

Aus der Poliklinik für Zahnärztliche Chirurgie und Aufnahme

Der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

Direktor: Univ.-Prof. Dr. J. Becker

Autogene Zahnwurzeltransplantate für die lokalisierte

Kieferkammaugmentation

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Zahnmedizin

der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

vorgelegt von

Didem Sahin

2018

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

gez.:

Dekan: Prof. Dr. med. Nikolaj Klöcker

Erstgutachter: Prof. Dr. med. dent. Frank Schwarz

Zweitgutachter: Prof. Dr. med. dent. Benedict Wilmes

Teile dieser Arbeit wurden veröffentlicht:

Schwarz, F., Hazar, D., Golubovic, V., Mihatovic, I., Becker, K., (2017),
Lokalisierte Kieferkammaugmentationen unter Verwendung autogener
Zahnwurzeln. Quintessenz 2017;68(12):1393-139

Zusammenfassung

Nach einem Zahnverlust ist die Gegebenheit eines ausreichend dimensionierten Knochenlagers zur Wiederherstellung der orofazialen Integrität durch Implantatinsertion obligatorisch. In der heutigen Zahnmedizin rückt daher die Fragestellung, welche Alternativen es zum Knochenaufbau mittels Knochenblöcken gibt, immer weiter in den Fokus des Interesses.

Tierexperimentelle Studien verifizieren, dass Wurzelaugmentationen vergleichbare Resultate wie native Knochenblockimplantate liefern können. Auch beim Menschen konnte dieses Verfahren in einem ersten Pilotversuch erfolgreich nachgewiesen werden. Nach einer Einheilungsphase von 26 Wochen zeigten sich deutliche klinische Anzeichen für eine nahezu vollständige Ankylose des Zahnwurzelfragmentes mit dem Empfängerknochen.

Das Ziel der vorliegenden klinischen Studie war, die Wirksamkeit des lateralen Kieferkammaufbaus mittels autogener Zahnwurzelaugmentation mit sekundärer Implantation nach sechs Monaten zu untersuchen. Im Rahmen dieser Studie wurde der horizontale Kieferkammaufbau mit Zahnwurzelfragmenten von Zähnen, die aus zahnmedizinischer Sicht eine Indikation zur Extraktion aufwiesen, durchgeführt (n=15). Sowohl endodontisch vorbehandelte (n=7), frakturierte (n=3), parodontal geschädigte (n=1), als auch Zähne mit großen Zahnhartsubstanzdefekten (n=4) wurden verwendet. Alle Augmentate wurden mit Titanschrauben am Empfängerknochen festgeschraubt. Nach 26 Wochen wurden die Schrauben entfernt und der mittlere Knochengewinn von 10.86 ± 2.71 mm ($p=0.001$) ermöglichte die suffiziente Implantation. Auf Basis dieser Erkenntnisse lässt sich schlussfolgern, dass dieses chirurgische Vorgehen zur Knochenneubildung die Zukunft der Zahnmedizin prägen kann.

Summary

Following the tooth loss in order to place dental implants a certain amount of bone is necessary. However, in many of the cases additional bone augmentation procedures are needed to ensure the successful treatment outcome. Based on the current evidence, it is still not clear, what materials can act as alternatives to the autogenous bone blocks, so called "Gold standard".

Previous animal studies and the human pilot study have demonstrated that bone volume augmentation with the root-grafts resulted in comparable clinical outcomes to autogenous bone blocks. In particular, after the healing period of 26 weeks, ankylosis between the root-graft and the bone could be observed.

The aim of the current study was to evaluate the clinical outcomes of the alveolar bone augmentation with the root-graft and a subsequent dental implant placement after 6 months of the healing. A total of 15 patients exhibiting teeth with the hopeless prognosis were included. Endodontically treated (n =7), fractured (n=3), periodontally involved teeth (n =1) and teeth presenting dental hard tissue defects (n = 4) were used for the lateral ridge augmentation. The root-grafts were fixed to the alveolar bone with titanium screws. After the healing period of 26 weeks, screws were removed and dental implants were placed.

At the clinical re-entry at 26 weeks homogenous incorporation of the transplanted root grafts at the former defect area could be detected. The gain of the ridge width amounted to 10.86 ± 2.71 mm ($p=0.001$) and allowed a successful implant placement with good primary stability. Based on the findings of the current investigation, the extracted tooth roots may be an alternative treatment approach for the bone augmentation procedures.

Abkürzungsverzeichnis

AB	Autogener Knochen
BIC	Knochen-Implantat-Kontakt
XB	Xenogenes Knochenersatzmaterial
PDL	Parodontales Ligament
DIC	Dentin-Implantat-Kontakt
BB	Bündelknochen
GBR	Guided Bone Regeneration/ Gesteuerte Knochenregeneration

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ursprünge von Knochenersatzmaterialien.....	10
Tabelle 2: Zusammensetzung der Zahnhartsubstanz	12
Tabelle 3: Häufigkeit zur Augmentation verwendeten Zähne	59
Tabelle 4: Statistik bei gepaarten Stichproben	60
Tabelle 5: Korrelationen bei gepaarten Stichproben	60
Tabelle 6: Ergebnisse der deskriptiven Statistik.....	61

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Veränderung der Gewebsstrukturen: Spontanheilung.....	6
Abbildung 2: Histologischer Nachweis für die strukturelle Ähnlichkeit von Dentin, Wurzelzement und Knochengewebe	14
Abbildung 3: Spontanheilung mit anschließender Implantation.....	17
Abbildung 4: Kieferkammaugmentation mit anschließender Implantation	18
Abbildung 5: Ridge Preservation mit anschließender Implantation	19
Abbildung 6: Zahnwurzelaugmentation mit anschließender Implantation	20
Abbildung 7: Extraktionsindikation der Zähne in der Studie	25
Abbildung 8: Zustand vor Extraktion des Zahnes 23 (<i>Patientenfall I</i>).....	30
Abbildung 9: Zustand vor Extraktion des Zahnes 25 (<i>Patientenfall II</i>).....	31
Abbildung 10: Zustand vor Extraktion des Zahnes 24 (<i>Patientenfall III</i>).....	32
Abbildung 11: Zustand der Extraktionsalveole in Regio 023 nach Extraktion des Zahnes (<i>Patientenfall I</i>)	33
Abbildung 12: Zustand nach Extraktion des endodontisch vorbehandelten Zahnes 25 (<i>Patientenfall II</i>)	34
Abbildung 13: Zustand der Extraktionsalveole in Regio 024 nach Extraktion des Zahnes (<i>Patientenfall III</i>)	35
Abbildung 14: Zustand nach Extraktion und Bearbeitung des parodontal geschädigten Zahnes 23 (<i>Patientenfall I</i>)	37
Abbildung 15: Bearbeitung einer endodontisch vorbehandelten Zahnwurzel (<i>Patientenfall II / III</i>)	38
Abbildung 16: Fixierung der Zahnwurzel mittels Titanschraube an den Empfängerknochen in Regio 023 (<i>Patientenfall I</i>)	39
Abbildung 17: Fixation der Zahnwurzel an den Empfängerknochen in Regio 025 (<i>Patientenfall II</i>)	40

Abbildung 18: Fixation der Zahnwurzel lateral an den Dehiszenzdefekt in Regio 024 (<i>Patientenfall III</i>)	41
Abbildung 19: Schieblehre zur Messung der Kieferkambbreite in mm	42
Abbildung 20: Plastische Deckung nach lateraler Augmentation in Regio 023 (<i>Patientenfall I</i>)	43
Abbildung 21: Zustand nach Nahtentfernung 10 Tage nach Augmentation	44
Abbildung 22: Darstellung des Zahnwurzelaugmentats (<i>Patientenfall I</i>)	46
Abbildung 23: Klinische Situation sechs Monate nach lateraler Kieferkammaugmentation (<i>Patientenfall I</i>)	46
Abbildung 24: Zustand nach Entfernung der Titanschraube (<i>Patientenfall I</i>) ...	47
Abbildung 25: Klinische Situation nach Implantatbohrung (<i>Patientenfall I</i>)	47
Abbildung 26: Implantatbohrung (<i>Patientenfall I</i>)	48
Abbildung 27: Zustand nach Implantatinsertion (<i>Patientenfall I</i>)	48
Abbildung 28: Zweiter Chirurgischer Eingriff nach einer Heilungsphase von 26 Wochen in Regio 025 (<i>Patientenfall II</i>)	49
Abbildung 29: Zweiter Chirurgischer Eingriff nach einer Heilungsphase von 26 Wochen (<i>Patientenfall III</i>)	50
Abbildung 30: Zustand nach Eingliederung der Krone in Regio 023 (<i>Patientenfall I</i>)	51
Abbildung 31: Zustand nach Eingliederung der Krone (<i>Patientenfall II</i>)	52
Abbildung 32: Zustand nach Eingliederung der Krone (<i>Patientenfall III</i>)	52
Abbildung 33: Messlehre zur Messung der Kieferkambbreite in mm	53
Abbildung 34: Kreisdiagramm zur Darstellung der Zahnwurzelgruppen	58
Abbildung 35: Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Kieferkambbreite vor Augmentation und Augmentatdicke.....	62

Abbildung 36: Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Kieferkammbreite vor Augmentation und des Knochengewinns	63
Abbildung 37: Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Kieferkammbreite nach Augmentation und Resorption des Augmentats	64
Abbildung 38: Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Kieferkammbreite vor Augmentation und Resorption des Augmentats	65

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Übersicht	1
1.2	Biologische Vorgänge nach Zahnextraktion	3
1.2.1	Heilungsvorgang einer Extraktionsalveole	3
1.2.2	Remodellierung des Gewebes nach Zahnextraktion	5
1.2.3	Veränderung der Gewebestrukturen nach Zahnextraktion	6
1.3	Kieferkammaufbaumaterialien	7
1.3.1	Knochenaufbau mit autogenem Knochen	7
1.3.2	Knochenaufbau mit Knochenersatzmaterialien	9
1.3.3	Knochenaufbau mit autogenen Zahnwurzeln	11
1.4	Implantationszeitpunkte	15
1.4.1	Das Prinzip der Sofortimplantation	15
1.4.2	Das Prinzip der verzögerten Sofortimplantation	16
1.4.3	Das Prinzip der Spätimplantation	16
1.5	Erhalt und Aufbau des Kieferkamms vor adäquater enossaler Implantatinserion	17
1.5.1	Implantation nach Spontanheilung	17
1.5.2	Implantation nach Kieferkammaugmentation	18
1.5.3	Implantation nach Ridge Preservation	19
1.5.4	Implantation nach Zahnwurzelaugmentation	20
1.6	Von der Osseointegration zur Entstehung des Begriffes der Dentointegration	21
1.7	Fragestellung	23
2	Material & Methoden	24

2.1	Studienprotokoll und Studiendesign	24
2.1.1	Studienpatienten	24
2.1.1.1	Extrahierte Zähne	25
2.1.2	Einschlusskriterien	26
2.1.3	Ausschlusskriterien	26
2.2	Untersuchungsplan.....	27
2.2.1	Erster Untersuchungstermin - Studienaufnahme	28
2.2.2	Zweiter Untersuchungstermin – Erster chirurgischer Eingriff bzw. Augmentation.....	28
2.2.2.1	Bearbeitung der Zahnwurzel.....	36
2.2.2.2	Kieferkambbreite	42
2.2.2.3	Lappendesign.....	42
2.2.2.4	Defektverschluss	43
2.2.2.5	Weichgewebsheilung	43
2.2.3	Dritter Untersuchungstermin - Nahtentfernung.....	44
2.2.4	Vierter Untersuchungstermin.....	44
2.2.5	Fünfter Untersuchungstermin - OP-Aufklärung vor Implantation	45
2.2.6	Zweiter chirurgische Eingriff - Implantation	45
2.2.7	Siebter Untersuchungstermin - Nahtentfernung	51
2.2.8	Achter Untersuchungstermin – Suprakonstruktion	51
2.2.9	Neunter Untersuchungstermin – Nachkontrolle 6 Monate nach der Prothetischen Versorgung	52
2.2.10	Studienequipments	53
2.2.11	Statistische Analysen	55
3	Ergebnisse.....	56

3.1	Ergebnisse der Auswertung des klinischen Datenbestandes	56
3.1.1	Patientenspezifische Faktoren – Alter und Geschlecht	57
3.1.2	Häufigkeit der Zahnwurzelgruppen	58
3.1.3	Extraktionsregionen der zur Augmentation verwendeten Zahnwurzeln	59
3.1.4	Ergebnisse zur Verbreiterung des Knochenvolumens sechs Monate nach lateraler Augmentation	60
3.1.5	Zusammenhang zwischen Kieferkammbreite vor Augmentation und Augmentatdicke	62
3.1.6	Zusammenhang zwischen Kieferkammbreite vor Augmentation und gesamten Knochengewinn.....	63
3.1.7	Zusammenhang zwischen Kieferkammbreite nach Augmentation und Resorptionsrate des Augmentats nach sechs Monaten	64
3.1.8	Zusammenhang zwischen Kieferkammbreite vor Augmentation und Resorptionsrate des Augmentats nach sechs Monaten	65
4	Diskussion	66
4.1	Diskussion von Material und Methoden	66
4.2	Diskussion der Ergebnisse	68
5	Schlussfolgerungen	75
6	Literaturverzeichnis.....	76
7	Danksagung	82

1 Einleitung

1.1 Übersicht

Heutzutage zählen Implantate zu einem weitverbreiteten Verfahren in der Zahnmedizin und dienen neben der Rekonstruktion funktioneller Defekte auch zur Wiederherstellung der Ästhetik. Für eine suffiziente Implantation und Osseointegration eines Implantates ist die Gegebenheit eines ausreichend dimensionierten Knochenlagers von essentieller Bedeutung (Schwarz et al., 2010a). Es ist bekannt, dass Knochenverlust nach Zahnextraktionen unumgänglich ist (Araujo et al., 2002, Qahash et al., 2008, Chappuis et al., 2017, Tan et al., 2012). Daher stellt der laterale Knochenaufbau vor Lückenschluss mittels enossalen Implantaten einen entscheidenden zahnmedizinischen Eingriff dar (Andersson, 2010, Andersson et al., 2003, Bragger et al., 2005, van Steenberghe et al., 1990, Bahat, 2000).

Zum Wiederaufbau eines ausreichenden Knochenlagers wird die Verwendung von autogenem Knochen (AB) als Goldstandard definiert (Nkenke et al., 2002). Einige mit der Zeit beschriebene Nachteile dieses Verfahrens, wie Begrenzbarkeit der intraoralen Knochenentnahme, diverse postoperative Komplikationen und Knochenresorptionen (Aloy-Prosper et al., 2015), waren Grund für die Suche nach Alternativen. Zur Rehabilitation von fortgeschrittenen Kieferkammdefekten haben sich aufgrund ihrer geringen Morbidität Knochenersatzmaterialien (KEM) unterschiedlicher Herkunft als weitere Augmentationsmethode durchgesetzt (Araujo et al., 2002, Rothamel et al., 2009). Dabei sind die Anforderungen an das ideale KEM die Biokompatibilität, die Osteokonduktivität und die Resorbierbarkeit des Augmentats (Schwarz et al.,

2010a). Jedoch haben zahlreiche Untersuchungen trotz der Rehydrierung von KEM mit morphogenen und mitogenen Wachstumsfaktoren geringe osteokonduktive Eigenschaften nachgewiesen (Schwarz et al., 2010b).

Die Augmentation mit einer alternativen biologische Matrix, der es gelingt die positiven Aspekte beider beschriebenen Verfahren zusammen zu fassen und die Nachteile zu umgehen, könnte zu einem Durchbruch in der Zahnmedizin führen. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Dissertation das Verfahren des Knochenaufbaus mit autogenen Zahnwurzelfragmenten untersucht. Denn der Einsatz von Zahnwurzeln gewinnt aufgrund der strukturellen Ähnlichkeit der Zahnhartsubstanz zum Knochengewebe (Linde, 1989, Wahl and Czernuszka, 2006, Brudevold et al., 1960, Andersson et al., 2009) immer mehr Anerkennung und soll im Rahmen dieser klinischen Studie genauer beobachtet werden.

1.2 Biologische Vorgänge nach Zahnextraktion

1.2.1 Heilungsvorgang einer Extraktionsalveole

Die Zahnextraktion stellt den am häufigsten durchgeführten oralchirurgischen Eingriff dar. In Zahlen ausgedrückt bedeutet dies – gemäß Kassenzahnärztlicher Vereinigung – eine jährliche Extraktion von ca. 13 Millionen Zähnen in Deutschland. Die zwei Hauptursachen für die Zahnextraktion stellen kariöse und parodontal infizierte Zähne dar (McCaul et al., 2001).

Zahlreiche wissenschaftliche Studien haben dafür gesorgt, dass die wesentlichen Heilungsvorgänge nach Zahnextraktion aufgeklärt werden konnten (Fickl et al., 2008, Araujo and Lindhe, 2005, Amler et al., 1960, Cardaropoli et al., 2003). Bereits 1960 wurden die genauen biologischen Prozesse einer heilenden Extraktionsalveole an humanen Biopsien beobachtet (Amler et al., 1960). Der physiologische Heilungsprozess wurde hierbei vom Zustand unmittelbar nach Zahnextraktion, Bildung eines Blutkoagels und dessen Ersatz durch Granulationsgewebe, bis hin zur Bildung des Geflechtknochens beschrieben. Dieser Vorgang bis zur knöchernen Regeneration dauert in etwa sechs bis acht Wochen (siehe Abb.1). Die Weichgewebsheilung wird nach vier bis sechs Wochen erreicht. In tierexperimentellen Studien wurden die biologischen Vorgänge in der Extraktionsalveole von der Knochenneubildung bis zur Remodellierung des neu gebildeten Hartgewebes näher beleuchtet (Cardaropoli et al., 2003). Cardaropoli et al. haben zu unterschiedlichen Zeitpunkten die verschiedenen Heilungsphasen einer Extraktionsalveole anhand von Biopsien untersucht. Dabei wurden die Vorgänge in apikalen, zentralen und marginalen Anteilen von Extraktionsalveolen beobachtet. Beschrieben wird im Rahmen

dieser Studie die Entstehung eines Blutkoagulums, welches in den ersten drei Tagen nach Zahnextraktion vorzufinden war. Dieses Koagulum wurde innerhalb von sieben Tagen zu einer provisorischen Matrix umgewandelt, bestehend aus Blutgefäßen, pluripotenten Zellen und Kollagenfasern. Nach dem 14. Tag ist neben einem Anteil an provisorischer Matrix das Vorhandensein von Geflechtknochen beobachtet worden (Cardaropoli et al., 2003). An Tag 30 der Heilungsphase bestand das Alveolarvolumen zu 88% aus mineralisiertem Knochen. Ein Abfall des Volumens auf 15% war nach 180 Tagen zu beobachten. Im Gegenzug nahm der Anteil des Knochenmarks nach 180 Tagen von 75% auf 85% zu. Diese Abnahme an mineralisiertem Knochen und die Zunahme an Knochenmark wurden im zentralen Anteil der Extraktionsalveole beobachtet. Im koronalen Anteil hingegen war lamellärer Knochen vorzufinden (Cardaropoli et al., 2003). Daraus lässt sich schlussfolgern, dass bei fehlender physiologischer Krafteinwirkung eine Resorption des Geflechtknochens erfolgt und lediglich die knöcherne Begrenzung zur Mundhöhle aus lamellärem Knochen besteht (Fickl et al., 2008). Die Resorption des Knochens ist dabei umso größer, je dünner die Alveolarwand ist (Tomasi et al., 2010, Sanz et al., 2010). Schropp verifizierte durch seine klinisch durchgeführten Studien, dass das horizontale Knochenvolumen innerhalb der ersten zwölf Monate nach Zahnextraktion um 5-7 mm abnimmt. Das entspricht fast 50 % der ursprünglichen Knochenbreite (Schropp et al., 2003).

1.2.2 Remodellierung des Gewebes nach Zahnextraktion

In zahlreichen tierexperimentellen Studien standen die Umbauprozesse innerhalb der Extraktionsalveole im Fokus des Interesses (Araujo and Lindhe, 2005, Fickl et al., 2008). Um den physiologischen Prozess besser verstehen zu können, muss die Funktion des Bündelknochens (BB) verstanden werden (Araujo and Lindhe, 2005). Bei dem BB handelt es sich um eine anatomische Struktur, die den inneren Anteil des Alveolarknochens auskleidet und von parodontalen Fasern (Sharpey'sche Fasern) durchzogen wird. Es stellt daher einen wesentlichen Bestandteil des Parodontiums dar. Der bukkale Anteil der Extraktionsalveole besteht fast ausschließlich aus BB, während der linguale Bereich neben dem schmalen Anteil des BB hauptsächlich aus Lamellenknochen besteht und somit kaum Resorptionen ausgesetzt ist (Araujo and Lindhe, 2005). Lateral zum BB verläuft ein parodontales Ligament, welches Fibroblasten, Blutgefäße und Entzündungszellen enthält. Bereits eine Woche nach Zahnextraktion können auf der Oberfläche des BB Osteoklasten nachgewiesen werden. Zwei Wochen nach Zahnextraktion ist der komplette Anteil des BB nicht mehr nachweisbar (Araujo and Lindhe, 2005).

Im klinischen Alltag stellt dieser physiologische Heilungsvorgang oft ein Problem dar, denn die Tatsache, dass immer ein Anteil der inneren Alveolenwand aus BB besteht, führt bei Zähnen mit dünner bukkalen Wand zur vollständigen Resorption und folglich zur Abflachung der bukkalen Lamelle (siehe Abb.1). Mit der Resorption des bukkalen Anteils kommt es zum Einfall des Weichgewebes in die Extraktionsalveole. Die Konsequenz daraus ist die Einschränkung der

knöchernen Regeneration, da der Einbruch des Weichgewebes in die Alveole den Raum für die Neubildung des Knochens einnimmt (siehe Abb. 1).

Die Schlussfolgerung aus diesem biologischen Vorgang ist, dass man nach Zahnextraktionen eine Abnahme der bucco-oralen Dimension erwarten muss (Fickl et al., 2008).

1.2.3 Veränderung der Gewebestrukturen nach Zahnextraktion

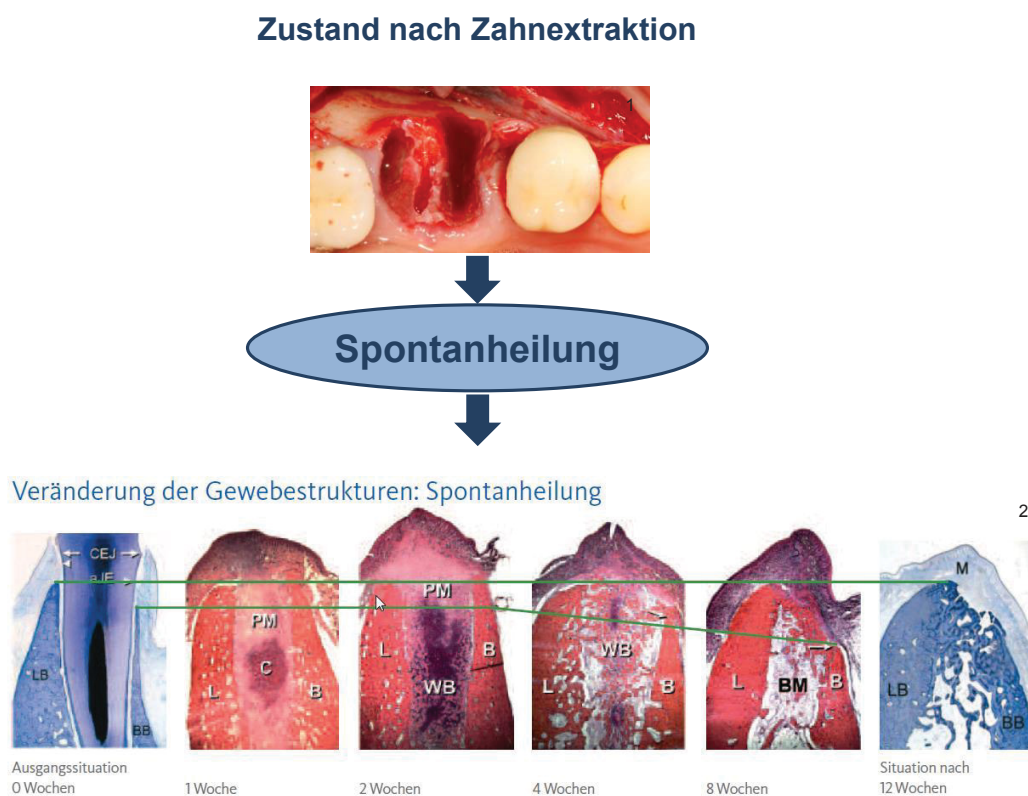


Abbildung 1: Veränderung der Gewebestrukturen: Spontanheilung

Klinisches Bild (1): Original aus dem Archiv der Westdeutschen Kieferklinik.

Abbildung (2): Aus der Unternehmensbroschüre „Therapiekonzepte für Extraktionsalveolen“,

Geistlich Biomaterials (31275.2/0804/d).

1.3 Kieferkammaufbaumaterialien

1.3.1 Knochenaufbau mit autogenem Knochen

Aufgrund seiner osteokonduktiven, -induktiven und osteogenetischen Eigenschaften gilt der AB für den Kieferkammaufbau als Goldstandard und kann sowohl aus extraoralen Körperanteilen wie Tibia, Rippe, Schädelkalotte oder Beckenknochen, als auch intraoral aus dem Unterkieferknochen entnommen werden (Nkenke et al., 2002, Kurz et al., 1989, Sandor et al., 2003, Nkenke et al., 2001). Bei größeren Kieferkammdefekten reicht eine intraorale Knochenentnahme oft nicht aus, weshalb Knochen aus extraoralen Körperregionen entnommen werden muss, um ein suffizientes Knochenlager für anschließende Implantationen zu schaffen (Andersson, 2010). Jedoch wurden nach größeren Knochenentnahmen aus dem Becken Beschwerden wie Gangstörungen, Taubheit und Schmerzen noch weit nach dem operativen Eingriff notiert (Sandor et al., 2003, Arrington et al., 1996, Hill et al., 1999). Einen weiteren Nachteil der extraoralen Knochenentnahme stellt die stationäre Aufnahme des Patienten und die Durchführung des Vorganges in Vollnarkose dar, weshalb viele Zahnärzte bei Defektrekonstruktionen von Kieferkämmen auf Knochenentnahmen aus dem Kinn oder der retromolaren Region der Mandibula zurückgreifen (Andersson et al., 2009). Jedoch können auch größere Knochenentnahmen aus der Kinnregion zu starken Schmerzen und Taubheitsgefühlen im Spendergebiet führen (Nkenke et al., 2001, Raghoobar et al., 2001, Andersson, 2008). Studien zeigen, dass die intraorale Knochenentnahme trotz allem mit einer guten Patientenzufriedenheit einhergeht

und dass der AB aus der lateralen Mandibula mit einer geringeren Morbidität im Vergleich zur Kinnregion beschrieben wird (Andersson, 2008).

Obwohl die hohen Erfolgsraten und die standardmäßige Durchführung der Knochenaugmentation mittels nativem Knochen Grund für die hohe Anerkennung dieses chirurgischen Vorgehens ist, gibt es Studien, welche die Nachteile dieses Verfahrens nachgewiesen haben. Spongiöser Knochen und Knochenmark haben den Nachteil, dass sie eine geringe mechanische Stabilität aufweisen. Wenn allerdings der Knochenaufbau mittels spongiösem Knochen gelingt, ist durch die Gegebenheit von Osteoblasten die Möglichkeit der Osteogenese am Empfängerknochen gegeben (Burchardt, 1983). Der Vorteil beim kortikalen Knochen ist seine mechanische Stabilität, jedoch wurde hier nur ein sehr geringes Potential von Osteoinduktivität nachgewiesen. In der Empfängerregion wurden unvollständige Ersatzresorptionen nach Transplantation von kortikalem Knochen beobachtet (Burchardt, 1983) und die Zusammensetzung aus nichtvitalem, nekrotischen und neu gebildetem Knochen nachgewiesen (Schwarz et al., 2016a). Eine ernsthafte Resorption von spongiösem Knochen nach Augmentation wurde verifiziert und beträgt Untersuchungen zufolge in einem Zeitraum von 1-5 Jahren nach Implantation 12-60% (Chiapasco et al., 2006).

1.3.2 Knochenaufbau mit Knochenersatzmaterialien

Durch die begrenzte Verfügbarkeit von Autotransplantaten stellt die Verwendung von KEM eine wichtige Alternative in der Zahnmedizin dar. Diese können isoliert oder ergänzend zu AB verwendet werden (Araujo et al., 2002). Die Indikation zur Verwendung von KEM ist der Knochenaufbau in vertikaler und horizontaler Dimension. Aber auch der Erhalt des Kiefers nach Zahnextraktionen im Sinne einer Ridge Preservation kann durch Applikation von KEM erfolgen (siehe Abb.5). Bei dünnem bukkalen Alveolarknochen kann durch das Verfahren der Ridge Preservation einer Abnahme des Knochenvolumens entgegengewirkt werden (Lindhe et al., 2013). Die Anforderungen an das ideale KEM sind Eigenschaften wie die hohe Biokompatibilität, die Osteokonduktivität, seine Platzhalterfunktion und die Resorbierbarkeit. Das am häufigsten angewendete xenogene KEM (siehe Tab.1) besteht aus deproteinisierten mineralischen Anteilen vom Rind (Bio-Oss®, Geistlich Biomaterials, Schweiz). Dieses KEM entspricht nach Entfernung der organischen Anteile einer dem menschlichen spongiösen Knochen gleichenden Struktur. Aufgrund dieser Strukturverwandtschaft zum spongiösen Knochen lässt sich die osteokonduktive Eigenschaft dieses Materials erklären.

Zahlreiche Studien haben die Augmentation von Knochendefekten mit KEM wissenschaftlich untersucht (Araujo et al., 2002, Schwarz et al., 2008) und sind zum Resultat gekommen, dass die porige Struktur am Empfängerknochen hauptsächlich von Weichgewebe umgeben ist und es nur an der Basis des Materials zur Knochenneubildung kommt. Araujo et al. sprechen von einer inkompletten Defektregeneration (Araujo et al., 2002). Die Verzögerung der

Wundheilung innerhalb der Extraktionsalveole nach Versorgung des Defektes mit KEM wurde nachgewiesen (Lindhe et al., 2014). Lindhe et al. zeigten dabei durch Biopsien sechs Monate nach Ridge Preservation, dass Partikel des KEM nicht resorbiert wurden aber von neu gebildetem Knochengewebe umgeben waren. Dieser Vorgang könnte auch erklären, weshalb mit KEM aufgefüllte Alveolen nicht den physiologischen Resorptionsvorgängen ausgesetzt sind (Lindhe et al., 2014). Dennoch haben Implantate in lokal augmentierten Regionen eine vergleichbare Prognose zu Implantaten die im AB inseriert worden sind (Esposito et al., 2009).

autogen	vom Patienten selbst
syngen, isogen	von genetisch identischen Individuen
allogen	von einem Individuum der gleichen Spezies (Mensch)
xenogen	von einer anderen Spezies (z.B Rind)
phykogen	pflanzlichen Ursprungs
alloplastisch	synthetische Fremdmaterialien

Tabelle 1: Ursprünge von Knochenersatzmaterialien

1.3.3 Knochenaufbau mit autogenen Zahnwurzeln

Zahlreiche Studien zeigen, dass nach einer Replantation oder Autotransplantation von Zähnen eine Ersatzresorption und Ankylose an der Kontaktfläche zum Knochen entsteht (Andersson et al., 2009). Dieses Verfahren der Transplantation ist ein anerkanntes Vorgehen zur ästhetischen und funktionellen Rekonstruktion mit hoher klinischer Relevanz (Chung et al., 2014).

Der Begriff der dentoalveolaren Ankylose beschreibt dabei die Interaktion zwischen dem Wurzeldentin und dem Alveolarknochen nach Verlust des Parodontalen Ligaments (PDL) (Andersson et al., 2009). Dieser Verlust kann neben der absichtlichen Extraktion mit anschließender Replantation oder Autotransplantation auch durch eine traumatische Avulsion bedingt sein. Das Resultat dieses Vorgangs ist der Ersatz des Wurzeldentins durch Knochen an der Kontaktfläche (Hammarstrom et al., 1989, Andersson et al., 2009). Dieses Merkmal des Dentins ist nur eines seiner vielfältigen Eigenschaften, die in zahlreichen Studien erforscht wurden (Linde, 1989). Seine strukturelle Ähnlichkeit zum Knochengewebe lässt diesem Bestandteil der Zahnhartsubstanz immer mehr Anerkennung als alternatives Knochenaufbaumaterial zukommen (Schwarz et al., 2016a, Schwarz et al., 2016b, Bormann et al., 2012). Denn das Dentin, als größter Anteil des menschlichen Zahnes, besteht zu 69,3 Gewichtsprozent aus anorganischem und zu 17,5 Gewichtsprozent aus organischem Material (siehe Tab.2). Analoge Werte zeigt das Knochengewebe mit 62,0 Gewichtsprozent anorganischer und 25,0 Gewichtsprozent organischer Substanz. Auch der Wassergehalt ist in beiden Matrices fast identisch: Dentin 13,2%, Knochengewebe 13% (Leonhardt, 1990).

	Anorganische Substanz	Organische Substanz	Wasser
Knochen	62,0%	25,0%	13,0%
Dentin	69,3%	17,5%	13,2%
Schmelz	96,0%	1,7%	2,3%

(Leonhardt, 1990)

Tabelle 2: Zusammensetzung der Zahnhartsubstanz

Im Gegensatz dazu handelt es sich beim Schmelz mit 96,0 Gewichtsprozent um eine überwiegend anorganische Matrix. Das Wurzelzement zeigt mit seiner anorganischen Substanz von 65,0 % einen analogen Aufbau zu einem schwach mineralisierten Geflechtknochen (Leonhardt, 1990). Das Dentin gleicht durch seine osteokonduktive und -induktive Eigenschaft dem Knochengewebe in einem weiteren Punkt, denn die Dentinmatrix enthält Knochen-Morphogenese Proteine, welche für die Knocheninduktion von essentieller Bedeutung sind (Andersson et al., 2009, Linde, 1989). Hierbei wird seine organische Substanz von Typ-I Kollagenfasern dominiert, welche ihm neben der Härte auch elastische Eigenschaften verleihen. Daneben finden sich außerdem nicht-kollagene Proteine wie zum Beispiel Phosphoproteine, Osteocalcin, Proteoglykane und Glykoproteine (Linde, 1989). In zahlreichen tierexperimentellen Studien konnte aufgrund dieser Eigenschaften eine homogene Integration der Augmentate in

den ossären Remodellierungsvorgang nachgewiesen werden (siehe Abb. 2). Hürzeler et al. haben im Rahmen eines tierexperimentellen Versuchs den Erhalt der bukkalen Lamelle durch eine inkomplette Extraktion von Zähnen mit Belassen der vestibulären Zahnwurzel und anschließender Implantation in unmittelbarer Nachbarschaft zum Wurzelfragment mit Erfolg nachgewiesen (Hürzeler et al., 2010). Histologisch konnte die Regeneration unterschiedlichster Defekttypen nach Wurzelaugmentationen verifiziert und eine deutliche Ersatzresorption nachgewiesen werden (Qin et al., 2014, Schwarz et al., 2013). Diese Eigenschaften sind Grund für die Entstehung der Hypothese, dass Dentin als alternatives Augmentationsmaterial beim Menschen in Frage kommen könnte.

Um dieser Idee nachzugehen wurden in aktuellen tierexperimentellen Studien die Wirksamkeit von autogenen Zahnwurzelfragmenten zur Verbreiterung des Kieferkammvolumens erfolgreich untersucht (Schwarz et al., 2016b, Becker et al., 2016). In einem ersten Pilotversuch am Menschen wurde dieses Verfahren des lateralen Kieferkammaufbaus mit Zahnwurzelfragmenten und sekundärer Implantation erfolgreich durchgeführt (Schwarz et al., 2016c). Der auf diese Weise neu gebildete Knochen stellte eine suffiziente Basis für die Insertion von enossalen Implantaten dar. Zudem konnten durch histologische Untersuchungen die Neubildung von Zement an der Kontaktfläche zwischen Wurzel dentin und Implantat verifiziert werden. Die Neubildung von PDL um das Implantat ausgehend von dem PDL der belassenen Wurzel wurde ebenfalls beobachtet (Warrer et al., 1993, Buser et al., 1990). Dabei befinden sich die Bindegewebszellen zur Bildung von Wurzelzement in dem PDL (Karring et al., 1985). Bereits acht Wochen nach Implantatinsertion in unmittelbarem Kontakt zu

einem Zahnwurzelfragment, konnte histologisch die Bildung von atubulärem Reparationsdentin, ausgehend von dem Wurzelzement nachgewiesen werden. Hierbei stellte das Reparationsdentin eine enge Verbindung zu der angrenzenden Implantatoberfläche her (Schwarz et al., 2013).

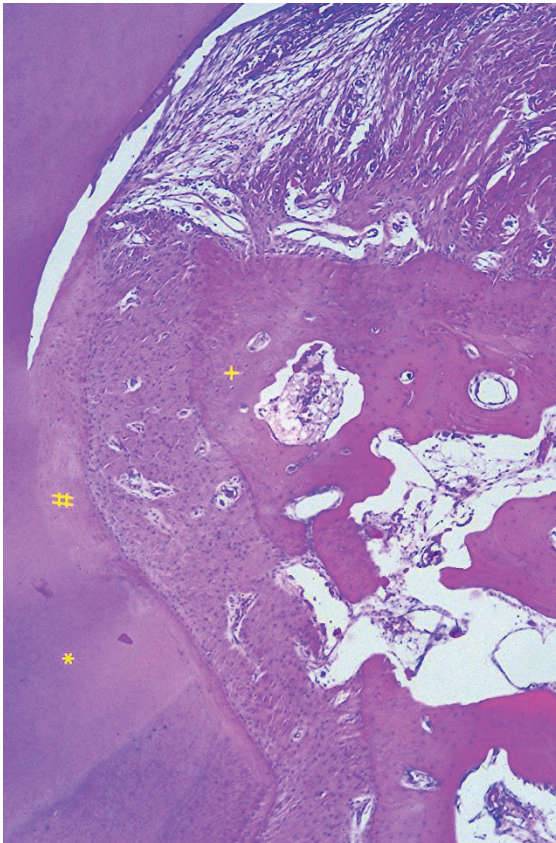


Abbildung 2: Histologischer Nachweis für die strukturelle Ähnlichkeit von Dentin, Wurzelzement und Knochengewebe

Quintessenz Verlag Quintessenz (68) 2017, Nr. 12; 1393-1398

Dentin () und Wurzelzement (#) zeigen ähnliche histologische Charakteristika wie das Knochengewebe (+) im Bereich des Alveolarfortsatzes (Tiermodell, Hämatoxylin-Eosin-Färbung)*

1.4 Implantationszeitpunkte

Um den korrekten Zeitpunkt einer Implantatinsertion auswählen zu können sind die Hart- und Weichgewebssituation an der geplanten Implantatregion die entscheidenden Faktoren. Unterschieden werden dabei zwischen den Zeitpunkten der Sofortimplantation, der verzögerten Sofortimplantation und dem Zeitpunkt der Spätimplantation.

1.4.1 Das Prinzip der Sofortimplantation

Sofortimplantation heißt, dass unmittelbar nach Zahnextraktion eine Implantation in die Extraktionsalveole erfolgt (siehe Abb. 3). Ab diesem Zeitpunkt beginnen die physiologischen Prozesse des Hart- und Weichgewebsumbaus (Schropp et al., 2003). In früheren Jahren nahm man an, dass die Implantation in eine frische Extraktionsalveole die physiologischen Remodellierungsvorgänge verhindern würde (Paolantonio et al., 2001). Vorausgegangene tierexperimentelle Studien zeigten, dass ähnliche Resorptionsprozesse sowohl in den Alveolarwänden nach Zahnextraktion als auch bei Sofortimplantationen auftreten. In beiden Fällen unterlag die bukkale Alveolarwand stärkeren Resorptionen (Araujo et al., 2005).

1.4.2 Das Prinzip der verzögerten Sofortimplantation

Der Zeitpunkt der verzögerten Sofortimplantation beträgt 6-8 Wochen nach Extraktion (siehe Abb.3). Zum Zeitpunkt der Implantation ist die Schleimhaut über der Extraktionsalveole verschlossen, jedoch ist die Phase der Knochenregeneration noch nicht abgeschlossen. Der Prozess der physiologischen Knochenresorption hat durch den Verlust der Knochenlamelle negative Auswirkungen auf die Weichgewebkontur. Um den Weichgewebseinfall in den Knochen zu verhindern und die knöchernen Regeneration zu unterstützen, kann mit Weichgewebstransplantaten oder KEM gearbeitet werden. Dieses Verfahren nennt sich Ridge Preservation und dient der Vorbereitung des Knochen- und Weichgewebsangebotes vor Implantatinsertion zu einem späteren Zeitpunkt (siehe Abb.5).

1.4.3 Das Prinzip der Spätimplantation

Eine Spätimplantation erfolgt in den vollständig regenerierten Knochen (siehe Abb.3). Dies kann je nach Anzahl der Wurzeln des extrahierten Zahnes und je nach periapikalem Befund mehrere Monate dauern. Wenn bei dem Patienten nach Zahnextraktion aufgrund von privaten Gründen (z.B. Schwangerschaft, finanziell bedingte Situation etc.) nicht nach 6-8 Wochen implantiert werden kann, kann das Prinzip einer Spätimplantation erfolgen.

1.5.2 Implantation nach Kieferkammaugmentation

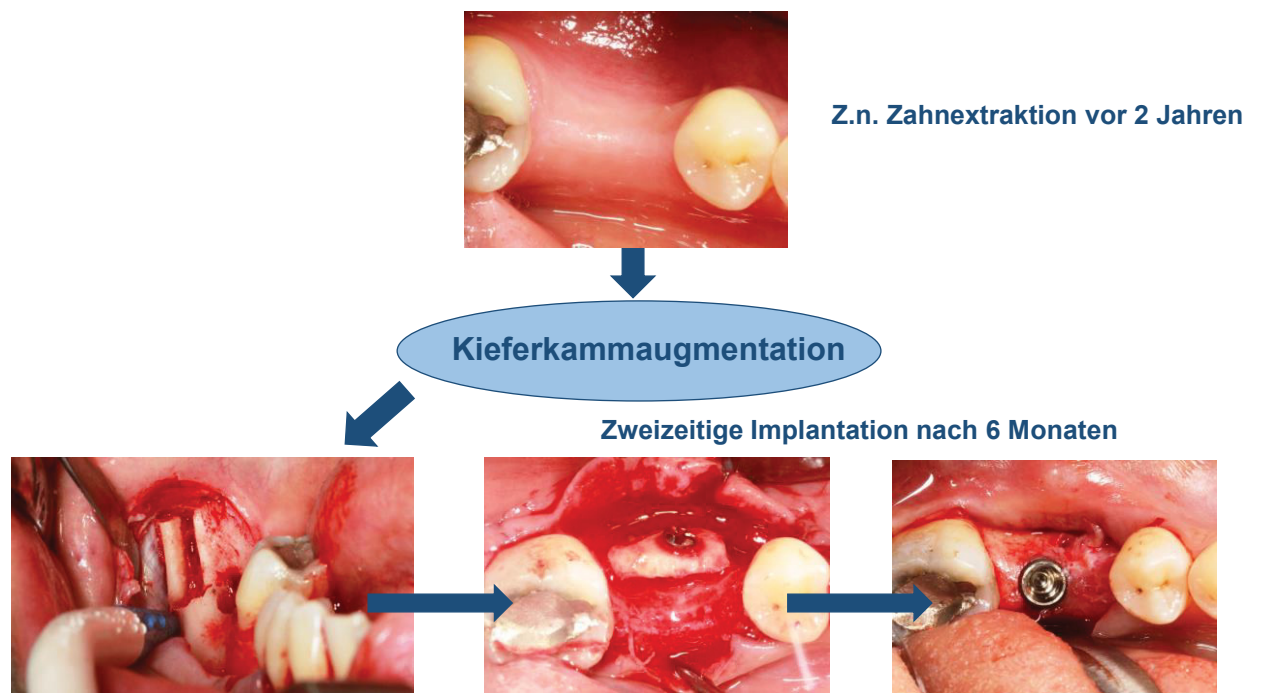


Abbildung 4: Kieferkammaugmentation mit anschließender Implantation

Klinische Bilder: Original aus dem Archiv der Westdeutschen Kieferklinik, Düsseldorf

1.5.3 Implantation nach Ridge Preservation

Hart- und Weichgewebsdefizite



Ridge Preservation

Verzögerte Sofortimplantation

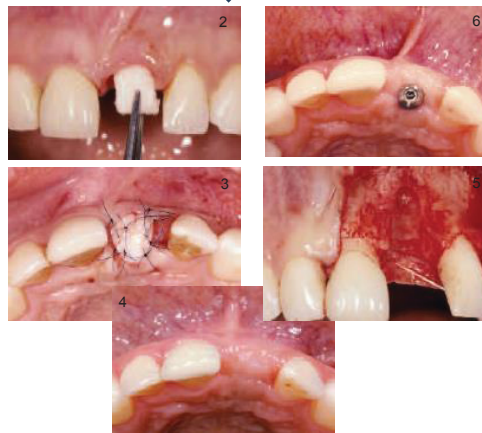


Abbildung 5: Ridge Preservation mit anschließender Implantation

Aus der Unternehmensbroschüre „Therapiekonzepte für Extraktionsalveolen“, Geistlich Biomaterials (31275.2/0804/d),

Klinisches Bild (1): Original von Dr. Karl-Ludwig Ackermann

Klinisches Bild (2,3,4,5,6): Original von Dr. Roland E. Jung

1.5.4 Implantation nach Zahnwurzelaugmentation

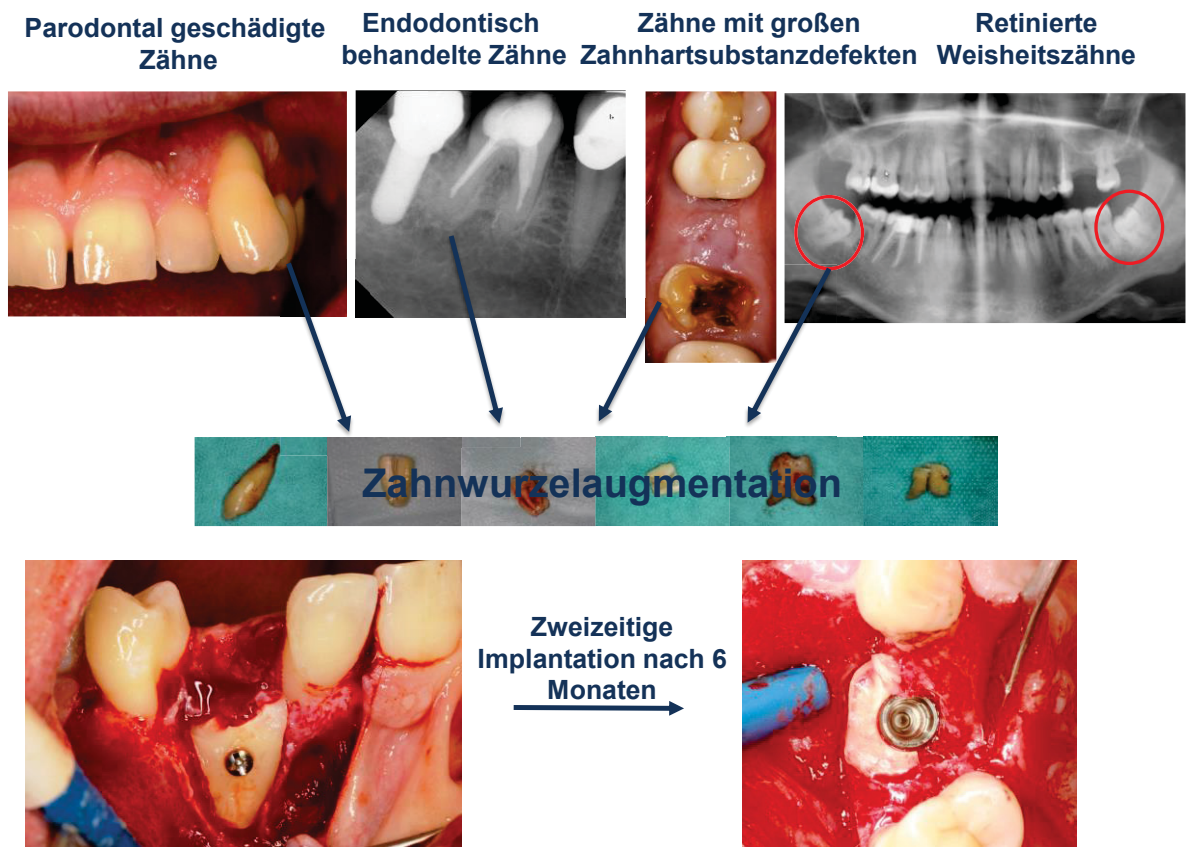


Abbildung 6: Zahnwurzelaugmentation mit anschließender Implantation

Klinische Bilder: Original aus dem Archiv der Westdeutschen Kieferklinik Düsseldorf

1.6 Von der Osseointegration zur Entstehung des Begriffes der Dentointegration

Branemark definierte den Begriff der Osseointegration, um seine Beobachtungen über den Knochen-Implantat-Kontakt (BIC) zu beschreiben (Branemark et al., 1977). Dieses Phänomen ist histologisch nachgewiesen und beweist, dass im BIC kein Bindegewebe und keine nicht knöchernen Strukturen vorhanden sind (Albrektsson, 1983). Innerhalb des BIC bildet sich nach Implantatinsertion zunächst eine provisorische Matrix, welche aus Blutgefäßen, pluripotenten Zellen und Kollagenfasern besteht. Diese Matrix wird im Laufe des Heilungsprozesses durch Geflechtknochen ersetzt. Im weiteren Verlauf bildet sich dann fibröser und lamellärer Knochen (Schwarz et al., 2007). Branemark definierte die Interaktion zwischen Knochen, Implantat und Implantatlager als eine mechanische Einheit (Branemark et al., 1969). Ausgehend von dem Wissen, dass Dentin und Knochengewebe eine strukturelle Ähnlichkeit aufweisen, wurden in Studien die Interaktion zwischen Implantat und Dentin untersucht. Nachgewiesen wurde eine erfolgreiche Implantatheilung in der Kontaktzone zwischen der belassenen Zahnwurzel und dem Implantat (DIC) (Schwarz et al., 2016b, Schwarz et al., 2016a, Hurzeler et al., 2010, Buser et al., 1990, Warrer et al., 1993). Die Apposition von neuem Wurzelzement im DIC und auch die Ausbildung eines PDL wurde auf der Implantatoberfläche nachgewiesen (Warrer et al., 1993, Buser et al., 1990). Schwarz et al. haben gezeigt, dass die mittlere prozentuale mineralisierte Kontaktzone zwischen Wurzel dentin und Implantatoberfläche 67,4% beträgt. Einen vergleichbaren Wert hat die mineralisierte Kontaktzone zwischen Implantat und Knochen von 63,5%. Darüber hinaus konnte die

Ausbildung von Hartgewebe in der Kontaktzone zwischen Wurzel- und Implantatoberfläche beobachtet werden (Schwarz et al., 2013). Aus dieser Ähnlichkeit zwischen DIC zu BIC ist der Begriff der Dentointegration entstanden. Dieses Wort beschreibt das analoge Verhältnis zwischen DIC und BIC (Schwarz et al., 2013, Schwarz et al., 2016a).

In klinischen Problemsituationen, wie zum Beispiel einer Zahnwurzelankylose in geplanter Implantatregion, kann das Wurzelfragment als Implantatlager verwendet werden. Diverse Studien berichten über hohe Erfolgsraten dieses Verfahrens (Davarpahah and Szmukler-Moncler, 2009, Davarpanah and Szmukler-Moncler, 2009, Davarpanah et al., 2015). Darüber hinaus können Wurzeln von extrahierten Zähnen zur Defektrekonstruktion verwendet werden (siehe Abb.6). Dieses Verfahren wurde in einem tierexperimentellen Versuch erfolgreich beschrieben (Schwarz et al., 2016a). Eine Pilotstudie am Menschen zeigte die suffiziente Implantation eines enossalen Implantates nach lateralem Kieferkammaufbau mit einer Zahnwurzel (Schwarz et al., 2016c).

1.7 Fragestellung

Kann durch die Zahnwurzelaugmentation die horizontale Dimension des Kieferkamms zur Insertion eines adäquaten endossalen Implantates suffizient verbreitert werden?

2 Material & Methoden

2.1 Studienprotokoll und Studiendesign

Im Rahmen der Studienplanung wurde ein Studienprotokoll verfasst, welches der Ethikkommission vorgelegt und von dieser am 30.11.2015 bewilligt wurde. Die Studiennummer lautet 4837R. Neben der Fragestellung und Zielsetzung enthält das Studienprotokoll Informationen zur Methodik und zum Studiendesign. Die Dauer der Studie erfolgte von März 2016 bis Januar 2018. Es handelt sich um ein dreiarmliges Studiendesign. In der ersten Gruppe wurden Patienten mit bereits defizitärem Knochen lateral mit Zahnwurzeln von impaktierten, retinierten oder überflüssigen Zähnen augmentiert. Die zweite Gruppe stellte die Kontrollgruppe mit autogenem Knochenblock aus dem Kieferwinkel dar. In der dritten Gruppe wurden defizitäre Extraktionsalveolen mit Zahnwurzeln des extrahierten Zahnes lateral augmentiert. Die vorliegende wissenschaftliche Arbeit befasst sich mit dem dritten Arm dieser prospektiven Fallstudie.

2.1.1 Studienpatienten

Die Rekrutierung der Studienpatienten erfolgte in der Ambulanz der Poliklinik für Zahnärztliche Chirurgie und Aufnahme der Westdeutschen Kieferklinik Düsseldorf. Es ist ein Patientenkollektiv von 15 Patienten, die im Hinblick auf die Studienkriterien geeignet waren, entstanden. Bei allen Patienten war eine Implantatversorgung, aufgrund einer unzureichenden Breite des Kieferkamms, ohne vorherige Kieferkammaugmentation nicht möglich gewesen.

2.1.1.1 Extrahierte Zähne

Im Rahmen der Studie wurden 15 Zähne extrahiert und im selben Eingriff wurden die Zahnwurzeln bearbeitet, in die jeweilige Defektregion angepasst und mittels Osteosyntheseschrauben fixiert.

Von den eingeschlossenen 15 Studienpatienten (siehe Abb.7) wurden sieben zuvor endodontisch vorbehandelte Zähne verwendet; diese wiesen zum Studienzeitpunkt apikale Entzündungen auf und waren nicht mehr erhaltungswürdig. Vier Patienten hatten Zähne mit großen Zahnhartsubstanzdefekten, deren Zahnwurzeln gesunde Substanz aufwiesen. Drei der eingeschlossenen Studienpatienten hatten frakturierte Zähne, welche extrahiert werden mussten. Ein Studienpatient hatte einen nichterhaltungswürdigen parodontal geschädigten Zahn.



Abbildung 7: Extraktionsindikation der Zähne in der Studie

2.1.2 Einschlusskriterien

Die folgenden Kriterien wurden ausnahmslos bei allen Studienpatienten beachtet. Eingeschlossen wurden Patienten, die

- im Alter zwischen 18 und 60 Jahren waren und anamnestisch keine Besonderheiten aufwiesen
- Nichtraucher waren
- ein unzureichendes horizontales Knochenvolumen vor Implantation hatten
- eine gesunde orale Mukosa mit mind. 3 mm keratinisierter Mukosa in geplanter Implantatregion hatten

2.1.3 Ausschlusskriterien

Die folgenden Kriterien wurden ausnahmslos bei allen Studienpatienten beachtet.

Ausgeschlossen wurden Patienten, die

- generelle Kontraindikationen für zahnmedizinische Eingriffe aufwiesen
- einen dünnen mukosalen Biotyp (<1mm) oder entzündliche/ autoimmune Erkrankungen der oralen Mukosa hatten
- an Erkrankungen wie Diabetes mellitus, Multiplem Myelom, Karzinom im oberen Respirationstrakt, Brustkrebs, Karzinom der Prostata oder der Niere angaben
- eine Chemotherapie und / oder Radiotherapie in der Anamnese der letzten 5 Jahre angaben

- aktuelle oder vorhergegangene Radiotherapien im Kopf-Hals Bereich aufwiesen
- eine Einnahme von Bisphosphonaten, Immunsuppressiva oder eine Hochdosis-Kortikosteroidtherapie in der Vergangenheit oder aktuell angaben
- Raucher waren
- schwanger waren oder sich in der Stillzeit befanden
- weiblich waren und einen Kinderwunsch angaben
- an einer weiteren Studie, innerhalb der letzten 24 Wochen vor dem Start dieser Studie teilgenommen haben

2.2 Untersuchungsplan

Im Rahmen dieser klinischen Studie wurden alle Patienten in zeitlich durch das Studienprotokoll fest vorgegebenen Abständen untersucht. Die Erfassung der Untersuchungsergebnisse erfolgte mit Hilfe von standardisierten Studienunterlagen. Zur Verschleierung der Patientenidentität wurden die Patientenangaben pseudonymisiert und jedem Patienten wurde eine Nummer zugewiesen. Alle chirurgischen Eingriffe wurden durch denselben, auf dem Gebiet der Oralchirurgie erfahrenen Operateur durchgeführt. Bei allen Kontrolluntersuchungen wurden intraorale Fotos von okklusaler und bukkaler Ansicht angefertigt. Insgesamt waren sechs Kontrolltermine im Studienprotokoll bis zur Implantation fest vorgegeben. Am siebten und achten Untersuchungstermin erfolgte die Anpassung und Festsetzung der Suprakonstruktion auf dem Implantat.

2.2.1 Erster Untersuchungstermin - Studienaufnahme

Nach Einschluss des Patienten in die Studie wurde dieser im Rahmen der ersten Untersuchung über den operativen Eingriff aufgeklärt. Alternative Behandlungsmethoden, das Risiko von Nerv-, Weichteil- und Nachbarzahnschädigungen wurden ausführlich besprochen. Die Möglichkeit der fehlenden Einheilung des Augmentats wurde dem Patienten erklärt und ihm wurde erläutert, dass im Falle eines solchen Misserfolges eine Implantation in der geplanten Region nicht möglich ist. Allgemeine Risiken wie Schwellung, Schmerz, Wundheilungsstörung, Nachblutung und die Entstehung von Hämatomen wurden ebenfalls besprochen und schriftlich festgehalten. Neben der intraoralen Fotodokumentation wurden die Anamnese und der Zustand der Mundhygiene von allen Patienten in den dafür vorgesehenen Feldern der Studienunterlagen notiert.

2.2.2 Zweiter Untersuchungstermin – Erster chirurgischer Eingriff bzw. Augmentation

Mindestens 24 Stunden nach Aufklärung des Patienten über das chirurgische Vorgehen wurde der Eingriff durchgeführt. Eine Stunde vor dem operativen Eingriff wurde prophylaktisch eine einmalige Gabe eines Antibiotikums (Amoxicillin bei Patienten <70kg 2g, Patienten >70kg 3g oder Clindamycin 600mg) und eines Kortison-Präparates (Prednisolon 20mg) bei jedem Patienten verabreicht. Der gesamte chirurgische Eingriff wurde fotodokumentiert, die Messungen der Kieferkammbreite vor und nach Augmentation wurden notiert und darüber hinaus wurden das gesamte chirurgische Vorgehen und die OP-

Dauer schriftlich festgehalten. Eine postoperative Aufklärung und Mundhygieneinstruktion der Patienten wurde vorgenommen.

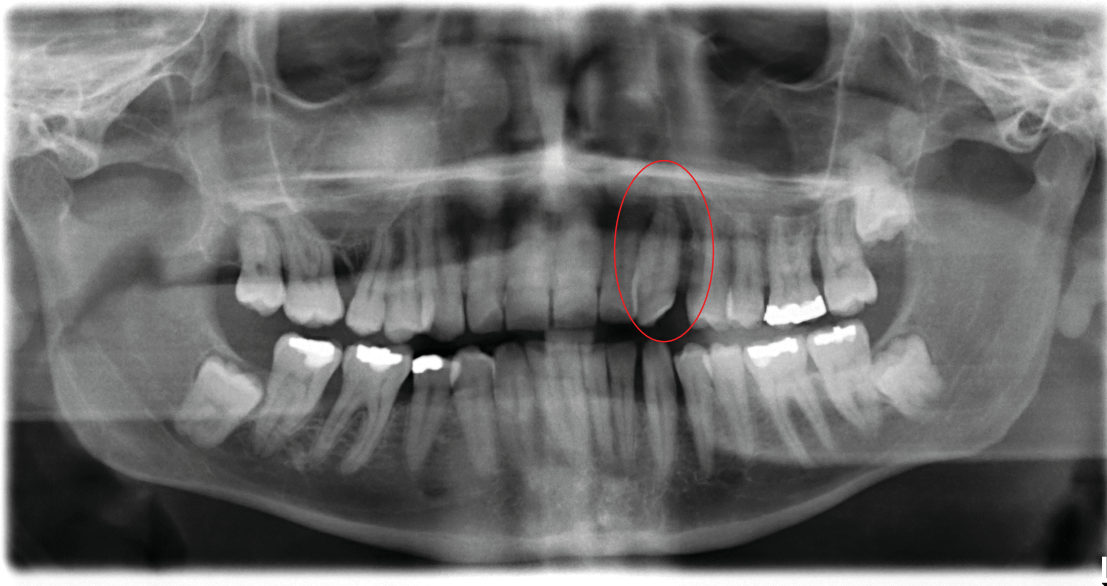
Die örtliche Betäubung wurde durch Articain mit Zusatz von Vasokonstriktoren (Ultracain D-S forte 1:100.000) durchgeführt. In allen Eingriffen wurde eine Lappenpräparation mit Erstellung eines Mukoperiostlappens vorgenommen, um den Empfängerknochen darzustellen.

Das Augmentat wurde in seiner Größe und Form an die Defektausdehnung angepasst und zentral mit einem Bohrer perforiert (Durchmesser 1,2mm).

Eine Titanschraube (Medicon® Durchmesser 1,5mm, Länge 9mm) wurde zur Befestigung des nativen Knochenblocks an der Empfängerregion verwendet. Auf einen zusätzlichen Knochenaufbau mittels KEM wurde bei allen Studienpatienten verzichtet. Abschließend erfolgte eine primäre plastische Deckung unter Einsatz eines modifizierten Mukoperiostlappens.



A



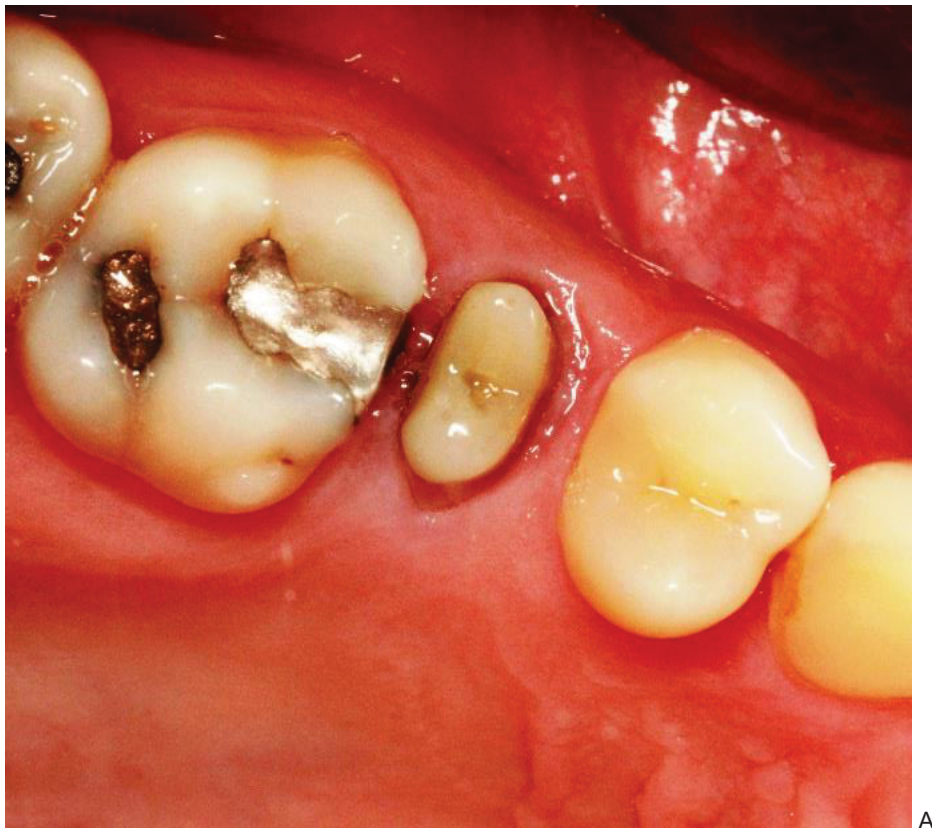
B

Abbildung 8: Zustand vor Extraktion des Zahnes 23 (Patientenfall I)

Parodontal geschädigter Zahn 23 zur Verwendung als laterales Augmentationsmaterial.

A) *Klinisches Bild aus der okklusalen Ansicht.*

B) *Röntgenologisches Bild mit zirkulär erkennbaren vertikalen Knocheneinbrüchen.*



A



B

Abbildung 9: Zustand vor Extraktion des Zahnes 25 (Patientenfall II)

Endodontisch vorbehandelter Zahn mit V. a. eine chronisch apikale Parodontitis zur Verwendung als laterales Augmentationsmaterial.

A) *Klinisches Bild aus okklusaler Ansicht.*

B) *Röntgenologisches Bild mit klar erkennbarem apikalem Entzündungsprozess.*

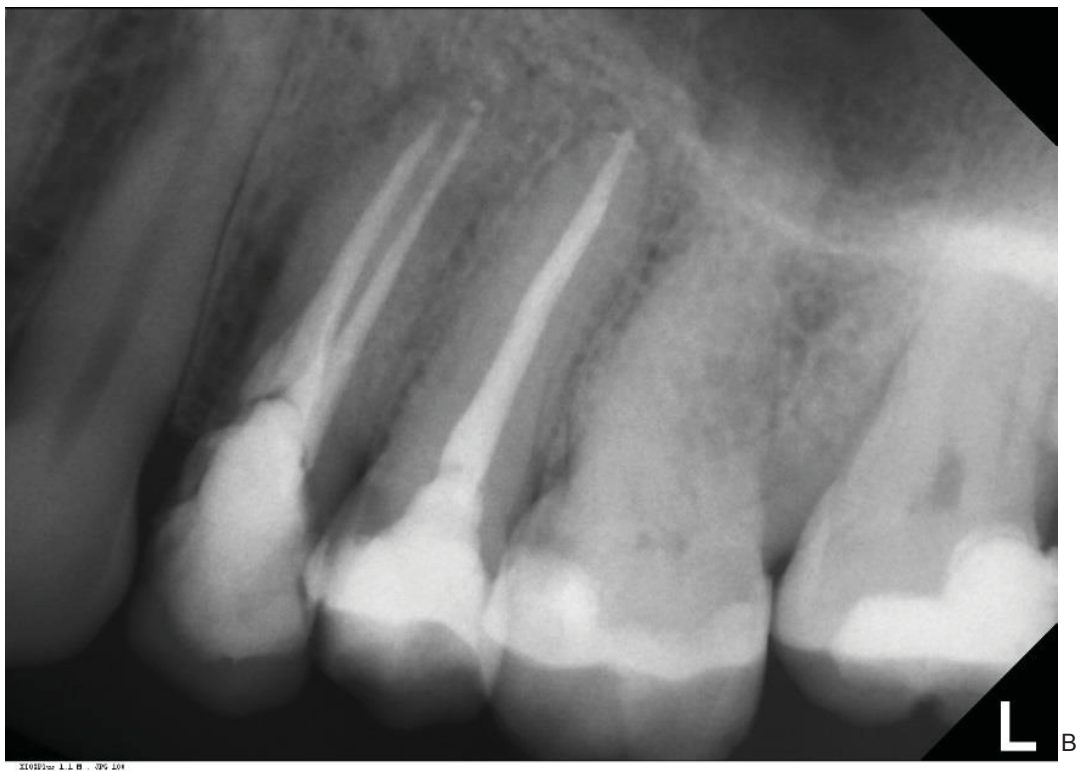
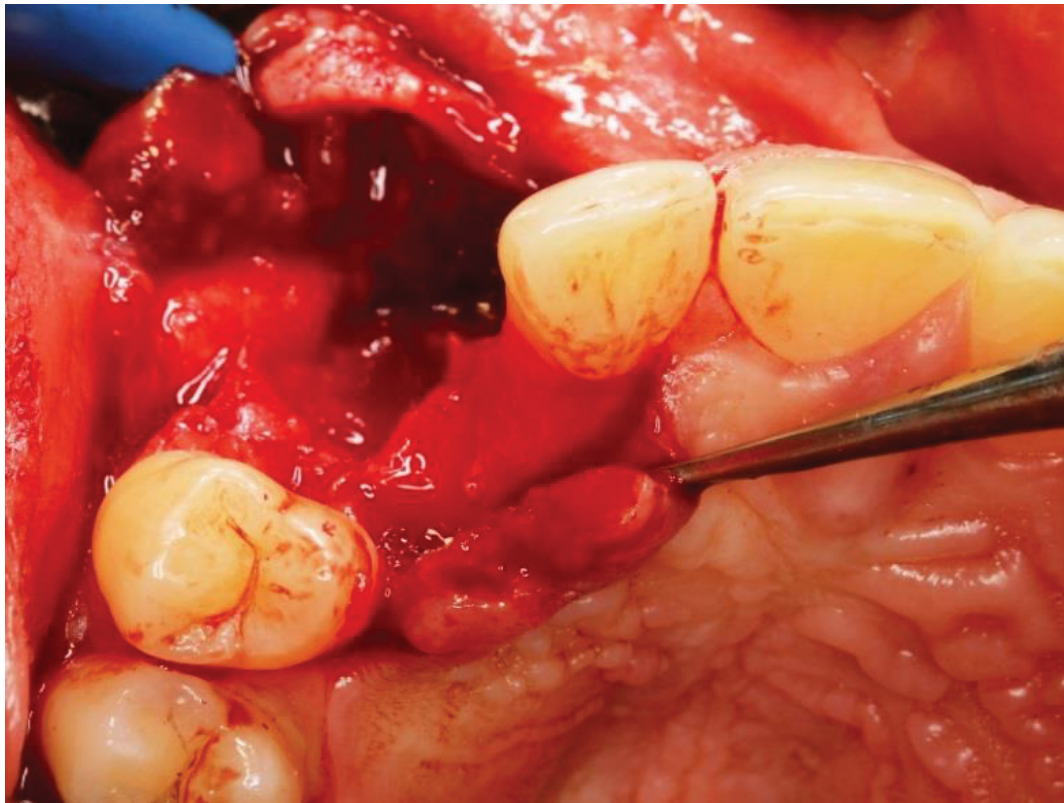


Abbildung 10: Zustand vor Extraktion des Zahnes 24 (Patientenfall III)

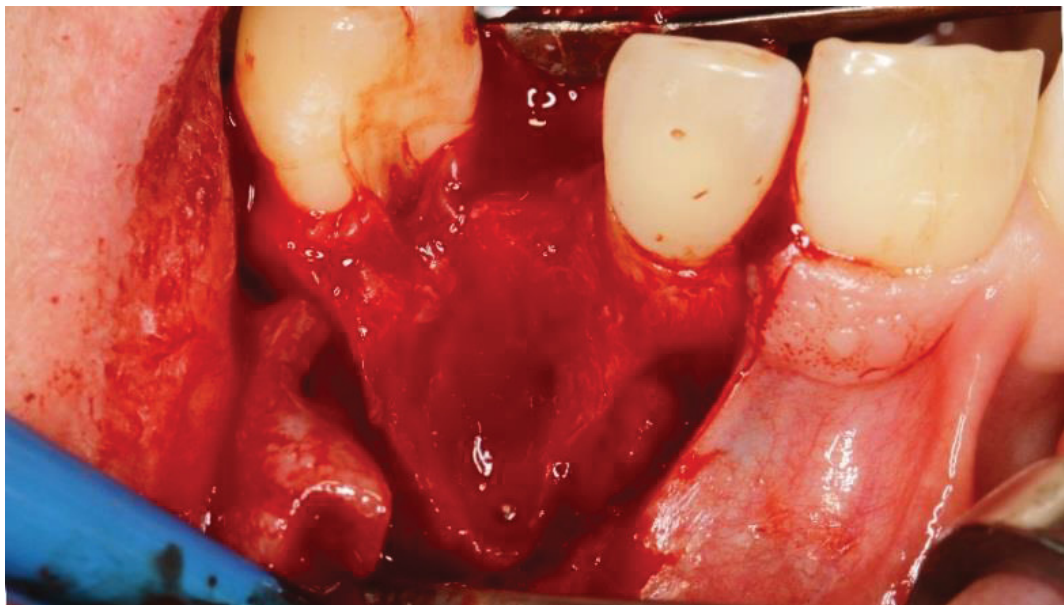
Endodontisch vorbehandelter Zahn 24 mit V. a. eine chronisch apikale Parodontitis, zur Verwendung als laterales Augmentationsmaterial.

A) Klinisches Bild vor Extraktion des Zahnes aus okklusaler Ansicht.

B) Präoperatives Röntgenbild zur Darstellung des Entzündungsprozesses apikal des Zahnes 24.



A

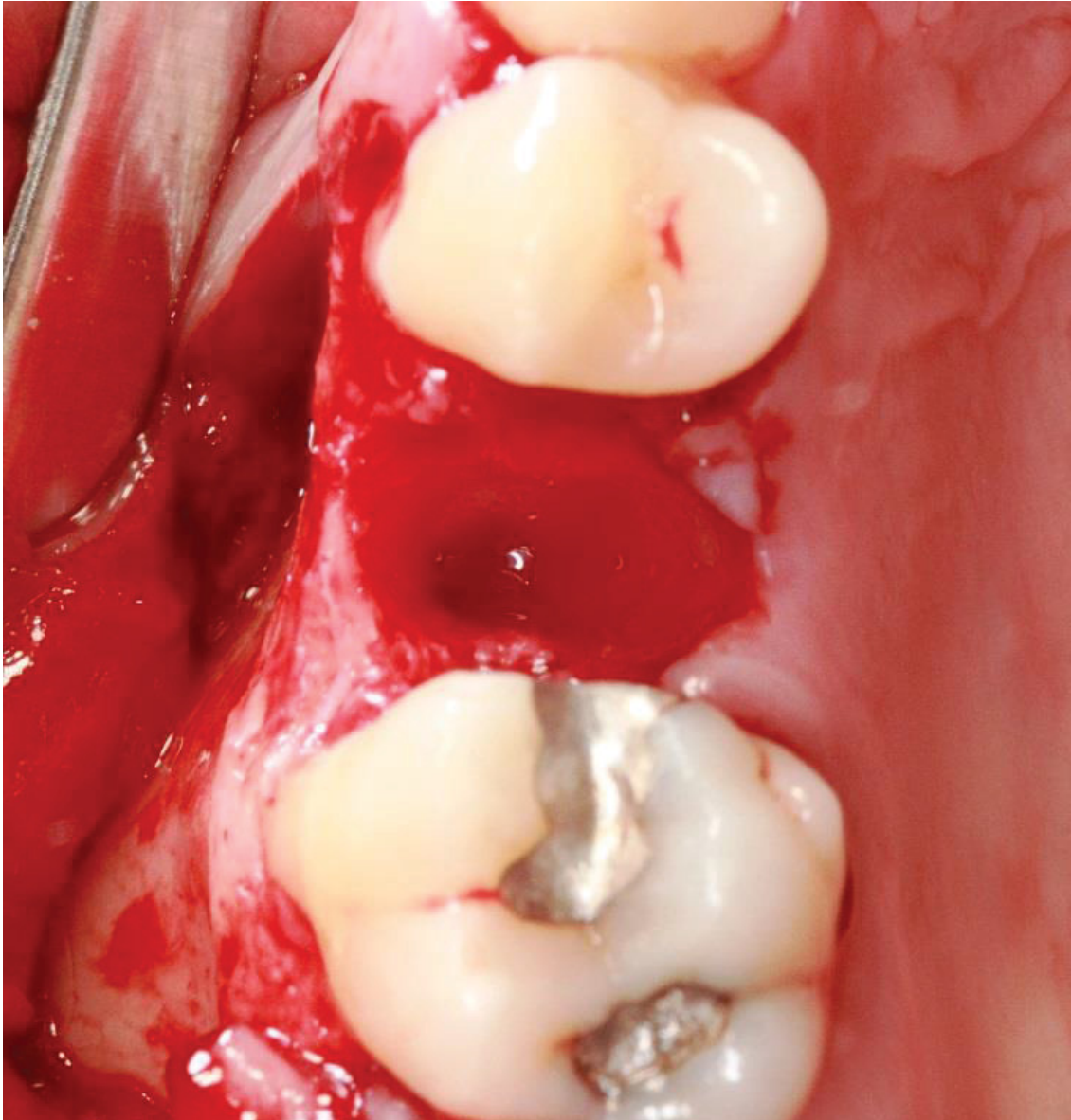


B

**Abbildung 11: Zustand der Extraktionsalveole in Regio 023 nach Extraktion des Zahnes
(Patientenfall I)**

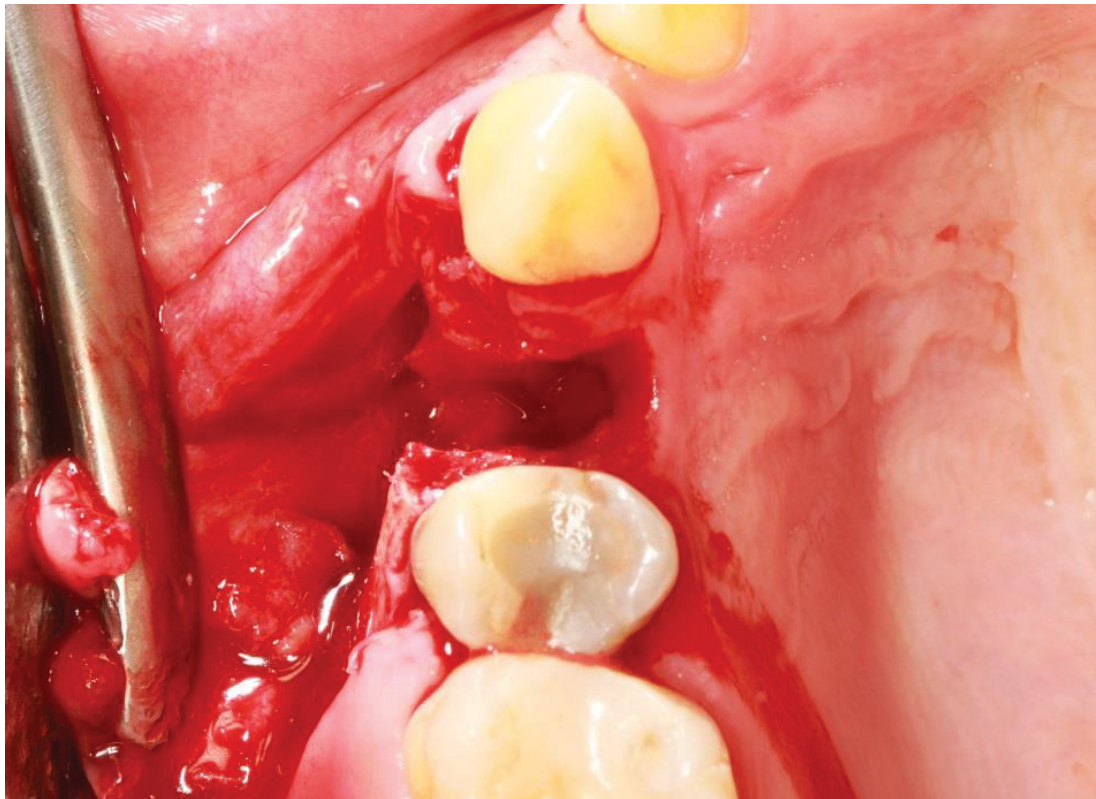
Bukkaler Dehiszenzdefekt in Regio 023

- A) *Intraoperatives Bild aus okklusaler Ansicht; der Verlust der gesamten bukkalen Lamelle ist ersichtlich.*
- B) *Intraoperatives Bild aus bukkaler Ansicht.*



**Abbildung 12: Zustand nach Extraktion des endodontisch vorbehandelten Zahnes 25
(Patientenfall II)**

Durch den physiologischen Remodellierungsprozess wird eine Resorption und damit einhergehende Abflachung der bukkalen Lamelle in Regio 025 erwartet.



A



B

Abbildung 13: Zustand der Extraktionsalveole in Regio 024 nach Extraktion des Zahnes (Patientenfall III)

A) *Bukkaler Dehiszenzdefekt aus okklusaler Ansicht.*

B) *Aus bukkalerr Ansicht ist der vertikale Knochendefekt deutlich zu erkennen.*

2.2.2.1 Bearbeitung der Zahnwurzel

Nach Extraktion (siehe Abb.11-13) des Zahnes und Trennung der Wurzel (siehe Abb.14, 15) von der Zahnkrone auf Höhe der Schmelz-Zement-Grenze, wurde die Wurzel an die Defektgröße angepasst. Eine vertikale Trennung der Zahnwurzel auf Höhe des Pulpenkanals wurde vorgenommen und im Falle einer infizierten Pulpa oder eines mit Wurzelfüllmaterial gefüllten Kanals, wurde eine Reinigung mit Handinstrumenten durchgeführt. Bei gesunden oder parodontal geschädigten Zähnen wurde die Zahnpulpa im Bereich der Wurzel erhalten. Ein primäres Ziel in der Zahnwurzelbearbeitung bestand darin, mittels Kugelfräse das Wurzelzement vollständig abzutragen und eine Dentinexposition an den basalen Kontaktzonen herzustellen, um eine Ankylose der Zahnwurzel am Empfängerknochen zu fördern. Die Augmentatoberfläche die zum Weichgewebe zugewandt war blieb dabei unberührt, da das Wurzelzement als Schutz der Zahnhartsubstanz vor Ersatzresorption dienen sollte. Nur bei parodontal geschädigten Zähnen wurde die Augmentatoberfläche komplett durch intensives Scaling und Wurzelglätten gereinigt, um sicherzustellen, dass keine bakteriellen Auflagerungen an der Wurzel gegeben waren. Die physiologische Auswölbung der Wurzelinnenfläche erlaubte, dass die interproximalen Flächen der Wurzel (mesial und distal) zum Empfängerknochen zugewandt waren. Die Fixierung des Wurzelfragments am Empfängerbett erfolgte mittels einer Osteosyntheseschraube aus Titan (Medicon®) mit der Länge 9mm und dem Durchmesser 1,5mm. Dazu wurde eine Vorbohrung mit einem Durchmesser von 1,2 mm durch die Wurzel vorgenommen (siehe Abb.16-18).



A



B

Abbildung 14: Zustand nach Extraktion und Bearbeitung des parodontal geschädigten Zahnes 23 (Patientenfall I)

A) Parodontal geschädigter Zahn 23 vor Trennung der Zahnkrone.

B) Nach Trennung der Zahnkrone auf Höhe der Schmelz-Zement-Grenze wurde eine vertikale Trennung der Wurzel durchgeführt.



A



B

Abbildung 15: Bearbeitung einer endodontisch vorbehandelten Zahnwurzel (Patientenfall II / III)

A) Nicht-erhaltungsfähiger Zahn mit Wurzelkanalfüllung.

B) Das Wurzelfüllmaterial lässt sich sehr einfach nach lateraler Perforation des Kanals entfernen.

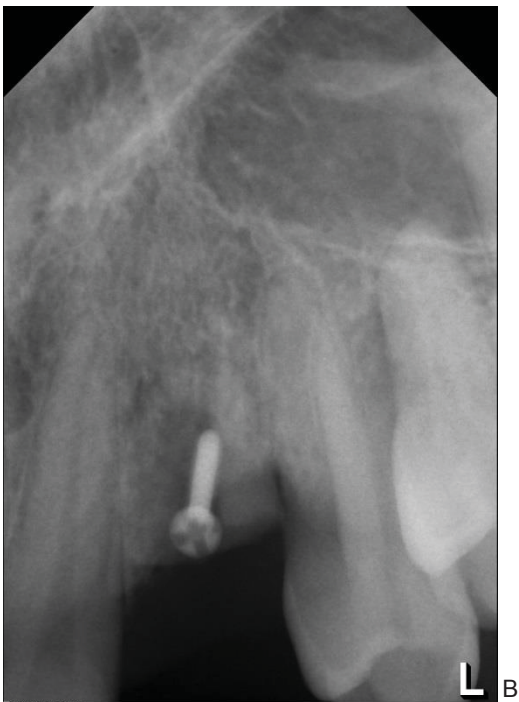
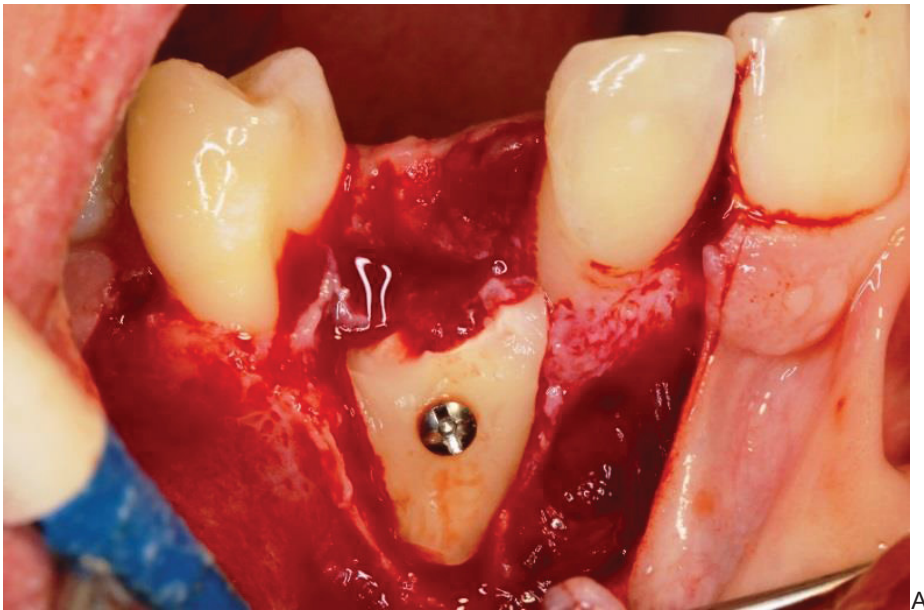
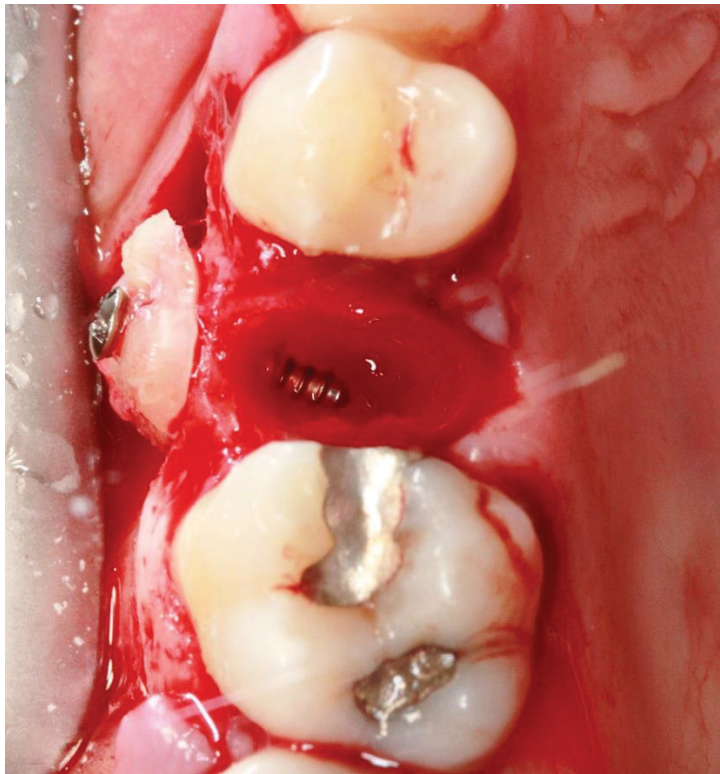


Abbildung 16: Fixierung der Zahnwurzel mittels Titanschraube an den Empfängerknochen in Regio 023 (Patientenfall I)

Direkte Augmentation eines bukkalen Knochendefekts mit der bearbeiteten und in die Defektregion angepassten Zahnwurzel.

- A) *Intraoperatives Bild aus bukkaler Ansicht mit erkennbarer Titanschraube zur Fixierung der Zahnwurzel.*
- B) *Postoperativer Zahnfilm zur Darstellung der Zahnwurzelaugmentation mittels Titanschraube.*



A

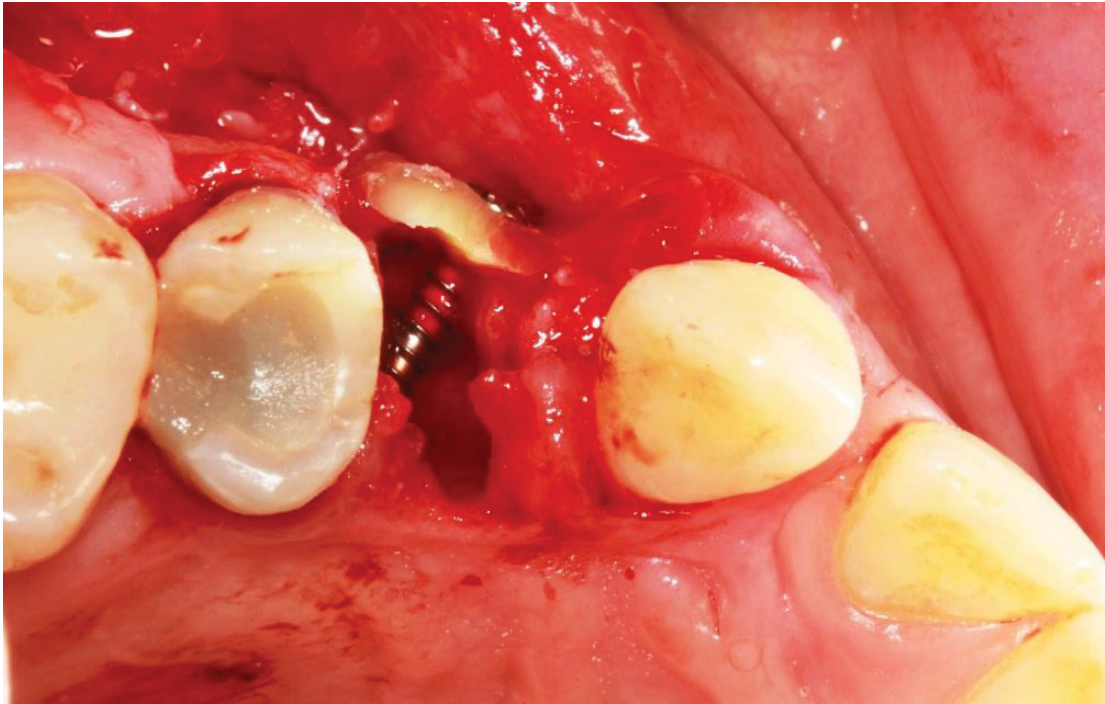


B

Abbildung 17: Fixation der Zahnwurzel an den Empfängerknochen in Regio 025 (Patientenfall II)

Direkte Augmentation eines bukkalen Dehiszenzdefektes unter Verwendung eines separierten Wurzelfragmentes des extrahierten Zahns.

- A) Intraoperatives Bild nach Fixierung der Zahnwurzel mittels Titanschraube in die Defektregion aus okklusaler Ansicht.*
- B) Darstellung der lateralen Augmentation mit autogener Zahnwurzel aus bukkaler Ansicht.*



A



B

**Abbildung 18: Fixation der Zahnwurzel lateral an den Dehiszenzdefekt in Regio 024
(Patientenfall III)**

- A) *Intraoperatives Bild aus okklusaler Ansicht. Die Zahnwurzel wurde an die Defektgröße angepasst und lateral mit einer Titanschraube fixiert.*
- B) *Intraoperatives Bild aus bukkaler Ansicht.*

2.2.2.2 Kieferkambbreite

Die Messung des Kieferkamms erfolgte vor und nach Wurzelaugmentation mit einer Schieblehre. Dabei wurde die mesio-distale Distanz von der Wurzeloberfläche des Nachbarzahnes zum Messpunkt notiert, um eine Reproduzierbarkeit des Messpunktes nach 26 Wochen zu ermöglichen. Gemessen wurde die horizontale Breite des Kieferkammes als Referenzwert zur Messung in 26 Wochen. Insgesamt wurden drei Messungen pro Patient erhoben: Messung vor Augmentation, Messung nach Augmentation und Messung der Kieferkambbreite 26 Wochen nach Augmentation.

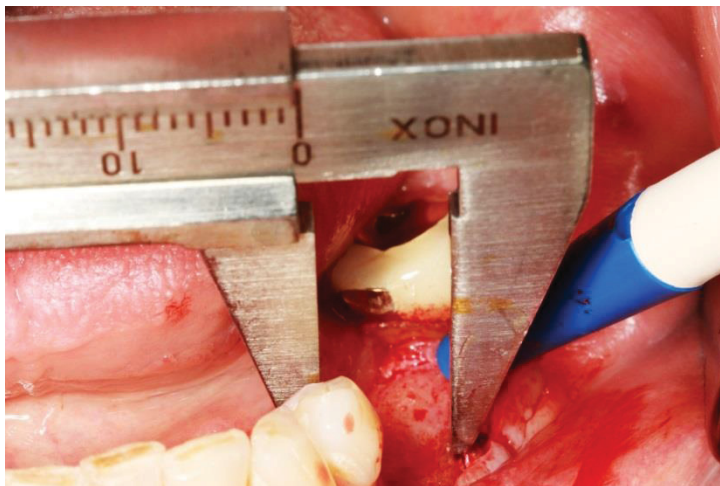


Abbildung 19: Schieblehre zur Messung der Kieferkambbreite in mm

2.2.2.3 Lappendesign

Das Lappendesign wurde nach folgenden Kriterien bewertet und das Vorgehen wurde in beiden chirurgischen Eingriffen dokumentiert:

- Inzision: krestal, bukkal, lingual

- Anzahl der Nachbarzähne die in die marginale Schnitfführung vor Durchführung des Entlastungsschnitts involviert waren
- Art der Lappenpräparation: Mukoperiostlappen, Mukosalappen
- Periostschlitzung (ja / nein)

2.2.2.4 Defektverschluss

Nach Augmentation / Implantation wurde das Weichgewebe adaptiert, um einen suffizienten Verschluss der Wunde zu gewährleisten. Folgende Aspekte wurden in den Studienunterlagen notiert:

- Nahttechnik
- Nahtmaterial

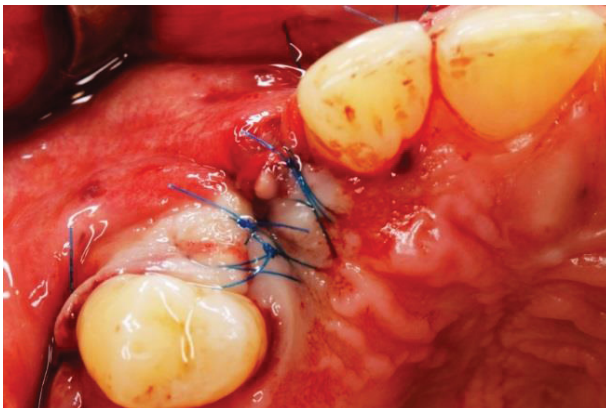


Abbildung 20: Plastische Deckung nach lateraler Augmentation in Regio 023 (*Patientenfall I*)

2.2.2.5 Weichgewebsheilung

Nach Augmentation wurde die Wundheilung kontrolliert. Klinisch wurde die Wunde auf Dehiszenzen untersucht. Im Falle einer Perforation der Schleimhaut durch das autogene Wurzelfragment, wäre nach erfolgloser Behandlung eine Entfernung des Fragmentes vorgenommen wurden.

2.2.3 Dritter Untersuchungstermin - Nahtentfernung

Der dritte Kontrolltermin fand zehn Tage nach Eingriff statt und bestand aus der Nahtentfernung und Spülung der Wunde mit Kochsalz. Die Heilung des Weichgewebes wurde im Hinblick auf Dehiszenzen untersucht (siehe Abb. 21). Vor und nach der Nahtentfernung wurden Fotos aus bukkaler und okklusaler Ansicht angefertigt. Der Patient wurde über die Mundhygieneinstruktionen aufgeklärt.

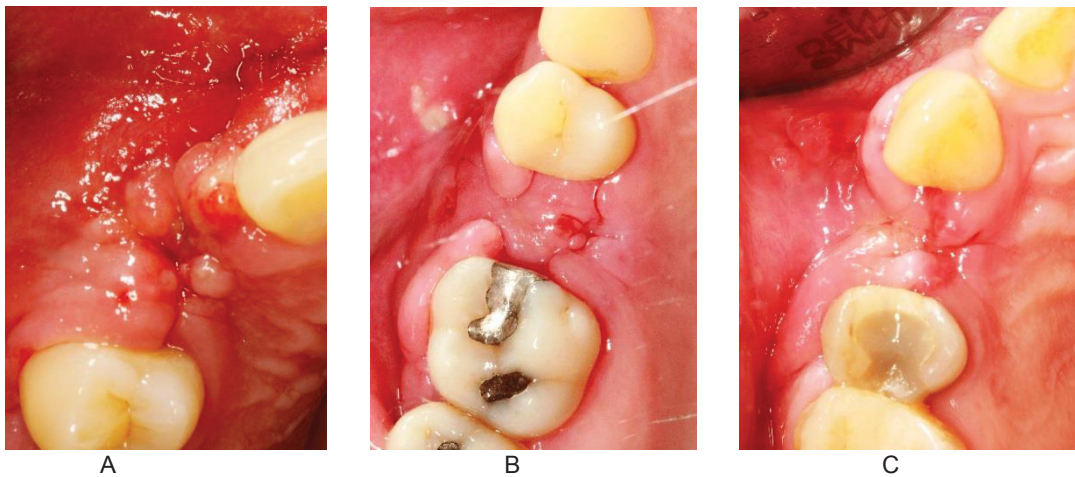


Abbildung 21: Zustand nach Nahtentfernung 10 Tage nach Augmentation

- A) *Regelrechte Wundheilungsverhältnisse in Regio 023 (Patientenfall I)*
- B) *Regelrechte Wundheilungsverhältnisse in Regio 025 (Patientenfall II)*
- C) *Regelrechte Wundheilungsverhältnisse in Regio 024 (Patientenfall III)*

2.2.4 Vierter Untersuchungstermin

Vier Wochen nach Eingriff fand die vierte Untersuchung statt. Die Dokumentation des intraoralen Befundes erfolgte durch Fotos aus bukkaler und okklusaler Ansicht.

2.2.5 Fünfter Untersuchungstermin - OP-Aufklärung vor Implantation

13 Wochen nach Augmentation erfolgte die letzte Untersuchung vor Implantation. Neben der Fotodokumentation wurde der Patient über den geplanten zweiten chirurgischen Eingriff aufgeklärt. Die möglichen Komplikationen, die nach Implantation entstehen können, wurden mit dem Patienten besprochen.

2.2.6 Zweiter chirurgische Eingriff - Implantation

Der zweite chirurgische Eingriff fand im Anschluss an eine ungestörte Wundheilungsphase von 26 Wochen nach Augmentation statt. Durch die Anfertigung einer digitalen Volumentomographie wurde zunächst eine radiologische Auswertung durchgeführt. Erst wenn dieses Ergebnis zufriedenstellend war, wurde der chirurgische Eingriff vorgenommen. Eine medikamentöse Abschirmung der Patienten mit Antibiotikum und Kortison erfolgte nach demselben Prinzip wie im ersten Eingriff. Die Messung der horizontalen Kieferkammbreite wurde erhoben und der gesamte Eingriff wurde fotodokumentiert. Die Titanschraube wurde entfernt und wenn ein ausreichendes Knochenvolumen gegeben war (siehe Abb.22-24), wurde die Implantation durchgeführt (siehe Abb.25-29). Ob das Implantat offen oder gedeckt einheilen sollte wurde intraoperativ, abhängig von der Primärstabilität des Implantates, bestimmt. Im Falle einer gedeckten Einheilung wurde die Freilegung des Implantates nach sechs Wochen vorgenommen. Das inserierte Implantat und der verwendete Gingivaformer oder die Verschlusschraube wurden in den Unterlagen dokumentiert. Ein postoperatives Röntgenbild (siehe Abb.27-29)

wurde angefertigt und der Patient wurde über das postoperative Verhalten aufgeklärt.

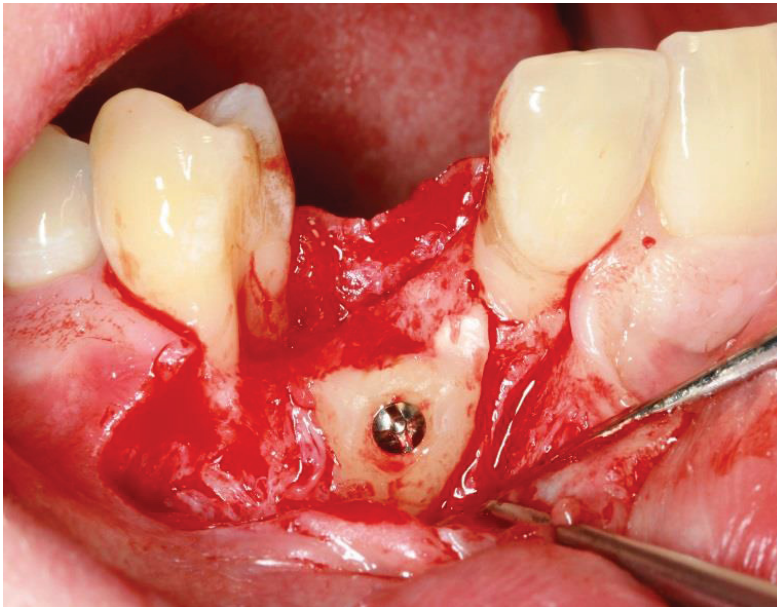


Abbildung 22: Darstellung des Zahnwurzelaugmentats (*Patientenfall I*)

Makroskopisch deutlich erkennbare Integration der Zahnwurzel in den Empfänger Knochen.

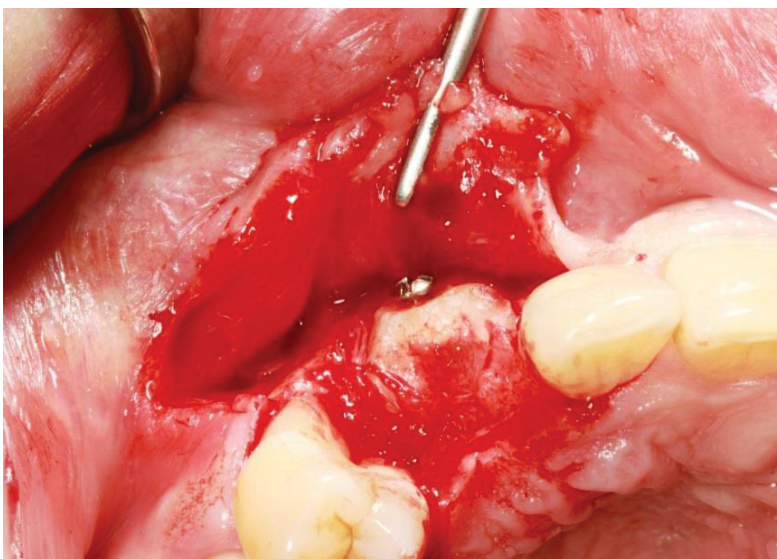


Abbildung 23: Klinische Situation sechs Monate nach lateraler Kieferkammaugmentation (*Patientenfall I*)

Analog zu den Ergebnissen im Tiermodell zeigen sich deutliche Anzeichen für eine Ersatzresorption.

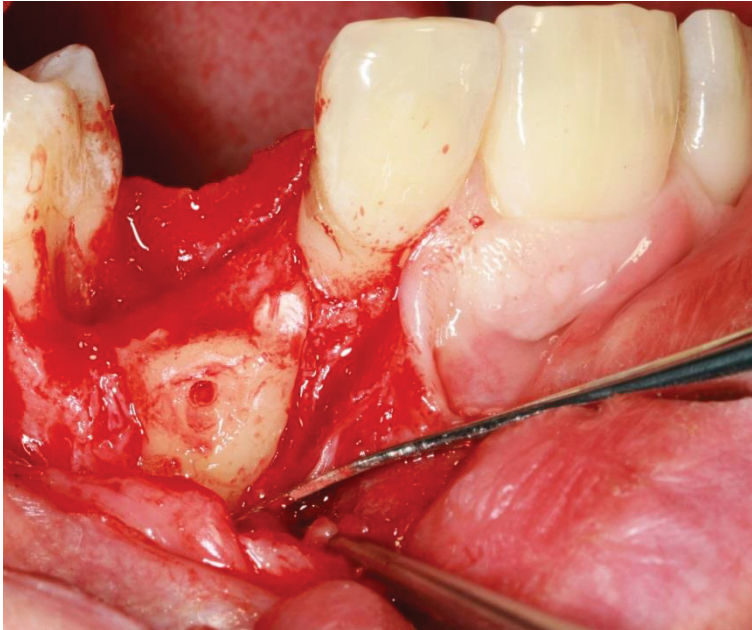


Abbildung 24: Zustand nach Entfernung der Titanschraube (Patientenfall I)

Deutlich erkennbare Einblutung aus dem Schraubenkanal nach Entfernung der Titanschraube.

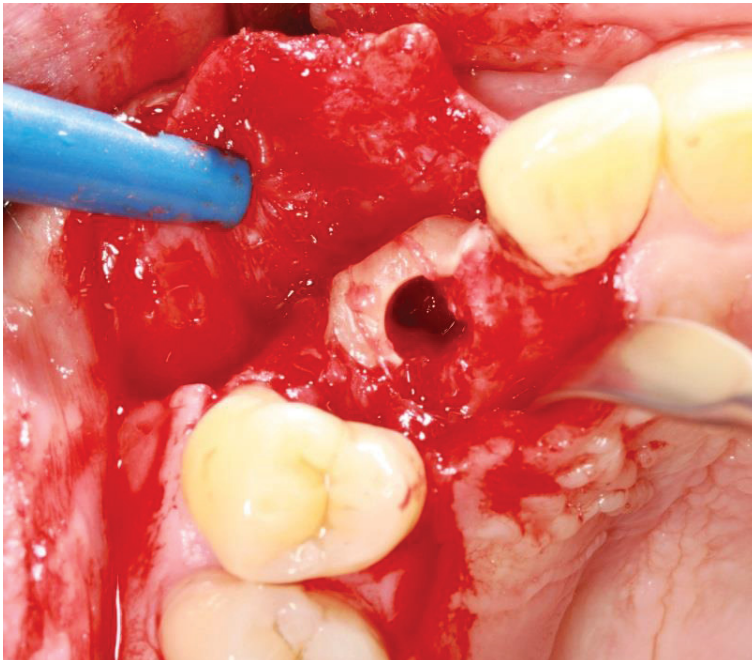


Abbildung 25: Klinische Situation nach Implantatbohrung (Patientenfall I)

Die Verbreiterung des Kieferkamms ermöglichte die Implantatinsertion in einer prothetisch günstigen Position.

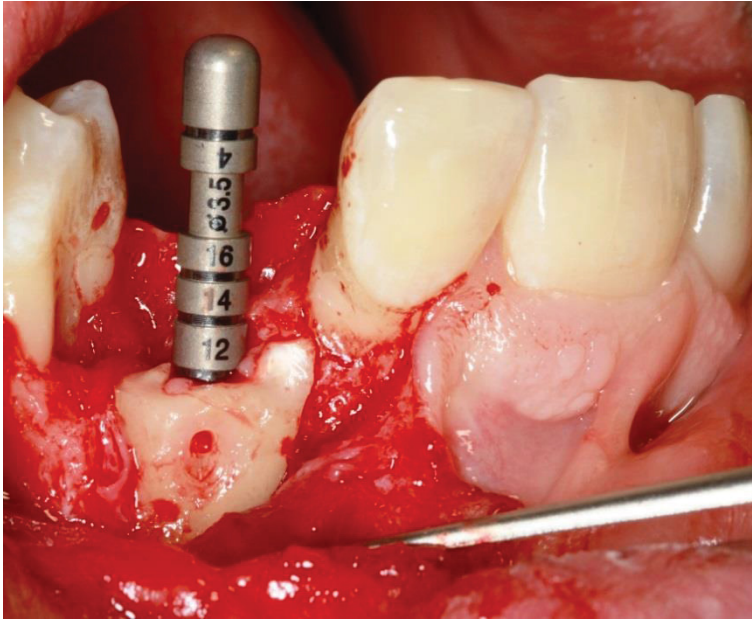


Abbildung 26: Implantatbohrung (Patientenfall I)

Eine Implantatbohrung wurde in den suffizient verbreiterten Kieferknochen vorgenommen (Durchmesser 4,1mm, Länge 12,00mm).

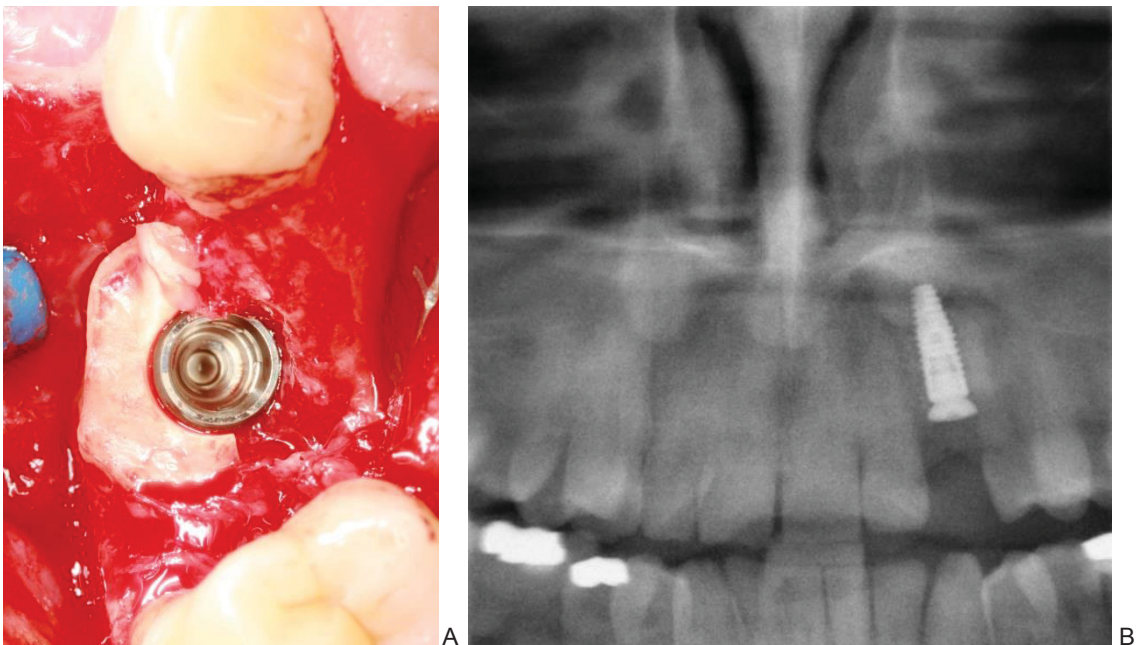


Abbildung 27: Zustand nach Implantatinsertion (Patientenfall I)

- A) *Homogene Integration der Zahnwurzel im Defektbereich nach 26 Wochen. Erkennbar sind deutliche klinische Merkmale einer Ersatzresorption.*
- B) *Postoperatives Röntgenbild zur Darstellung der suffizienten Implantation in Regio 023.*

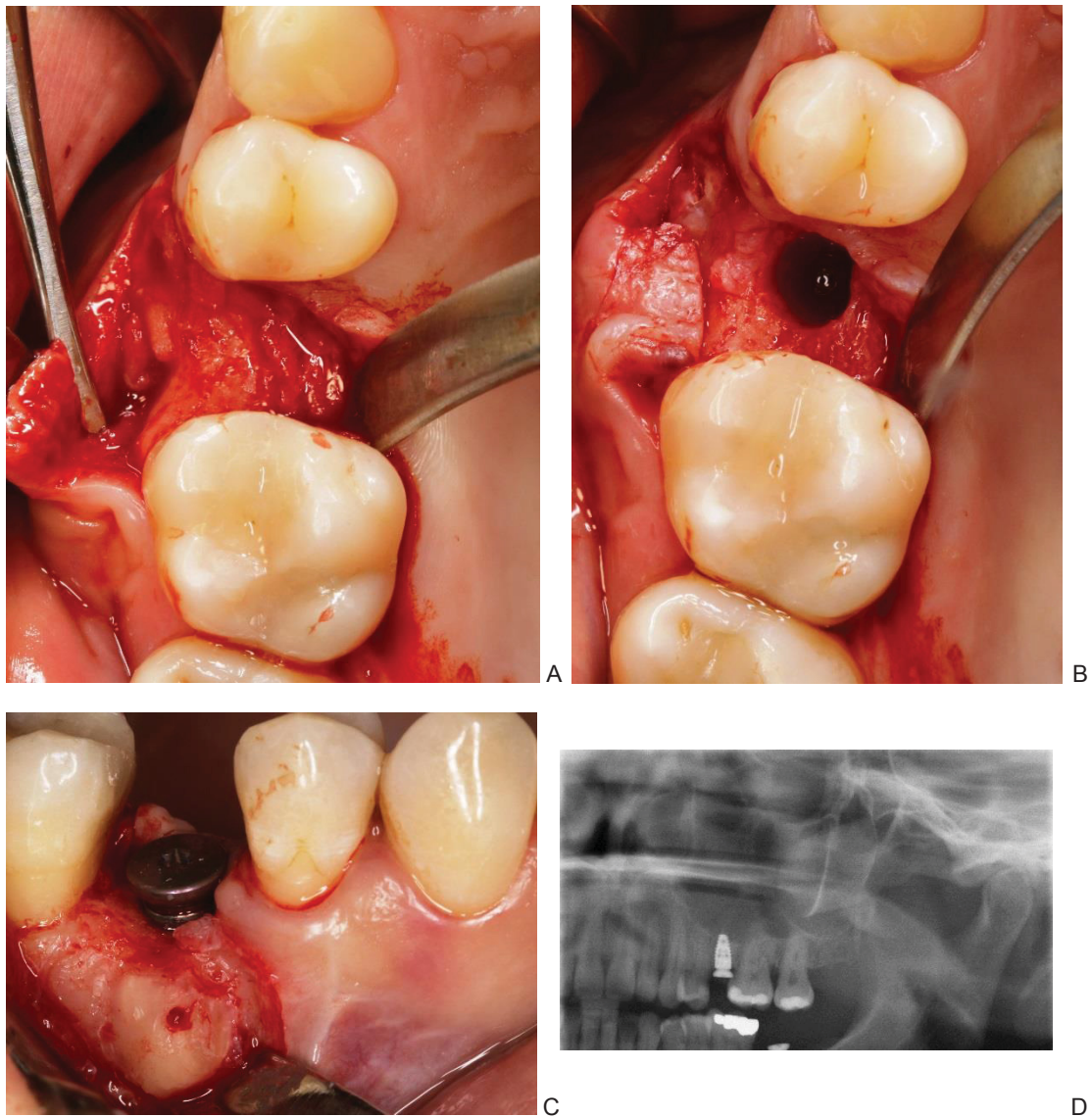
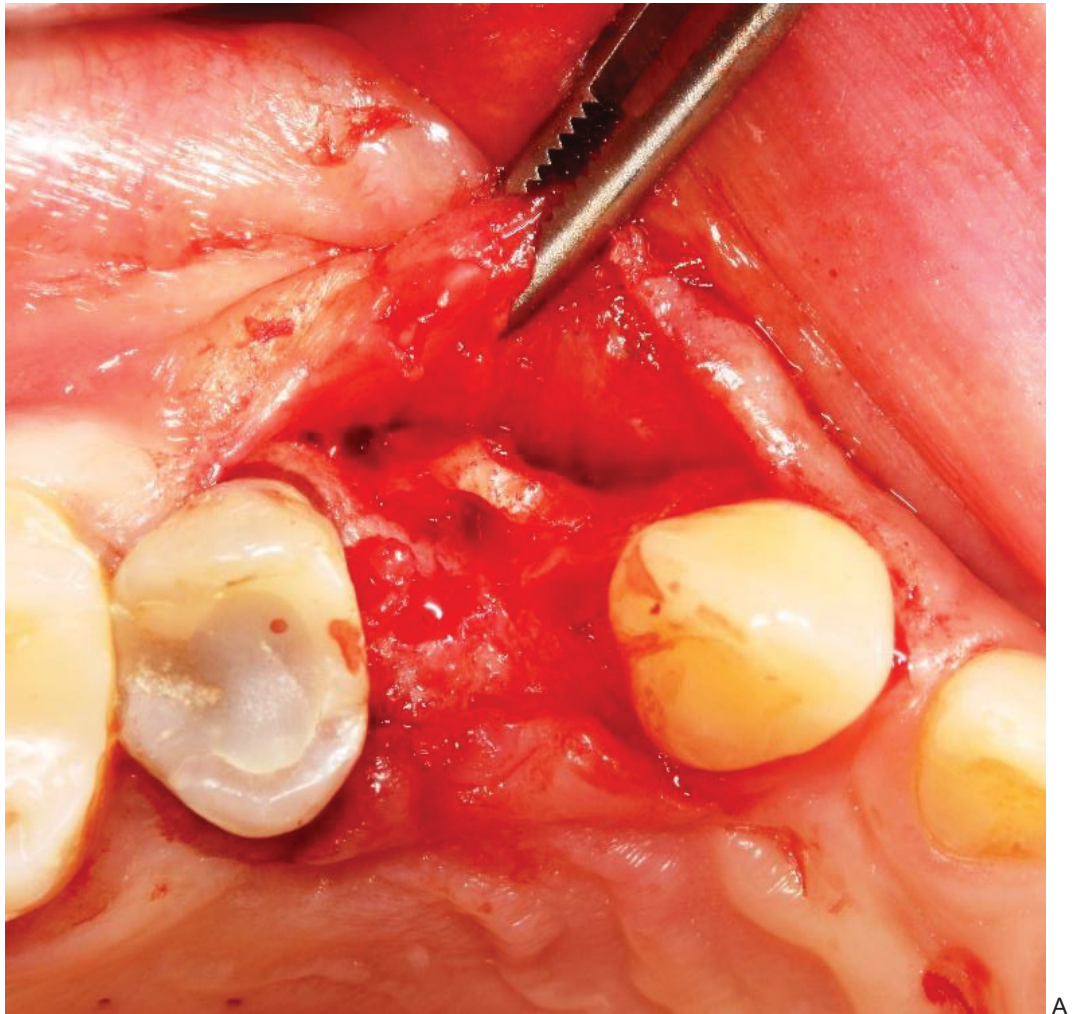
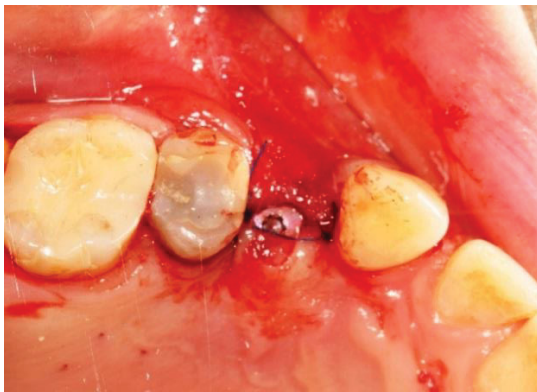


Abbildung 28: Zweiter Chirurgischer Eingriff nach einer Heilungsphase von 26 Wochen in Regio 025 (Patientenfall II)

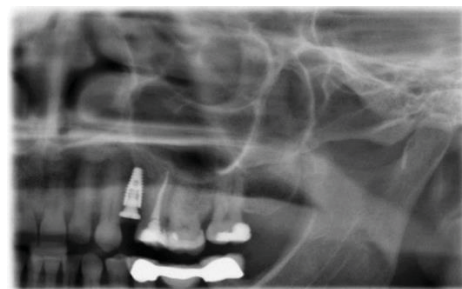
- A) *Darstellung der Zahnwurzel mit makroskopisch erkennbarer homogener Integration in den Empfängerknochen.*
- B) *Zustand nach Implantatbohrung in einer prothetisch günstig positionierten Region.*
- C) *Zustand nach Implantatinsertion (Durchmesser 4,1mm, Länge 8mm).*
- D) *Postoperatives Röntgenbild mit erkennbarer suffizienter Implantation.*



A



B



C

**Abbildung 29: Zweiter Chirurgischer Eingriff nach einer Heilungsphase von 26 Wochen
(Patientenfall III)**

- A) Makroskopisch klar erkennbare Integration der Zahnwurzel am Empfängerknochen.
- B) Klinisches Bild nach Implantatinsertion mit dem Verschluss durch einen Gingivaformer für eine transgingivale Einheilung des Implantats (Durchmesser: 4,1mm, Länge 9mm).
- C) Postoperatives Röntgenbild zur Darstellung der suffizienten Implantation in die augmentierte Region 024.

2.2.7 Siebter Untersuchungstermin - Nahtentfernung

Zehn Tage nach Implantation wurde der Patient zur Nahtentfernung vorstellig. Vor und nach dem Entfernen der Fäden wurden Fotos gemacht und die Wundregion wurde auf Dehiszenzen und Entzündungen kontrolliert. Eine Spülung der Wundregion mit antiseptischen Spüllösungen wurde durchgeführt.

2.2.8 Achter Untersuchungstermin – Suprakonstruktion

Zehn Wochen nach Implantation konnte die Belastung des Implantates mit der Suprakonstruktion erfolgen.

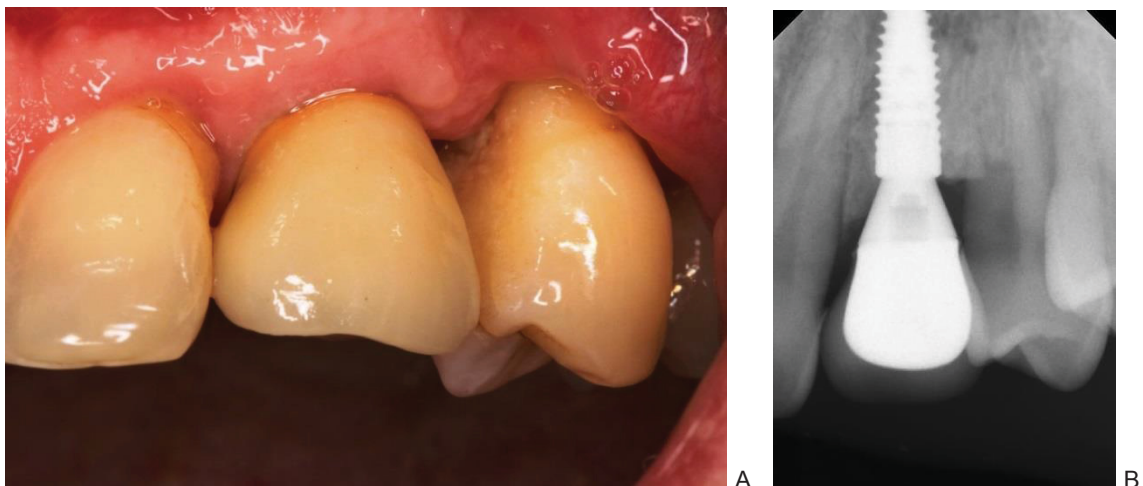


Abbildung 30: Zustand nach Eingliederung der Krone in Regio 023 (Patientenfall I)

- A) *Klinischer Zustand nach Eingliederung der Suprakonstruktion.*
- B) *Radiologischer Zustand nach Eingliederung der Suprakonstruktion.*

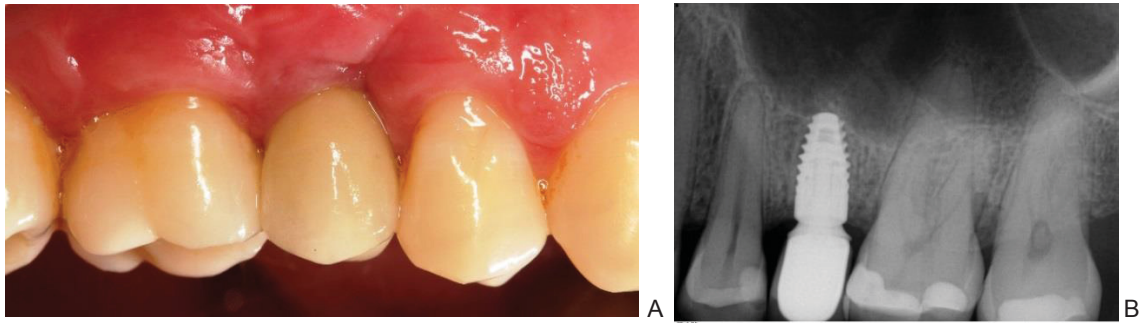


Abbildung 31: Zustand nach Eingliederung der Krone (Patientenfall II)

- A) *Klinischer Zustand nach Eingliederung der Zahnkrone.*
- B) *Röntgenologische Nachkontrolle nach Eingliederung des Zahnersatzes.*

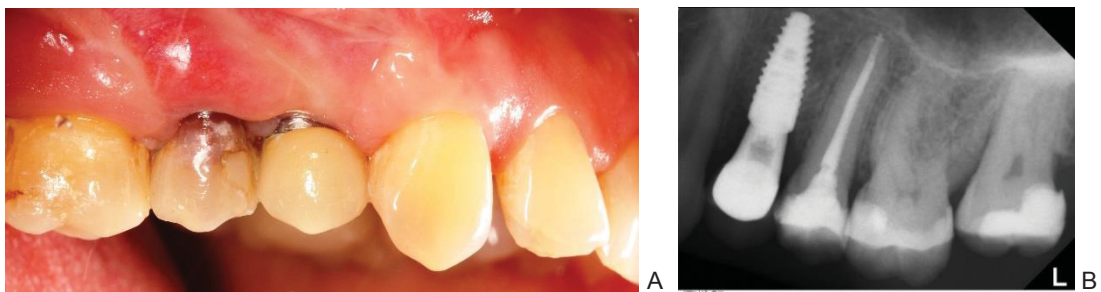


Abbildung 32: Zustand nach Eingliederung der Krone (Patientenfall III)

- A) *Klinischer Zustand nach Eingliederung der Zahnkrone.*
- B) *Röntgenologische Nachkontrolle nach Eingliederung des Zahnersatzes.*

2.2.9 Neunter Untersuchungstermin – Nachkontrolle 6 Monate nach der Prothetischen Versorgung

26 Wochen nach prothetischer Versorgung wurde eine Nachkontrolle des Implantates vorgenommen. Die periimplantären Indices wurden erhoben und es erfolgte eine erneute Fotodokumentation.

2.2.10 Studienequipments

Folgende Equipments kamen im Rahmen der klinischen Untersuchungen zur Anwendung:

- Klinische Messungen
 - Messlehre für die Messung der Kieferkambbreite

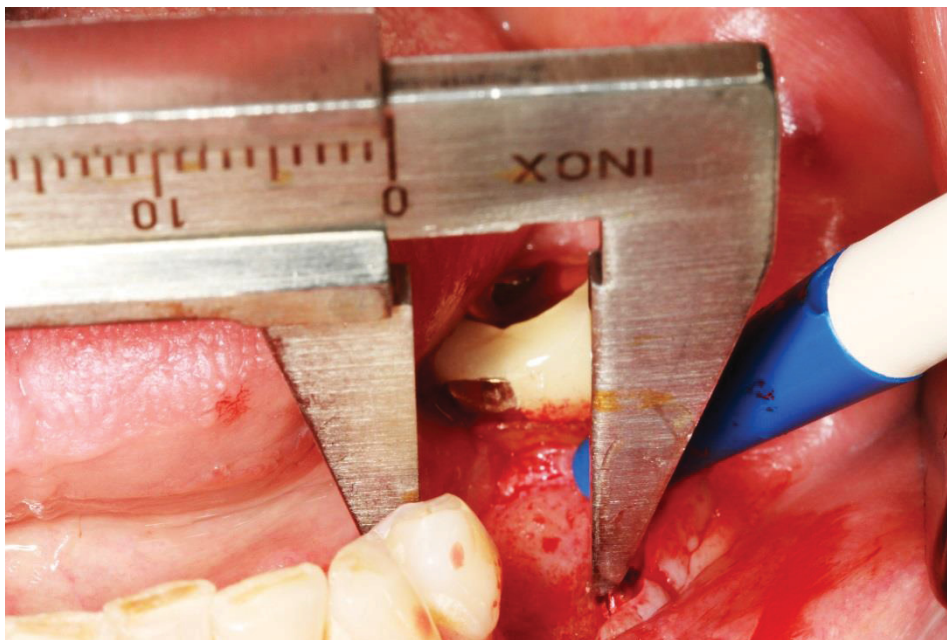


Abbildung 33: Messlehre zur Messung der Kieferkambbreite in mm

- Fotodokumentation
 - Kamera
- Radiologische Befundung
 - OPTG/DVT

Da das Augmentationsverfahren von Zahnwurzelfragmenten mit einigen wenigen Ausnahmen identisch zum Verfahren der Knochenblockaugmentation ist, wurden die üblichen oralchirurgischen Utensilien verwendet:

- **Osteosyntheseschrauben**

Zur Fixierung der Zahnwurzel am Empfängerknochen wurden Osteosyntheseschrauben (Medicon®, Länge 9mm und Durchmesser 1,5mm) verwendet.

- **Implantate**

Im Rahmen dieser Studie kamen ausschließlich Straumann® Bone Level Tapered- Implantate zur Verwendung. Länge und Durchmesser des verwendeten Implantates wurden dokumentiert.

- **Gingivaformer/Verschlusskappe**

Passend zum Implantat wurde der konforme Gingivaformer oder die Verschlusschraube ausgewählt.

- **Nahtmaterial**

Das verwendete Nahtmaterial wurde dokumentiert. In der Regel wurde der Defektverschluss mit Polypropylen- Naht durchgeführt.

2.2.11 Statistische Analysen

Die statistische Analyse unserer Daten erfolgte mit Hilfe des Software Programms Statistical Package of the Social Sciences (SPSS) 24.0.

Standartabweichungen und Mittelwerte wurden für folgende Parameter bestimmt: Kieferkammbreite vor Augmentation, Kieferkammbreite nach Augmentation, Augmentatdicke, Kieferkammbreite nach sechs Monaten, Knochengewinn, Resorption des Augmentats.

Der Datensatz wurde mit dem Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest auf die Normalverteilung untersucht.

Durch den gepaarten T-Test wurde der Zusammenhang zwischen der Kieferkammbreite vor Augmentation und der Kieferkammbreite nach sechs Monaten überprüft.

Ergebnisse mit $p < 0,05$ wurden als signifikant erachtet.

3 Ergebnisse

3.1 Ergebnisse der Auswertung des klinischen Datenbestandes

Im operativen Eingriff zur Augmentation der Zahnwurzel fanden keine Komplikationen statt. Die postoperative Heilungsphase verlief bei allen Studienpatienten regelrecht, das heißt ohne das Auftreten von Unverträglichkeiten oder dem Vorhandensein von einem der fünf Kardinalsymptome einer Entzündungsreaktion: Dolor, Rubor, Calor, Tumor, Functio laesa. Es wurden keine Lappendehiszenzen beobachtet und keiner der Patienten gab anhaltende Schmerzen nach Augmentation oder Implantatinsertion an.

Mit einer Ausnahme wurden alle Zahnwurzeln suffizient augmentiert und nach einer ungestörten Wundheilungsphase von 26 Wochen konnte erfolgreich implantiert werden.

Vor jeder Implantation wurde röntgenologisch kontrolliert, ob eine erfolgreiche Integrität zwischen Wurzelaugmentat und Knochen gegeben war. In allen Fällen konnte radiologisch eine vollständige Dentointegration beobachtet werden, d.h. die Kontaktzone zwischen Wurzel und Knochen war nicht mehr abzugrenzen und die ossäre Remodellation war deutlich zu sehen. Bei der chirurgischen Wiedereröffnung war im Bereich der Augmentation eine makroskopisch klar erkennbare homogene Integration und knöcherne Remodellation der Zahnwurzelfragmente zu erkennen. Die Zunahme des Knochenvolumens

erlaubte eine regelrechte Implantatbohrung mit suffizienter Insertion konventioneller schraubenförmiger Titanimplantate.

Nach Entfernung der Titanschraube war eine Einblutung aus dem Schraubenloch der Zahnwurzel gegeben. Somit ist von einem suffizienten ossären Remodellierungsvorgang in der Kontaktzone auszugehen. Der Misserfolg der Augmentation bei einem Studienpatienten lag darin, dass die bereits endodontisch vorbehandelte Zahnwurzel zu wenig gesunde Substanz aufwies, um diese als Augmentat nutzen zu können. Daher wurde die Augmentation dieser Zahnwurzel nicht durchgeführt.

Die Weichgewebshheilung nach Augmentation des Zahnwurzelfragmentes wurde an Tag 10, nach der 4. Woche, nach der 13. Woche und nach der 26. Woche beurteilt und in allen Fällen war eine regelrechte Wundheilung des Weichgewebes, ohne besondere Vorkommnisse wie Dehiszenzen, Schwellungen oder Perforationen zu beobachten.

3.1.1 Patientenspezifische Faktoren – Alter und Geschlecht

Es wurden insgesamt 15 Patienten gemäß den definierten Einschlusskriterien in die Studie eingeschlossen. Das Alter der Patienten variierte zwischen 34 und 55 Lebensjahren (Mittelwert 50,13 Lebensjahre). Von den eingeschlossenen 15 Patienten waren neun weiblich und sechs männlich.

3.1.2 Häufigkeit der Zahnwurzelgruppen

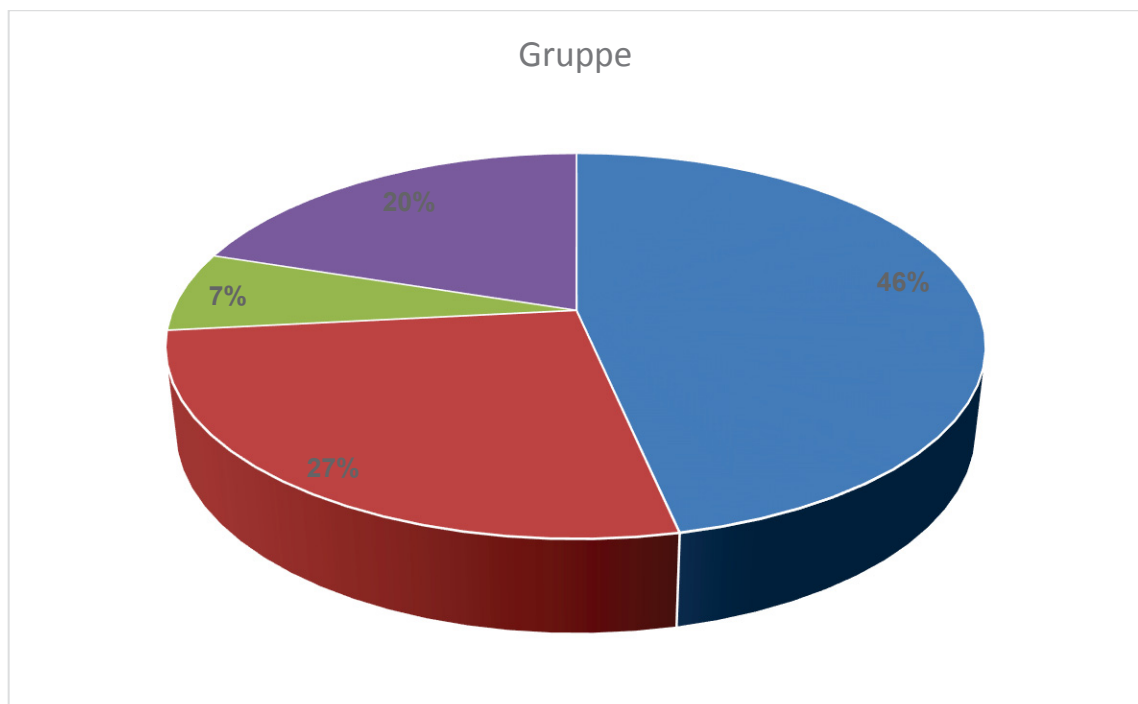


Abbildung 34: Kreisdiagramm zur Darstellung der Zahnwurzelgruppen

Im Rahmen der Studie wurden 15 Zähne extrahiert und im selben Eingriff wurden die Zahnwurzeln bearbeitet, in die jeweilige Defektregion angepasst und mittels Osteosyntheseschrauben fixiert.

Dabei wurden sieben zuvor endodontisch vorbehandelte (46%), vier Zähne mit großen Zahnhartsubstanzdefekten (27%), drei frakturierte Zähne (20%) und ein parodontal geschädigter Zahn (7%) verwendet.

3.1.3 Extraktionsregionen der zur Augmentation verwendeten Zahnwurzeln

Im Rahmen dieser Studie wurden Zähne aus allen vier Quadranten extrahiert, um diese anschließend als laterales Augmentat zu verwenden.

Lokalisation	Häufigkeit	Prozentueller Anteil (%)
15	2	13,3
17	1	6,7
23	2	13,3
24	2	13,3
25	2	13,3
26	1	6,7
27	2	13,3
37	1	6,7
42	1	6,7
46	1	6,7
Gesamt	15	100,0

Tabelle 3: Häufigkeit zur Augmentation verwendeten Zähne

3.1.4 Ergebnisse zur Verbreiterung des Knochenvolumens sechs Monate nach lateraler Augmentation

Zur Prüfung auf Normalverteilung der Messwerte wurde der Kolmogorov-Smirnov- Anpassungstest angewandt. Im Vergleich der Messwerte von Kieferkammbreite vor Augmentation zum Wert der Kieferkammbreite nach sechs Monaten war $p > 0,05$ und somit lag eine Normalverteilung vor. Bei allen 14 durchgeführten lateralen Knochenaugmentation konnte eine signifikante Zunahme des Knochenvolumens nach sechs Monaten im Vergleich zur Kieferkammbreite vor Augmentation gemessen werden ($p=0,00$).

	Mittelwert	N	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes
Kieferkammbreite vor Augmentation	5,9643	14	3,99261	1,06707
Kieferkammbreite nach Augmentation	12,2500	14	3,17896	,84961

Tabelle 4: Statistik bei gepaarten Stichproben

	N	Korrelation	Signifikanz
Kieferkammbreite vor Augmentation & Kieferkammbreite nach Augmentation	14	,849	,000

Tabelle 5: Korrelationen bei gepaarten Stichproben

Der Mittelwert für die Kieferkammbreite vor Augmentation des Kieferkamms lag bei 5,67 mm (SD 4,02 mm). Nach Augmentation zeigte sich im Durchschnitt eine Kieferkammbreite von 12,25 mm (SD 3,18 mm). Nach einer Heilungsphase von sechs Monaten zeigte sich eine signifikante Verbreiterung des Knochenvolumens

und der Kieferkamm betrug im Durchschnitt 10,86 mm (SD 2,71 mm). Im Durchschnitt wies die Augmentatdicke einen Wert von 6,29 mm (SD 2,12 mm) auf und der Knochengewinn betrug im Mittel 4,90 mm (SD 2,30 mm). Eine mittlere Resorptionsrate des Augmentats von 1,40 mm (SD 1,53 mm) wurde berechnet.

	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
Geschlecht	15	0	1	,40	,507
Kieferkammbreite vor Augmentation	15	,00	11,00	5,6667	4,01634
Kieferkammbreite nach Augmentation	14	7,00	16,00	12,2500	3,17896
Augmentatdicke	14	3,00	10,00	6,2857	2,11873
Kieferkammbreite nach 6 Monaten	14	6,00	14,00	10,8571	2,71342
Knochengewinn	14	,00	8,00	4,8929	2,29698
Resorption	14	,00	5,00	1,3929	1,53396
Gültige Werte (Listenweise)	14				

Tabelle 6: Ergebnisse der deskriptiven Statistik

3.1.5 Zusammenhang zwischen Kieferkambbreite vor Augmentation und Augmentatdicke

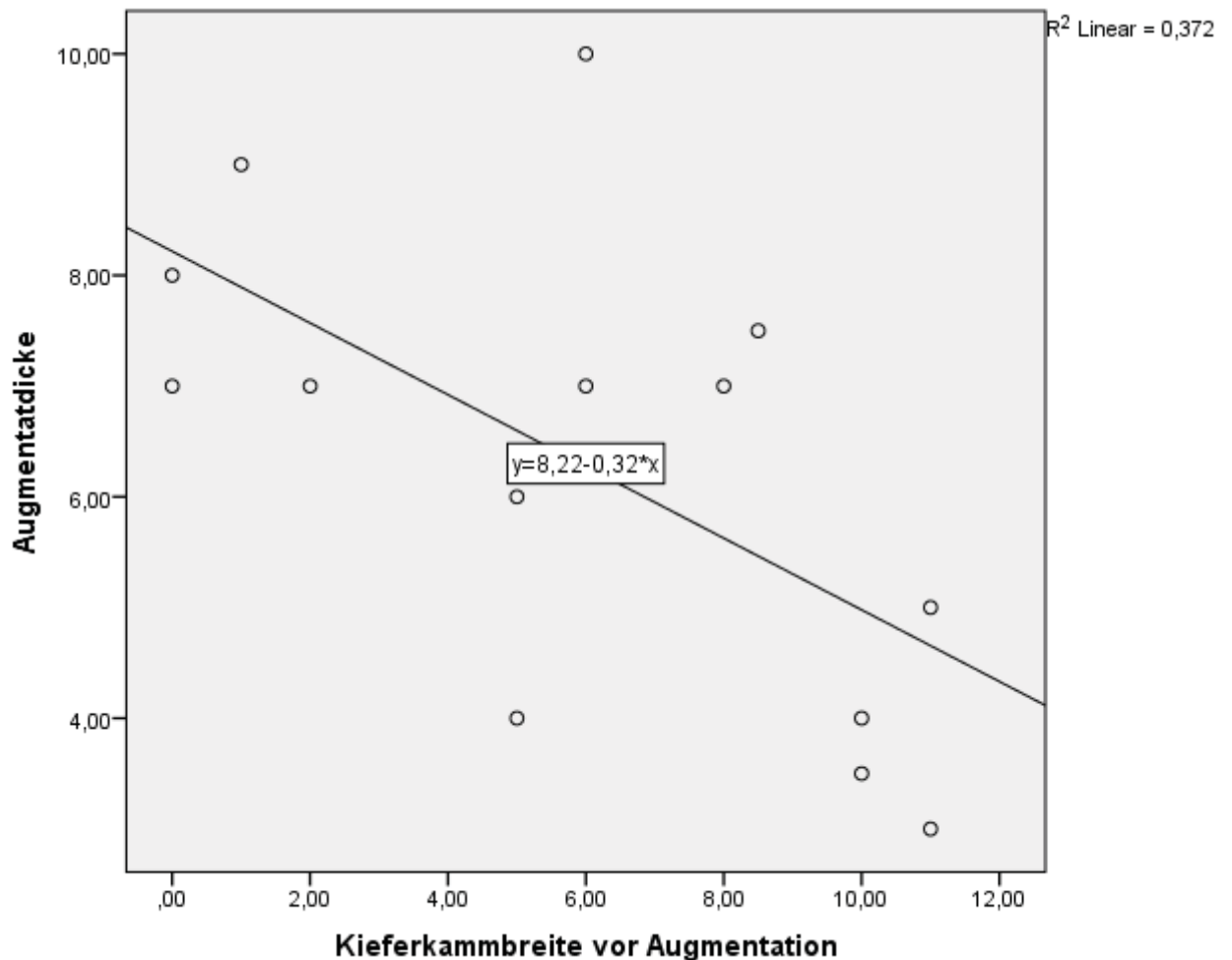


Abbildung 35: Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Kieferkambbreite vor Augmentation und Augmentatdicke

In der linearen Regressionsanalyse zeigte sich ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Kieferkambbreite vor Augmentation und der Augmentatdicke. Das Effektstärkemaß R^2 war 0,372 ($B = -0,324$, $p = 0,020$). Je größer die Kieferkambbreite vor Augmentation war, desto geringer war die Dicke der augmentierten Zahnwurzel. Dieser Zusammenhang wird durch das Punkt-Streu Diagramm visuell veranschaulicht.

3.1.6 Zusammenhang zwischen Kieferkambbreite vor Augmentation und gesamten Knochengewinn

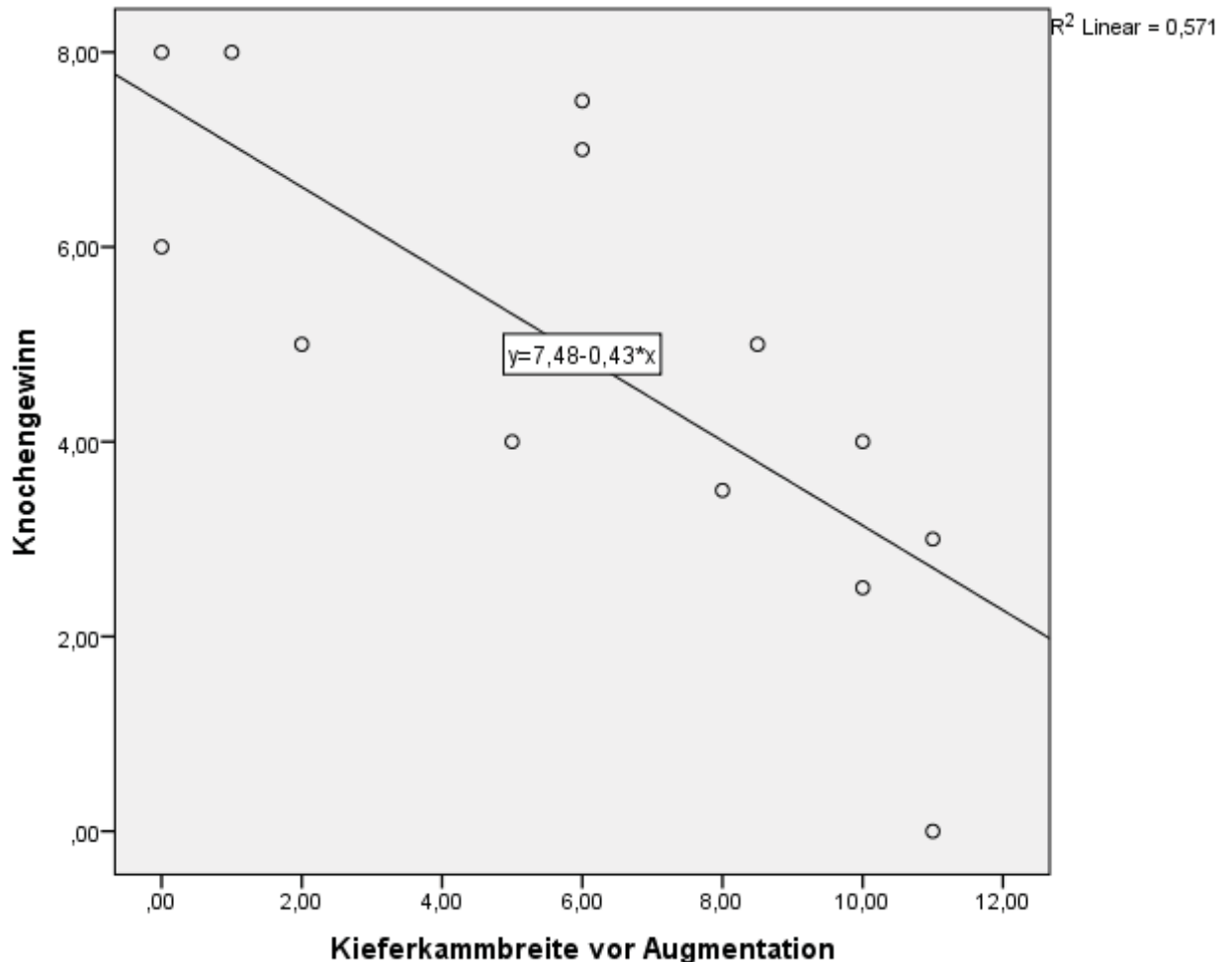


Abbildung 36: Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Kieferkambbreite vor Augmentation und des Knochengewinns

In der linearen Regressionsanalyse zeigte sich ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Kieferkambbreite vor Augmentation und dem Knochengewinn. Das Effektstärkemaß R^2 war 0,571 ($B = -0,435$, $p = 0,002$). Je Breiter der Kieferkamm vor der Augmentation war, desto geringer war die Verbreiterung des horizontalen Kieferkamms sechs Monate nach Augmentation. Dieser Zusammenhang wird durch das Punkt-Streu Diagramm visuell veranschaulicht.

3.1.7 Zusammenhang zwischen Kieferkambbreite nach Augmentation und Resorptionsrate des Augmentats nach sechs Monaten

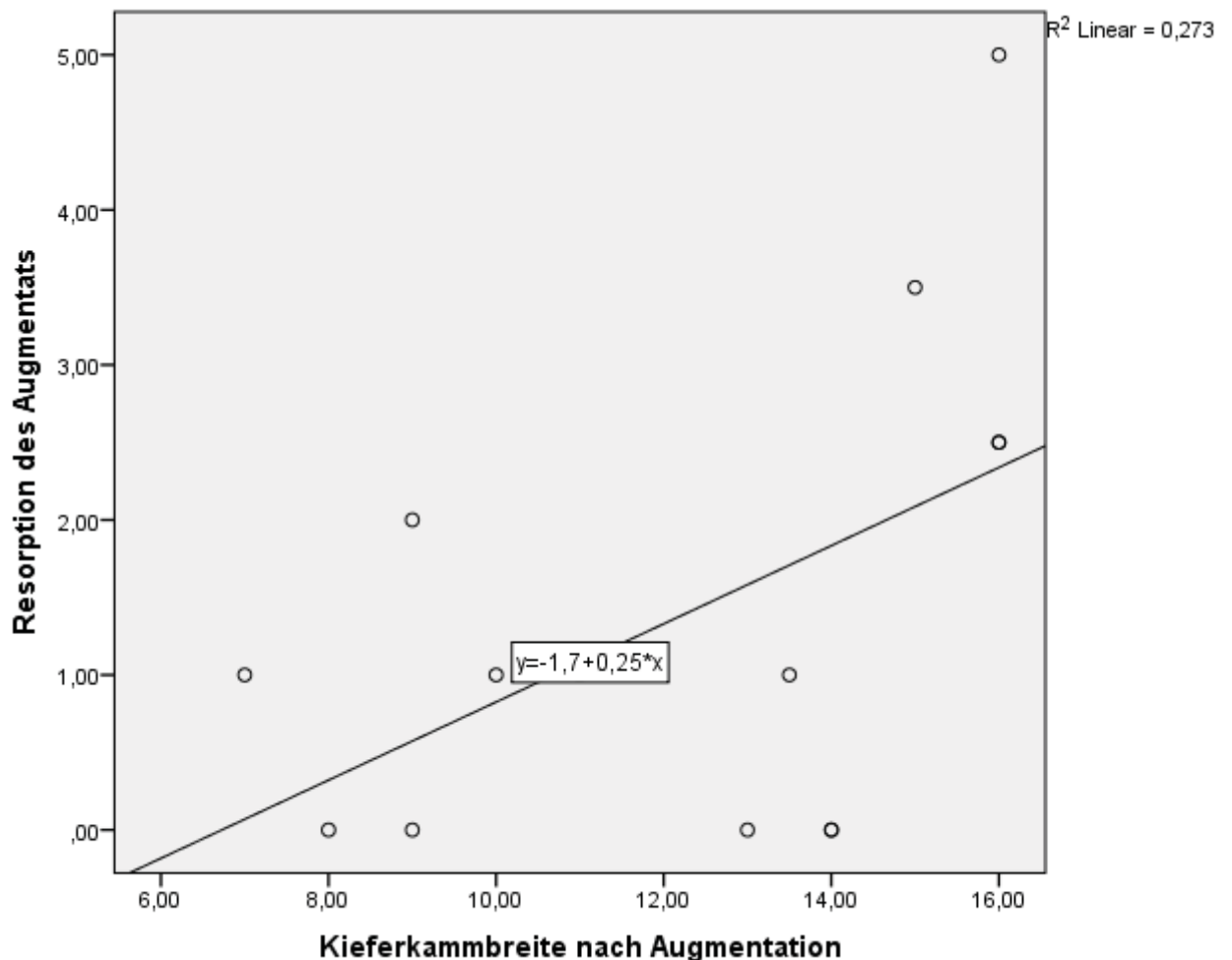


Abbildung 37: Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Kieferkambbreite nach Augmentation und Resorption des Augmentats

In der linearen Regressionsanalyse zeigte sich ein starker, jedoch nicht signifikanter Zusammenhang zwischen der Kieferkambbreite nach Augmentation und der Resorption des Augmentats. Das Effektstärkemaß R^2 war 0,273 ($B = 1,083$, $p = 0,055$). Je dicker der Kieferkamm nach Augmentation der Zahnwurzel war, desto größer war die Resorption des Augmentats nach sechs Monaten. Dieser Zusammenhang wird durch das Punkt-Streu Diagramm visuell veranschaulicht.

3.1.8 Zusammenhang zwischen Kieferkambbreite vor Augmentation und Resorptionsrate des Augmentats nach sechs Monaten

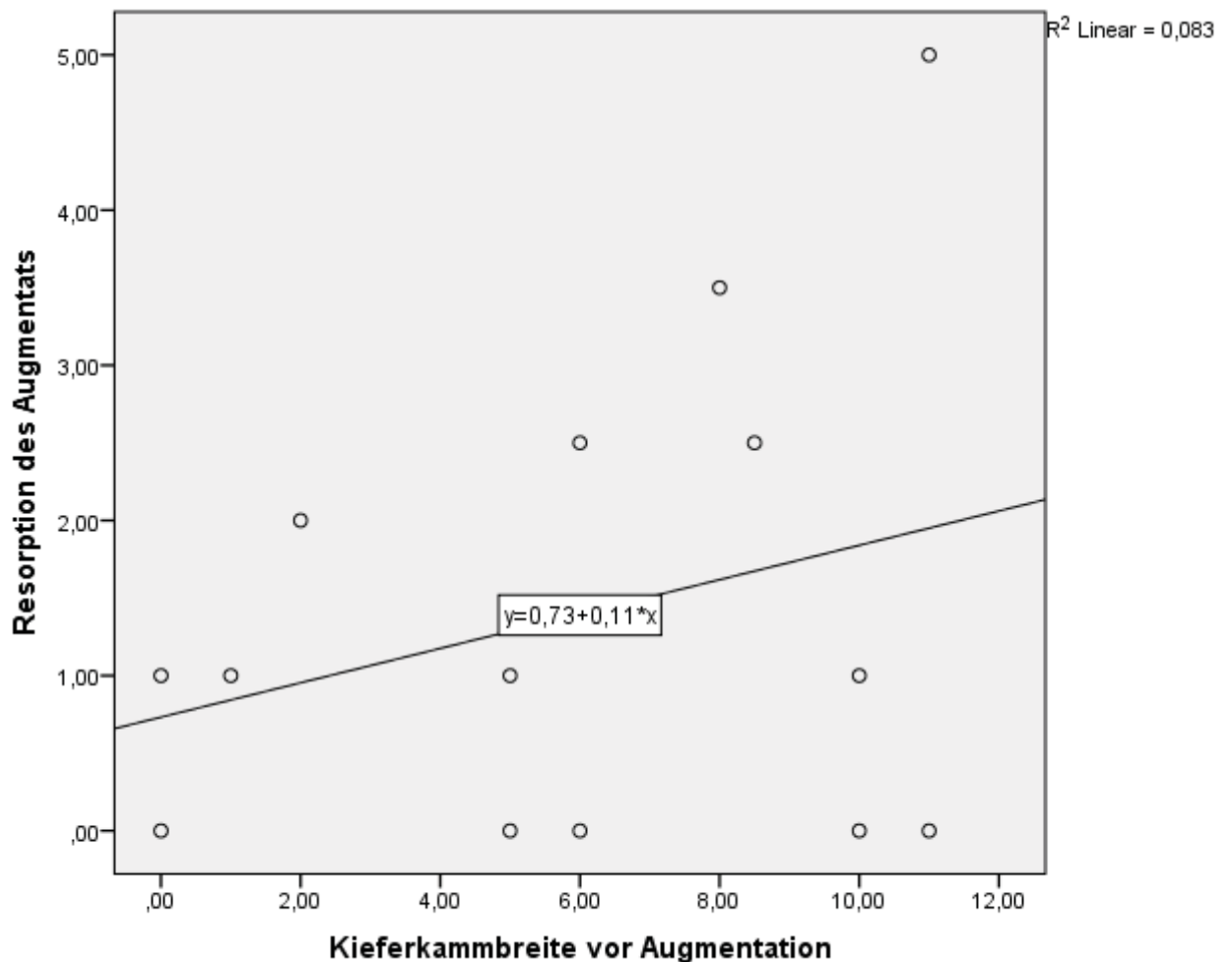


Abbildung 38: Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Kieferkambbreite vor Augmentation und Resorption des Augmentats

In der linearen Regressionsanalyse zeigte sich ein schwacher nicht signifikanter Zusammenhang zwischen der Kieferkambbreite vor Augmentation und der Resorption des Augmentats. Das Effektstärkemaß R^2 war 0,083 ($B = 0,750$, $p = 0,318$). Je größer die Kieferkambbreite vor Augmentation war, desto größer war die Resorption des Augmentats nach sechs Monaten. Dieser Zusammenhang wird durch das Punkt-Streu Diagramm visuell veranschaulicht.

4 Diskussion

4.1 Diskussion von Material und Methoden

Das Ziel dieser klinischen Studie war es eine suffiziente laterale Kieferkammaugmentation mit Zahnwurzeln zu erzielen. Eingeschlossen wurden dafür 15 gesunde, nichtrauchende Patienten, die zur Zahnextraktion von nichterhaltungsfähigen Zähnen in der Poliklinik für Zahnärztliche Chirurgie und Aufnahme vorstellig wurden.

Sieben von 15 Zähnen die zur lateralen Augmentation extrahiert wurden, waren endodontisch vorbehandelt und wurden aufgrund von chronisch apikalen Parodontitiden entfernt. Drei Zähne wurden aufgrund von Längstfrakturen extrahiert. Vier Zähne waren durch große Zahnhartsubstanzdefekte nicht mehr zu erhalten. Ein Zahn wurde aufgrund parodontaler Schädigung extrahiert.

Aufgrund der inhomogenen Verteilung der Extraktionsindikationen konnte im Rahmen der Studie untersucht werden, ob der klinische Zustand der Zahnwurzel Einfluss auf ihre biologische Aktivität haben kann.

In einem Patientenfall war eine erfolgreiche Augmentation von einem zuvor endodontisch behandelten Zahn nicht möglich gewesen, da die Wurzelsubstanz zu porös war und nicht genug Stabilität aufwies, um diese am Empfängerknochen fixieren zu können. Grund dafür kann die sehr großzügige Kanalaufbereitung des Zahnes gewesen sein. Daher wurde intraoperativ auf eine Augmentation dieser Zahnwurzel verzichtet. Alle anderen sechs wurzelkanalbehandelten Zähne dagegen wiesen ausreichend Substanz auf und ließen, nach einer Einheilungsphase von 26 Wochen, eine suffiziente Implantatinsertion in den

horizontal verbreiterten Kieferkamm zu. Somit ist die Gegebenheit einer gesunden und ausreichend dimensionierten Zahnwurzel Voraussetzung für die Augmentation. Im Falle einer Wurzelfraktur kann daher nicht wie beim AB auf eine Alternative (Knochenblock aus dem Gegenquadranten) zurückgegriffen werden. Im Gegensatz zur Knochenblockaugmentation hatte die Zahnwurzelaugmentation den Vorteil, dass keine zusätzliche Entnahmestelle aus der Kiefer- oder Kinnregion geschaffen werden musste. Somit waren neben einer verkürzten Operationszeit auch die Minimierung der Risiken für die Entstehung von postoperativen Komplikationen bei Augmentationen von Zahnwurzeln gegeben. Die Operationstechnik hat sich nicht wesentlich von der der Knochenblockaugmentation unterschieden. Nach Extraktion und Präparation der Zahnwurzeln konnten diese mittels Osteosyntheseschrauben exakt wie beim AB an den Empfängerknochen geschraubt werden.

4.2 Diskussion der Ergebnisse

Das Ziel in der klinischen Auswertung dieser Studie war festzustellen, ob eine suffiziente zweizeitige enossale Implantation nach lateraler Augmentation des Kieferkamms mit Zahnwurzelfragmenten auch bei Menschen möglich ist.

Nach einer Heilungsphase von 26 Wochen war eine makroskopisch klar erkennbare, homogene Integration der Zahnwurzel an dem Empfängerknochen zu beobachten, welcher von neu gebildetem Knochen bedeckt war. Ein durchschnittlicher horizontaler Knochengewinn nach lateraler Knochenaugmentation mit Zahnwurzeln betrug 4,89 mm und ermöglichte eine suffiziente Implantation, ohne die Notwendigkeit einer sekundären Augmentation. Das Resultat dieser Studie korreliert mit den präklinischen tierexperimentellen Studien und die Ergebnisse weichen nicht von denen der vorhergegangenen Pilotstudie am Menschen ab ([Schwarz et al., 2016b](#), [Schwarz et al., 2016c](#), [Andersson, 2010](#)). Darüber hinaus bestätigt diese wissenschaftliche Arbeit, dass parodontal geschädigte und endodontisch vorbehandelte Zähne nach richtiger Aufbereitung als suffiziente Knochenaufbaumaterialien genutzt werden können. Daher ist das Vorhandensein der Zahnpulpa weniger entscheidend für das Anwachsen der Zahnwurzel am Empfängerknochen. Zahnwurzeln, die zuvor endodontisch behandelt wurden, zeigten keinen Unterschied zu Zahnwurzeln mit gesunder Pulpa. Somit konnte die Annahme, dass Pulpazellen Grund für eine erfolgreiche Dentointegration sind ([Schwarz et al., 2013](#)), durch die suffiziente Einheilung von endodontisch vorbehandelten Zahnwurzeln im Rahmen dieser Studie widerlegt werden.

Die Ergebnisse waren auch nach Verwendung parodontal geschädigter Zähne nach Scaling und Wurzelglättung grundsätzlich mit denen von gesunden

Zahnwurzeln vergleichbar. Der klinische Zustand der Zahnwurzel hatte somit keinen sichtbaren Einfluss auf den Remodellierungsprozess.

Schwarz et al. haben im Tierversuch die palatinale Wurzel von Oberkiefermolaren belassen und in unmittelbarer Nähe ein Implantat inseriert. Nach einer Heilungsphase von acht Wochen zeigten histologische Analysen die Entstehung von Reparaturdentin in den iatrogen eröffneten Pulpakanälen. Außerdem wurde nachgewiesen, dass die Implantatoberflächen durch eine dünne atubuläre Schicht von Reparaturdentin bedeckt waren. Dieses Tertiärdentin wurde durch die oberflächlichen Schichten des Dentins produziert. Die mittlere prozentuale mineralisierte DIC betrug 67,4%, während die BIC einen vergleichbaren Wert von 63,5% zeigte (Schwarz et al., 2013). Dieses präklinische Ergebnis zeigt, dass Zahnwurzeln als Implantatlager verwendet werden können. Auf Basis dieser Erkenntnis wurde im Rahmen der klinischen Studie das biologische Potential dieser Matrix ausgenutzt, um den Kieferkamm für suffiziente Implantatinsertionen zu verbreitern.

Dass Ersatzresorptionen und Remodellierungsprozesse bei Augmentationen von Zahnwurzeln an Knochen entstehen, zeigten bereits unterschiedliche Tierexperimentelle Studien (Qin et al., 2014, Schwarz et al., 2016b, Karring et al., 1980). Dabei wurde nachgewiesen, dass die Kontaktzone zwischen Zahnwurzel und Knochen über die gesamte Zeit der Knochenremodellierung stabil und intakt war. Dies wiederum war auf die starre Fixation des Wurzelfragments mittels Titanschrauben zurückzuführen. Zunächst führte die Vaskularisation zu einer vorübergehenden fibrösen Integration in der Kontaktfläche zwischen Knochen und Wurzel. Nach einer Heilungsphase von sechs Monaten konnte radiologisch und histologisch eine Ankylose in der Kontaktzone zwischen Knochen und

Zahnwurzel nachgewiesen werden. Eine vollständige Bedeckung des Zahnfragments von neu gebildetem Knochen war zu erkennen ([Qin et al., 2014](#)). Qin et al. zeigten auch, dass die Grenzen der Zahnwurzelfragmente in den ersten drei Monaten hingegen radiologisch sehr gut vom Empfängerknochen abzugrenzen waren, und erst allmählich die Mineralisation in der Kontaktzone angestiegen ist ([Qin et al., 2014](#)). Eine postoperative Einheilungsphase von 26 Wochen wurde daher auch im Studienprotokoll dieser klinischen Studie berücksichtigt und bei allen Patienten konnten nach dieser Zeitspanne suffizient implantiert werden.

Der Fragestellung, ob sich Weichgewebe auf dem Wurzelaugmentat bildet, sind Karring und seine Arbeitsgruppe nachgegangen und haben beobachtet, dass Wurzeloberflächen mit intaktem PDL von einer Bindegewebsschicht umgeben wurden, während Wurzelfragmente ohne PDL Ersatzresorption und Ankylosen ausgesetzt waren ([Karring et al., 1980](#)). Auf Basis dieser Ergebnisse wurde in dieser klinischen Studie die Aufbereitung des Wurzelanteils, welcher direkten Kontakt zum Empfängerknochen hatte, so gestaltet, dass eine Ankylose durch Entfernung des PDL provoziert wurde ([Andreasen, 1980](#)). Um die äußere Schicht des Dentins vor Resorptionen zu schützen, wurde das Wurzelzement und das PDL belassen.

In metaanalytischen Untersuchungen mit Daten aus 40 klinischen Studien zeigten Sanz-Sánchez et al. welche Materialien die besten Ergebnisse zur Rekonstruktion von Knochendefekten liefern. Das Ziel dieser Analyse war mitunter herauszuarbeiten, welche Biomaterialien und Barrieremembranen als meist geeignete gelten, um den Kieferkamm für eine simultane oder zweizeitige enossale Implantation vorzubereiten ([Sanz-Sanchez et al., 2015](#)). Beim

simultanen Eingriff wurde die maximale Defektreduktion durch die Kombination aus partikulärem xenogenem KEM mit Knochen-Morphogenese Proteinen unter der Verwendung von resorbierbaren Membranen erzielt. Den minimalsten Knochengewinn zeigte die Kombination aus dem AB und der resorbierbaren Barrieremembran. Herausgestellt hat sich, dass das Verfahren der gesteuerten Knochenregeneration (Guided Bone Regeneration (GBR)) mit partikulärem xenogenen KEM und einer resorbierbaren Membran die am häufigsten angewandte Methode zur Reduktion des Knochendefekts ist (Donos et al., 2008, Jensen and Terheyden, 2009, Chiapasco et al., 2006). Hierbei gelingt es dem eigenen Körper durch den mechanischen Schutz der Barrieremembran, die das Einfallen des Bindegewebes in die Defektregion verhindert, und durch die osteokonduktive Eigenschaft des xenogenen KEM, den physiologischen Remodellierungsprozess in Gang zu setzen. Implantationen in den durch die GBR regenerierten Alveolarkamm zeigten vergleichbare Implantatüberlebensraten wie Implantationen in den nativen Knochen (Median 95,4%) (Donos et al., 2008). Jensen & Terheyden konnten nachweisen, dass eine vollständige Defektrekonstruktion durch die GBR zu 75,4-75,5% erzielt werden konnte, bei der Knochenrekonstruktion durch AB hingegen betrug die vollständige Regeneration 56,4% (Jensen and Terheyden, 2009). Dennoch muss berücksichtigt werden, dass transmukosale Implantatinsertionen mit simultaner GBR ungünstigere Ergebnisse liefern, als Implantationen in abgeheilte Kieferkammregionen (Siciliano et al., 2009). Eine wissenschaftliche Untersuchung zeigte auch, dass das Verfahren der simultanen GBR ein höheres Potential für periimplantäre Erkrankungen aufweist, unabhängig davon, ob die

GBR mit resorbierbaren oder nicht-resorbierbaren Membranen durchgeführt wurden (Jensen and Terheyden, 2009).

In dem Verfahren der zweizeitigen Implantation nach lateraler Kieferkammaugmentation erwies sich die Kombination aus partikulärem xenogenem KEM, AB und einer resorbierbaren Membran als die Zusammensetzung mit dem höchsten Defektregenerierungspotential. Den geringsten Knochengewinn zeigte die Kombination aus partikulärem alloplastischem KEM und einer nichtresorbierbaren Membran. In diesem Vorgehen der zweizeitigen Implantation wird die Implantatinsertion nach lateraler Knochenaugmentation mittels AB am häufigsten präferiert (Sanz-Sanchez et al., 2015).

Der AB wird aufgrund seiner osteokonduktiven, -induktiven und -genetischen Eigenschaften als Goldstandard definiert (Nkenke et al., 2002). Der spongiöse Knochen hat eine geringe mechanische Stabilität, aber im Gegensatz zum kortikalen Knochen ein hohes Potential an Osteoinduktivität. Es ist eine wesentliche Ähnlichkeit zwischen dem Knochenaufbau mittels spongiösem Knochen und Zahnwurzeln gegeben, denn die Zahnmatrix weist sowohl ostokonduktive als auch osteoinduktive Eigenschaften auf. Außerdem enthält die Dentinmatrix Knochen-Morphogenese Proteine, welche für die Knocheninduktion von essentieller Bedeutung sind (Andersson et al., 2009, Linde, 1989).

Die Wundheilung nach Zahnwurzelaugmentation unterschied sich nicht von der Heilungsphase nach Augmentation mit AB. Auch der Implantationszeitpunkt nach Knochenaufbau mit Zahnwurzelfragmenten war nach einem Zeitraum von sechs Monaten möglich. In präklinischen Studien wurden die zahnwurzelaugmentierten Areale im Vergleich zum AB auf immunhistochemische Eigenschaften und

volumetrische Analysen untersucht. Außerdem konnten im Mikrocomputertomogramm im Vergleich zur Knochenblockaugmentation ähnliche Oseocalcin-Antigen-Reaktivitäten (6,71 versus 2,73%) und Knochenvolumina pro bewertetem Gewebavolumen (0,34 versus 0,21) nachgewiesen werden. In Ausdrehversuchen wurde verifiziert, dass beide Augmentationsgruppen analoge biomechanische Werte (61,97 versus 44,8 Ncm) aufwiesen (Becker et al., 2016).

In Analogie zum Begriff der Osseointegration, der die strukturelle Einheit von Knochen und Implantat beschreibt, entstand der Begriff der Dentointegration, der die suffiziente Verbindung zwischen Implantat und Dentin wiedergibt (Schwarz et al., 2013). Dieses Phänomen der Dentointegration kann beim Menschen nach Implantatinserion in die Zahnwurzel histologisch nicht nachgewiesen werden. Einen interessanten Aspekt stellt jedoch das mikrobiologische Milieu zwischen Implantat und Zahnwurzel im Vergleich zur mikrobiologischen Zusammensetzung zwischen Knochen und Implantat dar. Auf Basis dieser Studie kann ein Grundstein für weitere Forschungen im Hinblick auf die periimplantäre Zusammensetzung in Zahnwurzeln gelegt werden. Außerdem kann die Studie mit einem größeren Patientenkollektiv wiederholt werden, dass annähernd vergleichbare Zahlen von jeder Gruppe (endodontisch behandelte Zähne, parodontal geschädigte Zähne, Zähne mit großen Zahnhartsubstanzdefekten, frakturierte Zähne) enthält. Auf diese Weise könnten die Erfolgchancen jeder Gruppe auf eine Einheilung genauer untersucht werden.

Neben den in dieser Studie verwendeten extrahierten Zähnen können als mögliche Quellen für die Gewinnung von Zahnwurzelaugmentaten auch

retinierte, impaktierte oder überzählige Zähne verwendet werden, welche Gegenstand in aktuellen klinischen Studien sind.

Die Schrumpfung des Zahnwurzelaugmentats betrug 26 Wochen nach Augmentation im Durchschnitt ca. 1,39 mm bzw. 22%. Beim autogenen Knochenblock ist eine Resorption in einem Zeitraum von 1-5 Jahren nach Implantation um 12-60% beobachtet worden (Chiapasco et al., 2006). Um den Erfolg der geringen Schrumpfung einer Zahnwurzel nachweisen zu können, müssen Messungen des Knochenvolumens 1-5 Jahre nach Implantatinsertion erfolgen. Diese Studie belegt die Wirksamkeit der Zahnwurzelaugmentation und verifiziert die Ergebnisse der vorangegangenen präklinischen Untersuchungen.

5 Schlussfolgerungen

Nach Durchführung dieser Studie lässt sich schlussfolgern, dass eine suffiziente Verbreiterung der horizontalen Dimension des Kieferknochens durch die Zahnwurzelaugmentation bewiesen werden konnte.

Analog zu den Ergebnissen aus präklinischen tierexperimentellen Studien zeigen sich deutliche Anzeichen für eine Ersatzresorption.

Eine adäquate enossale Implantation ohne sekundäre Augmentation durch KEM war nach sechs Monaten in den augmentierten Kieferknochen möglich.

6 Literaturverzeichnis

- ALBREKTSSON, T. 1983. Direct bone anchorage of dental implants. *J Prosthet Dent*, 50, 255-61.
- ALOY-PROSPER, A., PENARROCHA-OLTRA, D., PENARROCHA-DIAGO, M. & PENARROCHA-DIAGO, M. 2015. The outcome of intraoral onlay block bone grafts on alveolar ridge augmentations: a systematic review. *Med Oral Patol Oral Cir Bucal*, 20, e251-8.
- AMLER, M. H., JOHNSON, P. L. & SALMAN, I. 1960. Histological and histochemical investigation of human alveolar socket healing in undisturbed extraction wounds. *J Am Dent Assoc*, 61, 32-44.
- ANDERSSON, L. 2008. Patient self-evaluation of intra-oral bone grafting treatment to the maxillary frontal region. *Dent Traumatol*, 24, 164-9.
- ANDERSSON, L. 2010. Dentin xenografts to experimental bone defects in rabbit tibia are ankylosed and undergo osseous replacement. *Dent Traumatol*, 26, 398-402.
- ANDERSSON, L., EMAMI-KRISTIANSEN, Z. & HOGSTROM, J. 2003. Single-tooth implant treatment in the anterior region of the maxilla for treatment of tooth loss after trauma: a retrospective clinical and interview study. *Dent Traumatol*, 19, 126-31.
- ANDERSSON, L., RAMZI, A. & JOSEPH, B. 2009. Studies on dentin grafts to bone defects in rabbit tibia and mandible; development of an experimental model. *Dent Traumatol*, 25, 78-83.
- ANDREASEN, J. O. 1980. Analysis of pathogenesis and topography of replacement root resorption (ankylosis) after replantation of mature permanent incisors in monkeys. *Swed Dent J*, 4, 231-40.
- ARAUJO, M. G. & LINDHE, J. 2005. Dimensional ridge alterations following tooth extraction. An experimental study in the dog. *J Clin Periodontol*, 32, 212-8.
- ARAUJO, M. G., SONOHARA, M., HAYACIBARA, R., CARDAROPOLI, G. & LINDHE, J. 2002. Lateral ridge augmentation by the use of grafts comprised of autologous bone or a biomaterial. An experiment in the dog. *J Clin Periodontol*, 29, 1122-31.
- ARAUJO, M. G., SUKEKAVA, F., WENNSTROM, J. L. & LINDHE, J. 2005. Ridge alterations following implant placement in fresh extraction sockets: an experimental study in the dog. *J Clin Periodontol*, 32, 645-52.
- ARRINGTON, E. D., SMITH, W. J., CHAMBERS, H. G., BUCKNELL, A. L. & DAVINO, N. A. 1996. Complications of iliac crest bone graft harvesting. *Clin Orthop Relat Res*, 300-9.

- BAHAT, O. 2000. Branemark system implants in the posterior maxilla: clinical study of 660 implants followed for 5 to 12 years. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 15, 646-53.
- BECKER, K., DRESCHER, D., HONSCHIED, R., GOLUBOVIC, V., MIHATOVIC, I. & SCHWARZ, F. 2016. Biomechanical, micro-computed tomographic and immunohistochemical analysis of early osseous integration at titanium implants placed following lateral ridge augmentation using extracted tooth roots. *Clin Oral Implants Res*.
- BORMANN, K. H., SUAREZ-CUNQUEIRO, M. M., SINIKOVIC, B., KAMPMANN, A., VON SEE, C., TAVASSOL, F., BINGER, T., WINKLER, M., GELLRICH, N. C. & RUCKER, M. 2012. Dentin as a suitable bone substitute comparable to ss-TCP-an experimental study in mice. *Microvasc Res*, 84, 116-22.
- BRAGGER, U., KAROUSSIS, I., PERSSON, R., PJETURSSON, B., SALVI, G. & LANG, N. 2005. Technical and biological complications/failures with single crowns and fixed partial dentures on implants: a 10-year prospective cohort study. *Clin Oral Implants Res*, 16, 326-34.
- BRANEMARK, P. I., ADELL, R., BREINE, U., HANSSON, B. O., LINDSTROM, J. & OHLSSON, A. 1969. Intra-osseous anchorage of dental prostheses. I. Experimental studies. *Scand J Plast Reconstr Surg*, 3, 81-100.
- BRANEMARK, P. I., HANSSON, B. O., ADELL, R., BREINE, U., LINDSTROM, J., HALLEN, O. & OHMAN, A. 1977. Osseointegrated implants in the treatment of the edentulous jaw. Experience from a 10-year period. *Scand J Plast Reconstr Surg Suppl*, 16, 1-132.
- BRUDEVOLD, F., STEADMAN, L. T. & SMITH, F. A. 1960. Inorganic and organic components of tooth structure. *Ann N Y Acad Sci*, 85, 110-32.
- BURCHARDT, H. 1983. The biology of bone graft repair. *Clin Orthop Relat Res*, 28-42.
- BUSER, D., WARRER, K. & KARRING, T. 1990. Formation of a periodontal ligament around titanium implants. *J Periodontol*, 61, 597-601.
- CARDAROPOLI, G., ARAUJO, M. & LINDHE, J. 2003. Dynamics of bone tissue formation in tooth extraction sites. An experimental study in dogs. *J Clin Periodontol*, 30, 809-18.
- CHAPPUIS, V., ARAUJO, M. G. & BUSER, D. 2017. Clinical relevance of dimensional bone and soft tissue alterations post-extraction in esthetic sites. *Periodontol 2000*, 73, 73-83.
- CHIAPASCO, M., ZANIBONI, M. & BOISCO, M. 2006. Augmentation procedures for the rehabilitation of deficient edentulous ridges with oral implants. *Clin Oral Implants Res*, 17 Suppl 2, 136-59.
- CHUNG, W. C., TU, Y. K., LIN, Y. H. & LU, H. K. 2014. Outcomes of autotransplanted teeth with complete root formation: a systematic review and meta-analysis. *J Clin Periodontol*, 41, 412-23.
- DAVARPAHAH, M. & SZMUKLER-MONCLER, S. 2009. Unconventional implant placement. 2: placement of implants through impacted teeth. Three case reports. *Int J Periodontics Restorative Dent*, 29, 405-13.

- DAVARPANA, M. & SZMUKLER-MONCLER, S. 2009. Unconventional implant treatment: I. Implant placement in contact with ankylosed root fragments. A series of five case reports. *Clin Oral Implants Res*, 20, 851-6.
- DAVARPANA, M., SZMUKLER-MONCLER, S., RAJZBAUM, P., DAVARPANA, K., CAPELLE-OUADA, N. & DEMURASHVILI, G. 2015. Unconventional implant placement. V: Implant placement through impacted teeth; results from 10 cases with an 8- to 1-year follow-up. *Int Orthod*, 13, 164-80.
- DONOS, N., MARDAS, N. & CHADHA, V. 2008. Clinical outcomes of implants following lateral bone augmentation: systematic assessment of available options (barrier membranes, bone grafts, split osteotomy). *J Clin Periodontol*, 35, 173-202.
- ESPOSITO, M., GRUSOVIN, M. G., FELICE, P., KARATZOPOULOS, G., WORTHINGTON, H. V. & COULTHARD, P. 2009. Interventions for replacing missing teeth: horizontal and vertical bone augmentation techniques for dental implant treatment. *Cochrane Database Syst Rev*, Cd003607.
- FICKL, S., ZUHR, O., WACHTEL, H., BOLZ, W. & HUERZELER, M. 2008. Tissue alterations after tooth extraction with and without surgical trauma: a volumetric study in the beagle dog. *J Clin Periodontol*, 35, 356-63.
- HAMMARSTROM, L., BLOMLOF, L. & LINDSKOG, S. 1989. Dynamics of dentoalveolar ankylosis and associated root resorption. *Endod Dent Traumatol*, 5, 163-75.
- HILL, N. M., HORNE, J. G. & DEVANE, P. A. 1999. Donor site morbidity in the iliac crest bone graft. *Aust N Z J Surg*, 69, 726-8.
- HURZELER, M. B., ZUHR, O., SCHUPBACH, P., REBELE, S. F., EMMANOUILIDIS, N. & FICKL, S. 2010. The socket-shield technique: a proof-of-principle report. *J Clin Periodontol*, 37, 855-62.
- JENSEN, S. S. & TERHEYDEN, H. 2009. Bone augmentation procedures in localized defects in the alveolar ridge: clinical results with different bone grafts and bone-substitute materials. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 24 Suppl, 218-36.
- KARRING, T., ISIDOR, F., NYMAN, S. & LINDHE, J. 1985. New attachment formation on teeth with a reduced but healthy periodontal ligament. *J Clin Periodontol*, 12, 51-60.
- KARRING, T., NYMAN, S. & LINDHE, J. 1980. Healing following implantation of periodontitis affected roots into bone tissue. *J Clin Periodontol*, 7, 96-105.
- KURZ, L. T., GARFIN, S. R. & BOOTH, R. E., JR. 1989. Harvesting autogenous iliac bone grafts. A review of complications and techniques. *Spine (Phila Pa 1976)*, 14, 1324-31.
- LEONHARDT 1990. *Histologie, Zytologie und Mikroanatomie des Menschen*, Thieme Verlag.
- LINDE, A. 1989. Dentin matrix proteins: composition and possible functions in calcification. *Anat Rec*, 224, 154-66.

- LINDHE, J., ARAUJO, M. G., BUFLER, M. & LILJENBERG, B. 2013. Biphasic alloplastic graft used to preserve the dimension of the edentulous ridge: an experimental study in the dog. *Clin Oral Implants Res*, 24, 1158-63.
- LINDHE, J., CECCHINATO, D., DONATI, M., TOMASI, C. & LILJENBERG, B. 2014. Ridge preservation with the use of deproteinized bovine bone mineral. *Clin Oral Implants Res*, 25, 786-90.
- MCCAUL, L. K., JENKINS, W. M. & KAY, E. J. 2001. The reasons for extraction of permanent teeth in Scotland: a 15-year follow-up study. *Br Dent J*, 190, 658-62.
- NKENKE, E., RADESPIEL-TROGER, M., WILTFANG, J., SCHULTZE-MOSGAU, S., WINKLER, G. & NEUKAM, F. W. 2002. Morbidity of harvesting of retromolar bone grafts: a prospective study. *Clin Oral Implants Res*, 13, 514-21.
- NKENKE, E., SCHULTZE-MOSGAU, S., RADESPIEL-TROGER, M., KLOSS, F. & NEUKAM, F. W. 2001. Morbidity of harvesting of chin grafts: a prospective study. *Clin Oral Implants Res*, 12, 495-502.
- PAOLANTONIO, M., DOLCI, M., SCARANO, A., D'ARCHIVIO, D., DI PLACIDO, G., TUMINI, V. & PIATTELLI, A. 2001. Immediate implantation in fresh extraction sockets. A controlled clinical and histological study in man. *J Periodontol*, 72, 1560-71.
- QAHASH, M., SUSIN, C., POLIMENI, G., HALL, J. & WIKESJO, U. M. 2008. Bone healing dynamics at buccal peri-implant sites. *Clin Oral Implants Res*, 19, 166-72.
- QIN, X., RAJ, R. M., LIAO, X. F., SHI, W., MA, B., GONG, S. Q., CHEN, W. M. & ZHOU, B. 2014. Using rigidly fixed autogenous tooth graft to repair bone defect: an animal model. *Dent Traumatol*, 30, 380-4.
- RAGHOEBAR, G. M., LOUWERSE, C., KALK, W. W. & VISSINK, A. 2001. Morbidity of chin bone harvesting. *Clin Oral Implants Res*, 12, 503-7.
- ROTHAMEL, D., SCHWARZ, F., HERTEN, M., FERRARI, D., MISCHKOWSKI, R. A., SAGER, M. & BECKER, J. 2009. Vertical ridge augmentation using xenogenous bone blocks: a histomorphometric study in dogs. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 24, 243-50.
- SANDOR, G. K., NISH, I. A. & CARMICHAEL, R. P. 2003. Comparison of conventional surgery with motorized trephine in bone harvest from the anterior iliac crest. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 95, 150-5.
- SANZ-SANCHEZ, I., ORTIZ-VIGON, A., SANZ-MARTIN, I., FIGUERO, E. & SANZ, M. 2015. Effectiveness of Lateral Bone Augmentation on the Alveolar Crest Dimension: A Systematic Review and Meta-analysis. *J Dent Res*, 94, 128s-42s.
- SANZ, M., CECCHINATO, D., FERRUS, J., PJETURSSON, E. B., LANG, N. P. & LINDHE, J. 2010. A prospective, randomized-controlled clinical trial to evaluate bone preservation using implants with different geometry placed into extraction sockets in the maxilla. *Clin Oral Implants Res*, 21, 13-21.
- SCHROPP, L., WENZEL, A., KOSTOPOULOS, L. & KARRING, T. 2003. Bone healing and soft tissue contour changes following single-tooth extraction: a clinical and

- radiographic 12-month prospective study. *Int J Periodontics Restorative Dent*, 23, 313-23.
- SCHWARZ, F., FERRARI, D., BALIC, E., BUSER, D., BECKER, J. & SAGER, M. 2010a. Lateral ridge augmentation using equine- and bovine-derived cancellous bone blocks: a feasibility study in dogs. *Clin Oral Implants Res*, 21, 904-12.
- SCHWARZ, F., FERRARI, D., PODOLSKY, L., MIHATOVIC, I. & BECKER, J. 2010b. Initial pattern of angiogenesis and bone formation following lateral ridge augmentation using rhPDGF and guided bone regeneration: an immunohistochemical study in dogs. *Clin Oral Implants Res*, 21, 90-9.
- SCHWARZ, F., GOLUBOVIC, V., BECKER, K. & MIHATOVIC, I. 2016a. Extracted tooth roots used for lateral alveolar ridge augmentation: a proof-of-concept study. *J Clin Periodontol*, 43, 345-53.
- SCHWARZ, F., GOLUBOVIC, V., MIHATOVIC, I. & BECKER, J. 2016b. Periodontally diseased tooth roots used for lateral alveolar ridge augmentation. A proof-of-concept study. *J Clin Periodontol*, 43, 797-803.
- SCHWARZ, F., HERTEN, M., SAGER, M., WIELAND, M., DARD, M. & BECKER, J. 2007. Histological and immunohistochemical analysis of initial and early osseous integration at chemically modified and conventional SLA titanium implants: preliminary results of a pilot study in dogs. *Clin Oral Implants Res*, 18, 481-8.
- SCHWARZ, F., MIHATOVIC, I., GOLUBOVIC, V. & BECKER, J. 2013. Dentointegration of a titanium implant: a case report. *Oral Maxillofac Surg*, 17, 235-41.
- SCHWARZ, F., ROTHAMEL, D., HERTEN, M., FERRARI, D., SAGER, M. & BECKER, J. 2008. Lateral ridge augmentation using particulated or block bone substitutes biocoated with rhGDF-5 and rhBMP-2: an immunohistochemical study in dogs. *Clin Oral Implants Res*, 19, 642-52.
- SCHWARZ, F., SCHMUCKER, A. & BECKER, J. 2016c. Initial case report of an extracted tooth root used for lateral alveolar ridge augmentation. *J Clin Periodontol*, 43, 985-989.
- SICILIANO, V. I., SALVI, G. E., MATARASSO, S., CAFIERO, C., BLASI, A. & LANG, N. P. 2009. Soft tissues healing at immediate transmucosal implants placed into molar extraction sites with buccal self-contained dehiscences. A 12-month controlled clinical trial. *Clin Oral Implants Res*, 20, 482-8.
- TAN, W. L., WONG, T. L., WONG, M. C. & LANG, N. P. 2012. A systematic review of post-extraction alveolar hard and soft tissue dimensional changes in humans. *Clin Oral Implants Res*, 23 Suppl 5, 1-21.
- TOMASI, C., SANZ, M., CECCHINATO, D., PJETURSSON, B., FERRUS, J., LANG, N. P. & LINDHE, J. 2010. Bone dimensional variations at implants placed in fresh extraction sockets: a multilevel multivariate analysis. *Clin Oral Implants Res*, 21, 30-6.
- VAN STEENBERGHE, D., LEKHOLM, U., BOLENDER, C., FOLMER, T., HENRY, P., HERRMANN, I., HIGUCHI, K., LANEY, W., LINDEN, U. & ASTRAND, P. 1990.

Applicability of osseointegrated oral implants in the rehabilitation of partial edentulism: a prospective multicenter study on 558 fixtures. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 5, 272-81.

WAHL, D. A. & CZERNUSZKA, J. T. 2006. Collagen-hydroxyapatite composites for hard tissue repair. *Eur Cell Mater*, 11, 43-56.

WARRER, K., KARRING, T. & GOTFREDSEN, K. 1993. Periodontal ligament formation around different types of dental titanium implants. I. The self-tapping screw type implant system. *J Periodontol*, 64, 29-34.

7 Danksagung

Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Doktorvater und Betreuer Herrn Professor Dr. Frank Schwarz für die freundliche Überlassung des interessanten Themas, für seine hervorragende wissenschaftliche Betreuung und seine geduldige Unterstützung bei allen Fragen. Dank seinem Vertrauen in mich und meine Arbeit hat sich meine Motivation wissenschaftlich zu arbeiten sehr gesteigert.

Des Weiteren möchte ich Herrn Professor Dr. Jürgen Becker für meine praktische Ausbildung danken.

Mein außerordentlicher Dank gilt darüber hinaus den freundlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern aus der Abteilung für Zahnärztliche Chirurgie und Aufnahme der Westdeutschen Kieferklinik, für ihre Hilfe bei der Betreuung der Studienpatienten.

Vor allem möchte ich mich bei meinen Eltern Gülten und Mehmet Hazar und meinen Schwestern Ceren und Sinem bedanken, ohne die ein Studium und diese Doktorarbeit nicht möglich gewesen wären. Ihnen ist diese Arbeit gewidmet.

Und nicht zuletzt möchte ich meinem Ehemann und besten Freund Ayhan für seine Unterstützung und den starken emotionalen Rückhalt danken. Auch ihm ist diese Arbeit gewidmet.