

**Aus der Poliklinik für Kieferorthopädie der Heinrich-Heine-
Universität Düsseldorf**

Direktor: Univ.-Prof. Dr. Dr. Collin Jacobs

Verlustrate von Mini-Implantaten in der Kieferorthopädie

Dissertation

**zur Erlangung des Grades eines Doktors der Zahnmedizin der
Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf**

vorgelegt von

Daniela Balzert

2026

Als Inauguraldissertation gedruckt mit der Genehmigung der
Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

gez.:

Dekan/in: Prof. Dr. med. Nikolaj Klöcker

Erstgutachter/in: Prof. Dr. Benedict Wilmes

Zweitgutachter/in: PD Dr. Frank Spitznagel

Für meine Familie

Auflistung eigener Publikationen

Balzert D, De Felice ME, Küffer M, Wilmes B.

Failure rate of palatal orthodontic mini-implants: a retrospective study

American Journal of Orthodontics & Dentofacial Orthopedics

(submitted)

I. Zusammenfassung (deutsch)

Mini-Implantate sind als temporäre Verankerungselemente in der kieferorthopädischen Therapie etabliert und ermöglichen gezielte Zahnbewegungen ohne unerwünschte Nebenwirkungen. Dennoch stellt ihre Stabilität eine klinische Herausforderung dar. Ziel dieser retrospektiven Studie war es, die Verlustrate palatinaler Mini-Implantate zu analysieren sowie Einflussfaktoren wie Insertionsort, verwendete Apparatur, Alter und Geschlecht der Patienten zu identifizieren. Dabei sollte insbesondere geprüft werden, ob bestimmte Parameter mit einer erhöhten Verlustrate korrelieren, um Empfehlungen für die klinische Praxis abzuleiten. In die retrospektive Studie wurden Daten von 1358 Patienten (559 männlich, 799 weiblich) einbezogen, die zwischen 2007 und 2021 an der Universitätsklinik Düsseldorf mit palatinal inserierten Mini-Implantaten behandelt wurden. Insgesamt wurden 2632 Mini-Implantate analysiert. Die Auswertung erfolgte auf Grundlage klinischer Aufzeichnungen und digitaler Bilddatenbanken. Statistische Analysen umfassten deskriptive Methoden sowie inferenzstatistische Tests, insbesondere Chi-Quadrat- und exakter Fisher-Test, zur Untersuchung möglicher Zusammenhänge zwischen klinischen Parametern und der Verlustrate. Die Gesamtverlustrate der untersuchten Mini-Implantate lag bei 4,1%. Weder das Geschlecht noch das Alter der Patienten oder die Erfahrung des Behandlers zeigten signifikante Einflüsse auf die Verlustrate. Die Anzahl verwendeter Mini-Implantate sowie das Vorliegen syndromaler Erkrankungen hatten ebenfalls keinen statistisch signifikanten Einfluss. Die direkte Verankerungsform war jedoch signifikant häufiger mit Implantatverlusten assoziiert als die indirekte Verankerung. Zudem zeigte sich bei Patienten unter 13 Jahren eine signifikant höhere Verlustrate medianer im Vergleich zu paramedianen Implantationen. Die höchsten Verlustraten wurden bei den Apparaturen Hybridhyrax-Distalizer und Mausefalle festgestellt. Zur Reduktion der Verlustrate bei jungen Patienten sollte die paramediane Insertion bevorzugt werden. Darüber hinaus empfiehlt sich bei Apparaturen mit erhöhten Belastungen, mehrere Mini-Implantate zu verwenden. Diese Erkenntnisse ermöglichen eine verbesserte Therapieplanung und erhöhen die Behandlungssicherheit bei kieferorthopädischen Mini-Implantaten.

II. Zusammenfassung (englisch)

Mini-implants have become established as temporary anchorage devices in orthodontic therapy, enabling targeted tooth movements without undesired side effects. However, their stability remains a clinical challenge. The objective of this retrospective study was to analyze the failure rate of palatal mini-implants and to identify influencing factors such as insertion site, type of appliance, patient age, and gender. In particular, the study aimed to determine whether certain parameters correlate with an increased rate of implant failure in order to derive practical clinical recommendations. This retrospective study included data from 1,358 patients (559 males, 799 females) treated with palatally inserted mini-implants between 2007 and 2021 at the University Hospital Düsseldorf. A total of 2,632 mini-implants were analyzed based on clinical records and digital imaging databases. Statistical analyses involved descriptive methods as well as inferential statistical tests, specifically Chi-square and Fisher's exact test, to investigate possible associations between clinical parameters and the failure rate. The overall failure rate of the examined mini-implants was 4.1%. Neither patient gender nor age, nor the practitioner's experience significantly influenced the failure rate. Similarly, the number of mini-implants used and the presence of syndromic conditions showed no statistically significant effect. However, direct anchorage showed a significantly higher association with implant failure compared to indirect anchorage. Additionally, among patients younger than 13 years, median insertions had a significantly higher failure rate compared to paramedian insertions. The highest rates of implant failure were observed with the Hybrid Hyrax Distalizer and the Mousetrap appliance. To reduce the failure rate in younger patients, paramedian insertion is recommended. Additionally, for appliances involving higher mechanical loads, the use of multiple mini-implants is advised. These insights facilitate improved treatment planning and enhance clinical safety in orthodontic applications of mini-implants.

III. Abkürzungsverzeichnis

Alt-RAMEC.....	Alternate Rapid Maxillary Expansion and Constriction
CAD	Computer-Aided Design
CAM	Computer-Aided Manufacturing
DGZMK	Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
DVT	Digitale Volumentomographie
FRS	Fernröntgenseitenbild
OPG	Orthopantomogramm

IV. Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG.....	1
1.1	EINFÜHRUNG	1
1.2	VERANKERUNG IN DER KIEFERORTHOPÄDIE	1
1.3	KIEFERORTHOPÄDISCHE MINI-IMPLANTATE.....	3
1.3.1	<i>Historie.....</i>	3
1.3.2	<i>Funktionelle Differenzierung zu dentalen Implantaten.....</i>	5
1.3.3	<i>Dimensionen, Aufbau und Material</i>	5
1.3.4	<i>Indikationen</i>	6
1.3.5	<i>Insertionsplanung</i>	7
1.3.6	<i>Insertionsorte.....</i>	9
1.3.7	<i>Verwendetes Mini-Implantat-System</i>	13
1.3.8	<i>Abutments.....</i>	14
1.4	PRIMÄRSTABILITÄT UND SEKUNDÄRSTABILITÄT	15
1.5	VERLUST VON MINI-IMPLANTATEN	17
1.6	FRAGESTELLUNG UND ZIELSETZUNG DER ARBEIT	18
2	MATERIAL UND METHODEN	20
2.1	ETHISCHE UND RECHTLICHE UNBEDENKLICHKEIT	20
2.2	MATERIAL	20
2.3	ABLAUF DER MINI-IMPLANTAT-INSERTION	20
2.3.1	<i>Vorbereitung</i>	20
2.3.2	<i>Insertion</i>	21
2.3.3	<i>Belastungszeitpunkt.....</i>	24
2.3.4	<i>Explantation.....</i>	24
2.4	APPARATUREN AUS DIESER STUDIE	24
2.4.1	<i>Beneslider.....</i>	24
2.4.2	<i>Mesialslider.....</i>	25
2.4.3	<i>Mesial-Distal-Slider</i>	27
2.4.4	<i>Hybridhyrax.....</i>	27
2.4.5	<i>Molarenverankerung</i>	28
2.4.6	<i>Mausefalle</i>	29
2.4.7	<i>Pendulum B.....</i>	30
2.4.8	<i>T-Bogen.....</i>	31
2.4.9	<i>Einordnung.....</i>	32
2.5	METHODE	34
2.5.1	<i>Einschlusskriterien.....</i>	34

2.5.2	<i>Auswertungsparameter</i>	34
2.5.3	<i>Erfolgs- und Misserfolgskriterien</i>	35
2.6	AUSWERTUNG UND STATISTIK	35
3	ERGEBNISSE	36
3.1	DESKRIPTIVE STATISTIK	36
3.2	PARAMETERSPEZIFISCHE ANALYSE	37
3.2.1	<i>Alter und Geschlecht der Patienten</i>	37
3.2.2	<i>Behandler</i>	38
3.2.3	<i>Insertionsort</i>	39
3.2.4	<i>Anzahl der inserierten Mini-Implantate</i>	42
3.2.5	<i>Verankerte Apparatur</i>	42
3.2.6	<i>Verankerungsform</i>	44
3.2.7	<i>Patienten mit syndromalen Erkrankungen</i>	45
4	DISKUSSION	46
4.1	MATERIAL- UND METHODENKRITIK	46
4.2	INTERPRETATION DER ERGEBNISSE UND ERGEBNISKRITIK	47
4.2.1	<i>Patientenspezifische Faktoren</i>	47
4.2.2	<i>Behandler</i>	50
4.2.3	<i>Insertionsort</i>	51
4.2.4	<i>Anzahl der inserierten Mini-Implantate</i>	53
4.2.5	<i>Verankerte Apparatur</i>	54
4.2.6	<i>Verankerungsform</i>	56
4.2.7	<i>Syndrompatienten</i>	56
4.2.8	<i>Implantatbezogene Faktoren</i>	57
4.3	SCHLUSSFOLGERUNG	58
4.4	AUSBLICK	59
5	LITERATURVERZEICHNIS	61
6	ANHANG	68
6.1	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	68
6.2	TABELLENVERZEICHNIS	70

1 Einleitung

1.1 Einführung

Mini-Implantate haben sich als temporäre Verankerungsvorrichtungen etabliert, die komplexe Zahnbewegungen ohne unerwünschte dentale Nebeneffekte ermöglichen und nehmen somit eine zentrale Position in der kieferorthopädischen Therapie ein. Trotz der umfangreichen Anwendung und ihrer bedeutenden Rolle im klinischen Kontext bleibt die Stabilität der Mini-Implantate ein kritischer Faktor. Diese Studie beabsichtigt, die Verlustrate palatinaler Mini-Implantate zu untersuchen und dabei unterschiedliche Parameter zu berücksichtigen. Sie stützt sich dabei auf eine retrospektive Analyse von Patientendaten, die an der Universitätsklinik Düsseldorf erhoben wurden. Dadurch sollen die Faktoren, die zu einer erhöhten Verlustrate führen, identifiziert und potenzielle präventive Maßnahmen erarbeitet werden.

1.2 Verankerung in der Kieferorthopädie

Die Kieferorthopädie befasst sich mit der Erkennung und Korrektur von Zahn- und Kieferfehlstellungen. Die Applikation einer gezielten Kraft ist dabei unerlässlich, da erst durch diese Einwirkung eine Korrekturbewegung der dentalen Einheiten initiiert werden kann. Basierend auf den grundlegenden Gesetzen der Mechanik, insbesondere dem dritten Gesetz von Isaac Newton, dem Actio-Reactio-Prinzip, lässt sich annehmen, dass jede auf einen Zahn applizierte Kraft eine gleich große, entgegengerichtete Kraft hervorruft. Diese Tatsache führt in der kieferorthopädischen Therapie häufig zu unerwünschten Nebeneffekten, da die von der kieferorthopädischen Apparatur ausgehende Kraft eine ungewollte Bewegung der als Widerlager dienenden Zähne, verursachen kann (1).

Historisch betrachtet, wurde der Begriff 'Verankerung' in der Kieferorthopädie erstmals im frühen 20. Jahrhundert durch den renommierten Kieferorthopäden Edward H. Angle thematisiert (2). Der amerikanische Kieferorthopäde schrieb: „Nach den wohlbekannten Gesetzen der Physik halten sich Wirkung und Gegenwirkung das Gleichgewicht und sind einander entgegengesetzt; daraus folgt, dass der Widerstand der Verankerung größer als der des zu bewegenden Zahnes sein muss. Die idealste Verankerung wäre natürlich eine unbewegliche Basis.“ (2).

Daraus ergibt sich die Schlussfolgerung, dass die Stabilität des Widerlagers von entscheidender Bedeutung für die Effizienz der Verankerung ist. Die Fixierung von kieferorthopädischen Apparaturen an anderen Zähnen setzt voraus, dass diese eine höhere Verankerungswertigkeit aufweisen als jene, die zu bewegen sind. Diese Wertigkeit ergibt sich unter anderem aus der jeweiligen Wurzeloberfläche (3). Effektiver und klinisch wünschenswerter ist allerdings eine Verankerungsart, bei der das Widerlager eine maximale Stabilität aufweist, was im Idealfall einer stationären Basis entspricht. Innerhalb der kieferorthopädischen Terminologie wird diese Form der Verankerung als 'absolute Verankerung' bezeichnet. Daneben existieren die minimale, moderate und maximale Verankerung. Die absolute Verankerung hat die höchste Verankerungsqualität und verleiht der orthodontischen Behandlung ein Höchstmaß an Kontrolle und Vorhersagbarkeit (4). Die klinische Herausforderung besteht in der Maximierung der intendierten und der Minimierung der nicht intendierten Zahnbewegungen (5). Hier gewinnt die skelettale Verankerung an Bedeutung, die es ermöglicht, die Gegenkräfte nicht auf die Zähne, sondern über ein Implantat auf knöcherne Strukturen zu übertragen. Der skelettale Anker kann sowohl intra- als auch extraoral liegen (6).

Extraorale Verankerungssysteme, wie beispielsweise der Headgear oder die Delaire-Maske, stellen traditionelle Methoden dar. Der Headgear besteht typischerweise aus einem Kopfband, das um den Hinterkopf oder Nacken getragen wird und einem Bügel, der mit der orthodontischen Apparatur oder Bändern an den oberen Molaren befestigt ist. Diese Vorrichtung kann zur Behandlung einer Klasse II verwendet werden, indem sie das Wachstum des Oberkiefers verlangsamt oder die oberen Molaren nach distal bewegt. Die Delaire-Maske, auch bekannt als Gesichtsmaske oder Reverse-Pull Headgear, ist eine Apparatur, die bei Klasse III-Patienten angewendet wird. Sie besteht aus einer Gesichtsmaske, die das Gesicht umrahmt und mit elastischen Bändern oder Federn mit der orthodontischen Apparatur verbunden ist. Ziel ist es, durch Zug das Wachstum des Oberkiefers zu stimulieren oder die oberen Molaren nach mesial zu bewegen (Abb. 1). Die Effektivität dieser Systeme ist jedoch von der Compliance der Patienten abhängig, welche aufgrund ästhetischer Beeinträchtigungen nicht immer gegeben ist (1, 7).



Abbildung 1: Extraorale Abstützung mittels Delaire Maske

Die sogenannte Delaire-Maske dient der extraoralen Verankerung zur protrakiven Bewegung des Oberkiefers und besteht aus einer Stirn- und einer Kinnpelotte, die über einen Metallstab miteinander verbunden sind. Daran können elastische Zugmittel befestigt werden, die ihre Kraft auf eine intraoral verankerte Apparatur im Oberkiefer übertragen.

Wirkungsvoller ist eine Behandlung, die weitestgehend unabhängig von der Mitarbeit der Patienten ist. Intraoral bieten enossale dentale Implantate oder ankylosierte Zähne eine potenzielle Basis für solche Verankerungen (8). Allerdings haben nur eine Minderheit der Patienten solche Verankerungsmöglichkeiten. Daher waren die Optionen für eine intraorale absolute Verankerung kieferorthopädischer Apparaturen bis zur Einführung von Mini-Implantaten beschränkt. Erst in den letzten zwanzig Jahren hat sich, mit der Unterstützung spezieller Verankerungspins, ein Behandlungskonzept entwickelt, das die absolute Verankerung für einen großen Anteil der Patienten zugänglich macht.

1.3 Kieferorthopädische Mini-Implantate

1.3.1 Historie

Die Anfänge der Verwendung von Mini-Implantaten als skelettale Verankerungselemente lassen sich auf das Jahr 1945 zurückführen, als Gainsforth und Higley in experimentellen Ansätzen mit Vitallium-Schrauben an Hunden arbeiteten. Diese Versuche waren jedoch durch hohe Verlustraten gekennzeichnet (9). Zudem kamen Mini-Implantate, bevor sie in der Kieferorthopädie Anwendung fanden, schon seit Mitte der 1990er Jahre in der Prothetik zum Einsatz. Dort verwendet man sie zum Verankern von herausnehmbarem Zahnersatz auf dem atrophierten Kieferkamm, um die Lagestabilität der Prothesen bei geringer Restbezahnung zu verbessern und die verbliebenen Zähne zu entlasten. Dies kann

eine weniger invasive, kostengünstigere und zeitsparende Alternative gegenüber Augmentationen und konventionellen Implantaten sein (10).

Innerhalb der Kieferorthopädie wurden Minischrauben erstmals im Jahre 1997 von Kanomi als Mittel zur orthodontischen Verankerung eingesetzt (11). Anfängliche Verfahren erforderten einen aufwändigen mukogingivalchirurgischen Eingriff, gefolgt von einer definierten Einheilphase, bevor eine Belastung der Schrauben erfolgen konnte (12). Die Erkenntnis, dass die unmittelbare Stabilität nach der Insertion – die sogenannte Primärstabilität – von entscheidender Bedeutung ist, wurde erst zu einem späteren Zeitpunkt gewonnen. Heute werden Mini-Implantate meist direkt transgingival eingesetzt. Die Therapie mithilfe von Mini-Implantaten ersetzt konventionelle Methoden immer dann, wenn die Verankerung der Apparaturen besonders komplex erscheint oder andernfalls, unerwünschte Nebeneffekte zu erwarten sind (13). Ihre geringe Größe ermöglicht eine Platzierung an verschiedenen Stellen im Kiefer, selbst in Bereichen mit eingeschränktem Knochenangebot wie beispielsweise interradiikulär (11, 14).

Die Einführung der Mini-Implantate als transiente skelettale Verankerungselemente hat eine revolutionäre Erweiterung des Behandlungsspektrums in der Kieferorthopädie ermöglicht. Sie erleichtern die orthodontische Therapie erheblich, insbesondere durch die Reduzierung unerwünschter Nebenwirkungen. Die Verankerungskapazität, die die Mini-Implantate bieten, übertrifft die der konventionellen Apparaturen bei weitem (5). Eine Studie hat gezeigt, dass unter Zuhilfenahme von Mini-Implantaten der Verankerungsverlust im Vergleich zu konventionellen Systemen um 2,4 mm reduziert ist (15). Die breite Akzeptanz und Anwendung von Mini-Implantaten in der klinischen Praxis hat sich aufgrund der Einfachheit der Insertion und Entfernung, der geringen Kosten und der minimalen Anforderungen an die Patientencompliance etabliert (1, 5). Hinzufügen lässt sich außerdem, dass bei erwachsenen Patienten herkömmliche dentale Verankerungsmöglichkeiten aufgrund parodontaler Läsionen und/oder einer reduzierten Zahnzahl oftmals begrenzt sind und man so mithilfe von Mini-Implantaten zusätzliche Verankerungspunkte schaffen kann (16).

1.3.2 Funktionelle Differenzierung zu dentalen Implantaten

Kieferorthopädische Mini-Implantate sind speziell dafür konzipiert, eine temporäre, aber zuverlässige Verankerung in orthodontischen Behandlungen zu bieten. Dies unterscheidet sie grundlegend von dentalen Implantaten, die für den permanenten Zahnersatz vorgesehen sind. Ein entscheidendes Kriterium, welches die Mini-Implantate erfüllen müssen, ist die Möglichkeit der Entfernung nach Erfüllung ihrer Funktion. Selbst nach jahrelanger Nutzung können Mini-Implantate problemlos und ohne Anästhesie herausgedreht werden. Zwar kommt es auch bei Mini-Implantaten zu einer gewissen Osseointegration, doch aufgrund der glatten Oberfläche hat diese keinen wesentlichen Einfluss auf die Entfernung (17, 18). Dadurch kann nach dem Abschluss der aktiven kieferorthopädischen Behandlungsphase bei der Entfernung der Mini-Implantate auf aufwendige Verfahren wie Trepanbohrungen verzichtet werden. Sie lassen sich durch geringe Kraftanwendung, meist ohne Anästhesie, manuell oder mechanisch herausdrehen, was den Eingriff für den Patienten erheblich vereinfacht und die postoperative Heilung beschleunigt (19).

1.3.3 Dimensionen, Aufbau und Material

Die Dimensionen der Mini-Implantate variieren in der Länge von 4 bis 14 mm und im Durchmesser zwischen 1,2 und 2,3 mm (3). Ihre geringe Größe ermöglicht eine flexible Positionierung in verschiedenen Bereichen beider Kiefer (20). Die Mini-Implantate bestehen aus einer speziellen Titanlegierung, die hauptsächlich aus Titan, Aluminium und Vanadium zusammengesetzt ist. Eine häufig verwendete Legierung ist Ti-6Al-4V (Grad 5), die aus etwa 90 % Titan, 6 % Aluminium und 4 % Vanadium besteht (21). Diese Materialkombination verleiht den Mini-Implantaten eine hohe Stabilität, Korrosionsbeständigkeit und gute Biokompatibilität. Sie bestehen aus drei Hauptkomponenten: Kopf, Kragen und Schaft. Der Kopfteil, als Verbindungsstück zur orthodontischen Apparatur, bietet zahlreiche Gestaltungsoptionen, um eine vielfältige Verankerungsart zu ermöglichen. Es ist essenziell, dass der Kopf flach konstruiert ist, um Hebelwirkungen zu minimieren und die Beeinträchtigung des Patienten durch das hervorstehende Mini-Implantat so gering wie möglich zu halten. Der Kragen, der den transgingivalen Anteil bildet, muss eine dichte Mukosaanlagerung zulassen, um die Inzidenz von Perimukositis zu reduzieren, indem das Eindringen von Plaque und Speiseresten verhindert wird. Unterschnitte sind dabei zu vermeiden. Der intraossäre

Anteil, der Schaft, kann konisch, zylindrisch oder eine Kombination aus beiden Formen aufweisen, um eine optimale Stabilität zu gewährleisten (13).

1.3.4 Indikationen

Wie bereits erwähnt, fungieren die Mini-Implantate als vielseitige Verankerungshilfen mit unterschiedlichen Anwendungsmöglichkeiten. Zu den verschiedenen Indikationen gehören:

- 1) En-masse Retraktion im Oberkiefer und/oder Unterkiefer mit dem Bedarf der Molarenverankerung (22-27)
- 2) Behandlung eines transversalen Defizits im Oberkiefer (21, 28-31)
- 3) Mesialisierung (32-34)
- 4) Distalisierung (21, 35-38)
- 5) Molarenintrusion (39-41)
- 6) Einordnung verlagerter Zähne (21, 42, 43)
- 7) Präprothetischer Behandlungsbedarf (z.B. Molarenaufrichtung vor dentaler Implantatinserterion) (44, 45)

Es ist möglich, die Mini-Implantate entweder simultan oder konsekutiv für multiple Indikationen einzusetzen. So ist es beispielsweise realisierbar, dass sie gleichzeitig als Verankerungselement zur Einordnung eines dislozierten Zahns und zur Mesialisierung eines Molaren fungieren (Abb. 2).



Abbildung 2: Simultane Mehrfachnutzung von Mini-Implantaten im anterioren Gaumen

Zwei median inserierte Mini-Implantate sind mittels Beneplate verblockt. An ihnen sind sowohl ein beidseitiger Mesialslider zur Mesialisierung der Molaren als auch ein Teilbogen zur Einordnung des verlagerten Zahns 12 befestigt.

Quelle: Universitätsklinikum Düsseldorf, Poliklinik für Kieferorthopädie, internes Bildarchiv (Image Collector) (46)

1.3.5 Insertionsplanung

Konventionelle Planung

Die traditionelle kieferorthopädische Diagnostik und Planung nutzt hauptsächlich zweidimensionale Röntgenaufnahmen, wie Orthopantomogramme (OPG) und Fernröntgenseitenbilder (FRS) und die Vermessung von Gipsmodellen. Ergänzend hierzu werden intra- und extraoralen Fotografien angefertigt, die die Planung, auch hinsichtlich ästhetischer Parameter, unterstützt. Laut einer Studie aus dem Jahr 2020 weist die auf einem FRS basierende Einschätzung des Knochenangebots gewisse Limitationen auf (47). Mini-Implantate wurden üblicherweise ohne Führungshilfe mit einem maschinell oder manuell betriebenen Winkelstück eingesetzt.

Digitale Planung

Mit der Entwicklung digitaler Technologien hat sich die Präzision in der Planung und Umsetzung von Mini-Implantat-Insertionen deutlich verbessert. Intraorale Scanner erlauben die Erstellung von dreidimensionalen Modellen, die zusammen mit fortschrittlichen Bildgebungsmethoden wie der Digitalen Volumentomographie (DVT)

eine umfassende Darstellung des Behandlungsbereichs ermöglichen. Digitale Planungssoftwares ermöglichen darüber hinaus die genaue Simulation und Planung der Implantatpositionierung. Der Einsatz von Computer-Aided Design (CAD) zur Konzeption und Computer-Aided Manufacturing (CAM) zum 3D-Druck von Insertionsschablonen ermöglicht eine so genannte "geführte Insertion", durch die die geplante Positionierung der Mini-Implantate mit hoher Genauigkeit erreicht werden kann (Abb. 3). Diese Methode sichert, dass die im Vorfeld digital geplante Position der Mini-Implantate während der Insertion möglichst exakt umgesetzt wird. Neben CAD/CAM-gefertigten Schablonen können auch konventionell hergestellte Führungshilfen zur Unterstützung einer präzisen Mini-Implantat-Insertion eingesetzt werden. In einer *in-vitro*-Studie wurde die Genauigkeit palatinaler Mini-Implantat-Insertionen mithilfe verschiedener chirurgischer Schablonen untersucht, wobei CAD/CAM-basierte und konventionell hergestellte Führungshilfen verglichen wurden (48). Es wurden palatinale Mini-Implantate mithilfe verschiedener chirurgischer Schablonen in 3D-gedruckte Oberkiefermodelle inseriert. Ziel war es, die Übertragungsgenauigkeit konventionell hergestellter und CAD/CAM-gefertigter Schablonen unter kontrollierten Laborbedingungen zu vergleichen. Die Ergebnisse zeigten, dass konventionelle Schablonen aus Pattern Resin eine höhere Übertragungsgenauigkeit aufwiesen als die getesteten 3D-gedruckten Alternativen, wobei Letztere dennoch eine klinisch akzeptable Präzision erreichten. In einer Cadaver-Studie wurde die Genauigkeit digital geplanter Insertionsschablonen unter realitätsnäheren Bedingungen untersucht (49). Dabei zeigte sich, dass kommerziell gefertigte CAD/CAM-Schablonen (Gruppe A) eine signifikant höhere Präzision bei der Insertion palatinaler Mini-Implantate aufwiesen als intern produzierte, lediglich digital geplante Schablonen (Gruppe B) sowie freihändige Insertionen (Gruppe C). Die Ergebnisse unterstreichen die klinische Relevanz vollständig digital geplanter und professionell gefertigter Schablonen für eine sichere und reproduzierbare Mini-Implantat-Platzierung. Eine exakte Positionierung und Ausrichtung ist besonders bei Patienten mit pathologischen anatomischen Verhältnissen, wie zum Beispiel bei Lippen-Kiefer-Gaumen-Spalten, notwendig. Zusätzlich erlaubt die fortschrittliche CAD/CAM-Technologie die Fertigung kieferorthopädischer Apparaturen durch Verfahren wie das Laser-Sintern. Dieser Ansatz ermöglicht eine Herstellung von Apparaturen, die genau auf die individuellen anatomischen Gegebenheiten des Patienten abgestimmt sind. Eine aktuelle Studie verglich den konventionellen mit dem

digitalen Workflow bei der Anwendung palatinaler Mini-Implantate und deren zugehörigen Apparaturen (50). Dabei zeigte sich, dass der digitale Ansatz durch präzisere Planung, individualisierte Gestaltung und die Möglichkeit die Insertion und die Eingliederung der Apparatur in einer Sitzung durchzuführen, deutliche Vorteile hinsichtlich Effizienz und Passgenauigkeit bietet. Allerdings wurde auch auf mögliche Nachteile hingewiesen, wie erhöhte Kosten und die eingeschränkte intraorale Aktivierbarkeit metallgedruckter Konstruktionen. Zudem erfordern digital gefertigte Apparaturen stets einen Laborprozess, während einige konventionelle Mini-Implantat-Apparaturen direkt am Behandlungsstuhl angepasst werden können.



Abbildung 3: CAD/CAM gefertigte Apparatur zur skelettalen Verankerung im Oberkiefer

Die Abbildung zeigt von links nach rechts die digitale Konstruktionsplanung eines skelettal verankerten Benesliders im anterioren Gaumen, das gedruckte Modell mit CAD/CAM gefertigter Apparatur sowie die klinische Situation nach Eingliedern des Benesliders.

Quelle: Universitätsklinikum Düsseldorf, Poliklinik für Kieferorthopädie, internes Bildarchiv (Image Collector) (46)

Die Verwendung einer DVT ausschließlich für Planungszwecke sollte sorgfältig abgewogen werden, da die Strahlenbelastung bei dieser Methode hoch ist und somit eine strengere Indikationsstellung erforderlich macht (51). Gemäß den aktuellen Richtlinien der Deutschen Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde (DGZMK) ist eine besonders sorgfältige Prüfung der Indikationen bei der Anwendung von DVT bei Kindern notwendig. Laut diesen Richtlinien ist eine DVT-Anfertigung nur dann gerechtfertigt, wenn der diagnostische Mehrwert die potenziellen Risiken durch die Strahlenexposition überwiegt (52).

1.3.6 Insertionsorte

Gaumen

Im Oberkiefer ist die Insertion von kieferorthopädischen Mini-Implantaten im harten Gaumenbereich, insbesondere median und paramedian, aufgrund der günstigen

Knochenbedingungen und der geringen Risiken weit verbreitet. Im Bereich der Sutura palatina mediana, auf Höhe der dritten Gaumenrugae ist die Knochendichte bei erwachsenen Patienten typischerweise hoch, was zu einer guten Primärstabilität der Mini-Implantate führt und das Risiko für eine Verletzung der Zahnwurzeln minimiert (53). Paramediane Bereiche bieten ähnliche Vorteile, wobei die Insertion seitlich der Suture erfolgt. Hier ist ebenfalls eine ausreichende Knochendicke vorhanden, die die Stabilität des Mini-Implantats unterstützt. In posterioren Abschnitten des harten Gaumens ist jedoch ausschließlich eine mediane Insertion sinnvoll, da das Knochenangebot paramedian reduziert ist (54). Zudem ist die Schleimhaut im Gaumenbereich meist dicker und keratinisiert, was zu geringeren Entzündungsraten und einer besseren postoperativen Heilung führt. Anterior der dritten Gaumenrugae sollten die Mini-Implantate nicht inseriert werden, da in diesem Bereich die Schleimhautdicke erhöht ist und so die Gefahr des Kippens des Mini-Implantats besteht (55). Der Bereich zwischen den Prämolaren im vorderen Gaumen gilt als geeigneter Insertionsort, da er eine hohe Erfolgsrate für die Verankerung bietet (Abb. 4) (56-58).

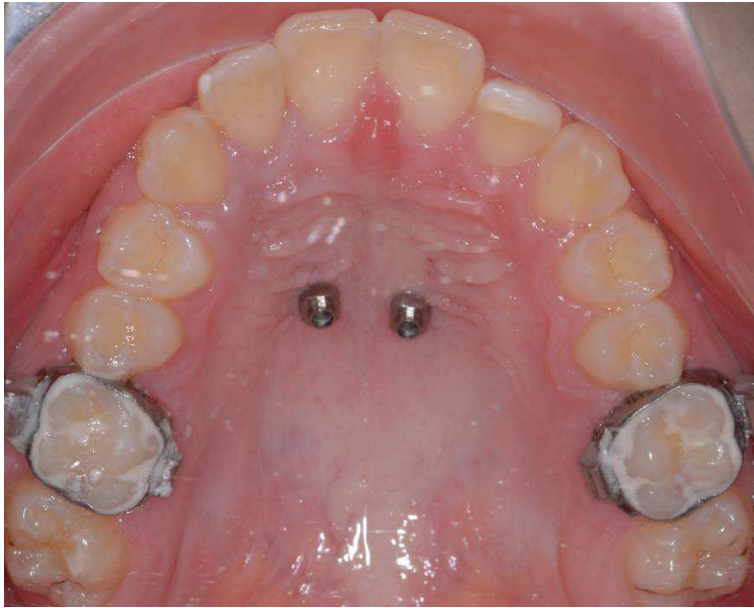


Abbildung 4: Kieferorthopädische Mini-Implantate im anterioren Gaumen

Zwei paramedian inserierte Mini-Implantate im anterioren Gaumen sowie zwei zementierte Molarenbänder zur Vorbereitung der Eingliederung einer skelettal verankerten Apparatur.

Quelle: Universitätsklinikum Düsseldorf, Poliklinik für Kieferorthopädie, internes Bildarchiv (Image Collector) (46)

Insgesamt ergibt sich daraus die sogenannte T-Zone im harten Gaumen, die sich für die Mini-Implant-Insertion besonders gut eignet (58). Sie befindet sich posterior der drei Gaumenfalten und inkludiert sowohl den medianen als auch den paramedianen Insertionsort (Abb. 5).

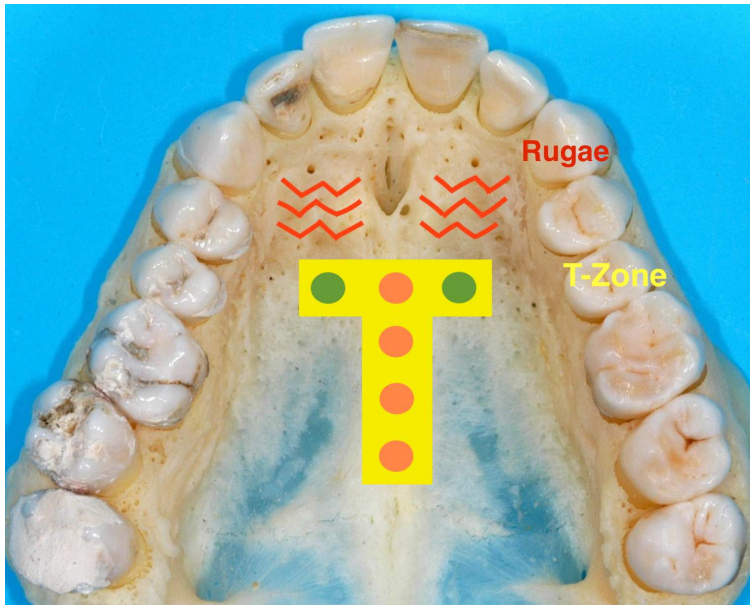


Abbildung 5: T-Zone im anterioren Gaumen

Die schematische Darstellung zeigt die T-Zone als bevorzugten Insertionsbereich für Mini-Implantate im anterioren Gaumen, posterior der palatinalen Rugae gelegen und sowohl die mediane als auch die paramediane Region umfassend.

Quelle: Universitätsklinikum Düsseldorf, Poliklinik für Kieferorthopädie, internes Bildarchiv (Image Collector) (46)

Alveolarfortsatz

Im Alveolarfortsatz werden Mini-Implantate häufig im bukkalen Bereich zwischen den Zahnwurzeln eingesetzt (Abb. 6). Dieser Bereich bietet viele Insertionsmöglichkeiten, jedoch mit einem erhöhten Risiko, da die Nähe zu den Zahnwurzeln und die variierende Knochendichte besondere Sorgfalt bei der Planung und Positionierung erfordert. Die posteriore Region des Alveolarfortsatzes, insbesondere zwischen den zweiten Prämolaren und den Molaren, wird als bevorzugter Bereich für die Platzierung angesehen. Insbesondere zwischen den Zahnwurzeln bedingt die Insertion einen Kompromiss zwischen geringem Durchmesser für eine sichere Platzierung in begrenzten interradikulären Räumen und dem Risiko eines Implantatbruchs. Ein kleinerer Durchmesser kann für eine sichere Insertion in enge interradikuläre Räume notwendig sein, erhöht aber das Risiko eines Implantatbruchs während der Insertion (59). Darüber hinaus kann eine zu nahe an den Zahnwurzeln platzierte Verankerung dazu führen, dass das Mini-Implantat mit den Wurzeln während der orthodontischen Bewegung kollidiert, was die effektive Zahnbewegung begrenzt. Die Dimensionierung

und Positionierung der Mini-Implantate im Alveolarkamm erfordert demnach schon bei der Insertion eine sorgfältige Berücksichtigung der geplanten Zahnbewegung. Eine präoperative Bildgebung ist entscheidend, um eine genaue Einschätzung der anatomischen Verhältnisse zu erhalten und so das Risiko von Implantatverlusten zu minimieren. Die Weichgewebebedingungen im Alveolarfortsatz können variieren und sind oft weniger dicht als im Gaumenbereich, was eine gründliche Mundhygiene und Nachsorge zur Vermeidung von Entzündungen erforderlich macht (20).



Abbildung 6: Kieferorthopädisches Mini-Implantat im Alveolarfortsatz

Ein bukkal im Alveolarfortsatz zwischen den Wurzeln der Zähne 44 und 45 inseriertes Mini-Implantat zur skelettalen Verankerung zur Mesialisierung des Unterkiefermolaren.

Quelle: Universitätsklinikum Düsseldorf, Poliklinik für Kieferorthopädie, internes Bildarchiv (Image Collector) (46)

1.3.7 Verwendetes Mini-Implantat-System

In der vorliegenden Untersuchung sollte nur ein Mini-Implantat-System retrospektiv untersucht werden (Benefit, PSM Medical, Gunningen, Deutschland), um systematische Verzerrungen durch die Einbeziehung unterschiedlicher Systeme zu vermeiden. Es handelt sich dabei um Mini-Implantate aus einer Grad-V-Titanlegierung, die in den Längen von 7 - 15 mm und den Durchmessern 2 oder 2,3 mm erhältlich sind (Abb. 7). Die Längenangaben beziehen sich auf den intraossären und transmukosalen Bereich des Mini-Implantats. Die Titanschrauben sind

selbstbohrend, was durch die durchlaufend scharfen Gewindespitzen und eine Schraubenspitze ermöglicht wird. Dadurch ist die Insertion auch ohne vorherige Pilotbohrung möglich. Dennoch wird bei Erwachsenen aufgrund der höheren Knochendichte eine Vorbohrung empfohlen, um die notwendige Insertionskraft zu reduzieren. Ein weiteres Merkmal ist die mögliche Verbindung zwischen Mini-Implantat und orthodontischer Apparatur, die durch die Integration verschiedener Abutments mittels einer Schraube auf dem Implantat realisiert wird. Ein Zwölfkant verhindert eine mögliche Rotation des Abutments. Außerdem können zwei Mini-Implantate durch eine Miniplatte verblockt werden, wodurch eine höhere Verankerungskapazität ermöglicht wird (60).

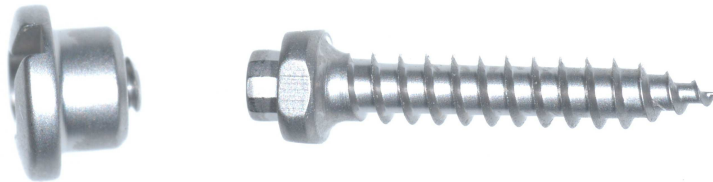


Abbildung 7: Benefit Mini-Implantat

Links ist die Abdeckschraube dargestellt, rechts der transmukosale Anteil des Mini-Implantats und der intraossäre Anteil mit durchlaufend scharfen Gewindespitzen und der Schraubenspitze.

Quelle: Universitätsklinikum Düsseldorf, Poliklinik für Kieferorthopädie, internes Bildarchiv (Image Collector) (46)

1.3.8 Abutments

Abutments stellen die Verbindung zwischen dem Mini-Implantat und der daran befestigten Apparatur her. Sie übertragen die Kräfte, die für die Zahnbewegung erforderlich sind, auf das Mini-Implantat. Sie bestehen aus biokompatiblen Materialien, wie Titan oder Edelstahl, die zum einen eine gute Verträglichkeit mit dem umliegenden Gewebe aufweisen und zum anderen eine hohe mechanische Festigkeit bieten. Im Fall des Benefit-Systems kommen Stahl-Abutments zum Einsatz. Das klassische Abutment dient nur als Verbindungselement, an dem keine zusätzlichen Komponenten befestigt sind. Mit einer sogenannten Beneplate hat man die Möglichkeit, zwei Mini-Implantate miteinander zu verblocken (Abb. 8). An der

Beneplate können Drähte in verschiedenen Konfigurationen befestigt sein, die individuell für den jeweiligen Patienten angepasst und gebogen werden können. Je nach klinischem Einsatzgebiet sind an den Abutments unterschiedliche Arten für Befestigungen angebracht. Eine häufige Konfiguration besteht darin, dass ein Draht direkt am Abutment fixiert ist, der dann individuell angepasst wird. Eine weitere Option ist die direkte Verbindung von ein oder zwei Brackets am Abutment, die als Ankerpunkte für Bögen oder andere orthodontische Elemente dienen können. Als Ankerpunkt kann auch eine direkt am Abutment befestigte Öse dienen (61).



Abbildung 8: Beneplate mit Bracket oder Bogen

Dargestellt sind verschiedene Ausführungen der Beneplate, darunter links eine Variante mit angeschweißtem Bracket, in der Mitte mit angeschweißtem Bogen und rechts eine einfache Beneplate. Quelle: Universitätsklinikum Düsseldorf, Poliklinik für Kieferorthopädie, internes Bildarchiv (Image Collector) (46)

Für den temporären Zahnersatz gibt es nicht-metallische Abutments, die sich für die Befestigung von temporären Kronen eignen. Polyetheretherketon (PEEK) ist ein biokompatibler Hochleistungskunststoff. Diese Abutments ermöglichen eine stabile Verankerung temporärer prothetischer Versorgungen auf den Mini-Implantaten und sind somit eine geeignete, kurzfristige Lösung als Zahnersatz (62).

1.4 Primärstabilität und Sekundärstabilität

Die Integration von Implantaten in den Kieferknochen unterteilt sich in zwei Phasen, die sogenannte Primärstabilität und die Sekundärstabilität. Diese unterscheiden sich

signifikant in ihren biomechanischen und zellulären Eigenschaften. Im Kontext kieferorthopädischer Mini-Implantate manifestiert sich die Primärstabilität in der Kapazität des Implantats, unmittelbar nach der Insertion orthodontischen Kräften standzuhalten (63). Diese initiale Stabilität ist eine Funktion der mechanischen Verankerung, die durch die Interaktion zwischen dem Mini-Implantat und dem Kieferknochen entsteht. Hierbei sind eine adäquate Knochenqualität und -dichte von entscheidender Bedeutung für die sofortige Belastbarkeit (13, 64, 65). Bei dentalen Implantaten ist die Primärstabilität essenziell für die Osseointegration und somit für den langfristigen Erfolg des Implantats von zentraler Relevanz (66). Zwischen der Primärstabilität und der darauffolgenden Sekundärstabilität tritt eine Phase mit herabgesetzter Implantatstabilität auf. Diese tritt typischerweise nach etwa zwei Wochen ein und ist auf die Entzündungsreaktion zurückzuführen, die durch die Implantation ausgelöst wird (67, 68). In dieser Phase kommt es zu einer osteoklastischen Resorption des umgebenden Knochens als natürliche Antwort auf die implantatinduzierte Veränderung. Diese Resorption bereitet das Feld für die nachfolgende Knochenregeneration, indem die freiliegende Spongiosa als leitfähiges Gerüst für die Osteoblasten dient, die mit dem Aufbau von neuem Knochengewebe um das Implantat herum beginnen. Während der Sekundärstabilität überwiegen schließlich die osteoblastischen Aktivitäten, was zu einer zunehmenden Stabilisierung des Knochens führt (69, 70). Bei dentalen Implantaten spielt die Oberflächenbeschaffenheit wegen der Wechselwirkung mit den umgebenen Knochengewebezellen eine große Rolle, denn eine erhöhte Rauigkeit der Implantatoberfläche fördert die Zelladhäsion und Knochenintegration (71, 72). Methoden wie Sandstrahlen und Säureätzung optimieren die Oberfläche für eine verbesserte Migration und Haftung der Osteoblasten, was die Osseointegration begünstigt (73). Bei Mini-Implantaten, die in der Kieferorthopädie Verwendung finden, stellt sich die Frage, ob eine solche dauerhafte Osseointegration wünschenswert ist, da sie nur temporär bis zum Abschluss der Behandlung stabil verankert sein sollen und danach leicht zu entfernen sein müssen. Hier ist die Primärstabilität entscheidend für die sofortige Belastung. Diese Stabilität kann durch eine Vorbohrung mit einem zu großen Durchmesser verringert werden (74-76). Bei einer hohen Knochendichte ist eine Vorbohrung jedoch ratsam. Wilmes et al. empfehlen bei erwachsenen Patienten die Verwendung eines Vorbohrers, dessen Durchmesser 0,5mm kleiner ist, als der des zu inserierenden Mini-Implantats (76). Dadurch kann das Drehmoment, das bei

der Insertion aufgebracht werden muss, reduziert werden, denn ein zu hoher Insertionstorque erhöht das Frakturrisiko deutlich. Zusätzlich dazu könnte es bei einem zu hohen Drehmoment aufgrund der schlechten Wärmeleitfähigkeit des Knochens zu Hitzeentwicklung und dadurch zu einer thermisch induzierten Osteonekrose kommen (77). Laut einer Untersuchung an porcinem Iliumknochen wird bei Mini-Implantaten mit einem Durchmesser von 1,6mm ein Insertionstorque von 20 Ncm empfohlen, da ab Werten von 23 Ncm Implantatfrakturen zu beobachten waren (76). Die Verwendung von Chirurgiemotoren und Mikromotoren ermöglicht es, ein maximales Drehmoment bei der Insertion festzulegen, um Überbelastungen zu verhindern. Wilmes et al. konnten zudem zeigen, dass insbesondere der Durchmesser der Mini-Implantate einen erheblichen Einfluss auf das Frakturdrehmoment hat. Größere Durchmesser wiesen dabei signifikant höhere Frakturdrehmomente auf (78).

1.5 Verlust von Mini-Implantaten

Trotz der zahlreichen Vorteile stellt das Verlustrisiko kieferorthopädischer Mini-Implantate weiterhin eine wesentliche Herausforderung dar. Häufig lässt es sich auf eine unzureichende kortikale Knochendicke, fehlerhafte Insertionstechniken sowie auf periimplantäre Entzündungen im Rahmen unzureichender Mundhygiene zurückführen (76, 79, 80). Die Mundhygiene nimmt im Kontext der Stabilität temporärer Verankerungselemente, wie Mini-Implantate, eine zentrale Rolle ein. Durch die vermehrte Plaqueakkumulation infolge kieferorthopädischer Apparaturen kann es zu entzündlichen Prozessen kommen, die den Behandlungserfolg negativ beeinflussen. Daher sind individuelle Präventionsmaßnahmen unter Berücksichtigung patientenspezifischer Risikofaktoren essenziell (81). Eine fehlerhafte Insertionstechnik kann darüber hinaus zu iatrogenen Schädigungen benachbarter anatomischer Strukturen, wie des Parodontalapparates, der Zahnwurzeln, neurovaskulärer Strukturen oder der Kieferhöhle, führen. In solchen Fällen ist eine Explantation mit anschließender Repositionierung an eine geeignete Insertionsstelle erforderlich. In der Regel bleibt die Prognose der betroffenen Zähne hierbei unbeeinträchtigt. Wird die Stabilität eines Mini-Implantats durch entzündliche Prozesse oder knöcherne Umbauvorgänge kompromittiert, führt dies in der Regel zu einem irreversiblen Verlust der Verankerung (79). Eine vollständige Osseointegration von Mini-Implantaten bleibt in der Regel aus, sodass während der

kieferorthopädischen Behandlung mit geringen Bewegungen im Bereich von etwa 1 bis 1,5 mm gerechnet werden muss (82). Als allgemeine Empfehlung gilt, dass ein Abstand von mindestens 2 mm zu benachbarten anatomischen Strukturen eingehalten werden sollte, insbesondere bei einer Insertion in interradiäre Regionen (79, 83, 84). Eine Studie zur Verlustrate von Mini-Implantaten hat gezeigt, dass der Großteil der Verluste innerhalb von 100 bis 150 Tagen nach Belastung mit orthodontischen Kräften auftritt (85). Aus einer Metaanalyse aus dem Jahr 2018 geht hervor, dass die Verlustraten von Mini-Implantaten zwischen 1,3% und 16,4% liegen (7). Diese Spanne ist bedeutsam, da sie auf unterschiedliche Einflussfaktoren im klinischen Einsatz dieser Verankerungssysteme hinweist.

In der Literatur gibt es unterschiedliche Definitionen für den Verlust, den Erfolg oder das Überleben eines Mini-Implantats, was die Vergleichbarkeit von Studienergebnissen erschwert. Ein kritischer Aspekt bei der Bewertung des Erfolgs oder Misserfolgs von Mini-Implantaten ist die Festlegung klarer Kriterien für deren Verlust. In unserer Analyse wurde ein Verlust als solcher gewertet, wenn die Therapie mit der Mini-Implantat-Apparatur aufgrund einer Lockerung des Mini-Implantats oder einer periimplantären Entzündung abgebrochen werden musste. Da dies die Verankerung der kieferorthopädischen Apparatur und somit die Effektivität des gesamten Behandlungsplans beeinträchtigt, ist es von wesentlicher Bedeutung den Einfluss verschiedener Faktoren hinsichtlich der Verlustrate zu analysieren.

1.6 Fragestellung und Zielsetzung der Arbeit

Die Stabilität von Mini-Implantaten ist von entscheidender Bedeutung für den Erfolg klinischer Behandlungen in der Kieferorthopädie. Die Verlustrate der Mini-Implantate wird von einer Konstellation unterschiedlicher Faktoren beeinflusst. Zu den in unserer Studie untersuchten Kriterien zählt der Insertionsort (median im Vergleich zu paramedian im anterioren Gaumen). Auch die spezifische Funktion der Apparatur und die Anzahl der eingesetzten Mini-Implantate können die Verlustrate beeinflussen, da sie mit unterschiedlichen Belastungen einhergehen. Darüber hinaus können patientenspezifische Faktoren wie Alter und Geschlecht Einfluss auf die Ergebnisse haben, da diese Faktoren die Dynamik des Knochenstoffwechsels und somit die Stabilität der Mini-Implantate modifizieren können. In der vorliegenden Untersuchung wurden implantatspezifische Variablen, wie zum Beispiel die Größe oder

Oberflächenbeschaffenheit, nicht berücksichtigt. Die Behandlungsfälle wurden systematisch aufgearbeitet, um festzustellen, ob und inwieweit spezifische Umstände mit einem erhöhten Risiko des Implantatverlustes korrelieren. Anschließend werden die Ergebnisse mit der vorhandenen Literatur verglichen. Ziel der Studie ist es, durch die Analyse dieser Faktoren eine Grundlage für die Optimierung kieferorthopädischer Behandlungsstrategien zu schaffen, damit das Risiko des Mini-Implantat-Verlustes minimiert und die Behandlungserfolge maximiert werden können.

2 Material und Methoden

Diese Studie beruht auf einer retrospektiven Analyse von Patientendaten der kieferorthopädischen Abteilung der Universitätsklinik Düsseldorf. In die Untersuchung wurden Patientenfälle aus den Jahren 2007 bis 2021 eingeschlossen, bei denen die Behandlung mit Mini-Implantaten als Verankerungselement entweder erfolgreich abgeschlossen wurde oder gescheitert war. Die Stichprobe umfasst Daten von insgesamt 1358 Patienten (559 männliche und 799 weibliche Patienten). Insgesamt wurden 2632 Mini-Implantate verwendet, wobei die Anzahl der pro Patient inserierten Implantate bis zu vier betrug. Die Insertionen wurden sowohl von Fachzahnärzten als auch von Assistenzzahnärzten der kieferorthopädischen Abteilung durchgeführt. Die kritischen Behandlungsschritte jedes Patienten wurden fotografiert und in einer Datenbank, dem sogenannten Image Collector, systematisch erfasst. Anhand dieser Datenbank war es möglich, die initiale Ausgangslage, den Fortschritt sowie den Abschluss oder den Abbruch der Therapie zu dokumentieren. Ergänzend boten die Patientenakten einen zusätzlichen Einblick in den individuellen Behandlungsverlauf.

2.1 Ethische und rechtliche Unbedenklichkeit

Die Ethikkommission der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf hat das Studienprotokoll geprüft und für ethisch unbedenklich befunden (Nr. 2021-1303).

2.2 Material

Sämtliche Patienten wurden mit Mini-Implantaten aus einer Grad-V-Titanlegierung versorgt. Die Mini-Implantate standen in den Längen von 7 bis 15 mm und mit Durchmessern von 2,0 oder 2,3 mm zur Verfügung.

2.3 Ablauf der Mini-Implantat-Insertion

2.3.1 Vorbereitung

Für eine oberflächliche Anästhesie der Schleimhaut wurde je nach Wunsch des Patienten Xylocain mit einem Wattepellet auf die Stelle aufgetragen, wo anschließend die Injektion erfolgte. Nach einigen Minuten wurden paramedian zwei Anästhesiedepots gesetzt (Abb. 9). Hierfür wurde Ultracain verwendet.

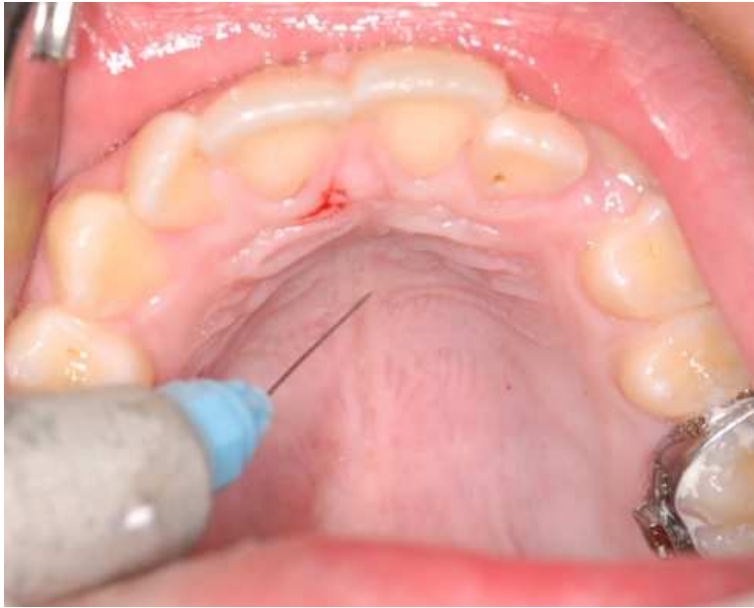


Abbildung 9: Palatinale Infiltrationsanästhesie im anterioren Gaumen

Injektion einer Infiltrationsanästhesie im anterioren Gaumen zur örtlichen Betäubung vor der Insertion von Mini-Implantaten im Bereich der T-Zone.

Quelle: Universitätsklinikum Düsseldorf, Poliklinik für Kieferorthopädie, internes Bildarchiv (Image Collector) (46)

2.3.2 Insertion

Nach Überprüfen der Anästhesie wurde in indizierten Fällen eine Vorbohrung durchgeführt. Dies ist besonders bei älteren Patienten bei medianer Insertion zu empfehlen, da die Sutura palatina mediana oft eine starke Verknöcherung aufweist. Die Tiefe der Vorbohrung betrug circa 3 mm und der Durchmesser des Vorbohrers war 0,5mm kleiner als der des zu inserierenden Mini-Implantats (Abb. 10) (76).



Abbildung 10: Vorbohrung mit Pilotbohrer

Vorbohrung in die Sutura palatina mediana zur Vorbereitung der Insertion eines medianen Mini-Implantats im anterioren Gaumen.

Quelle: Universitätsklinikum Düsseldorf, Poliklinik für Kieferorthopädie, internes Bildarchiv (Image Collector) (46)

Anschließend erfolgt die transgingivale Mini-Implantat-Insertion (Abb. 11). Auf ein blaues Winkelstück mit DIN-Anschluss wird ein manueller Drehansatz aufgesetzt (Abb. 12). Eine weitere Möglichkeit ist ein Akkuschraubendreher. Sowohl das manuelle sowie das maschinelle Inserieren kann mit oder ohne Drehmoment-Kontrolle erfolgen. Entscheidend ist, dass das Mini-Implantat nicht zu schnell in den Gaumen rotiert wird, da es ohne Wasserkühlung durchgeführt wird und eine Überhitzung vermieden werden muss.



Abbildung 11: Insertion eines Mini-Implantats

Insertion eines Mini-Implantats in die Sutura palatina mediana des anterioren Gaumens mithilfe eines maschinellen Winkelstückmotors.

Quelle: Universitätsklinikum Düsseldorf, Poliklinik für Kieferorthopädie, internes Bildarchiv (Image Collector) (46)

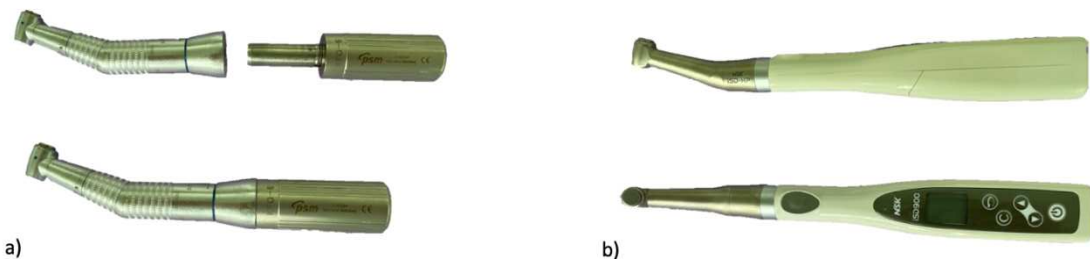


Abbildung 12: Winkelstücke zur Insertion kieferorthopädischer Mini-Implantate

a) manueller Winkelstück-Ansatz nach Fritzemeier (psm Medical Solutions, Gunningen, Deutschland);

b) maschineller Winkelstückmotor iSD900 (NSK Nakanishi Inc., Tochigi, Japan)

Quelle: Universitätsklinikum Düsseldorf, Poliklinik für Kieferorthopädie, internes Bildarchiv (Image Collector) (46)

Durch computergestützte Planung können die Mini-Implantate heutzutage mithilfe von Schablonen inseriert werden. Durch die Verwendung solcher Schablonen ist der

Insertionsort, die Insertionstiefe und die Angulation exakt determiniert. Dadurch wird die Prozedur noch risikoarmer, da mögliche Fehlerquellen reduziert werden (86).

2.3.3 Belastungszeitpunkt

Nach der Insertion werden die Mini-Implantate direkt auf Primärstabilität überprüft, da sie in der Regel sofort belastet werden können. Während früher zunächst ein Abdruck angefertigt wurde, kann heutzutage mit Hilfe von CAD/CAM gefertigten Apparaturen anschließend direkt das kieferorthopädische Gerät eingegliedert werden.

2.3.4 Explantation

Nach Erreichen des Behandlungsziels werden die Mini-Implantate in der Regel ohne Anästhesie wieder herausgedreht, sofern sie nicht noch für eine anschließend folgende Apparatur zur Verankerung benötigt werden.

2.4 Apparaturen aus dieser Studie

Die skelettale Verankerung im Oberkiefer kann vielseitig genutzt werden. Es gibt verschiedene Indikationen und die damit korrespondierenden kieferorthopädischen Apparaturen. Die meisten Apparaturen verbinden die Mini-Implantate unmittelbar mit der zu bewegenden Zahngruppe. Hier spricht man von der direkten Verankerungsform. Im Gegensatz dazu ist bei der indirekten Verankerung noch ein Verankerungsblock dazwischengeschaltet. Dieser Block dient als statisches Bindeglied zwischen dem Mini-Implantat und der zu bewegenden Zahneinheit. Im Folgenden werden die in unserer Studie am häufigsten eingesetzten Apparaturen mit ihrer jeweiligen Verankerungsform dargestellt.

2.4.1 Beneslider

Eine der häufigsten Indikationen ist die Molarendistalisierung im Oberkiefer. Ziel dabei ist es bei Platzmangel, Platz für die Ausrichtung aller Zähne zu schaffen. Der Beneslider ermöglicht eine körperliche Distalisierung der Molaren, es handelt sich hier um eine direkte Verankerung (Abb. 13). Er wird an den ersten Molaren befestigt, es sei denn, die Weisheitszähne sind durchgebrochen. Dann wird er an den zweiten Molaren befestigt. Wenn nur in einem Quadranten distalisiert werden muss, kann der Beneslider auch einseitig verwendet werden.



Abbildung 13: Beneslider mit zwei medianen Mini-Implantaten

Apparatur zur Distalisierung der oberen Molaren, verankert an zwei median im anterioren Gaumen inserierten Mini-Implantaten, über eine Beneplate miteinander verblockt und an Molarenbändern befestigt.

Quelle: Universitätsklinikum Düsseldorf, Poliklinik für Kieferorthopädie, internes Bildarchiv (Image Collector) (46)

2.4.2 Mesialslider

Ist das Ziel die Mesialisierung der Molaren, wird der Mesialslider verwendet (Abb. 14). Genau wie bei dem Beneslider handelt es sich um die direkte Verankerungsform und der Mesialslider kann bei Bedarf ebenfalls nur einseitig verwendet werden (Abb. 15).

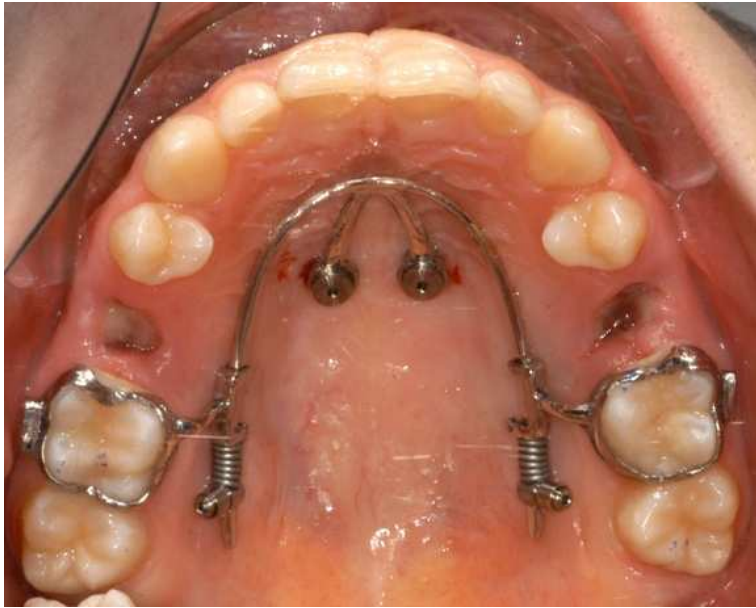


Abbildung 14: Mesialslider mit zwei paramedianen Mini-Implantaten

Apparatur zur Mesialisierung der oberen Molaren, verankert an zwei paramedian im anterioren Gaumen inserierten Mini-Implantaten und an Molarenbändern befestigt.

Quelle: Universitätsklinikum Düsseldorf, Poliklinik für Kieferorthopädie, internes Bildarchiv (Image Collector) (46)



Abbildung 15: Einseitiger Mesialslider mit zwei paramedianen Mini-Implantaten

Apparatur zur einseitigen Mesialisierung im Oberkiefer im ersten Quadranten, verankert an zwei paramedian im anterioren Gaumen inserierten Mini-Implantaten und direkt über Komposit an den Zähnen 16 und 15 befestigt.

Quelle: Universitätsklinikum Düsseldorf, Poliklinik für Kieferorthopädie, internes Bildarchiv (Image Collector) (46)

2.4.3 Mesial-Distal-Slider

Um Asymmetrien zu behandeln, wird der Mesial-Distal-Slider eingesetzt, bei dem in einem Quadranten mesialisiert und im anderen distalisiert wird (Abb. 16). Die zu bewegendenden Zahneinheiten sind direkt mit den Mini-Implantaten verbunden.



Abbildung 16: Mesial-Distal-Slider mit zwei medianen Mini-Implantaten

Apparatur, bei der im ersten Quadranten mesialisiert und im zweiten distalisiert wird, verankert an zwei median im anterioren Gaumen inserierten Mini-Implantaten, über eine Beneplate miteinander verblockt und an Molarenbändern befestigt.

Quelle: Universitätsklinikum Düsseldorf, Poliklinik für Kieferorthopädie, internes Bildarchiv (Image Collector) (46)

2.4.4 Hybridhyrax

Zur Behandlung eines Kreuzbisses in Form einer skelettalen Expansion der Maxilla ist die Hybridhyrax geeignet. Auch hier handelt es sich um eine direkte Verankerung. Ihr Ziel ist die Gaumennahterweiterung, die sowohl dental als auch skelettal verankert wird. Sie wird ebenfalls an den ersten Molaren befestigt und enthält eine zentrale Schraube, die zur schrittweisen transversalen Erweiterung des Oberkiefers betätigt wird (Abb. 17). Durch das Drehen der Schraube werden die Knochenhälften des Oberkiefers auseinanderbewegt, was die Mittelgesichtssuturen stimuliert und eine allmähliche Expansion ermöglicht (87, 88). Das sogenannte Alternate Rapid Maxillary Expansion and Constriction Protokoll (Alt-RAMEC) wurde 2005 von Liou et al.

eingeführt und wird häufig mit der Gaumennahterweiterung bei Klasse III Therapie eingesetzt (89). Es zielt darauf ab durch die Stimulation der Suturen den Oberkiefer ausreichend weit protrahieren zu können (90). Das Protokoll sieht vor, dass der Oberkiefer in der ersten Woche expandiert und in der zweiten Woche durch das Zurückstellen der Expansionsschraube komprimiert wird. Dieser Zyklus von Expansion und Kompression wird abwechselnd über einen Zeitraum von 7 bis 8 Wochen fortgesetzt, abhängig von der gewünschten finalen Breite des Oberkiefers.



Abbildung 17: Hybridhyrax mit zwei paramedianen Mini-Implantaten

Apparatur zur skelettal verankerten Gaumennahterweiterung, verankert an zwei paramedian im anterioren Gaumen inserierten Mini-Implantaten und an Molarenbändern befestigt.

Quelle: Universitätsklinikum Düsseldorf, Poliklinik für Kieferorthopädie, internes Bildarchiv (Image Collector) (46)

2.4.5 Molarenverankerung

Die ossäre Verankerung der Molaren kommt bei der Retraktion im Oberkiefer zur Anwendung. Hier spricht man von indirekter Verankerung, denn die ersten Molaren werden an den Mini-Implantaten fixiert und so stationär gehalten (Abb. 18). Diese Konfiguration ermöglicht es, die Frontzähne durch eine En-Masse-Retraktion zu distalisieren, ohne dass es zu einer unerwünschten Mesialisierung der Molaren kommt.



Abbildung 18: Molarenverankerung mit zwei paramedianen Mini-Implantaten

Skelettale Verankerung der oberen zweiten Molaren nach Extraktion der oberen ersten Molaren im Rahmen einer En-Masse-Retraktion, verankert an zwei paramedian im anterioren Gaumen inserierten Mini-Implantaten und an Molarenbändern befestigt.

Quelle: Universitätsklinikum Düsseldorf, Poliklinik für Kieferorthopädie, internes Bildarchiv (Image Collector) (46)

2.4.6 Mausefalle

Die Korrektur eines frontal offenen Bisses kann mithilfe der Mausefalle behandelt werden, deren Aufgabe in der Intrusion der Molaren besteht (Abb. 19). Zudem kann sie präprothetisch zur Intrusion elongierter Molaren dienen. Den Namen der Apparatur verdankt sie ihrem von okklusal betrachteten Erscheinungsbild, welches einer Mausefalle ähnelt (91). Da die Mini-Implantate über die Apparatur direkt mit den Molaren, die intrudiert werden sollen, verbunden sind, spricht man auch hier von der direkten Verankerungsform.

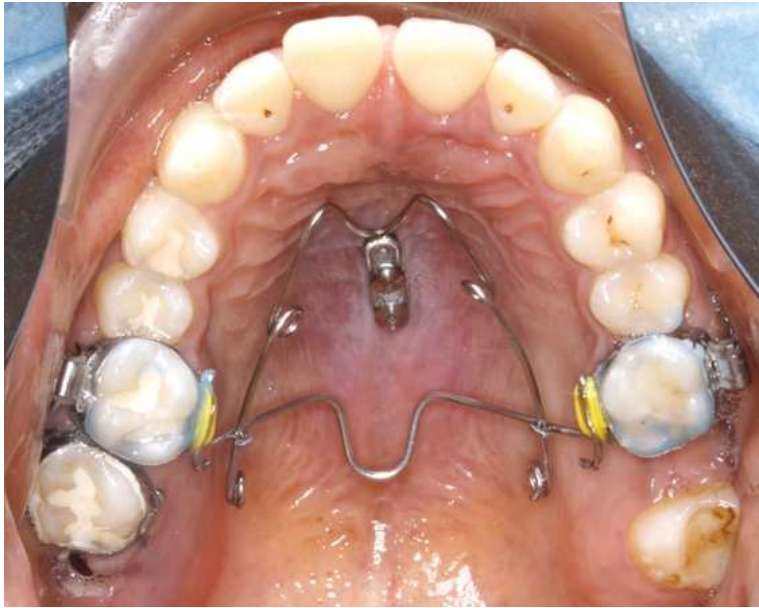


Abbildung 19: Mausefalle mit zwei medianen Mini-Implantaten

Apparatur zur Molarenintrusion im Oberkiefer, verankert an zwei median im anterioren Gaumen inserierten Mini-Implantaten, über eine Beneplate miteinander verblockt und an Molarenbändern befestigt.

Quelle: Universitätsklinikum Düsseldorf, Poliklinik für Kieferorthopädie, internes Bildarchiv (Image Collector) (46)

2.4.7 Pendulum B

Die Hauptfunktion der Pendulum B Apparatur ist ebenfalls die Distalisierung von Molaren im Oberkiefer und es handelt sich auch um eine direkte Verankerung (Abb. 20). Während der Beneslider auf die körperliche Distalisation der Molaren fokussiert ist, kann die Pendulum B Apparatur durch die spezielle Anordnung und das Design der Drahtkomponenten zudem eine rotatorische oder aufrichtende Kraft auf die Molaren ausüben. Dies kann zum Beispiel dann relevant werden, wenn zusätzlicher Platz geschaffen werden soll, indem man einen Molaren um seine palatinale Wurzel nach distal rotiert.



Abbildung 20: Pendulum B mit zwei medianen Mini-Implantaten

Apparatur zur Distalisierung der oberen Molaren mit zusätzlicher Möglichkeit zur Rotation und Aufrichtung der Molaren, verankert an zwei median im anterioren Gaumen inserierten Mini-Implantaten, über eine Beneplate miteinander verblockt und an Molarenbändern befestigt.

Quelle: Universitätsklinikum Düsseldorf, Poliklinik für Kieferorthopädie, internes Bildarchiv (Image Collector) (46)

2.4.8 T-Bogen

Zur Front-Verankerung wird der T-Bogen eingesetzt (Abb. 21). Da die Front einen stationären Verankerungsblock darstellt, spricht man von der indirekten Verankerungsform.

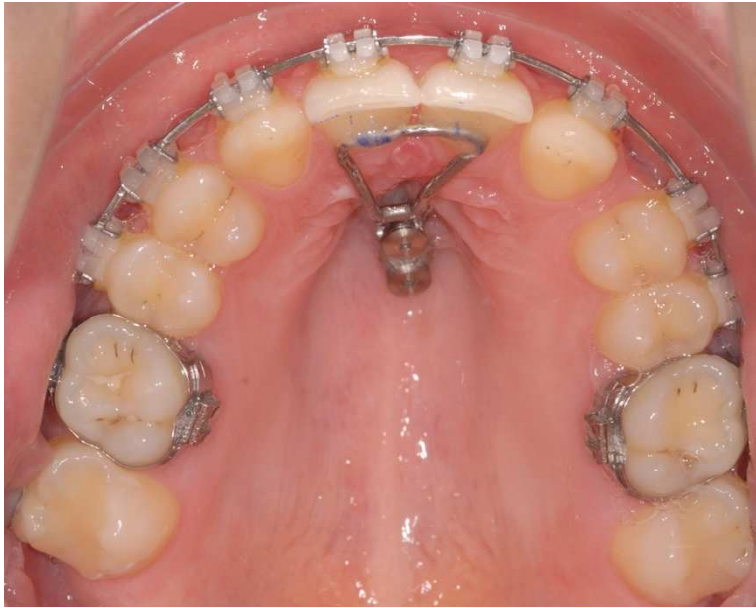


Abbildung 21: T-Bogen mit zwei medianen Mini-Implantaten

Apparatur zur Verankerung der oberen mittleren Schneidezähne, verankert an zwei median im anterioren Gaumen inserierten Mini-Implantaten, über eine Boneplate miteinander verblockt.

Quelle: Universitätsklinikum Düsseldorf, Poliklinik für Kieferorthopädie, internes Bildarchiv (Image Collector) (46)

2.4.9 Einordnung

Bei der Einordnung von dislozierten Zähnen kann die benötigte Kraft von einem palatinalen Mini-Implantat ausgehen, das als stationärer Ankerpunkt dient (Abb. 22-23). Über ein Kettchen, das mit dem einzuordnenden Zahn verbunden ist, wird eine kontrollierte Zugkraft ausgeübt. Der verlagerte Zahn wird so schrittweise in die korrekte Position im Zahnbogen gezogen. Die Apparatur zur Einordnung kann sowohl direkt als auch indirekt verankert sein.



Abbildung 22: Einordnung eines verlagerten Eckzahns mit einem medianen Mini-Implantat

Apparatur zur Einordnung eines nach palatinal verlagerten oberen rechten Eckzahns, direkt verankert an einem median im anterioren Gaumen inserierten Mini-Implantat.

Quelle: Universitätsklinikum Düsseldorf, Poliklinik für Kieferorthopädie, internes Bildarchiv (Image Collector) (46)



Abbildung 23: Einordnung eines verlagerten Eckzahns mit zwei medianen Mini-Implantaten

Apparatur zur Einordnung eines oberen linken Eckzahns, indirekt verankert über die oberen Molaren, die mithilfe von Molarenbändern mit einem Mesialslider verbunden sind. Der Mesialslider ist an zwei medianen Mini-Implantaten im anterioren Gaumen verankert, die über eine Beneplate miteinander verblockt sind.

Quelle: Universitätsklinikum Düsseldorf, Poliklinik für Kieferorthopädie, internes Bildarchiv (Image Collector) (46)

2.5 Methode

2.5.1 Einschlusskriterien

Integriert in die Studie wurden alle Patienten, die im obengenannten Zeitraum mit einem oder mehreren Mini-Implantaten zur ossären Verankerung einer kieferorthopädischen Apparatur versorgt wurden. Dabei wurden ausschließlich Patienten berücksichtigt, bei denen die Mini-Implantate im anterioren Gaumen (median oder paramedian) inseriert wurden. Darüber hinaus wurden auch Patienten, die von externen Kieferorthopäden für die Insertion überwiesen wurden, in die Studienpopulation aufgenommen, sofern ausreichend Unterlagen zur Auswertung einsehbar waren. War ein Mini-Implantat stabil, das Ergebnis dennoch nicht zufriedenstellend, beispielsweise aufgrund eines ankylosierten Zahns oder eines notwendigen chirurgischen Eingriffs, wurden die Patienten von der Studie ausgeschlossen.

2.5.2 Auswertungsparameter

Die Grundlage zur Aufnahme der Daten bildete der Image Collector der kieferorthopädischen Abteilung des Universitätsklinikums Düsseldorf. Für die Vervollständigung und Details wurden Patientenakten sowohl in digitaler als auch in Papierform hinzugezogen.

Aus den Daten wurden folgende Parameter entnommen:

- Geschlecht (m/w)
- Alter
- Insertionsjahr
- Insertionsort (median/paramedian/kombiniert)
- Behandler (Fachzahnarzt/Weiterbildungsassistent)
- Anzahl der verwendeten Mini-Implantate pro Patient
- eingegliederte Apparatur (Beneslider/ Mesialslider/Mesial-Distal-Slider/ T-Mesialslider/ Hybridhyrax/Hybridhyrax- Distalizer/ Molarenverankerung/ Mausefalle/ Pendulum B/ T-Bogen/ Mehrfachnutzung simultan/ Sonstige)
- Verankerungsform (direkt/indirekt/kombiniert)
- Vorhandensein von Syndromen

2.5.3 Erfolgs- und Misserfolgskriterien

Bei der Auswertung wurde beurteilt, ob das klinische Ziel der Mini-Implantat-Apparatur erreicht wurde. War dies der Fall, wurde es als erfolgreich gewertet. Hierfür musste nicht die komplette kieferorthopädische Behandlung des Patienten abgeschlossen, sondern nur die Aufgabe des Mini-Implantats erfüllt worden sein. Musste das Mini-Implantat aufgrund von Komplikationen, wie einer Entzündung, Lockerung oder Wanderung der an den Mini-Implantaten befestigten Apparatur vorzeitig entfernt werden, scheiterte dadurch die Verankerung. Solche Fälle wurden entsprechend als Misserfolg gewertet.

2.6 Auswertung und Statistik

Alle erhobenen Daten wurden in einer Tabelle in dem Programm Microsoft Excel für Mac (Version 16.60) zusammengetragen. Anschließend wurden sie für eine statistische Auswertung aufbereitet und codiert. Ausgewertet wurden sie mit dem Programm R (Version 4.1.2.). Neben einer deskriptiven Datenauswertung, wurden zudem einige Hypothesen mittels interferenzstatistischer Verfahren untersucht. Das Skalenniveau der Parameter, die im Hinblick auf die Verlustrate untersucht wurden, ist, bis auf das Jahr der Insertion, nominal. Für die interferenzstatistische Auswertung wurde der exakte Fisher-Test und der Chi-Quadrat-Test angewendet. Mit diesen Signifikanztests wird überprüft, ob zwischen zwei Variablen (1. Verlust, 2. untersuchter Parameter) ein Zusammenhang besteht. Ist der zugehörige p-Wert < 0.05 , handelt es sich um ein signifikantes Ergebnis. In diesem Fall wird die Nullhypothese abgelehnt und eine Abhängigkeit angenommen.

3 Ergebnisse

3.1 Deskriptive Statistik

In diese Studie wurden 1.358 Patienten integriert (Abb. 24), bestehend aus 559 männlichen und 799 weiblichen Teilnehmern. Das Alter der Patienten reichte von 6 bis 64 Jahren, mit einem medianen Alter von 14 Jahren. Die kieferorthopädische Behandlung erfolgte bei 521 Patienten durch Fachzahnärzte und bei 837 durch Weiterbildungsassistenten. Die Untersuchung beschränkte sich ausschließlich auf Patienten mit einer skelettalen Verankerung im anterioren Gaumen, wobei zwischen medianer und paramedianer Insertion unterschieden wurde. Bei 909 Patienten wurden die Mini-Implantate median inseriert und bei 404 paramedian. Bei 45 Patienten wurde die kieferorthopädische Apparatur sowohl an medianen und paramedianen Mini-Implantaten verankert. Zu Beginn der Studie wurde die mediane Insertion bevorzugt, im Laufe der Zeit zeigte sich jedoch eine Präferenz für die paramediane Insertion.

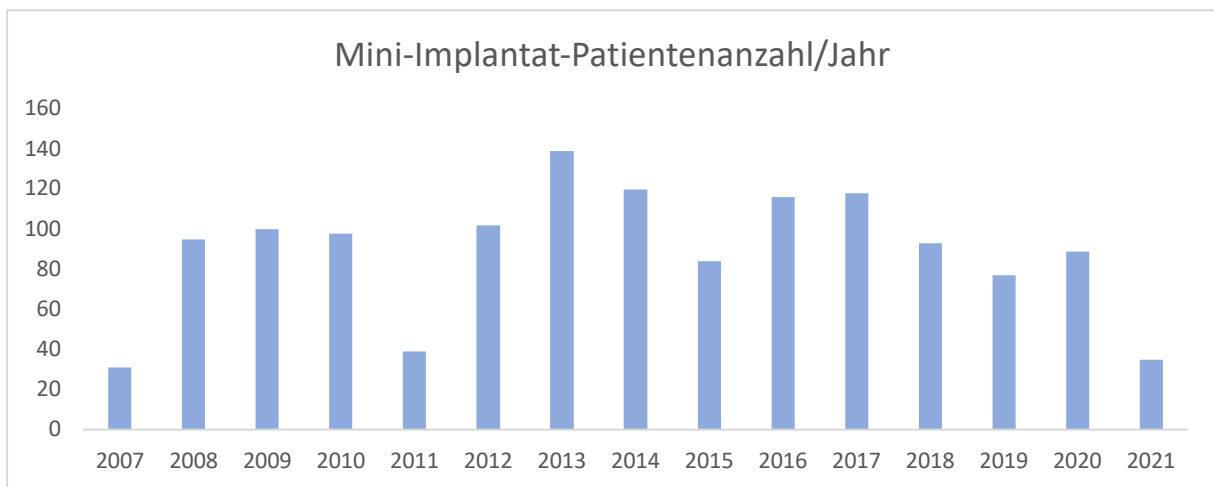


Abbildung 24: Anzahl der mit Mini-Implantaten behandelten Patienten pro Jahr

Jährliche Fallzahlen von Patienten, bei denen zwischen 2007 und 2021 Mini-Implantate im Rahmen einer kieferorthopädischen Behandlung eingesetzt wurden. Die Y-Achse zeigt die absolute Anzahl der Patienten, die X-Achse das jeweilige Behandlungsjahr.

Im Verlauf dieser Studie wurde der Beneslider mit 448 mal am häufigsten eingesetzt. 189 mal wurde der Mesialslider und 62 mal der Mesial-Distalslider eingegliedert. Die Hybridhyrax ist mit 162 mal die am dritt häufigsten verwendete Apparatur. 101 mal wendete man die Molarenverankerung an, 45 mal die Mausefalle, 30 mal den T-Bogen, 20 mal den T-Mesialslider und 13 mal den Hybridhyrax-Distalizer.

Apparaturen, die noch seltener als die Pendulum B Apparatur mit einer Häufigkeit von 13 mal verwendet wurden, wurden unter Sonstige zusammengefasst. Dazu gehören der PDL-Distraktor, der Horse-Shoe-Lizer, der Top Jet, die Frosch Apparatur, der Bungee TPA, die Bärenfalle, die Quad-Hyrax, der Z-Slider, der W-Slider und der BMX-Expander. In 126 Fällen wurden mehrere Apparaturen gleichzeitig eingegliedert. Die kieferorthopädische Behandlung mithilfe von Mini-Implantaten wurde, falls möglich, auch bei Patienten mit syndromalen Erkrankungen angewendet. Von 2007 bis 2021 waren es insgesamt 48, darunter war das häufigste Krankheitsbild die Lippen-Kiefer-Gaumenspalte.

3.2 Parameterspezifische Analyse

Im Folgenden werden verschiedene Parameter auf einen Zusammenhang mit der Verlustrate untersucht. Dabei wurden in der Analyse 1336 Patienten, bei denen der Erfolgsstatus bekannt war, berücksichtigt. Innerhalb der Gesamtkohorte konnte bei 55 Patienten ein Verlust des Mini-Implantats festgestellt werden, wohingegen bei 1281 Patienten die Behandlung mit der Mini-Implantat-Apparatur erfolgreich war. Die Verlustrate lag damit bei 4.1%.

Für die im Folgenden betrachteten kategorialen Einflussgrößen werden kategoriespezifische Verlustraten berechnet und per Balkendiagramm grafisch dargestellt. Zusätzlich werden diese durch einen exakten Fisher-Test miteinander verglichen und als Effektmaß bei binären Einflussgrößen die Odds Ratio (OR) angegeben. Aufgrund der hohen Anzahl an verschiedenen Apparaturen wurde bei dem Vergleich ihrer Verlustraten ein Chi-Quadrat-Test angewendet. Darüber hinaus wurden hier noch post-hoc-Tests durchgeführt, um zu untersuchen, welche Apparatur sich hinsichtlich der Verlustrate von den anderen Apparaturen unterscheidet.

3.2.1 Alter und Geschlecht der Patienten

Zunächst wurde die Abhängigkeit der Verlustrate von Mini-Implantaten vom Alter der Patienten untersucht (Abb. 25). Zur Durchführung der Analyse wurden drei Altersgruppen definiert. Die erste Gruppe umfasst alle Patienten, die bei Behandlungsbeginn jünger als 13 Jahre alt waren ($n = 424$). Die zweite Gruppe beinhaltet Patienten zwischen 13 und 17 Jahren ($n = 472$). In der dritten Altersgruppe

sind alle erwachsenen Patienten ab 18 Jahren zusammengefasst ($n = 440$). Der exakte Fisher-Test ergab keinen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen dem Alter der Patienten und der Verlustrate der Mini-Implantate ($p = 0.2534$), wobei die Verlustraten in den drei Altersgruppen zwischen 3,0% und 5,2% lagen.

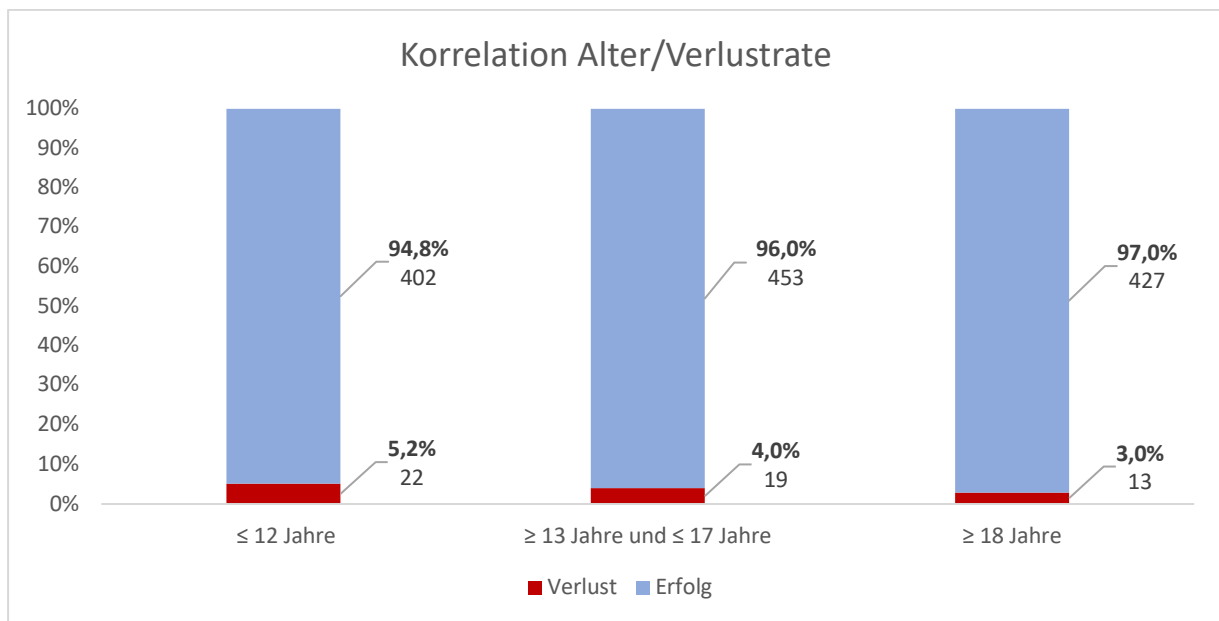


Abbildung 25: Zusammenhang zwischen Alter und Verlustrate der Mini-Implantate

Dargestellt ist die prozentuale Erfolgs- und Verlustrate der Mini-Implantate in drei Altersgruppen (≤ 12 Jahre, 13–17 Jahre, ≥ 18 Jahre). Die Y-Achse zeigt den Anteil erfolgreicher (blau) bzw. nicht erfolgreicher (rot) Behandlungen in Prozent, die absoluten Fallzahlen sind jeweils neben den Balken angegeben.

97,1% der 551 Behandlungen des männlichen und 95,0% der 785 Behandlungen des weiblichen Geschlechts waren erfolgreich ($p = 0.07$; $OR = 0.57$). Ein Zusammenhang zwischen dem Geschlecht und der Verlustrate konnte mit einem p-Wert von 0.07 nicht bewiesen werden.

3.2.2 Behandler

Zudem wurde überprüft, ob es einen Unterschied für den Behandlungserfolg mit Mini-Implantaten macht, je nachdem ob die Insertion durch einen Fachzahnarzt für Kieferorthopädie erfolgt oder durch einen Zahnarzt in Weiterbildung (Abb. 26). In absoluten Zahlen wurden mehr Patienten von Weiterbildungsassistenten behandelt, nämlich 833 im Vergleich zu 503 durch Fachzahnärzte. Prozentual hatten die Fachzahnärzte eine Verlustrate von 2,8% und die Weiterbildungsassistenten von

4,9%. Mit dem exakten Fisher-Test wurde kein signifikanter Unterschied festgestellt ($p = 0.06$; OR = 0.55).

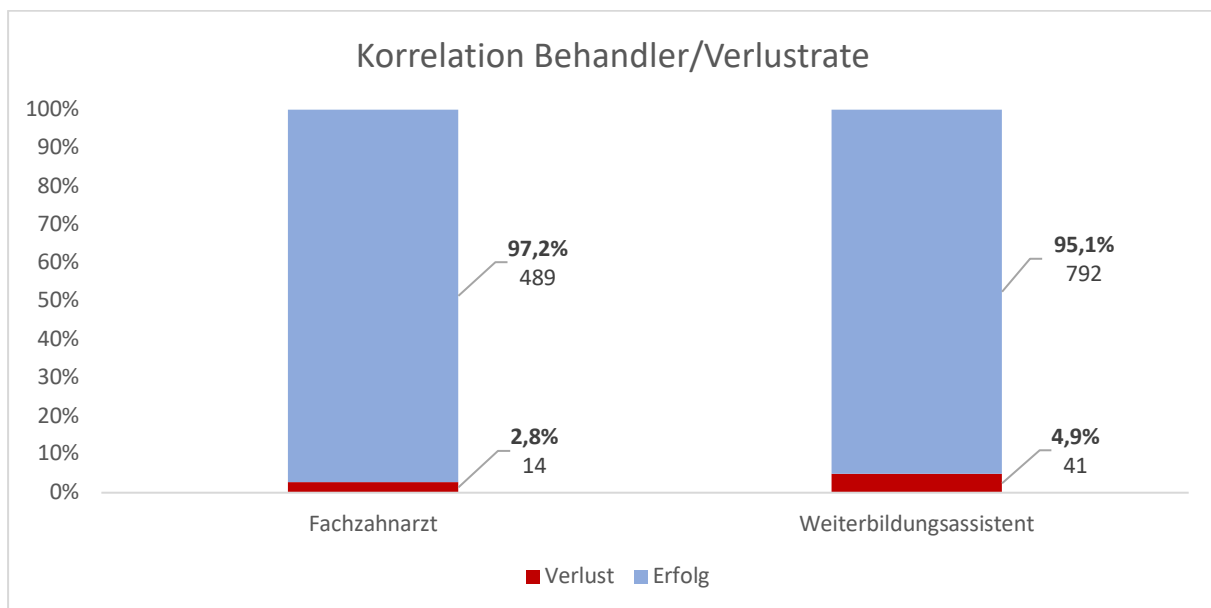


Abbildung 26: Zusammenhang zwischen Behandler und Verlustrate der Mini-Implantate

Dargestellt ist die prozentuale Erfolgs- und Verlustrate der Mini-Implantate bei Insertion durch Fachzahnärzte bzw. Weiterbildungsassistenten. Die Y-Achse zeigt den Anteil erfolgreicher (blau) bzw. nicht erfolgreicher (rot) Behandlungen in Prozent, die absoluten Fallzahlen sind jeweils neben den Balken angegeben.

3.2.3 Insertionsort

Die Mini-Implantate wurden im anterioren Gaumen entweder median ($n = 899$) oder paramedian ($n = 393$) der Sutura palatina mediana inseriert (Abb. 27). In 44 Patientenfällen wurden sie sowohl median als auch paramedian eingesetzt. Für die zeitliche Tendenz, die Mini-Implantate vermehrt paramedian und weniger median zu inserieren, wurde der Chi-Quadrat-Test für Trends in Proportionen berechnet. Ein zeitlicher Trend bei der Häufigkeit von medianen (abnehmender Trend) und paramedianen (zunehmender Trend) Insertionen konnte anhand von p-Werten, die < 0.0001 sind, festgestellt werden. Die Verlustrate bei median gesetzten Mini-Implantaten betrug 4,4%, bei paramedian gesetzten 3,6%. War die Apparatur gleichzeitig an median und paramedian inserierten Mini-Implantaten verankert, kam es bei 2,3% der Behandlungen zu einem Verlust. Ein signifikanter Unterschied konnte nicht festgestellt werden ($p = 0.07$; OR = 0.57).

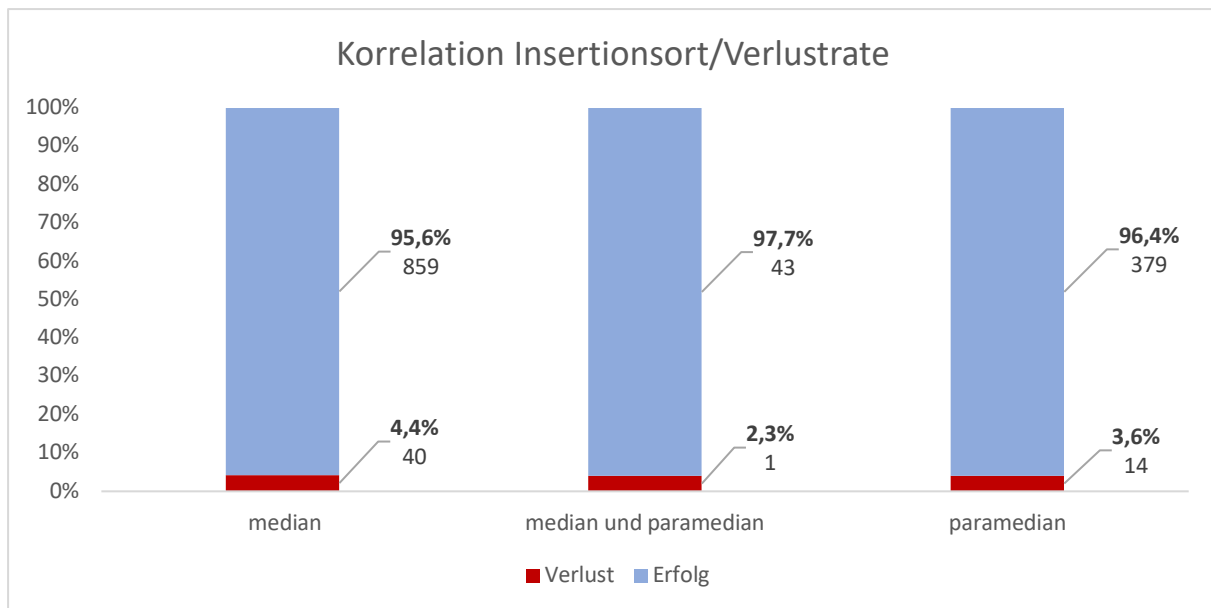


Abbildung 27: Zusammenhang zwischen Insertionsort und Verlustrate der Mini-Implantate

Dargestellt ist die prozentuale Erfolgs- und Verlustrate der Mini-Implantate in Abhängigkeit vom Insertionsort (median, kombiniert, paramedian). Die Y-Achse zeigt den Anteil erfolgreicher (blau) bzw. nicht erfolgreicher (rot) Behandlungen in Prozent, die absoluten Fallzahlen sind jeweils neben den Balken angegeben.

Zusätzlich wurde die Verlustrate hinsichtlich des Verankerungsortes separat bei jüngeren und älteren Patienten verglichen. Das Patientenkollektiv wurde aufgeteilt in eine Altersgruppe unter 13 Jahren ($n = 417$) und eine zweite Gruppe von Patienten, die 13 Jahre und älter sind ($n = 872$). In der jüngeren Altersgruppe betrug die Verlustrate bei paramedianer Insertion 2,7%, während sie bei medianer Insertion 7,3% erreichte ($p = 0.046$; $OR = 2.84$) (Abb. 28). Ein signifikanter Unterschied wurde statistisch nachgewiesen ($p < 0,05$). Für die Altersgruppe, die 13 Jahre oder älter war, gab es keinen statistisch signifikanten Unterschied zwischen der Verlustrate und dem Insertionsort. Von den Patienten mit paramedianen Mini-Implantaten waren 4,3% der Behandlungen nicht erfolgreich und mit medianen in 3,3% der Fälle ($p = 0.52$; $OR = 0.76$) (Abb. 29).

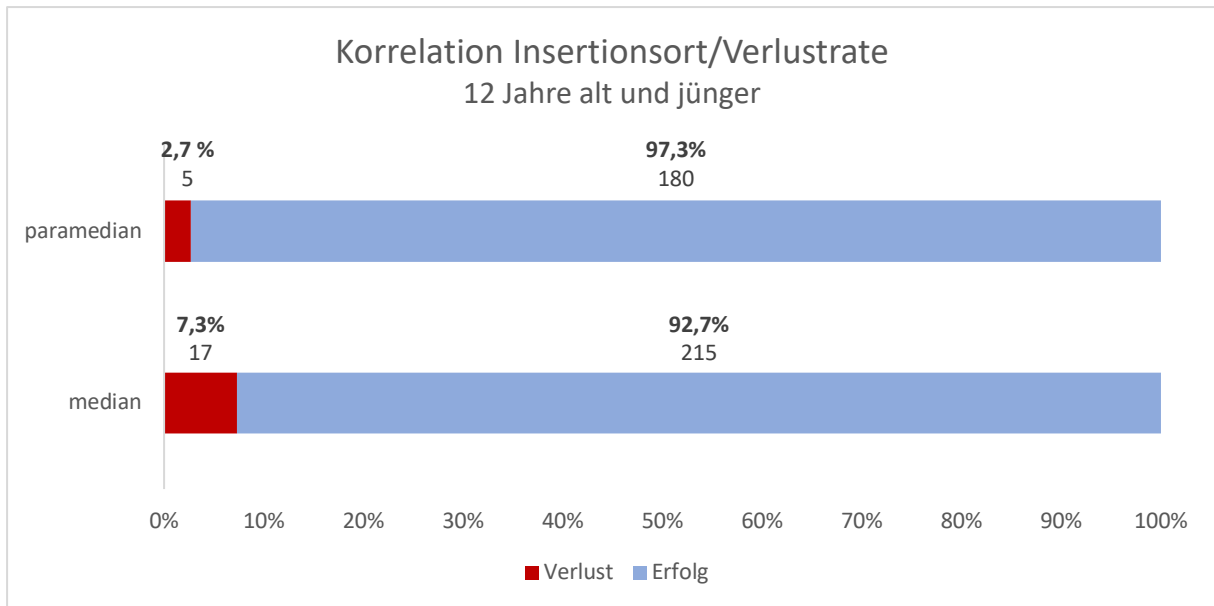


Abbildung 28: Zusammenhang zwischen Insertionsort und Verlustrate der Mini-Implantate bei Patienten im Alter von ≤ 12 Jahren

Dargestellt ist die prozentuale Erfolgs- und Verlustrate der Mini-Implantate bei Patienten im Alter von 12 Jahren und jünger, differenziert nach Insertionsort (median, paramedian). Die X-Achse zeigt den Anteil erfolgreicher (blau) bzw. nicht erfolgreicher (rot) Behandlungen in Prozent, die absoluten Fallzahlen sind jeweils über den Balken angegeben.

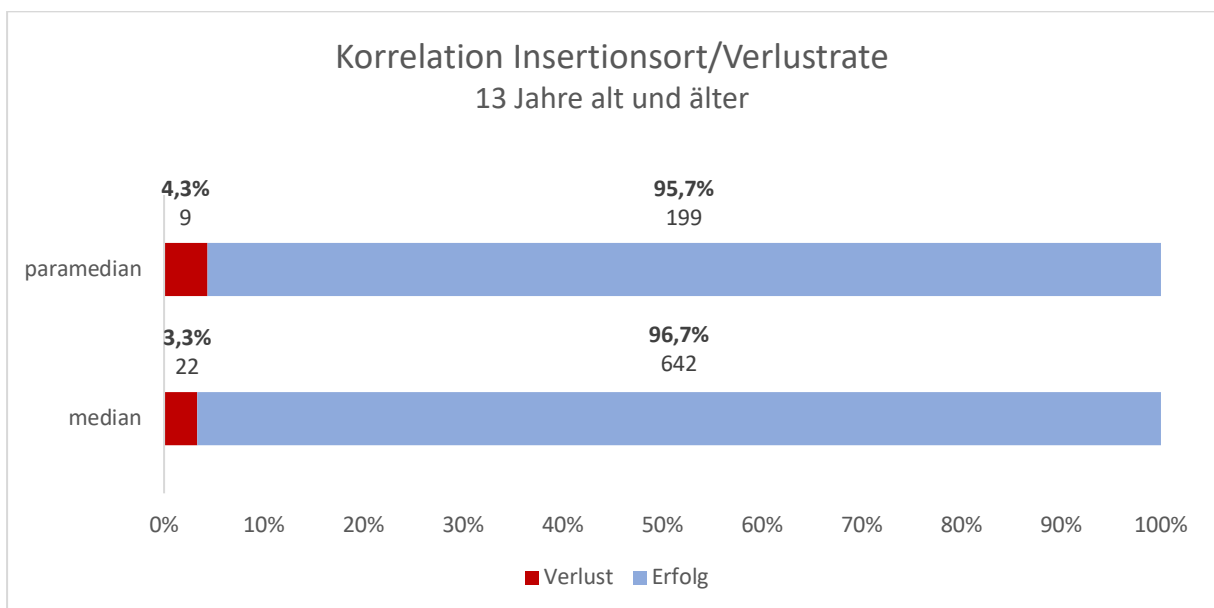


Abbildung 29: Zusammenhang zwischen Insertionsort und Verlustrate der Mini-Implantate bei Patienten im Alter von ≥ 13 Jahren

Dargestellt ist die prozentuale Erfolgs- und Verlustrate der Mini-Implantate bei Patienten im Alter von 13 Jahren und älter, differenziert nach Insertionsort (median, paramedian). Die X-Achse zeigt den Anteil erfolgreicher (blau) bzw. nicht erfolgreicher (rot) Behandlungen in Prozent, die absoluten Fallzahlen sind jeweils über den Balken angegeben.

3.2.4 Anzahl der inserierten Mini-Implantate

Der Großteil der Apparaturen wurde an einem oder zwei Mini-Implantaten verankert. In 110 Fällen wurde ein und in 1174 Fällen wurden zwei Mini-Implantate verwendet. Da nur in seltenen Fällen drei oder mehr inseriert wurden, sind diese Patienten bei der Analyse der Verlustrate hinsichtlich der Anzahl der verwendeten Mini-Implantate exkludiert worden. 95,7% der Behandlungen mit zwei und 98,2% der Behandlungen mit einem Mini-Implantat waren erfolgreich (Abb. 30). Ein signifikanter Unterschied konnte nicht festgestellt werden ($p = 0.31$; $OR = 0.42$).

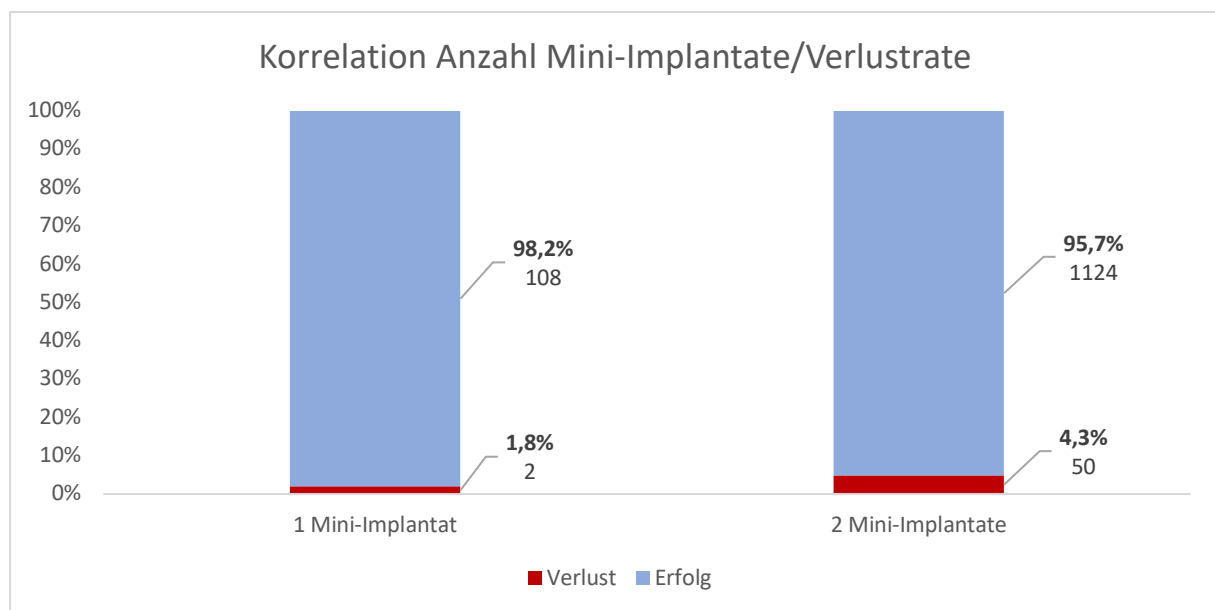


Abbildung 30: Zusammenhang zwischen der Anzahl eingesetzter Mini-Implantate pro Patient und der Verlustrate

Dargestellt ist die prozentuale Erfolgs- und Verlustrate der Mini-Implantate in Abhängigkeit von der Anzahl eingesetzter Mini-Implantate (ein Mini-Implantat, zwei Mini-Implantate). Die Y-Achse zeigt den Anteil erfolgreicher (blau) bzw. nicht erfolgreicher (rot) Behandlungen in Prozent, die absoluten Fallzahlen sind jeweils neben den Balken angegeben.

3.2.5 Verankerte Apparatur

Ein weiterer Parameter, der hinsichtlich der Verlustrate analysiert wurde, ist die verankerte Apparatur. Von allen zuvor erwähnten kieferorthopädischen Geräten wurde die prozentuale Verlustrate berechnet. Diese bewegt sich zwischen 0 und 8%. Einen größeren Anteil an Misserfolgen weisen nur die Mausefalle mit 11,1% und der Hybridhyrax-Distalizer mit 23,1% auf. Bei 23 Patienten mit einer Hybridhyrax wurde das Alt-RAMEC-Protokoll angewendet. Die Verlustrate liegt hier bei 4,3%. Die restlichen Werte sind der Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Zusammenhang zwischen eingesetzter Apparatur und Verlustrate der Mini-Implantate

Dargestellt sind die absolute Anzahl sowie der prozentuale Anteil erfolgreicher und nicht erfolgreicher Behandlungen in Abhängigkeit von der jeweils eingesetzten Apparatur. Die Erfolgs- und Verlustraten beziehen sich jeweils auf die Gesamtanzahl der Patienten pro Apparaturtyp.

Apparatur	Erfolg n = Anzahl der erfolgreichen Fälle %=Erfolgsquote	Verlust n = Anzahl der gescheiterten Fälle %=Verlustquote	Gesamt n = Gesamtanzahl %=Gesamtquote
<i>Beneslider</i>	426 95,1%	22 4,9%	448 100%
<i>Mesialslider</i>	181 95,8%	8 4,2%	189 100%
<i>Hybridhyrax</i>	158 97,5%	4 2,5%	162 100%
<i>Mehrfachnutzung</i>	123 97,6%	3 2,4%	126 100%
<i>Molarenverankerung</i>	99 98,0%	2 2,0%	101 100%
<i>Mesial-Distal-Slider</i>	61 98,4%	1 1,6%	62 100%
<i>Mausefalle</i>	40 88,9%	5 11,1%	45 100%
<i>Einordnung</i>	32 97,0%	1 3,0%	33 100%
<i>T-Bogen</i>	30 100%	0 0%	30 100%
<i>T-Mesialslider</i>	20 100%	0 0%	20 100%
<i>Hybridhyrax-Distalizer</i>	10 76,9%	3 23,1%	13 100%
<i>Pendulum B</i>	12 92,3%	1 7,7%	13 100%
<i>Sonstige</i>	89 94,7%	5 5,3%	94 100%

Zudem wurde hier der Chi-Quadrat-Test angewendet, der einen signifikanten Zusammenhang zwischen der eingegliederten Apparatur und der Verlustrate errechnet hat ($\chi^2 (12) = 25,378$; $p = 0,013$). Mit dem post-hoc-Test wurde gezeigt, dass sich die Verlustrate des Hybridhyrax-Distalizers signifikant von den anderen unterscheidet ($p = 0,014$).

3.2.6 Verankerungsform

Zudem wurde die Verlustrate zwischen direkter Verankerung, bei der die Kraft direkt auf das Mini-Implantat übertragen wird und indirekter Verankerung, bei der die Kraft über einen Verankerungsblock umgeleitet wird, untersucht. Bei den Patienten, wo Mini-Implantate simultan mehrfach genutzt wurden, ist es möglich, dass sich beide Verankerungsformen gleichzeitig auswirken. In dieser Analyse wurden ausschließlich Patienten berücksichtigt, bei denen die Verankerungsform nur direkt oder indirekt war. Direkt verankert wurden 1079 Apparaturen, wovon 50 Behandlungen nicht erfolgreich waren, was einer Verlustrate von 4,6% entspricht. Indirekt verankert wurden 175 Apparaturen und es kam nur in einem Fall zu einem Verlust. Die Verlustrate beträgt hier 0,6% (Abb. 31). Mit einem p-Wert von 0.006 konnte statistisch ein Zusammenhang zwischen der Verankerungsform und der Verlustrate belegt werden ($p = 0.006$; OR = 8.5).

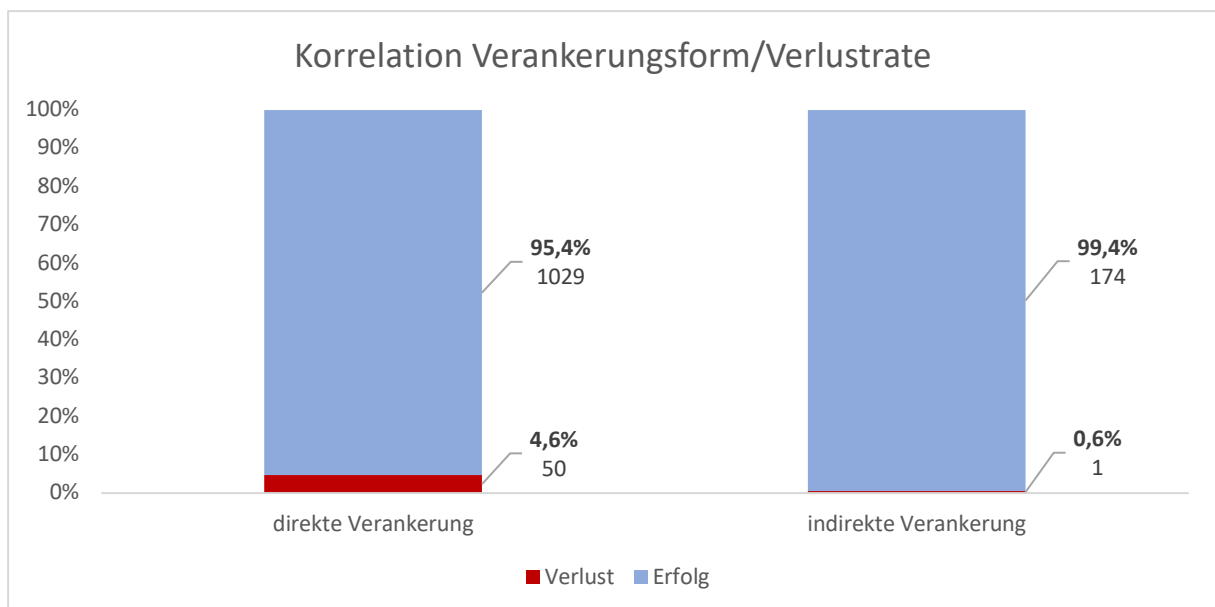


Abbildung 31: Zusammenhang zwischen der Verankerungsform und der Verlustrate der Mini-Implantate

Dargestellt ist die prozentuale Erfolgs- und Verlustrate der Mini-Implantate in Abhängigkeit von der Art der Verankerung (direkt, indirekt). Die Y-Achse zeigt den Anteil erfolgreicher (blau) bzw. nicht erfolgreicher (rot) Behandlungen in Prozent, die absoluten Fallzahlen sind jeweils neben den Balken angegeben.

3.2.7 Patienten mit syndromalen Erkrankungen

Zuletzt wurde ein Blick darauf geworfen, ob die Behandlung mithilfe von Mini-Implantaten für Patienten mit syndromalen Erkrankungen ähnlich erfolgsversprechend ist oder ob ein erhöhtes Risiko des Implantatverlustes besteht. Insgesamt wurden in dem Zeitraum 48 Patienten mit syndromalen Erkrankungen mit Mini-Implantaten behandelt, wovon die Behandlung bei 3 Patienten scheiterten. Von den 1288 behandelten Patienten ohne syndromale Erkrankungen waren 52 Behandlungen nicht erfolgreich. Aus dem Ergebnis des exakten Fisher-Tests ist kein signifikanter Zusammenhang abzuleiten ($p = 0.44$; $OR = 0.63$). Bei 6,3% der Patienten mit syndromaler Erkrankung und bei 4,0% der Patienten ohne syndromale Erkrankung war die Behandlung nicht erfolgreich (Abb. 32).

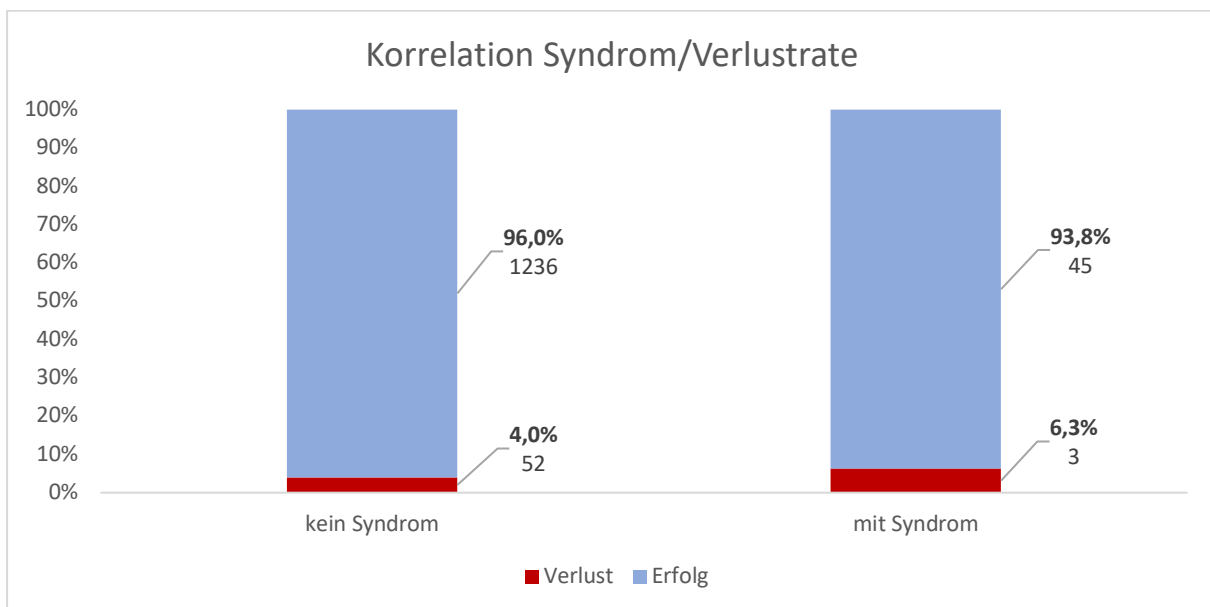


Abbildung 32: Zusammenhang zwischen dem Vorliegen eines Syndroms und der Verlustrate der Mini-Implantate

Dargestellt ist die prozentuale Erfolgs- und Verlustrate der Mini-Implantate bei Patienten mit und ohne Syndrom. Die Y-Achse zeigt den Anteil erfolgreicher (blau) bzw. nicht erfolgreicher (rot) Behandlungen in Prozent, die absoluten Fallzahlen sind jeweils neben den Balken angegeben.

4 Diskussion

4.1 Material- und Methodenkritik

Die vorliegende Untersuchung basiert auf einer retrospektiven Datenerhebung, was trotz der Möglichkeit zur Auswertung zahlreicher Fälle auch mit methodischen Einschränkungen verbunden ist. Das bedeutet, dass die Daten aus bereits abgeschlossenen Behandlungsfällen stammen und nicht gezielt für die Studie erhoben wurden. Dadurch können Fehler in der Dokumentation oder unvollständige Daten die Ergebnisse beeinflussen. Zudem konnten potenziell relevante Einflussfaktoren, wie zum Beispiel das individuelle Mundhygieneverhalten, lokale gingivale Entzündungen oder das Rauchverhalten der Patienten, nicht systematisch kontrolliert werden. Außerdem besteht die Gefahr von Verzerrungen, da die Auswahl der Fälle nicht im Voraus festgelegt wurde. Dies kann die Übertragbarkeit der Ergebnisse einschränken und die Vergleichbarkeit mit prospektiven, kontrollierten Studien erschweren. Dennoch bietet die retrospektive Analyse die Möglichkeit, eine große Anzahl von Fällen effizient auszuwerten.

Es wurde ausschließlich ein Mini-Implantat-System untersucht. Dies stellt einen methodischen Vorteil dar, da systembedingte Unterschiede entfallen und somit die Vergleichbarkeit der Ergebnisse innerhalb der Studie erhöht wird. Gleichzeitig ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Mini-Implantat-Systeme eingeschränkt ist. Zudem wurde in unserer Studie nicht jedes Mini-Implantat individuell bewertet. Stattdessen wurde jeder Patientenfall als Ganzes betrachtet, wobei oft zwei Mini-Implantate pro Patient zum Einsatz kamen. Die als Erfolg eingestufte Behandlung reflektiert den Abschluss der geplanten Behandlungsmaßnahmen mit den Mini-Implantaten. Jedoch könnte eine Lockerung eines einzelnen Mini-Implantats in dieser Betrachtungsweise unberücksichtigt bleiben, besonders wenn sie verblockt waren. Umgekehrt könnte ein Patientenfall als Misserfolg eingestuft werden, selbst wenn nur eines von zwei Mini-Implantaten Entzündungszeichen aufwies, während das andere stabil und symptomfrei blieb.

Ein zusätzlicher Kritikpunkt ergibt sich aus den kleinen Eventraten innerhalb des Datensatzes. Trotz einer hohen Fallzahl und signifikanten Effektgrößen, die sich in Form von Odds Ratios deutlich von eins unterscheiden, bleibt es schwierig, statistisch

signifikante Ergebnisse zu erzielen. Dies liegt daran, dass kleine Eventraten die statistische Power reduzieren und somit die Zuverlässigkeit der ermittelten Odds Ratios beeinträchtigen können. Die retrospektive Untersuchungsweise, die Fokussierung auf ein Mini-Implantat-System sowie die zusammenfassende Bewertung von Patientenfällen anstelle einzelner Mini-Implantate, verbunden mit der Schwierigkeit, bei kleinen Eventraten statistisch signifikante Ergebnisse zu erzielen, unterstreicht die Notwendigkeit einer kritischen Diskussion im Rahmen der Ergebnisinterpretation.

4.2 Interpretation der Ergebnisse und Ergebniskritik

Frühere Studien untersuchten die Erfolgs- und Misserfolgsraten von Mini-Implantaten sowie Einflussfaktoren im Zusammenhang mit deren Einsatz als temporäre Verankerungselemente in der Kieferorthopädie. Dabei wurde von Erfolgsraten im Bereich von 75,2 % bis 90,7 % berichtet (92-95). Unabhängig von den verschiedenen Parametern, die individuell untersucht wurden, beträgt die Gesamtverlustrate dieser Studie 4,1%. In einer Metaanalyse von 2018 schwanken die Verlustraten von 1,3% bis 16,4% (7). Die große prozentuale Spanne ist vor allem darauf zurückzuführen, dass der Insertionsort in diesen Studien variabel war. In unserer Analyse geht es ausschließlich um Mini-Implantate im anterioren Gaumen. Dabei lagen die Verlustraten der zuvor genannten Metaanalyse zwischen 1,3% und 5,5%. Somit liegt die in unserer Studie festgestellte Verlustrate im Bereich der in anderen Studien berichteten Werte.

Generell kritisch zu betrachten ist, dass die vorhandene Datenlage, die sich mit dem Verlust von Mini-Implantaten beschäftigt, oft auf kleineren Patientengruppen oder Fallstudien basiert, was die Verallgemeinerbarkeit der Ergebnisse limitiert. Die Vielzahl an Variablen, die es in Bezug auf die Verlustrate zu beachten gilt, erschwert es, eine ausreichend große Gruppengröße für jeden zu untersuchenden Faktor zu analysieren, um so eine ausreichende statistische Aussagekraft zu erlangen.

4.2.1 Patientenspezifische Faktoren

In dieser Studie erstreckte sich das Altersspektrum der Patienten, die mit Mini-Implantaten behandelt wurden, von 6 bis 64 Jahren. Der Median des Alters liegt

aufgrund eines hohen Anteils minderjähriger Patienten bei 14 Jahren. Zur Untersuchung einer möglichen Korrelation zwischen der Verlustrate von Mini-Implantaten und bestimmten Altersgruppen wurde die Patientenkohorte in drei Alterskategorien unterteilt. Die erste Gruppe umfasst Patienten unter 13 Jahren ($n = 424$). In dieser Altersspanne findet der Dentitionswechsel mit seinen Wechselgebissphasen statt. Die zweite Gruppe beinhaltet Jugendliche im Alter von 13 bis 17 Jahren ($n = 472$), bei denen in der Regel der Dentitionswechsel abgeschlossen ist. Zudem kommt es während dieser Altersperiode zu einem vermehrten körperlichen Wachstum. Die dritte Gruppe fasst alle erwachsenen Patienten zusammen ($n = 440$). Die Festlegung der Altersgrenzen erfolgte mit der Absicht, eine gleichmäßige Verteilung der Patienten auf die drei Gruppen zu gewährleisten, um erhebliche Schwankungen in der Gruppengröße zu vermeiden. Wie zuvor dargelegt, besteht die Mehrheit der Studienteilnehmer aus Minderjährigen, weswegen diese noch mal auf zwei Altersgruppen aufgeteilt wurden. Die Verlustrate zwischen den drei Altersgruppen war ähnlich (erste Altersgruppe: 5,2%, zweite Altersgruppe: 4,0%, dritte Altersgruppe: 3,0%) und der exakte Fisher-Test zeigte keinen statistisch signifikanten Zusammenhang. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass das Alter der Patienten und damit einhergehend das Wachstumsstadium des Kieferknochens keinen generellen Einfluss auf den Behandlungserfolg mit Mini-Implantaten zu haben scheint. In einem weiteren Schritt der Analyse wird jedoch untersucht, ob sich bestimmte Insertionsorte bei älteren oder jüngeren Patienten mehr eignen.

In der Literatur besteht Konsens darüber, dass patientenbezogene Faktoren wie Alter, Geschlecht, Knochenqualität, Knochenquantität, Schleimhautverhältnisse und Mundhygiene potenzielle Einflüsse auf die Verlustrate von Mini-Implantaten haben. Verschiedene Studien haben den Einfluss des Alters auf die Erfolgsrate von Mini-Implantaten untersucht und keinen signifikanten Zusammenhang festgestellt (4, 5). Allerdings weisen die Ergebnisse von Lee SJ et al. darauf hin, dass bei Patienten unter 20 Jahren eine erhöhte Vorsicht direkt nach der Implantation angebracht sei (96). Eine erhöhte Verlustrate bei Patienten unter 15 Jahren wird von Kim YH et al. auf die noch nicht vollständig abgeschlossene Knochenkalzifikation und den intensiven Knochenumbau zurückgeführt (97). Xin et al. konnten ebenfalls feststellen, dass jüngere Patienten häufiger einen Verlust von Mini-Implantaten aufwiesen, während

bei älteren Personen eine höhere Stabilität der Mini-Implantate beobachtet wurde (98). Diese Beobachtung wird durch weitere Studien gestützt, die auch darauf hinweisen, dass ältere Patienten in der Regel über eine höhere Knochenqualität und -quantität verfügen, was möglicherweise zu einer verbesserten Stabilität der Mini-Implantate beiträgt (99, 100).

In Bezug auf geschlechtsspezifische Unterschiede ergaben die Ergebnisse dieser Studie, dass keine signifikante Differenz in der Erfolgsquote zwischen Männern und Frauen existiert, mit Erfolgsraten von 97,1% bei Männern und 95% bei Frauen. Diese Beobachtung wird durch die Metaanalyse von Papageorgiou SN et al. und die Studie von Karagkiolidou A et al. gestützt, wo ebenfalls keine Korrelation zwischen Geschlecht und Mini-Implantat-Verlustrate festgestellt werden konnte (4, 5). Dies korreliert mit den Erkenntnissen von Sumer AP et al., die keinen signifikanten Unterschied in der palatinalen Knochendicke in Abhängigkeit vom Geschlecht feststellen konnten (101). Die Rolle der Knochenqualität und -quantität sowie der Schleimhautverhältnisse ist in der Fachliteratur unbestritten (58, 99, 100). Eine zu dünne Kortikalis am Ort der Insertion beeinträchtigt die Primärstabilität und steigert folglich das Risiko eines Implantatverlustes. Zudem sollte die Platzierung innerhalb befestigter keratinisierter Gingiva erfolgen, denn dies verringert die Entstehung von Schwellungen und Entzündungen (60, 61). Kakali et al. konnten einen signifikanten Zusammenhang zwischen spezifischen Einflussfaktoren wie dem Gingivatyp und dem Rauchverhalten der Patienten und einem erhöhten Risiko für das Versagen von Mini-Implantaten beobachten (102). Ein weiterer patientenspezifischer Faktor ist die Mundhygiene der Patienten. Auch diese kann bei den Verlusten der Mini-Implantate eine Rolle spielen (13). Auch wenn man durch die skelettale Verankerung mittels Mini-Implantaten weitestgehend Compliance unabhängig ist, ist man bei der häuslichen Mundhygiene auf die Mitarbeit der Patienten angewiesen. Genau wie bei dentalen Implantaten begünstigt eine ungenügende Mundhygiene die Entstehung von Entzündungen, die zu einer Periimplantitis führen können. Dies kann ein Anlass für das vorzeitige Entfernen des Mini-Implantats sein. Eine niedrigere Verlustrate bei guter Mundhygiene bestätigten auch die Ergebnisse von Lee et. al. und Park et. al. (96, 103). Favero et al. berichten, dass Chlorhexidin das Risiko entzündlicher Prozesse verringern kann. Zudem kann eine Lasertherapie durch entzündungshemmende Effekte die Stabilität von Mini-Implantaten verbessern. Auch

Schallzahnbürsten sowie rotierend-oszillierende elektrische Zahnbürsten sind nachweislich wirksam in der Plaqueentfernung, wobei letzteren eine höhere Effektivität zugeschrieben wird. Das Guided-Biofilm-Therapy-(GBT)-Protokoll hat sich im Rahmen der professionellen Zahnreinigung bewährt und fördert zudem die Patientenmotivation und damit auch die Erhaltung einer guten Mundhygiene während der kieferorthopädischen Behandlung (81).

4.2.2 Behandler

Mit in die Auswertung einbezogen wurde auch, ob der behandelnde Zahnarzt bereits ein Fachzahnarzt für Kieferorthopädie ist oder ob er sich noch in der Weiterbildung befindet. Insgesamt behandeln an der Uniklinik Düsseldorf mehr Weiterbildungsassistenten als Fachzahnärzte. Dementsprechend gingen in absoluten Zahlen auch mehr Mini-Implantate, die von Assistenz Zahnärzten inseriert wurden, verloren. Die prozentuale Verlustrate von den Fachzahnärzten und den Weiterbildungsassistenten unterscheidet sich jedoch nicht signifikant voneinander. 2,8% der Behandlungen mit Mini-Implantaten von Fachzahnärzten und 4,9% von Weiterbildungsassistenten blieben ohne Erfolg.

Kim YH et al. betonen, dass die Fähigkeiten des Behandlers in den meisten Studien nicht berücksichtigt werden. Aus ihrer Publikation „Midpalatal miniscrews for orthodontic anchorage: Factors affecting clinical success“ geht hervor, dass die Erfolgsrate des Behandlers ihrer Studie, in den ersten 18 Monaten von 75% auf über 90% anstieg (97). Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass die Erfahrung des Behandlers einen Einfluss auf den klinischen Erfolg hat. Auch Garfinkle JS et al. sprechen in ihrer Publikation von einer sogenannten Lernkurve des Operators bezüglich einer erfolgreichen Mini-Implantat-Insertion (104). In der vorliegenden Untersuchung wurde die individuelle Verlustrate und die potenzielle Progression der Lernkurve einzelner Operateure nicht isoliert betrachtet. Vielmehr konzentrierte sich die Analyse auf die generelle Hypothese, dass Fachzahnärzte im Vergleich zu Weiterbildungsassistenten eine geringere Verlustrate von Mini-Implantaten aufweisen. Auch wenn die erfasste Verlustrate bei Fachzahnärzten mit 2,8% niedriger ausfiel als die 4,9% bei Weiterbildungsassistenten, war dieser Unterschied marginal und erreichte keine statistische Signifikanz. Somit konnte kein bedeutsamer

Zusammenhang zwischen der beruflichen Qualifikation und der Verlustrate der Mini-Implantate festgestellt werden.

4.2.3 Insertionsort

Es gibt bereits Studien, die untersucht haben, ob die Insertion eines Mini-Implantats an einem bestimmten Insertionsort mit einem erhöhten Risiko des Implantatverlustes einhergeht. Es kristallisiert sich ein Konsens heraus, der die Insertion im Alveolarfortsatz im Vergleich zum Gaumen als risikobehafteter einstuft. In der zuvor bereits erwähnten Metaanalyse von Mohammed H et al. wurden 61 Studien berücksichtigt, die die Verlustraten von Insertionen im Gaumen, denen im Alveolarfortsatz gegenüberstellen (7). Während es im Gaumen mit einem Risiko zwischen 1,3% und 5,5% zu einem Implantatverlust kommt, liegen die Verlustraten im Alveolarfortsatz zwischen 9,2% und 16,4%. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die Mini-Implantate im Alveolarfortsatz meist interradiär gesetzt werden und die Gefahr des Wurzelkontaktes bei der Insertion besteht. Auch in der Metaanalyse wird ein erhöhtes Risiko für Implantatversagen bei Wurzelkontakt der Mini-Implantate beschrieben (7). Doch nicht nur bei der Insertion stellt der Wurzelkontakt eine Gefahr dar, denn auch die gewünschte Zahnbewegung ist hierdurch stark limitiert. Aus diesem Grund wird der anteriore Gaumen als bevorzugte Insertionsregion angesehen, da dort ein Kontakt zu Zahnwurzeln weniger wahrscheinlich ist. Besonders die paramediane Region bietet Vorteile, wie einen kürzeren Kraftarm und eine größere kortikale Knochendicke im Bereich zwischen Eckzahn und erstem Prämolaren (102). Xin et al. stellte ebenfalls fest, dass die palatinale Region die stabilste Insertionsstelle für Mini-Implantate darstellt und anderen Bereichen, wie den interradiären, retromaxillären und retromandibulären Regionen, hinsichtlich der Stabilität überlegen ist (98).

In der hier vorliegenden Studie wurden ausschließlich Mini-Implantate im anterioren Gaumen betrachtet. Verglichen wurde spezifisch der mediane und der paramediane Insertionsort. Seltener wurde simultan median und paramedian jeweils ein Mini-Implantat gesetzt. Bei dem Vergleich der Verlustraten von den drei Gruppen wurde der exakte Fisher-Test angewendet, dessen Resultat keine signifikanten Unterschiede bewies. Prozentual lagen die Verlustraten bei 4,4% für die mediane, bei 2,3% für die

kombiniert median und paramediane und bei 3,6% für die paramediane Insertion. Median werden die Mini-Implantate in die Sutura palatina mediana gesetzt, deren Ossifikation im Kindes- und Jugendalter nicht abgeschlossen ist. Die Verknöcherung geschieht nicht gleichmäßig entlang der Suture, sondern beginnt dorsal und endet meist erst nach dem 40. Lebensjahr ventral um den Canalis incisivus (105). In diesem Kontext brachte eine Tierstudie aus dem Jahr 2008 Bedenken zum Ausdruck, indem sie die Möglichkeit von Wachstumsstörungen durch median gesetzte Implantate aufwarf (106). Ebenso ist bei Mini-Implantaten, die in die mediane Gaumensuture inseriert werden, eine verringerte Primärstabilität und Störungen im frühen Heilungsprozess denkbar (58). Die Stabilität palatinal inserierter Mini-Implantate während der frühen Einheilphase wurde in mehreren Studien klinisch untersucht. Nienkemper et al. (2014, 2015) konnten zeigen, dass paramedian gesetzte Mini-Implantate bereits kurz nach der Insertion eine hohe Primärstabilität aufweisen, die sich über die initiale Heilungsphase weitgehend konstant hält (67, 107). In der zuvor bereits erwähnten Studie „Midpalatal miniscrews for orthodontic anchorage: Factors affecting clinical success“ wurde der mediane und paramediane Insertionsort ebenfalls hinsichtlich der Verlustrate verglichen. Es wurden 128 Patienten in einem Alter zwischen 8 und 56 Jahren mit einbezogen. Bei den Jugendlichen wurden die Mini-Implantate nur paramedian inseriert, um die noch in Entwicklung befindliche mediane Gaumensuture nicht zu beeinträchtigen. Es ergab sich, dass die paramedianen Mini-Implantate mit 20,8% häufiger verloren gingen als die medianen mit 7,5% (97). Mit einer paramedianen Verlustrate von 20,8% liegt diese deutlich über den 3,6% aus unserer Studie. Die Herausforderung, präzise Vergleiche anzustellen, ergibt sich aus der unspezifischen Definition des Begriffs "paramedian", der lediglich eine Insertion neben der medianen Gaumennaht beschreibt. In der gegenwärtigen Studie wurden alle Mini-Implantate in der anfangs bereits erwähnten T-Zone platziert, ein Bereich, der sich posterior der drei Gaumenfalten befindet und sowohl mediane als auch paramediane Insertionsorte inkludiert. Eine Studie aus dem Jahr 2016 betonte die besondere Eignung dieser Zone für die Insertion von Mini-Implantaten. Aufgrund der erhöhten Schleimhautdicke in der Region der ersten und zweiten Gaumenfalten besteht ein erhöhtes Risiko für das Kippen des Mini-Implantats, weshalb von einer Insertion in diesem Bereich abgeraten wird (58).

Da der Großteil der Suturen erst während der Pubertät verknöchert, wurde in dieser Studie daher noch einmal analysiert, ob die median gesetzten Mini-Implantate speziell bei Kindern häufiger verloren gehen. Dafür wurde die Patientenkohorte dem Alter entsprechend in zwei Gruppen aufgeteilt. Die Verlustrate bei allen Patienten, die jünger als 13 Jahre alt sind, beträgt bei den paramedian gesetzten Mini-Implantaten 2,7% und bei den medianen 7,3%. Bei der Altersgruppe ab 13 Jahre oder älter gingen sie paramedian in 4,3% der Fälle verloren und median in 3,3%. Bei den jüngeren Patienten wurde mit dem exakten Fisher-Test eine statistische Abhängigkeit bewiesen, dass bei Kindern die Verlustrate der medianen Mini-Implantate signifikant höher ist als die der paramedianen. Es ist bereits lange anerkannt, dass Mini-Implantate im Gaumen die größten Erfolgsraten aufweisen. Laut unserem Wissen gibt es aber bisher keine andere Studie zu dem direkten Vergleich des medianen und paramedianen Insertionsorts mit Berücksichtigung des Alters. Die Beobachtung, dass bei jüngeren Patienten paramediane Mini-Implantate seltener verloren gehen, machte man in der Uniklinik Düsseldorf im Laufe der Zeit. Daher konnte von 2007 bis 2021 ein zeitlicher Trend zur vermehrten paramedianen Insertion festgestellt werden. Karagkiolidou et al. erwähnten schon 2013, dass insbesondere bei jungen Patienten mit noch nicht vollständig ossifizierter mittlerer Gaumennaht die paramediane Mini-Implantat-Insertion als vorteilhaft erachtet wird (4). Die Knochendicke median und paramedian (3mm und 6mm entfernt von der Suture im Bereich der oberen ersten Prämolaren) unterscheidet sich jedoch nicht signifikant voneinander, wie eine Analyse von de Rezende Barbosa et. al. ergab (108).

4.2.4 Anzahl der inserierten Mini-Implantate

In 110 Behandlungen wurde nur ein Mini-Implantat inseriert und davon verliefen 98,2% erfolgreich. In 1174 Fällen wurden zwei inseriert, wovon 95,7% der Behandlungen erfolgreich waren. Ein Zusammenhang bezüglich der Verlustrate konnte bei dem Vergleich, ob ein oder zwei Mini-Implantate verwendet wurden, nicht festgestellt werden. In der Studie von Kim et. al. kam jedoch heraus, dass der Verbund aus zwei Mini-Implantaten zu einer signifikant höheren Erfolgsrate führt. Bei der Verblockung von zwei Mini-Implantaten wurde eine Erfolgsrate von 95,9% erreicht und bei der Verankerung an nur einem lediglich 82,4% (97).

Bei der Interpretation unseres Ergebnisses ist es wichtig zu berücksichtigen, dass Variablen, wie die verankerte Apparatur oder der Insertionsort, außer Acht gelassen wurden. Meistens wurden orthodontische Geräte, wo niedrigere Kräfte zu erwarten sind, wie zum Beispiel bei der Molarenverankerung, an nur einem Mini-Implantat verankert. Unsere Datenauswertung kann demnach nicht endgültig klären, ob die beobachtete geringere Verlustrate bei der Verwendung eines einzelnen Mini-Implantats auf dessen tatsächliche Effektivität zurückzuführen ist oder ob diese möglicherweise durch die vorwiegende Anwendung bei orthodontischen Apparaturen mit niedrigeren Kraftanforderungen beeinflusst wurde. Es besteht die Annahme, dass bei Anwendungen mit höheren zu erwartenden Kräften, wie der Molarenintrusion, der Einsatz mehrerer Mini-Implantate vorteilhaft sein könnte, um die Belastung auf jedes Implantat zu reduzieren und dadurch die Verlustrate zu minimieren. Die Validierung dieser Annahme bedarf weiterführender Untersuchungen.

4.2.5 Verankerte Apparatur

Bei der Analyse der Verlustraten wurde auch die Indikation als potenzieller Risikofaktor einbezogen. Je nach Behandlungsziel wurde eine indizierte Apparatur an den Mini-Implantaten verankert. Details zu den spezifischen Apparaturen und den korrespondierenden Verlustraten sind Tabelle 1 zu entnehmen. Das verwendete Gerät lässt oftmals Rückschlüsse auf den Insertionsort und die Anzahl der verwendeten Mini-Implantate zu. Beispielsweise werden bei der Hybridhyrax, deren Ziel die Gaumennahterweiterung ist, immer zwei Mini-Implantate paramedian inseriert. Im Fall der Molarendistalisierung sind sowohl die paramediane als auch die mediane Insertion möglich, wobei üblicherweise zwei, in einigen Fällen aber auch nur eins verwendet werden. Bis auf die Verlustraten von zwei Apparaturen lagen die anderen zwischen 0 und 8%. Nur die Mausefalle mit 11,1% und der Hybridhyrax-Distalizer mit 23,1% wiesen höhere Verlustraten auf. Bei der Mausefalle werden die Mini-Implantate durch Zugkräfte in extrusiver Richtung belastet. Diese aus dem Knochen herauswirkenden Kräfte könnten eine erhöhte Belastung ausüben und so die vergleichsweise hohe Verlustrate erklären. Der Hybrid-Hyrax-Distalizer wird häufiger bei wachsenden Patienten in Kombination mit dem Alt-RAMEC-Protokoll und Klasse-III-Gummizügen eingesetzt, was ebenfalls zu einer verstärkten mechanischen Beanspruchung der Mini-Implantate führen kann. Eine übermäßige Kraftbelastung

kann ein Grund für höhere Verlustraten sein, sodass es ratsam sein könnte, die Last durch die Verwendung von mehr Mini-Implantaten zu verteilen. Beispielsweise könnte bei der Mausefalle die Verankerung an drei anstelle von zwei Mini-Implantaten vorteilhaft sein (Abb. 33-34).



Abbildung 33: Mausefalle mit zwei Mini-Implantaten

Apparatur zur Molarenintrusion im Oberkiefer, verankert an zwei median im anterioren Gaumen inserierten Mini-Implantaten, über eine Beneplate miteinander verblockt und an Molarenbändern befestigt.

Quelle: Universitätsklinikum Düsseldorf, Poliklinik für Kieferorthopädie, internes Bildarchiv (Image Collector) (46)



Abbildung 34: Mausefalle mit drei Mini-Implantaten

Apparatur zur Molarenintrusion im Oberkiefer, verankert an drei verblockten Mini-Implantaten – zwei paramedian und eins median im anterioren Gaumen inseriert – und über Gummizüge mit Molarenbändern verbunden.

Quelle: Universitätsklinikum Düsseldorf, Poliklinik für Kieferorthopädie, internes Bildarchiv (Image Collector) (46)

4.2.6 Verankerungsform

Bei der Verankerungsform unterscheidet man, wie anfangs erwähnt, die direkte und die indirekte Verankerung. Die Verlustrate der direkt verankerten Mini-Implantate aus dieser Studie beträgt 4,6%. Bei der indirekten Verankerungsform liegt sie bei 0,6% und es konnte mit einem p-Wert von 0.006 eine statistische Signifikanz bewiesen werden. Diese Diskrepanz mag darauf zurückzuführen sein, dass bei der direkten Verankerung die Kräfte unmittelbar auf die Mini-Implantate übertragen und nicht durch einen dazwischengeschalteten dentalen Verankerungsblock verteilt werden. Dadurch werden die unmittelbar auf die Mini-Implantate einwirkenden Kräfte abgeschwächt. Auch in den Berechnungen von Antoszewska et. al war die Verlustrate der direkten Verankerung mit 7,4% höher als die der indirekten Verankerung mit 3,0% (109).

4.2.7 Syndrompatienten

Die Verlustrate der Patienten mit Syndromen oder Fehlbildungen war geringfügig höher, aber es konnte keine statistische Abhängigkeit bewiesen werden. Die

Fehlbildung, die am häufigsten auftrat, war die Lippen-Kiefer-Gaumenspalte. Mit insgesamt 6,3% Verlustrate der Patienten mit syndromalen Erkrankungen gegenüber den 4,0% der restlichen Patienten, kann man schlussfolgernd sagen, dass die Behandlung mit Mini-Implantaten bei Patienten mit Syndromen ähnlich erfolgsversprechend ist. Nach unserem Wissen gibt es zum Vergleich noch keine anderen Studien, die den Einfluss von bestehenden Fehlbildungen auf die Verlustrate von orthodontischen Mini-Implantaten näher untersuchen.

4.2.8 Implantatbezogene Faktoren

Auch wenn in unserer Studie Implantat-bezogene Faktoren nicht berücksichtigt wurden, da wir ausschließlich die gleichen Mini-Implantate verwendet haben, haben sie dennoch einen nennenswerten Stellenwert in Bezug auf die Verlustrate. Hierbei geht es um dimensionale Eigenschaften, wie die Länge, der Durchmesser oder das Gewindedesign, aber auch um materialbezogene Eigenschaften, wie die Materialzusammensetzung oder die Oberflächenbeschaffenheit.

Wie anfangs schon erwähnt, unterscheiden sich orthodontische Mini-Implantate von dentalen Implantaten in ihrer Oberflächenbeschaffenheit. Da Mini-Implantate in der Kieferorthopädie nur für die Dauer der Behandlung stabil und anschließend wieder einfach zu entfernen sein müssen, ist ihr Schaft typischerweise hochglanzpoliert. Eine raue Oberflächenstruktur führt zu einer besseren Zelladhäsion und somit zu mehr Osseointegration. Da die Mini-Implantate jedoch wieder entfernt werden sollen, würde bei einer zu ausgeprägten Oberflächenrauheit die Gefahr bestehen, dass man zu viel Kraft bei der Explantation aufwenden muss und es deswegen zu einer Schädigung des umliegenden Knochens oder zum Implantatbruch kommen kann. Ravi et al. untersuchten in ihrer Studie, ob Mini-Implantate mit einer komplexeren Oberflächenstruktur eine niedrigere Verlustrate aufweisen. Sie gelangten zu dem Schluss, dass das maximale Entnahmemoment, also das höchste Drehmoment, das bei der Explantation aufgewendet werden muss, bei oberflächenbehandelten Mini-Implantaten signifikant höher ist, es jedoch trotzdem nicht zu Komplikationen bei der Entnahme kam. Auch wenn eine erhöhte Rauheit zu einer besseren Osseointegration geführt hat, kamen sie hinsichtlich einer verringerten Verlustrate zu keinem signifikanten Ergebnis (73). Dies ist möglicherweise auf die relativ kleinen Fallzahlen

zurückzuführen und sollte in Zukunft in größeren Studien untersucht werden. In einer experimentellen Studie wurde gezeigt, dass die Osseointegration von Mini-Implantaten aus Ti-6Al-4V ELI (Titanlegierung mit 6 % Aluminium, 4 % Vanadium, Extra Low Interstitials) durch Anodisierung, zyklische Prä-Kalzifikation und Wärmebehandlung signifikant verbessert werden kann. In Tierversuchen mit Kaninchen wurde nach vier Wochen ein signifikant höheres Entnahmedrehmoment gemessen, was auf eine verbesserte Osseointegration der behandelten Mini-Implantate hinweist (110).

Wilmes et al. heben in ihrer Studie von 2016 hervor, dass die Primärstabilität für die Stabilität der Mini-Implantate entscheidend ist und dass diese im Wesentlichen von drei Komponenten beeinflusst wird: die Knochenqualität, das Implantatdesign und die Insertionsmodalitäten. Zur Beurteilung der Primärstabilität wurden die verschiedenen Eindrehmomente gemessen. Bezogen auf das Implantatdesign kamen sie in ihrer Untersuchung zu dem Schluss, dass konische Implantate eine höhere Primärstabilität aufweisen als zylindrische. Zudem stellten sie fest, dass größere Durchmesser oder Längen des gleichen Implantattyps mit einer höheren Primärstabilität korrelierten (111). Dass größere Mini-Implantate zu einer erhöhten Primärstabilität führen, bestätigt auch eine Studie der Uniklinik Düsseldorf aus dem Jahr 2021, in welcher unter anderem auch der Insertionswinkel als möglicher Einflussfaktor auf die Primärstabilität untersucht wurde. Hier eignen sich besonders Insertionswinkel von 60 oder 70 Grad (112). Bei beiden Studien handelt es sich um *in-vitro*-Untersuchungen, die ausschließlich die Primärstabilität untersuchten, nicht jedoch den klinischen Langzeiterfolg oder die Verlustrate am Patienten.

4.3 Schlussfolgerung

Die Gesamtverlustrate aller inserierten Mini-Implantate im anterioren Gaumen der Uniklinik Düsseldorf im Zeitraum von 2007 bis 2021 lag bei 4,1%.

Bei der parameterspezifischen statistischen Analyse ergab sich folgendes:

- das Geschlecht, das Alter, sowie der Behandler zeigen keinen signifikanten Einfluss auf die Verlustrate

- es besteht kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Verlustrate und der Anzahl der verwendeten Mini-Implantate oder dem Vorliegen syndromaler Erkrankungen
- die direkte Verankerungsform zeigt eine signifikant höhere Verlustrate als die indirekte
- bei Patienten unter 13 Jahren steht die mediane Mini-Implantat-Insertion in Korrelation mit einer erhöhten Verlustrate
- die Mausefalle und der Hybridhyrax-Distalizer weisen die höchsten Verlustraten auf

Abschließend kann festgehalten werden, dass zur Verbesserung der Stabilität und Erfolgsrate bei jüngeren Patienten der paramediane Insertionsort präferiert werden sollte. Darüber hinaus ist es ratsam, bei Apparaturen, bei denen erhöhte Kräfte zu erwarten sind, mehr Mini-Implantate zur Verankerung zu verwenden.

4.4 Ausblick

Die Anwendung von CAD/CAM-Schablonen für das Inserieren von orthodontischen Mini-Implantaten ist eine vielversprechende Entwicklung, die das Potenzial hat, die Präzision und Sicherheit dieses Verfahrens signifikant zu verbessern. Diese Technologie ermöglicht eine detaillierte Planung und Positionierung der Mini-Implantate basierend auf den individuellen anatomischen Gegebenheiten des Patienten, was theoretisch zu einer Verringerung der Verlustrate führen könnte. Die Kombination aus fortgeschrittener Bildgebung, wie beispielsweise 3D-Röntgenaufnahmen und der präzisen Umsetzung der Planung durch CAD-CAM-Schablonen stellt einen bedeutenden Fortschritt in der kieferorthopädischen Behandlung dar.

Zukünftige Studien sollten sich darauf konzentrieren, die Wirksamkeit dieser Methode zu bewerten, insbesondere im Hinblick auf die Verlustrate von Mini-Implantaten. Es wäre interessant zu untersuchen, ob die durch CAD-CAM-Schablonen ermöglichte präzisere Platzierung zu einer höheren Erfolgsrate führt, indem sie beispielsweise das Risiko einer Fehlplatzierung verringert und eine bessere Anpassung an die individuellen anatomischen Bedingungen bietet. Solche Studien könnten dazu

beitragen, klinische Protokolle weiter zu verfeinern und die Effizienz und Sicherheit von Mini-Implantaten als Verankerungsmethode in der Kieferorthopädie zu erhöhen.

5 Literaturverzeichnis

1. Topouzelis, N. and P. Tsaousoglou, *Clinical factors correlated with the success rate of miniscrews in orthodontic treatment*. Int J Oral Sci, 2012. **4**(1): p. 38-44.
2. Angle, E.H., *Treatment of Malocclusion of the Teeth*. S.S. White Dental Manufacturing Co., 1887.
3. Ludwig, B., et al., *Grundlagen der Verankerung, Auswahl der Schrauben*. ZWP online, 2011.
4. Karagiolidou, A., et al., *Survival of palatal miniscrews used for orthodontic appliance anchorage: a retrospective cohort study*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2013. **143**(6): p. 767-72.
5. Papageorgiou, S.N., I.P. Zogakis, and M.A. Papadopoulos, *Failure rates and associated risk factors of orthodontic miniscrew implants: a meta-analysis*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2012. **142**(5): p. 577-595.e7.
6. Skeggs, R.M., P.E. Benson, and F. Dyer, *Reinforcement of anchorage during orthodontic brace treatment with implants or other surgical methods*. Cochrane Database Syst Rev, 2007(3): p. CD005098.
7. Mohammed, H., et al., *Role of anatomical sites and correlated risk factors on the survival of orthodontic miniscrew implants: a systematic review and meta-analysis*. Prog Orthod, 2018. **19**(1): p. 36.
8. Yamaguchi, M., et al., *Mini-implants in the anchorage armamentarium: new paradigms in the orthodontics*. Int J Biomater, 2012. **2012**: p. 394121.
9. Gainsforth BL, Higley LB. A study of orthodontic anchorage possibilities in basal bone. American Journal of Orthodontics and Oral Surgery 1945;31:406-16
10. Bayer, C., *Mini-Implantate: Vielseitige Optionen zur Verankerung von Teilprothesen*. ZWP online, 2014.
11. Kanomi, R., *Mini-implant for orthodontic anchorage*. J Clin Orthod, 1997. **31**(11): p. 763-7.
12. Branemark, P.I., et al., *Osseointegrated implants in the treatment of the edentulous jaw. Experience from a 10-year period*. Scand J Plast Reconstr Surg Suppl, 1977. **16**: p. 1-132.
13. Leo, M., et al., *Temporary anchorage devices (TADs) in orthodontics: review of the factors that influence the clinical success rate of the mini-implants*. Clin Ter, 2016. **167**(3): p. e70-7.
14. Costa, A., M. Raffaini, and B. Melsen, *Miniscrews as orthodontic anchorage: a preliminary report*. Int J Adult Orthodon Orthognath Surg, 1998. **13**(3): p. 201-9.
15. Papadopoulos, M.A., S.N. Papageorgiou, and I.P. Zogakis, *Clinical effectiveness of orthodontic miniscrew implants: a meta-analysis*. J Dent Res, 2011. **90**(8): p. 969-76.
16. Diedrich, P., *Kieferorthopädische Behandlung Erwachsener*. In: Diedrich, P. (Hrsg.), Praxis der Zahnheilkunde. Kieferorthopädie III. München–Jena: Urban & Fischer, 2000: p. 174–208.
17. Prager, T.M., et al., *Remodeling along the bone-screw interface*. J Orofac Orthop, 2008. **69**(5): p. 337-48.
18. Melsen, B. and A. Costa, *Immediate loading of implants used for orthodontic anchorage*. Clin Orthod Res, 2000. **3**(1): p. 23-8.

19. Favero, L.G., A. Pisoni, and C. Paganelli, *Removal torque of osseointegrated mini-implants: an in vivo evaluation*. Eur J Orthod, 2007. **29**(5): p. 443-8.
20. Hourfar, J., et al., *Influence of interradicular and palatal placement of orthodontic mini-implants on the success (survival) rate*. Head Face Med, 2017. **13**(1): p. 14.
21. Wilmes, B. and D. Drescher, *A miniscrew system with interchangeable abutments*. J Clin Orthod, 2008. **42**(10): p. 574-80; quiz 595.
22. Becker, K., et al., *Efficacy of orthodontic mini implants for en masse retraction in the maxilla: a systematic review and meta-analysis*. Int J Implant Dent, 2018. **4**(1): p. 35.
23. Upadhyay, M., et al., *Treatment effects of mini-implants for en-masse retraction of anterior teeth in bialveolar dental protrusion patients: a randomized controlled trial*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2008. **134**(1): p. 18-29 e1.
24. Antoszewska-Smith, J., et al., *Effectiveness of orthodontic miniscrew implants in anchorage reinforcement during en-masse retraction: A systematic review and meta-analysis*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2017. **151**(3): p. 440-455.
25. Al-Sibaie, S. and M.Y. Hajeer, *Assessment of changes following en-masse retraction with mini-implants anchorage compared to two-step retraction with conventional anchorage in patients with class II division 1 malocclusion: a randomized controlled trial*. Eur J Orthod, 2014. **36**(3): p. 275-83.
26. Upadhyay, M., S. Yadav, and S. Patil, *Mini-implant anchorage for en-masse retraction of maxillary anterior teeth: a clinical cephalometric study*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2008. **134**(6): p. 803-10.
27. Khlef, H.N., et al., *Evaluation of Treatment Outcomes of En masse Retraction with Temporary Skeletal Anchorage Devices in Comparison with Two-step Retraction with Conventional Anchorage in Patients with Dentoalveolar Protrusion: A Systematic Review and Meta-analysis*. Contemp Clin Dent, 2018. **9**(4): p. 513-523.
28. Garrett, B.J., et al., *Skeletal effects to the maxilla after rapid maxillary expansion assessed with cone-beam computed tomography*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2008. **134**(1): p. 8-9.
29. Yilmaz, A., et al., *Comparison of short-term effects of mini-implant-supported maxillary expansion appliance with two conventional expansion protocols*. Eur J Orthod, 2015. **37**(5): p. 556-64.
30. Mehta, S., et al., *Biomechanics of conventional and miniscrew-assisted rapid palatal expansion*. J World Fed Orthod, 2024. **13**(3): p. 105-112.
31. Chamberland, S., *Maxillary expansion in nongrowing patients. Conventional, surgical, or miniscrew-assisted, an update*. J World Fed Orthod, 2023. **12**(4): p. 173-183.
32. Becker, K., et al., *Skeletally anchored mesialization of molars using digitized casts and two surface-matching approaches : Analysis of treatment effects*. J Orofac Orthop, 2018. **79**(1): p. 11-18.
33. Chandra, P., et al., *Maxillary molar mesialization with palatal mini-implants*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2020. **157**(1): p. 4.
34. Wilmes, B., S. Vasudavan, and D. Drescher, *Maxillary molar mesialization with the use of palatal mini-implants for direct anchorage in an adolescent patient*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2019. **155**(5): p. 725-732.

35. Wilmes, B., et al., *The Hybrid Hyrax Distalizer, a new all-in-one appliance for rapid palatal expansion, early class III treatment and upper molar distalization*. J Orthod, 2014. **41 Suppl 1**: p. S47-53.
36. Bechtold, T.E., et al., *Long-term stability of miniscrew anchored maxillary molar distalization in Class II treatment*. Angle Orthod, 2020. **90**(3): p. 362-368.
37. Bayome, M., et al., *Distalization of maxillary molars using temporary skeletal anchorage devices: A systematic review and meta-analysis*. Orthod Craniofac Res, 2021. **24 Suppl 1**: p. 103-112.
38. Ceratti, C., et al., *Effectiveness of miniscrew-supported maxillary molar distalization according to temporary anchorage device features and appliance design: systematic review and meta-analysis*. Angle Orthod, 2024. **94**(1): p. 107-121.
39. Wilmes, B., et al., *Mini-implant-anchored Mesialslider for simultaneous mesialisation and intrusion of upper molars in an anterior open bite case: a three-year follow-up*. Aust Orthod J, 2015. **31**(1): p. 87-97.
40. Patel, S.D., et al., *Effectiveness of Miniscrew-Supported Molar Intrusion: A Clinical Study*. J Pharm Bioallied Sci, 2024. **16**(Suppl 1): p. S707-S710.
41. Kravitz, N.D., et al., *The use of temporary anchorage devices for molar intrusion*. J Am Dent Assoc, 2007. **138**(1): p. 56-64.
42. Nienkemper, M., et al., *Extrusion of impacted teeth using mini-implant mechanics*. J Clin Orthod, 2012. **46**(3): p. 150-5;quiz 183.
43. Wilmes, B. and D. Drescher, *Vertical periodontal ligament distraction--a new method for aligning ankylosed and displaced canines*. J Orofac Orthop, 2009. **70**(3): p. 213-23.
44. Mizrahi, E. and B. Mizrahi, *Mini-screw implants (temporary anchorage devices): orthodontic and pre-prosthetic applications*. J Orthod, 2007. **34**(2): p. 80-94.
45. Nienkemper, M., et al., *Preprosthetic molar uprighting using skeletal anchorage*. J Clin Orthod, 2013. **47**(7): p. 433-7.
46. Universitätsklinikum Düsseldorf, P.f.K., *internes Bildarchiv (Image Collector)*.
47. Mohlhenrich, S.C., et al., *Suitability of virtual plaster models superimposed with the lateral cephalogram for guided paramedian orthodontic mini-implant placement with regard to the bone support*. J Orofac Orthop, 2020. **81**(5): p. 340-349.
48. Mang de la Rosa, M.R., et al., *Accuracy of palatal orthodontic mini-implants placed by conventionally or CAD/CAM-based surgical guides: a comparative in vitro study*. Angle Orthod, 2023. **93**(1): p. 79-87.
49. Stursa, L., et al., *Accuracy of Palatal Orthodontic Mini-Implants Placed Using Fully Digital Planned Insertion Guides: A Cadaver Study*. J Clin Med, 2023. **12**(21).
50. Wilmes, B., *Conventional versus digital workflows for palatal TADs? Seminars in Orthodontics*, 2025. **31**(1): p. 81–90.
51. Lee, H. and A. Badal, *A Review of Doses for Dental Imaging in 2010-2020 and Development of a Web Dose Calculator*. Radiol Res Pract, 2021. **2021**: p. 6924314.
52. AWMF, *S2k-Leitlinie Dentale digitale Volumentomographie*. AWMF online, 2022.

53. Hourfar, J., et al., *Three dimensional anatomical exploration of the anterior hard palate at the level of the third ruga for the placement of mini-implants--a cone-beam CT study*. Eur J Orthod, 2015. **37**(6): p. 589-95.
54. Kang, S., et al., *Bone thickness of the palate for orthodontic mini-implant anchorage in adults*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2007. **131**(4 Suppl): p. S74-81.
55. Buchter, A., et al., *Load-related implant reaction of mini-implants used for orthodontic anchorage*. Clin Oral Implants Res, 2005. **16**(4): p. 473-9.
56. Winsauer, H., et al., *Paramedian vertical palatal bone height for mini-implant insertion: a systematic review*. Eur J Orthod, 2014. **36**(5): p. 541-9.
57. Becker, K., et al., *Is there an ideal insertion angle and position for orthodontic mini-implants in the anterior palate? A CBCT study in humans*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2019. **156**(3): p. 345-354.
58. Wilmes, B., et al., *The T-Zone: Median vs. Paramedian Insertion of Palatal Mini-Implants*. J Clin Orthod, 2016. **50**(9): p. 543-551.
59. Barros, S.E., et al., *Effect of mini-implant diameter on fracture risk and self-drilling efficacy*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2011. **140**(4): p. e181-92.
60. Wilmes, B., et al., *Der Beneslider zur Distalisierung im Oberkiefer*. Inf Orthod Kieferorthop, 2013: p. 42-50.
61. Wilmes, B., *Benefit system: mini-implants for skeletal anchorage*. Kieferorthopädie, 2015. **29**(4): p. 1-10.
62. Wilmes, B., et al., *Mini-implant-supported temporary pontics*. J Clin Orthod, 2014. **48**(7): p. 422-9.
63. Casana-Ruiz, M.D., et al., *Risk factors for orthodontic mini-implants in skeletal anchorage biological stability: a systematic literature review and meta-analysis*. Sci Rep, 2020. **10**(1): p. 5848.
64. Zawawi, K.H., *Acceptance of orthodontic miniscrews as temporary anchorage devices*. Patient Prefer Adherence, 2014. **8**: p. 933-7.
65. Seifi, M. and N.S. Matini, *Evaluation of primary stability of innovated orthodontic miniscrew system (STS): An ex-vivo study*. J Clin Exp Dent, 2016. **8**(3): p. e255-9.
66. Rabel, A., S.G. Kohler, and A.M. Schmidt-Westhausen, *Clinical study on the primary stability of two dental implant systems with resonance frequency analysis*. Clin Oral Investig, 2007. **11**(3): p. 257-65.
67. Nienkemper, M., et al., *Mini-implant stability at the initial healing period: a clinical pilot study*. Angle Orthod, 2014. **84**(1): p. 127-33.
68. Branemark, P.I., *Osseointegration and its experimental background*. J Prosthet Dent, 1983. **50**(3): p. 399-410.
69. Lotz, E.M., et al., *Regulation of osteoclasts by osteoblast lineage cells depends on titanium implant surface properties*. Acta Biomater, 2018. **68**: p. 296-307.
70. Minkin, C. and V.C. Marinho, *Role of the osteoclast at the bone-implant interface*. Adv Dent Res, 1999. **13**: p. 49-56.
71. Huang, H.L., et al., *Initial stability and bone strain evaluation of the immediately loaded dental implant: an in vitro model study*. Clin Oral Implants Res, 2011. **22**(7): p. 691-698.
72. Kim, M.H., et al., *Cell adhesion and in vivo osseointegration of sandblasted/acid etched/anodized dental implants*. Int J Mol Sci, 2015. **16**(5): p. 10324-36.

73. Ravi, J., et al., *Survival rate and stability of surface-treated and non-surface-treated orthodontic mini-implants: a randomized clinical trial*. Dental Press J Orthod, 2023. **28**(2): p. e2321345.
74. Heidemann, W., et al., *Influence of different pilot hole sizes on torque measurements and pullout analysis of osteosynthesis screws*. J Craniomaxillofac Surg, 1998. **26**(1): p. 50-5.
75. Wilmes, B. and D. Drescher, *Impact of insertion depth and predrilling diameter on primary stability of orthodontic mini-implants*. Angle Orthod, 2009. **79**(4): p. 609-14.
76. Wilmes, B. and D. Drescher, *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, 2011. **40**(7): p. 697-703.
77. Gurdan, Z., et al., *Effect of pre-drilling on intraosseous temperature during self-drilling mini-implant placement in a porcine mandible model*. J Oral Sci, 2017. **59**(1): p. 47-53.
78. Wilmes, B., A. Panayotidis, and D. Drescher, *Fracture resistance of orthodontic mini-implants: a biomechanical in vitro study*. Eur J Orthod, 2011. **33**(4): p. 396-401.
79. Papadopoulos, M.A. and F. Tarawneh, *The use of miniscrew implants for temporary skeletal anchorage in orthodontics: a comprehensive review*. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod, 2007. **103**(5): p. e6-15.
80. Sarul, M., et al., *Effect of the length of orthodontic mini-screw implants on their long-term stability: a prospective study*. Angle Orthod, 2015. **85**(1): p. 33-8.
81. Favero, R., et al., *Maintaining Hygiene in Orthodontic Miniscrews: Patient Management and Protocols-A Literature Review*. Dent J (Basel), 2024. **12**(7).
82. Liou, E.J., B.C. Pai, and J.C. Lin, *Do miniscrews remain stationary under orthodontic forces?* Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2004. **126**(1): p. 42-7.
83. Ohashi, E., et al., *Implant vs screw loading protocols in orthodontics*. Angle Orthod, 2006. **76**(4): p. 721-7.
84. Wang, Y.C. and E.J. Liou, *Comparison of the loading behavior of self-drilling and predrilled miniscrews throughout orthodontic loading*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2008. **133**(1): p. 38-43.
85. Wiechmann, D., U. Meyer, and A. Buchter, *Success rate of mini- and micro-implants used for orthodontic anchorage: a prospective clinical study*. Clin Oral Implants Res, 2007. **18**(2): p. 263-7.
86. Drescher, D. and B. Wilmes, *CAD/CAM-gesteuerte Insertion von Mini-Implantaten in der KFO*. Kieferorthopädie Nachrichten, 2018. **32**(1): p. 23–29.
87. Nienkemper, M., et al., *Maxillary protraction using a hybrid hyrax-facemask combination*. Prog Orthod, 2013. **14**(1): p. 5.
88. Wilmes, B., M. Nienkemper, and D. Drescher, *Application and effectiveness of a mini-implant- and tooth-borne rapid palatal expansion device: the hybrid hyrax*. World J Orthod, 2010. **11**(4): p. 323-30.
89. Liou, E.J., *Effective maxillary orthopedic protraction for growing Class III patients: a clinical application simulates distraction osteogenesis*. Prog Orthod, 2005. **6**(2): p. 154-71.
90. Wilmes, B. and R. de Gabriele, *Die EASY DRIVER-Methode*. Kieferorthopädie Nachrichten, 2016(06): p. 17.
91. Wilmes, B., et al., *The "Mouse Trap" appliance for molar uprighting*. J Clin Orthod, 2017. **51**(9): p. 554-562.

92. Moon, C.H., et al., *Factors associated with the success rate of orthodontic miniscrews placed in the upper and lower posterior buccal region*. Angle Orthod, 2008. **78**(1): p. 101-6.
93. Baek, S.H., et al., *Success rate and risk factors associated with mini-implants reinstalled in the maxilla*. Angle Orthod, 2008. **78**(5): p. 895-901.
94. Kuroda, S., et al., *Root proximity is a major factor for screw failure in orthodontic anchorage*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2007. **131**(4 Suppl): p. S68-73.
95. Kuroda, S., et al., *Clinical use of miniscrew implants as orthodontic anchorage: success rates and postoperative discomfort*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2007. **131**(1): p. 9-15.
96. Lee, S.J., et al., *Survival analysis of orthodontic mini-implants*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2010. **137**(2): p. 194-9.
97. Kim, Y.H., et al., *Midpalatal miniscrews for orthodontic anchorage: factors affecting clinical success*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2010. **137**(1): p. 66-72.
98. Xin, Y., et al., *Miniscrews for orthodontic anchorage: analysis of risk factors correlated with the progressive susceptibility to failure*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2022. **162**(4): p. e192-e202.
99. Chen, Y.J., et al., *A retrospective analysis of the failure rate of three different orthodontic skeletal anchorage systems*. Clin Oral Implants Res, 2007. **18**(6): p. 768-75.
100. Ramirez-Ossa, D.M., et al., *An Umbrella Review of the Effectiveness of Temporary Anchorage Devices and the Factors That Contribute to Their Success or Failure*. J Evid Based Dent Pract, 2020. **20**(2): p. 101402.
101. Sumer, A.P., et al., *The evaluation of palatal bone thickness for implant insertion with cone beam computed tomography*. Int J Oral Maxillofac Surg, 2016. **45**(2): p. 216-20.
102. Kakali, L., et al., *Success of palatal implants or mini-screws placed median or paramedian for the reinforcement of anchorage during orthodontic treatment: a systematic review*. Eur J Orthod, 2019. **41**(1): p. 9-20.
103. Park, H.S., S.H. Jeong, and O.W. Kwon, *Factors affecting the clinical success of screw implants used as orthodontic anchorage*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2006. **130**(1): p. 18-25.
104. Garfinkle, J.S., et al., *Evaluation of orthodontic mini-implant anchorage in premolar extraction therapy in adolescents*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2008. **133**(5): p. 642-53.
105. Sander, F.G., et al., *Kieferorthopädie*. Zahn-Mund-Kiefer-Heilkunde, 2. Auflage. Thieme, 2011: p. 199.
106. Holst, A.I., et al., *Insertion of palatal implants in juvenile pigs: effects on midpalatal suture growth*. Clin Oral Implants Res, 2008. **19**(11): p. 1166–1171.
107. Nienkemper, M., et al., *Stability of paramedian inserted palatal mini-implants at the initial healing period: a controlled clinical study*. Clin Oral Implants Res, 2015. **26**(8): p. 870-875.
108. de Rezende Barbosa, G.L., et al., *Comparison of median and paramedian regions for planning palatal mini-implants: a study in vivo using cone beam computed tomography*. Int J Oral Maxillofac Surg, 2014. **43**(10): p. 1265-8.

109. Antoszewska, J., et al., *Five-year experience with orthodontic miniscrew implants: a retrospective investigation of factors influencing success rates*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2009. **136**(2): p. 158 e1-10; discussion 158-9.
110. Im, C., et al., *Improvement of osseointegration of Ti-6Al-4V ELI alloy orthodontic mini-screws through anodization, cyclic pre-calcification, and heat treatments*. Prog Orthod, 2022. **23**(1): p. 11.
111. Wilmes, B., et al., *Parameters affecting primary stability of orthodontic mini-implants*. J Orofac Orthop, 2006. **67**(3): p. 162-74.
112. Kreuter, A., *Der Einfluss des Insertionswinkels auf die Primärstabilität von kieferorthopädischen Mini-Implantaten*. Dissertation, Universitätsklinikum Düsseldorf, 2021.

6 Anhang

6.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Extraorale Abstützung mittels Delaire Maske	3
Abbildung 2: Simultane Mehrfachnutzung von Mini-Implantaten im anterioren Gaumen	7
Abbildung 3: CAD/CAM gefertigte Apparatur zur skelettalen Verankerung im Oberkiefer	9
Abbildung 4: Kieferorthopädische Mini-Implantate im anterioren Gaumen	11
Abbildung 5: T-Zone im anterioren Gaumen	12
Abbildung 6: Kieferorthopädisches Mini-Implantat im Alveolarfortsatz	13
Abbildung 7: Benefit Mini-Implantat	14
Abbildung 8: Beneplate mit Bracket oder Bogen	15
Abbildung 9: Palatinale Infiltrationsanästhesie im anterioren Gaumen	21
Abbildung 10: Vorbohrung mit Pilotbohrer	22
Abbildung 11: Insertion eines Mini-Implantats	23
Abbildung 12: Winkelstücke zur Insertion kieferorthopädischer Mini-Implantate	23
Abbildung 13: Beneslider mit zwei medianen Mini-Implantaten	25
Abbildung 14: Mesialslider mit zwei paramedianen Mini-Implantaten	26
Abbildung 15: Einseitiger Mesialslider mit zwei paramedianen Mini-Implantaten	26
Abbildung 16: Mesial-Distal-Slider mit zwei medianen Mini-Implantaten	27
Abbildung 17: Hybridhyrax mit zwei paramedianen Mini-Implantaten	28
Abbildung 18: Molarenverankerung mit zwei paramedianen Mini-Implantaten	29
Abbildung 19: Mausefalle mit zwei medianen Mini-Implantaten	30
Abbildung 20: Pendulum B mit zwei medianen Mini-Implantaten	31
Abbildung 21: T-Bogen mit zwei medianen Mini-Implantaten	32
Abbildung 22: Einordnung eines verlagerten Eckzahns mit einem medianen Mini-Implantat	33
Abbildung 23: Einordnung eines verlagerten Eckzahns mit zwei medianen Mini-Implantaten	33
Abbildung 24: Anzahl der mit Mini-Implantaten behandelten Patienten pro Jahr	36
Abbildung 25: Zusammenhang zwischen Alter und Verlustrate der Mini-Implantate	38
Abbildung 26: Zusammenhang zwischen Behandler und Verlustrate der Mini-Implantate	39

Abbildung 27: Zusammenhang zwischen Insertionsort und Verlustrate der Mini-Implantate	40
Abbildung 28: Zusammenhang zwischen Insertionsort und Verlustrate der Mini-Implantate bei Patienten im Alter von ≤ 12 Jahren	41
Abbildung 29: Zusammenhang zwischen Insertionsort und Verlustrate der Mini-Implantate bei Patienten im Alter von ≥ 13 Jahren	41
Abbildung 30: Zusammenhang zwischen der Anzahl eingesetzter Mini-Implantate pro Patient und der Verlustrate	42
Abbildung 31: Zusammenhang zwischen der Verankerungsform und der Verlustrate der Mini-Implantate	44
Abbildung 32: Zusammenhang zwischen dem Vorliegen eines Syndroms und der Verlustrate der Mini-Implantate.....	45
Abbildung 33: Mausefalle mit zwei Mini-Implantaten	55
Abbildung 34: Mausefalle mit drei Mini-Implantaten	56

6.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenhang zwischen eingesetzter Apparatur und Verlustrate der Mini-Implantate	43
---	----

Danksagung

Mama, Papa – danke, dass ihr immer da seid. Ohne euch hätte ich diesen Weg nie so gehen können.

Große Schwester – danke, dass du immer für mich da bist, für deinen Rückhalt und deine unermüdliche Unterstützung, sogar auf kieferorthopädischen Kongressen.

Kleine Schwester – mein lebendiges Tagebuch – auch wenn du tausende Kilometer entfernt bist, bist du immer da.

Außerdem danke ich Herrn Prof. Dr. Wilmes für die Bereitstellung meines Promotionsthemas und die Möglichkeit, bei ihm promovieren zu dürfen, sowie für seine Unterstützung und Erreichbarkeit während der gesamten Promotionszeit.