

Aus der Poliklinik für Parodontologie und Zahnerhaltung der Universitätsmedizin der  
Johannes-Gutenberg-Universität Mainz

Vergleich der klassischen Aufbereitungsmethoden des Implantatbettes gegenüber  
der Piezo-Technik.

Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades der  
Zahnmedizin

der Universitätsmedizin  
der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz  
vorgelegt von

Manuel Limberger aus Villingen-Schwenningen

Mainz, 2020

Tag der Promotion: 08. Dezember 2020

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Literaturdiskussion</b> .....	<b>3</b>
<b>2.1 Biologischer Zusammenhang des Implantatbettes</b> .....	<b>3</b>
2.1.1 Knochengewebe .....	3
2.1.2 Knochenqualität .....	4
2.1.3 Knochenquantität .....	5
<b>2.2 Osseointegration / Implantateinheilung</b> .....	<b>7</b>
2.2.1 Osteoinduktion .....	7
2.2.2 Osteokonduktion .....	8
2.2.3 Osseointegration .....	9
2.2.4 Implantatstabilität .....	10
<b>2.3 Design des Implantats</b> .....	<b>15</b>
<b>3. Material und Methoden</b> .....	<b>16</b>
<b>3.1 Studiendesign</b> .....	<b>16</b>
<b>3.2 Experimenteller Verlauf</b> .....	<b>18</b>
3.2.1 Vorbehandlung und Instruktion .....	18
3.2.2 Implantation .....	18
3.2.3 Postoperatives Verhalten .....	19
3.2.4 Datenerfassung.....	19
3.2.5 Implantatsystem.....	19
3.2.6 Operatives Vorgehen .....	24
3.2.7 Datenauswertung .....	27
3.2.8 Statistische Untersuchung .....	32
<b>4. Ergebnisse</b> .....	<b>33</b>
<b>4.1 Probanden</b> .....	<b>34</b>
<b>4.2 Klinische Messwerte</b> .....	<b>35</b>
4.2.1 Implantatstabilitäten (ISQ) .....	35
4.2.2 Das Knochenniveau .....	37
4.2.3 Aufbereitungszeitraum .....	38
4.2.4 Breite der Gingiva .....	39
4.2.5 Mundgesundheit .....	41
<b>4.3 Klinische Ergebnisse</b> .....	<b>41</b>
<b>5. Diskussion</b> .....	<b>43</b>
<b>6. Zusammenfassung</b> .....	<b>49</b>
<b>7. Literaturverzeichnis</b> .....	<b>51</b>

<b>Abbildung 2.1</b> Korrelation zwischen primärer und sekundärer Stabilität (44).....	11
<b>Abbildung 2.2</b> Korrelation zwischen Mobilität und ISQ Werten (57).....	14
<b>Abbildung 3.1</b> Halbseitige Panoramaschichtaufnahme mit zwei Messkugeln Regio 46 / 47 .....	18
<b>Abbildung 3.2</b> Surgic Pro® der Firma NSK, NAKANISHI INC., Tochigi, Japan,.....	22
<b>Abbildung 3.3</b> PIEZOSURGERY® touch, mectron.....	23
<b>Abbildung 3.4</b> Instrumente zur Implantatbettauflbereitung (implant prep starter kit, mectron® s.p.a., Carasco, Italien .....	24
<b>Abbildung 3.5</b> Zeitlicher Ablauf der Studie.....	27
<b>Abbildung 3.6</b> Messgerät zur Resonanzfrequenzanalyse, Ostell ISQ .....	28
<b>Abbildung 3.7</b> Implantat Regio 37 direkt nach Insertion .....	29
<b>Abbildung 3.8</b> Implantat Regio 37 drei Monate nach Implantation .....	30
<b>Abbildung 3.9</b> OHIP G-14 Fragebogen.....	31
<b>Abbildung 4.1</b> Mittelwert $\pm$ Standardabweichung. Änderung der Implantatstabilitäten innerhalb von sechs Monaten der piezochirurgischen Aufbereitung und der klassischen Aufbereitung. ....	36
<b>Abbildung 4.2</b> Verlauf des Knochenniveaus der klassischen und der piezochirurgischen Aufbereitung innerhalb des Untersuchungszeitraums von 24 Monaten .....	38
<b>Abbildung 4.3</b> Box-Plot Darstellung der mittleren Aufbereitungsdauer nach Methode .....	39
<b>Abbildung 4.4</b> Verteilung der mittleren Gingivadicke nach Testgruppen .....	40

## Tabellenverzeichnis

---

<b>Tabelle 2.1</b> Resorptionsklassen nach Fallschlüssel (1986) .....	6
<b>Tabelle 2.2</b> Resorptionsklassen nach Atwood (1962).....	6
<b>Tabelle 4.1</b> Implantatverteilung im Ober- (n = 24) und Unterkiefer (n = 26) .....	34
<b>Tabelle 4.2</b> Mittelwerte, Standardabweichung und Signifikanzwerte der durchschnittlichen Implantatstabilität.....	36
<b>Tabelle 4.3</b> Mittelwert $\pm$ Standardabweichung. Änderung der Implantatstabilitäten innerhalb von sechs Monaten der piezochirurgischen Aufbereitung und der klassischen Aufbereitung. ....	36
<b>Tabelle 4.4</b> Mittelwert $\pm$ Standardabweichung. Änderung des Knochenniveaus innerhalb von 24 Monaten der piezochirurgischen Aufbereitung und der klassischen Aufbereitung. ....	37
<b>Tabelle 4.5</b> Mittelwert der Aufbereitungszeit nach Art der Methode .....	39
<b>Tabelle 4.6</b> Deskriptiven Werte der mittleren Gingivadicke .....	40
<b>Tabelle 4.7</b> Mittlere Werte des OHIP Fragebogens sowie Signifikanz .....	41
<b>Tabelle 4.8</b> Ergebnisse der OHIP Auswertung in Prozent und totaler Anzahl .....	41

### Abkürzungsverzeichnis

IGF	Insulinähnliche Wachstumsfaktoren
FGF	Fibroblasten-Wachstumsfaktoren
PDGF	Plättchen-abgeleiteter Wachstumsfaktor
TGF- $\beta$	Transformierender Wachstumsfaktor
ISQ	Implantatstabilitätsquotient
RFA	Ressonanzfrequenzanalyse
PTV	Periotestwert
HIV	Humaner Immundefizienz-Virus
PF	Plattform

### 1. Einleitung

Unter der zahnmedizinischen Implantologie versteht man das Inserieren von körperfremdem, oder fremd entstandenen Material, um die künstliche Voraussetzung für eine prothetische Versorgung und somit eine realistische Kaufunktion wiederherzustellen. Nach Verlust eines Zahnes, eines ganzen Quadranten oder aller Zähne, ist das Ziel hierbei, die funktionelle sowie ästhetische Funktion wiederherzustellen.

Bereits Ende der dreißiger Jahre experimentierten die Gebrüder Strock (1,2) mit orthopädischen Schrauben zur Wiedereingliederung von Zähnen. Formiggini (1) entwickelte diese weiter zu einem spiralen förmigen Design, das erstmals eine Verbindung von Knochen und Metall erlaubte. Es folgten viele Modifikationen dieses Designs. 1940 entwickelte Dahl flache Abutments, (3) das Verbindungselement zwischen Implantat und Krone, die, im Gegensatz zu Vorangegangenen, jetzt über dem Knochenrand lagen. In den Anfängen der sechziger und siebziger Jahre des letzten Jahrhunderts gab es vielzählige Neu- und Weiterentwicklungen in der modernen Implantologie. So entwarfen zum Beispiel Heinrich (1971) und Linkow (1968) flache, blattförmige Implantate, sogenannte Extensionsimplantate (1).

In den letzten Dekaden kam es zu einer rasanten Entwicklung der oralen Implantatsysteme, die durch den Pioniergeist von wenigen Zahnärzten getragen wurde. Zu Beginn mit orthopädischen Schrauben zum Wiedereingliedern von Zähnen, bis hin zum ersten wurzelförmigen Gewindeimplantat aus Titan vergingen viele Jahrzehnte. Eine maßgebliche Beteiligung an der Entwicklung der modernen Implantate wird Per-Ingvar Brånemark und Leonhard Linkow zugeschrieben. Brånemark beschrieb erste Veränderung des Implantatdesigns, der Einheilungszeiten und dem Chirurgisches Vorgehen in den Siebziger Jahren.

So entdeckte er etwa, dass der Erfolg eines Implantates von der knöchernen Einheilung abhängt, der sogenannten Osseointegration. Diese Erkenntnis ergab sich eher zufällig während einer seiner Forschungsarbeiten (4). Osseointegration galt zu diesem Zeitpunkt noch als nicht möglich oder nötig (5). Der Umbruch zu osseointegrierten Implantaten gilt jedoch bis heute als wegweisend – „Wechsel von der Pionierära zur wissenschaftlichen Ära“ (6). Stand damals noch das wissenschaftliche Erproben auf Funktionalität im Vordergrund, so sind es heute mehr

und mehr die Faktoren Handhabung und Ästhetik. Im Gegensatz zu den bisherigen Einheilphasen von mehreren Monaten werden heute entweder direkte Belastung oder kürzere Einheilphasen vorgezogen (5). Das letzte Jahrhundert wurde von der Weiterentwicklung des Designs und der Implantatoberfläche beherrscht. Seit 2006 untersucht man nunmehr zunehmend die operative Aufbereitung des Implantatbettes. Klinische und histologische Ergebnisse bei Osteotomien mit sogenannten piezochirurgischen Verfahren veranlassten unter anderem die Firma Mectron® zur Entwicklung spezieller Instrumente zur Knochenperforation (7).

Bei der Piezochirurgie handelt es sich um ein in der Zahnmedizin sowie in der Medizin verwendetes System zum Schneiden von Hartgewebe. Zahlreiche Studien haben die klinischen Vorteile der Piezochirurgie in Bezug auf die Schnittqualität, Wendigkeit, Handhabung und Sicherheit untersucht. Allerdings haben nur wenige Studien ihre Überlegenheit gegenüber den traditionellen Systemen in Bezug auf die Dynamik der Knochenheilung untersucht. Daher war das Ziel dieser Studie, die Dynamik der Knochenheilung nach Implantation mit piezochirurgischer Knochenaufbereitung zu bewerten und sie mit denen herkömmlicher Knochenbohrungen zu vergleichen (8,9).

Ziel dieser Studie war es, anhand der Untersuchungen zu analysieren, ob durch die Implantatbettaufbereitung mit dem Piezosystem die Sekundärstabilität der Implantate beeinflusst wird. Dabei soll insbesondere herausgefunden werden, ob die in der zahnmedizinischen Implantologie noch wenig verwendete Piezochirurgie, einen Einfluss auf die enossale Einheilung der Implantate hat. Außerdem soll eine Aussage darüber getroffen werden, ob die Schleimhautdicke, zusammen mit der Aufbereitungsmethode einen zusätzlichen Einfluss auf die Einheilung und den periimplantären Knochen hat. Postoperative Beschwerden, sowie allgemeine Patientenzufriedenheit wurde durch patientenorientierte Bewertung erhoben.



### 2. Literaturdiskussion

#### 2.1 Biologischer Zusammenhang des Implantatbettes

##### 2.1.1 Knochengewebe

Der ausdifferenzierte Knochen des Kiefers dient in der Implantologie als Lager des Implantats. Er ist die zweithärteste Substanz unseres Körpers. Der skelettale Aufbau des menschlichen Körpers beginnt in der Fetalzeit und endet in der zweiten Lebensdekade. Zusätzlich findet ein lebenslänglicher Umbau statt, der sich regulativ im Knochenabbau und –Aufbau abwechselt. Dieser Prozess wird als „Remodelling“ bezeichnet, dessen Regulation durch mechanische Belastung erfolgt. Bei fehlender Belastung kommt es demnach zu einem Abbau des Knochens. Durch eine Überbelastung kann der Knochen trotz hohen Widerstandes gegen Druck- und Zugkräfte brechen. Die mäßige und veränderte Belastung hält die Auf- und Abbauprozesse jedoch in einem ständigen Gleichgewicht (10,11).

Systematisch werden zwei Typen des Knochengewebes, die ohne scharfe Begrenzung ineinander übergehen, unterschieden: die Kompakta und die Spongiosa. Die Kompakta tritt als feste, widerstandsfähige Hartsubstanz auf und ist neben der Peripherie im Unterkieferknochen zu finden (11).

Spongioser Knochen stellt sich als ein dreidimensionales, gitterförmiges Gerüst dar und besteht aus den Spongiosatrabekeln. Trabekel sind kleine weitverzweigte Knochenbälkchen, die sich im Inneren des Skeletknochens befinden. Ihre Ausrichtung wird nach physikalischer und mechanischer Belastung parallel zur größten Druck- oder Zugbelastung beeinflusst. Hierdurch entsteht eine große mechanische Widerstandskraft bei einer maximalen Leichtbauweise. Die feinen Maschen zwischen den Trabekeln bilden das Knochenmark, die bei Erwachsenen teilweise auch mit Fettgewebe gefüllt sind. Die äußere Wand bildet die Kompakta (11). Durch mechanische Beanspruchung des Kieferknochens, bedingt durch die Kaukräfte, findet eine dynamische Anpassung der Knochenarchitektur an die vorherrschende Belastung statt. Durch die ständige Anpassung wird einer möglichen Ermüdung oder Frakturbildung vorgebeugt. Die auf den Knochen wirkende Belastung beeinflusst somit direkt Qualität und die Quantität des Gewebes (10).

### 2.1.2 Knochenqualität

Die Knochenqualität, also die Dichte des Knochens, steht im direkten Zusammenhang mit der Primärstabilität des Implantats. Für die Verankerung ist somit die Knochendichte von essentieller Bedeutung (12). Je nach körperlichem Zustand des jeweiligen Individuums kann die Qualität des Knochens im Körper variieren. Mit höherem Alter kommt es physiologisch zu einer Degeneration des Gewebes. Im Knochen äußert sich als Folge einer hormonellen Störung der Osteoblasten eine osteoporotische Veränderung. Resultat ist die Abnahme der Knochenmasse. Insbesondere sind hierbei Osteolysen mit einer Minimierung der Kortikalis von der Innen- zur Außenseite, sowie die Erhöhung des Knochenmarkvolumens mit dem Verlust der Trabekel zu benennen. Weiter kommt es zur Reduktion des Knochenmarks mit gleichzeitiger Zunahme des Fettanteils der Spongiosa. Abhängig von der Volumenverteilung der Spongiosa und Kortikales im Kieferknochen wurden 1985 von Lekholm und Zarb vier Gruppen der Knochenqualität unterschieden (13).

**Knochen D1:** Fast der gesamte Kieferknochen besteht aus kompaktem Kieferknochen

**Knochen D2:** Eine dicke Schicht von kortikalem Knochen umgibt dichten Trabekelknochen

**Knochen D3:** Eine dünne Schicht von kortikalem Knochen umgibt weniger dichten Trabekelknochen

**Knochen D4:** Eine dünne Schicht des kortikalen Knochens umgibt Trabekel mit niedriger Dichte

Ohne Computertomographie (CT) ist es in der Regel kaum möglich, die Knochendichte vor einer Operation zu bestimmen. Daher ist es zu empfehlen vor der Operation ein Digitale Volumentomographie (DVT) anzufertigen, um die Knochendichte in den Bereichen geplanter Implantate zu bewerten. Regelmäßige Einzelaufnahmen oder Panoramaschichtaufnahmen sind nicht hilfreich, da die kortikale bukkale Schicht die Dichte der Knochen trabekel überdeckt. Jedes axiale

Bild auf einem DVT besteht aus vielen tausend Pixeln. Jeder Pixel hat eine bestimmte Graustufe, die sogenannte CT-Zahl (gemessen in Hounsfield-Einheiten [HU]), die mit der Dichte des untersuchten Gewebes zusammenhängt. Je höher die CT-Zahl, desto dichter das Gewebe (12).

Der D1 Knochendichte Typ beginnt in der Regel bei 1.200 HU. D2 Knochendichte im Bereich von 800 bis 1200 HU. D3 Knochendichte im Bereich von 300 bis 800 HU und D4 Knochendichte bei 300 HU. Daher ist die Messung der Knochendichte mit einem CT-Scan schnell und einfach durchzuführen (12).

Die Knochenqualität kann anhand der Auswertung der CT Bilder nur grob angenommen werden. Eine endgültige Beurteilung kann daher nur intraoperativ stattfinden. Anhand des Bohrwiderstandes bei der Aufbereitung des Implantatbettes kann der Operateur die Knochenqualität selbst bewerten (14).

### 2.1.3 Knochenquantität

Neben der Qualität des Knochens ist auch ein ausreichendes Angebot an Knochenvolumen für eine erfolgreiche Implantatinserterion, mit anschließender prothetischer Belastung, essentiell (15). Die Zahnextraktion ist eine der am häufigsten durchgeführten Zahnbehandlungen. Im Allgemeinen verläuft die Heilung nach Zahnextraktion sowohl des harten als auch des weichen Gewebes komplikationslos. Die Entfernung eines Zahnes führt jedoch zu einem gewissen alveolären Knochenverlust sowie zu strukturellen Veränderungen in dem darüber liegenden Weichgewebe (16). Untersuchungen haben gezeigt, dass in den ersten 2-3 Monaten nach Extraktion deutliche Abweichungen des Alveolarkamms beobachtet werden, wobei die Veränderungen stärker bukkal auftreten (17). Man unterscheidet hier zwischen der horizontalen Resorption, die aufgrund der oralen Muskulatur und der Zunge entstehen, und vertikalem Verlust. Dieser kann durch die Kompression des Alveolarkamms, zum Beispiel durch eine schleimhautgetragene Prothese, auftreten (16,18). Die Veränderung des Alveolarkammvolumens kann die prothetische Rehabilitation mit zahngestützten oder abnehmbaren Prothesen sowie den implantatgetragenen Prothesen erheblich erschweren. Die alveoläre Knochenresorption erschwert eine optimale Positionierung von Zahnimplantaten bzw. eine Implantation generell (19).

Als Klassifizierung der Resorption haben Atwood (20) und Fallschlüssel (21) 6 verschiedene Stadien der Atrophie für Ober- und Unterkiefer entwickelt (Tab.1).

<b>Resorptionsklasse Oberkiefer</b>	<b>Merkmale</b>
<b>0</b>	Prae-extractionem
<b>I</b>	Hoher, breiter Kiefer
<b>II</b>	Hoher, schmaler Kiefer
<b>III</b>	Hoher, scharfkantiger Kiefer
<b>IV</b>	Breiter, flacher Kiefer
<b>V</b>	Vollständig atrophiert

**Tabelle 2.1** Resorptionsklassen nach Fallschlüssel (1986)

<b>Resorptionsklasse Unterkiefer</b>	<b>Merkmale</b>
<b>0</b>	Prae-extractionem
<b>I</b>	Post-extractionem
<b>II</b>	Hoher Kiefer
<b>III</b>	Hoher, schmaler Kiefer
<b>IV</b>	Flach, abgerundeter Kiefer
<b>V</b>	Vollständig atrophiert und konkav

**Tabelle 2.2** Resorptionsklassen nach Atwood (1962)

### 2.2 Osseointegration / Implantateinheilung

Ziel der Implantation ist die Osseointegration, die durch das Zusammenspiel zwischen Oberfläche Implantat / Knochen beeinflusst wird. Erfolgreiche Einheilung hängt zum einen von Material, Topographie, Oberfläche, Form und Oberflächenchemie des Implantates, zum anderen von den oben genannten Aspekten wie Knochenangebot und Knochenqualität ab (22). Basis für eine erfolgreiche Einheilung ist die Neubildung von physiologischem Knochen an der Oberfläche zum Implantat. Neben der Osseointegration müssen zwei weitere Eigenschaften des Implantatmaterials beachtet werden. Hierbei handelt es sich um die Morphologie der Oberfläche und die Oberflächenchemie. Die Morphologie ist Bestandteil des Produktionsprozesses und hat laut Literatur einen entscheidenden Einfluss auf die Osseointegration (23). Die Oberflächenchemie ist in erster Linie durch den Werkstoff an sich bedingt, kann aber durch chemische Beschichtungen und Veränderungen, sowie auch durch verschiedene Formen der Oberflächenaktivierung verändert werden (24).

Die knöchernen Einheilung von Implantaten verläuft histographisch annähernd wie die Heilung einer gewöhnlichen knöchernen Wunde. Unterschieden wird bei der Heilung einer Knochenbohrung mit Insertion eines Implantats und der Reparatur eines Bohrlochs ohne Implantat die geringe Entzündungsreaktion. Aufgrund dessen rechnet man damit, dass hier eine Knochenschicht von 0,5 mm nekrotisch wird (25). Die gesamte Integration kann in 3 Phasen eingeteilt werden (26):

- **Osteoinduktion**
- **Osteokonduktion**
- **Osseointegration**

#### 2.2.1 Osteoinduktion

Die Osteoinduktion, also die Rekrutierung von unreifen Zellen und die Stimulation dieser Zellen, um sich zu Prä-Osteoblasten zu entwickeln, ist ein biologischer Grundmechanismus. Dieser tritt regelmäßig bei Frakturheilung und Implantatintegration auf. Es handelt sich also um einen Prozess, bei dem die

Osteogenese induziert wird. Auch wenn bereits vorhandene Osteoblasten (vor der Verletzung) dazu beitragen können neue Knochen zu bilden, ist allgemein anerkannt, dass solche vorbestehenden Zellen nur einen kleinen Teil zu der Knochenneubildung beitragen (27).

Durch die Verletzung werden lokale biochemische Botenstoffe freigesetzt, die die Zellen dabei unterstützen, sich der Situation anzupassen und in angemessener Weise zu reagieren. Einige dieser Botenstoffe führen zur Differenzierung und Organisation von Zellen, während andere Mitogene (zellteilungsanregende Proteine) stimulieren. Dieser erste Teil der Heilungsreaktion umfasst somit osteoinduktiv einen Prozess, der unmittelbar nach der Verletzung beginnt und in den ersten Wochen stattfindet (26).

### 2.2.2 Osteokonduktion

Das Knochenwachstum auf einer Implantatoberfläche hängt von der Aktivität differenzierter Knochenzellen ab. Diese Zellen stammen von vorbestehenden Prä-Osteoblasten sowie von Osteoblasten selbst ab, die durch ein Gewebetrauma aktiviert werden. Außerdem wird dieser Prozess durch mesenchymale Zellen, die durch die Osteoinduktion aktiviert werden, initiiert (27). Die Osteokonduktion hängt somit weitgehend von der vorangehenden Osteoinduktion ab (26). Für die Knochenbildung sind unterschiedliche Arten von Wachstumsfaktoren erforderlich. Zudem tritt kein Knochenwachstum auf ohne eine vorangehende, ordnungsgemäße Blutversorgung. Albrektsson untersuchte das Knochenwachstum und das Remodeling in In-vivo Studien und kam zu dem Schluss, dass für die Knochenbildung eine sogenannte volle Vaskularisierung notwendig war (28). So wird auch klar, dass die Hauptwirkung vieler Wachstumsfaktoren sowohl mitogen als auch angiogenetisch sind. Wachstumsfaktoren, die Knochengewebe auf verschiedene Weise regulieren können, umfassen den insulinähnlichen Wachstumsfaktor (IGF I, II), den Fibroblastenwachstumsfaktor (FGF), den TGF- $\beta$ , und den Thrombozyten-Wachstumsfaktor (PDGF).(29) Die IGF werden auch Somatomedine genannt. Diese Wachstumsfaktoren sind kleine Proteine, die als Signalvermittler für Zellen dienen. Im Fall der Implantateinheilung ist der Knochenaufbau nicht nur von den allgemeinen Bedingungen der Knochenreparatur abhängig, sondern auch von dem verwendeten

Implantatmaterial und seinen spezifischen Reaktionen. Eine Knocheneinheilung ist bei bestimmten Materialien wie Kupfer und Silber nicht möglich (26).

### 2.2.3 Osseointegration

Brånemark führte den Begriff der Osseointegration ein und beschrieb damit die Fremdkörperintegration in den Knochen. Die Osseointegration ist keine Besonderheit, sondern hängt, wie zuvor beschrieben, von der früheren Osteoinduktion und Osteokonduktion ab. Daher werden Materialien, die zu toxisch sind, um eine Osteokonduktion zu ermöglichen, auch nicht osseointegriert. Allerdings zeigen viele Materialien zumindest eine gewisse Knochenbefestigung. Dieser Umstand hat Pathologen dazu bewogen, die Osseointegration als einfache Fremdkörperreaktion zu betrachten (30), während klinisch orientierte Wissenschaftler eine solche Auffassung zurückgewiesen haben. In der oralen Implantologie kam es zu einem Durchbruch osseointegrierter Implantate, die im Gegensatz zu alternativ verankerten Implantaten, die in der Regel sehr schlechte Erfolgsraten aufweisen, hervorragende Ergebnisse lieferten (4,5,31). Auch wenn die anfängliche Osseointegration von der Knocheninduktion und -Kondition abhängig ist, bedeutet der Begriff, dass die Knochenverankerung über einen längeren Zeitraum aufrechterhalten wird. Im Gegensatz zum desmodontalen Verankerungsaufbau des natürlichen Zahnes, fehlen bei einem osseointegriertem Implantat die desmodontalen Fasern. Bei einem Implantat ist die Grenzschicht kollagenfrei und reich an Kalzium und Phosphat. Diese Schicht markiert die Grenze zwischen Knochen und Implantat (26).

Für eine langfristige Überlebensrate der Implantate ist das Verhältnis der Osseointegration von besonderer Bedeutung. Prämisse ist hier die ausreichende Vaskularisierung und das dadurch abhängige Potential der Regeneration von Knochengewebe, sowie das oben beschriebene Remodeling (22). Zylindrisches Implantatdesign (ohne Gewinde), raue plasmabehaftete Oberfläche und Überbelastung stellen Faktoren dar, die zu einem sekundären Versagen der Osseointegration führen können (31,32). Hierbei sind Makro- bzw. Mikrobewegungen voneinander zu unterscheiden.

Die Implantatstabilität zum Zeitpunkt der Insertion und während der Einheilung ist entscheidend für den klinischen Erfolg (33). Eine übermäßige Belastung des Implantats kann eine hohe Mikrobewegung während der Knochenheilung

verursachen, die das Fibrin-Netzwerk und das neue Gefäßsystem der frühen Knochenheilung schädigen kann (34). Dies lässt darauf schließen, dass die Implantatmobilität mit einem progressiven, marginalen Knochenverlust und einem möglichen Implantatverlust zusammenhängt. Die Schwachstelle könnte an der nicht fibrilären Schicht an der Implantatoberfläche liegen, die aufgrund der Abwesenheit von Kollagen, der elastischen Komponente des Knochens, vermutlich keine ausreichende Zug- oder Druckfestigkeit aufweist (35).

Man ist lange davon ausgegangen das eine vorzeitige Implantatbelastung, eine reduzierte Osteogenese, aufgrund der periimplantären, fibrösen Gewebsbildung, mit sich bringt(36). Allerdings kann eine niedrige Belastung, die der physiologischen ähnelt auch eine Osteogenese fördern (37,38). Letztendlich ist nicht das Fehlen einer Belastung, sondern vielmehr die Vermeidung einer maßlosen Bewegung am Implantat-Knochen-Kontakt maßgeblich für die Osseointegration (39).

### 2.2.4 Implantatstabilität

Eine starre Verankerung des Implantats ist Ziel der Implantatbetaufbereitung (40). Wie oben beschrieben benötigt jede Osseointegration eine Auflagerung von neuen Zellschichten ohne jegliche Mikrobewegung. Direkt nach der Implantatinserktion ist die Festigkeit des Implantates rein mechanischen Ursprungs und wird als Primärstabilität bezeichnet. Je höher die Primärstabilität desto geringer ist die Mikrobewegung (39). Einflussfaktoren der Primärstabilität sind die biologische Kompatibilität von Implantatmaterial und Knochen (41), den biomechanischen Eigenschaften des Wirtsknochen (42), einem maximal atraumatischem Vorgehen bei der Operation (43) und dem Implantatdesign (15). Im Laufe des Heilungsprozesses ändert sich diese Art der Stabilität in eine Mischform aus mechanische und biologische Stabilität (Sekundärstabilität). Die Sekundärstabilität ist somit die aus Knochenbildung und Remodeling resultierende Zunahme der Stabilität. Weiter ändert sich durch die verschiedenen biologischen Prozesse um das Implantat die Beschaffenheit von einer Knochenresorption bis zur Knochenapposition. Jegliche Bewegung des Implantats in dieser Phase kann zum Verlust des Implantats führen. Nach Abschluss der Osseointegration, nach etwa 4-6 Monaten (4,31,35), ist das Implantat vollständig biologisch integriert (44).



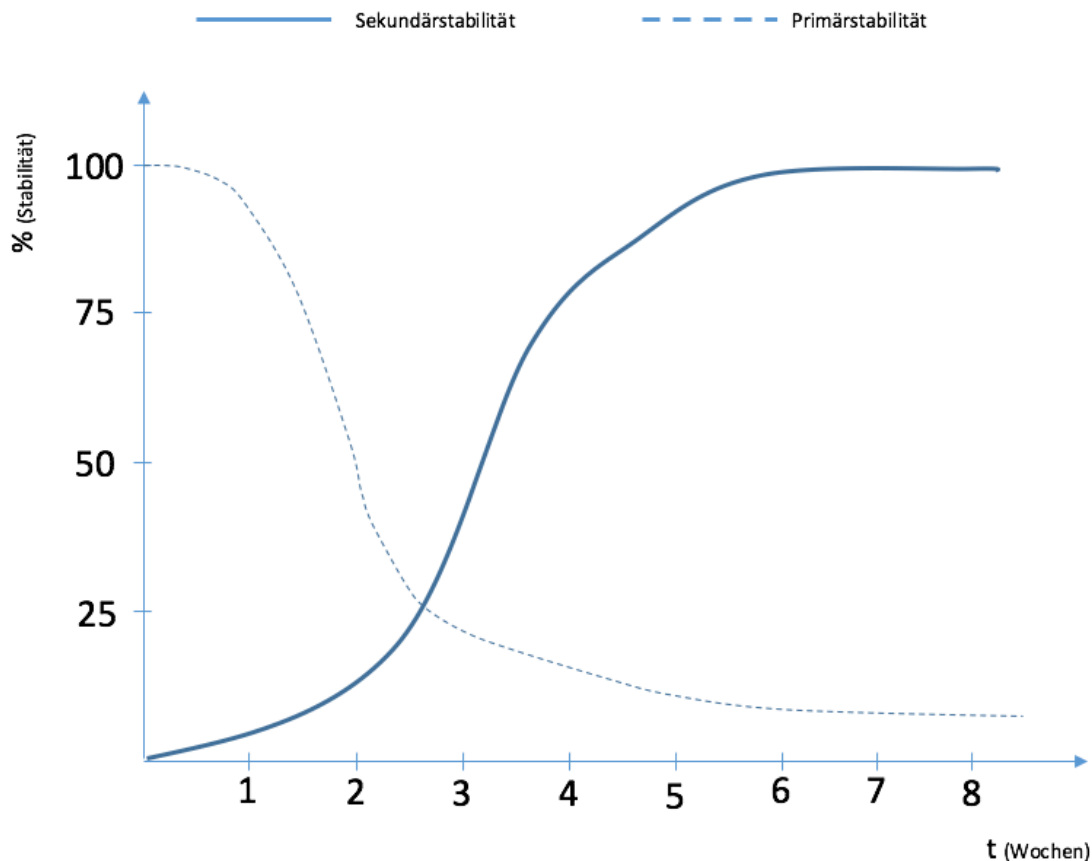


Abbildung 2.1 Korrelation zwischen primärer und sekundärer Stabilität (44)

### Messung der Implantatstabilität

Zur Messung der Primärstabilität des Implantats stehen eine Reihe von Methoden zur Verfügung. Dazu gehören unter anderem die Drehmomentanalyse, der Ausdrehtest (45), der Perkussionstest, der Periotest (46) und die Resonanzfrequenzanalyse (RFA, 47). Als invasive Ermittlung der Knochenstabilität können auch histologische Daten herangezogen werden, um durch Messung der Knochenqualität Rückschlüsse auf die Primärstabilität zu erhalten.

Die unbedeutendste und auch unspezifischste Methode ist die Kontrolle der klinisch wahrnehmbaren Beweglichkeit des Implantats durch Druck mit einem Instrument oder den Fingern. Der Perkussionstest ist einer der einfachsten Methoden, der zur Abschätzung der Integration verwendet werden kann. Dieser Test basiert auf der Schwingungs-akustischen Theorie. Ein klinisches Urteil über die Osseointegration entsteht durch den Klang, der bei der Perkussion mit einem metallischen Instrument zu hören ist. Ein klar klingender "Kristallklang" deutet auf eine erfolgreiche

Osseointegration hin, während ein "dumpfer" Klang keine Osseointegration anzeigt (48). Allerdings ist diese Methode stark vom Erfahrungsniveau und dem subjektiven Wahrnehmen des Behandlers abhängig. Darüber hinaus ist das Gehör nicht standardisiert und sensitiv genug, um Klänge unterscheiden zu können, und kann daher nicht als eine Testmethode verwendet werden (49).

Bei der Drehmomentanalyse wird die Knochenqualität während der Implantation gemessen. Der Eindrehwiderstand bei der Implantatinsertion, gemessen in Ncm, korreliert mit der Dichte des jeweiligen Knochens. Diese Energie wurde als signifikant, mit der Knochendichte korrelierend, als einer der Faktoren für die Stabilität des Implantats bestimmt (50).

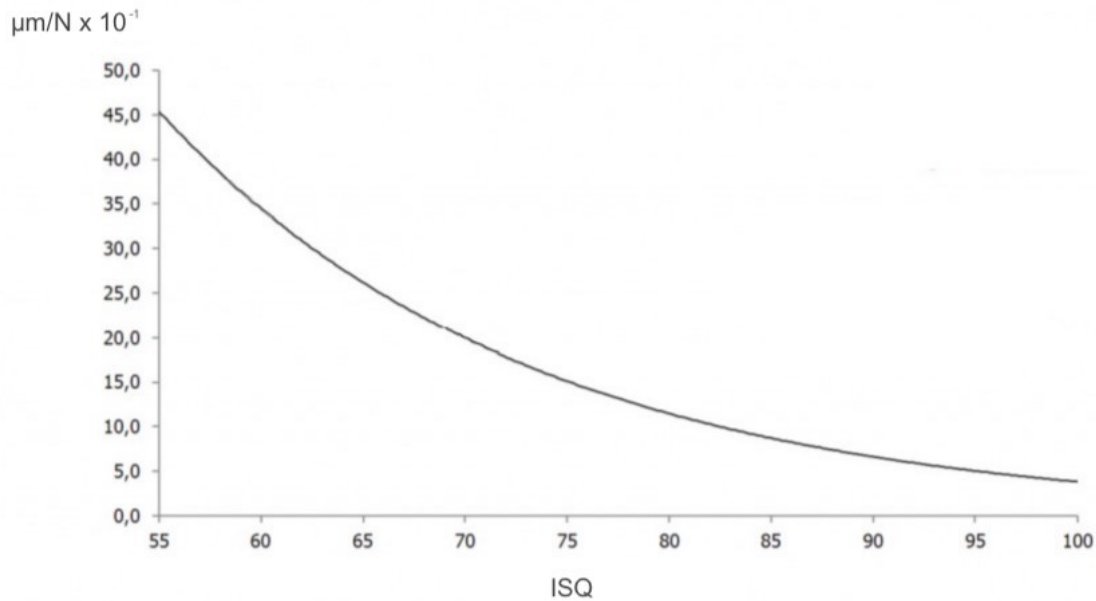
Beim Ausdrehtest wird entgegen der ursprünglichen Eindrehrichtung ein Drehmoment angesetzt. Dieser Test kann erst nach einer spezifischen Einheilphase erfolgen. Implantate, die osseointegriert sind, widerstehen dem Drehmoment. Dadurch kann das Maß der Osseointegration ermittelt werden. An der Implantat-Knochengrenze, entstehen jedoch Scherkräfte, die destruiierend auf die Integration wirken und den Test somit klinisch unbrauchbar werden lassen (51).

Der Periotest wurde weitestgehend untersucht und als zuverlässige Methode zur Bestimmung der Implantatstabilität empfohlen. Beim Periotest wird ein elektromagnetisch angetriebener und elektronisch gesteuerter Metallstab, der sich in einem Handstück befindet, verwendet. Der Metallstab tastet perkussorisch den Zahn oder das Implantat in einer elektronisch gesteuerten Abfolge viermal pro Sekunde vier Sekunden lang ab. Gemessen wird die Zeit des Kontaktes zwischen dem Prüfkörper und dem Abstandstab. Je kürzer die Zeit desto unbeweglicher ist der Zahn bzw. das Implantat. Die Signale werden dann in einen eindeutigen Wert umgewandelt, der Periotest-Wert (PTV) genannt wird. Ursprünglich wurde der Test zur Messung der Beweglichkeit eines natürlichen Zahnes entwickelt (52). Bei einem natürlichen Zahn stellt die Pufferkapazität des Parodonts ein Problem bei der Analyse der Verteilung der Stoßkraft dar. Wenn dynamische Eigenschaften auf der Grundlage der Annahme untersucht werden, dass die gesamte parodontale Struktur als mechanische Einheit fungiert, ist es schwierig, die Dämpfung des Parodonts zu simulieren. Im Gegensatz dazu wird angenommen, dass die Knochen-Implantat-Grenzfläche als direkte Verankerung präzisere Ergebnisse liefert (49).

Aufgrund von Angulationen in vertikaler und horizontaler Richtung des Handstücks zur Distanzhülse kann es zur Abweichung der Messung kommen (49). Aus diesem Grund wird der Periotest zur Kontrolle von Implantaten konträr diskutiert (52,53).

Bei der Resonanzfrequenzanalyse, die von Neil Meredith 1996 erstmals zur quantitativen Messung der Stabilität beschrieben wurde, wird die Messung der Resonanzfrequenz verwendet (47). Es handelt sich um eine nicht invasive diagnostische Methode, die die Implantatstabilität und die Knochendichte zu verschiedenen Zeitpunkten mithilfe von Vibrationen und einem Prinzip der strukturellen Analyse misst (54). Die Resonanzfrequenzanalyse verwendet einen Wandler, der durch eine Schraube mit dem Implantat oder dem Abutment verschraubt wird. Der Wandler besteht aus 2 piezokeramischen Elementen, von denen eines durch ein sinusförmiges Signal (5 bis 15 kHz) vibriert. Das Handstück dient als Rezeptor für das Signal. Resonanzpeaks aus dem empfangenen Signal zeigen die erste Resonanzfrequenz des Messobjekts an. In vitro und in vivo Studien haben gezeigt, dass dieser Resonanzpeak verwendet werden kann, um die Implantatstabilität quantitativ zu bestimmen.

Die Mikromobilität, also die Differenz mit der sich das Implantat bewegt, wenn es einer lateralen Kraft circa 10 mm über dem Knochenniveau unterworfen wird, wird hier mit  $\mu\text{m} / \text{N}$  ausgedrückt. Die Kraft wird in einem definierten Abstand vom Knochenniveau angewendet. Die Mikrobeweglichkeit wird bestimmt durch Knochendichte im Allgemeinen, dem Grad der Osseointegration, der Vorbereitung der Implantatbohrung und der Implantatgestaltung (55). Die Korrelation zwischen Mikrobeweglichkeit ( $\mu\text{m} / \text{N}$ ) und ISQ ist nicht linear. Die Mikrobeweglichkeit wird näherungsweise um 50% reduziert bei einer Reduktion des ISQ von 60 auf 70 (siehe nachfolgende Grafik) (56).



**Abbildung 2.2** Korrelation zwischen Mobilität und ISQ Werten (57)

Derzeit gibt es zwei Hersteller auf dem Markt: Osstell, Gothenburg, Sweden und TOP ONE BIOTECH Tainan, Taiwan. Osstell kombiniert den Wandler und die Frequenzquelle zu einem Gerät. In den frühen Studien wurde das Hertz als Maßeinheit verwendet (58). Später entwickelte Osstell den Implantat-Stabilitätsquotienten (ISQ) als dimensionslose Messeinheit (59).

Resonanzfrequenzwerte von 3.500 bis 8.500 Hz werden in eine ISQ von 0 bis 100 umgesetzt. Ein hoher Wert zeigt eine größere Stabilität an, während ein niedriger Wert geringe Stabilität beschreibt (48). Im Durchschnitt wird ein ISQ von 69 nach einem Jahr Belastung bei erfolgreicher Osseointegration angegeben (54).

Mathematisch ist der Quotient wie folgt definiert:

$$\text{ISQ} = fR \times fR (u + v \cdot L) + fR (K + nL) + p + m \cdot L$$

**fR** = Resonanzfrequenz (gemessen)

**u, v, k, n, p, m** = definierte Kalibrierungsfaktoren

**L** = Abutmentlänge

### 2.3 Design des Implantats.

In der Implantologie werden verschiedenste Typen von Implantaten eingesetzt, die sich hinsichtlich ihrer Materialien, Beschichtung, Form und Oberfläche unterscheiden. Eine Eigenschaft haben alle Implantate gemeinsam, sie bestehen aus einem alloplastischen Material (14).

Die primäre Stabilität eines Implantats ist abhängig von Form, Länge und Durchmesser des Implantats (60). Zudem ist ein Material nötig, dass biokompatibel oder bioaktiv ist. Für die Osseointegration ist eine Knochenapposition an das Material von großer Bedeutung (4). Die in der oralen Implantologie verwendeten Materialien bestehen hauptsächlich aus Oxidkeramik und Titan. In der zahnärztlichen Implantologie werden ausschließlich alloplastische Materialien verwendet (61). Nach der wissenschaftlichen Lage und den praktischen Anwendungen werden Metalle in der enossalen Implantologie bevorzugt. Grund dafür ist, dass in der Regel ein reduziertes Knochenangebot vorherrscht und metallische Implantate bei einem relativ grazilen Design einer hohen mechanischen Belastung widerstehen. Heute werden fast alle enossalen Implantate aus Reintitan oder Titanlegierungen hergestellt (62). Außerdem wird derzeit kontrovers über die Neuentwicklung von keramischen Implantaten diskutiert (63).

Die Materialien stellen einen direkten Kontakt bzw. Verbund zwischen Implantat und Knochen dar. Außerdem bleiben potentielle unerwünschte Gewebereaktionen aus. Sie unterscheiden sich in Eigenschaften wie Material, Makrostruktur, Mikrostruktur und Oberflächenchemie. Implantate müssen zudem mit dem enossalen Teil die Kaukräfte an das umgebene Knochengewebe weiterleiten, um zum Erhalt des Knochens beitragen zu können. Da bei einem Implantat die parodontale Aufhängung fehlt, sollte, um Belastungsmaxima zu vermeiden, eine möglichst große und runde Oberfläche generiert werden (64).

### 3. Material und Methoden

#### 3.1 Studiendesign

Die Studie wurde als klinische, prospektive, doppelblind-randomisierte Pilotstudie mit Parallelgruppen nach dem CONSORT-Statement durchgeführt. Die Studie vergleicht zwei verschiedene Aufbereitungsmethoden des Knochens für die Implantation eines Titanimplantates: Die klassische Bohrung mit einem rotierenden Bohrer und die Aufbereitung mit einem piezochirurgischen Instrument. Beide Implantatbetten erhielten dasselbe Implantat. Die klinischen und patientenbezogenen Ergebnisse wurden miteinander verglichen. Das Studienprotokoll wurde vom Ethikkomitee der Universitätsmedizin Mainz genehmigt. Vor der Aufnahme in die klinische Studie wurde von allen Studienteilnehmern eine schriftliche Einverständniserklärung eingefordert. Zudem fanden die klinischen Eingriffe unter Berücksichtigung der Grundsätze aus der Deklaration von Helsinki statt. Die Studienteilnehmer waren hinsichtlich der Eignung (Ein- und Ausschlusskriterien) für die Studie von einem Untersucher ausgewählt worden. Es fand eine randomisierte Einteilung statt.

#### **Studienteilnehmer**

30 unmittelbar nachfolgende Teilnehmer wurden im Zeitraum von Oktober 2014 – April 2015 in der Poliklinik für Zahnerhaltungskunde, der Klinik für Zahn-, Mund- und Kieferkrankheiten in Mainz, untersucht. Die letztendliche Auswahl der Studienteilnehmer fand nach bestimmten Ein- und Ausschlusskriterien statt:

#### Teilnahmekriterien waren:

- Lückengebiss in Unter- oder Oberkiefer (2 Implantationsloci je Unter- oder Oberkiefer),
- Mindestrestbezaehlung von vier Zähnen pro Quadrant,
- Patient  $\geq 18$  Jahre.
- Ausreichende Knochenangebot ohne Notwendigkeit einer Knochenaugmentation
- Gute Mundhygiene (API  $\leq 25\%$  und SBI  $\leq 25\%$ )

### Ausschlusskriterien waren:

- Vorerkrankungen, welche die Wundheilung beeinflussen können,
- Metabolische Knochenerkrankung,
- Bestrahlung im Bereich des Kopfes,
- Schwangerschaft, Stillzeit,
- Starker Nikotinabusus ( $\geq 10$  Zigaretten am Tag),
- Schlechte Mundhygiene (Full Mouth Plaque Score  $\leq 25\%$ , Full Mouth Bleeding Score  $\leq 25\%$ ),
- Bisphosphonatanamnese,
- Unbehandelte Parodontopathien,
- Notwendigkeit einer Knochenaugmentation im zu implantierenden Bereich.

### **Ausführende Personen**

#### Operateur und Teilhabende

Alle chirurgischen Eingriffe wurden von einem erfahrenen Implantologen durchgeführt. Der behandelnde Zahnarzt wies eine langjährige klinische Erfahrung im Bereich der Chirurgie auf. Die Aufbereitung und die Implantation, sowie die prä- und postoperativen Untersuchungen fanden in der Poliklinik für Zahnerhaltungskunde, der Zahnklinik Mainz, statt. Das Institut für Medizinische Biometrie, Epidemiologie und Informatik wurde für die statistische Analyse der klinischen Daten hinzugezogen.

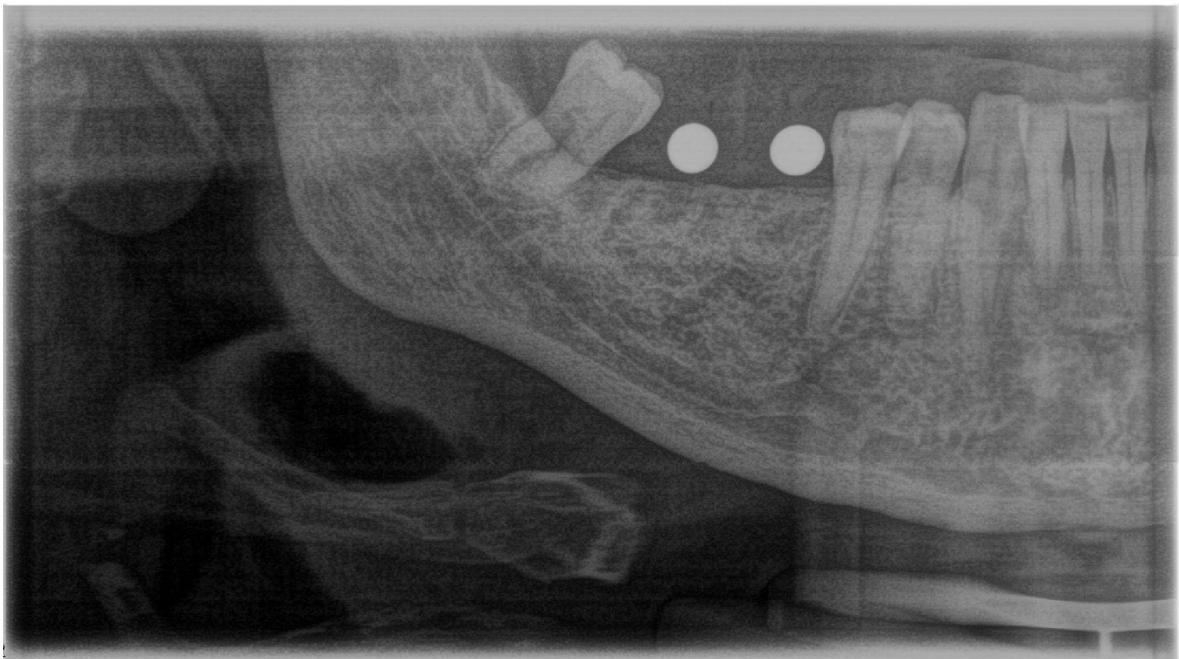
#### Examinatoren

Die klinischen prä- und postoperativen Untersuchungen mit anschließender Datenerfassung wurden einzig von dem Doktorand vorgenommen. Dazu gehörte die Anfertigung von Röntgenbildern sowie die röntgenologische Analyse und die klinische Messung der Implantatstabilitäten. Für die Analyse wurde der Examinator im Voraus je von einem Experten für die Analyse von Röntgenbildern und die Messung von angewandeter Technik zur quantitativen Analyse von Implantaten eingewiesen.

### 3.2 Experimenteller Verlauf

#### 3.2.1 Vorbehandlung und Instruktion

- Im Anschluss an das Screening nahmen 25 ausgewählte Studienteilnehmer an einer Prophylaxe teil, die mindestens vier Wochen vor dem geplanten chirurgischen Eingriff stattfand. Alle Patienten erhielten an diesem Termin eine professionell durchgeführte Zahnreinigung.
- Von allen Patienten wurde ein dentaler und parodontaler Status erhoben. Für die implantologische Planung wurden Panoramaschichtaufnahmen mit Messkugeln angefertigt.



**Abbildung 3.1** Halbseitige Panoramaschichtaufnahme mit zwei Messkugeln Regio 46 / 47

#### 3.2.2 Implantation

- Die Vorbereitung des Implantatbettes und die anschließende Implantation der Titanimplantate, mit der klassischen oder der piezochirurgischen Methode fanden alle in einem Eingriff statt. Eine Stunde präoperativ erhielten alle Patienten 1000 mg Amoxicillin (alternativ 300 mg Clindamycin bei Allergie) und anschließend 2000mg/Tag (bzw. 600 mg Clindamycin/Tag) für je 6 Tage.



### 3.2.3 Postoperatives Verhalten

- Jeder Patient erhielt unmittelbar im Anschluss an die Operation 600 mg Ibuprofen per oral.
- Diese Prävention galt dem Verhindern von möglichen Entzündungen sowie postoperativen Schmerzen.  
Weitere Einnahmen des NSAR wurden vom Operateur nur bei Bedarf empfohlen.
- Die Studienteilnehmer wurden angehalten, im Operationsgebiet vorsichtig die vorhandenen Zähne zu Reinigen. Des Weiteren sollten Traumata im Behandlungsgebiet vermieden werden sowie jegliche sportlichen Aktivitäten sollten ebenfalls für vier Wochen vermieden werden.
- Alle Patienten wurden angewiesen mit kalten Kompressen eine mögliche Schwellung durch intermittierendes Kühlen zu reduzieren.
- Eine dreimal tägliche 60-sekündige Spülung mit einer 0,12% Chlorhexidindigluconat-Lösung (CHX) (GUM Paroex 0,12 %, Sunstar Deutschland GmbH) wurde jedem Patienten für eine Woche verschrieben.
- 7 -10 Tage postoperativ wurden die Nähte entfernt.

### 3.2.4 Datenerfassung

- Die klinischen Parameter wurden bei der Operations-Sitzung, nach einem, drei, sechs und nach zwölf Monaten erfasst.
- Anfertigung von individualisierten Röntgenhaltern mit medizinischem Silikon wurden für Vergleichs- und Dokumentationszwecke präoperativ angefertigt.
- Fragebögen für eine subjektive, patientenbezogene Datenerfassung sind während des Screenings, sowie nach dem Eingriff ausgehändigt worden.

### 3.2.5 Implantatsystem

- In dieser Studie kam das SPI®ELEMENT INICELL® Implantatsystem von Thommen Medical® (Grenchen, Schweiz) zum Einsatz, das aus maschinengefrästen Schraubenimplantaten mit sandgestrahlten und thermisch säuregeätzter Implantatoberfläche besteht. Die Implantate besitzen

eine zylindrische Form. Zudem wird das speziell darauf abgestimmte Instrumentarium verwendet.

- Zu diesem Instrumentarium gehören Bohrer und Gewindeschneider mit verschiedenen Durchmessern, um ein formpassendes Implantatbett zu präparieren. Das chirurgische Implanttset umfasst weiter eine Röntgen-Tiefenmesslehre, Richtungsindikatoren und verschiedene Eindrehinstrumente.

### **Verwendete Implantattypen**

- Bei den Implantaten handelt es sich um zylindrische Implantate mit einem selbstschneidenden Gewinde. In der Studie verwendete Implantate wurden mit einer Länge von 11 mm und einem enossalen Durchmesser von 4mm verwendet. Der Kerndurchmesser beträgt 3,5 mm. Das Implantat wird mit PF 4.0mm bezeichnet. Der Durchmesser der prothetischen Plattform beträgt 4,0mm.
- Das Implantatsystem von Thommen Medical (Grenchen, Schweiz) beinhaltet ein Konditionierungssystem das INICELL® benannt wird. Diese Flüssigkeit schafft kurz vor der Implantation eine hydrophile Implantatoberfläche, was Voraussetzung für eine optimale Benetzbarkeit ist.

### **Instrumentarium der klassischen Implantatbettaufbereitung**

#### Bohrersortiment

Zu dem Bohrersortiment für die Implantatbettpräparation gehören ein Pilotbohrer mit 2 mm Durchmesser (VECTOdrill™ 2,00 mm, thommenmedical), ein Bohrer mit 2,8 mm Durchmesser (VECTOdrill™ 2,80 mm, thommenmedical) und ein 3,5 mm Durchmesser Spiralbohrer (VECTOdrill™ 3,50 mm, thommenmedical). Alle Instrumente dienen zur Erweiterung des Bohrkanals von 2 mm auf 2,8 mm, sowie anschließend auf 3,5 mm. Die Bohrer sind aus Keramik und mit Tiefenmarkierung gekennzeichnet. Versenker und Gewindeschneider sind abhängig vom Implantattyp anzuwenden.

### Kontrollinstrumente

Die Richtungsindikatoren werden in den Bohrschaft gesetzt, um die Implantatachse intraoperativ zu kontrollieren. Um die angrenzenden anatomischen Strukturen neben dem Implantat beurteilen zu können, gibt es eine Röntgenmesslehre.

### Eindrehinstrumente

Die Eindrehinstrumente bestehen aus dem Verbindungspfosten, dem Einbringpfosten und einer Ratsche. Der Einbringpfosten wird auf das Implantat aufgeschraubt, um es in den Bohrschaft zu drehen. Danach wird der Einbringpfosten wieder entfernt und der Gingivaformer auf das Implantat geschraubt.

### Verwendete Chirurgie Bohrmaschine

Die für die klassische Implantatbettauflbereitung verwendete Chirurgie Bohrmaschine ist die Surgic Pro® der Firma NSK (NAKANISHI INC., Tochigi, Japan). Hierbei handelt es sich um einen häufig in der Implantologie genutzten Mikromotor. Das Gerät besitzt ein Drehmoment bis 80 Ncm, ein Drehzahlspektrum von 200 bis 40.000 U/min und eine Arbeitsfeldausleuchtung mittels LED-Beleuchtung.



**Abbildung 3.2** Surgic Pro® der Firma NSK, NAKANISHI INC., Tochigi, Japan, (Quelle: Web URL: <http://www.pro3implant.com.uy/wp-content/uploads/2017/03/SurgicPro-2.jpg> , 25.10.2018)

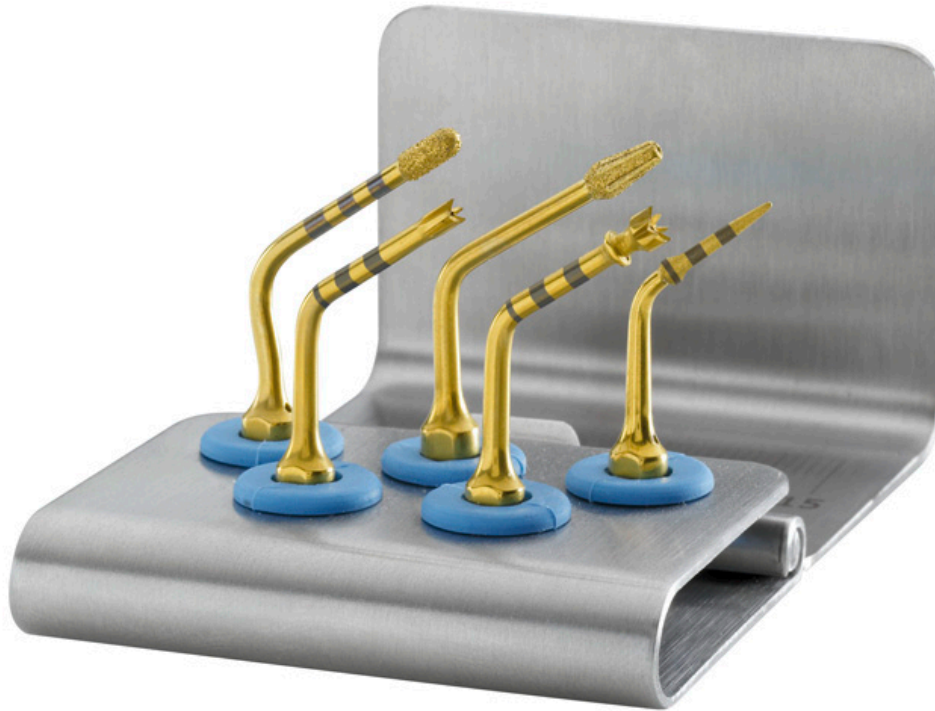
Für die piezochirurgische Implantatbettauflbereitung wurde das Gerät *touch* der Firma mectron® (mectron s.p.a., Carasco, Italien) verwendet.



**Abbildung 3.3** PIEZOSURGERY® touch, mectron (Quelle: Web URL: [https://mectron.de/fileadmin/user\\_upload/dental/general/pictures/products/PIEZOSURGERY/units/ps\\_units\\_PStouch\\_front\\_left\\_4x3\\_white.jpg](https://mectron.de/fileadmin/user_upload/dental/general/pictures/products/PIEZOSURGERY/units/ps_units_PStouch_front_left_4x3_white.jpg) , 14.10.2018)

### Verwendete Piezo Instrumente

Zu dem piezochirurgischen Instrumentensortiment gehören ein initialer, richtungsgebender Pilotbohrer (IM1S® mectron) mit konischer Form mit einem maximalen Durchmesser von 2,0 mm. Ein 2,0 mm (IM2® mectron), 3,0 mm (IM3® mectron) und 3,4 mm (IM3-4® mectron) Instrument zur Knochenperforation, sowie ein 2,0 mm (P2-3® mectron) und ein 3,0 mm (P3-4® mectron) Instrument zur Optimierung der Konzentrizität mit Diamantbeschichtung und Korngröße von 150 µm.



**Abbildung 3.4** Instrumente zur Implantatbettaufbereitung (implant prep starter kit, mectron® s.p.a., Carasco, Italien, Quelle: Web URL. [http://dental.mectron.com/fileadmin/user\\_upload/dental/general/pictures/products/PIEZOSURGERY/inser\\_t\\_kits/ps\\_kits\\_implant-prep\\_start](http://dental.mectron.com/fileadmin/user_upload/dental/general/pictures/products/PIEZOSURGERY/inser_t_kits/ps_kits_implant-prep_start) 14.10.2018

### 3.2.6 Operatives Vorgehen

Bei jeder Implantation wurden jeweils zwei Implantate inseriert. Die Implantatbetten wurden jeweils mit dem Implantatbohrer (Surgic Pro®, NSK NAKANISHI INC., Tochigi, Japan) und einer piezochirurgischen Fräse (touch mectron®, mectron s.p.a., Carasco, Italien) aufbereitet. Der allgemeine Ablauf gestaltete sich bei der Implantation Insertion der Implantate gleich.

Vor der chirurgischen Implantation wurden Panoramaschichtaufnahmen mit einer diagnostischen Messkugel angefertigt. Mit diesen Aufnahmen wurde das Knochenangebot vermessen und beurteilt. Nach abgeschlossener implantologischer Diagnostik wurde jeder Patient präoperativ über eventuelle Komplikationen aufgeklärt. Alle Implantate wurden von nur einem Operateur inseriert. Alle Patienten

unterlagen derselben Operationsvorbereitung.

Vor Beginn der Operation wurde die Mundhöhle mit 0,2%iger Chlorhexidinlösung (DYNEXAN PROAKTIV® 0,2% CHX, Chemische Fabrik Kreussler & Co. GmbH, Wiesbaden, Deutschland) zur Keimreduktion gespült. Zur lokalen Schmerzausschaltung im Operationsgebiet wurde ein Lokalanästhetikum mit Vasokonstriktor (Ultracain® D-S 1:200.000, 1,7 ml, Hoechst Marion Roussel, Deutschland GmbH, Frankfurt am Main, Deutschland) lokal injiziert. Zur prophylaktischen Gabe von Antibiotika (Chemoprävention) wurde eine Stunde vor Eingriff Amoxicillin (Erwachsene: 1,0 g, AMOXICILLIN ratiopharm®) und bei bestehender Allergie gegen Penicillin Clindamycin (Erwachsene: 600 mg, Clindamycin- ratiopharm®) oral verabreicht.

Alle Implantationen wurden nach den Operationsprotokollen des Herstellers durchgeführt. Nach Anästhesie im Operationsgebiet wurde ein krestaler Schnitt mit jeweils bukkalem und oralem Mukoperiostlappen durchgeführt.

### **Klassische Aufbereitung**

- (1) Durch eine krestale Schnittführung und die Bildung eines vollen Lappens wurde der Kieferkamm von Weichgewebe befreit.
- (2) Die erste Pilotbohrung bei 800U/min und geringem axialem Druck bis zur Länge von 9,5mm mit einem 2mm Bohrer (VECTODrill Pilotbohrer® Thommen Medical AG, Grenchen, Schweiz). Die Pilotbohrung definierte die Achse und die Bohrposition. Sie sichert außerdem die Bohrposition und verhindert ein Abgleiten des nächsten Bohrers. Die Ankörnung mit einem Rosenbohrer entfällt bei diesem System. Nach der Pilotbohrung wurden nacheinander ein 2,8mm Spiralbohrer und ein 3,6mm Spiralbohrer aus Keramik (VECTODrill® Thommen Medical AG, Grenchen, Schweiz) zur Implantatbettoberweiterung verwendet.
- (3) Vor Insertion wurde die Implantatoberfläche mit dem vom Hersteller entwickelten System (APLIQUIQ® Thommen Medical AG, Grenchen, Schweiz) konditioniert. Die Implantatinsertion erfolgte sowohl mit dem

maschinellen und dem konventionellen Eindrehinstrument. Die Implantatschulter von denen in dieser Studie verwendeten Implantaten musste kreisförmig positioniert werden.

- (4) Nach Insertion wurde die Primärstabilität mittels Resonanz-Frequenz-Analyse ermittelt. Danach wurde der Gingivaformer mit einem Schraubendreher und einem maximalen Drehmoment von 10N/cm festgezogen. Anschließend wurde die Gingiva spannungsfrei mit Einzelknopf- oder Rückstich-Nähten (Premilene® 5/0, B/Braun Aesculap, Tuttlingen, Deutschland) primär verschlossen.

### **Piezochirurgische Aufbereitung**

Bei der Aufbereitung mit der piezochirurgischen Methode wurde bis zur Darstellung des Kieferkammes exakt gleich vorgegangen.

- (1) Die erste Bohrung erfolgte mit einer konischen Pilotfräse (IM1S® mectron) mit einem maximalen Durchmesser von 2mm für die initiale richtungsgebende Osteotomie. Die Bohrung erfolgt auf die Länge des Implantates.
- (2) Die darauffolgende Fräse (IM2® mectron) erweitert die Osteotomie auf einen Durchmesser von 2mm. Anschließend wird nur die kreisförmige Kortikale und deren Konzentrität mit der nächsten Fräse (IP2-3® mectron) optimiert.
- (3) Zum erneuten Erweitern des Implantatbettes dient das nächste Instrument (IM3® mectron). Das Instrument (P3-4® mectron) dient zur erneuten Optimierung der Konzentrität des kreisförmigen Anteils.
- (4) Zur abschließenden Implantatbetterweiterung wird das Instrument (IM3.4® mectron) verwendet. Alle Instrumente, bis auf die zur kreisförmigen Erweiterung, werden bis zur Implantatlänge inseriert.



### 3.2.7 Datenauswertung

#### Allgemeiner Untersuchungsablauf der Studie

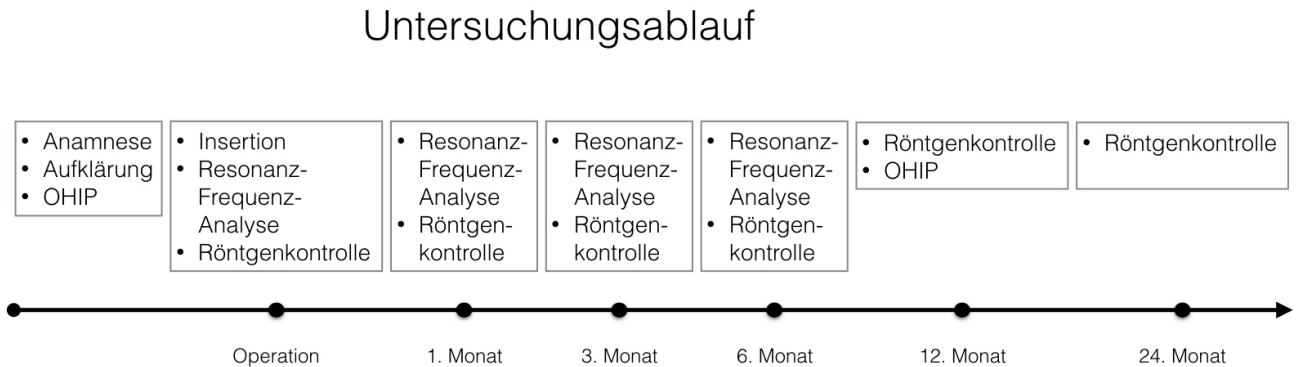


Abbildung 3.5 Zeitlicher Ablauf der Studie

#### Nachuntersuchung der Osseointegration

- (1) Die Implantatstabilität wurde mit der Resonanz Frequenz Analyse gemessen. Hier wurde das Gerät ISQ (OSSTELL® Göteborg, Schweden) verwendet. Der für die Messung verwendete Sensor SmartPeg® stammt von dem gleichen Hersteller.
- (2) Alle Patienten wurden direkt nach Implantation sowie nach ein, drei und sechs Monaten danach auf Osseointegration der jeweiligen Implantate kontrolliert. Für die Ermittlung der Implantatstabilität wurde die Resonanz Frequenz Analyse genutzt. Das verwendete System bestand aus einem Sensor (SmartPeg®, Ostell, Göteborg Schweden), der durch ein Gewinde auf dem Implantat befestigt wird.
- (3) Der Sensor wird über einen Magnetimpuls, der von der Messsonde im Handinstrument ausgegeben wird, angesprochen. Die Resonanzfrequenz, die als Messgröße für die Implantatstabilität gilt, wird aus dem Antwortsignal errechnet. Die Ergebnisse werden als „Implant Stability Quotient“ (ISQ; Implantatstabilitätsquotient) im Bereich von 1 bis 100 angezeigt. Die Höhe des Werts kann Aufschluss über die Osseointegration des Implantats geben. Je höher der Wert, desto größer ist die primäre oder sekundäre Stabilität.
- (4) Bei jeder Messung wurden zwei Werte ermittelt. Der Mittelwert der

Messungen aus mesiolingualer und distobukkaler Richtung ergaben jeweils den verwendeten Wert.



**Abbildung 3.6** Messgerät zur Resonanzfrequenzanalyse, Ostell ISQ (Quelle: Web. URL: [https://www.osstell.com/wp-content/uploads/2015/03/Ostell-instrument-03\\_h.jpg](https://www.osstell.com/wp-content/uploads/2015/03/Ostell-instrument-03_h.jpg), 23.02.2018)

### Röntgenologische Nachuntersuchung

- Um die Knochenresorption am eingeeheilten Implantat zu beurteilen, wurden am Tag der Insertion sowie ein, drei, sechs, zwölf und 24 Monate danach ein standardisierter Zahnfilm angefertigt. Es wurde jedes Mal der bei der Implantation hergestellte Sensorhalter mit individuellem Aufbiss verwendet, um eine gleichbleibende Filmposition sowie Tubuseinstellung zu gewährleisten.
- Bei den weitgehend orthoradial belichteten Zahnfilmen wurde das periimplantäre Knochenniveau vermessen. Referenzpunkte waren das distale

und mesiale Knochenniveau, sowie die Implantatschulter. Die Messungen der Zahnfilme wurden mit dem OpenSource Programm „ImageJ“ vermessen. ImageJ ist ein öffentlich zugängliches Java-Bildverarbeitungsprogramm. Die räumliche Kalibrierung wurde über den konstanten Implantatdurchmesser sowie dessen Länge realisiert und für jedes einzelne Röntgenbild neu kalibriert, um reale Maße in Maßeinheiten wie Millimetern zur Verfügung zu stellen. Abb. 3.7 Zeigt das Implantat in Regio 37 direkt nach der Insertion. Abb. 3.8 mit demselben Implantat 3 Monate nach Insertion.



**Abbildung 3.7** Implantat Regio 37 direkt nach Insertion



**Abbildung 3.8** Implantat Regio 37 drei Monate nach Implantation

### **Patientenbefragung**

Der Patientenfragebogen OHIP G-14 mit subjektiven prae- und postoperativen Bewertung der einzelnen Patienten wurde jeweils vor der Operation und nach der ersten Kontrolle nach Einsetzen der prothetischen Versorgung von den Patienten anonym ausgefüllt.

Die Fragen des in dieser Studie verwendeten Fragebogens OHIP G-14 erfassen nur negative Aspekte der oralen Mundgesundheit. Sie beziehen sich auf einen individuell festgelegten Zeitraum.

Antworten über die Häufigkeit der aufgetretenen Probleme werden auf einer ordinalen Skala mit den Abstufungen „nie“=0, „kaum“=1, „ab und zu“=2, „oft“=3 und „sehr oft“=4 wiedergegeben.

Ist die Differenz einer negativer Wert trat eine Verbesserung ein, war er positiv trat eine Verschlechterung ein.

# OHIP-G 14

## – Fragebogen zur mundgesundheitsbezogenen Lebensqualität –

Bitte prüfen Sie für jede der folgenden Aussagen, wie sehr die beschriebene Situation für Sie persönlich zutrifft. Kreuzen Sie bitte für jede Aussage eine Zahl an.

<b>Hatten Sie im vergangenen Monat aufgrund von Problemen mit Ihren Zähnen, im Mundbereich oder mit Ihrem Zahnersatz ...</b>	<b>sehr oft</b>	<b>oft</b>	<b>ab und zu</b>	<b>kaum</b>	<b>nie</b>
Schwierigkeiten bestimmte Worte auszusprechen? .....	4	3	2	1	0
das Gefühl, Ihr Geschmackssinn war beeinträchtigt?.....	4	3	2	1	0
den Eindruck, dass Ihr Leben ganz allgemein weniger zufriedenstellend war?.....	4	3	2	1	0
Schwierigkeiten zu entspannen?.....	4	3	2	1	0

<b>Ist es im vergangenen Monat aufgrund von Problemen mit Ihren Zähnen, im Mundbereich oder mit Ihrem Zahnersatz vorgekommen, ...</b>	<b>sehr oft</b>	<b>oft</b>	<b>ab und zu</b>	<b>kaum</b>	<b>nie</b>
dass Sie sich angespannt gefühlt haben? .....	4	3	2	1	0
dass Sie Ihre Mahlzeiten unterbrechen mussten?.....	4	3	2	1	0
dass es Ihnen unangenehm war, bestimmte Nahrungsmittel zu essen?	4	3	2	1	0
dass Sie anderen Menschen gegenüber eher reizbar gewesen sind?.....	4	3	2	1	0
dass es Ihnen schwergefallen ist, Ihren alltäglichen Beschäftigungen nachzugehen?.....	4	3	2	1	0
dass Sie vollkommen unfähig waren, etwas zu tun?.....	4	3	2	1	0
dass Sie sich ein wenig verlegen gefühlt haben?.....	4	3	2	1	0
dass Ihre Ernährung unbefriedigend gewesen ist? .....	4	3	2	1	0

<b>Hatten Sie im vergangenen Monat ...</b>	<b>sehr oft</b>	<b>oft</b>	<b>ab und zu</b>	<b>kaum</b>	<b>nie</b>
Schmerzen im Mundbereich?.....	4	3	2	1	0
ein Gefühl der Unsicherheit in Zusammenhang mit Ihren Zähnen, Ihrem Mund oder Ihrem Zahnersatz?.....	4	3	2	1	0

**Vielen Dank!**

© Gestaltung: IDZ, 2005

Abbildung 3.9 OHIP G-14 Fragebogen

### 3.2.8 Statistische Untersuchung

Die statistische Analyse wurde mithilfe des Programmes IBM SPSS Statistic 23 (IBM Deutschland GmbH, Ehningen, Deutschland) durchgeführt. Die Stichprobenumfangsplanung, Teststärke sowie Effektstärke wurden mit dem Programm G\*Power (Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, Deutschland) durchgeführt.

Anhand einer ähnlichen Studie von Stacchi et al. (65) wurde mit einer statistischen Aussagekraft von 80 sowie  $\alpha = 0,05$  eine Fallzahl von 24 ermittelt, da nicht, wie in der o.g. Studie in nur in einem Kiefer, sondern in Beiden untersucht wurde. Um den Fall eines möglichen Drop-Outs zu kompensieren wurde die Studie mit einer Fallzahl von 25 begonnen.

Die deskriptive Statistik beinhaltet die absoluten und relativen Häufigkeiten für kategoriale Variablen und Mittelwerte und die Standardabweichung für kontinuierliche Variablen. Die primären Variablen für den letztendlichen Erfolg der Einheilung in beiden Gruppen waren:

- Die Höhe und der Verlauf der Implantatstabilität
- Verlauf des periimplantäre Knochenniveaus

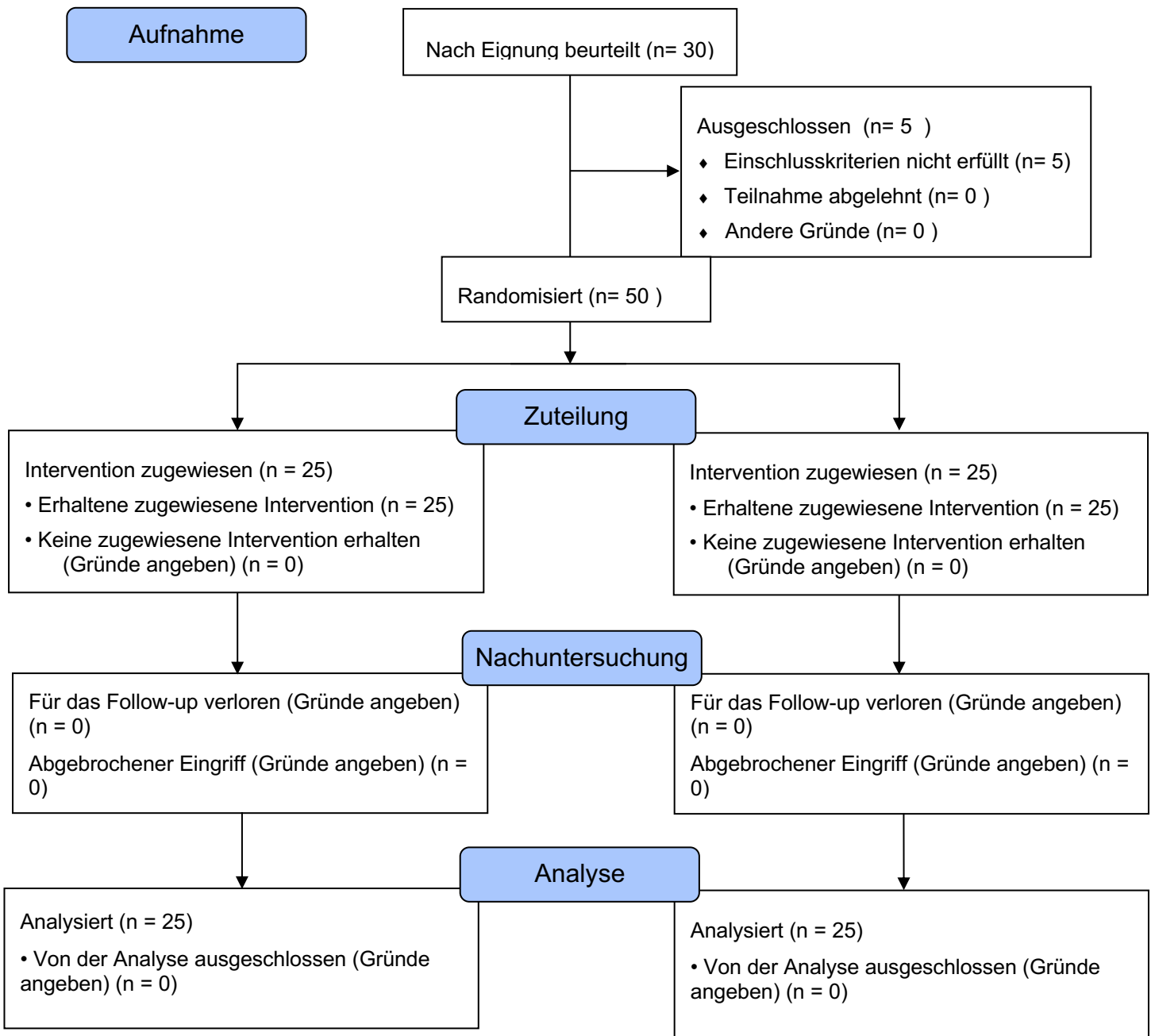
Sekundäre Variablen waren:

- Einflüsse der Gingivadicke und der Aufbereitungsmethode auf das Knochenniveau
- Subjektiver Patientenfragebogen

Die Auswertung der Differenzen beider Gruppen wurde mit Hilfe des Mann-Whitney-U Tests, der Fridman Varianz Analyse, T-Tests, Bonferony-, Levene- und Tukey Tests durchgeführt. P-Werte kleiner als 0,05 wurden als signifikant angesehen. Für die Auswertung der sekundären Variablen wurde eine explorative Datenanalyse gewählt, die p-Werte wurden hier miterfasst.

4. Ergebnisse

**CONSORT Flow Diagram**



4.1 Probanden

An der Studie beteiligten sich 30 Patienten die auf ihre Eignung für diese Studie untersucht wurden. Fünfundzwanzig Teilnehmer erfüllten alle Ein- und Ausschlusskriterien und unterschrieben die Einverständniserklärung. Anschließend wurde in einem Zufallsverfahren der Operationlocus jeweils einer Versuchsgruppe zugeteilt den nur der Operateur kannte. Alle Versuchsteilnehmer (n=25) standen ein Jahr, bis zum Abschluss der klinischen Studie für alle Termine zu Verfügung. Dadurch lag von jedem Teilnehmer bis zum Ende der Studie ein vollständiger Datensatz vor. Insgesamt wurden 50 Implantate inseriert, jeweils 24 Implantate in den Oberkiefer und 26 Implantate in den Unterkiefer.

Nach der randomisierten Zuteilung der Implantationsloci zu einem der beiden Aufbereitungsverfahren wurde der operative Eingriff in den gewählten Regionen vorgenommen. Am häufigsten wurde in der Region des ersten Molaren implantiert. Die genaue Implantatverteilung ist aus Tabelle 4.1 zu entnehmen.

0,0 %	2,0%	14,0%	6,0%	4,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	4,0%	12,0%	6,0%	0,0%
0	1	7	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	6	3	0
<b>18</b>	<b>17</b>	<b>16</b>	<b>15</b>	<b>14</b>	<b>13</b>	<b>12</b>	<b>11</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>25</b>	<b>26</b>	<b>27</b>	<b>28</b>	
<b>48</b>	<b>47</b>	<b>46</b>	<b>45</b>	<b>44</b>	<b>43</b>	<b>42</b>	<b>41</b>	<b>31</b>	<b>32</b>	<b>33</b>	<b>34</b>	<b>35</b>	<b>36</b>	<b>37</b>	<b>38</b>	
0	5	8	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	7	3	0	
0,0%	10,0%	16,0%	2,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	4,0%	14,0%	6,0%	0,0%	

**Tabelle 4.1** Implantatverteilung im Ober- (n = 24) und Unterkiefer (n = 26)



### 4.2 Klinische Messwerte

Insgesamt wurden 50 Implantate inseriert. Das Inserieren der Implantate wurde bei allen Patienten komplikationslos durchgeführt. ISQ-Werte, Dauer der Aufbereitung und die krestale Gingivadicke wurden dokumentiert. Für keinen der Patienten entstanden während und nach den chirurgischen Eingriffen, sowie bei den Messungen, Unannehmlichkeiten. Die folgende statistische Auswertung betrifft diejenigen Patienten, von denen alle Werte nebst der Implantation und der sechs – Monatsmessung erfasst werden konnten (n = 25). Einen Monat nach dem operativen Eingriff gaben alle Probanden an, keine Beschwerden oder Schmerzen im Operationsgebiet gehabt zu haben. Nach drei und sechs Monaten waren alle Patienten absolut beschwerdefrei. Die Probanden wurden von einem Doktoranden und einem Zahnarzt jeweils zwei Jahre lang nachuntersucht. Alle Probanden erschienen zu ihren vereinbarten Terminen. Bei der endgültigen Auswertung der Werte wurden alle Patienten berücksichtigt, bei denen über den Zeitraum der Untersuchungen alle Ergebnisse korrekt erhoben werden konnten.

#### 4.2.1 Implantatstabilitäten (ISQ)

Der mittlere ISQ in der Baseline-Messung betrug:

- $70,98 \pm 10,3$  in der piezoelektrischen Gruppe
- $70,82 \pm 9,20$  in der klassischen Aufbereitung Gruppe

Die erste Messung nach der Operation fand in der ersten Phase des Bone-Remodeling, nach einem Monat statt. Zu diesem Zeitpunkt war die Wundheilung der Schleimhaut abgeschlossen.

Im Laufe der nächsten Recallsitzungen, die drei und sechs Monate nach Operation stattfanden, nach anfänglicher Abnahme, konnte eine fortlaufende, stetige Zunahme der Stabilitäten gemessen werden.

## Ergebnisse

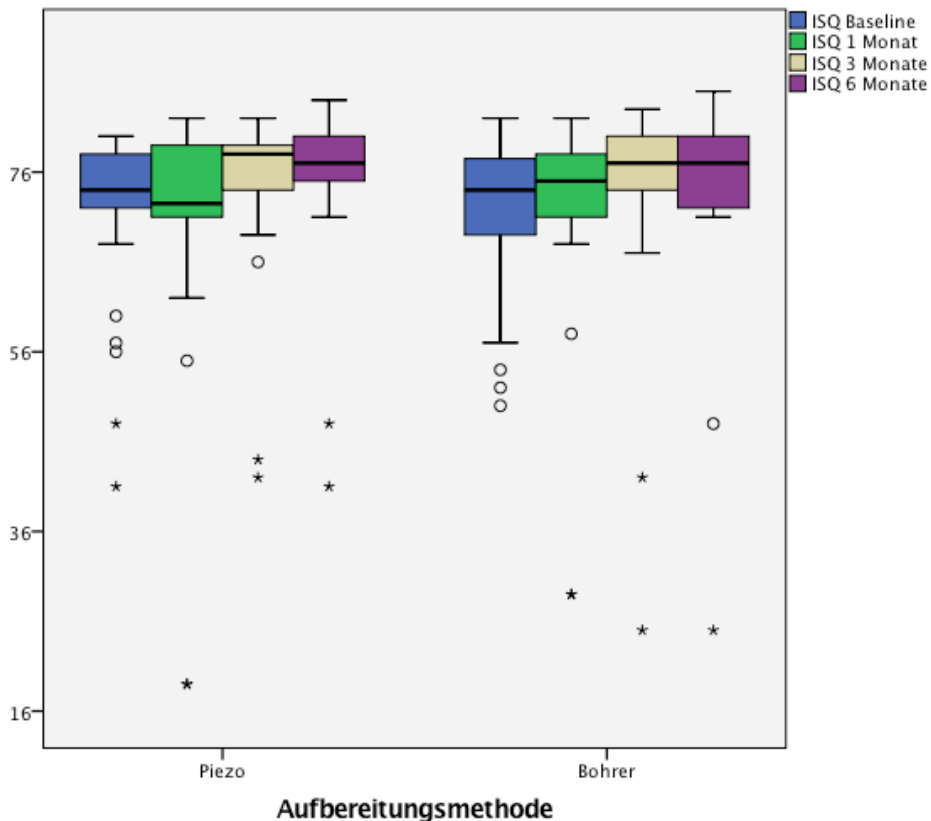
Die mittlere Implantatstabilität nach der finalen Messung nach sechs Monaten betrug:

- 74,92 ± 9,70 in der piezoelektrischen Gruppe
- 74,52 ± 12,6 in der klassischen Aufbereitung Gruppe

	<b>Bohrer</b>	<b>Piezoelektrisch</b>	<i>P</i> -value differences between techniques (Wilcoxon)
<b>Zeitpunkt</b>	Mean (SD)	Mean (SD)	
Baseline	70,82 ± 9,20	70,98 ± 10,3	0,771
1 Monat	70,68 ± 13,4	69,04 ± 16,2	0,823
3 Monate	73,40 ± 12,8	73,96 ± 10,1	0,930
6 Monate	74,52 ± 12,6	74,92 ± 9,70	0,690

**Tabelle 4.2** Mittelwerte, Standardabweichung und Signifikanzwerte der durchschnittlichen Implantatstabilität

Wie man der oberen Tabelle entnehmen kann, haben sich die Implantatstabilitäten geringfügig unterschieden, wobei bei der piezochirurgischen Aufbereitung die sekundäre Stabilität kurzfristig stärker abnahm.



**Abbildung 4.1** Mittelwert ± Standardabweichung. Änderung der Implantatstabilitäten innerhalb von sechs Monaten der piezochirurgischen Aufbereitung und der klassischen Aufbereitung.

Die Implantatstabilität weist innerhalb der beiden Gruppen zu jedem der gemessenen Zeitpunkte gemessen von der Baseline sowie in der Gesamtheit keinen signifikanten Unterschied auf. Der Vergleich der klinischen Messwerte nach 6 Monaten beider Aufbereitungsarten ergab keinen statistisch signifikanten Unterschied ( $p = 0,690$ ).

#### 4.2.2 Das Knochenniveau

Die postoperativ gemessenen Werte des Knochenniveaus hatten in beiden Gruppen stabile Werte. Die gemessenen Werte beinhalten den maschinieren Anteil des Implantates von 0,4mm.

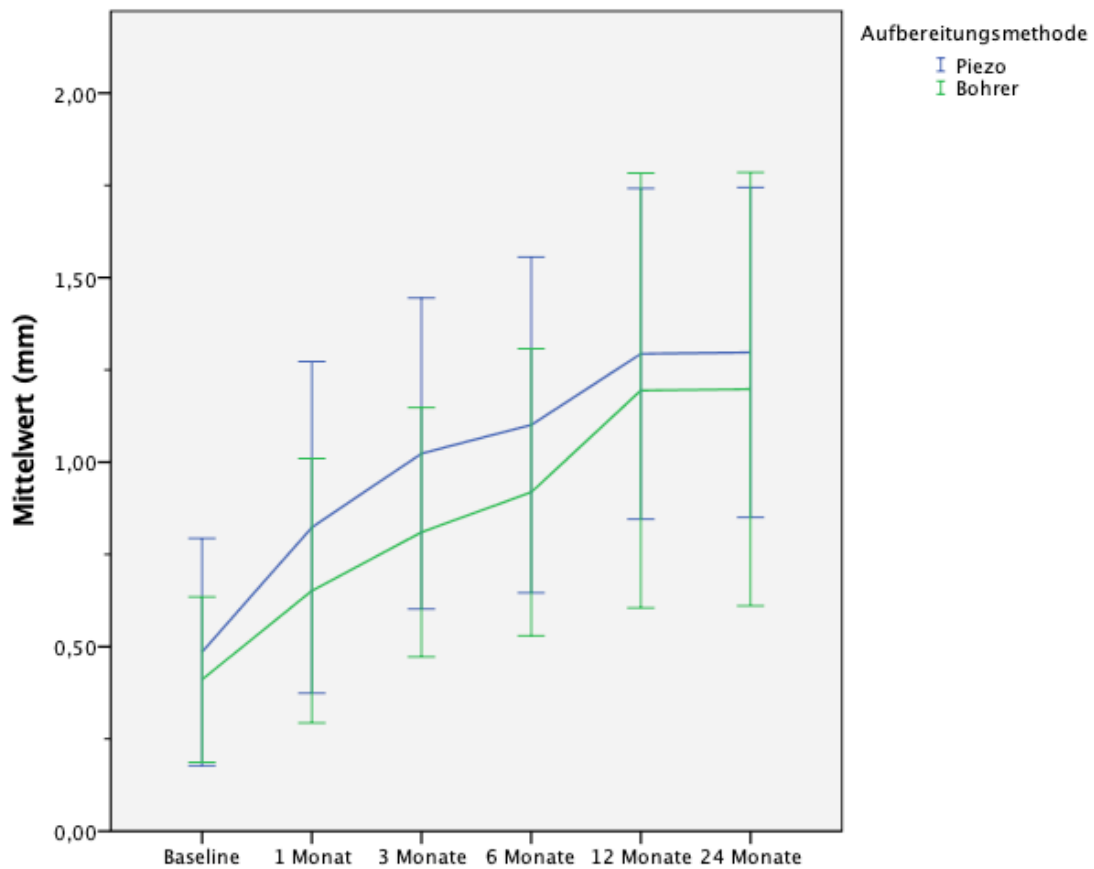
Das mittlere Knochenniveau nach 24 Monaten gemessen vom obersten Anteil des Implantates bis zum krestalen Knochen betragen:

- $1,30 \pm 0,45$  mm in der piezoelektrischen Gruppe
- $1,20 \pm 0,58$  mm in der klassischen Aufbereitung Gruppe

	<b>Bohrer</b>	<b>Piezoelektrisch</b>	
<b>Zeitpunkt</b>	Mean (SD)	Mean (SD)	<i>P</i> -Wert
Baseline	0,41± 0,22	0,48 ± 0,30	0,332
1 Monat	0,65 ± 0,35	0,82 ± 0,44	0,142
3 Monate	0,81 ± 0,33	1,02 ± 0,42	0,055
6 Monate	0,91 ± 0,38	1,10 ± 0,45	0,134
12 Monate	1,19 ± 0,58	1,29 ± 0,44	0,505
24 Monate	1,20 ± 0,58	1,30 ± 0,45	0,503

**Tabelle 4.4** Mittelwert ± Standardabweichung. Änderung des Knochenniveaus innerhalb von 24 Monaten der piezochirurgischen Aufbereitung und der klassischen Aufbereitung.

Das Niveau des Knochens um das Implantat erreichte im Verlauf der Studie, innerhalb der jeweiligen Gruppen sowie innerhalb des Verfahrens keinen statistisch signifikanten Unterschied.



**Abbildung 4.2** Verlauf des Knochenniveaus der klassischen und der piezochirurgischen Aufbereitung innerhalb des Untersuchungszeitraums von 24 Monaten

### 4.2.3 Aufbereitungszeitraum

Insgesamt konnte eine mittlere Aufbereitungszeit in Sekunden der beiden unterschiedlichen Methoden während der operativen Aufbereitungsphase von

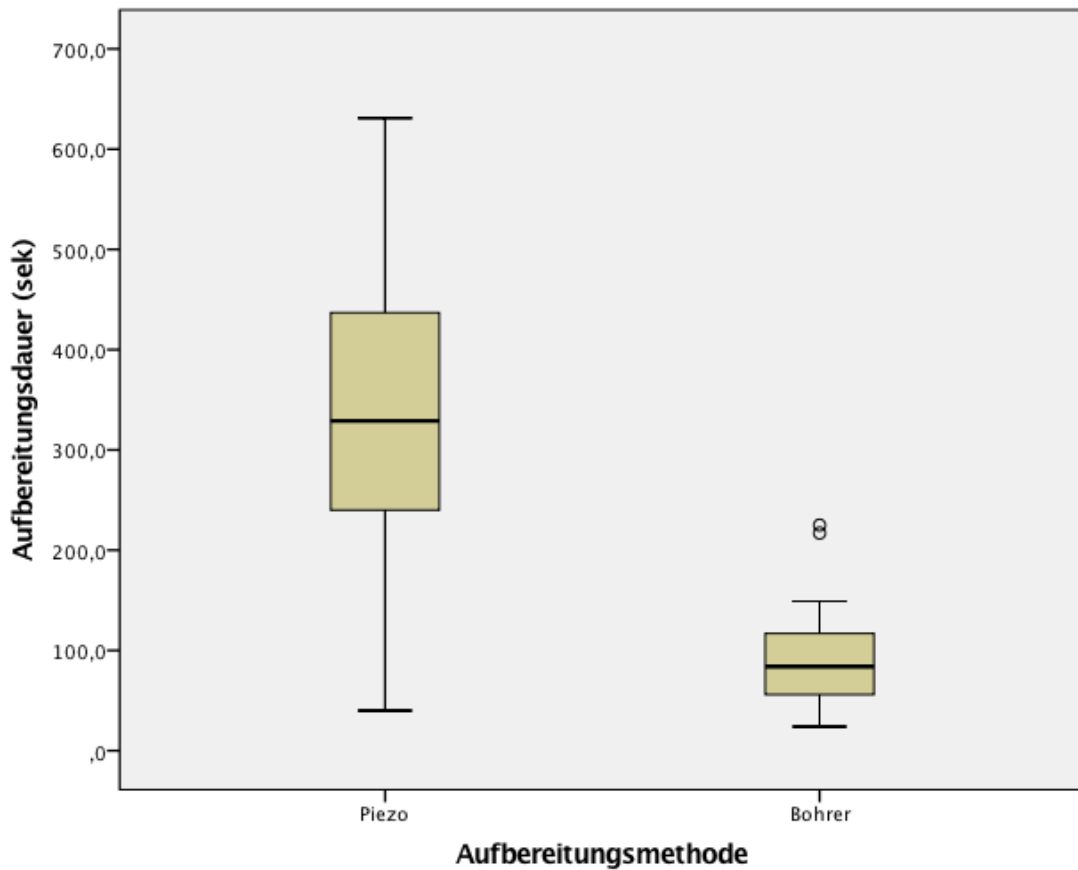
- 329 Sekunden in der Piezo-Gruppe
- 92 Sekunden in der Bohrer-Gruppe

beobachtet werden.

## Ergebnisse

	<b>Bohrer</b>	<b>Piezoelektrisch</b>	
<b>Zeitpunkt</b>	Mean (SD)	Mean (SD)	<i>P</i> - Wert (Wilcoxon)
Baseline	92,640 ± 10,52	329,440 ± 26,93	0,000

**Tabelle 4.5** Mittelwert der Aufbereitungszeit nach Art der Methode



**Abbildung 4.3** Box-Plot Darstellung der mittleren Aufbereitungsdauer nach Methode

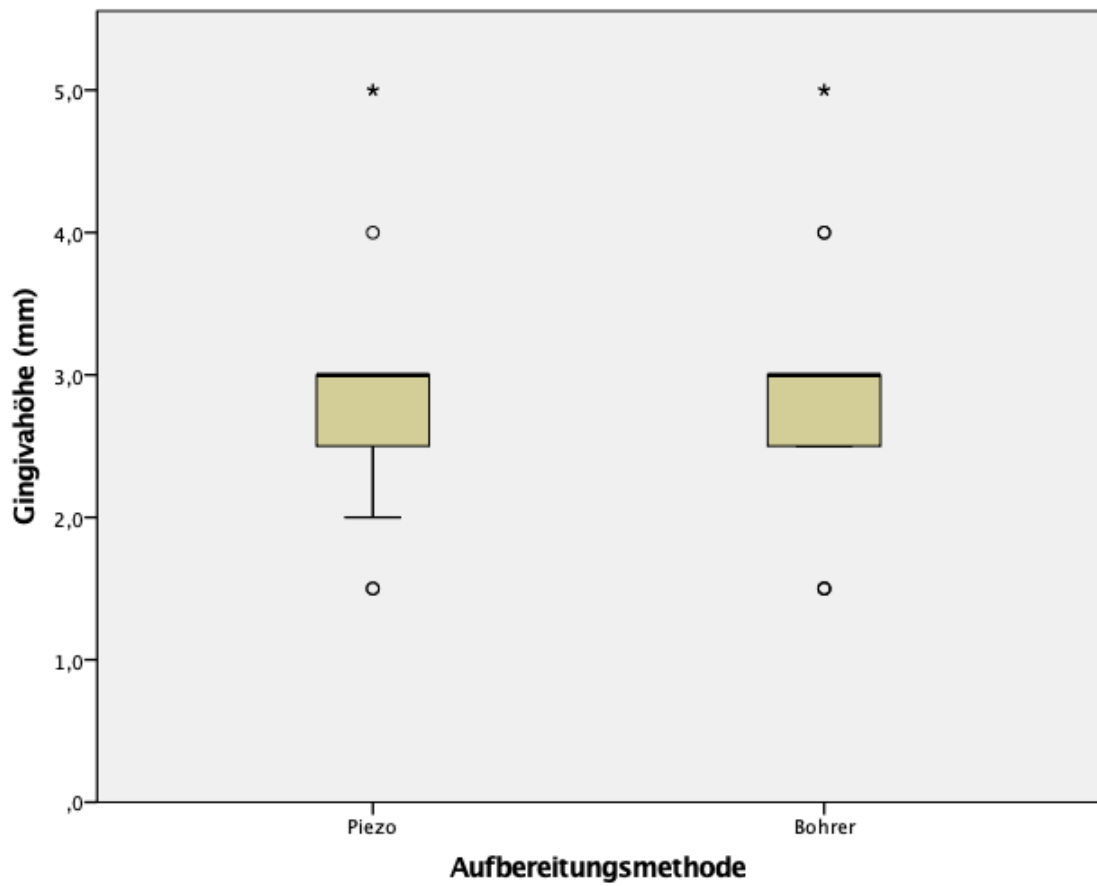
### 4.2.4 Breite der Gingiva

Insgesamt wurden klinische Messwerte bei der Breite der keratinisierten Gingiva von im Mittelwert liegenden 2,940 mm gemessen.

**Gingivahöhe**

	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
Gingivahöhe	50	1,5	5,0	2,940	,8369

**Tabelle 4.6** Deskriptiven Werte der mittleren Gingivadicke



**Abbildung 4.4** Verteilung der mittleren Gingivadicke nach Testgruppen

#### 4.2.5 Mundgesundheits

Der Fragebogen enthält verschiedene Entscheidungsfragen, deren Häufigkeitsverteilung in der nachfolgenden Tabelle dargestellt sind. Des Weiteren konnten die Studienteilnehmer ihre persönliche Einschätzung und Bewertung des Therapieerfolges bewerten.

**OHIP Auswertung**

	Prae	Post	dif	p-Wert
n	16	16	16	
Mittelwert	2,75 ± 3,58	1,50 ± 2,81	-1,25 ± 2,11	0,032
Summe	44	24	-20	

**Tabelle 4.7** Mittlere Werte des OHIP Fragebogens sowie Signifikanz

Veränderung der Selbsteinschätzung der Mundgesundheits $\Delta$	Anzahl der Patienten n (%)	OHIP Differenz (Resultat)
-8	1 (6,3)	> Abnahme der Probleme
-4	1 (6,3)	> Abnahme der Probleme
-2	2 (12,5)	> Abnahme der Probleme
-1	4 (25)	> Abnahme der Probleme
0	4 (50)	Konstanz der Mundgesundheits

**Tabelle 4.8** Ergebnisse der OHIP Auswertung in Prozent und totaler Anzahl

#### 4.3 Klinische Ergebnisse

Die nachfolgenden klinischen Ergebnisse beschreiben die gemessenen Veränderungen nach sechs, zwölf und 24 Monaten, die an den Implantaten und dem umliegenden Gewebe gemessen wurden.

### a) Zunahme der Implantatstabilitäten

In beiden Gruppen war ein Gewinn an der Implantatstabilität zu erkennen. Der Wert erreichte nach sechs Monaten:

- $3,94 \pm 10,54$  bei der piezochirurgischen Methode
- $3,70 \pm 10,31$  bei der klassischen Methode



### 5. Diskussion

Die in dieser Studie erlangten Ergebnisse zur Implantatbettpräparation, zum einen durch die konventionelle und zum anderen durch die piezochirurgische Aufbereitung, erzielten sehr zufriedenstellende Ergebnisse. Nachfolgend umfasst der Abschnitt die Gegenüberstellung beider Techniken, zudem folgt eine Auseinandersetzung mit dem gesamten Studienaufbau.

Nach unserem besten Wissen, ist keine Studie vorhanden, die den Verlauf des Knochenniveaus um das Implantat über 24 Monate untersucht hat.

Durch die Einführung der Piezo-Chirurgie in die Zahnheilkunde wurde es ermöglicht, neue Arten der Implantatbettpräparation anzuwenden. Im Vergleich zur Knochenheilung bei klassisch verwendeten Spiralbohrungen wurde hier vermutet, dass die Aufbereitung des Implantatbettes mittels Piezo-Chirurgie eine schnellere Osseointegration und damit eine Verbesserung der periimplantären Knochens führen würde. Nach diesen vorläufigen Annahmen bestand das Ziel der klinischen Studie darin, die Implantatstabilität während der Osseointegration unter Verwendung von Resonanzfrequenzanalyse, periimplantärem, radiologischem marginalem Knochenverlust und der Einfluss der Schleimhautbreite zu evaluieren. So sollten Veränderungen in der Stabilität und Einheilung von Implantaten evaluiert werden, deren Implantatbetten mittels ultraschall- und rotationschirurgischen Instrumenten vorbereitet wurden.

In dieser Studie wurde versucht, alle Faktoren, welche die primäre Stabilität beeinflussen zu minimieren (48), um sich auf die Einflüsse der chirurgischen Technik zu beschränken. Es wurden Implantate verwendet, die in den Parametern Durchmesser, Länge, Makro- und Mikrotopographie identisch waren. Zudem besaßen alle Implantate eine bioaktive Oberfläche, die eine Knochenbildung fördern sollte (66,67). Als chirurgische Lokation wurden die Seitenzahnbereiche im Ober- und Unterkiefer ausgewählt. Die Operationstechniken wurden so weit wie möglich standardisiert, um subjektive Endergebnisse zu minimieren (Einzeloperator, sowie gleicher Enddurchmesser der Implantatbohrungen in beiden Gruppen).

### **Implantatstabilitäten**

Die Resonanzfrequenzanalyse wurde als nichtinvasiv und zuverlässig ausgewählt, um Schwankungen in der Stabilität zu verhindern (45,48).

Die Stabilitätsmessungen der Resonanzfrequenzanalyse stehen in direktem Zusammenhang mit der Implantatstabilität im umgebenden Knochen: Während der Einheilung spiegelt eine Erhöhung der ISQ-Werte vermutlich eine neue Knochenapposition an der Implantat-Knochen-Grenzfläche wieder. Mittlere ISQ-Werte beider Gruppen, die in dieser Studie zum Zeitpunkt der Implantatinsertion und nach 90 Tagen registriert wurden, stimmen mit anderen klinischen Studien überein, die mit baugleichen Implantaten verschiedener Hersteller durchgeführt wurden (54,56,65,68–71).

Die Implantatstabilität der Testgruppe, beginnend bei der Baseline, nahm während der ersten Heilungsphase ab. Viele Studien zeigen, dass Knochenmodellierung und Remodellierung in der Nähe der Implantatoberfläche zu einer Abnahme der ISQ-Werte innerhalb der ersten drei Wochen führen kann (72–75). Diese Erkenntnisse weisen auf das Vorhandensein eines Intervalls zwischen der primären und sekundären Stabilität hin, währenddessen die Mobilität des Implantats zunehmen kann. Abrahamsson hat bei der Untersuchung von Wundheilungsphasen um Zahnimplantate gezeigt, dass im Bereich der Implantatgewinde mit primärer mechanischer Stabilität durch Knochenresorptionsprozesse eine Osseointegration auftritt, die die mechanische Stabilität kurzzeitig gefährden kann. Der Übergang von abnehmender zu steigender Implantatstabilität deutet auf eine Veränderung des Knochenmetabolismus von überwiegend resorptiv zu vorwiegend appositionellem Wachstum hin (73).

Die ISQ-Werte in der vorliegenden Studie zeigten auch einen geringen Verlust nach ca. 30 Tagen, wie Beobachtungen einer Reihe anderer klinischer Studien, die mit der herkömmlichen Präparation durchgeführt wurden (56,68,73–75).

Darüber hinaus unterschieden sich die Veränderungen der ISQ-Werte während der gesamten Beobachtungszeit in beiden Gruppen nicht signifikant. Mit anderen Worten, Unterschiede in der Implantatstabilität zwischen den beiden Gruppen sind statistisch nicht signifikant für den gesamte Beobachtungszeitraum. Diese Befunde stehen im Einklang mit der durchgeführten Studie von Stacchi et al (69), die unter Verwendung der Resonanzfrequenzanalyse zeigte, dass weder die piezoelektrische

noch die klassische Implantatbettpräparation zur schnelleren Heilung mit einer höheren Knochendichte und einer verbesserten Osteogenese um Zahnimplantate führt.

Es ist wichtig zu beachten, dass die Ergebnisse dieser Pilotstudie wegen einiger Einschränkungen der vorliegenden Studie sensibel zu bewerten sind. Variablen wie die Operationstechnik, die begrenzte Anzahl der Fälle und die Wahl der Operationsstelle (Ober- und Unterkiefer) müssen bei der Verallgemeinerung dieser Ergebnisse berücksichtigt werden. Darüber hinaus ist noch zu klären, ob ein Stabilitätsunterschied einiger weniger ISQ-Punkte als klinisch relevant angesehen werden kann.

### **Aufbereitungsdauer**

Ähnlich wie in der Studie Sagheb et al. (76) war das klassische Bohrverfahren signifikant schneller als die Piezochirurgie. Im Gegensatz zur piezochirurgischen Aufbereitung, erlaubt die klassische Methode klinisch eine relevante Reduktion der gesamten Operationszeit.

Die für die Implantatbettaufbereitung benötigte Zeit ist in der klinischen Praxis aus wirtschaftlichen Gründen wichtig. Außerdem wurde eine positive Korrelation zwischen einer erhöhten Knochendichte im Unterkiefer und der Notwendigkeit längerer Implantatbettpräparationen gesehen. Es ist jedoch zu beachten, dass piezochirurgische Instrumente im hochdichten kortikalen Knochen eine eingeschränkte Schnitffestigkeit aufweisen können. Folglich muss die Zeit für die notwendige Tiefe für die Implantatinserktion ausgeweitet werden. Eine Perforation eines harten kortikalen Knochens mit einem rotierenden Bohrer vor der piezochirurgischen Aufbereitung würde den Eingriff beschleunigen und gleichzeitig die Vorteile des Einsatzes der Piezomethode nutzen (7,69).

### **Periimplantäres Knochenniveau**

Linkevicius et al. beschrieb 2009 eine höhere periimplantäre krestale Knochenabnahme, wenn die suprakrestale Mukosa  $\leq 2\text{mm}$  war. Auch in unsere Studie wollten wir diese Faktor mit in unsere Untersuchung analysieren. Von den 50 untersuchten Mukosadicken, lagen nur drei Werte mit 1,5 mm unterhalb dieses kritischen Wertes, von daher konnte in der multifaktoriellen Analyse kein Einfluss der Mukosadicke auf den Knochenabbau gezeigt werden.

Da die chirurgische Implantatbettauflbereitung theoretisch in den ersten Phasen der Knochenheilung einen Einfluss haben kann, indem das Trauma am marginalen Knochen minimiert wird, wurden dementsprechend die periimplantären Röntgenaufnahmen in dieser Studie nach der Implantatinserterion, ein, drei, sechs, zwölf und vierundzwanzig Monate danach erstellt, um den Knochenverlust zu berechnen.

Die Ergebnisse des Knochenabbaus nach Art der Aufbereitungsmethode lassen erkennen, dass der Knochenabbau bei der Piezo-Technik in der Baseline nahezu identisch zur klassischen Aufbereitung ist. Bei der Piezo-Technik ist dieser Wert marginal höher. Ab der Messung nach einem Monat liegt die Piezo-Methode mit dem gemessenen Knochenabbau leicht oberhalb der klassischen Aufbereitung (jedoch nicht signifikant). Dies führt sich bis zur Messung nach sechs Monaten fort. Zur Messung nach zwölf Monaten nähert sich der Abbau bei beiden Methoden an, bis er nach 24 Monaten nahezu unverändert ist. Mit Blick auf den Verlauf des periimplantäre Knochenniveaus wurden keine vergleichbaren klinischen Studien gefunden die über 24 Monaten die Knochenmodellierung observiert hat und die Mukosadicke in der Analyse berechnet hat.

Diese Ergebnisse könnten mit den unterschiedlichen Geometrien der Piezoschneider und der eingesetzten Implantate zusammenhängen. Zum einen wies das initiale Piezoinstrument in dieser Studie einen konischen, schmalen Körper und einen breiten Kragen auf. Auf der anderen Seite wurde die Osteotomie der Implantationsregion mit zylindrischen Bohrern durchgeführt. Obwohl die Piezo-Spitzen und die Bohrer mit dem konischen schmalen Körper kalibriert sind, führt die konische Form möglicherweise zu kortikaler Kompressionen und somit Knochenresorption.

In dieser Studie wurde auch der mandibuläre Seitenzahnbereich verwendet. Diese anatomische Zone weist einen breiten kortikalen Knochen auf, der, wenn er zusammengedrückt wird, zu einer Knochenresorption führt. Die klinische Relevanz dieser Kompression wurde wahrscheinlich durch die Breite des kortikalen Knochens hervorgehoben. Um einen solchen negativen Effekt zu verhindern, ist ein minimaler Unterschied zwischen Spitze und Implantat ratsam. Zudem ist die Entfernung von Gingivaformern mit einer zusätzlichen marginalen Knochenresorption um Implantate herum verbunden (77,78). In dieser Studie wurden Gingivaformer sowohl bei Test-

als auch bei Kontrollgruppenimplantaten während des Beobachtungszeitraums mehrmals entfernt, um RFA-Bewertungen zu ermöglichen. Die Wirkung könnte auch die Studienergebnisse zum marginalen Knochenverlust erklären, die mögliche Unterschiede zwischen den beiden Gruppen maskiert haben.

In ähnlicher Weise wurden zwölf Monate nach dem Einsetzen der Suprakonstruktion keine Unterschiede zwischen den Techniken hinsichtlich des Implantatausgangs festgestellt. Vorhandene Studien (65,79,80) berichten über die Präparation von Implantatbetten mittels Piezotechnik sowie hohen Implantatüberlebensraten, die mit denen konventioneller Bohrtechniken zu vergleichen sind. Blus & Szmukler-Moncler (2010) erhielten eine hundertprozentige Überlebensrate für 40 Implantaten, die mittels Piezopräparation vorbereitet wurden und mindestens zwölf Monate lang beobachtet wurden.

Di Alberti et al. (2010) verglichen Ultraschalluntersuchungen im Vergleich zu konventionellem Bohren bei 40 Patienten, die mit mindestens zwei Implantaten in gesunden nativen Knochen behandelt wurden und berichteten von einer 100% Erfolgsrate für Implantate, die mit beiden Techniken platziert wurden. Die Ergebnisse dieser Studie müssen aufgrund einiger Einschränkungen mit Vorsicht bewertet werden. Variablen wie der einzelne Operateur, der alle Operationen durchführt, die begrenzte Stichprobengröße und die Wahl der Operationsstelle müssen bei der Verallgemeinerung dieser Ergebnisse berücksichtigt werden.

### **Schleimhautdicke**

Aus der Analyse zu dem Faktor der Schleimhautdicke, konnte für die Interaktion aus den Messungen der Knochenresorption und der Schleimhautdicke kein signifikanter Nachweis erbracht werden. Dies spricht dafür, dass sich der Effekt der Schleimhautdicken auf den Knochenabbau über die Zeit verändert bzw. unterschiedlich ist. In dieser Studie waren in beiden Testgruppen im Mittel die Gingivabreiten bei 2,94 mm, was der biologischen Breite entspricht.

Im Rahmen dieser Studie kann geschlossen werden, dass die Dicke des vertikalen Schleimhautgewebes ein wichtiger Faktor für die frühe Ätiologie des krestalen Knochenabbaus ist. Wenn während der Implantation dünne Weichgewebe vorhanden waren, war der krestale Knochenverlust am deutlichsten.

Dieser Zusammenhang lässt sich erklären, indem in verschiedenen Studien Implantate in Knochen mit dünnem Weichgewebe eingebracht wurden. In den Tierversuchen wurde das biologische Schema der Knochenresorption aufgrund dünner Weichteile identifiziert. Es wurde gezeigt, dass Weichgewebe in der Umgebung von Implantaten im Vergleich zu Zähnen dicker sind (78).

Das bedeutet, dass um Implantate mehr Gewebe in der Höhe benötigt wird als um Zähne. Um die biologische Breite des darunterliegenden Knochens zu schützen, sowie die Hämostase aufrechtzuerhalten. Außerdem haben Berglundh und Lindhe gezeigt, dass das Ausdünnen des Weichgewebes auf 2 mm oder weniger bei histologischen Proben zu einem höheren Knochenverlust führen kann als bei Implantaten mit einer mittleren Dicke von 3,3 mm (81). Ein indirekter Beweis kann auch in anderen Tierstudien über die Morphogenese von periimplantären Geweben gefunden werden, da die Autoren beobachteten, dass die Bildung einer periimplantären Mukosa einen Verlust des marginalen Knochenlevels beinhaltet (82).

Bei einer weiteren Auswertung der vorliegenden Ergebnisse muss beachtet werden, dass eine wiederholte Abutmentmanipulation, die in dieser Studie mehrmals zur RFA entfernt wurden, gewöhnlich mit einer Störung des etablierten Schleimhautverschlusses verbunden war, was zu einer Erhöhung der periimplantären Knochenreduktion führen kann. Der nachteilige Effekt einer wiederholten Abstoßung der Abutments auf Weichteil- und Weichgewebeniveau stimmt mit früheren und neueren präklinischen Daten überein (78,83).

Die Schleimhautdicke als Faktor für den krestalen Knochenverlust wurde in der Forschung nicht häufig evaluiert. Tatsächlich haben die meisten Studien zum krestalen Knochenverlust die anfängliche Weichgewebsdicke zum Zeitpunkt der Implantatinsertion nicht bewertet. Dies bedeutet, dass die meisten Berichte über Knochenverlustdaten keine genauen Informationen enthalten.

Es sollte betont werden, dass eine Messung der anfänglichen Weichteildicke sehr ratsam sein könnte, wenn sich die Forschung auf die Bewertung des krestalen Knochenverlustes konzentrieren wird.

### 6. Zusammenfassung

**Hintergrund** Die Einführung neuer Möglichkeiten für die Implantatbettpräparation, wie die Piezochirurgie, hat ein Interesse in der Wissenschaft geweckt, dass von verschiedenen Arbeiten dokumentiert wird. Diese Technik begünstigt eine Knochendichteverbesserung im Vergleich zur klassischen Technik. Vergleicht man die konventionelle Technik mit der Piezochirurgie kommt man zu der Frage ob sich ein möglicher Effekt der Ultraschallenergie, auf das Regenerationspotenzial der Körperzellen, wie zum Beispiel der Osteoblasten, positiv auf Stabilität der Implantate auswirken kann.

**Zielsetzung** Ziel dieser klinischen Pilotstudie ist, durch den Vergleich der Piezo-Technik mit der klassischen Aufbereitungsmethode des Implantatbettes eine eventuelle beschleunigte Sekundärstabilität des Implantates durch Aktivierung des Regenerationsprozesses des umliegenden Knochens zu evaluieren. Zudem soll der Einfluss der Schleimhautdicke auf die zirkuläre Knochenresorption um das Implantat beurteilt werden.

**Material und Methoden** Die prospektive Pilotstudie wurde an 25 Patienten durchgeführt. Jeder Patient erhielt zwei Implantate im Ober- oder Unterkiefer. Je ein Standort wurde mit einem konventionellen Bohrer vorbereitet. Der zweite Standort wurde mit sechs aufeinanderfolgenden Ultraschallspitzen (Testgruppe) abgeschlossen. Messungen der Resonanzfrequenzanalyse wurden bei der Implantatinsertion und nach eins, drei und sechs Monaten durchgeführt. Periimplantärer, krestaler Knochenverlust bei Implantation eins, drei, sechs, zwölf und 24 Monate nach Insertion, wurden mit periapikalen Röntgenaufnahmen berechnet. Der Wilcoxon-Test für verwandte Proben wurde verwendet, um Unterschiede in der Implantatstabilität und im periimplantären marginalen Knochenverlust zwischen den beiden Gruppen zu untersuchen.

**Ergebnisse** Nach Ablauf der Studie, zeigten alle Implantate (n=50) eine erfolgreiche Osseointegration (Erfolgsrate 100%). Die Stabilität war in der Kontrollgruppe im ersten Monat höher (ISQ  $70,68 \pm 13,4$ ), als in der Testgruppe ( ISQ  $69,04 \pm 16,2$  ), jedoch nicht signifikant ( $p$ -Wert 0,832). Beide Gruppen zeigten eine leichte Reduktion

des mittleren Stabilitätskoeffizienten im ersten Monat (ISQ-Kontrollgruppe  $-0,14 \pm 4,2$  ISQ-Testgruppe:  $-1,94 \pm 5,9$ ). Der geringste ISQ Wert zeigte sich nach einem Monat in der Testgruppe (ISQ 19) und nach drei Monaten in der Kontrollgruppe (ISQ 25). Im gesamten Beobachtungszeitraum zeigten sich keine signifikanten Unterschiede in der Implantatstabilität ( $p$ -Werte  $> 0,690$ ). Das mittlere Knocheniveau nach 24 Monaten betrug  $1,30 \pm 0,45\text{mm}$  in der Testgruppe und  $1,20 \text{ mm} \pm 0,58$  in der Kontrollgruppe. Es zeigte sich in der Analyse keine signifikanten Unterschiede zwischen den Messungen des periimplantären Knochenabbaus ( $p$ -Werte  $> 0,055$ ).

**Schlussfolgerung** Innerhalb der Grenzen dieser Pilotstudie konnte kein zusätzlicher Benefit durch die Verwendung der Piezo-Osteotomie verzeichnet werden. Des Weiteren zeigte sich, dass die vertikale Dicke im suprakrestalen Bereich, überhalb des Implantates, positiv auf den periimplantären Knochen auswirkt. Weitere Studien mit größerer Patientenzahl sind notwendig um die Erkenntnisse unsere Pilotstudie zu bestätigen.



7. Literaturverzeichnis

1. Abraham CM. A brief historical perspective on dental implants, their surface coatings and treatments. *Open Dent J.* 2014;8:50–5.
2. Linkow LI, Dorfman JD. Implantology in dentistry. A brief historical perspective. *N Y State Dent J.* 1991;57(6):31–5.
3. Linkow. *The Legends of Implant Dentistry with The History of Transplantology and Implantology.* Jp Medical Ltd; 2010. 336 p.
4. Branemark PI, Adell R, Breine U, Hansson BO, Lindstrom J, Ohlsson A. Intra-osseous anchorage of dental prostheses. I. Experimental studies. *Scand J Plast Reconstr Surg.* 1969/01/01. 1969;3(2):81–100.
5. Albrektsson T, Wennerberg A. The impact of oral implants - past and future. Vol. 71, *Journal Canadian Dental Association.* 2005. p. 327.
6. Zarb GA. Implants for complete denture therapy. *J Dent Educ.* 1988/12/01. 1988;52(12):721–4.
7. Vercellotti T. *Piezochirurgie in der Zahnmedizin.* Berlin: Quintessence Publishing, Deutschland; 2011. 124 p.
8. Labanca M, Azzola F, Vinci R, Rodella LF. Piezoelectric surgery: Twenty years of use. *Br J Oral Maxillofac Surg.* 2008;46(4):265–9.
9. Pavlíková G, Foltán R, Horká M, Hanzelka T, Borunská H, Šedý J. Piezosurgery in oral and maxillofacial surgery. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2011;40(5):451–7.
10. Lüllmann-Rauch R. *Taschenlehrbuch Histologie.* Thieme. 2012. 694 p.
11. Welsch U. Sobotta, *Lehrbuch Histologie.* 1. Auflage, Urban & Fischer. 2003. p. 528-529.
12. Louie A-F. *Surgical and radiologic anatomy for oral implantology.* Quintessence Publishing Co, Inc; 2013.
13. Lekholm U, Zarb GA. Patient selection and preparation, in tissue integrated prostheses: Osseointegration in Clinical Dentistry. *Quintessence Publishing.* 1985. 199–209 p.

14. Reichart, P.A. / Hausamen, J.-E. / Becker, J. / Neukam, F.W. / Schliephake, H. / Schmelzeisen R. Curriculum Chirurgie. Quintessence Publishing, Deutschland; 2002. Band 1-3.
15. Porter JA, Von Fraunhofer JA. Success or failure of dental implants? A literature review with treatment considerations. Vol. 53, General Dentistry. 2005. p. 423–32.
16. Schropp L, Wenzel A, Kostopoulos L, Karring T. Bone healing and soft tissue contour changes following single-tooth extraction: a clinical and radiographic 12-month prospective study. *Int J Periodontics Restorative Dent*. 2003;23(4):313–23.
17. Araújo MG, Lindhe J. Ridge alterations following tooth extraction with and without flap elevation: An experimental study in the dog. *Clin Oral Implants Res*. 2009;20(6):545–9.
18. Tan WL, Wong TLT, Wong MCM, Lang NP. A systematic review of post-extractional alveolar hard and soft tissue dimensional changes in humans. *Clin Oral Implants Res*. 2012;23(SUPPL. 5):1–21.
19. John V, De Poi R, Blanchard S. Socket preservation as a precursor of future implant placement: review of the literature and case reports. *Compend Contin Educ Dent*. 2007;28(11):572–80.
20. Atwood DA. Postextraction changes in the adult mandible as illustrated by microradiographs of midsagittal sections and serial cephalometric roentgenograms. *J Prosthet Dent*. 1963 Sep;13(5):810–24.
21. Fallschlüssel GKH. Zahnärztliche Implantologie. Wissenschaft und Praxis. Berlin: Quintessence Publishing, Deutschland; 1986. 488 p.
22. Marco F, Milena F, Gianluca G, Vittoria O. Peri-implant osteogenesis in health and osteoporosis. *Micron*. 2005;36(7–8):630–44.
23. Wennerberg a, Hallgren C, Johansson C, Danelli S. A histomorphometric evaluation of screw-shaped implants each prepared with two surface roughnesses. *Clin Oral Implants Res*. 1998;9(1):11–9.
24. Telleman G, Albrektsson T, Hoffman M, Johansson CB, Vissink A, Meijer HJA, et al. Peri-implant endosseous healing properties of dual acid-etched mini-

- implants with a nanometer-sized deposition of caP: A histological and histomorphometric human study. *Clin Implant Dent Relat Res.* 2010;12(2):153–60.
25. H. BH. Einführung in die Implantologie. München: Urban & Schwarzenberg; 1996.
26. Albrektsson T, Johansson C. Osteoinduction, osteoconduction and osseointegration. 2001;96–101.
27. Frost HM. The biology of fracture healing. An overview for clinicians. Part I. *Clin Orthop Relat Res.* 1989;(248):283–93.
28. Albrektsson T. The Healing of autologous bone grafts after varying the degrees of surgical trauma. *J Bone Joint Surg Br.* 1980;62(3):403–10.
29. Trippel SB, Coutts RD, Einhorn TA, Mundy GR, Rosenfeld RG. Growth factors as therapeutic agents. *J Bone Jt Surg .* 1996;78-A(8):1272–86.
30. Cataldo E, Santis H. Response of the Oral Tissue to Exogenous Foreign Materials. *J Periodontol.* 1974 Feb 1;45(2):93–106.
31. Lekholm U, Zarb G. Patient selection and preparation. Brånemark PI, Zarb GA, Albrektsson T (eds) *Tissue Integr Prostheses* Quintessence, Chicago. 1985;199–209.
32. Kumar G, Narayan B. Osseointegrated titanium implants: Requirements for ensuring a long-lasting, direct bone-to-implant anchorage in man. In: *Classic Papers in Orthopaedics.* 2014. p. 507–9.
33. Horwitz J, Zuabi O, Peled M. [Resonance frequency analysis in immediate loading of dental implants]. *Refuat Hapeh Vehashinayim.* 2003;20(3):80-88,104.
34. Degidi M, Piattelli A. A 7-year Follow-up of 93 Immediately Loaded Titanium Dental Implants. *J Oral Implantol.* 2005;31(1):25–31.
35. Puleo DA, Nanci A. Understanding and controlling the bone-implant interface. Vol. 20, *Biomaterials.* 1999. p. 2311–21.
36. Brånemark PI, Hansson BO, Adell R, Breine U, Lindström J, Hallén O, et al. Osseointegrated implants in the treatment of the edentulous jaw. Experience

- from a 10-year period. *Scand J Plast Reconstr Surg Suppl.* 1977;16:1–132.
37. Degidi M, Scarano A, Piattelli M, Perrotti V, Piattelli A. Bone remodeling in immediately loaded and unloaded titanium dental implants: a histologic and histomorphometric study in humans. *J Oral Implantol.* 2005;31(1):18–24.
38. Simmons CA, Valiquette N, Pilliar RM. Osseointegration of sintered porous-surfaced and plasma spray-coated implants: An animal model study of early postimplantation healing response and mechanical stability. *J Biomed Mater Res.* 1999;47(2):127–38.
39. Szmukler-Moncler S, Salama H, Reingewirtz Y, Dubruille JH. Timing of loading and effect of micromotion on bone-dental implant interface: Review of experimental literature. *J Biomed Mater Res.* 1998;43(2):192–203.
40. Zarb GA, Alberktsson T. [Criteria for determining clinical success with osseointegrated dental implants]. *Cah Prothese.* 1990;(71):19–26.
41. Li S, Ni J, Liu X, Zhang X, Yin S, Rong M, et al. Surface characteristics and biocompatibility of sandblasted and acid-etched titanium surface modified by ultraviolet irradiation: An in vitro study. *J Biomed Mater Res - Part B Appl Biomater.* 2012;100 B(6):1587–98.
42. Al-Juboori MJ, AbdulRahaman S Bin, Hassan A. The correlation between crestal bone resorption and implant stability during healing period using resonance frequency analysis. *Implant Dent.* 2013;22:351–5.
43. Bengazi F, Lang NP, Canciani E, Viganò P, Velez JU, Botticelli D. Osseointegration of implants with dendrimers surface characteristics installed conventionally or with Piezosurgery®. A comparative study in the dog. *Clin Oral Implants Res.* 2014;25(1):10–5.
44. SINGH AV. *Clinical Implantology.* Elsevier; 2013.
45. Farré-Pagès N, Augé-Castro ML, Alaejos-Algarra F, Mareque-Bueno J, Ferrés-Padró E, Hernández-Alfaro F. Relation between bone density and primary implant stability. *Med Oral Patol Oral Cir Bucal.* 2011;16(1):62–7.
46. Schulte W, Lukas D. Periotest to monitor osseointegration and to check the occlusion in oral implantology. *J Oral Implantol.* 1993;19(1):23–32.
47. Meredith N, Alleyne D, Cawley P. Quantitative determination of the stability of

- the implant-tissue interface using resonance frequency analysis. Vol. 7, Clinical Oral Implants Research. 1996. p. 261–7.
48. Atsumi M, Park S, Wang H. Methods used to assess implant stability: current status. Oral Maxillofac Implant. 2007;
49. Meredith N. Assessment of implant stability as a prognostic determinant. Int J Prosthodont. 1998;11(5):491–501.
50. Friberg B, Sennerby L, Gröndahl K, Bergström C, Bäck T, Lekholm U. On cutting torque measurements during implant placement: a 3-year clinical prospective study. Clin Implant Dent Relat Res. 1999;1(2):75–83.
51. Al-Nawas B, Brahm R GK. Resonanzfrequenzanalyse zur non-invasiven Analyse der Primärstabilität enossaler Implantate in vivo. Zahnärztliche Implantol. 2002;18:142–8.
52. Olive J, Aparicio C. Periotest method as a measure of osseointegrated oral implant stability. Int J Oral Maxillofac Implants. 1990;5(4):390–400.
53. Aparicio C. The use of the Periotest value as the initial success criteria of an implant: 8-year report. Int J Periodontics Restorative Dent. 1997 Apr;17(2):150–61.
54. Balleri P, Cozzolino A, Ghelli L, Momicchioli G, Varriale A. Stability measurements of osseointegrated implants using Osstell in partially edentulous jaws after 1 year of loading: a pilot study. Clin Implant Dent Relat Res. 2002;4(3):128–32.
55. Sennerby L, Meredith N. Implant stability measurements using resonance frequency analysis: Biological and biomechanical aspects and clinical implications. Periodontol 2000. 2008;47:51–66.
56. Pagliani L, Sennerby L, Petersson A, Verrocchi D. Oral Rehabilitation The relationship between resonance frequency analysis ( RFA ) and lateral displacement of dental implants : an in vitro study. 2013;(3).
57. Pagliani L, Sennerby L, Petersson A, Verrocchi D, Volpe S, Andersson P. The relationship between resonance frequency analysis (RFA) and lateral displacement of dental implants: An in vitro study. J Oral Rehabil. 2013;
58. Friberg B, Sennerby L, Meredith N, Lekholm U. A comparison between cutting

- torque and resonance frequency measurements of maxillary implants. A 20-month clinical study. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 1999;28(4):297–303.
59. Lachmann S, Yves Laval J, Jäger B, Axmann D, Gomez-Roman G, Groten M, et al. Resonance frequency analysis and damping capacity assessment - Part 2: Peri-implant bone loss follow-up. An in vitro study with the Periotest™ and Osstell™ instruments. *Clin Oral Implants Res.* 2006;17(1):80–4.
60. Frandsen PA, Christoffersen H, Madsen T. Holding power of different screws in the femoral head. A study in human cadaver hips. *Acta Orthop Scand.* 1984 Jun;55(3):349–51.
61. Edward AP, Attin T, Bill B, Josip B, Josef S. *Farbatlanten der Zahnmedizin.* In Thieme; 2008. p. 376.
62. Implants D. *Osseointegration and Dental Implants.* 2009. 448 p.
63. Cionca N, Hashim D, Mombelli A. Zirconia dental implants: where are we now, and where are we heading? *Periodontol 2000.* 2017 Feb;73(1):241–58.
64. B. K, Wagner W. *Implantologie.* 2nd ed. München: Urban&Fischer; 2004.
65. Vercellotti T, Stacchi C, Russo C, Rebaudi A, Vincenzi G, Pratella U, et al. Ultrasonic implant site preparation using piezosurgery: a multicenter case series study analyzing 3,579 implants with a 1- to 3-year follow-up. *Int J Periodontics Restorative Dent.* 2014;34(1):11–8.
66. Oates TW, Valderrama P, Bischof M, Nedir R, Jones A, Simpson J, et al. Enhanced implant stability with a chemically modified SLA surface: a randomized pilot study. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2007;22:755–60.
67. West JD, Oates TW. Identification of stability changes for immediately placed dental implants. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2007;22(4):623–30.
68. Canullo L, Penarrocha D, Penarrocha M, Rocio AG, Penarrocha-Diago M, Penarrocha D, et al. Piezoelectric vs. conventional drilling in implant site preparation: pilot controlled randomized clinical trial with crossover design. *Clin Oral Implant Res.* 2014;25(12):1336–43.
69. Stacchi C, Vercellotti T, Torelli L, Furlan F, Di Lenarda R. Changes in implant stability using different site preparation techniques: Twist drills versus piezosurgery. A single-blinded, randomized, controlled clinical trial. *Clin Implant*

- Dent Relat Res. 2013;15(2):188–97.
70. Glauser R, Sennerby L, Meredith N, Rée A, Lundgren A, Gottlow J, et al. Resonance frequency analysis of implants subjected to immediate or early functional occlusal loading. *Clin Oral Implants Res.* 2004;15(4):428–34.
  71. Östman PO, Wennerberg A, Ekestubbe A, Albrektsson T. Immediate Occlusal Loading of NanoTite™ Tapered Implants: A Prospective 1-Year Clinical and Radiographic Study. *Clin Implant Dent Relat Res.* 2013;15(6):809–18.
  72. Baker JA, Vora S, Bairam L, Kim H II, Davis EL, Andreana S. Piezoelectric vs. conventional implant site preparation: Ex vivo implant primary stability. *Clin Oral Implants Res.* 2012;23(4):433–7.
  73. Abrahamsson I, Berglundh T, Linder E, Lang NP, Lindhe J. Early bone formation adjacent to rough and turned endosseous implant surfaces. An experimental study in the dog. *Clin Oral Implants Res.* 2004;15(4):381–92.
  74. Botticelli D, Berglundh T, Persson LG, Lindhe J. Bone regeneration at implants with turned or rough surfaces in self-contained defects. An experimental study in the dog. *J Clin Periodontol.* 2005;32(5):448–55.
  75. Valderrama P, Oates TW, Jones AA, Simpson J, Schoolfield JD, Cochran DL. Evaluation of Two Different Resonance Frequency Devices to Detect Implant Stability: A Clinical Trial. *J Periodontol.* 2007;78(2):262–72.
  76. Sagheb K, Kumar V V., Azaripour A, Walter C, Al-Nawas B, Kämmerer PW. Comparison of conventional twist drill protocol and piezosurgery for implant insertion: An ex vivo study on different bone types. *Clin Oral Implants Res.* 2016;1–7.
  77. Becker K, Mihatovic I, Golubovic V, Schwarz F. Impact of abutment material and dis-/re-connection on soft and hard tissue changes at implants with platform-switching. *J Clin Periodontol.* 2012 Aug;39(8):774–80.
  78. Abrahamsson I. The mucosal barrier following abutment dis/reconnection An experimental study in dogs. *J Clin Periodontol.* 1997;24(8):568–72.
  79. Blus C, Szmukler-Moncler S. Atraumatic tooth extraction and immediate implant placement with Piezosurgery: evaluation of 40 sites after at least 1 year of loading. *Int J Periodontics Restorative Dent.* 2010;30(4):355–63.

80. Di Alberti L, Donnini F, Di Alberti C, Camerino M. A comparative study of bone densitometry during osseointegration: piezoelectric surgery versus rotary protocols. *Quintessence Int.* 2010;41(8):639–44.
81. Berglundh T. Dimension of the periimplant mucosa Biological width revisited. *J Clin Periodontol.* 1996;23(10):971–3.
82. Berglundh T, Abrahamsson I, Welander M, Lang NP, Lindhe J. Morphogenesis of the peri-implant mucosa: An experimental study in dogs. *Clin Oral Implants Res.* 2007;18(1):1–8.
83. Rodríguez X, Vela X, Méndez V, Segalà M, Calvo-Guirado JL, Tarnow DP. The effect of abutment dis/reconnections on peri-implant bone resorption: A radiologic study of platform-switched and non-platform-switched implants placed in animals. *Clin Oral Implants Res.* 2013;24(3):305–11.



### **Danksagung**

Ein außerordentlicher Dank gilt natürlich meinen Eltern und meiner Familie. Nicht nur haben sie mir mein Studium und die Verwirklichung meiner Zukunftspläne ermöglicht, sie haben mich außerdem während der gesamten Zeit liebevoll und uneingeschränkt unterstützt.

Ein ganz besonderes Dankeschön gilt meinem Patenonkel, der mich für den besonderen Beruf des Zahnarztes inspiriert hat und in meinem Leben ganz außergewöhnlich begleitet und unterstützt hat.