralen Versuchen mit einer relativen Häufigkeit von 0,28. Am Gipsmodell war ein Zusammenhang zwischen der Erfahrung der Behandler und den Ergebnissen nicht erkennbar. Die Erfahrung der Behandler wirkte sich jedoch positiv auf den Erfolg der intraoral platzierten Mini-Implantate aus. Im Unterkiefer traten Wurzelkontakte weniger häufig auf als im Oberkiefer (intraoral mit einer relativen Häufigkeit von 0,1 häufiger, am Modell mit einer relativen Häufigkeit von 0,28). Der Einfluss des Implantatdurchmessers auf die Anzahl der Wurzelkontakte war größer als der Einfluss der Implantatlänge. Dies zeigte sich in der größeren Anzahl der Wurzelkontakte bei den Implantaten mit einem Durchmesser von 2,0 mm im Vergleich zu den Implantaten mit 1,6 mm Durchmesser. Beim Umgang mit dem für alle Behandler unbekanntem Navigationssystem war zudem eine Lernkurve erkennbar.

Die Häufigkeit der in der vorliegenden Studie auftretenden Wurzelkontakte übertraf die in der Literatur angegebenen Misserfolgsraten von Mini-Implantaten um ein Vielfaches. Als mögliche Ursachen können die tatsächlich vorhandenen Platzverhältnisse, die eingeschränkten Sichtverhältnisse im Insertionsgebiet und der Methodenfehler angeführt werden. Zudem sind Wurzelkontakte anhand der dreidimensionalen Datensätze besser diagnostizierbar. Jedoch deuten die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit darauf hin, dass auf einem Gipsmodell ausreichend Informationen zur Verfügung stehen, um eine Mini-Implantatposition ohne Wurzelschädigung festzulegen. Die Entwicklung von weiteren Übertragungssystemen, die präzise eine Implantatposition von einem Gipsmodell in den Patientenmund übertragen, erscheint somit sinnvoll.

## 7.2 Summary

Within orthodontics, mini-implants proved of value especially in cases where stable anchorage was necessary. An interradicular insertion on the vestibular side in the area of the fixed gingiva is ideal for the biomechanic of the appliance and the stability of the mini-implants. This location, however, constitutes a risk of damage to the adjacent roots. Additionally, the possibility of a failure increases in case of a root contact. Literature presents numerous methods and auxiliary devices for a safe positioning of mini-implants, yet the efficiency of these methods has not been proved. This survey investigates if an injury of roots can be avoided by planning the implant position on a cast. Special attention lay on the clinicians experience.

For this purpose an optical navigation system (lapdoc, BZMM) was used, allowing the simulation of the insertion of mini-implants. Therefore, several clinicians were able to simulate insertions on the same subjects and their casts. The relation of teeth, bone and soft tissue was done by using cone-beam computed tomography and navigation bow with optical check marks. The method error was determined previously with a deviation of 0,66 mm and 0,38°. The insertion was simulated with a surgical hand tool. First, each one of the three participating clinicians defined the suitable mini-implant insertion sites, using virtually created panoramic views. Then, ten insertions were made in each of the casts and subjects. The implant positions were saved as data sets. The analysis of the results proved that a comparison could be established not only between the different jaws, the various clinicians and their insertion technique, but also between the difference of an insertion in the cast and of an intraoral insertion. Additionally, mini-implants of various sizes were used for the different saved positions.

The results of the study were examined according to the frequency and degrees of root injuries. Panoramic view did initially not prove to be an appropriate method for avoiding root contact. The insertion sites chosen by the clinicians with the help of the panoramic view appeared to be the most suitable, but the available bone was less than what is needed for a safe insertion. But the available bone was with 2,85 mm to 3,35 mm not adequate for a save insertion. Therefore, the number of root injuries was higher than expected. It seems that all clinicians were able to avoid a root contact more often on a cast than intraoral. Comparing with intraoral attempts, with a relative incidence of 0,58 more than twice the number root-contacts could prevented on the casts (intraoral 0,28). Also, a correlation of the clinicians experience and his results on the casts could not be identified. However, the clinicians

experience affected the success of the intraoral positioning of mini-implants. Root contact occurred less often in the mandible than in the maxilla. The effect of the implants diameter on the number of root contacts was bigger than the impact of the length of the implants. Furthermore, there was an evident learning curve of the handling of the system formerly unknown to the clinicians.

In the present study, the frequency of root contacts exceeded the failure rates observed in the literature far more than expected. Possible causes might be the actual space available, limited visibility conditions of the insertion area and the system error. Moreover the three-dimensional data sets allowed to diagnose root contact more easily. Still, the results of the present study indicate that a cast presents sufficient information for positioning a mini-implant without injuring the roots.

## 8 Literaturverzeichnis

1. Alves M, Jr., Baratieri C, Nojima LI (2011): Assessment of mini-implant displacement using cone beam computed tomography, *Clin Oral Implants Res* (Band 22), Nr. 10, Seite 1151-6
2. Angle EH (1913): Die Okklusionsanomalien der Zähne Seite 325-339
3. Apel S, Apel C, Morea C, et al. (2009): Microflora associated with successful and failed orthodontic mini-implants, *Clin Oral Implants Res* (Band 20), Nr. 11, Seite 1186-90
4. Asscherickx K, Vannet BV, Wehrbein H, et al. (2005): Root repair after injury from mini-screw, *Clin Oral Implants Res* (Band 16), Nr. 5, Seite 575-8
5. Asscherickx K, Vannet BV, Wehrbein H, et al. (2008): Success rate of miniscrews relative to their position to adjacent roots, *Eur J Orthod* (Band 30), Nr. 4, Seite 330-5
6. Baker RW, Guay AH, Peterson HW, Jr. (1972): Current concepts of anchorage management, *Angle Orthod* (Band 42), Nr. 2, Seite 129-38
7. Bauer W, Diedrich P (1990): Motivation und Erfolgsbeurteilung erwachsener Patienten zur kieferorthopädischen Behandlung - Interpretation einer Befragung, *Fortschr Kieferorthop* (Band 51), Nr. 3, Seite 180-8
8. Berens A, Wiechmann D, Dempf R (2006): Mini- and micro-screws for temporary skeletal anchorage in orthodontic therapy, *J Orofac Orthop* (Band 67), Nr. 6, Seite 450-8
9. Bernhart T, Freudenthaler J, Dortbudak O, et al. (2001): Short epithetic implants for orthodontic anchorage in the paramedian region of the palate. A clinical study, *Clin Oral Implants Res* (Band 12), Nr. 6, Seite 624-31
10. Block MS, Hoffman DR (1995): A new device for absolute anchorage for orthodontics, *Am J Orthod Dentofacial Orthop* (Band 107), Nr. 3, Seite 251-8
11. Borah GL, Ashmead, D. (1996): The fate of teeth transfixed by osteosynthesis screws, *Plast Reconstr Surg* (Band 97), Nr. 4, Seite 726-9
12. Bousquet F, Bousquet P, Mauran G, et al. (1996): Use of an impacted post for anchorage, *J Clin Orthod* (Band 30), Nr. 5, Seite 261-5
13. Brisceno CE, Rossouw PE, Carrillo R, et al. (2009): Healing of the roots and surrounding structures after intentional damage with miniscrew implants, *Am J Orthod Dentofacial Orthop* (Band 135), Nr. 3, Seite 292-301
14. Büchter A, Wiechmann D, Koerdt S, et al. (2005): Load-related implant reaction of mini-implants used for orthodontic anchorage, *Clin Oral Implants Res* (Band 16), Nr. 4, Seite 473-9
15. Carano A, Velo S, Leone P, et al. (2005): Clinical applications of the Miniscrew Anchorage System, *J Clin Orthod* (Band 39), Nr. 1, Seite 9-24
16. Chaddad K, Ferreira AF, Geurs N, et al. (2008): Influence of surface characteristics on survival rates of mini-implants, *Angle Orthod* (Band 78), Nr. 1, Seite 107-13
17. Chaimanee P, Suzuki B, Suzuki EY (2011): "Safe zones" for miniscrew implant placement in different dentoskeletal patterns, *Angle Orthod* (Band 81), Nr. 3, Seite 397-403
18. Chen YH, Chang HH, Chen YJ, et al. (2008): Root contact during insertion of miniscrews for orthodontic anchorage increases the failure rate: an animal study, *Clin Oral Implants Res* (Band 19), Nr. 1, Seite 99-106

19. Chen YJ, Chang HH, Huang CY, et al. (2007): A retrospective analysis of the failure rate of three different orthodontic skeletal anchorage systems, *Clin Oral Implants Res* (Band 18), Nr. 6, Seite 768-75
20. Chen YJ, Chang HH, Lin HY, et al. (2008): Stability of miniplates and miniscrews used for orthodontic anchorage: experience with 492 temporary anchorage devices, *Clin Oral Implants Res* (Band 19), Nr. 11, Seite 1188-96
21. Cheng SJ, Tseng IY, Lee JJ, et al. (2004): A prospective study of the risk factors associated with failure of mini-implants used for orthodontic anchorage, *Int J Oral Maxillofac Implants* (Band 19), Nr. 1, Seite 100-6
22. Chin MY, Sandham A, de Vries J, et al. (2007): Biofilm formation on surface characterized micro-implants for skeletal anchorage in orthodontics, *Biomaterials* (Band 28), Nr. 11, Seite 2032-40
23. Cho UH, Yu W, Kyung HM (2010): Root contact during drilling for microimplant placement. Affect of surgery site and operator expertise, *Angle Orthod* (Band 80), Nr. 1, Seite 130-6
24. Choi HJ, Kim TW, Kim HW (2007): A precise wire guide for positioning interradicular miniscrews, *J Clin Orthod* (Band 41), Nr. 5, Seite 258-61
25. Chung KR, Kim SH, Kook YA (2004): The C-orthodontic micro-implant, *J Clin Orthod* (Band 38), Nr. 9, Seite 478-86
26. Costa A, Raffainl M, Melsen B (1998): Miniscrews as orthodontic anchorage: a preliminary report, *Int J Adult Orthodon Orthognath Surg* (Band 13), Nr. 3, Seite 201-9
27. Cousley RR (2009): A stent-guided mini-implant system, *J Clin Orthod* (Band 43), Nr. 6, Seite 403-7
28. Cousley RR, Parberry DJ (2006): Surgical stents for accurate miniscrew insertion, *J Clin Orthod* (Band 40), Nr. 7, Seite 412-7
29. Creekmore TD, Eklund MK (1983): The possibility of skeletal anchorage, *J Clin Orthod* (Band 17), Nr. 4, Seite 266-9
30. Dao V, Renjen R, Prasad HS, et al. (2009): Cementum, pulp, periodontal ligament, and bone response after direct injury with orthodontic anchorage screws: a histomorphologic study in an animal model, *J Oral Maxillofac Surg* (Band 67), Nr. 11, Seite 2440-5
31. Deguchi T, Nasu M, Murakami K, et al. (2006): Quantitative evaluation of cortical bone thickness with computed tomographic scanning for orthodontic implants, *Am J Orthod Dentofacial Orthop* (Band 129), Nr. 6, Seite 7-12
32. Deguchi T, Takano-Yamamoto T, Kanomi R, et al. (2003): The use of small titanium screws for orthodontic anchorage, *J Dent Res* (Band 82), Nr. 5, Seite 377-81
33. Deutsche Gesellschaft für Zahn- M-uKeVD (2009): S1-Empfehlung Dentale Volumentomographie (DVT), Leitlinien der DGZMK
34. Diedrich P (1993): Verschiedene orthodontische Verankerungssysteme, *Fortschr Kieferorthop* (Band 54), Nr. 4, Seite 156-71
35. Diedrich P (2000): Implantate zur orthodontischen Verankerung, *PDZ, Kieferorthopädie* (Band 11/2) Seite 157-167
36. El-Beialy AR, Abou-El-Ezz AM, Attia KH, et al. (2009): Loss of anchorage of miniscrews: a 3-dimensional assessment, *Am J Orthod Dentofacial Orthop* (Band 136), Nr. 5, Seite 700-7
37. Er K, Bayram M, Tasdemir T (2011): Root canal treatment of a periradicular lesion caused by unintentional root damage after orthodontic miniscrew placement: a case report, *Int Endod J* (Band 44), Nr. 12, Seite 1170-5

38. Erverdi N, Acar A (2005): Zygomatic anchorage for en masse retraction in the treatment of severe Class II division 1, *Angle Orthod* (Band 75), Nr. 3, Seite 483-90
39. Estelita S, Janson G, Chiqueto K, et al. (2006): A three-dimensional radiographic-surgical guide for mini-implant placement, *J Clin Orthod* (Band 40), Nr. 9, Seite 548-54
40. Estelita S, Janson G, Chiqueto K, et al. (2011): Mini-implant insertion based on tooth crown references: a guide-free technique, *Int J Oral Maxillofac Surg*
41. Estelita S, Janson G, Chiqueto K, et al. (2009): Predictable drill-free screw positioning with a graduated 3-dimensional radiographic-surgical guide: a preliminary report, *Am J Orthod Dentofacial Orthop* (Band 136), Nr. 5, Seite 722-35
42. Fabbroni G, Aabed S, Mizen K, et al. (2004): Transalveolar screws and the incidence of dental damage: a prospective study, *Int J Oral Maxillofac Surg* (Band 33), Nr. 5, Seite 442-6
43. Freudenthaler JW, Haas R, Bantleon HP (2001): Bicortical titanium screws for critical orthodontic anchorage in the mandible: a preliminary report on clinical applications, *Clin Oral Implants Res* (Band 12), Nr. 4, Seite 358-63
44. Gainsforth BL, Higley, L.B. (1945): A study of orthodontic anchorage possibilities in basal bone, *Am J Orthod Oral Surg* (Band 31), Seite 406-17
45. Garfinkle JS, Cunningham LL, Jr., Beeman CS, et al. (2008): Evaluation of orthodontic mini-implant anchorage in premolar extraction therapy in adolescents, *Am J Orthod Dentofacial Orthop* (Band 133), Nr. 5, Seite 642-53
46. Glasl B, Ludwig B, Kinzinger G, et al. (2010): Aktuelle Übersicht zum Risikopotenzial von Wurzelverletzungen bei interrädikulärer Insertion orthodontischer Miniimplantate/Minischrauben, *Kieferorthopädie* (Band 24), Nr. 1, Seite 7-15
47. Glatzmaier J, Wehrbein H, Diedrich P (1996): Biodegradable implants for orthodontic anchorage. A preliminary biomechanical study, *Eur J Orthod* (Band 18), Nr. 5, Seite 465-9
48. Gray JB, Steen ME, King GJ, et al. (1983): Studies on the efficacy of implants as orthodontic anchorage, *Am J Orthod* (Band 83), Nr. 4, Seite 311-7
49. Heidemann W, Gerlach KL, Grobel KH, et al. (1998): Influence of different pilot hole sizes on torque measurements and pullout analysis of osteosynthesis screws, *J Craniomaxillofac Surg* (Band 26), Nr. 1, Seite 50-5
50. Heidemann W, Terheyden H, Gerlach KL (2001): Analysis of the osseous/metal interface of drill free screws and self-tapping screws, *J Craniomaxillofac Surg* (Band 29), Nr. 2, Seite 69-74
51. Hembree M, Buschang PH, Carrillo R, et al. (2009): Effects of intentional damage of the roots and surrounding structures with miniscrew implants, *Am J Orthod Dentofacial Orthop* (Band 135), Nr. 3, Seite 281-9
52. Herman RJ, Currier GF, Miyake A (2006): Mini-implant anchorage for maxillary canine retraction: a pilot study, *Am J Orthod Dentofacial Orthop* (Band 130), Nr. 2, Seite 228-35
53. Hernandez LC, Montoto G, Puente Rodriguez M, et al. (2008): 'Bone map' for a safe placement of miniscrews generated by computed tomography, *Clin Oral Implants Res* (Band 19), Nr. 6, Seite 576-81
54. Heymann GC, Tulloch JF (2006): Implantable devices as orthodontic anchorage: a review of current treatment modalities, *J Esthet Restor Dent* (Band 18), Nr. 2, Seite 68-79
55. Horner K, Islam M, Flygare L, et al. (2009): Basic principles for use of dental cone beam computed tomography: consensus guidelines of the European Academy of

- Dental and Maxillofacial Radiology, Dentomaxillofac Radiol (Band 38), Nr. 4, Seite 187-95
56. Hu KS, Kang MK, Kim TW, et al. (2009): Relationships between dental roots and surrounding tissues for orthodontic miniscrew installation, Angle Orthod (Band 79), Nr. 1, Seite 37-45
  57. Huja SS, Grubaugh EL, Rummel AM, et al. (2009): Comparison of hand-traced and computer-based cephalometric superimpositions, Angle Orthod (Band 79), Nr. 3, Seite 428-35
  58. Hwang YC, Hwang HS (2011): Surgical repair of root perforation caused by an orthodontic miniscrew implant, Am J Orthod Dentofacial Orthop (Band 139), Nr. 3, Seite 407-11
  59. Ishii T, Nojima K, Nishii Y, et al. (2004): Evaluation of the implantation position of mini-screws for orthodontic treatment in the maxillary molar area by a micro CT, Bull Tokyo Dent Coll (Band 45), Nr. 3, Seite 165-72
  60. Jolley TH, Chung CH (2007): Peak torque values at fracture of orthodontic miniscrews, J Clin Orthod (Band 41), Nr. 6, Seite 326-8
  61. Kahl-Nieke B (2001): Einführung in die Kieferorthopädie, 2. Auflage. Auflage, Urban & Fischer, München, Jena, ISBN: 3-437-05420-1
  62. Kang YG, Kim JY, Lee YJ, et al. (2009): Stability of mini-screws invading the dental roots and their impact on the paradental tissues in beagles, Angle Orthod (Band 79), Nr. 2, Seite 248-55
  63. Kanomi R (1997): Mini-implant for orthodontic anchorage, J Clin Orthod (Band 31), Nr. 11, Seite 763-7
  64. Kau CH, English JD, Muller-Delgado MG, et al. (2010): Retrospective cone-beam computed tomography evaluation of temporary anchorage devices, Am J Orthod Dentofacial Orthop (Band 137), Nr. 2, Seite 166 e1-5
  65. Kim H, Kim TW (2011): Histologic evaluation of root-surface healing after root contact or approximation during placement of mini-implants, Am J Orthod Dentofacial Orthop (Band 139), Nr. 6, Seite 752-60
  66. Kim JW, Baek SH, Kim TW, et al. (2008): Comparison of stability between cylindrical and conical type mini-implants. Mechanical and histological properties, Angle Orthod (Band 78), Nr. 4, Seite 692-8
  67. Kim SH, Choi YS, Hwang EH, et al. (2007): Surgical positioning of orthodontic mini-implants with guides fabricated on models replicated with cone-beam computed tomography, Am J Orthod Dentofacial Orthop (Band 131), Nr. 4 Suppl, Seite S82-9
  68. Kim SH, Kang JM, Choi B, et al. (2008): Clinical application of a stereolithographic surgical guide for simple positioning of orthodontic mini-implants, World J Orthod (Band 9), Nr. 4, Seite 371-82
  69. Kim SH, Kang SM, Choi YS, et al. (2010): Cone-beam computed tomography evaluation of mini-implants after placement: Is root proximity a major risk factor for failure?, Am J Orthod Dentofacial Orthop (Band 138), Nr. 3, Seite 264-76
  70. Kim SH, Yoon HG, Choi YS, et al. (2009): Evaluation of interdental space of the maxillary posterior area for orthodontic mini-implants with cone-beam computed tomography, Am J Orthod Dentofacial Orthop (Band 135), Nr. 5, Seite 635-41
  71. Kitai N, Yasuda Y, Takada K (2002): A stent fabricated on a selectively colored stereolithographic model for placement of orthodontic mini-implants, Int J Adult Orthodon Orthognath Surg (Band 17), Nr. 4, Seite 264-6
  72. Kokich VG, Shapiro PA, Oswald R, et al. (1985): Ankylosed teeth as abutments for maxillary protraction: a case report, Am J Orthod (Band 88), Nr. 4, Seite 303-7

73. Kravitz ND, Kusnoto B (2006): Placement of mini-implants with topical anesthetic, *J Clin Orthod* (Band 40), Nr. 10, Seite 602-4
74. Kravitz ND, Kusnoto B (2007): Risks and complications of orthodontic miniscrews, *Am J Orthod Dentofacial Orthop* (Band 131), Nr. 4 Suppl, Seite S43-51
75. Kravitz ND, Kusnoto B, Hohlt WF (2007): A simplified stent for anterior miniscrew insertion, *J Clin Orthod* (Band 41), Nr. 4, Seite 224-6
76. Kuroda S, Sugawara Y, Deguchi T, et al. (2007): Clinical use of miniscrew implants as orthodontic anchorage: success rates and postoperative discomfort, *Am J Orthod Dentofacial Orthop* (Band 131), Nr. 1, Seite 9-15
77. Kuroda S, Yamada K, Deguchi T, et al. (2007): Root proximity is a major factor for screw failure in orthodontic anchorage, *Am J Orthod Dentofacial Orthop* (Band 131), Nr. 4 Suppl, Seite 68-73
78. Kyung HM, Park HS, Bae SM, et al. (2003): Development of orthodontic micro-implants for intraoral anchorage, *J Clin Orthod* (Band 37), Nr. 6, Seite 321-8
79. Kyung SH, Choi JH, Park YC (2003): Miniscrew anchorage used to protract lower second molars into first molar extraction sites, *J Clin Orthod* (Band 37), Nr. 10, Seite 575-9
80. Lee JS, Park HS, Kyung HM (2001): Micro-implant anchorage for lingual treatment of a skeletal Class II malocclusion, *J Clin Orthod* (Band 35), Nr. 10, Seite 643-7
81. Lee SJ, Ahn SJ, Lee JW, et al. (2010): Survival analysis of orthodontic mini-implants, *Am J Orthod Dentofacial Orthop* (Band 137), Nr. 2, Seite 194-9
82. Lee YK, Kim JW, Baek SH, et al. (2010): Root and bone response to the proximity of a mini-implant under orthodontic loading, *Angle Orthod* (Band 80), Nr. 3, Seite 452-8
83. Ley M, Müller-Hartwich R, Zain N, et al. (2008): Der Berliner Kortikalistypodont - Einführung der kortikalen Verankerung und der Segmentbogentechnik in der Studentenausbildung, *Kieferorthopädie* (Band 22), Nr. 1, Seite 49-53
84. Lim HJ, Choi YJ, Evans CA, et al. (2011): Predictors of initial stability of orthodontic miniscrew implants, *Eur J Orthod* (Band 33), Nr. 5, Seite 528-32
85. Lin JC, Liou EJ (2003): A new bone screw for orthodontic anchorage, *J Clin Orthod* (Band 37), Nr. 12, Seite 676-81
86. Lin JC, Liou EJ, Yeh CL, et al. (2007): A comparative evaluation of current orthodontic miniscrew systems, *World J Orthod* (Band 8), Nr. 2, Seite 136-44
87. Linkow LI (1970): Implanto-orthodontics, *J Clin Orthod* (Band 4), Nr. 12, Seite 685-90
88. Liou EJ, Pai BC, Lin JC (2004): Do miniscrews remain stationary under orthodontic forces?, *Am J Orthod Dentofacial Orthop* (Band 126), Nr. 1, Seite 42-7
89. Liu HL, Dong-xu; Wang, Guangchun; Wang, Chun-ling; Zhao, Zhen (2010): Accuracy of surgical positioning of orthodontic miniscrews with a computer-aided design and manufacturing template, *Am J Orthod Dentofacial Orthop* (Band 137 - Online only), Nr. 6, Seite 728.e1-10
90. Ludlow JB, Davies-Ludlow LE, White SC (2008): Patient risk related to common dental radiographic examinations: the impact of 2007 International Commission on Radiological Protection recommendations regarding dose calculation, *J Am Dent Assoc* (Band 139), Nr. 9, Seite 1237-43
91. Ludlow JB, Ivanovic M (2008): Comparative dosimetry of dental CBCT devices and 64-slice CT for oral and maxillofacial radiology, *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* (Band 106), Nr. 1, Seite 106-14
92. Ludwig B, Glasl B, Kinzinger G, et al. (2011): Anatomical guidelines for miniscrew insertion: vestibular interradicular sites, *J Clin Orthod* (Band 45), Nr. 3, Seite 165-73

93. Ludwig B, Glasl B, Lietz T, et al. (2009): Minischrauben zum temporären Ersatz aplastischer seitlicher Schneidezähne, *Kieferorthopädie* (Band 23), Nr. 3, Seite 195-203
94. Ludwig B, Glasl B, Lietz T, et al. (2008): Radiological location monitoring in skeletal anchorage: introduction of a positioning guide, *J Orofac Orthop* (Band 69), Nr. 1, Seite 59-65
95. Ludwig B, Özkan V, Glasl B, et al. (2006): Aspekte zum Risikopotenzial kortikaler kieferorthopädischer Verankerungselemente, *Kieferorthopädie* (Band 20), Nr. 3, Seite 209-221
96. Mah J, Bergstrand F (2005): Temporary anchorage devices: a status report, *J Clin Orthod* (Band 39), Nr. 3, Seite 132-6
97. Maino BG, Bednar J, Pagin P, et al. (2003): The spider screw for skeletal anchorage, *J Clin Orthod* (Band 37), Nr. 2, Seite 90-7
98. Maino BG, Weiland F, Attanasi A, et al. (2007): Root damage and repair after contact with miniscrews, *J Clin Orthod* (Band 41), Nr. 12, Seite 762-6
99. Majumdar A, Tinsley D, O'Dwyer J, et al. (2005): The "Chesterfield stent": an aid to the placement of midpalatal implants, *Br J Oral Maxillofac Surg* (Band 43), Nr. 1, Seite 36-9
100. McNamara TG, O'Shea D, McNamara CM, et al. (2000): The management of traumatic ankylosis during orthodontics: a case report, *J Clin Pediatr Dent* (Band 24), Nr. 4, Seite 265-7
101. Melsen B (2005): Mini-implants: Where are we?, *J Clin Orthod* (Band 39), Nr. 9, Seite 539-47
102. Melsen B, Costa A (2000): Immediate loading of implants used for orthodontic anchorage, *Clin Orthod Res* (Band 3), Nr. 1, Seite 23-8
103. Melsen B, Petersen JK, Costa A (1998): Zygoma ligatures: an alternative form of maxillary anchorage, *J Clin Orthod* (Band 32), Nr. 3, Seite 154-8
104. Miyawaki S, Koyama I, Inoue M, et al. (2003): Factors associated with the stability of titanium screws placed in the posterior region for orthodontic anchorage, *Am J Orthod Dentofacial Orthop* (Band 124), Nr. 4, Seite 373-8
105. Miyazawa K, Kawaguchi M, Tabuchi M, et al. (2010): Accurate pre-surgical determination for self-drilling miniscrew implant placement using surgical guides and cone-beam computed tomography, *Eur J Orthod*, Seite 1-6
106. Mizrahi E, Mizrahi B (2007): Mini-screw implants (temporary anchorage devices): orthodontic and pre-prosthetic applications, *J Orthod* (Band 34), Nr. 2, Seite 80-94
107. Mommaerts MY, Michiels ML, De Pauw GA (2005): A 2-year outcome audit of a versatile orthodontic bone anchor, *J Orthod* (Band 32), Nr. 3, Seite 175-81
108. Monnerat C, Restle L, Mucha JN (2009): Tomographic mapping of mandibular interradicular spaces for placement of orthodontic mini-implants, *Am J Orthod Dentofacial Orthop* (Band 135), Nr. 4, Seite 428 e1-9
109. Moon CH, Lee DG, Lee HS, et al. (2008): Factors associated with the success rate of orthodontic miniscrews placed in the upper and lower posterior buccal region, *Angle Orthod* (Band 78), Nr. 1, Seite 101-6
110. Moon CH, Park HK, Nam JS, et al. (2010): Relationship between vertical skeletal pattern and success rate of orthodontic mini-implants, *Am J Orthod Dentofacial Orthop* (Band 138), Nr. 1, Seite 51-7
111. Morea C, Dominguez GC, Wuo Ado V, et al. (2005): Surgical guide for optimal positioning of mini-implants, *J Clin Orthod* (Band 39), Nr. 5, Seite 317-21
112. Morea C, Hayek JE, Oleskovicz C, et al. (2011): Precise insertion of orthodontic miniscrews with a stereolithographic surgical guide based on cone beam computed

- tomography data: a pilot study, *Int J Oral Maxillofac Implants* (Band 26), Nr. 4, Seite 860-5
113. Motoyoshi M, Hirabayashi M, Uemura M, et al. (2006): Recommended placement torque when tightening an orthodontic mini-implant, *Clin Oral Implants Res* (Band 17), Nr. 1, Seite 109-14
  114. Motoyoshi M, Matsuoka M, Shimizu N (2007): Application of orthodontic mini-implants in adolescents, *Int J Oral Maxillofac Surg* (Band 36), Nr. 8, Seite 695-9
  115. Motoyoshi M, Yano S, Tsuruoka T, et al. (2005): Biomechanical effect of abutment on stability of orthodontic mini-implant. A finite element analysis, *Clin Oral Implants Res* (Band 16), Nr. 4, Seite 480-5
  116. Ohashi E, Pecho OE, Moron M, et al. (2006): Implant vs screw loading protocols in orthodontics, *Angle Orthod* (Band 76), Nr. 4, Seite 721-7
  117. Owens SE, Buschang PH, Cope JB, et al. (2007): Experimental evaluation of tooth movement in the beagle dog with the mini-screw implant for orthodontic anchorage, *Am J Orthod Dentofacial Orthop* (Band 132), Nr. 5, Seite 639-46
  118. Papadopoulos MA, Papageorgiou SN, Zogakis IP (2011): Clinical effectiveness of orthodontic miniscrew implants: a meta-analysis, *J Dent Res* (Band 90), Nr. 8, Seite 969-76
  119. Park HS, Bae SM, Kyung HM, et al. (2001): Micro-implant anchorage for treatment of skeletal Class I bialveolar protrusion, *J Clin Orthod* (Band 35), Nr. 7, Seite 417-22
  120. Park HS, Jeong SH, Kwon OW (2006): Factors affecting the clinical success of screw implants used as orthodontic anchorage, *Am J Orthod Dentofacial Orthop* (Band 130), Nr. 1, Seite 18-25
  121. Park HS, Kwon TG, Kwon OW (2004): Treatment of open bite with microscrew implant anchorage, *Am J Orthod Dentofacial Orthop* (Band 126), Nr. 5, Seite 627-36
  122. Park HS, Lee SK, Kwon OW (2005): Group distal movement of teeth using microscrew implant anchorage, *Angle Orthod* (Band 75), Nr. 4, Seite 602-9
  123. Poggio PM, Incorvati C, Velo S, et al. (2006): "Safe zones": a guide for miniscrew positioning in the maxillary and mandibular arch, *Angle Orthod* (Band 76), Nr. 2, Seite 191-7
  124. Präger T, Brochhagen HG, Müller-Hartwich R (2006): Knochenangebot im Unterkieferalveolarfortsatz für kortikale Verankerungsschrauben, *Kieferorthopädie* (Band 20), Nr. 4, Seite 259-265
  125. Präger T, Karapetian V, Müller-Hartwich R, et al. (2008): Application of a computer navigation system for the placement of orthodontic anchorage screws, *Int J Comput Dent* (Band 11), Nr. 3-4, Seite 201-12
  126. Qiu L, Haruyama N, Suzuki S, et al. (2011): Accuracy of orthodontic miniscrew implantation guided by stereolithographic surgical stent based on cone-beam CT-derived 3D images, *Angle Orthod*
  127. Re S, Corrente G, Abundo R, et al. (2000): Orthodontic treatment in periodontally compromised patients: 12-year report, *Int J Periodontics Restorative Dent* (Band 20), Nr. 1, Seite 31-9
  128. Reddy KB, Kumar MP, Kumar MN (2008): A grid for guiding miniscrew placement, *J Clin Orthod* (Band 42), Nr. 9, Seite 531-2
  129. Reicheneder C, Rottner K, Bokan I, et al. (2008): Mechanical loading of orthodontic miniscrews - significance and problems: an experimental study, *Biomed Tech (Berl)* (Band 53), Nr. 5, Seite 242-5
  130. Renjen R, Maganzini AL, Rohrer MD, et al. (2009): Root and pulp response after intentional injury from miniscrew placement, *Am J Orthod Dentofacial Orthop* (Band 136), Nr. 5, Seite 708-14

131. Reynders R, Ronchi L, Bipat S (2009): Mini-implants in orthodontics: a systematic review of the literature, *Am J Orthod Dentofacial Orthop* (Band 135), Nr. 5, Seite 564 e1-19
132. Roberts WE, Helm FR, Marshall KJ, et al. (1989): Rigid endosseous implants for orthodontic and orthopedic anchorage, *Angle Orthod* (Band 59), Nr. 4, Seite 247-56
133. Roberts WE, Marshall KJ, Mozsary PG (1990): Rigid endosseous implant utilized as anchorage to protract molars and close an atrophic extraction site, *Angle Orthod* (Band 60), Nr. 2, Seite 135-52
134. Roberts WE, Smith RK, Zilberman Y, et al. (1984): Osseous adaptation to continuous loading of rigid endosseous implants, *Am J Orthod* (Band 86), Nr. 2, Seite 95-111
135. Roth A, Yildirim M, Diedrich P (2004): Forced eruption with microscrew anchorage for preprosthetic leveling of the gingival margin. Case report, *J Orofac Orthop* (Band 65), Nr. 6, Seite 513-9
136. Ruppin J, Popovic A, Strauss M, et al. (2008): Evaluation of the accuracy of three different computer-aided surgery systems in dental implantology: optical tracking vs. stereolithographic splint systems, *Clin Oral Implants Res* (Band 19), Nr. 7, Seite 709-16
137. Sandusky WC, Jr. (1951): Orthodontic anchorage, *Am J Orthod* (Band 37), Nr. 11, Seite 858-66
138. Schätzle M, Männchen R, Zwahlen M, et al. (2009): Survival and failure rates of orthodontic temporary anchorage devices: a systematic review, *Clin Oral Implants Res* (Band 20), Nr. 12, Seite 1-9
139. Schermeier O (2002): Ein Navigationssystem für die dentale Implantologie (Band 227), *Fortschritt-Berichte VDI*, VDI-Verlag, Düsseldorf, ISBN: 3-18-322717-7
140. Schermeier O, Hildebrand D, Lueth TC, et al. (2001): Accuracy of an image guided system for oral implantology, *CARS 2001 - Computer Assisted Radiology and Surgery*, Berlin, Germany
141. Schnelle MA, Beck FM, Jaynes RM, et al. (2004): A radiographic evaluation of the availability of bone for placement of miniscrews, *Angle Orthod* (Band 74), Nr. 6, Seite 832-7
142. Schroeder HE (2000): *Orale Strukturbiologie* (Band 5) Seite 214, Georg Thieme Verlag, Stuttgart - New York
143. Schroeder HE (2000): *Orale Strukturbiologie* (Band 5) Seite 196, Georg Thieme Verlag, Stuttgart - New York
144. Sherman AJ (1978): Bone reaction to orthodontic forces on vitreous carbon dental implants, *Am J Orthod* (Band 74), Nr. 1, Seite 79-87
145. Song YY, Cha JY, Hwang CJ (2007): Mechanical characteristics of various orthodontic mini-screws in relation to artificial cortical bone thickness, *Angle Orthod* (Band 77), Nr. 6, Seite 979-85
146. Stahl E, Keilig L, Abdelgader I, et al. (2009): Numerical analyses of biomechanical behavior of various orthodontic anchorage implants, *J Orofac Orthop* (Band 70), Nr. 2, Seite 115-27
147. Stuteville OH (1938): Injuries caused by orthodontic forces and the ultimate results of these injuries, *American Journal of Orthodontics and Oral Surgery* (Band 24), Nr. 2, Seite 103- 119
148. Suzuki EY, Buranastidporn B (2005): An adjustable surgical guide for miniscrew placement, *J Clin Orthod* (Band 39), Nr. 10, Seite 588-90
149. Suzuki EY, Suzuki B (2007): A simple three-dimensional guide for safe miniscrew placement, *J Clin Orthod* (Band 41), Nr. 6, Seite 342-6

150. Suzuki EY, Suzuki B (2008): Accuracy of miniscrew implant placement with a 3-dimensional surgical guide, *J Oral Maxillofac Surg* (Band 66), Nr. 6, Seite 1245-52
151. Triaca AA, M. und Wintermantel, E. (1992): Ein neues Titan-Flachschrauben-Implantat zur orthodontischen Verankerung am anterioren Gaumen, *Inf. Orthodont. Kieferorthop.* (Band 24), Seite 251-257
152. Trisi P, Rao W, Rebaudi A (1999): A histometric comparison of smooth and rough titanium implants in human low-density jawbone, *Int J Oral Maxillofac Implants* (Band 14), Nr. 5, Seite 689-98
153. Tseng YC, Hsieh CH, Chen CH, et al. (2006): The application of mini-implants for orthodontic anchorage, *Int J Oral Maxillofac Surg* (Band 35), Nr. 8, Seite 704-7
154. Turley PK, Kean C, Schur J, et al. (1988): Orthodontic force application to titanium endosseous implants, *Angle Orthod* (Band 58), Nr. 2, Seite 151-62
155. Umemori M, Sugawara J, Mitani H, et al. (1999): Skeletal anchorage system for open-bite correction, *Am J Orthod Dentofacial Orthop* (Band 115), Nr. 2, Seite 166-74
156. Wang HN, Liu DX, Wang CL, et al. (2009): Influence of periodontal ligament injury on initial stability for immediately loaded mini-implant, *Hua Xi Kou Qiang Yi Xue Za Zhi* (Band 27), Nr. 2, Seite 224-6, 236
157. Wang YC, Liou EJ (2008): Comparison of the loading behavior of self-drilling and predrilled miniscrews throughout orthodontic loading, *Am J Orthod Dentofacial Orthop* (Band 133), Nr. 1, Seite 38-43
158. Wawrzinek C, Sommer T, Fischer-Brandies H (2008): Microdamage in cortical bone due to the overtightening of orthodontic microscrews, *J Orofac Orthop* (Band 69), Nr. 2, Seite 121-34
159. Wehrbein H (2004): Orthodontische Implantatverankerung, *Kieferorthopädie* (Band 18), Nr. 2, Seite 117-124
160. Wehrbein H, Glatzmaier J, Mundwiler U, et al. (1996): The Orthosystem--a new implant system for orthodontic anchorage in the palate, *J Orofac Orthop* (Band 57), Nr. 3, Seite 142-53
161. Weinstein S (1967): Minimal forces in tooth movement, *Am J Orthod* (Band 53), Nr. 12, Seite 881-903
162. Widmann G, Stoffner R, Keiler M, et al. (2009): A laboratory training and evaluation technique for computer-aided oral implant surgery, *Int J Med Robot* (Band 5), Nr. 3, Seite 276-83
163. Wilmes B, Drescher D (2006): Verankerung mit Miniimplantaten bei präprothetischer kieferorthopädischer Therapie, *Kieferorthopädie* (Band 20), Nr. 3, Seite 203-208
164. Wilmes B, Drescher D (2008): A miniscrew system with interchangeable abutments, *J Clin Orthod* (Band 42), Nr. 10, Seite 574-80
165. Wilmes B, Drescher D (2011): Impact of bone quality, implant type, and implantation site preparation on insertion torques of mini-implants used for orthodontic anchorage, *Int J Oral Maxillofac Surg* (Band 40), Nr. 7, Seite 697-703
166. Wilmes B, Drescher D, Nienkemper M (2009): A miniplate system for improved stability of skeletal anchorage, *J Clin Orthod* (Band 43), Nr. 8, Seite 494-501
167. Wilmes B, Ottenstreuer S, Su YY, et al. (2008): Impact of implant design on primary stability of orthodontic mini-implants, *J Orofac Orthop* (Band 69), Nr. 1, Seite 42-50
168. Wilmes B, Rademacher C, Olthoff G, et al. (2006): Parameters affecting primary stability of orthodontic mini-implants, *J Orofac Orthop* (Band 67), Nr. 3, Seite 162-74
169. Wilmes B, Su YY, Sadigh L, et al. (2008): Pre-drilling force and insertion torques during orthodontic mini-implant insertion in relation to root contact, *J Orofac Orthop* (Band 69), Nr. 1, Seite 51-8

- 
170. Wu JC, Huang JN, Zhao SF, et al. (2006): Radiographic and surgical template for placement of orthodontic microimplants in interradicular areas: a technical note, *Int J Oral Maxillofac Implants* (Band 21), Nr. 4, Seite 629-34
  171. Yu JJ, Kim GT, Choi YS, et al. (2011): Accuracy of a cone beam computed tomography-guided surgical stent for orthodontic mini-implant placement, *Angle Orthod*

## 9 Anhang

### 9.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Mini-Implantat .....	6
Abbildung 2: Patientenbeispiel mit zahlreichen Mini-Implantaten .....	7
Abbildung 3: Horizontalfraktur, verursacht durch ein Mini-Implantat .....	16
Abbildung 4: Planungsschiene mit Navigationsbogen .....	29
Abbildung 5: Komponenten des mobilen Navigationssystems Lapdoc .....	31
Abbildung 6: Registrierungskomponenten .....	32
Abbildung 7: Versuchsaufbau .....	35
Abbildung 8: Versuchsdurchführung .....	35
Abbildung 9: Oberfläche der Lapdoc-Software zur Auswertung .....	37
Abbildung 10: Oberfläche zum Austausch der Mini-Implantatkörper .....	38
Abbildung 11: Modell zur Bestimmung des Methodenfehlers .....	39
Abbildung 12: Skizze zur Darstellung der Methodenfehlerberechnung .....	40
Abbildung 13: Darstellung des Methodenfehlers als Boxplot .....	41
Abbildung 14: Ergebnisse für die zweifache Auswertung einer Datenreihe .....	42
Abbildung 15: Ergebnisse von Behandler 1 im Oberkiefer .....	46
Abbildung 16: Ergebnisse von Behandler 1 im Unterkiefer .....	46
Abbildung 17: Ergebnisse von Behandler 2 im Oberkiefer .....	47
Abbildung 18: Ergebnisse von Behandler 2 im Unterkiefer .....	47
Abbildung 19: Ergebnisse von Behandler 3 im Oberkiefer .....	48
Abbildung 20: Ergebnisse von Behandler 3 im Unterkiefer .....	48
Abbildung 21: Ergebnisse der Versuche für Behandler 1 im Oberkiefer .....	50
Abbildung 22: Ergebnisse der Versuche für Behandler 2 im Oberkiefer .....	50
Abbildung 23: Ergebnisse der Versuche für Behandler 3 im Oberkiefer .....	51
Abbildung 24: Ergebnisse der Versuche für Behandler 1 im Unterkiefer .....	53
Abbildung 25: Ergebnisse der Versuche für Behandler 2 im Unterkiefer .....	53
Abbildung 26: Ergebnisse der Versuche für Behandler 3 im Unterkiefer .....	54
Abbildung 27: Gesamtübersicht „kein Wurzelkontakt“ für alle Behandler .....	55
Abbildung 28: Vergleich zwischen den verschiedenen Behandlern im Oberkiefer intraoral .....	57
Abbildung 29: Vergleich zwischen den verschiedenen Behandlern am Oberkiefermodell .....	58
Abbildung 30: Vergleich zwischen den verschiedenen Behandlern im Unterkiefer intraoral .....	59
Abbildung 31: Vergleich zwischen den verschiedenen Behandlern am Unterkiefermodell .....	60
Abbildung 32: Gesamtübersicht „kein Wurzelkontakt“ für die einzelnen Behandler .....	62
Abbildung 33: Behandlervergleich am Zwischenraum mesial von Zahn 11 .....	64
Abbildung 34: Behandlervergleich am Zwischenraum mesial von Zahn 13 .....	64
Abbildung 35: Vergleich aller Behandler zwischen Oberkiefer und Unterkiefer intraoral .....	66
Abbildung 36: Vergleich aller Behandler zwischen Oberkiefer und Unterkiefer am Modell .....	66

---

Abbildung 37: Darstellung der relativen Häufigkeiten für die Mini-Implantatpositionen ohne Wurzelkontakt in Abhängigkeit vom Implantattyp .....	68
Abbildung 38: Lernkurven der einzelnen Behandler für die verschiedenen Untersuchungsobjekte .....	70
Abbildung 39: Lernkurve Gesamtübersicht .....	70

## 9.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: <b>Übersicht Übertragungssplints</b> .....	19
Tabelle 2: <b>Übersicht Positionierungshilfen</b> .....	22
Tabelle 3: <b>Verwendete Mini-Implantate</b> .....	30
Tabelle 4: <b>Behandlererfahrung</b> .....	33
Tabelle 5: <b>Zur Insertion geeignete Zahnzwischenräume nach Begutachtung der Panoramaschicht-</b> <b>darstellungen</b> .....	33
Tabelle 6: <b>Auswertungsschema für das Standardimplantat (tomas-pin N 08)</b> . ....	36
Tabelle 7: <b>Ergebnisse der Methodenfehlerbestimmung</b> .....	41
Tabelle 8: <b>Kreuztabelle der Erst- und Zweitauswertung</b> .....	43
Tabelle 9: <b>Übereinstimmung der Zweitauswertung mit der Erstauswertung</b> .....	43
Tabelle 10: <b>Interradikuläre Distanzen der Probandinnen 1 und 2</b> .....	44
Tabelle 11: <b>Ergebnisse verschiedener Studien zum interradikulären Platzangebot für die interradikuläre</b> <b>Insertion von Mini-Implantaten von bukkal</b> .....	85
Tabelle 12: <b>Übersicht der Insertionswinkel zur Zahnachse [°]</b> .....	93

### **9.3 Danksagung**

Mein Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr. P.-G. Jost-Brinkmann für die Annahme des Promotionsthemas und seiner Motivation auf der Zielgeraden.

Ein besonderer Dank gilt natürlich meinem Betreuer Dr. Ralf Müller-Hartwich, der mich bei dieser Arbeit von der Konzeption bis zur Fertigstellung freundschaftlich und wissenschaftlich begleitete und dabei nicht die Geduld mit mir verlor.

Mein ganz besonderer Dank gilt Dipl.-Ing. Bartosz Kosmecki vom Berliner Zentrum für Mechatronische Medizintechnik (BZMM). Sowohl für die hervorragende Betreuung während der Versuche, als auch für das Einbringen seines Wissens und eigener Vorschläge, im Besonderen bei der Ermittlung des Methodenfehlers.

Ein großer Dank gilt natürlich auch Cindy und Sylvia, die als Probandinnen etliche Stunden ihrer wertvollen Zeit opferten.

Danken möchte ich auch den Herren PD Dr. Dr. W. Hopfenmüller und Dr. K. Neumann, die mich hinsichtlich der statistischen Aufarbeitung sehr beruhigten.

Ein großer Dank gilt auch Katja für die regelmäßigen Diskussionen bezüglich des Schreibens einer Dissertation und ihre Vorschläge damit alles noch ein bisschen schöner aussieht.

Meiner lieben Frau Ellen und meiner Familie danke ich besonders für ihre unendliche Geduld und Unterstützung bei der Fertigstellung dieser Arbeit.

#### **9.4 Lebenslauf**

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.

### **9.5 Eidesstattliche Erklärung**

„Ich, Norman Rabe, erkläre, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: „Wurzelverletzungen durch orthodontische Mini-Implantate. Ein Vergleich zwischen Positionierung auf einem Modell und klinischer Situation. – Eine Pilotstudie -“ selbst verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, ohne die (unzulässige) Hilfe Dritter und auch in Teilen keine Kopien anderer Arbeiten dargestellt habe.“

Berlin, den 21.12.2012

Norman Rabe