

Aus der Klinik für Zahnerhaltung, Parodontologie und Präventive Zahnheilkunde
Universitätsklinikum des Saarlandes, Homburg/Saar
Direktor: Prof. Dr. M. Hannig

**Augmentation transversaler Kieferkammdefizite zur Aufnahme dentaler
Implantate: Vergleich der Knochenschalentechnik nach Khoury mit einer
Schalentechnik unter Verwendung von autologem Dentin
(Tooth-Shell-Technique)**

Inaugural-Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Zahnheilkunde
der Medizinischen Fakultät
der Universität des Saarlandes

2023

vorgelegt von:
Marco Alexander Peichl, M.A.
geboren am 07.06.1984 in Heidelberg

Tag der Promotion: 14.11.2023

Dekan: Prof. Dr. M.D. Menger

1. Berichterstatter: Prof. Dr. M. Korsch, M.A.

2. Berichterstatter: Prof. Dr. Dr. K. Freier

Meiner Familie in Liebe und Dankbarkeit gewidmet

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis IV

Abbildungsverzeichnis V

Tabellenverzeichnis..... VI

1. Zusammenfassung..... 1

2. Einleitung 5

2.1. Physiologie und Pathophysiologie der Alveolenheilung nach Zahnverlust..... 8

2.2. Augmentationstechniken 11

2.3. Augmentationsmaterialien 13

2.4. Autologes Dentin als Augmentationsmaterial..... 17

2.5. Ziel der Arbeit/ Fragestellung 22

3. Material und Methodik..... 23

3.1. Studiendesign und Studienpatienten 23

3.2. Berufsethische Beratung 24

3.3. Fallzahlkalkulation..... 24

3.4. Ein- und Ausschlusskriterien 25

3.4.1. Einschlusskriterien 25

3.4.2. Ausschlusskriterien 25

3.5. Aufklärung der Patienten 26

3.6. Randomisierung 27

3.7. Entfernung und Aufbereitung der Studienzähne..... 27

3.8. Operationstechniken..... 28

3.8.1. Augmentation..... 28

3.8.2. Implantation 32

3.8.3. Freilegung der Implantate 34

3.9. Evaluation der Implantatstabilität 34

3.10. Studienprotokoll..... 36

3.11. Erfassung postoperativer Beschwerden	41
3.12. Erfassung klinischer Komplikationen	42
3.13. Radiologische Auswertung	42
3.13.1. Approximales Knochenniveau in Relation zur Implantatschulter	43
3.13.2. Transversale Kieferkammbreite und Breite der vestibulären bzw. oralen Lamelle	44
3.14. Statistische Auswertung	45
4. Ergebnisse	46
4.1. Studienpopulation.....	46
4.2. Klinische Dokumentation der Augmentation.....	46
4.2.1. Augmentationsregionen nach Zahngruppen.....	46
4.2.2. Kieferkammbreiten.....	47
4.2.3. Eingriffsdauer.....	47
4.3. Klinische Dokumentation der Implantation	47
4.3.1. Implantattypen.....	48
4.3.2. Bestimmung der Primärstabilität.....	49
4.4. Klinische Dokumentation der Implantatfreilegung.....	49
4.4.1. Periimplantäres Knochenniveau.....	49
4.4.2. Bestimmung der Sekundärstabilität	49
4.5. Patientenwahrnehmung postoperativer Beschwerden.....	51
4.5.1. Postoperative Schmerzen nach Augmentation	51
4.5.2. Postoperative Schwellung nach Augmentation.....	51
4.5.3. Schmerzmitteleinnahme nach Augmentation.....	53
4.6. Klinische Dokumentation des Follow-ups ein Jahr nach der Augmentation.....	54
4.6.1. Entzündungsparameter.....	54
4.6.2. Breite der keratinisierten Mukosa	54
4.7. Dokumentation klinischer Komplikationen	54
4.8. Radiologische Auswertung	54
4.8.1. Approximales Knochenniveau in Relation zur Implantatschulter	54

4.8.2. Kieferkammbreiten	55
4.8.3. Resorption der transversalen Kieferkammbreite.....	57
4.8.4. Zusammenhang zwischen Augmentatbreite und Resorption.....	61
5. Diskussion.....	62
5.1. Wissenschaftlicher Hintergrund und Fragestellung der Arbeit.....	62
5.2. Methodenwahl.....	63
5.3. Methodenkritik	63
5.3.1. Kritik an den statistischen Verfahren	63
5.3.2. Kritik an der praktischen Durchführung	64
5.4. Diskussion der Ergebnisse	66
5.5. Schlussfolgerungen	83
6. Literaturverzeichnis	84
7. Eigene Publikationen	96
8. Danksagung	97
9. Lebenslauf.....	98
10. Anhang.....	99

Abkürzungsverzeichnis

BMP= Bone Morphogenetic Protein

BoP= Bleeding on Probing

BST= Bone-Shell-Technique

DFDBA= Demineralized Freeze-Dried Bone Allograft

DVT= digitale Volumetomographie

EDTA= Ethylendiamintetraacetat

EGF= Epidermal Growth Factor

FFBA= Fresh Frozen Bone Allograft

FGF= Fibroblast Growth Factor

GBR= Guided Bone Regeneration

IGF= Insulin-Like Growth Factor

IL= Interleukin

ISQ= Implantat-Stabilitäts-Quotient

KEM= Knochenersatzmaterial

MPBA= Mineralized Processed Bone Allograft

NRS= numerische Rating-Skala

PDGF= Platelet-Derived Growth Factor

PROM= Patient Reported Outcome Measure

RANK= Receptor Activator of NF- κ B

RANKL= Receptor Activator of NF- κ B Ligand

RFA= Resonanzfrequenzanalyse

VAS= visuelle Analogskala

VEGF= Vascular Endothelial Growth Factor

VRS= verbale Rating-Skala

TGF= Transforming Growth Factor

TST = Tooth-Shell-Technique

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Einteilung der Knochenqualitäten nach Lekholm und Zarb 1985 6

Abb. 2: Gewinnung eines autologen Knochenblocks und von Knochenspänen aus der Linea obliqua externa des retromolaren Unterkiefers 30

Abb. 3: Präparation der Knochenschale und Fixation mit Distanzschrauben 31

Abb. 4: Tooth-Shell-Technique..... 32

Abb. 5: Implantation 33

Abb. 6: Evaluation der Implantatstabilität 35

Abb. 7: Präparation der Zahnscheibe in der TST-Gruppe 37

Abb. 8: Aufbereitung des Zahnmaterials 38

Abb. 9: Visuelle Analogskala (VAS)..... 41

Abb. 10: Evaluation des approximalen Knochenniveaus..... 43

Abb. 11: Messung der transversalen Kieferkammbreite und der vestibulären bzw. oralen Knochenlamelle..... 44

Abb. 12: Streudiagramm Korrelation zwischen ISQ zum Zeitpunkt der Implantation und ISQ zum Zeitpunkt der Implantatfreilegung..... 50

Abb. 13: Boxplot-Diagramm zur Darstellung der postoperativen Schmerzen nach Augmentation 51

Abb. 14: Boxplot- Diagramm zur Darstellung der postoperativen Schwellung nach Augmentation 52

Abb. 15: Durchschnittliche Analgetikaeinnahme nach Augmentation 53

Abb. 16: Streudiagramm zur Darstellung des Zusammenhangs zwischen Augmentatbreite und der Resorption auf Höhe L2 zwischen den Untersuchungszeitpunkten T1 und T4..... 61

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Klassifikation der Knochenqualitäten nach Misch 1990 7

Tab. 2: Einteilung der Knochenersatzmaterialien (modifiziert nach Khoury)..... 17

Tab. 3: Alters- und Geschlechtsverteilung der Patienten zum Zeitpunkt der Augmentation... 46

Tab. 4: Übersicht der einzelnen Patienten mit Geschlecht, Alter, Gruppenzugehörigkeit, Implantatsystem, Implantatlänge und -durchmesser 48

Tab. 5: Übersicht der Implantatstabilitätsquotienten zum Zeitpunkt der Implantation und der Implantatfreilegung 50

Tab. 6: Mittelwerte der transversalen Kieferkammbreite zu den Zeitpunkten T1-T4 und der Breiten der vestibulären und oralen Lamelle zu den Zeitpunkten T2-T4 56

Tab. 7: Mittlere Resorption (absolut) der transversalen Kieferkammbreite und der vestibulären bzw. oralen Lamelle 59

Tab. 8: Mittlere Resorption (relativ) der transversalen Kieferkammbreite und der vestibulären bzw. oralen Lamelle 60

1. Zusammenfassung

Verschiedene Vorgänge können zu einer Dimensionsveränderung des Kieferkamms führen, in deren Folge die Insertion eines dentalen Implantats deutlich erschwert oder unmöglich ist. Dazu zählen entzündliche Prozesse wie z.B. eine Parodontitis, aber auch Tumore und Zysten, Traumata, chirurgische Einflussfaktoren sowie physiologische Umbauvorgänge und Inaktivitätsatrophie nach Zahnverlust. In den vergangenen Jahrzehnten sind viele operative Techniken beschrieben worden, die eine Verbreiterung bzw. Erhöhung des Kieferkamms anstreben, um die sichere Insertion eines Implantats zu gewährleisten.

Das Ziel der vorliegenden Untersuchung war der Vergleich zweier Techniken zur Augmentation bei transversalen Kieferkammdefiziten für die Aufnahme von dentalen Implantaten. Dabei sollte überprüft werden, ob sich mit einer Kieferkammaugmentation unter Verwendung einer autologen Dentinscheibe und partikuliertem Dentin (Tooth-Shell-Technique) Ergebnisse erreichen lassen, die hinsichtlich des Augmentations- und Implantaterfolges, dem Auftreten postoperativer Komplikationen und postoperativer Beschwerden mit der Knochenschalentechnik nach Khoury (Bone-Shell-Technique) gleichwertig sind. Die Untersuchung wurde als prospektive, randomisierte Studie durchgeführt. Der Beobachtungszeitraum der Studie belief sich auf ein Jahr.

Es wurden insgesamt 20 Studienteilnehmer in die Studie eingeschlossen und in zwei Studiengruppen (Gruppe 1: Bone-Shell-Technique (BST); Gruppe 2: Tooth-Shell-Technique (TST)) randomisiert zu je 10 Patienten verteilt.

Mit der TST konnten primär Augmentationsbreiten erreicht werden, die mit denen der BST vergleichbar waren. Während des Beobachtungszeitraums traten bei keinem der Studienteilnehmer Komplikationen auf. Die postoperativen Beschwerden nach den augmentativen Eingriffen wurden von den Patienten vom 1.-28. postoperativen Tag mittels visueller Analogskalen dokumentiert. Die Schmerzen waren in beiden Gruppen moderat (mediane VAS <20) ohne signifikanten Unterschied zwischen den beiden Gruppen. Die postoperative Schwellung wurde von den Patienten als schwerwiegender bewertet als der postoperative Schmerz. Die Schwellung wurde in der TST-Gruppe am 7. postoperativen Tag signifikant stärker als in der BST-Gruppe angegeben.

Drei Monate nach dem augmentativen Eingriff war bei allen Studienteilnehmern ein ausreichend dimensionierter Kieferkamm für die Aufnahme eines konventionellen

Titanimplantats vorzufinden. Die Implantate konnten in beiden Gruppen mit einer vergleichbaren Primärstabilität (BST: ISQ=63,1, TST: ISQ=57,7; $p=0,301$) verankert werden. Nach einer Einheitszeit von drei Monaten hatte die Implantatstabilität in beiden Gruppen gleichermaßen signifikant zugenommen (BST: +15,1; TST: +15,4; $p=0,956$). Die transversale Kieferkammbreite wurde nach der Augmentation, der Implantation, der Freilegung und ein Jahr nach der Augmentation mit einer dreidimensionalen Bildgebung im Sinne eines digitalen Volumentomogramms ermittelt. Dabei zeigte sich nach einem Jahr eine mittlere Resorption der transversalen Kieferkammbreite von $1,42\pm 0,93$ mm in der BST-Gruppe und $0,98\pm 1,09$ mm in der TST-Gruppe. Der Unterschied zwischen beiden Gruppen war dabei nicht signifikant ($p=0,346$). An einem Implantat der BST- Gruppe und an zwei Implantaten der TST- Gruppe war ein vertikaler Knochenabbau von 0,9 mm bzw. 0,5 mm und 0,7 mm zu dokumentieren. Die Häufigkeit einer periimplantären Mukositis war in beiden Gruppen vergleichbar (BST: $n=3$; TST: $n=4$).

Es konnte festgestellt werden, dass die Augmentation mit autologem Dentin nach dem Konzept der Tooth-Shell-Technique eine erfolgsversprechende und sichere Behandlungsmethode zur Augmentation von lateralen Kieferkammdefiziten darstellt. Hinsichtlich des Augmentations- und Implantationserfolgs, der Resorption, des Auftretens von Komplikationen und postoperativer Beschwerden ist diese mit der Knochenschalentechnik nach Khoury vergleichbar. Zur Bewertung der Langzeitstabilität der Augmentate und der Implantatüberlebensraten sind Studien mit einem längeren Beobachtungszeitraum notwendig.

Summary

Various processes can lead to a dimensional change of the alveolar ridge, which can complicate the placement of a dental implant or even make it impossible. These include inflammatory processes such as periodontitis, but also tumors and cysts, trauma, surgical factors as well as physiological remodeling processes and atrophy after tooth loss. Over the past decades, many surgical techniques have been described that aim to broaden the alveolar ridge to ensure the safe placement of an implant.

The aim of the present study was to compare two techniques for grafting transverse alveolar ridge deficits to incorporate dental implants. The purpose was to determine whether alveolar ridge grafting using an autologous dentin shell and particulate dentin (Tooth-Shell-Technique) can achieve results equivalent to the Bone-Shell-Technique according to Khoury in terms of graft and implant success, incidence of postoperative complications and postoperative discomfort. The study was conducted as a prospective, randomized trial. The observation period of the study was one year.

A total of 20 study participants were included in the study and randomly divided into two study groups (Group 1: Bone-Shell-Technique (BST); Group 2: Tooth-Shell-Technique (TST)) of 10 patients each.

With TST, augmentation results comparable to those of BST were achieved in terms of alveolar ridge width. Postoperative discomfort after augmentation surgery was documented by patients from postoperative day 1-28 using visual analog scales. Postoperative pain was moderate in both groups (median VAS <20) with no statistically significant difference between the groups. Postoperative swelling was rated as more severe than postoperative pain by patients. Swelling was reported to be significantly more severe in the TST group on postoperative day 7. During the observation period, none of the study participants experienced clinical or technical complications. Three months after the augmentation surgery, all study participants had an adequately sized alveolar ridge to receive a conventional titanium implant. The implants were inserted with an equivalent primary stability in both groups (BST: ISQ=63.1, TST: ISQ=57.7; $p=0.301$). After a healing period of three months, both groups showed an equally significant increase in implant stability (BST: +15.1; TST: +15.4; $p=0.956$). Transversal ridge width was determined after grafting, implant placement, implant exposure and one year after grafting with three-dimensional imaging in terms of a cone-beam CT. After one year, the mean resorption of the transversal ridge width was 1.42 ± 0.93 mm in the BST group and 0.98 ± 1.09 mm in the TST

group. The difference between the two groups was not significant ($p=0.346$). Vertical bone resorption of 0.9mm, resp. 0.5mm and 0.7mm was observed on one implant in the BST group and on two implants in the TST group. The incidence of peri-implant mucositis was comparable in both groups (BST: $n=3$; TST: $n=4$).

It can be concluded that bone grafting using autologous dentin according to the Tooth-Shell-Technique concept is a promising and safe method for grafting lateral ridge deficits. Regarding grafting and implantation success, resorption, complications and postoperative discomfort this technique is comparable to the Bone-Shell-Technique according to Khoury. Studies with a longer observation period are necessary to evaluate the long-term stability of the graft and the implant survival rates.

2. Einleitung

Der Verlust eines Zahnes oder mehrerer Zähne stellt für den betroffenen Patienten, je nach Ausmaß und Lokalisation, nicht selten eine deutliche Beeinträchtigung der orofazialen Integrität dar. Eine ästhetische, funktionelle, sensorische, phonetische und nicht zuletzt auch psychosoziale Rehabilitation kann mit der Eingliederung eines Zahnersatzes erfolgen. Bei klassischen Formen des Zahnersatzes werden die benachbarten Zähne oder der Restzahnbestand zur Befestigung des Zahnersatzes genutzt. Nicht selten bedeutet dies, dass vor allem gesunde Zähne zur Aufnahme eines Brückenankers oder von Verankerungselementen, wie z.B. Teleskopkronen, herangezogen und beschliffen werden. Das Beschleifen dieser Zähne führt nicht nur zum Verlust von gesunder Zahnhartsubstanz, sondern auch zu einem erhöhten Risiko für endodontische Komplikationen, Sekundärkaries oder Frakturereignisse (GOODACRE et al., 2003). Für die prothetische Versorgung nach Zahnverlust setzen sich in den letzten Jahrzehnten zunehmend dentale Implantate durch, vor allem, wenn dadurch herausnehmbarer Zahnersatz oder das Beschleifen naturgesunder Zähne vermieden werden kann. Das Indikationsspektrum von dentalen Implantaten reicht von der Versorgung der Einzelzahnücke bis zur Rehabilitation des zahnlosen Kiefers mit herausnehmbarem oder festsitzendem Zahnersatz.

Die Verankerung von enossalen Implantaten im Kieferknochen beruht auf dem vom schwedischen Orthopäden Per-Ingvar Brånemark postulierten Konzept der Osseointegration. Unter dem Begriff Osseointegration versteht man den direkten funktionellen und strukturellen Kontakt zwischen vitalem Knochengewebe und der Oberfläche des lastaufnehmenden Implantats ohne Interposition von Bindegewebe (BRÅNEMARK et al., 1969). Schröder et al. bezeichneten dieses Aufwachsen von Knochen auf die Implantatoberfläche als funktionelle Ankylose (SCHROEDER et al., 1976). Eine suffiziente Osseointegration durch Kontaktosteogenese hängt von der Biokompatibilität des Implantatwerkstoffs, dessen Oberflächenbeschaffenheit, der Belastung während der Einheilung, dem Zustand des Knochens und einer ausreichenden mechanischen Stabilität (Primärstabilität) ab (ALBREKTSSON, JACOBSSON, 1987). Diese mechanische Stabilität des Implantats im Knochen unmittelbar nach der Insertion ist als Primärstabilität definiert. Sie kommt durch das Eindrehen und „Verklemmen“ des Implantats in ein formkongruent präpariertes Implantatlager zustande. Eine ausreichende Knochenqualität und -quantität sind dabei entscheidende Faktoren für eine sichere Primärstabilität und damit auch für den Erfolg der Implantation (CHRCANOVIC et al., 2017).

Die Knochenqualität wird in der dentalen Implantologie über das Verhältnis von kompakter Kortikalis und trabekulär organisierter Spongiosa definiert. Lekholm und Zarb führten 1985 ein Klassifikationsschema ein, nach welchem der Kieferknochen anhand dieses Verhältnisses in vier Klassen eingeteilt wird (LEKHOLM, ZARB, 1985). Während ein Knochen der Klasse 1 durch einen hohen Anteil an Kortikalis und eine dichte Spongiosastruktur gekennzeichnet ist, definiert sich ein Knochen der Klasse 4 durch eine dünne Kortikalis, die eine lockere Spongiosa umgibt (siehe Abb. 1).

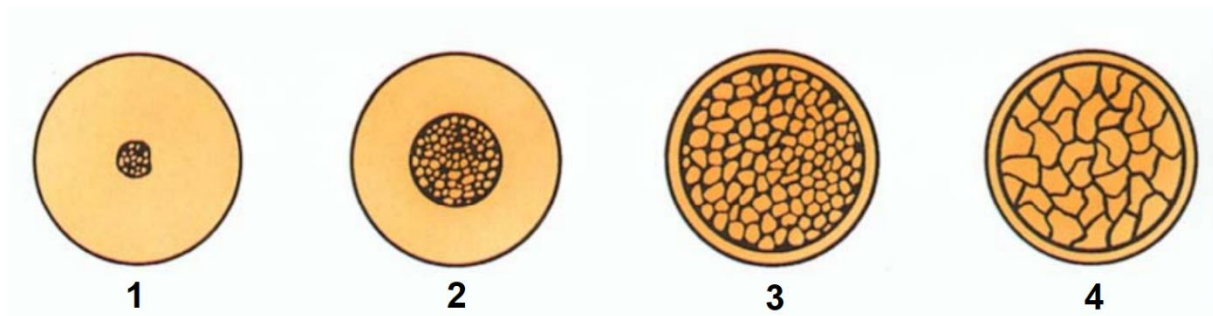


Abb. 1: Einteilung der Knochenqualitäten nach Lekholm und Zarb 1985

(aus H. Spiekermann: *Farbatlanten der Zahnmedizin: „Implantologie“*; Thieme, Stuttgart, 1994)

Klasse 1: Kiefer besteht fast ausschließlich aus homogener Kortikalis

Klasse 2: Breite Kortikalis umgibt engmaschige Spongiosa

Klasse 3: Dünne Kortikalis umgibt engmaschige Spongiosa

Klasse 4: Dünne Kortikalis umgibt weitmaschige Spongiosa

Eine vergleichbare Klassifikation wurde Anfang der 1990er Jahre von Carl Misch vorgeschlagen. Der Knochen wird dabei, wie bei der Klassifikation von Lekholm und Zarb, anhand des Kortikalis-Spongiosa-Verhältnisses in vier Qualitätsklassen unterteilt (D1- D4). Jede dieser Klassen wird darüber hinaus anatomischen Lokalisationen zugeordnet und die implantologische Wertigkeit des Knochens bewertet. Faktoren, die in diese Bewertung einfließen, sind unter anderem die zu erreichende Primärstabilität, der Knochen-Implantat-Kontakt oder die Blutversorgung (MISCH, 1990a). In ausgeprägt kortikalem Knochen der Qualität D1 lässt sich aufgrund der mechanischen Festigkeit in der Regel eine hohe Primärstabilität und ein großflächiger Kontakt zwischen Implantat und Knochen erreichen. Die geringe Durchblutung des kortikalen Knochens kann jedoch die Osseointegration verzögern. Bei Knochen der Qualität D4 ist es dagegen, bedingt durch die dünne Kortikalis und die weitmaschige Spongiosastruktur, schwierig, eine ausreichende Primärstabilität zu erzielen,

wodurch der Erfolg der Implantation negativ beeinflusst werden kann (CHRCANOVIC et al., 2017; GOIATO et al., 2014).

Tab. 1: Klassifikation der Knochenqualitäten nach Misch 1990

(aus H. Spiekermann: Farbatlanten der Zahnmedizin: „Implantologie“; Thieme, Stuttgart, 1994)

<p>D1- dichte Kortikalis Frontbereich des atrophierten zahnlosen Unterkiefers</p>	<p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - gute Primärstabilität - große Knochen-Implantat-Kontaktfläche - kurze Implantate möglich <p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - reduzierte Blutversorgung (längere Einheilzeiten) - oft geringe Knochenhöhe - schwierige Implantatbettpräparation (Überhitzung)
<p>D2- dichte, poröse Kortikalisengmaschige Spongiosa Front- und Seitenzahnbereich im Unterkiefer Frontalbereich (oral) im Oberkiefer</p>	<p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - gute Primärstabilität - gute Einheilungstendenz (Blutversorgung) - einfache Implantatbettpräparation <p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - keine
<p>D3- dünne, poröse Kortikalisweitmaschige Spongiosa Frontbereich (fazial) und Seitenzahnbereich im Oberkiefer Zustand nach Osteoplastik von D2</p>	<p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - gute Blutversorgung <p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - schwierige Implantatbettpräparation (Bohrlocherweiterung) - maximale Ausnutzung des Knochenangebots notwendig - reduzierte Knochen-Implantat-Kontaktfläche (Erhöhung der Implantatzahl)
<p>D4- weitmaschige Spongiosa Tuberbereich Zustand nach Osteoplastik von D3</p>	<p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - keine <p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - schwierige Implantatbettpräparation (Primärstabilität) - maximale Ausnutzung des Knochenangebots notwendig - reduzierte Knochen-Implantat-Kontaktfläche (Erhöhung der Implantatzahl)

Neben der Knochenqualität ist ein ausreichendes Knochenangebot, in das ein adäquat dimensioniertes Implantat inseriert werden kann, entscheidend für den Implantationserfolg. Dieses kann durch verschiedene Faktoren wie entzündliche Prozesse, Raumforderungen, Traumata, das chirurgische Vorgehen sowie physiologische Umbauvorgänge und Inaktivitätsatrophie nach Zahnverlust vermindert sein.

Ist der Kieferkamm zu schmal oder wird der Durchmesser des Implantats zu groß gewählt, ist die Implantatoberfläche in der Folge nur von einer dünnen Knochenlamelle bedeckt. Bei einer periimplantären Knochenstärke unter 1,5- 2 mm besteht ein erhöhtes Risiko für einen vertikalen marginalen Knochenverlust, vor allem im Bereich der vestibulären Knochenlamelle

(AIZCORBE-VICENTE et al., 2020; MONJE et al., 2019a). Der teilweise oder vollständige Verlust der vestibulären Lamelle führt häufig zu ästhetischen Problemen durch eine Rezession des periimplantären Weichgewebes und dadurch freiliegenden Implantatanteilen (BUSER et al., 2004). Eine bakterielle Besiedelung der freiliegenden Implantatoberflächen befördert zudem das Entstehen von periimplantären Erkrankungen (LANG et al., 2000). Unter biomechanischen Gesichtspunkten ist bei einem ausgedünnten oder fehlenden vestibulären Hartgewebe eine erhöhte Belastung des periimplantären Knochens festzustellen (OKUMURA et al., 2010).

In den vergangenen Jahrzehnten sind daher verschiedene rekonstruktive Therapieansätze zur Herstellung eines ausreichend dimensionierten und qualitativ hochwertigen Implantatlagers (Augmentation) beschrieben worden.

2.1. Physiologie und Pathophysiologie der Alveolenheilung nach Zahnverlust

Nach dem Verlust eines Zahnes kommt es zu physiologischen Umbauvorgängen im Bereich der knöchernen Alveole. Bereits 1969 beschrieb Amler die grundlegenden Prinzipien der Regeneration der Extraktionsalveole (AMLER, 1969). In Folge der Extraktion induzieren Gewebshormone, die aus dem Endothel der geschädigten Blutgefäße freigesetzt werden, wie z.B. das Thromboxan-A₂, durch eine Vasokonstriktion und eine Aggregation von Thrombozyten die primäre (zelluläre) Hämostase. Durch den Kontakt des Blutes mit extravaskulärem Gewebethromboplastin wird zudem die plasmatische Gerinnungskaskade aktiviert, was eine Polymerisation des Fibrinogens im Blutplasma zu einem mechanisch stabilen Fibrinnetzwerk zur Folge hat (sekundäre bzw. plasmatische Hämostase). Es bildet sich Blutkoagulum, das die knöchernen Alveole auskleidet und diese vor bakterieller Infektion und Austrocknung schützt. Aktivierte Thrombozyten fördern durch eine Degranulation der α -Granula die Freisetzung von Wachstumsfaktoren und Zytokinen, vor allem IGF (insulin-like growth factor), TNF- α (Tumornekrose-Faktor-alpha), IL-1 (Interleukin-1), IL-6 (Interleukin-6), EGF (epidermal growth factor), TGF- β (transforming growth factor-beta), PDGF (platelet-derived growth factor), VEGF (vascular endothelial growth factor) und FGF (fibroblast growth factor). Unter dem Einfluss dieser Zytokine werden durch Chemotaxis Granulozyten, Monozyten und Gewebsmakrophagen angezogen, die nekrotische Zellen und Bakterien phagozytieren (WITTE, BARBUL, 1997). Proangiogenetische Wachstumsfaktoren, wie VEGF und FGF, induzieren die Proliferation von Endothelzellen, wodurch ab dem 3. Tag die Neoangiogenese im Koagel deutlich zunimmt (BROGI et al., 1994). Fibroblastenstimulierende Wachstumsfaktoren, wie PDGF, TGF- β und FGF, fördern die Differenzierung von Histiozyten

zu Fibroblasten und die Migration von Fibroblasten aus dem umgebenden Gewebe in das Blutkoagel. Diese bilden eine extrazelluläre Matrix aus Fibronectin, Glykosaminoglykanen und Hyaluronsäure. Im weiteren Verlauf der Heilung kommt es durch eine vermehrte Kapillareinsprossung und durch ein Einwachsen von Kollagenfasern zu einer Umwandlung dieser provisorischen Bindegewebsmatrix in Granulationsgewebe (CARDAROPOLI et al., 2003). Von den Wundrändern migrieren Gingivakeratinozyten auf das Granulationsgewebe und bilden so nach 14-21 Tagen eine vollständige epitheliale Bedeckung (SCULEAN et al., 2014). Wachstumsfaktoren, wie die bone morphogenetic proteins (BMP), TGF- β , PDGF, FGF und IGF, stimulieren die Migration von mesenchymalen Stammzellen durch Chemotaxis und deren Differenzierung zu Osteoprogenitorzellen und später zu sekretorischen Osteoblasten. Das organisierte Granulationsgewebe wird durch Osteoneogenese sukzessive durch lockeren Geflechtknochen ersetzt (ARAÚJO, LINDHE, 2005). Nach ca. 30 Tagen sind erste Zeichen eines Remodellings des Geflechtknochens zu Lamellenknochen im Sinne einer Ausbildung primärer Osteone festzustellen. Nach ca. 120-180 Tagen ist das Remodelling von Geflecht- zu Lamellenknochen abgeschlossen (CARDAROPOLI et al., 2003). Nicht selten ist im Zuge dieser Umbauvorgänge eine Dimensionsveränderung des ortsständigen Knochens im vertikalen, vor allem aber im oro-vestibulären Aspekt zu beobachten (VAN DER WEIJDEN et al., 2009). Eine wichtige Rolle spielt dabei der Bündelknochen, der das Zahnfach auskleidet und entwicklungs geschichtlich Teil des Zahnhalteapparates ist. Dieser Knochen ist eine zahnabhängige Struktur, an dem die Sharpey'schen Fasern des Zahnhalteapparats inserieren und der aus den Arteriolen des Parodonts ernährt wird. Nach der Zahnentfernung kommt es aufgrund der fehlenden Versorgung und der fehlenden funktionellen Stimuli durch den Zahnhalteapparat (Inaktivitätsatrophie) zu einer Resorption dieses Knochens (ARAÚJO, LINDHE, 2005). Die Resorption findet vorwiegend im vestibulären Anteil der Alveole statt, da dieser, vor allem bei gewebsschwachen Phänotypen, weitgehend aus Bündelknochen besteht. Je nach Stärke der bukkalen Knochenlamelle und dem Anteil an Bündelknochen können ein horizontaler Knochenverlust von 29-63% und ein vertikaler Knochenverlust von 11-22% beobachtet werden. Der größte Volumenverlust findet dabei in den ersten 6 Monaten post extractionem statt (TAN et al., 2012). Bei einer Stärke der vestibulären Lamelle von weniger als einem Millimeter, wie sie häufig bei gewebsschwachen Phänotypen anzutreffen ist, zeigt sich ein signifikant höherer Knochenverlust. In Untersuchungen von Chappuis et al. ergab sich für diesen Phänotyp ein mittlerer vertikaler Knochenverlust von 7,5 mm, während bei vestibulären Knochenlamellen mit einer Stärke größer als einem Millimeter der vertikale Verlust mit 1,1 mm deutlich geringer ausfiel (CHAPPUIS et al., 2017). Der orale Teil der

Alveolenwand stellt sich dagegen sowohl im horizontalen als auch im vertikalen Aspekt weniger resorptionsanfällig dar, da dieser zum einen gewebstärker ist und zum anderen vorwiegend aus Lamellenknochen besteht (ARAÚJO, LINDHE, 2005; CARDAROPOLI et al., 2003). Im Oberkiefer ist in den meisten Fällen eine schneller ablaufende und ausgeprägtere Resorption als im Unterkiefer zu beobachten. Dies wird durch die vergleichsweise dünn ausgeprägte Kortikalis und die spongiöse Grundstruktur des Oberkiefers begünstigt, da kortikaler Knochen deutlich resorptionsstabiler ist als spongiöser Knochen (SCHROPP et al., 2003).

Neben dem physiologischen Remodelling nach Zahnverlust können auch entzündliche Prozesse während der Alveolenheilung ursächlich für eine Resorption des Knochens sein (AMLER, 1999). Am häufigsten tritt dabei die akute postoperative Wundheilungsstörung auf. Hier kommt es typischerweise am 2.-4. postoperativen Tag entweder durch Fibrinolyse eines bis dahin stabilen Koagulums oder einer insuffizienten primären Koagulumbildung zu einem partiellen oder vollständigen Verlust des Blutkoagulums („trockene Alveole“, Alveolitis sicca). Die Ursachen für die Desintegration des Koagulums können Fibrinolyse durch bakterielle Enzyme in Folge einer Infektion, durch mechanische Irritation, z.B. durch eine Zahnbürste oder exzessives Spülen, sowie durch Nikotinabusus sein (GHOSH et al., 2022). Auch die Einnahme oraler Kontrazeptiva steht im Verdacht, durch eine gesteigerte Plasminogenaktivität das Risiko für eine Fibrinolyse zu erhöhen (SWEET, BUTLER, 1977). Nach dem Verlust des Blutkoagulums liegt Alveolarknochen frei und wird bakteriell infiziert, mit der Folge einer lokalisierten Osteitis bzw. Osteomyelitis. Seltener treten dagegen chronische Wundheilungsstörungen auf. Diese manifestieren sich in der Regel erst 2-4 Wochen nach der Zahntfernung. In der Literatur wird je nach Umfang des operativen Traumas insgesamt über eine Häufigkeit für postoperative Wundheilungsstörungen nach 3-30% aller Zahntfernungen berichtet (DALY et al., 2022). Dabei werden von verschiedenen Zellen, wie z.B. Leukozyten, vermehrt proinflammatorische Zytokine, wie z.B. IL-1 oder TNF- α , sezerniert. Diese regen Osteoblasten und aktive B- und T-Lymphozyten dazu an, ein spezifisches Protein, den Receptor Activator of NF- κ B Liganden (RANKL), auszuschütten. Die Bindung des RANKL an die entsprechende Rezeptordomäne RANK (Receptor Activator of NF- κ B) stimuliert die Differenzierung von Osteoklastenprogenitorzellen zu aktiven Osteoklasten und steigert zugleich die Aktivität von ausgereiften Osteoklasten. Letztere degradieren durch proteolytische Enzyme die kollagene Knochenmatrix und lösen über eine Erniedrigung des pH-Wertes durch

aktiven Protonentransport die mineralisierte Knochensubstanz auf (AZUMA et al., 2000; JIMI et al., 1999).

Auch ein traumatisch bedingter Knochenverlust, z.B. nach einer Alveolarfortsatzfraktur durch Sequestrierung (EBELSEDER, GLOCKNER, 1999), einer umfangreichen Deperiostierung bei der Bildung eines Mukoperiostlappens (FICKL et al., 2008) oder einer exzessiven Osteotomie bzw. traumatischen Luxation bei der Zahnentfernung, kann die Dimension des Alveolarkamms negativ beeinflussen (QUAYLE, 1990).

2.2. Augmentationstechniken

Bei den präimplantologischen Maßnahmen zur Herstellung eines ausreichend dimensionierten Kieferkamms kann generell zwischen additiven, expansiven und subtraktiven Techniken unterschieden werden.

Unter additiven Techniken versteht man die Verbreiterung bzw. Erhöhung des ortsständigen Knochens durch Auflagerung eines Augmentats. Zu den am häufigsten klinisch angewandten additiven Verfahren zählen die gesteuerte Knochenregeneration (guided bone regeneration (GBR)), die Augmentation mittels Titan-Mesh und die Blocktransplantation.

Das Prinzip der GBR beruht auf der Schaffung eines Hohlraums für die knöcherne Regeneration durch Applikation einer mechanischen, zellokklusiven Barriere im Sinne einer Membran. Diese Barriere verhindert die Proliferation von Weichgewebe in den Alveolardefekt, welche deutlich schneller abläuft als die Knochenneubildung. Dadurch wird dem Knochen die Möglichkeit gegeben, den freien Raum knöchern zu durchbauen (LINDE et al., 1993). Als Barriere können sowohl resorbierbare als auch nicht resorbierbare Membranmaterialien zum Einsatz kommen. Resorbierbare Materialien bieten den Vorteil, dass nach der Einheilung kein zusätzlicher Eingriff zur Materialentfernung notwendig ist (RETZEPI, DONOS, 2010). Meist erfolgt eine Füllung des Defektraumes zwischen Membran und Lagerknochen mit Knochenersatzmaterial und/oder partikuliertem Eigenknochen. Aufgrund der fehlenden Rigidität und mechanischen Stabilität der Membranmaterialien sind die Möglichkeiten vertikaler oder umfangreicher lateraler Augmentationen jedoch begrenzt (CHIAPASCO et al., 1999; TROELTZSCH et al., 2016).

Eine weitere, auf diesem biologischen Prinzip basierende Technik ist die Augmentation mittels Titan-Mesh. Im Unterschied zur GBR wird bei dieser Technik ein plastisch formbares Titannetz verwendet, welches ausreichend rigide ist, um mechanische Ruhe und eine sichere

Stabilisierung des Augmentats zu gewährleisten. Dadurch sind bei der Titan-Mesh-Technik auch Augmentationen komplexer lateraler Defekte und in begrenztem Umfang auch vertikale Augmentationen möglich (BRIGUGLIO et al., 2019).

Bei der Blocktransplantation wird dagegen ein kompaktes, blockförmiges Augmentat an den Defekt angepasst, so dass es dem Lagerknochen flächig anliegt, und dort fixiert. Die Fixation erfolgt meist mittels Osteosyntheseschrauben aus Titan, die nach Einheilung des Augmentats in der Regel wieder entfernt werden. Die Regeneration des Knochens und das Remodelling hängen dabei stark von den Eigenschaften des transplantierten Knochens ab. So verlaufen das Einwachsen von ernährenden Blutgefäßen und die Migration von pluripotenten Zellen in das Transplantat schneller, wenn dieses nicht nur aus Kortikalis besteht, sondern auch spongiöse Anteile enthält (BURCHARDT, 1983). Deshalb lassen sich mit kortiko-spongiösem Knochen mit großen spongiösen Anteilen, wie z.B. Knochen aus dem Beckenkamm, häufig sehr gute Regenerationsergebnisse erreichen (ZINS, WHITAKER, 1983). Nachteilig ist allerdings eine mitunter stark ausgeprägte Resorption dieser Transplantate während der Einheilung (MERTENS et al., 2013). Rein oder überwiegend kortikale Transplantate desmaler Genese aus intraoralen Spenderregionen, wie z.B. dem retromandibulären bzw. mentalen Bereich, weisen hingegen eine wesentlich geringere Resorption auf. Allerdings ist auch das Regenerationspotenzial aufgrund der kompakten Struktur begrenzt (KHOURY et al., 2010).

Mit der von Khoury beschriebenen Schalenteknik lassen sich die Stabilität von kortikalem Knochen gegenüber resorptiven Prozessen und die Regenerationsfähigkeit von spongiösem Knochen verbinden (KHOURY, HANSER, 2014). Hierbei wird ein kortikaler Knochenblock, z.B. aus dem retromandibulären Unterkiefer, gewonnen und eine dünne kortikale Platte abgetrennt. Diese wird, je nach angestrebter Kieferkambbreite, auf Distanz zum Knochendefekt fixiert. Der dadurch geschaffene Raum zwischen Lagerknochen und kortikaler Schale wird mit partikuliertem Knochen aufgefüllt. Das partikulierte Material imitiert durch die vergrößerte Oberfläche und den interpartikulären Raum spongiösen Knochen. Dadurch ergeben sich im Vergleich zu kompaktem kortikalem Knochen gute Voraussetzungen für eine Vaskularisation und die Migration von vitalen Knochenzellen in das Augmentat. Zudem lassen sich durch das Fixieren der kortikalen Schale auf Distanz zum Lagerknochen größere Augmentationsvolumina, auch in vertikaler Dimension, erreichen als durch monokortikale Blocktechniken (KHOURY et al., 2010).

Bei den expansiven Augmentationstechniken wird der ortsständige Knochen durch Spaltung und Dehnung erweitert. Dabei muss zwischen Techniken zur horizontalen Erweiterung und zur vertikalen Erhöhung des Kieferkamms unterschieden werden. Bei der Bone-Spreading- und der Bone-Splitting-Technik wird durch eine inkomplette vertikale Segmentosteotomie und durch Aufdehnung des Osteotomiespalts eine horizontale Erweiterung des Kieferkamms erreicht, allerdings nur in geringem Umfang (CHIAPASCO et al., 2009).

Die Sandwich-Technik und die Distraktionsosteogenese hingegen sind expansive Techniken, die vorwiegend zur Erhöhung des Kieferkamms eingesetzt werden. Bei der Sandwich-Technik wird eine vollständige horizontale Segmentosteotomie durchgeführt, wobei das Segment am oralen Mukoperiostlappen gestielt bleibt, um eine vaskuläre Versorgung des Knochens zu gewährleisten. Das Segment wird mit Osteosyntheseschrauben in vertikaler Dimension auf Distanz zum Lagerknochen fixiert. In den dadurch geschaffenen Spaltraum wird ein Interponat in Blockform oder in partikulierter Form eingebracht (SCHETTLER, HOLTERMANN, 1977).

Bei der Distraktionsosteogenese wird, ähnlich wie bei der Sandwich-Technik, eine horizontale Segmentosteotomie durchgeführt. Das Segment wird jedoch nicht statisch fixiert, sondern der Spaltraum nach einer Latenzphase kontinuierlich durch einen implantierten Distraktor expandiert. Dabei wird das im Zuge der Knochenheilung entstehende bindegewebige Regenerationsgewebe, der sogenannte Kallus, distrahiert und so ein Volumenzuwachs erreicht (ERNST, ADOLPHS, 2016). Die Distraktionsosteogenese kommt vorwiegend bei umfangreichen vertikalen Knochendefiziten und bei Schädelfehlbildungen zum Einsatz (DAVIES et al., 1998).

Subtraktive Verfahren können bei krestal schmalen, basal jedoch ausreichend dimensionierten Alveolarkämmen angewandt werden. Durch die Resektion eines schmalen Kieferkammanteils kann die Implantation in die tieferen, ausreichend breiten Anteile des Kiefers verlagert werden. Diese Technik findet hauptsächlich bei zahnlosen Kiefern Anwendung (KORSCH et al., 2020).

2.3. Augmentationsmaterialien

Die Einteilung von Augmentationsmaterialien erfolgt prinzipiell hinsichtlich ihrer biologischen Wirkung in Bezug auf die Knochenneubildung und ihres Ursprungs. Bei der biologischen Wirkung wird zwischen Osteokonduktion, Osteoinduktion und Osteogenese unterschieden.

Osteokonduktion beschreibt die Eigenschaft eines Augmentationsmaterials, die Neubildung von Knochen entlang einer Leitstruktur (Matrix) zu fördern (BURCHARDT, 1983). Poröse

oder partikuliert Materialien ermöglichen eine bessere Proliferation von Blutgefäßen und Migration von Knochenzellen und mesenchymalen Stammzellen aus der Peripherie in das Augmentat, als kompakte Augmentate dies tun. Idealerweise besteht das Material aus partikuliertem autologem Knochen oder bioinertem bzw. bioaktivem Knochenersatzmaterial, welches im Rahmen der Osteoneogenese resorbiert und durch neu gebildeten Knochen ersetzt wird (KHOURY et al., 2010).

Das Prinzip der Osteoinduktion beruht auf der Freisetzung osteoinduktiver Wachstumsfaktoren aus dem Augmentat, welche die Teilung und Differenzierung ortsständiger Osteoprogenitorzellen und undifferenzierter mesenchymaler Stammzellen in der Umgebung des Transplantats zu knochenbildenden Zellen anregen. Dabei sind die Bone Morphogenetic Proteins, welche zur Familie der Transforming Growth Factors (TGF) gehören, von besonderer Bedeutung (KHANIJOU et al., 2021; ZHANG et al., 1997). In der humanen Knochenmatrix konnten bislang 15 verschiedene BMP-Subtypen identifiziert werden, die im menschlichen Organismus unterschiedliche Wirkung entfalten können. Die regulatorische Wirkung auf die Knochenneubildung ist vor allen für die Subtypen BMP-2, BMP-3 und BMP-7 beschrieben (XIAO et al., 2007). Diese BMP-Subtypen stimulieren durch Chemotaxis die Migration von mesenchymalen Stammzellen in das Transplantat und fördern die Proliferation von Osteoprogenitorzellen sowie deren Differenzierung zu Osteoblasten (BARBOZA et al., 1999). Reife Osteoblasten sind wiederum selbst in der Lage, BMPs zu sezernieren, die in die Knochenmatrix eingebaut werden (MARX, GARG, 1998). Neben den BMPs sind in der Knochenmatrix zahlreiche weitere Wachstumsfaktoren vorzufinden, die regulatorisch auf die Zellproliferation und -differenzierung wirken, wie z.B. TGF- β , PDGF, FGF und IGF-1 bzw. IGF-2 (WOZNEY et al., 1990). Bei der Knochenneubildung ist vor allem IGF-1 von zentraler Bedeutung. IGF-1 wirkt regulatorisch auf die Calcium-Phosphat-Homöostase und den Vitamin-D3-Stoffwechsel und fördert dadurch die Mineralisierung von neugebildetem Knochengewebe. IGF-1 stimuliert zudem die Synthese von Proteoglykanen, Kollagen und anderen Matrixproteinen, die am Aufbau der organischen Knochenmatrix beteiligt sind, und fördert die Proliferation und Differenzierung von Osteoblasten (CANALIS et al., 1993).

Die osteogenetische Wirkung eines Augmentats hingegen geht von vitalen, ausdifferenzierten Osteoblasten aus, die mit dem Augmentat transplantiert werden und ohne weitere Differenzierung selbst in der Lage sind, neuen Knochen zu bilden (KHOURY et al., 2010).

Hinsichtlich ihres Ursprungs können alloplastische, xenogene, allogene und autologe Augmentationsmaterialien unterschieden werden.

Alloplastische Materialien sind synthetischen Ursprungs. Dazu zählen z.B. Biokeramiken, β -Tricalciumphosphat, synthetisches Hydroxylapatit, Bioglas oder Copolymere auf Polylactid-, Polyglycolid-, Polymethylmethacrylat- oder Polyhydroxyethylmethacrylat-Basis. Aufgrund ihrer synthetischen Herstellung sind diese Materialien praktisch unbegrenzt verfügbar und ohne Risiko einer Übertragung von Infektionskrankheiten einsetzbar. Alloplastische Materialien sind jedoch nur osteokonditiv wirksam, da sie keine osteoinduktiven Zytokine, wie z.B. BMPs oder vitale Osteoblasten bzw. Osteoprogenitorzellen, enthalten, von denen eine Osteogenese ausgehen könnte (MISCH, DIETSH, 1993).

Xenogene Knochenersatzmaterialien werden aus Fremdorganismen gewonnen. Sie können sowohl pflanzlichen (=phykogen, z.B. aus Algen) als auch tierischen Ursprungs sein (z.B. deproteinierter Knochen bovinen Ursprungs). Durch eine mehrstufige chemische und thermische Aufbereitung werden die organischen Anteile denaturiert und entfernt. Das Risiko für immunologische Reaktionen gegen das Augmentat und die Übertragung von Erkrankungen, insbesondere Erkrankungen durch pathologisch veränderte Proteine (Prionen), ist als sehr gering einzustufen (KIM et al., 2016a). Das nach der Aufbereitung verbleibende, trabekuläre, anorganische Gerüst des Gewebes dient als Leitgerüst für die Neoangiogenese und die darauffolgende Migration von knochenbildenden Zellen bzw. deren Vorläuferzellen in das Augmentat (CORNELL, LANE, 1998). Inwiefern osteoinduktiv wirksame Zytokine, wie z.B. BMPs, nach der Aufbereitung zurückbleiben, ist noch nicht abschließend geklärt (HÄMMERLE et al., 1998; SCHWARTZ et al., 2000). Daher besitzen xenogene Knochenersatzmaterialien vorwiegend osteokonditive und gegebenenfalls in begrenztem Maße osteoinduktive Eigenschaften (MIRON et al., 2016).

Allogene Knochenersatzmaterialien werden dagegen aus Knochen der artgleichen Spezies gewonnen. Der Knochen stammt von Körperspendern oder von Lebendspendern, in der Regel als Gelenkresektate im Rahmen totalendoprothetischer Operationen (DELLOYE et al., 2007). Allogene Materialien werden nach der Art der Aufbereitung in rein physisch und physiko-chemisch aufbereitete Materialien unterteilt. Zu den physisch aufbereiteten allogenen Knochenersatzmaterialien zählt zum Beispiel „fresh frozen bone allograft“ (FFBA), bei dem der Knochen lediglich tiefgefroren wird und die zelluläre Struktur vollständig erhalten bleibt. Bei der physiko-chemischen Aufbereitung werden durch eine chemische Dezellularisierung

zusätzlich immunogene und potenziell infektiöse Bestandteile entfernt und der Knochen gefriergetrocknet, wie z.B. bei „demineralized freeze-dried bone allograft“ (DFDBA) oder „mineralized processed bone allograft“ (MPBA). Physiko-chemisch aufbereitete Knochenersatzmaterialien sind rein osteokonduktiv wirksam, wohingegen rein physisch aufbereitete Materialien durch den Erhalt von zellulärer Struktur auch osteoinduktive Eigenschaften haben. Immunologische Reaktionen und die Übertragung von Krankheiten können, insbesondere bei den rein physisch aufbereiteten Materialien, nicht vollständig ausgeschlossen werden (DELLOYE et al., 2007). In Deutschland sind lediglich physiko-chemisch aufbereitete Produkte als Medizinprodukte zugelassen (KOLK et al., 2012).

Autologe Knochenersatzmaterialien stammen vom selben Individuum, am häufigsten in Form von autologen Knochentransplantaten. Immunologische Reaktionen oder die Übertragung von Infektionserkrankungen können daher sicher ausgeschlossen werden. Neben osteokonduktiven und -induktiven Eigenschaften besitzt autologer Knochen auch eine osteogenetische Potenz, da mit dem Knochen in gewissem Umfang auch vitale Osteozyten transplantiert werden, die, unabhängig von einer Migration weiterer Zellen in das Transplantat, Knochen bilden können. Autologer Knochen gilt in der präimplantologischen Chirurgie aus diesen Gründen auch als „Goldstandard“ (MISCH, 2022; SAKKAS et al., 2017).

Der Knochen kann dabei von intraoralen und extraoralen Donorstellen entnommen werden. Intraorale Donorstellen bieten den Vorteil, dass sie gut zugänglich sind und sich die Eingriffe in der Regel in Lokalanästhesie und mit einer geringeren Entnahmemorbidität durchführen lassen. In der präimplantologischen Chirurgie kommen vorwiegend die Linea obliqua externa des retromolaren Unterkiefers sowie seltener die Mentalregion und die Crista zygomaticoalveolaris zum Einsatz. Embryonalgeschichtlich entwickeln sich sowohl die Maxilla als auch die Mandibula über desmale Ossifikation aus dem Meckelknorpel des ersten Schlundbogens. Knochen, der durch desmale Ossifikation entstanden ist, zeigt gegenüber Knochen enchondraler Genese, wie z.B. Beckenknochen, eine geringere Resorption (ZINS, WHITAKER, 1979). Knochentransplantate aus der retromolaren Mandibula erweisen sich dabei als besonders resorptionsstabil gegenüber Transplantaten aus anderen Entnahmeregionen (RAGHOEBAR et al., 1996). Die Augmentatvolumina, die sich mit einer intraoralen Knochenentnahme erreichen lassen, sind mit ca. 2-10cm³ jedoch vergleichsweise gering (MISCH, 1990b; SCHWARTZ-ARAD, LEVIN, 2005). Für Augmentationen größeren Ausmaßes oder für komplexe Defektrekonstruktionen, z.B. nach Teilresektion eines Kiefers, reicht eine intraorale Knochenentnahme oft nicht aus, so dass auf Knochen aus extraoralen

Spenderregionen, wie beispielsweise aus der Crista iliaca des anterioren Beckenkamms, der Tibia oder der Tabula externa der Schädelkalotte, zurückgegriffen werden muss. Die Entnahme solcher extraoraler Augmentate stellt eine zusätzliche Belastung für den Patienten durch die postoperative Komorbidität im zusätzlichen Operationsgebiet dar. Zudem ist die Wahrscheinlichkeit für postoperative Komplikationen erhöht (NKENKE et al., 2004; SAKKAS et al., 2018). Mit Hilfe dreidimensionaler Augmentationstechniken wie der Knochenschalentechnik nach Khoury, können auch mit Knochen aus intraoralen Spenderregionen Augmentationsvolumina erreicht werden, die normalerweise eine Domäne von Transplantaten aus extraoralen Spenderregionen sind (KHOURY et al., 2010).

In der nachfolgenden Tabelle ist die Einteilung der Knochenersatzmaterialien hinsichtlich ihres Ursprungs und ihrer biologischen Eigenschaften in Bezug auf die Knochenneubildung dargestellt.

Tab. 2: Einteilung der Knochenersatzmaterialien (modifiziert nach Khoury)

	<i>Ursprung</i>	<i>Osteokonduktion</i>	<i>Osteoinduktion</i>	<i>Osteogenese</i>
<i>Alloplastisch</i>	Synthetisch hergestelltes Fremdmaterial	X		
<i>Xenogen</i>	von anderer Spezies	X	(X?)	
<i>Allogen</i>	von derselben Spezies	X	(X)	
<i>Autolog</i>	Vom selben Individuum	X	X	X

Aufgrund der strukturellen und chemischen Ähnlichkeit von Dentin zu Knochengewebe rückte in den vergangenen Jahrzehnten vermehrt die Verwendung von autologem Dentin als alternatives Augmentationsmaterial in den Fokus des wissenschaftlichen Interesses.

2.4. Autologes Dentin als Augmentationsmaterial

Dentin eignet sich gut als Knochenersatzmaterial, da es in seiner anorganischen und organischen Zusammensetzung und seinem Wassergehalt dem Knochengewebe sehr ähnlich ist. Der Anteil anorganischer Substanz im menschlichen Dentin liegt bei ca. 69% und der Anteil organischer Komponenten bei ca. 17,5%. Der Alveolarknochen besteht im Vergleich dazu zu ca. 62% aus anorganischen und zu 25% aus organischen Bestandteilen. Der Wassergehalt

sowohl von Dentin als auch von Knochen liegt bei ca. 13%. Die organische Substanz des Dentins setzt sich wie beim Alveolarknochen zu 90% aus Kollagen und zu etwa 9% aus nichtkollagenen Proteinen zusammen (LEONHARDT, 1990). Die Kollagenfraktion wird mit einem Volumenanteil von 95% von Kollagen Typ I dominiert. Andere Kollagene (Typ III, V und XII) sind mit 5% von untergeordneter Bedeutung. In der Fraktion der nichtkollagenen Proteine des Dentins sind Strukturproteine vorzufinden, die auch am Aufbau der extrazellulären Matrix des Alveolarknochens beteiligt sind, wie z.B. Osteocalcin, Osteopontin, Osteonectin, Phosphoprotein und Sialoprotein (BUTLER, RITCHIE, 1995; CHEN et al., 1992; KIM et al., 2013; PRASAD et al., 2010). Neben diesen Strukturproteinen sind im Dentin eine Vielzahl an osteoinduktiven Wachstumsfaktoren und Zytokinen konserviert. Bereits in den 1970er Jahren konnten Butler et al. im Tierversuch zeigen, dass sich in der non-kollagenen Proteinfraction der Dentinmatrix BMP nachweisen lässt, welches nach heterotoper Implantation (z.B. in Muskelgewebe) Knochen- und Knorpelbildung induziert (BUTLER et al., 1977). Das in der Dentinmatrix konservierte BMP ist nicht absolut identisch mit dem BMP der Knochenmatrix. Es ist diesem jedoch strukturell sehr ähnlich und entfaltet in vivo die gleiche osteoinduktive Wirkung (BESSHO et al., 1991). Neben BMP, im Dentin vor allem als BMP-2, BMP-4, BMP-6 und BMP-7 repräsentiert, ist eine Vielzahl weiterer Wachstumsfaktoren, wie z.B. TGF- β , IGF-1, IGF-2, PDGF oder FGF, nachweisbar, welche die Proliferation und Differenzierung von knochenbildenden Zellen regulieren, die Synthese von Strukturproteinen fördern sowie die Neoangiogenese und Mineralisierung der Knochenmatrix begünstigen (KIM et al., 2017; KIM et al., 2010; KIM et al., 2014c; LINDE, 1989; ROBERTS-CLARK, SMITH, 2000).

Die anorganische Substanz des Dentins besteht wie Knochen aus verschiedenen Calciumphosphaten. Den größten Anteil macht dabei Hydroxylapatit aus (FINCHAM et al., 1999; PALMER et al., 2008). In geringen Mengen sind auch β -Tricalciumphosphat, Octacalciumphosphat und amorphes Calciumphosphat am Aufbau der anorganischen Substanz beteiligt (KIM et al., 2010). Obwohl die chemische Zusammensetzung der anorganischen Substanz von Dentin und Knochen nahezu identisch ist, lassen sich Unterschiede hinsichtlich des Kristallisationsgrads und der Kristallgröße feststellen. Der Kristallisationsgrad in Dentin ist dabei höher und die Kristalle sind größer als in kortikalem Knochen, z.B. aus dem retromandibulären Unterkiefer (KHANIJOU et al., 2021).

Eine Anforderung, die an Knochenersatzmaterialien gestellt wird, ist eine materialabhängige Biodegradibilität, d.h., dass ein Knochenersatzmaterial sukzessive abgebaut und durch Knochen ersetzt werden sollte. Idealerweise bedeutet dies, dass das Ersatzmaterial direkt in den

Remodellingprozess des Knochens einbezogen wird (KHOURY et al., 2010). Bereits in den 1960er Jahren konnte in Untersuchungen von Andreasen und Hjørting-Hansen festgestellt werden, dass es bei Kontakt zwischen Dentin und Knochen zu einer ankylotischen Fusion kommt und das Dentin durch Ersatzresorption in der Folge sukzessive durch Knochen ersetzt wird (ANDREASEN, HJØRTING-HANSEN, 1966). Beim Zahn verhindert diesen Vorgang normalerweise das Wurzelzement und das Parodontalligament auf der Wurzel. Das Phänomen kann häufig nach dentalen Traumata beobachtet werden, wenn es bei der extraoralen Lagerung eines avulsierten Zahnes unter unphysiologischen Bedingungen oder einer mechanischen Verletzung, z.B. durch Intrusion oder laterale Luxation, zu einer Nekrose der Parodontalgewebe gekommen ist (ANDERSSON et al., 1989; ANDREASEN, 1980b, a). Eine Ankylose tritt auf, wenn sich im Frühstadium der Verletzung im benachbarten Alveolarknochen Osteoklasten differenzieren und an der verletzten Wurzeloberfläche anhaften, bevor Fibroblasten die Läsion erreichen, um eine Regeneration des Parodontalligaments zu bewirken (FUSS et al., 2003). Ein darauf basierendes, etabliertes Therapiekonzept zum Erhalt des Kieferkammes ist die Dekoronation nach Andreasen. Ist ein Zahn aufgrund einer Ankylose und einer beginnenden Ersatzresorption nicht zu erhalten, wird der betreffende Zahn dekapitiert und die verbleibende Wurzel der knöchernen Ersatzresorption überlassen. Dadurch kann der Kieferkamm für eine spätere Implantation in seiner Dimension erhalten werden (ANDREASEN et al., 2018). Seit Mitte der 1960er Jahre wurden zahlreiche tierexperimentelle Studien durchgeführt, in denen nachgewiesen werden konnte, dass Dentin bei der Implantation in unterschiedliche Gewebe die Bildung von Knochen- und Knorpelgewebe induziert (AL-ASFOUR et al., 2013; AL-ASFOUR et al., 2017; BANG, URIST, 1967; BESSHO et al., 1990; BUTLER et al., 1977; CONOVER, URIST, 1979; REGISTER et al., 1972; URIST, 1971; YEOMANS, URIST, 1967) und dass Dentin in den Remodellingprozess des Knochens mit einbezogen wird (ANDERSSON, 2010; ATIYA et al., 2014; BORMANN et al., 2012; QIN et al., 2014; WEDENBERG et al., 1987).

Anfang der 2010er Jahre folgten Fallbeschreibungen, die eine klinische Anwendung von autologem Dentin als Augmentationsmaterial dokumentierten, sowie auch erste klinische Studien. Dabei wurden vorwiegend Techniken beschrieben und untersucht, bei denen das Dentin in partikulierter Form zum Einsatz kam, z.B. zum Auffüllen der Extraktionsalveole im Sinne einer Socket preservation (ARTZI et al., 2022; CERVERA-MAILLO et al., 2021; DEL CANTO-DÍAZ et al., 2019; ELFANA et al., 2021; JOSHI et al., 2016; MINETTI et al., 2020; MINETTI et al., 2019; POHL et al., 2020; SANTOS et al., 2021; VALDEC et al., 2017; YÜCEER-ÇETINER et al., 2021), zur gesteuerten Knochenregeneration (KIM et al., 2014a;

KIM et al., 2016b; LEE et al., 2013; WANG et al., 2022) oder zur Sinusbodenelevation (JUN et al., 2014; KIM et al., 2014b; POHL et al., 2016).

Mit der zunehmenden klinischen Anwendung von autologem Dentin als alternativem Knochenersatzmaterial wurden verschiedene Verfahren zur Aufbereitung des Zahnmaterials kommerziell auf dem Markt verfügbar. Dabei wird das Dentin entweder direkt nach der Zahntfernung chair-side zu einem gebrauchsfertigen, partikulierten Augmentationsmaterial aufbereitet, wie z.B. mit dem Smart Dentin Grinder (Kometa Bio, Creskill, USA) oder dem TT Tooth Transformer (TT Tooth Transformer SRL, Mailand, Italien), oder es wird in einer Zahnbank entsprechend für eine spätere Verwendung behandelt (AutoBT, Korea Tooth Bank Co., Seoul, Korea). Letzteres Verfahren ist jedoch ausschließlich in Südkorea verfügbar. Neben einer Partikulation wird bei diesen Verfahren das Dentin einer Dekontamination zur Beseitigung potenziell infektiöser Bestandteile sowie einer Demineralisierung unterzogen. Die Demineralisierung erfolgt dabei entweder mit einer Säure, wie z.B. 2%-iger Salpetersäure (AutoBT), oder einem Chelator, wie z.B. 10%-igem Ethylendiamintetraacetat (Smart Dentin Grinder), mit dem Ziel, das Kollagenetzwerk des Dentins zu exponieren und in der Dentinmatrix konservierte Wachstumsfaktoren freizugeben. In Untersuchungen von Koga et al. zeigte sich, dass der Grad der Demineralisierung des Dentins Einfluss auf das Ausmaß der knöchernen Regeneration des Augmentats hat. Bei vollständig demineralisiertem und nicht demineralisiertem Dentinpartikulat zeigte sich in dieser Untersuchung eine deutlich schlechtere Knochenneubildung als bei partiell demineralisiertem Dentinpartikulat. Dies ist darauf zurückzuführen, dass an nicht demineralisiertem Dentin keine ausreichende Osteoblastenadhäsion stattfindet, wohingegen an partiell und vollständig demineralisiertem Dentin an der exponierten Kollagenstruktur eine deutliche Adhäsion festzustellen ist. Vollständig demineralisiertes Dentin wird jedoch durch das Fehlen der anorganischen Substanz sehr schnell resorbiert, da das Kollagenetzwerk durch enzymatische Degradation schneller abgebaut wird, als durch Osteokonduktion und -induktion neuer Knochen gebildet werden kann. In dieser Untersuchung konnte des Weiteren nachgewiesen werden, dass sich neben dem Grad der Demineralisierung auch die Größe der Dentinpartikel auf die Regenerationsfähigkeit des Augmentats auswirkt. So zeigten größere Dentinpartikel mit einer mittleren Partikelgröße von 1000 µm aufgrund der größeren Zelladhäsionsfläche eine bessere knöcherne Regeneration als kleinere Partikel mit 200 µm bzw. 500 µm (KOGA et al., 2016). Im Vergleich zu konventionellen partikulären Knochenersatzmaterialen, die für die oben genannten Indikationen standardmäßig eingesetzt werden, wie z.B. xenogener, deproteinisierter Knochen

bovinen Ursprungs oder β -Tricalciumphosphat, ist bei der Verwendung von partikulierter, partiell demineralisierter Dentinmatrix ein signifikant größeres Ausmaß an knöcherner Regeneration festzustellen (JOSHI et al., 2016; JUN et al., 2014; PANG et al., 2017; SANTOS et al., 2021).

Schwarz et al. beschrieben 2016 in einem tierexperimentellen Case report (SCHWARZ et al., 2016c) und zwei präklinischen Proof-of-Concept-Studien (SCHWARZ et al., 2016a; SCHWARZ et al., 2016b) erstmalig die Verwendung blockförmiger Dentinaugmentate zur Augmentation lateraler Kiefer-kammdefizite.

Bei dieser Technik wird ein solides Augmentat aus einer Zahnwurzel gewonnen und an die Defektmorphologie angepasst, so dass diese flächig dem Defekt anliegt. An der Kontaktfläche zum Empfängerknochen wird das Wurzelzement und das Parodontalligament vom Augmentat entfernt, um eine Ankylose und Ersatzresorption zu provozieren. Auf der defektabgewandten Fläche, die von Weichgewebe bedeckt ist, werden diese Gewebe hingegen belassen, um eine Resorption zu verhindern. Eine über diese Maßnahmen hinausgehende Aufbereitung des Augmentats, z.B. eine Demineralisation, erfolgt dabei nicht.

Bei den präklinischen Proof-of-Concept-Studien wurden die Dentinaugmentate aus gesunden, vitalen Prämolaren sowie aus devitalisierten Prämolaren und Prämolaren mit ligatur-induzierten parodontalen Läsionen mit monokortikalen Knochenblocktransplantaten verglichen. Hinsichtlich der erreichten postaugmentativen Kieferkambreiten war kein Unterschied zwischen den Dentin- und Knochenblockaugmentaten festzustellen. In der histologischen Untersuchung zeigten sich an den Dentinstrukturen deutliche Zeichen einer Ersatzresorption sowie eine Apposition von atubulärem Reparaturdentin zwischen Dentinaugmentat und Implantat, was bereits im Jahre 2013 von Schwarz et al. als „Dentointegration“ beschrieben wurde (SCHWARZ et al., 2013). Leukozytäre Infiltrate waren histologisch nicht nachweisbar. In histomorphometrischen Untersuchungen evaluierten Becker et al., inwiefern mikrostrukturelle Unterschiede zwischen Dentinaugmentaten und Knochenaugmentaten bestehen. Sie konnten dabei keine Unterschiede hinsichtlich des Anteils an Knochen am Gesamtgewebe, Trabekelstärke/-abstand und Konnektivität feststellen, wobei bei den Dentinaugmentaten teilweise noch residuelle Dentinfragmente nachweisbar waren (BECKER et al., 2019).

In einer 2018 veröffentlichten, prospektiven, kontrollierten Studie wurde die klinische Anwendung dieser Technik evaluiert. Bei dieser Untersuchung wurden Augmentate aus

autologen Zahnwurzeln retinierter oder impaktierter Zähne (n=15 Patienten) mit kortikalen Knochenblockaugmentaten aus dem retromolaren Unterkiefer (n=15 Patienten) verglichen. Nach einer Einheilzeit von 26 Wochen war bei den Dentinaugmentaten eine signifikant geringere Resorption der transversalen Kieferkammbreite gegenüber den Knochenblocktransplantaten festzustellen. In allen Fällen war ein ausreichend breiter Kieferknochen zur Aufnahme eines Implantates erreicht worden. Die Einheilung der Augmentate und Implantate lief in beiden Gruppen komplikationsfrei (SCHWARZ et al., 2018).

Die Technik von Schwarz et al. unterliegt jedoch Einschränkungen hinsichtlich der möglichen Augmentatbreite, da diese durch die Breite der verwendeten Zahnwurzel limitiert wird. Basierend auf den Erkenntnissen, dass autologes Dentin aufgrund seiner chemischen und strukturellen Ähnlichkeiten mit autologem Knochen ein ähnliches Verhalten in Bezug auf Osteoinduktion/-konduktion und Remodelling zeigt, wurde von Korsch eine Schalenteknik unter der Verwendung von autologem Dentin (Tooth-Shell-Technique) vorgeschlagen (KORSCH, 2020). Bei dieser Technik wird analog zur Schalenteknik nach Khoury eine Dentinschale auf Distanz zum Kieferkammdefekt fixiert und der entstehende Hohlraum mit partikuliertem Dentin aufgefüllt, wodurch größere Augmentationsbreiten erreicht werden können (KHOURY et al., 2010).

2.5. Ziel der Arbeit/ Fragestellung

In der vorliegenden Arbeit sollen zwei Techniken zur lateralen Kieferkammaugmentation, die Knochenschalentechnik mit Distanzschrauben nach Khoury und die Tooth-Shell-Technique unter Verwendung von autologem Dentin, verglichen werden. Dabei soll geklärt werden:

1. Unterscheiden sich die beiden angewandten Techniken hinsichtlich des Auftretens von klinischen Komplikationen?
2. Lassen sich mit der Tooth-Shell-Technique nach einer Beobachtungszeit von einem Jahr vergleichbare Ergebnisse hinsichtlich des Augmentationserfolgs und der Osseointegration erzielen wie mit der Knochenschalentechnik nach Khoury?
3. Unterscheiden sich die Techniken hinsichtlich des Auftretens von postoperativen Beschwerden? Insbesondere soll festgestellt werden, ob durch den zur Knochenentnahme erforderlichen Zweiteingriff, welcher bei der Knochenschalentechnik nach Khoury notwendig ist und der bei der Tooth-Shell-Technique entfällt, eine höhere Beeinträchtigung durch postoperative Schmerzen und Schwellungen zu verzeichnen ist.

3. Material und Methodik

3.1. Studiendesign und Studienpatienten

Die der vorliegenden Arbeit zugrunde liegende Untersuchung wurde als prospektive, randomisierte klinische Studie in einem zweiarmigen Design durchgeführt. Im Rahmen dieser Studie erfolgten im Zeitraum zwischen September 2019 und Dezember 2020 bei insgesamt 20 Studienpatienten laterale Kieferkammaugmentationen mittels Knochenschalentechnik nach Khoury (Studienarm 1) und einer Schalentechnik unter Verwendung von autologem Dentin (Studienarm 2).

Gruppe 1 (10 Patienten): BST (Bone-Shell-Technique)

Laterale Kieferkammaugmentation unter Verwendung einer autologen Knochenschale aus dem retromolaren Bereich des Unterkiefers mit Distanzschrauben und partikuliertem Eigenknochen nach Khoury, im Folgenden Bone-Shell-Technique bzw. BST genannt.

Gruppe 2 (10 Patienten): TST (Tooth-Shell-Technique)

Laterale Kieferkammaugmentation unter Verwendung einer autologen Dentinscheibe mit Distanzschrauben und partikuliertem Dentin, im Folgenden Tooth-Shell-Technique bzw. TST genannt.

Die Rekrutierung der Studienpatienten und die Durchführung der Eingriffe erfolgten in der oralchirurgischen Abteilung der Akademie für Zahnärztliche Fortbildung in Karlsruhe und dem Zentrum für Implantologie und Oralchirurgie Prof. Dr. Michael Korsch in Heidelberg. Sämtliche operative Eingriffe wurden vom selben Operateur durchgeführt.

Die Patienten mussten für die Teilnahme an der Studie mindestens einen nichterhaltungsfähigen bzw. nichterhaltungswürdigen Zahn aufweisen. Dabei war es unerheblich, ob sich der Zahn im Bereich der prospektiven Implantation oder einer anderen Region befand.

Um möglichst vergleichbare Ergebnisse zu erreichen, wurden nur Patienten in die Studie aufgenommen, die im anterioren Oberkiefer (Regio 14-24) eine Implantatversorgung wünschten und ein Kieferkammdefizit von mindestens 4 mm mit der Notwendigkeit einer Kieferkammaugmentation aufwiesen.

3.2. Berufsethische Beratung

Das Studienvorhaben wurde vor Studienbeginn der Ethikkommission der Landesärztekammer Baden-Württemberg vorgelegt. Unter dem Aktenzeichen F-2018-108-Z erging am 16.07.2019 der Beschluss, dass, unter Bezugnahme auf das Statut der Ethikkommission der Landesärztekammer Baden-Württemberg, keine Bedenken hinsichtlich des beantragten Forschungsvorhabens bestehen. Die Studie wurde im Deutschen Register für klinische Studien unter der Studien-Nummer DRKS00017752 registriert.

3.3. Fallzahlkalkulation

Vor der Rekrutierung der Patienten wurde eine Fallzahlkalkulation durchgeführt, mit dem Ziel, den Stichprobenumfang so zu wählen, dass ein ggf. vorhandener Behandlungseffekt in der Untersuchung als statisch signifikant erkannt werden kann, aber nicht mehr Patienten als nötig behandelt würden.

Als Hauptoutcomeparameter wurde in der vorliegenden Untersuchung die mittlere Resorption der Augmentatbreite in bucco-oraler Richtung nach einem Jahr definiert. Die Schätzung des zu erwartenden Effekts basierte dabei für die TST-Gruppe auf Resorptionsraten von autologen Zahnwurzelaugmentaten nach 6 Monaten von Schwarz et al. (SCHWARZ et al., 2018). Die Schätzung des zu erwartenden Outcomes der BST-Gruppe beruhte auf den Resorptionsraten von Knochentransplantaten mit Distanzschrauben nach Khoury nach 12 Monaten aus unserer Arbeitsgruppe (BARTOLS et al., 2018). Der Berechnung der notwendigen Fallzahl lagen die Resorptionsraten von Augmentationen bei teilbezahnten Patienten zugrunde. Augmentationen bei zahnlosen Patienten wurden in der Annahme eines deutlich anderen Resorptionsverhaltens nicht in die Kalkulation inkludiert.

Um mit einem Signifikanzniveau α von 5% und einem β -Fehlerniveau von 5% ($\alpha = 0,05$ und $(1-\beta) = 0,95$) Unterschiede zwischen den Gruppen zu erkennen, wurde unter der Annahme einer mittleren Resorptionsrate von 2,17 mm nach 12 Monaten in der BST-Gruppe und von 0,13 mm nach 6 Monaten in der TST-Gruppe eine Gesamtzahl von 6 Patienten pro Gruppe berechnet. Die Berechnung der Stichprobengröße erfolgte mit dem Statistikprogramm G*Power 3.1 (FAUL et al., 2009).

Um trotz möglicher Drop-outs eine ausreichende Fallzahl zu erreichen, wurde eine Gruppengröße von jeweils 10 Patienten pro Gruppe angestrebt.

3.4. Ein- und Ausschlusskriterien

3.4.1. Einschlusskriterien

- nicht erhaltungsfähiger bzw. -würdiger Zahn:
 - Zahn aufgrund umfangreichem koronalem Zahnhartsubstanzverlust nicht restaurierbar oder zur Verankerung von prothetischen Rekonstruktionen nicht geeignet
 - Zahn mit horizontaler oder vertikaler Fraktur
 - Zahn mit umfangreichem parodontalem Attachmentverlust und infauster Prognose (starker Lockerungsgrad, interradikulärer Knochenabbau, Knochenabbau bis ins apikale Wurzeldrittel)
 - Zahn mit weitreichender Kompromittierung, die nur mit großem Aufwand und/oder schlechter klinischer Prognose behandelt werden kann und der Patient dies ablehnt
- Geplante Implantation in der anterioren Maxilla (Regio 14-24)
- Transversales Kieferkammdefizit von mindestens 4 mm
- Patientenalter zwischen 18 und 75 Jahren

3.4.2. Ausschlusskriterien

- Zähne mit umfangreichen Substanzdefekten der Zahnwurzel oder einer für die Gewinnung eines Augmentats unzureichenden Zahnmorphologie
- Transversales Kieferkammdefizit von weniger als 4 mm
- Patienten unter 18 Jahren oder über 75 Jahren
- Patienten, die eine laterale Augmentation ablehnten
- Patienten mit allgemeinen Systemerkrankungen
- Schwangerschaft oder Stillzeit
- Patienten mit Tumorleiden
- Patienten mit aktueller oder vorangegangener Radiatio im Kopf-Hals-Bereich
- Patienten unter Medikation mit Bisphosphonaten oder anderen Antiresorptiva
- Suchterkrankungen
- Erkrankungen aus dem Formenkreis der Psychosomatik

- Patienten mit niedriger Compliance
- Fehlende Einverständniserklärung

Die Beurteilung des vestibulo-oralen Knochendefizits erfolgte anhand einer präoperativen DVT-Aufnahme (50x50 mm). Dabei wurden eine vestibuläre und eine orale Bedeckung mit Hartgewebe (nativer Knochen oder Augmentat) von jeweils 1,5 mm als Mindestanforderung definiert. Bei einem angestrebten Implantatdurchmesser von 4,3 mm bedeutete dies eine zu erreichende Kieferkammbreite von mindestens 7,3 mm. Das Knochendefizit ergab sich aus der angestrebten Kieferkammbreite abzüglich der Ist-Kieferkammbreite zum Zeitpunkt T0 (Basisuntersuchung).

3.5. Aufklärung der Patienten

Sämtliche Patienten, die hinsichtlich der Einschlusskriterien für eine Teilnahme an der Studie geeignet waren, wurden im Vorfeld vom Operateur über Wesen und Inhalt der Studie sowie den Eingriff im Detail aufgeklärt.

Im Rahmen eines implantologischen Aufklärungsgesprächs wurde den Patienten der vorliegende Befund anhand von Röntgenaufnahmen sowie intraoral dargestellt. Durch eine Visualisierung mittels Skizzen wurden den Patienten die Notwendigkeit zur Augmentation und das operative Vorgehen bei den in der Studie angewandten Techniken erläutert. Den Patienten wurden außerdem alternative prothetische Versorgungsmöglichkeiten wie Brücken- oder Prothesenversorgungen aufgezeigt. Es erfolgte eine ausführliche Erläuterung der möglichen Risiken und Komplikationen des augmentativen und implantologischen Eingriffs sowohl in mündlicher als auch in schriftlicher Form. Im Einzelnen wurde aufgeklärt über allgemeine postoperative Risiken und Komplikationen wie Wundschmerz, Schwellung, Nachblutung, Wundinfektionen und Wundheilungsstörungen, sowie über eingriffsspezifische Risiken und Komplikationen wie Nervenschädigungen mit passagerem oder dauerhaftem Sensibilitätsverlust, Verlust des Augmentats bzw. des Implantats und Dehiszenzen. Weiterhin wurde das Verhalten nach dem Eingriff besprochen. Jedem Patienten wurde darüber hinaus eine Patienteninformation mit einer schematisch bebilderten Erläuterung der verschiedenen Eingriffe und den Aufklärungsinhalten mitgegeben (Aufklärungsbogen und Patienteninformation s. Anhang 1).

Die Patienten wurden darüber informiert, dass die Eingriffe im Rahmen der Studie durch eine von der Akademie für Zahnärztliche Fortbildung Karlsruhe abgeschlossene Probandenversicherung abgedeckt sind, die auch die Patienten im Zentrum für Implantologie und Oralchirurgie einschließt.

Die Patienten wurden ebenfalls in Kenntnis gesetzt, dass die Speicherung und Verarbeitung der erhobenen Studienergebnisse gemäß der geltenden Datenschutzgrundverordnung (DSGVO) und in pseudonymisierter Form erfolge. Die Ergebnisse der Studie wurden ausschließlich in statistischer Aussage formuliert. Es wurden keine Daten veröffentlicht, anhand derer die Patienten persönlich identifiziert werden könnten. Es wurde über die Freiwilligkeit hinsichtlich der Studienteilnahme aufgeklärt und dass die Teilnahme jederzeit ohne Nennung von Gründen und ohne Nachteile für die medizinische Versorgung widerrufen werden könne. Der Patient willigte mit der Unterschrift einer Einverständniserklärung in die Teilnahme an der Studie sowie der Speicherung und Verarbeitung seiner Daten ein (Einverständniserklärung und Datenschutzerklärung s. Anhang 2.).

3.6. Randomisierung

Die Aufteilung der Studienpatienten auf die beiden Studienarme erfolgte direkt nach der Zahnentfernung durch eine einfache Randomisierung mittels Losverfahren. Dazu wurden jeweils 10 Karten mit der Aufschrift „BST“ bzw. „TST“ versehen und einzeln in Umschläge verpackt. Die Umschläge wurden in einem verschlossenen Behältnis aufbewahrt. Nach der Zahnentfernung wurde von einer zahnmedizinischen Fachangestellten ein Umschlag aus dem Behältnis gezogen und dem Operateur das Augmentationsverfahren mitgeteilt.

3.7. Entfernung und Aufbereitung der Studienzähne

Die Entfernung der nichterhaltungsfähigen Studienzähne erfolgte durch vorsichtige Luxationsbewegungen mit einem Bein'schen Hebel und einer Extraktionszange. Mehrwurzelige Zähne wurden zur Schonung des umgebenden Knochens dekapitiert und anschließend die Wurzeln getrennt. Nach der Zahnentfernung wurde zur Stabilisierung des Blutkoagels ein Kollagenkegel (Parasorb Cone, Resorba, Nürnberg, Deutschland) in das Alveolarfach eingelegt und mit einer Kreuznaht aus pseudomonofilem, nicht resorbierbarem Nahtmaterial (Supramid, 4-0, Serag-Wiessner, Naila, Deutschland) fixiert.

Die Zähne wurden im Anschluss an die Zahnentfernung anhand des Studienprotokolls aufbereitet (Aufbereitungsprotokoll s. Studienprotokoll 3.10). Dabei wurde eine ca. 1-1,5 mm dicke Scheibe Wurzelentin aus dem Bereich des größten Durchmessers der Wurzel gewonnen

und der restliche Zahn partikuliert. Nach der anschließenden Desinfektion und partiellen Demineralisierung wurde das aufbereitete Zahnmaterial getrocknet und bei -18°C bis zur Augmentation gelagert.

3.8. Operationstechniken

Nach der Instruktion des Patienten über den Verlauf des operativen Eingriffs und der Fotodokumentation der Ausgangssituation erfolgte die Lagerung des Patienten auf dem Behandlungsstuhl. Der Patient spülte selbstständig zwei Minuten den Mund mit einer 0,12%-igen Chlorhexidinguconatlösung (Paroex, Sunstar Gum, Etoy, Schweiz).

Die Anästhesie im Bereich des Unterkiefers für die retromolare Knochenentnahme in der BST-Gruppe erfolgte durch eine Leitungsanästhesie des N. alveolaris inferior mit ca. 1,5 ml Citocartin 1:100.000 (Articain + Adrenalin 1:100000, Sopira, Heraeus Kulzer, Hanau, Deutschland) und eine Infiltrationsanästhesie des N. buccalis mit ca. 0,5 ml Citocartin 1:100.000.

Die Anästhesie im Bereich des Oberkiefers erfolgte durch eine Leitungsanästhesie der Nn. palatini bzw. des N. incisivus mit Citocartin 1:100.000, ca. 0,3 ml pro Seite und Infiltrationsanästhesie des Plexus dentalis superioris mit ca. 1,5 ml Citocartin 1:100.000. Nach einer perioralen Hautdesinfektion mit Octenidin-Lösung (Octenisept, Schülke-Mayr, Norderstedt, Deutschland) wurde der Patient mit sterilen Tüchern abgedeckt.

Alle augmentativen Eingriffe wurden durch eine perioperative Antibiose am präoperativen Tag, am Operationstag und am ersten postoperativen Tag mit Amoxicillin 750 mg in drei täglichen Einzeldosen per os (bei vorliegender Penicillinallergie 300 mg Clindamycin in drei täglichen Einzeldosen) abgeschirmt.

Als analgetische Bedarfsmedikation wurde Ibuprofen 600 mg rezeptiert. Außerdem wurden die Patienten instruiert, zur chemischen Plaquekontrolle eine Woche lang morgens und abends mit einer Octenidin-haltigen Mundspüllösung (Octenident, Schülke-Mayr, Norderstedt, Deutschland) zu spülen.

3.8.1. Augmentation

Die Schnittführung erfolgte bei den beiden zu vergleichenden Techniken durch Bildung eines Mukoperiostlappens im Defektbereich mit einer krestalen Inzision sowie einem vertikalen Entlastungsschnitt. Eine Periostschlitzung an der Lappenbasis ermöglichte die Lappenmobilisation und erleichterte dadurch die spannungsfreie Adaptation der Wundränder.

Der Wundverschluss nach durchgeführter Augmentation erfolgte mittels eines monofilen, nicht resorbierbaren Nahtmaterials (Supramid 5-0, Serag-Wiessner, Naila, Deutschland).

Nach Abschluss des augmentativen Eingriffs erfolgte eine Röntgenkontrolle im Sinne einer DVT zur Beurteilung des Augmentats.

Bone-Shell-Technique nach Khoury (BST-Gruppe):

Bei den Patienten, die der BST-Gruppe zugewiesen waren, wurde das autologe Knochentransplantat durch eine Entnahme aus dem retromolaren Unterkiefer im Bereich der Linea obliqua externa gewonnen. Zunächst wurde durch Bildung eines Mukoperiostlappens der retromolare Knochen dargestellt. Die Inzision erfolgte analog zur Winkelschnittführung bei Weisheitszahnentfernungen im Unterkiefer auf Höhe des distobukkalen Höckers des zweiten Molaren in einem spitzen Winkel nach distal. Anschließend wurde die Inzision nach mesial extendiert und ein vertikaler Entlastungsschnitt auf Höhe der mesialen Wurzel des zweiten Molaren angelegt. Nach der Mobilisation des Mukoperiostlappens und der Darstellung der Linea obliqua externa wurde ein den Maßgaben der Planung entsprechendes Knochenstück umschnitten. Dies geschah durch zwei vertikale Osteotomien und eine basalhorizontale Osteotomie mittels rotierender Mikrosägen (Frios MicroSaw, Dentsply Sirona Implants, Mannheim, Deutschland) sowie durch okklusal-krestale Perforationen mit einem Drillbohrer (Abb. 2 A). Mit einem Knochenmeißel wurden mit leichten Hammerschlägen die okklusal-krestalen Perforationen verbunden und das kortikale Knochenstück an der so entstandenen Sollbruchstelle luxiert (Abb. 2 B). Mit einem Spiralbohrer (Pilotbohrer 1, L=41 mm, Ø 2,2 mm, Straumann, Basel, Schweiz) wurden aus derselben Region Knochenspäne gewonnen (Abb. 2 C), die mit einem Knochenfilter (KF-T 3, Schlumbohm, Brokenstedt, Deutschland) aufgefangen wurden (Abb. 2 D). Die Spenderregion wurde abschließend spannungsfrei vernäht (Supramid 5/0, Serag-Wiessner, Naila, Deutschland).

Vom diesem kortikalen Knochenblock wurde extraoral mit Hilfe der rotierenden Mikrosäge eine dünne Knochenscheibe von 1-1,5 mm abgetrennt (Abb. 3 A und B). Diese Knochenscheibe wurde lateral des Knochendefektes mit Osseosyntheseschrauben (stoma[®]microscrews, Stoma, Emmingen-Liptingen, Deutschland) auf Distanz fixiert (Abb. 3 C). Der restliche Knochen des entnommenen Blocks wurde in einer Knochenquetsche (Zepf Dental, Seitingen-Oberflacht, Deutschland) durch Zerstoßen partikuliert. Der Hohlraum zwischen dem ortständigen Knochen und der Knochenscheibe wurde mit dem Gemisch des Knochens aus dem

Knochenfilter und dem partikulierten Knochen aufgefüllt (Abb. 3 D). Abschließend erfolgte ein spannungsfreier Wundverschluss mit Supramid 5-0.

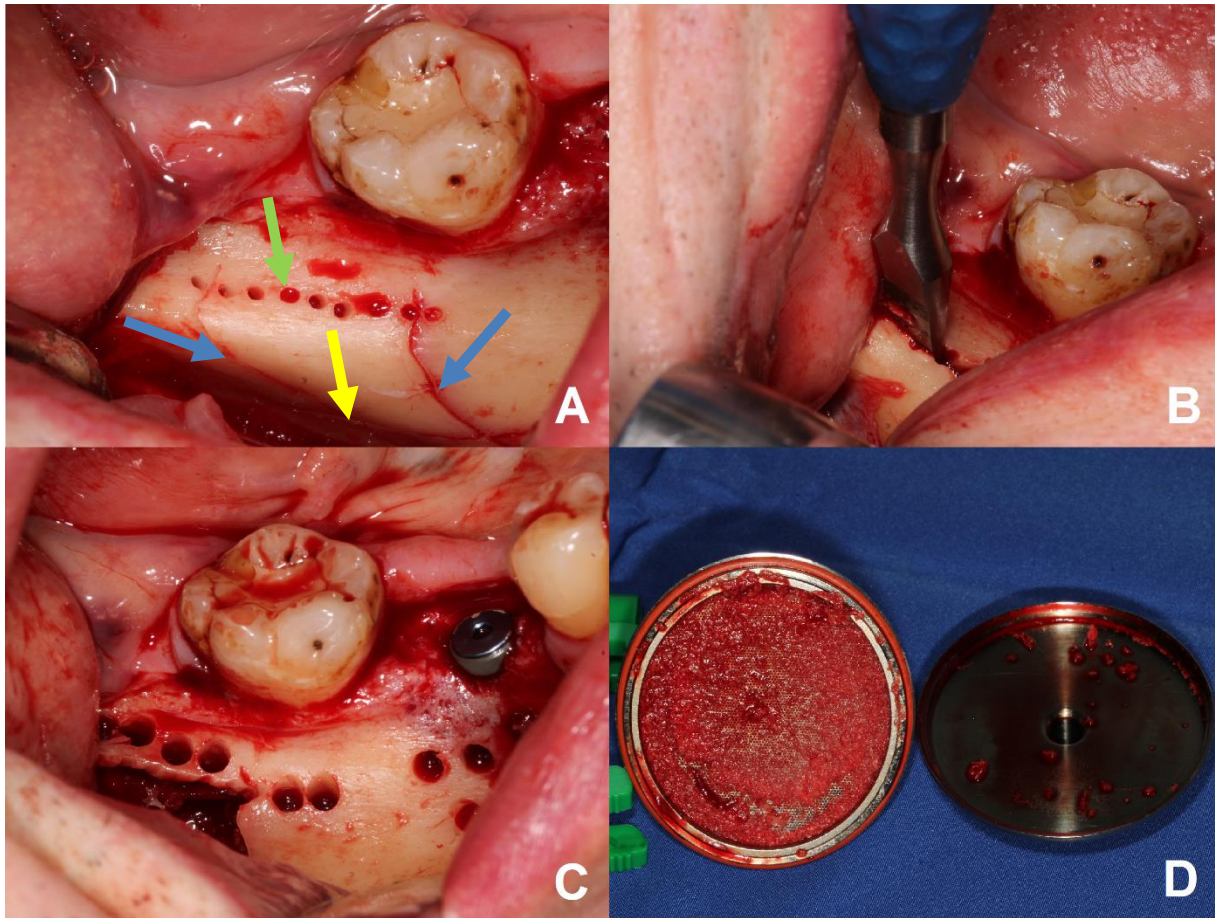


Abb. 2: Gewinnung eines autologen Knochenblocks und von Knochenspänen aus der Linea obliqua externa des retromolaren Unterkiefers

A: Dargestellte Linea obliqua externa mit zwei vertikalen Osteotomien (blaue Pfeile) und einer basalhorizontalen Osteotomie (gelber Pfeil) sowie okklusalkrestalen Perforationen (grüner Pfeil); B: Luxation des Knochenstücks mit einem Knochenmeißel; C: Bohrungen in der Kortikalis zur Gewinnung von kortikalen Knochenspänen; D: Aufgefangene Knochenspäne im Knochenfilter

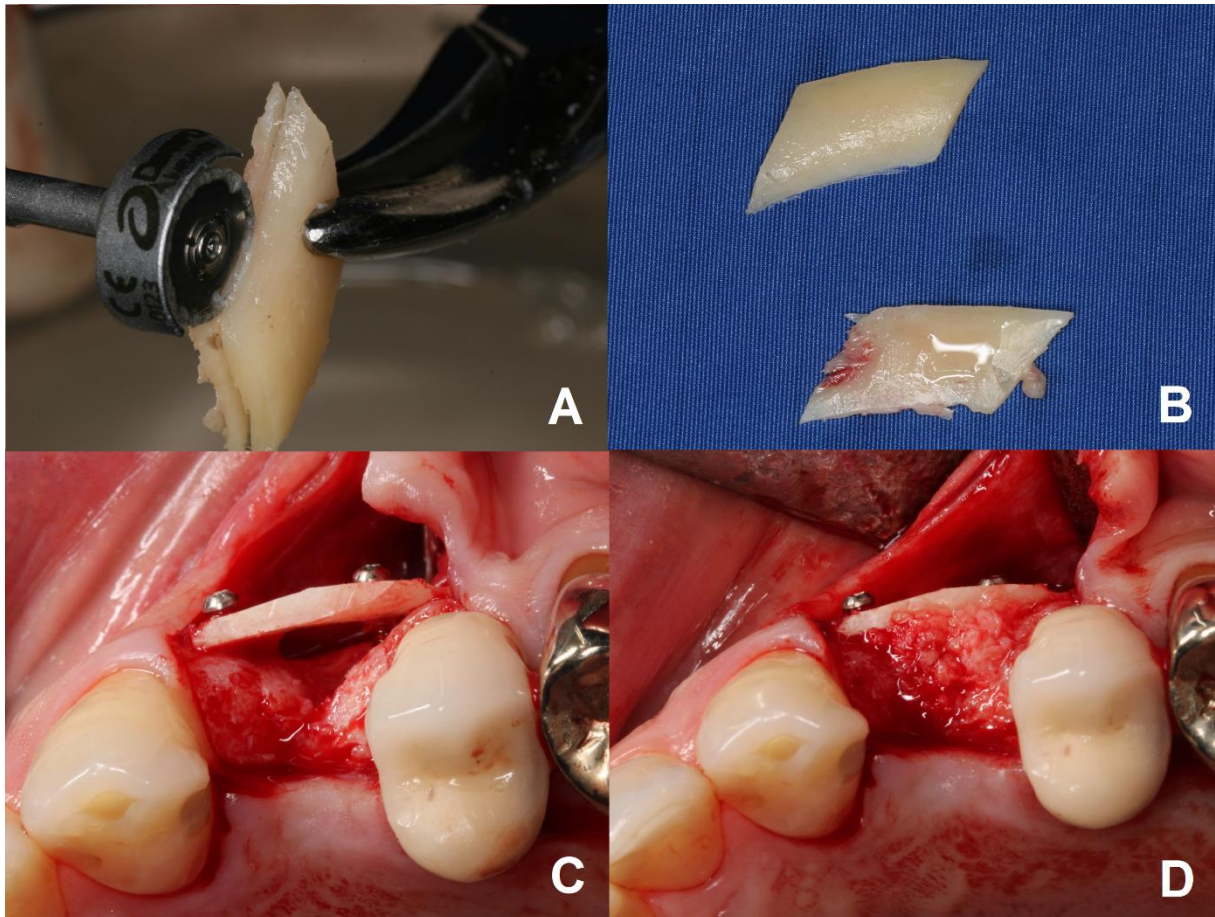


Abb. 3: Präparation der Knochenschale und Fixation mit Distanzschrauben

A: Extraorale vertikale Längsteilung des Knochenblocks mit der Microsaw; B: Geteilter Knochenblock; C: Vestibulär in Regio 024 mit zwei Osteosyntheseschrauben auf Distanz fixierte Knochenschale; D: Mit partikuliertem Knochen und den aufgefangenen Knochenspänen aufgefüllter Spaltraum zwischen Knochenschale und Lagerknochen

Tooth-Shell-Technique (TST-Gruppe)

Bei den Patienten, die der TST-Gruppe zugewiesen waren, wurde die im Vorfeld präparierte Dentinschale mit Osteosyntheseschrauben analog zur Knochenschalentechnik nach Khoury lateral des Knochendefekts auf Distanz fixiert (Abb. 4 B und C) und der Raum zwischen Dentinschale und dem ortsständigen Knochen mit dem Dentinpartikulat aufgefüllt (Abb. 4 D). Abschließend wurde die Wunde spannungsfrei mit Supramid 5-0 vernäht.

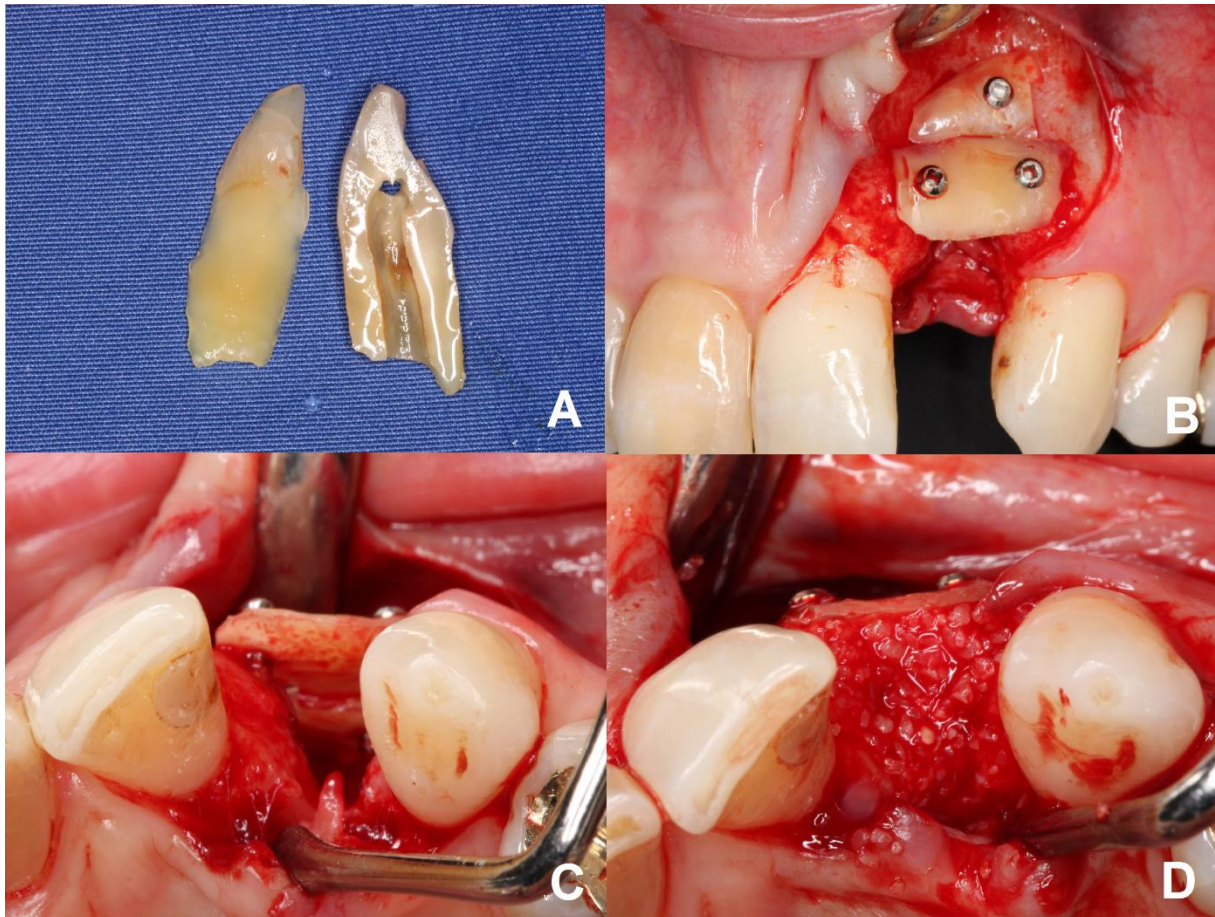


Abb. 4: Tooth-Shell-Technique

A: Gereinigter Zahn mit abgetrennter Zahnschale; B: Mit Osteosyntheseschrauben auf Distanz fixierte Zahnschalen in frontaler Ansicht Regio 022; C: Mit zwei Osteosyntheseschrauben auf Distanz fixierte Zahnschalen in okklusaler Ansicht; D: Mit partikuliertem Dentin aufgefüllter Spaltraum zwischen Zahnschale und Lagerknochen

3.8.2. Implantation

Nach einer Einheilzeit des Augmentats von drei Monaten erfolgte in beiden Gruppen die Implantatinsertion. Über einen Mukoperiostlappen mit einer krestalen Inzision und einem vertikalen Entlastungsschnitt wurde die augmentierte Region dargestellt (Abb. 5 B) und die Osteosyntheseschrauben entfernt. Nach Evaluation der Kieferkambbreite und Feststellung einer ausreichenden Breite wurde die Pilotbohrung durchgeführt.

Im Anschluss erfolgte die Aufbereitung des Implantatlagers und das Einbringen des Implantats gemäß Protokoll des Herstellers. Es wurden im Rahmen der Studie ausschließlich Astra EV- (Astra Tech Implant System, Dentyply-Sirona, Bensheim, Deutschland) und Conelog-

Implantate (Conelog Screw Line, Camlog, Wimsheim, Deutschland) inseriert. Die Implantate wurden alle auf Hartgewebensniveau (nativer Knochen bzw. Augmentat) inseriert, so dass die Implantatoberfläche allseitig von Knochen bzw. Augmentat bedeckt war (Abb. 5 C).

Nach dem Verschluss des Implantats mittels einer Deckschraube und der anschließenden Wundtoilette mit steriler isotoner Kochsalzlösung erfolgte der spannungsfreie Wundverschluss mit Supramid 5-0 (Abb. 5 D). Nach Abschluss des operativen Eingriffs wurde eine Röntgenkontrolle im Sinne einer digitalen Volumentomographie zur Beurteilung der Implantation durchgeführt. Die Analgesie und die chemische Plaquekontrolle erfolgten analog zum augmentativen Eingriff.

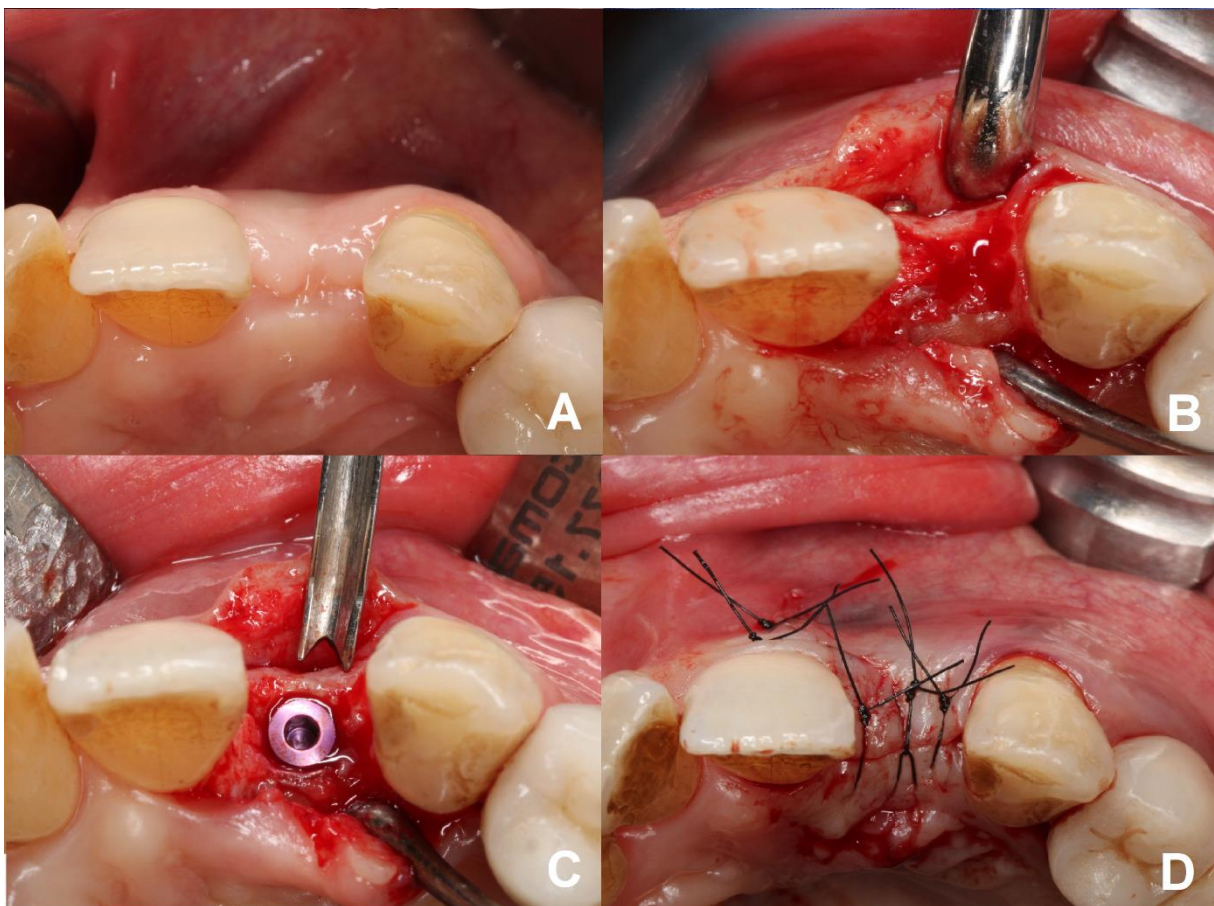


Abb. 5: Implantation

A: Kieferkamm Regio 022 in okklusaler Ansicht; B: freigelegter Kieferkamm vor Entfernen der Osteosyntheseschraube in okklusaler Ansicht; C: inseriertes Implantat auf Knochen- bzw. Augmentatniveau nach Einbringen der Deckschraube in okklusaler Ansicht; D: Kieferkamm nach Wundverschluss in okklusaler Ansicht

3.8.3. Freilegung der Implantate

Nach einer dreimonatigen Einheilzeit wurden die Implantate über eine krestale Inzision ohne Entlastungsinzisionen freigelegt und ein Gingivaformer eingebracht. Der Wundverschluss wurde mit Supramid 5-0 durchgeführt. Bei einer ausreichenden Sekundärstabilität (Implantatstabilität, s. 3.9.) erfolgte nach der Weichgewebsheilung nach ca. 3-4 Wochen die prothetische Versorgung.

3.9. Evaluation der Implantatstabilität

Bei der Implantatstabilität wird generell zwischen der Primärstabilität bzw. der mechanischen Stabilität direkt nach der Implantatinsertion und der sekundären bzw. biologischen Stabilität nach abgeschlossener Osseointegration unterschieden. Zur Evaluation der Primärstabilität wurde in der vorliegenden Untersuchung das Drehmoment beim Eindrehen des Implantats (insertion torque) in das präparierte Implantatbett mit dem Implantatmotor (Implantmed, W&H, Bürmoos, Österreich) gemessen. Dazu wurde der höchste Wert beim Eindrehen, d.h., das maximale Drehmoment am Implantatmotor, abgelesen und dokumentiert (Abb. 6 C und D).

Zusätzlich wurde eine Resonanzfrequenzanalyse (RFA) direkt nach der Implantation zur Bestimmung der Primärstabilität und nach der Implantatfreilegung zur Bestimmung der Sekundärstabilität durchgeführt. Für die RFA wurde ein implantatsystemspezifischer Messadapter (MulTipeg™, Integration Diagnostics Sweden AB, Göteborg, Schweden) mit einem Eindrehinstrument (MulTipeg™ Driver, Integration Diagnostics Sweden AB, Göteborg, Schweden) in das Implantat eingeschraubt und handfest angezogen (ca. 6-8 Ncm). Über ein Handstück (Neoss Penguin^{RFA}, Integration Diagnostics Sweden AB, Göteborg, Schweden) wurde kontaktlos ein piezoelektrisch generierter magnetischer Impuls in das Implantat weitergeleitet (Abb. 6 A). Je nach Ausmaß des Knochen-Implantat-Kontaktes und der Dichte des periimplantären Gewebes ändert sich die applizierte Frequenz (MEREDITH, 1998). Diese Frequenzänderung wird vom Handstück aufgenommen und durch einen reziproken piezoelektrischen Effekt in eine elektrische Spannung umgewandelt. Der Messwert wird als dimensionsloser Wert, dem Implantatstabilitätsquotienten (ISQ), auf einer Skala von 1-100 angezeigt (Abb. 6 B), wobei hohe ISQ-Werte mit einer hohen Implantatstabilität korrelieren. Für ISQ-Werte zwischen 60 und 70 wird in der wissenschaftlichen Literatur eine mittlere Stabilität und für Werte über 70 eine hohe Stabilität angenommen (SENNERBY, 2013).

In der vorliegenden Untersuchung wurden Implantate, die zum Zeitpunkt der Freilegung einen ISQ-Wert größer als 60 aufwiesen, für die prothetische Versorgung freigegeben.

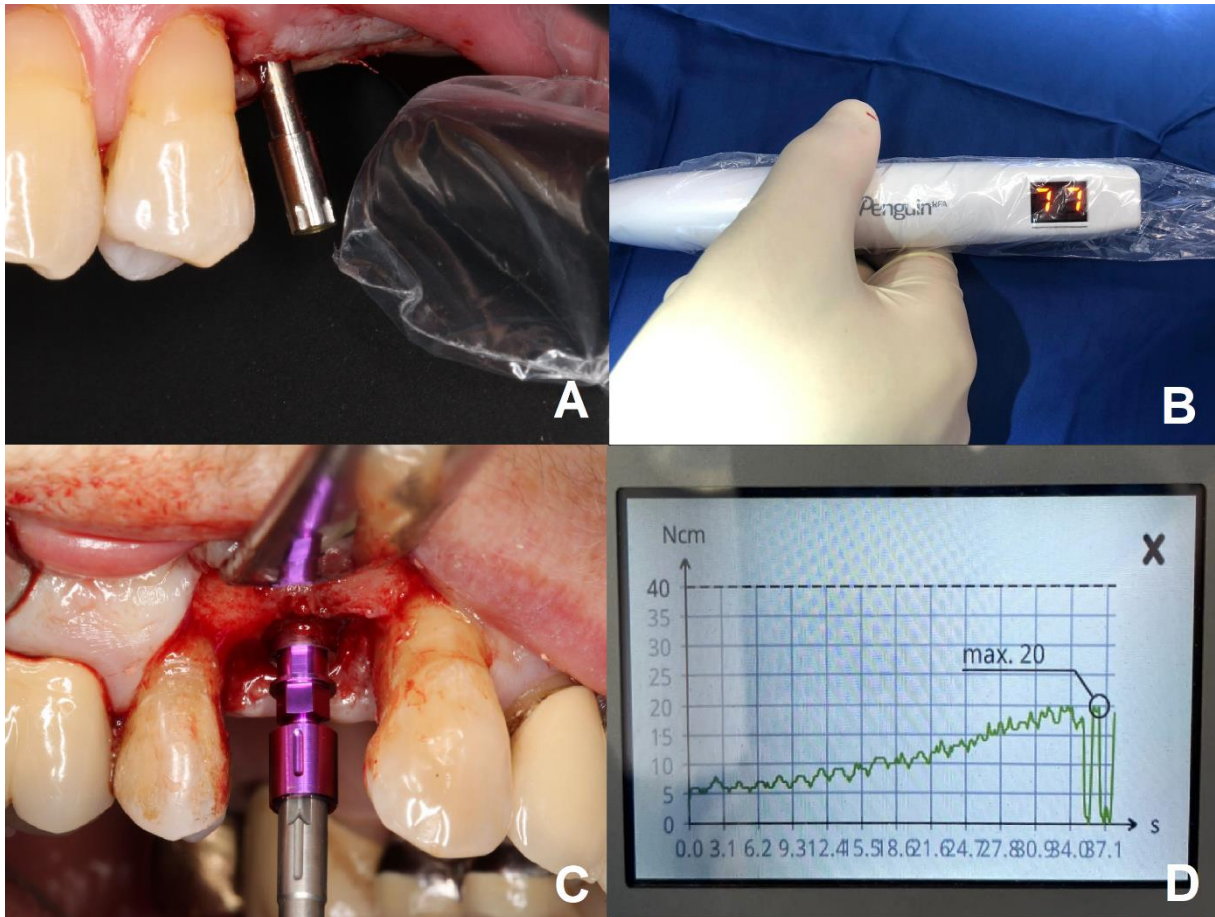


Abb. 6: Evaluation der Implantatstabilität

A: eingeschraubter MultiTeg-Messadapter in Regio 025, die Messspitze des Penguin-Handstückes ist am rechten Bildrand zu sehen; B: Penguin-Handstück mit digitaler Anzeige des ISQ-Wertes (in diesem Fall ISQ=77); C: Eindrehen des Implantats in den Implantatstollen; D: Anzeige der Verlaufskurve des Einbringdrehmoments am Implantatmotor, mit Markierung des maximalen erreichten Drehmoments (in diesem Fall 20 Ncm)

3.10. Studienprotokoll

Präoperativ:

- Feststellung der Eignung zur Studienteilnahme
- Aufklärung über Studienteilnahme (siehe 3.5.)
- Aufklärung über die operativen Eingriffe
- Entfernung des nicht erhaltungsfähigen Zahnes
- Aufbereitung des extrahierten Zahnes:
 - Entfernung von Fremdmaterial (Krone, Füllungsmaterial), anhaftendem Weichgewebe (Parodontalligament, Pulpa), Debris und Wurzelzement mit einem diamantierten Präparationsschleifkörper mit 110 µm Körnung (Gebr. Brasseler, Lemgo, Deutschland) unter Kühlung mit steriler Kochsalzlösung (Abb. 6 A)
 - Präparation einer 1-1,5 mm breiten Dentinscheibe mittels einer rotierenden, diamantierten Mikrosäge (Frios MicroSaw, Dentsply Sirona Implants, Mannheim, Deutschland) (Abb. 6 B, C, D). Es handelt sich hierbei um das gleiche Instrumentarium, welches bei Gruppe 1 für die Präparation der Knochenscheibe verwendet wird.

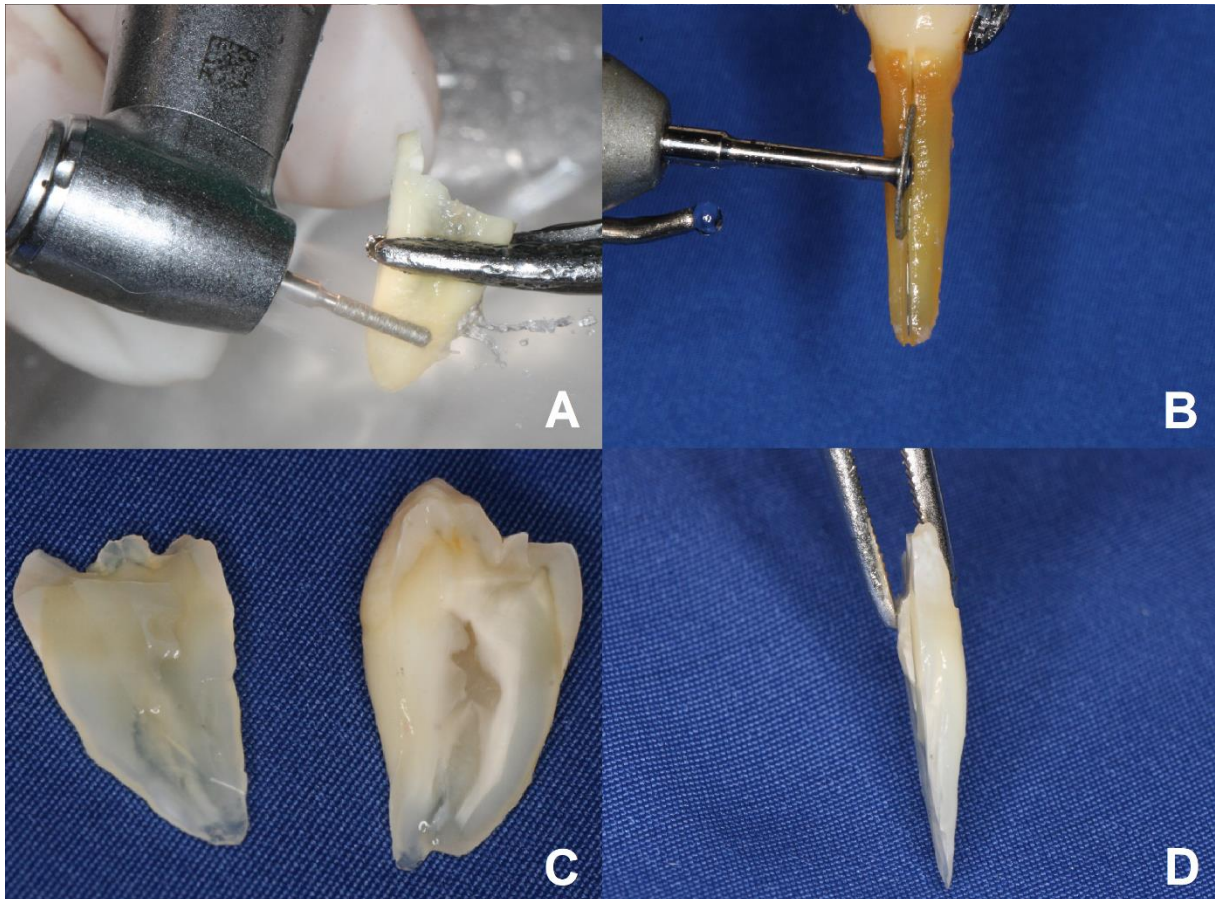


Abb. 7: Präparation der Zahnscheibe in der TST-Gruppe

A: Entfernung von Fremdmaterial, anhaftendem Weichgewebe, Debris und Wurzelzement mit einem diamantierten Präparationsschleifkörper; B: Präparation der Zahnscheibe mit einer diamantierten Mikrosäge; C: präparierte Zahnscheibe und restliche Zahnhartsubstanz; D: Zahnscheibe in seitlicher Aufsicht

- Partikulieren des verbleibenden Dentins mit einem sterilen Einweg-Mahlwerk (Smart Dentin Grinder, Kometa Bio, Creskill, USA, siehe Abb. 4) auf 300-1200 μm Partikelgröße (Abb. 7 A)
- Einlage der Dentinscheibe und des Partikulats für 10 Minuten in ein steriles, verschließbares Dappenglas mit einer Lösung aus Natriumhydroxid (0,5 N, 4 ml) und Ethanol (20 Vol.%, 1ml) (Dentin Cleanser, Kometa Bio, Creskill, USA); Aufnahme des Überstandes mit steriler Gaze nach Einwirkzeit
- Reinigung mit phosphatgepufferter Kochsalzlösung (Dulbecco's Phosphat Buffered Saline, Kometa Bio, Creskill, USA) für 3 Minuten durch Einlage und manuelles Aufschütteln; Aufnahme des Überstandes mit steriler Gaze

- Einlage für weitere 2 Minuten in eine 10%ige EDTA-Lösung (EDTA solution, Kometa Bio, Creskill, USA)
- Nach der Einwirkzeit nochmals Reinigung für 3 Minuten in phosphatgepufferter Kochsalzlösung durch Einlage und Aufschütteln



Abb. 8: Aufbereitung des Zahnmaterials

A: Steriles Einweg-Mahlwerk (Smart Dentin Grinder) mit Zahnteilen; B: Partikulat nach Mahlvorgang in Auffangkassette; C: Aufbereitungslösungen (rot: Natriumhydroxid-Lösung, 0,5M; grün: phosphatgepufferte Kochsalzlösung; blau: EDTA-Lösung, 10%); D: Zahnscheibe und Partikulat in Dappenglas

- Trocknen der Dentinscheibe und des Dentinpartikulats auf einer Heizplatte bei 38 °C
- Lagerung der aufbereiteten Dentinscheibe und des Partikulats bis zur Augmentation bei -18 °C in einem sterilen verschließbaren Gefäß (Eppendorf Conical Tube, Eppendorf AG, Hamburg, Deutschland), beschriftet mit Patientennamen und Patientennummer

- klinische und radiologische Untersuchung (DVT 50x50 mm) 3 Monate nach Zahnentfernung (T0)
- Reevaluation der Eignung zur Studienteilnahme
- virtuelle Implantatplanung anhand der dreidimensionalen Bildgebung zur Bestimmung des Knochen- und Weichteildefizits und der Größe des Augmentats
- Fotodokumentation der Ausgangssituation

Augmentation (3 Monate nach Zahnentfernung) (T1)

- Augmentation (siehe 3.7.2.)
- Fotodokumentation
- Zeitmessung der Behandlungsdauer
- Röntgenkontrolle (DVT 50x50 mm) und radiologische Vermessung des Augmentats

Postoperativ (nach Augmentation)

- Dokumentation der postoperativen Schmerzen und der postoperativen Schwellung bis zum 28. postoperativen Tag mittels visueller Analogskalen (s. Abb. 6) und des Analgetikaeinsatzes bis zum 14. postoperativen Tag
- Dokumentation von Dehiszenzen, Wundheilungsstörungen und anderen Auffälligkeiten bis zum Zeitpunkt der prothetischen Versorgung des Implantats

Implantation (3 Monate nach Augmentation) (T2)

- Fotodokumentation
- Klinische Vermessung der Kieferkammbreite
- Insertion des Implantats nach Protokoll des Implantatherstellers und Dokumentation des Einbringdrehmoments (Implantmed, W&H, Bürmoos, Österreich)
- Messung der Implantatstabilität mittels Resonanzfrequenzanalyse (Neoss Penguin, Integration Diagnostics Sweden, Göteborg, Schweden)
- Dokumentation des Herstellers, der Länge und des Durchmessers des Implantats
- Röntgenkontrolle (DVT 50x50 mm) nach Implantation

Postoperativ (nach Implantation):

- Wundkontrolle nach 1, 3, 7, 14 und 28 Tagen
- Dokumentation von Schmerzen und Schwellung bis zum 28. postoperativen Tag mittels visueller Analogskalen und Analgetikaeinsatz bis zum 14. postoperativen Tag durch die Patientin / den Patienten
- Implantatfreilegung 3 Monate nach Implantation (T3):
 - Messung der Implantatstabilität mittels Resonanzfrequenzanalyse (Neoss Penguin, Integration Diagnostics Sweden AB, Göteborg, Schweden)
 - Klinische Beurteilung des periimplantären Knochenniveaus in Relation zur Implantatschulter mittels Sondierung mit einer Parodontalsonde im mesialen, distalen, oralen und vestibulären Aspekt
 - Röntgenkontrolle (DVT 50x50 mm)
- Prothetische Versorgung des Implantats
- Ein-Jahres-Kontrolle 12 Monate nach Augmentation (T4):
 - Röntgenkontrolle (DVT 50x50 mm)
 - Klinische Untersuchung:
 - Messung der periimplantären Sondiertiefen mittels Sondierung mit einer Parodontalsonde im mesialen, distalen, oralen und vestibulären Aspekt
 - Dokumentation von Blutung auf Sondieren
 - Messung der Breite der vestibulären, befestigten, periimplantären Schleimhaut (Marginalsaum bis mukogingivale Grenzlinie)

3.11. Erfassung postoperativer Beschwerden

Die Patienten wurden gebeten, die postoperativen Beschwerden (Schmerzen/Schwellung) nach dem augmentativen Eingriff sowie den Schmerzmittelverbrauch zu dokumentieren. Hierzu erhielten sie nach dem Eingriff einen Dokumentationsbogen (s. Anhang 3), auf dem die postoperativen Schmerzen und die wahrgenommene Schwellung zu erfassen waren. Die Dokumentation erfolgte auf einer visuellen Analogskala (VAS) (Abb. 6) zu definierten Zeitpunkten (1., 3., 7., 14. und 28. postoperativer Tag). Für auftretende Schmerzen und Schwellung wurde jeweils eine separate VAS verwendet.

Die in der vorliegenden Untersuchung verwendete VAS ist eine 100 mm messende, unskalierte Linie, deren linker Endpunkt mit „*keine Schmerzen*“ bzw. „*keine Schwellung*“ und deren rechter Endpunkt mit „*unerträgliche Schmerzen*“ bzw. „*unerträgliche Schwellung*“ beschriftet sind. Der Patient markierte durch einen vertikalen Strich mit einem Stift auf der Linie das Ausmaß der Schmerzen bzw. der Schwellung. Um eine Validierung der Datenaufnahme der postoperativen Beschwerden zu gewährleisten, wurden alle Patienten standardisiert aufgeklärt. Da postoperative Beschwerden und Schwellungen tageszeitabhängig variieren, wurden die Patienten angewiesen, die VAS zur Mittagszeit vor der Einnahme von Analgetika auszufüllen.

Zusätzlich war die Patientin / der Patient angehalten, die Anzahl eingenommener Tabletten der täglich eingenommenen, analgetischen Bedarfsmedikation vom 1. bis zum 15. postoperativen Tag zu dokumentieren.

Die Auswertung der VAS erfolgte nach dem 28. postoperativen Tag. Hierfür wurde die Strecke zwischen „keine Beschwerden“ und der Markierung in Millimetern gemessen.



Abb. 9: Visuelle Analogskala (VAS)

Die Evaluation der postoperativen Beschwerden und des Analgetikaverbrauchs entspricht dem von Korsch et al. publizierten Protokoll zur Bewertung der Patientenwahrnehmung von

postoperativen Beschwerden nach Knochenentnahme für laterale Kieferkammaugmentationen (KORSCH et al., 2014).

3.12. Erfassung klinischer Komplikationen

Ereigneten sich Komplikationen im Zeitraum zwischen dem augmentativen Eingriff und der Verlaufskontrolle ein Jahr nach dem augmentativen Eingriff, wurden diese dokumentiert. Dabei wurde zwischen dem Zeitpunkt des Ereignisses (Früh- und Spätkomplika-tionen) und der Schwere der Komplikation (schwerwiegende/nicht-schwerwiegende Komplikation) differenziert.

Als Frühkomplika-tionen wurden Komplikationen definiert, die bis zum Zeitpunkt der prothetischen Versorgung eingetreten waren. Komplikationen, zu denen es zwischen der prothetischen Versorgung des Implantats und dem Beobachtungsende nach einem Jahr kam, wurden als Spätkomplika-tionen bezeichnet.

Schwerwiegende Komplikationen waren definitionsgemäß Komplikationen, die mit einem Verlust des Augmentats durch Infektion oder durch eine starke Resorption einhergingen, so dass die Insertion eines Implantats nicht oder nur durch weitere augmentative Maßnahmen möglich war. Ein Implantatverlust wurde ebenfalls als schwerwiegende Komplikation gewertet.

Sämtliche Komplikationen, die eine spätere Implantation sowie die Einheilung des Implantats selbst nicht negativ beeinflussten, wie Infektionen, Wundheilungsstörungen, Nahtdehiszenzen und temporäre Sensibilitätsstörungen, wurden als nicht-schwerwiegend bezeichnet.

3.13. Radiologische Auswertung

Zur Beurteilung des periimplantären Knochens wurden nach der Augmentation (T1), nach der Implantation (T2), nach der Freilegung (T3) und ein Jahr nach der Augmentation (T4) DVT-Aufnahmen mit einem Volumen von 50x50 mm (PaX-Duo3D, Orange Dental, Biberach an der Riß, Germany) angefertigt. Die Auswertung der DVT erfolgte mit Ez3D Plus Software (Vatech Co. Ltd., Hwaseong-si, Korea). Sämtliche Messungen wurden dreimal durchgeführt und aus den Messwerten jeweils das arithmetische Mittel gebildet.

Beurteilt wurden bei der radiologischen Auswertung:

- das approximale Knochen-niveau in Relation zur Implantatschulter
- die transversale Kieferkambbreite 2 und 4 mm unterhalb der Implantatschulter

- die Stärke der vestibulären und oralen Knochenlamelle 2 und 4 mm unterhalb der Implantatschulter

3.13.1. Approximales Knochniveau in Relation zur Implantatschulter

Die Beurteilung des approximalen Knochniveaus zum Nachweis eines horizontalen Knochenverlustes erfolgte in einer tangential zum Kieferkamm orientierten Schnittebene. Die Schnittebene wurde dabei durch den Implantatmittelpunkt gelegt (Abb. 10 A). Es wurde beurteilt, ob die Implantatoberfläche im mesialen und distalen Aspekt vollständig von Knochen bedeckt war (Abb. 10 B). In Fällen, bei denen die Implantatoberfläche nicht vollständig knöchern bedeckt war, wurde der Abstand vom ersten Implantat-Knochenkontakt bis zur Implantatschulter in Millimeter gemessen. Hierbei wurde jeweils nur der höhere Wert in die statistische Auswertung einbezogen.

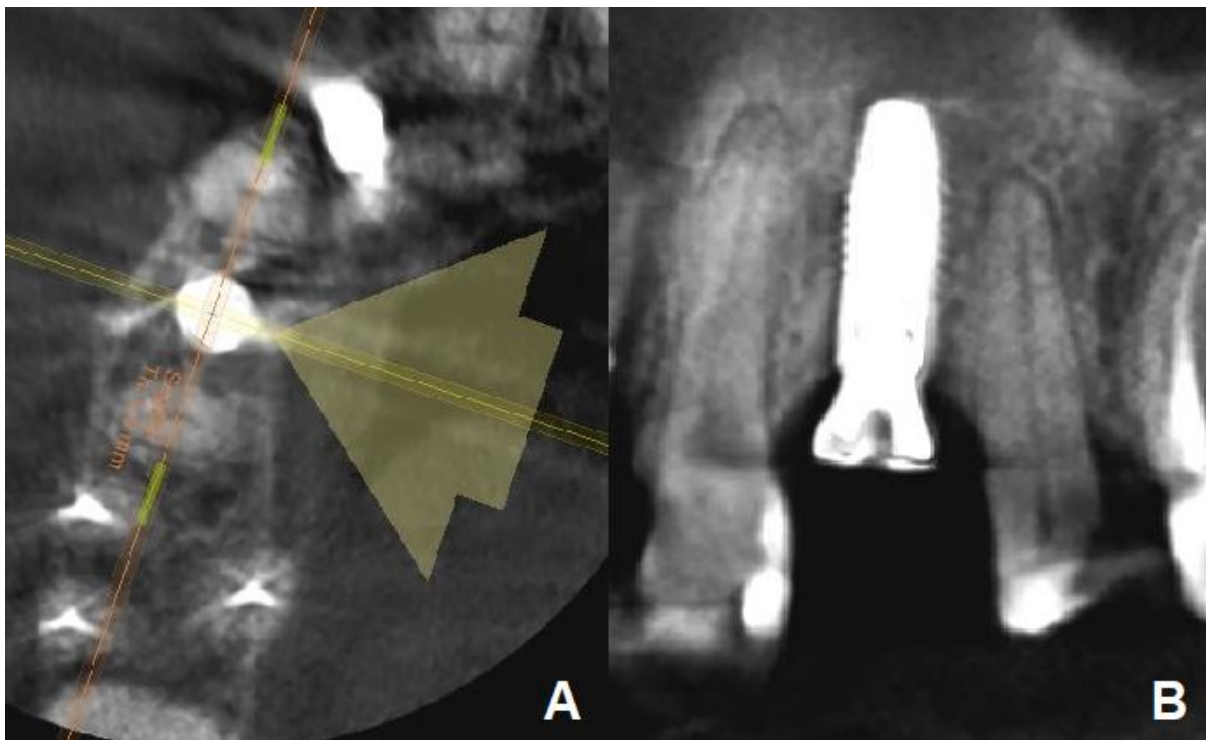


Abb. 10: Evaluation des approximalen Knochniveaus

A: Tangential zum Kieferkamm orientierte Schnittebene (orangene Linie); B: Ansicht von sagittal, im dargestellten Fall ist die Implantatoberfläche im mesialen und distalen Aspekt vollständig von Knochen bedeckt.

3.13.2. Transversale Kieferkammbreite und Breite der vestibulären bzw. oralen Lamelle

Zur Beurteilung der transversalen Kieferkammbreite und der Stärke der vestibulären bzw. der palatinalen Lamelle wurde die Schnittebene in der Mitte des Implantatkörpers in vestibulo-oraler Richtung, d. h. senkrecht zum Kieferkamm, gewählt.

Damit die Messwerte der transversalen Kieferkammbreite vergleichbar waren, mussten die Messungen stets auf gleicher Höhe erfolgen. Als Referenzpunkt für die Messung zum Zeitpunkt T1 (nach der Augmentation) wurde der höchste Punkt des Alveolarkamms herangezogen. Zu den Zeitpunkten T2 (nach der Implantation), T3 (bei der Freilegung) und T4 (ein Jahr nach der Augmentation) wurde der höchste Punkt der Implantatschulter als Referenzpunkt gewählt. Gemessen wurde die transversale Kieferkammbreite 2 mm (L2) und 4 mm (L4) unterhalb des Referenzpunktes (Abb.11 A).

Ergänzend wurden zu den Zeitpunkten T2, T3 und T4 die Dicke der vestibulären und der oralen Lamelle gemessen. Die Messungen erfolgten, wie bereits bei der transversalen Kieferkammbreite, 2 mm und 4 mm unterhalb des Referenzpunktes (Abb. 11 B). Als Referenzpunkt diente auch hier der höchste Punkt der Implantatschulter.

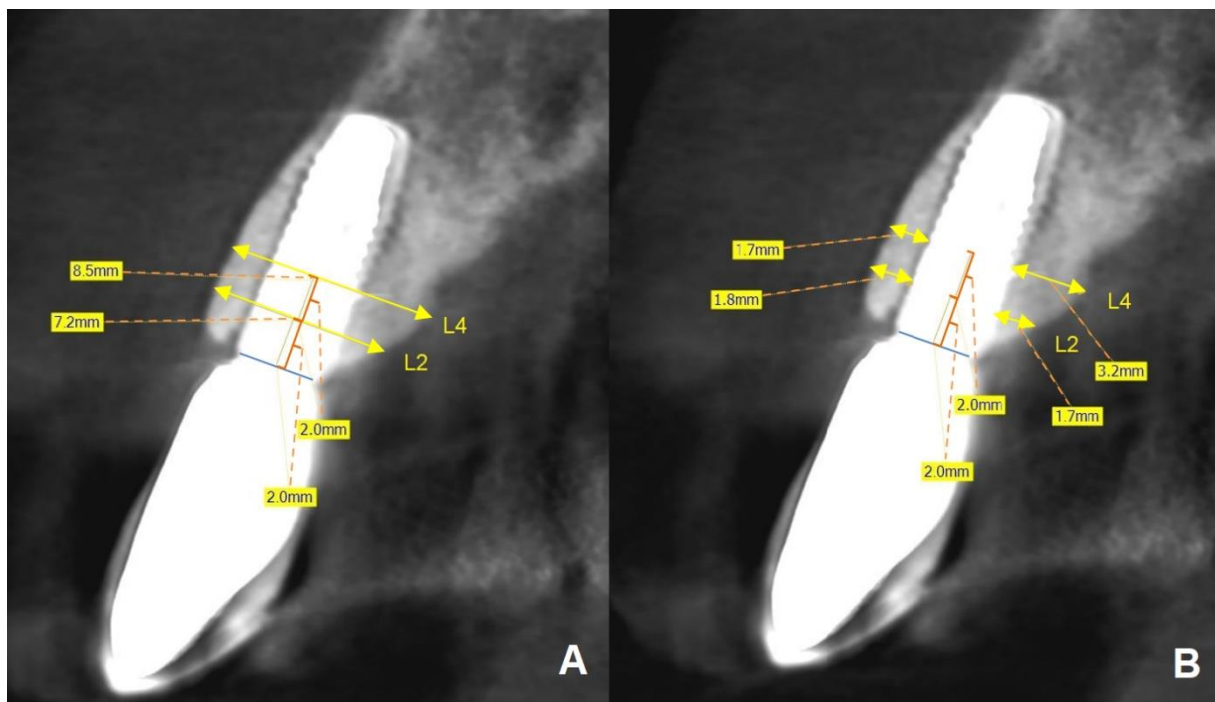


Abb. 11: Messung der transversalen Kieferkammbreite und der vestibulären bzw. oralen Knochenlamelle

A: Messung der transversalen Kieferkammbreite 2 mm und 4 mm (gelbe Pfeile) unterhalb der Implantatschulter (blaue Linie); B: Messung der Breite der bukkalen und oralen Knochenlamelle 2 mm und 4 mm (gelbe Pfeile) unterhalb der Implantatschulter (blaue Linie);

Um die Reproduzierbarkeit bei der Einstellung der Ebenen sicherzustellen, wurde ein transversaler Screenshot angefertigt. Die Ebene der darauffolgenden Messungen wurde anhand dieser Dokumentation ausgerichtet.

3.14. Statistische Auswertung

Die erhobenen Daten wurden mittels Kolomogorov-Smirnov-Tests auf das Vorliegen einer Normalverteilung untersucht.

Die Daten, bei denen keine Normalverteilung vorlag, wurden mit einem nichtparametrischen Testverfahren im Sinne eines Mann-Whitney-U-Test verglichen. Der Vergleich von Mittelwerten normalverteilter Daten wurde mittels Zweistichproben-t-Tests bzw. mittels eines gepaarten t-Tests durchgeführt. Kategorische Daten wurden mittels Kreuztabellen verglichen und die statistische Signifikanz anhand des Fishers-Exact-Tests ermittelt.

Zusammenhänge zwischen zwei metrisch skalierten Variablen wurden anhand des Korrelationskoeffizienten nach Pearson und zwischen kategorischen und metrischen Variablen anhand des Eta-Koeffizienten bestimmt.

Alle Auswertungen wurden auf Patientenebene berechnet. Dies entsprach in dieser Studie der Implantat-Ebene.

Die Datenerfassung erfolgte mit Microsoft Excel und die statistische Auswertung mit IBM SPSS Statistics 28.0.0.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) unter Windows 10.

4. Ergebnisse

4.1. Studienpopulation

Die Studienpopulation bestand aus 20 Patienten, welche randomisiert auf zwei Gruppen zu je zehn Patienten verteilt wurden. Die Alters- und Geschlechterverteilung der Patienten ist in Tabelle 3 dargestellt. Das mittlere Alter der Studienpopulation lag bei 57,1 Jahren. Es bestand kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Altersverteilung.

Tab. 3: Alters- und Geschlechtsverteilung der Patienten zum Zeitpunkt der Augmentation

	<i>Studienpopulation</i>						<i>p-Wert</i> <i>ANOVA</i>
	<i>Gesamt</i>		<i>Gruppe 1</i> <i>BST</i>		<i>Gruppe 2</i> <i>TST</i>		
<i>Alter [Jahre]</i>							
<i>Mittelwert (SD)</i>	57,1 (11,5)		54,1(14,6)		60,0 (6,7)		0,258
<i>Spanne</i>	20,3-74,2		20,3-70,1		52,0-74,2		
<i>Geschlecht</i>	m	w	m	w	m	w	
<i>n</i>	13	7	7	3	6	4	

n = Anzahl, m = männlich, w = weiblich, SD = Standardabweichung

4.2. Klinische Dokumentation der Augmentation

4.2.1. Augmentationsregionen nach Zahngruppen

Im Rahmen der Studie wurden in 20 Regionen Augmentationen durchgeführt. Davon waren 14 Augmentationen (70%) im Frontzahnggebiet (Regio 012-022), eine in der Eckzahnregion (5%) und fünf (20%) im Prämolarengebiet (Regio 015-014 bzw. 024-025).

Alle entfernten Zähne waren nicht erhaltungsfähig bzw. - würdig und waren gegenüber dem Mundhöhlenmilieu exponiert. Die verwendeten Zähne wiesen entweder eine Fraktur auf (n=3), waren umfangreich parodontal kompromittiert (n=4), aufgrund umfangreicher Zahnhartsubstanzschäden nicht restaurierbar (n=1) oder aufgrund einer endodontischen Komplikation nicht erhaltungsfähig (n=2). Fünf Zähne, die zur Augmentation verwendet wurden, wiesen eine Wurzelfüllung auf.

4.2.2. Kieferkambreiten

Die mittlere klinisch gemessene Kieferkambbreite der gesamten Studienkohorte vor der Augmentation war $2,2\pm 1,5$ mm. In der BST-Gruppe zeigte sich dabei eine mittlere präaugmentative Kieferkambbreite von $2,0\pm 1,33$ mm und bei der TST-Gruppe von $2,5\pm 1,7$ mm. Es bestand kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den beiden Studiengruppen ($p=0,520$). Die mittlere klinisch gemessene Kieferkambbreite nach Augmentation belief sich für die gesamte Studienkohorte auf $9,1\pm 1,2$ mm. Die durch die Augmentation erreichte mittlere Kieferkambbreite war in der BST-Gruppe mit $8,9\pm 1,1$ mm etwas größer als bei der TST-Gruppe mit $9,3\pm 1,3$ mm. Ein signifikanter Unterschied zwischen den Untersuchungsgruppen war jedoch nicht festzustellen ($p=0,458$).

Dies ergibt einen mittleren klinischen Zuwachs der Kieferkambbreite von $6,9\pm 1,9$ mm in der BST-Gruppe und $6,8\pm 1,9$ mm in der TST-Gruppe.

Die mittlere Abweichung der radiologisch bestimmten Kieferkambbreite von den klinisch gemessenen Kieferkambbreiten lag bei $0,3\pm 0,8$ mm. Eine statistisch signifikante Abweichung der Mittelwerte konnte nicht festgestellt werden (gepaarter t-Test, Korrelation 0,766; df 19; T 1,619; $p=0,122$).

4.2.3. Eingriffsdauer

Die mittlere Eingriffsdauer für die Knochenentnahme und die Augmentation in der BST-Gruppe lag bei $35,7\pm 9,78$ Minuten und bei der TST-Gruppe bei $26,3\pm 8,8$ Minuten. Bei der TST-Gruppe wurde die Zeit der Zahnaufbereitung nicht in die Operationszeit mit einberechnet, da diese drei Monate zuvor extraoral erfolgte. Der Unterschied war statistisch signifikant (ANOVA $F=5,019$, df 1, $p=0,037^*$).

4.3. Klinische Dokumentation der Implantation

Die Implantation erfolgte im Mittel $97\pm 10,9$ Tagen nach dem augmentativen Eingriff. Bei allen Patienten war ein ausreichend dimensionierter Kieferkamm vorzufinden, der eine regelgerechte Insertion eines konventionellen Titanimplantats erlaubte. Die Augmentate zeigten sich nach der Darstellung durch Bildung eines Mukoperiostlappen makroskopisch homogen durchbaut. Es war bei allen Augmentaten in der klinischen Inspektion eine makroskopisch erkennbare Integrität zwischen Augmentat und Augmentatlager zu dokumentieren. Bei der Präparation des Implantatbetts stellte sich bei allen Fällen eine vitale Blutung dar.

4.3.1. Implantattypen

Im Rahmen der Studie kamen als Implantatsysteme Astra Tech Implant System™ EV (Dentsply-Sirona, York, USA) und Conelog® (Altatec GmbH, Wimsheim, Deutschland) zur Anwendung. Es wurden 17 Astra Tech EV Implantate und drei Conelog-Implantate inseriert. Die nachfolgende Tabelle 4 gibt einen Überblick über die verwendeten Implantattypen.

Tab. 4: Übersicht der einzelnen Patienten mit Geschlecht, Alter, Gruppenzugehörigkeit, Implantatsystem, Implantatlänge und -durchmesser

<i>Patient Nr.</i>	<i>Geschlecht</i>	<i>Alter</i>	<i>Regio</i>	<i>Technik</i>	<i>Implantatsystem</i>	<i>Implantat- durchmesser [mm]</i>	<i>Implantat- länge [mm]</i>
<i>Patient 1</i>	m	74	12	Dentin	Astra Tech EV	3,6	11
<i>Patient 2</i>	w	70	21	Knochen	Astra Tech EV	3,6	11
<i>Patient 3</i>	m	59	11	Dentin	Astra Tech EV	3,6	11
<i>Patient 4</i>	w	59	24	Dentin	Conelog	3,8	11
<i>Patient 5</i>	w	68	12	Dentin	Astra Tech EV	3,6	11
<i>Patient 6</i>	m	66	12	Knochen	Astra Tech EV	3,6	11
<i>Patient 7</i>	m	55	14	Dentin	Astra Tech EV	4,2	11
<i>Patient 8</i>	m	61	14	Knochen	Astra Tech EV	4,2	11
<i>Patient 9</i>	m	20	11	Knochen	Conelog	3,8	11
<i>Patient 10</i>	m	58	11	Knochen	Astra Tech EV	4,2	11
<i>Patient 11</i>	w	56	22	Knochen	Astra Tech EV	3,6	11
<i>Patient 12</i>	w	56	14	Dentin	Astra Tech EV	3,6	11
<i>Patient 13</i>	m	43	21	Knochen	Astra Tech EV	3,6	11
<i>Patient 14</i>	w	64	22	Knochen	Astra Tech EV	3,6	11
<i>Patient 15</i>	w	60	12	Dentin	Astra Tech EV	3,6	11
<i>Patient 16</i>	m	54	11	Dentin	Astra Tech EV	4,2	11
<i>Patient 17</i>	m	54	22	Knochen	Astra Tech EV	4,2	11
<i>Patient 18</i>	m	45	13	Knochen	Conelog	3,8	11
<i>Patient 19</i>	m	60	14	Dentin	Astra Tech EV	3,6	11
<i>Patient 20</i>	m	52	22	Dentin	Astra Tech EV	3,6	11

m = männlich, w = weiblich, mm = Millimeter

4.3.2. Bestimmung der Primärstabilität

Das mittlere maximale Einbringdrehmoment bei der Implantation lag bei $12,7 \pm 9,5$ Ncm. In der BST-Gruppe konnte mit $14,6 \pm 11,7$ Ncm im Mittel ein geringfügig höheres maximales Einbringdrehmoment erreicht werden als in der TST-Gruppe mit $10,8 \pm 6,7$ Ncm. Ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den beiden Gruppen war nicht festzustellen ($p=0,383$).

Die korrespondierenden Werte für die Resonanzfrequenzanalyse lagen im Mittel bei einem ISQ-Wert von $60,4 \pm 11,4$. Dabei waren für die BST-Gruppe erneut geringfügig höhere Werte als für die TST-Gruppe festzustellen (BST: $63,1 \pm 9,6$; TST: $57,7 \pm 12,9$). Ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den beiden Gruppen war hier ebenso nicht festzustellen ($p=0,301$).

4.4. Klinische Dokumentation der Implantatfreilegung

Die Freilegung der Implantate erfolgte im Mittel $96 \pm 17,5$ Tage nach der Implantation.

4.4.1. Periimplantäres Knochenniveau

Das klinisch evaluierte periimplantäre Knochenniveau befand sich bei der Freilegung an allen Implantaten zirkumferent auf Höhe der Implantatschulter. Die Sondierung im mesialen, distalen, vestibulären und oralen Aspekt ergab an keinem der Implantate einen Anhalt auf einen periimplantären Knochenabbau.

4.4.2. Bestimmung der Sekundärstabilität

Der mittlere ISQ-Wert bei Implantatfreilegung betrug $75,6 \pm 7,7$. Lediglich bei einer Patientin aus der TST-Gruppe lag der ISQ mit 54 unterhalb des Wertes 60, welcher als Grenzwert für eine versorgungsfähige Implantatstabilität festgelegt wurde. Bei dieser Patientin wurde nach drei Monaten nochmals der ISQ-Wert bestimmt. Dabei stellte sich ein ISQ-Wert > 60 dar, so dass eine prothetische Versorgung zu diesem Zeitpunkt erfolgen konnte.

Der mittlere ISQ der BST-Gruppe war dabei mit $78,2 \pm 4,4$ geringfügig höher als bei der TST-Gruppe mit $73,1 \pm 9,6$. Es bestand kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Gruppen ($p=0,143$). Die mittlere Zunahme des ISQ zwischen Implantation und Freilegung lag bei $15,2 \pm 11,7$ (BST-Gruppe: $15,1 \pm 8,1$; TST-Gruppe $15,4 \pm 14,9$) und war in beiden Gruppen statistisch signifikant ($p < 0,001$, gepaarter T-Test). Zwischen den beiden Gruppen war kein Unterschied bei der Zunahme der Implantatstabilität festzustellen ($p=0,956$). Die Werte sind in der nachfolgenden Tabelle 5 dargestellt.

Tab. 5: Übersicht der Implantatstabilitätsquotienten zum Zeitpunkt der Implantation und der Implantatfreilegung

	<i>Studienpopulation</i>			Zwei- Stichproben- t-Test
	Gesamt	Gruppe 1	Gruppe 2	
			BST	TST
<i>ISQ bei Implantation T2 (SD)</i>	60,4 (11,4)	63,1 (9,6)	57,7 (12,9)	0,301
<i>ISQ bei Implantatfreilegung T3 (SD)</i>	75,6 (7,7)	78,2 (4,4)	73,1 (9,6)	0,143
<i>Veränderung T2-T3 (SD)</i>	15,2 (11,7)	15,1 (8,1)	15,4 (14,9)	0,956

ISQ= Implantatstabilitätsquotient, SD= Standardabweichung

Es zeigte sich keine statistisch signifikante Korrelation zwischen dem ISQ bei der Implantation als Maß für die Primärstabilität und dem ISQ zum Zeitpunkt der Implantatfreilegung als Maß für die Sekundärstabilität (Pearson $r=0,297$, $p=0,203$). Die Korrelation ist im nachfolgenden Streudiagramm (Abb. 12) grafisch dargestellt.

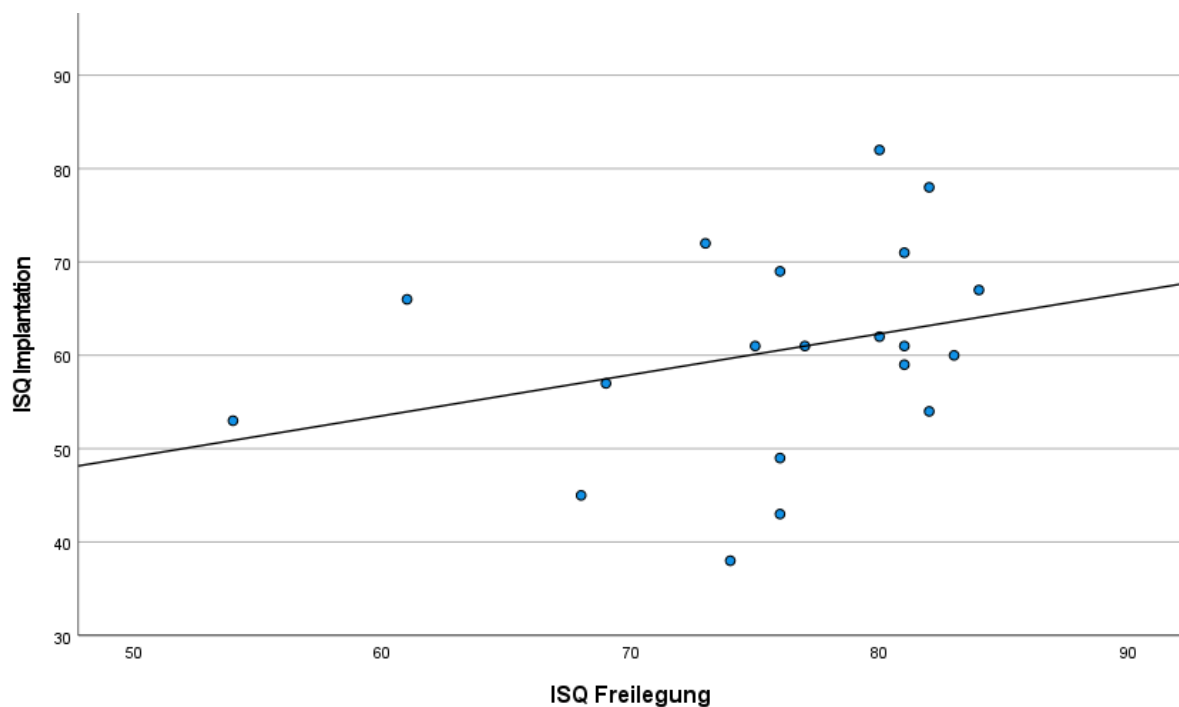


Abb. 12: Streudiagramm Korrelation zwischen ISQ zum Zeitpunkt der Implantation und ISQ zum Zeitpunkt der Implantatfreilegung

4.5. Patientenwahrnehmung postoperativer Beschwerden

4.5.1. Postoperative Schmerzen nach Augmentation

Die postoperativen Schmerzen wurden in beiden Gruppen am ersten postoperativen Tag am größten angegeben. Mit Ausnahme eines Patienten aus der BST-Gruppe, der mit einem VAS-Wert von 71 eine starke Schmerzempfindung anzeigte, berichteten alle Patienten nur geringfügige Beschwerden mit einem VAS-Wert < 20 . Es war zu keinem Zeitpunkt ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Gruppen festzustellen (Tag 1: $p=0,528$, Tag 3: $p=0,191$, Tag 7: $p=0,587$, Tag 14: $p=0,897$, Tag 28: $p=0,122$; Mann-Whitney-U-Test). In Abbildung 13 sind die VAS-Werte in Millimeter als Boxplot-Grafik visualisiert.

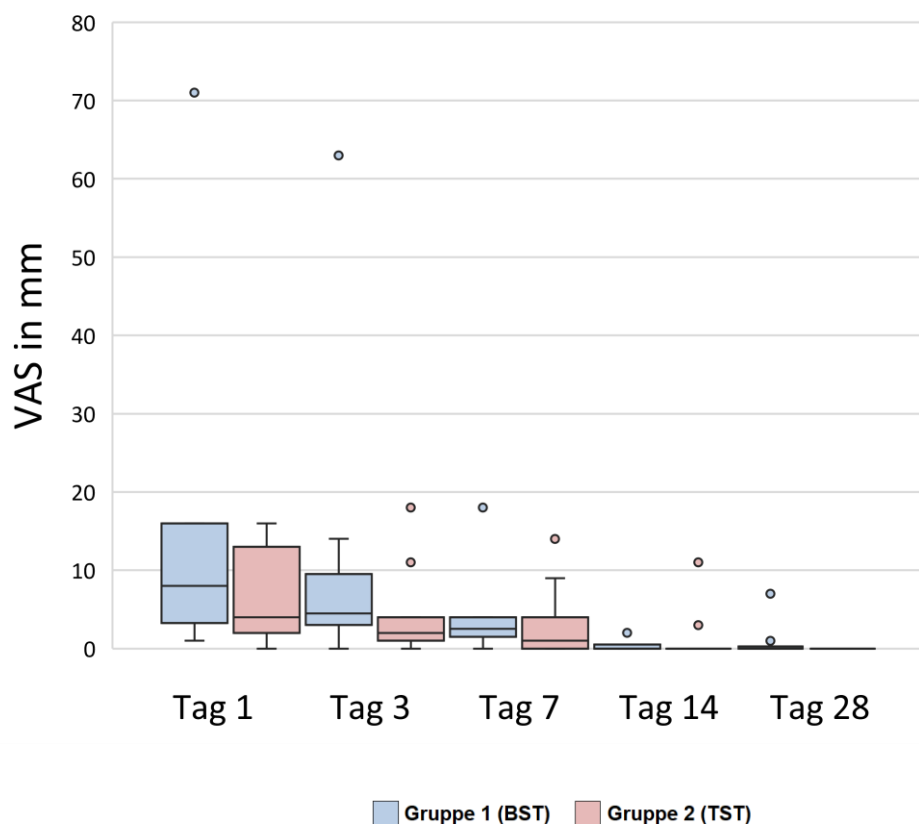


Abb. 13: Boxplot-Diagramm zur Darstellung der postoperativen Schmerzen nach Augmentation

VAS-Werte in Millimeter mit Median und Standardabweichung für die postoperativen Schmerzen vom ersten bis 28. postoperativen Tag

4.5.2. Postoperative Schwellung nach Augmentation

Die postoperative Schwellung wurde im Vergleich zu den postoperativen Schmerzen als deutlich stärker wahrgenommen. Die Patienten der BST-Gruppe gaben mit einem medianen

VAS-Wert von 40 die stärkste Schwellung am dritten postoperativen Tag an, während die Schwellung mit einem medianen VAS-Wert von 14 am ersten postoperativen Tag noch geringer ausfiel.

Die Patienten, bei denen eine Augmentation mit autologem Dentin durchgeführt wurde, vermerkten die stärkste Schwellung mit einem medianen VAS-Wert von 52 hingegen am ersten postoperativen Tag. Die Schwellung nahm danach kontinuierlich ab. Zum Befragungszeitpunkt nach einer Woche gab die Gruppe, bei der eine Augmentation mit autologem Dentin durchgeführt wurde, eine signifikant stärkere Schwellung an ($p=0,048$, Mann-Whitney-U-Test).

An den anderen Tagen war kein statistisch signifikanter Unterschied auszumachen (Tag 1: $p=0,210$; Tag 3: $p=0,531$; Tag 14: $p=0,387$; Tag 28: $p=1,000$). In der nachfolgenden Abbildung 14 sind die VAS-Werte in Millimeter dargestellt.

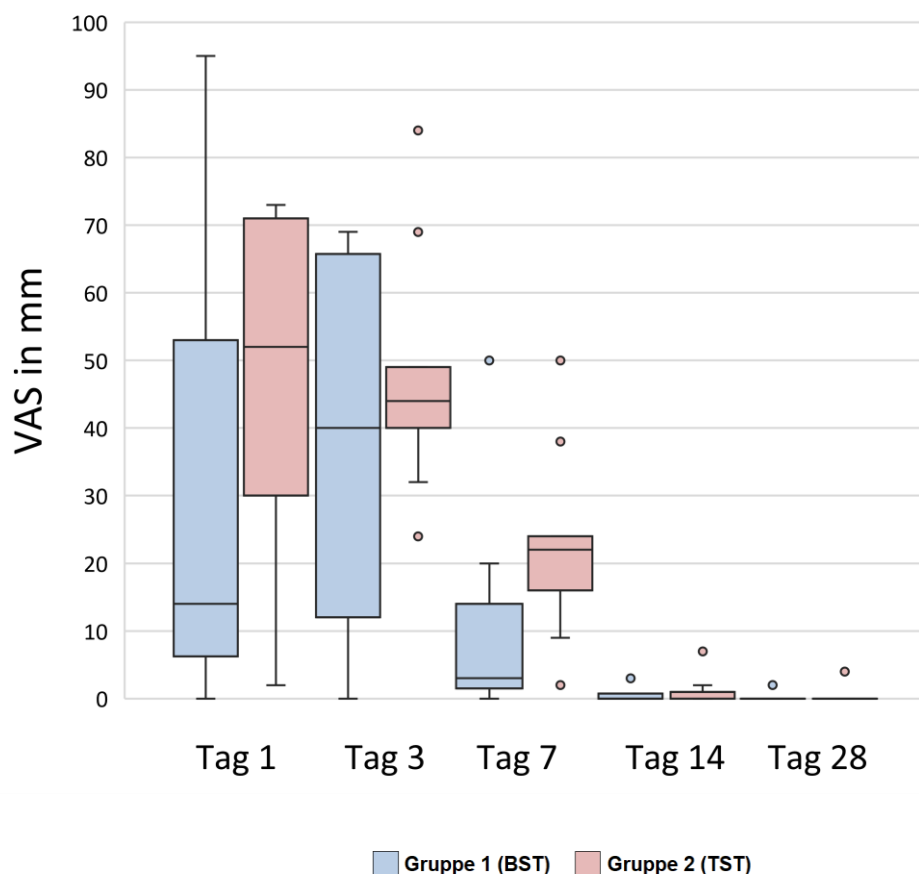


Abb. 14: Boxplot- Diagramm zur Darstellung der postoperativen Schwellung nach Augmentation

VAS-Werte in Millimeter mit Median und Standardabweichung für die postoperative Schwellung vom ersten bis 28. postoperativen Tag

4.5.3. Schmerzmitteleinnahme nach Augmentation

Der mittlere Analgetikaverbrauch war am ersten postoperativen Tag am größten. Dabei benötigten die Patienten aus der TST-Gruppe mit einem mittleren Analgetikaverbrauch von 1,6 Tabletten mehr Schmerzmittel als die Patienten aus der BST-Gruppe mit einem mittleren Analgetikaverbrauch von einer Tablette. Der mittlere Analgetikaverbrauch pro Tag ist in der Abbildung 15 dargestellt.

Drei Patienten aus der BST-Gruppe benötigten am ersten postoperativen Tag keine Schmerzmittel, wohingegen in der TST-Gruppe alle Patienten Schmerzmittel einnahmen. Es war zu keinem Befragungszeitpunkt ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den beiden Gruppen festzustellen.

Die kumulative Analgetikaeinnahme über den Beobachtungszeitraum von 15 Tagen war in der TST-Gruppe im Mittel mit $4,5 \pm 3,9$ Tabletten höher als in der BST-Gruppe, wo im Mittel nur $2,8 \pm 3,4$ Tabletten im gleichen Zeitraum eingenommen wurden. Ein statistisch signifikanter Unterschied war dabei nicht festzustellen ($p = 0,316$). Ab dem 9. Tag war in der TST-Gruppe und ab dem 13. Tag in der BST-Gruppe kein Patient mehr auf die Einnahme von Schmerzmitteln angewiesen.

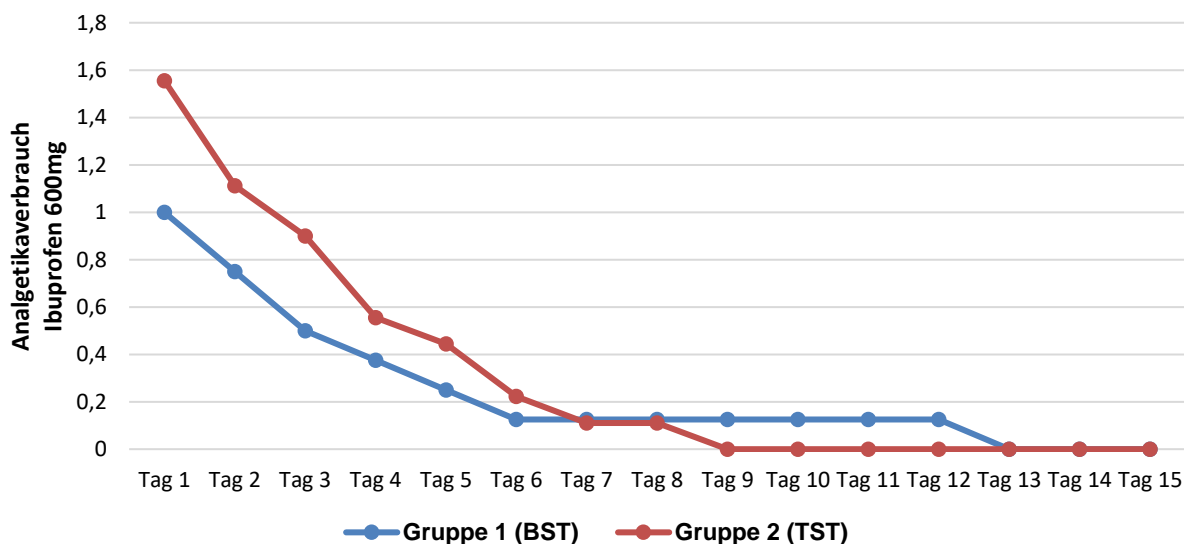


Abb. 15: Durchschnittliche Analgetikaeinnahme nach Augmentation

Durchschnittliche Anzahl an Tabletten (Ibuprofen 600 mg) pro Patient pro Tag vom ersten bis zum 15. postoperativen Tag

4.6. Klinische Dokumentation des Follow-ups ein Jahr nach der Augmentation

Das Follow-up erfolgte 1 Jahr nach der Augmentation. Alle in die Studie eingeschlossenen Patienten (n=20) konnten untersucht werden. Zu diesem Zeitpunkt waren alle Implantate prothetisch mit einem festsitzenden Zahnersatz versorgt.

4.6.1. Entzündungsparameter

Es wurde an allen Implantaten eine Sondierung an vier Punkten (mesial, bukkal, distal und palatinal) des periimplantären Gewebes vorgenommen. Drei Implantate der BST-Gruppe und vier Implantate der TST-Gruppe zeigten eine Blutungsreaktion nach der Sondierung. Ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen war nicht dabei festzustellen ($p=0,639$). Entzündungszeichen wie Rötung, Schwellung oder eine Suppuration aus dem periimplantären Sulkus waren bei keinem der Implantate nachweisbar.

4.6.2. Breite der keratinisierten Mukosa

Es stellte sich an allen Implantaten bei der visuellen Inspektion eine periimplantäre Manschette aus keratinisierter Mukosa dar. Im vestibulären Aspekt zwischen dem Marginalsaum und der mukogingivalen Grenzlinie gemessen lag diese im Mittel bei $3,9\pm 1,7$ mm.

In der BST-Gruppe war die keratinisierte Mukosa mit $4,3\pm 1,6$ mm im Mittel breiter als in der TST-Gruppe mit einem Mittelwert von $3,5\pm 1,7$ mm. Der Unterschied war statistisch nicht signifikant ($p= 0,291$).

4.7. Dokumentation klinischer Komplikationen

Während des Beobachtungszeitraums (Augmentation – 1-Jahres-Kontrolle) traten an keinem der Augmentate bzw. der Implantate klinische oder technische Komplikationen auf.

4.8. Radiologische Auswertung

4.8.1. Approximales Knochenniveau in Relation zur Implantatschulter

Zum Zeitpunkt der Freilegung (T3) war radiologisch bei keinem der Implantate ein vertikaler Knochenabbau im mesialen und distalen Aspekt erkennbar. Bei der Kontrolle ein Jahr nach der Augmentation zeigte ein Implantat aus BST-Gruppe einen vertikalen Knochenverlust von 0,9 mm. In der TST-Gruppe war an zwei Implantaten ein Knochenabbau von 0,5 bzw. 0,7 mm festzustellen.

4.8.2. Kieferkambreiten

Die radiologische gemessene, mittlere transversale Kieferkambbreite 2 Millimeter unterhalb des Referenzpunktes (L2) belief sich nach dem augmentativen Eingriff (T1) auf $8,8 \pm 1,2$ mm. Die Kieferkambbreite war mit $9,3 \pm 1,1$ mm bei der TST-Gruppe größer als in der BST-Gruppe, bei der sich eine mittlere Kieferkambbreite von $8,3 \pm 1,2$ mm darstellte. Der Unterschied war statisch jedoch nicht signifikant ($p=0,071$). Bei den Untersuchungszeitpunkten T2 (Implantation), T3 (Freilegung) und T4 (Jahreskontrolle) hingegen erwies sich die mittlere transversale Kieferkambbreite mit zwei Millimetern unterhalb des Referenzpunktes in der TST-Gruppe als signifikant breiter als in der BST-Gruppe.

Auch die transversale Kieferkambbreite 4 Millimeter unterhalb des Referenzpunktes (L4) stellte sich in der TST-Gruppe breiter dar als in der BST-Gruppe. Der Unterschied war zu den Zeitpunkten nach der Augmentation (T1) und bei der Freilegung (T3) in der TST-Gruppe signifikant, wohingegen zu den Zeitpunkten der Implantation (T2) und der Jahreskontrolle (T4) kein signifikanter Unterschied zu ermitteln war.

Die Mittelwerte der transversalen Kieferkambbreite zu den Zeitpunkten T1, T2, T3 und T4 sowie der Breiten der bukkalen und oralen Lamelle zu den Zeitpunkten T2, T3 und T4 sind in der Tabelle 6 aufgeführt.

Tab. 6: Mittelwerte der transversalen Kieferkambbreite zu den Zeitpunkten T1-T4 und der Breiten der vestibulären und oralen Lamelle zu den Zeitpunkten T2-T4

<i>Messzeitpunkt</i>	<i>Studienpopulation</i>			Zwei- Stichproben- ^ t-Test
	Gesamt	Gruppe 1 BST	Gruppe 2 TST	p-Wert
<i>Kieferkambbreite bei Augmentation (T1)</i>				
<i>auf Höhe L2 in mm (SD)</i>	8,8 (1,24)	8,3 (1,23)	9,3 (1,10)	0,071
<i>auf Höhe L4 in mm (SD)</i>	9,4 (1,26)	8,9 (1,02)	10,0 (1,28)	0,048*
<i>Kieferkambbreite bei Implantation (T2)</i>				
<i>auf Höhe L2 in mm (SD)</i>	8,5 (1,21)	7,7 (0,84)	9,3 (0,99)	0,001*
<i>auf Höhe L4 in mm (SD)</i>	9,2 (1,26)	8,6 (0,76)	9,7 (1,45)	0,052
<i>Breite vestib. Lamelle bei Implantation (T2)</i>				
<i>auf Höhe L2 in mm (SD)</i>	2,3 (0,70)	2,0 (0,34)	2,7 (0,77)	0,011*
<i>auf Höhe L4 in mm (SD)</i>	2,4 (0,72)	2,2 (0,42)	2,7 (0,88)	0,131
<i>Breite orale Lamelle bei Implantation (T2)</i>				
<i>auf Höhe L2 in mm (SD)</i>	2,2 (0,78)	1,8 (0,53)	2,6 (0,77)	0,009*
<i>auf Höhe L4 in mm (SD)</i>	3,05 (0,86)	2,8 (0,47)	3,3 (1,08)	0,137
<i>Kieferkambbreite bei Freilegung (T3)</i>				
<i>auf Höhe L2 in mm (SD)</i>	8,0 (1,40)	7,0 (0,87)	8,9 (1,18)	<0,001*
<i>auf Höhe L4 in mm (SD)</i>	8,8 (1,56)	8,2 (0,97)	9,3 (1,84)	0,044*
<i>Breite vestib. Lamelle bei Freilegung (T3)</i>				
<i>auf Höhe L2 in mm (SD)</i>	2,0 (0,86)	1,3 (0,55)	2,6 (0,62)	<0,001*
<i>auf Höhe L4 in mm (SD)</i>	2,2 (0,81)	1,8 (0,53)	2,6 (0,88)	0,031*
<i>Breite orale Lamelle bei Freilegung (T3)</i>				
<i>auf Höhe L2 in mm (SD)</i>	1,9 (0,88)	1,6 (0,41)	2,4 (1,03)	0,029*
<i>auf Höhe L4 in mm (SD)</i>	2,9 (0,97)	2,7 (0,55)	3,1 (1,26)	0,303
<i>Kieferkambbreite Jahreskontrolle (T4)</i>				
<i>auf Höhe L2 in mm (SD)</i>	7,6 (1,35)	6,9 (0,92)	8,3 (1,37)	0,007*
<i>auf Höhe L4 in mm (SD)</i>	8,5 (1,53)	8,0 (0,99)	8,9 (1,86)	0,176
<i>Breite vestib. Lamelle Jahreskontrolle (T4)</i>				
<i>auf Höhe L2 in mm (SD)</i>	1,8 (0,82)	1,3 (0,65)	2,3 (0,67)	0,004*
<i>auf Höhe L4 in mm (SD)</i>	1,9 (0,83)	1,6 (0,74)	2,2 (0,81)	0,074
<i>Breite orale Lamelle Jahreskontrolle (T4)</i>				
<i>auf Höhe L2 in mm (SD)</i>	1,8 (0,73)	1,6 (0,33)	2,0 (0,98)	0,313
<i>auf Höhe L4 in mm (SD)</i>	2,7 (0,94)	2,6 (0,46)	2,8 (1,28)	0,718

mm= Millimeter, SD= Standardabweichung

4.8.3. Resorption der transversalen Kieferkambbreite

Bei der Auswertung der Veränderung der Kieferkambbreiten zeigte sich in beiden Gruppen im Verlauf ein Rückgang. In der BST-Gruppe war im Zeitraum zwischen der Augmentation (T1) und der Implantatfreilegung (T3), sprich, in den ersten sechs Monaten nach Augmentation, 2 mm unterhalb des Referenzpunktes (L2) die Veränderung am stärksten. Die absolute Breite des Kieferkamms reduzierte sich auf diesem Messlevel im Mittel um 1,3 mm, während in der TST-Gruppe eine signifikant geringere mittlere Abnahme von 0,4 mm festzustellen war ($p=0,018^*$). Zwischen der Implantatfreilegung (T3) und der 1-Jahreskontrolle (T4) stagnierte in der BST-Gruppe der Rückgang jedoch und es war in diesem Zeitraum nur noch eine mittlere Abnahme der Kieferkambbreite von 0,1 mm zu verzeichnen. In der TST-Gruppe zeigte sich dagegen eine größere, jedoch statistisch nicht signifikante Abnahme von 0,6 mm ($p=0,095$) innerhalb dieser Zeitspanne. Die absolute mittlere Abnahme der Kieferkambbreite über den gesamten Untersuchungszeitraum $\Delta T1-T4$ war in der BST-Gruppe mit 1,4 mm etwas größer als in der TST-Gruppe mit 1,0 mm. Der Unterschied war statistisch nicht signifikant ($p=0,346$).

Am Messlevel 4 mm unterhalb des Referenzpunktes (L4) zeigte sich im Mittel bei beiden Gruppen ein vergleichbarer kontinuierlicher Rückgang der Kieferkambbreite von jeweils 1,0 mm. Zu keinem Zeitpunkt war ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Gruppen feststellbar.

Die Boxplot-Grafiken im Anhang 4 und 5 stellen die Mittelwerte und Standardabweichungen der absoluten Kieferkambbreiten im zeitlichen Verlauf zwischen den Untersuchungszeitpunkten T1 und T4 graphisch dar.

In Tabelle 7 finden sich die Mittelwerte der transversalen Kieferkambbreite über die Zeiträume Augmentation-Jahreskontrolle ($\Delta T1-T4$), Implantation-Freilegung ($\Delta T2-T3$) und Implantation- Jahreskontrolle ($\Delta T2-T4$) und der bukkalen bzw. oralen Lamelle über die Zeiträume Implantation-Freilegung ($\Delta T2-T3$) und Implantation-Jahreskontrolle ($\Delta T2-T4$). In Tabelle 8 sind die korrespondierenden Werte für die Resorption in Relation zur initialen Kieferkambbreite und der Breite der vestibulären bzw. oralen Lamelle in Prozent dargestellt.

Bei der Betrachtung der vestibulären bzw. oralen Lamelle zeigte sich, dass die Veränderung der Kieferkambbreite in der BST-Gruppe vorwiegend im Bereich der vestibulären Lamelle stattfand, während in der TST-Gruppe die Veränderung in etwa gleichermaßen an der vestibulären und oralen Lamelle zu sehen war. Sowohl auf dem Messlevel L2 als auch auf dem Messlevel L4 erfolgte in der BST-Gruppe ca. 80 % der Gesamtresorption im Zeitraum $\Delta T2-T4$

im Bereich der vestibulären Lamelle. In der TST-Gruppe sind dies im selben Zeitraum nur ca. 40 % der Gesamtresorption.

In der BST-Gruppe wies die vestibuläre Lamelle auf dem Messlevel L2, ähnlich wie bei der Gesamtresorption, eine deutliche initiale mittlere Abnahme von 0,57 mm zwischen den Untersuchungszeitpunkten T2 und T3 auf, entsprechend 30 % der Breite, sowie eine Stagnation zwischen den Untersuchungszeitpunkten T3 und T4.

In der TST-Gruppe war im Bereich der vestibulären Lamelle auf diesem Messlevel zwischen den Untersuchungszeitpunkten T2 und T3 eine nur geringfügige Veränderung von 0,1 mm festzustellen, was 3,7 % der Breite entspricht. Der Unterschied zwischen den beiden Gruppen war sowohl für die absoluten Werte ($p=0,015^*$) als auch für die relativen Werte ($p=0,007^*$) statistisch signifikant. Für das Intervall $\Delta T2-T4$ war kein signifikanter Unterschied mehr feststellbar ($p= 0,389$).

Auf dem Messlevel L4 stellte sich die Resorption der vestibulären Lamelle im Intervall $\Delta T2-T3$ für die BST-Gruppe mit 0,37 mm, entsprechend 17,2% der Ausgangsbreite, etwas weniger akzentuiert dar. Im Intervall $\Delta T2-T4$ zeigte sich mit einer mittleren Resorption von 0,6 mm, entsprechend 27,1% der Ausgangsbreite, ein ähnliches Ausmaß an Resorption wie auf dem Messlevel L2. In der TST-Gruppe fiel die Resorption mit 0,1 mm, entsprechend 4,5% der Ausgangsbreite, im Intervall $\Delta T2-T3$ und mit 0,43 mm, entsprechend 16,3% der Ausgangsbreite, im Intervall $\Delta T2-T4$ geringer aus. Der Unterschied zwischen beiden Gruppen war zu keinem Zeitpunkt statistisch signifikant.

Die Diagramme im Anhang 6 bis 9 stellen die Mittelwerte der Breite der vestibulären und oralen Lamelle auf den Messlevels L2 bzw. L4 im zeitlichen Verlauf zwischen den Untersuchungszeitpunkten T2 und T4 dar.

Tab. 7: Mittlere Resorption (absolut) der transversalen Kieferkambbreite und der vestibulären bzw. oralen Lamelle

	<i>Studienpopulation</i>			Zwei-
	Gesamt	Gruppe 1	Gruppe 2	Stichproben-
		BST	TST	t-Test
				p-Wert
<i>Mittlere Resorption Kieferkambbreite $\Delta T1-T4$</i>				
<i>auf Höhe L2 in mm (SD)</i>	1,20 (1,01)	1,42 (0,93)	0,98 (1,09)	0,346
<i>auf Höhe L4 in mm (SD)</i>	0,95 (1,14)	0,87 (1,08)	1,03 (1,25)	0,762
<i>Mittlere Resorption Kieferkambbreite $\Delta T2-T3$</i>				
<i>auf Höhe L2 in mm (SD)</i>	0,55 (0,49)	0,70 (0,49)	0,40 (0,47)	0,183
<i>auf Höhe L4 in mm (SD)</i>	0,38 (0,51)	0,43 (0,46)	0,32 (0,57)	0,643
<i>Mittlere Resorption vestibuläre Lamelle $\Delta T2-T3$</i>				
<i>auf Höhe L2 in mm (SD)</i>	0,32 (0,47)	0,57 (0,48)	0,10 (0,31)	0,015*
<i>auf Höhe L4 in mm (SD)</i>	0,24 (0,32)	0,37 (0,36)	0,10 (0,21)	0,057
<i>Mittlere Resorption orale Lamelle $\Delta T2-T3$</i>				
<i>auf Höhe L2 in mm (SD)</i>	0,24 (0,65)	0,23 (0,59)	0,25 (0,75)	0,948
<i>auf Höhe L4 in mm (SD)</i>	0,16 (0,49)	0,10 (0,39)	0,22 (0,60)	0,600
<i>Mittlere Resorption Kieferkambbreite $\Delta T2-T4$</i>				
<i>auf Höhe L2 in mm (SD)</i>	0,91 (0,81)	0,83 (0,57)	0,98 (1,03)	0,691
<i>auf Höhe L4 in mm (SD)</i>	0,71 (0,77)	0,64 (0,64)	0,78 (0,92)	0,697
<i>Mittlere Resorption vestibuläre Lamelle $\Delta T2-T4$</i>				
<i>auf Höhe L2 in mm (SD)</i>	0,54 (0,58)	0,65 (0,62)	0,42 (0,54)	0,389
<i>auf Höhe L4 in mm (SD)</i>	0,52 (0,62)	0,60 (0,69)	0,43 (0,58)	0,559
<i>Mittlere Resorption orale Lamelle $\Delta T2-T4$</i>				
<i>auf Höhe L2 in mm (SD)</i>	0,42 (0,79)	0,16 (0,51)	0,68 (0,96)	0,149
<i>auf Höhe L4 in mm (SD)</i>	0,33 (0,58)	0,12 (0,42)	0,54 (0,67)	0,109

mm= Millimeter, SD= Standardabweichung

Tab. 8: Mittlere Resorption (relativ) der transversalen Kieferkammbreite und der vestibulären bzw. oralen Lamelle

	<i>Studienpopulation</i>			Zwei-
	Gesamt	Gruppe 1 BST	Gruppe 2 TST	Stichproben- t-Test p-Wert
<i>Mittl. Resorption Kieferkammbreite AT1-T4</i>				
<i>auf Höhe L2 in % (SD)</i>	13,5 (10,74)	16,6 (9,52)	10,5 (11,52)	0,217
<i>auf Höhe L4 in % (SD)</i>	10,1 (12,04)	9,3 (11,48)	10,8 (13,16)	0,798
<i>Mittl. Resorption Kieferkammbreite AT2-T3</i>				
<i>auf Höhe L2 in % (SD)</i>	6,8 (6,38)	9,1 (6,46)	4,5 (5,70)	0,108
<i>auf Höhe L4 in % (SD)</i>	4,6 (7,00)	5,2 (6,00)	4,0 (8,10)	0,722
<i>Mittlere Resorption vestib. Lamelle AT2-T3</i>				
<i>auf Höhe L2 in % (SD)</i>	14,8 (26,75)	30,0 (26,97)	3,7 (16,41)	0,007*
<i>auf Höhe L4 in % (SD)</i>	10,8 (17,00)	17,1 (20,51)	4,5 (10,03)	0,079
<i>Mittlere Resorption orale Lamelle AT2-T3</i>				
<i>auf Höhe L2 in % (SD)</i>	8,1 (28,04)	8,9 (24,44)	7,2 (32,56)	0,895
<i>auf Höhe L4 in % (SD)</i>	5,4 (21,02)	3,5 (12,38)	7,2 (27,78)	0,700
<i>Mittl. Resorption Kieferkammbreite AT2-T4</i>				
<i>auf Höhe L2 in % (SD)</i>	10,7 (9,25)	10,8 (7,41)	10,6 (11,22)	0,973
<i>auf Höhe L4 in % (SD)</i>	8,0 (8,70)	7,5 (7,51)	8,6 (10,07)	0,794
<i>Mittlere Resorption vestib. Lamelle AT2-T4</i>				
<i>auf Höhe L2 in % (SD)</i>	23,7 (27,07)	33,7 (32,03)	13,7 (17,31)	0,105
<i>auf Höhe L4 in % (SD)</i>	21,8 (26,04)	27,2 (31,60)	16,3 (19,20)	0,361
<i>Mittlere Resorption orale Lamelle AT2-T4</i>				
<i>auf Höhe L2 in % (SD)</i>	12,8 (33,70)	4,2 (25,60)	21,3 (39,08)	0,269
<i>auf Höhe L4 in % (SD)</i>	10,4 (23,53)	3,5 (14,60)	17,2 (29,18)	0,201

SD= Standardabweichung

4.8.4. Zusammenhang zwischen Augmentatbreite und Resorption

In der linearen Regressionsanalyse lässt sich kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Augmentatbreite und der Resorption nachweisen ($R^2=0,019$, $F=0,344$, $p=0,565$). Es ist dabei kein Unterschied zwischen der BST-Gruppe ($R^2=0,012$, $F=0,930$, $p=0,768$) und der TST-Gruppe ($R^2=0,018$, $F=0,144$, $p=0,715$) festzustellen.

Der Zusammenhang zwischen Augmentatbreite und Resorption zwischen den Untersuchungszeitpunkten T1 und T4 ist in Abbildung 16 in einem Streudiagramm graphisch dargestellt.

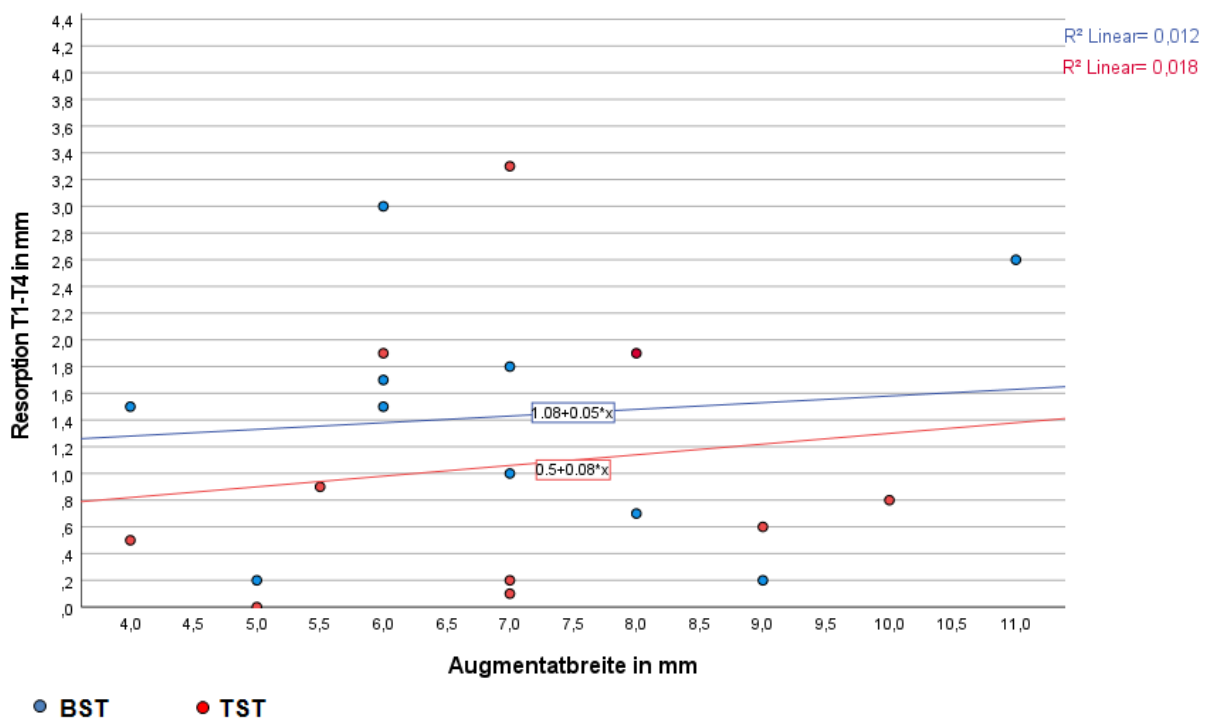


Abb. 16: Streudiagramm zur Darstellung des Zusammenhangs zwischen Augmentatbreite und der Resorption auf Höhe L2 zwischen den Untersuchungszeitpunkten T1 und T4

5. Diskussion

5.1. Wissenschaftlicher Hintergrund und Fragestellung der Arbeit

Ein ausreichend dimensionierter Kieferkamm ist die Grundbedingung für eine erfolgreiche Implantatinsertion. Nicht selten ist der ortsständige Knochen jedoch durch resorptive Prozesse oder Atrophie in seinem Volumen so umfangreich reduziert, dass eine Implantatinsertion nicht ohne weiteres möglich ist. In der wissenschaftlichen Literatur ist eine Vielzahl an Verfahren und Materialien zur präimplantologischen Rekonstruktion des Kieferkammes beschrieben. Transplantate aus autologem Knochen werden aufgrund ihrer exzellenten osteokonduktiven, osteoinduktiven und osteogenen Eigenschaften sowie der immunologischen Kompatibilität nach wie vor als „Goldstandard“ betrachtet. Aufgrund der guten Zugänglichkeit, der geringen Entnahmemorbidity und der Anwendbarkeit unter ambulanten Kautelen haben sich intraorale Donorstellen, wie z.B. die Linea obliqua externa des retromolaren Unterkiefers, in der präimplantologischen Chirurgie als Standardverfahren durchgesetzt. Seit einigen Jahren wird als alternatives autologes Augmentationsmaterial die Verwendung von Dentin, welches aus extrahierten Zähnen gewonnen wurde, beschrieben. Die wissenschaftliche Datenlage zeigt, dass autologes Dentin, aufgrund seiner strukturellen und chemischen Ähnlichkeit zu Knochen, ein geeignetes Augmentationsmaterial darstellt, mit dem sich dimensionsstabile Augmentationsergebnisse erreichen lassen. Die in der wissenschaftlichen Literatur beschriebenen Techniken zur lateralen Augmentation von Kieferkammdefekten mit autologem Dentin basieren vorwiegend auf der Verwendung von kompakten Augmentaten aus der gesamten Zahnwurzel. Das mit diesen Techniken zu erreichende Augmentationsvolumen ist durch die Breite der verwendeten Zahnwurzel jedoch limitiert. Die in der vorliegenden Arbeit beschriebene Tooth-Shell-Technique ermöglicht dagegen größere Augmentationsvolumina, da bei dieser Technik eine aus der Zahnwurzel gewonnene Dentinscheibe auf Distanz zum Kieferkammdefekt fixiert und der dadurch entstehende Hohlraum mit dem partikulierten Dentin der restlichen Zahnwurzel aufgefüllt wird.

Das Ziel der vorliegenden Untersuchung war der klinische Vergleich zweier Techniken zur Augmentation von transversalen Kieferkammdefiziten für die Aufnahme von dentalen Implantaten. Dabei sollte überprüft werden, ob sich mit einer Kieferkammaugmentation unter Verwendung einer autologen Dentinscheibe und partikuliertem Dentin (Tooth-Shell-Technique) Ergebnisse erreichen lassen, die hinsichtlich des Augmentations- und Implantaterfolges, dem Auftreten von postoperativen Komplikationen und den postoperativen

Beschwerden mit der Knochenschalentechnik nach Khoury (Bone-Shell-Technique) gleichwertig sind.

5.2. Methodenwahl

Für die Durchführung der vorliegenden Untersuchung wurde ein prospektives, randomisiert kontrolliertes Studiendesign gewählt. Um die Effektivität und die Sicherheit eines Behandlungsverfahrens zu evaluieren, sind randomisierte, kontrollierte klinische Studien der Goldstandard (HARITON, LOCASCIO, 2018). Durch die Randomisierung soll sichergestellt werden, dass potenzielle Störgrößen (Confounders) in den Untersuchungsgruppen gleichmäßig verteilt sind, d.h., dass Strukturgleichheit innerhalb der Gruppen vorliegt. Eine Zuteilung der Patienten zu den Studiengruppen, die nicht randomisiert, sondern durch eine Selektion erfolgt, birgt das Risiko einer Verzerrung der Studienergebnisse (selection bias), durch bewusste oder unbewusste gezielte Auswahl anhand bestimmter, möglicherweise ergebnisrelevanter Kriterien. Neben der Randomisierung kann eine Verblindung von Patienten zur Vermeidung von Verzerrungseffekten beitragen. Die Verblindung kann dabei doppelblind (Behandler und Proband), einfachblind (Behandler oder Proband) oder offen sein. Eine Verblindung ist vorteilhaft, wenn das Risiko besteht, dass durch die Kenntnis der Gruppenzuteilung das Verhalten oder die Wahrnehmung des Patienten oder des Behandlers beeinflusst und dadurch die Studienergebnisse verzerrt werden (performance bias). Bei der Erhebung von subjektiven Zielkriterien, wie z.B. in der vorliegenden Untersuchung zur Wahrnehmung von postoperativen Beschwerden, ist die Gefahr für Verzerrungseffekte, im Vergleich zur Erhebung von objektiven klinischen Parametern, erhöht. Eine Verblindung der Probanden war in der vorliegenden Untersuchung nicht möglich, da sich die beiden untersuchten Operationstechniken im klinischen Vorgehen zur Gewinnung des Augmentats für den Probanden wahrnehmbar unterscheiden.

5.3. Methodenkritik

5.3.1. Kritik an den statistischen Verfahren

Zur Bestimmung eines geeigneten Stichprobenumfangs wurde im Vorfeld eine Fallzahlplanung durchgeführt. Ziel der Fallzahlplanung ist es, den Stichprobenumfang so groß zu wählen, dass ein vorhandener Unterschied zwischen den untersuchten Parametern mit hoher Wahrscheinlichkeit als statistisch signifikant erkannt wird, aber nicht unnötig viele Patienten behandelt werden (KABISCH et al., 2011). In der vorliegenden Arbeit war der Hauptzielparameter die Resorption der transversalen Kieferkammbreite. Die erwartete

Effektgröße wurde anhand vorbekannter Resorptionsraten von autologen Knochenschalenaugmentationen nach Khoury (BARTOLS et al., 2018) und Zahnwurzelaugmentaten (SCHWARZ et al., 2018) abgeschätzt. Zum Zeitpunkt der Fallzahlplanung waren zur Augmentation transversaler Kieferkammdefizite mit blockförmigen Dentinaugmentaten, bis auf die oben genannte Studie von Schwarz et al., keine klinischen Daten verfügbar.

Bei der Schätzung der Effektgröße anhand vorbekannter Daten besteht immer die Gefahr einer Überschätzung des erwarteten Effekts, was im Zweifel eine zu geringe Fallzahl, um beobachtete Effekte statistisch signifikant nachzuweisen, mit sich bringen kann. Die in der vorliegenden Untersuchung ermittelten Werte hinsichtlich der Resorption zeigten in beiden Untersuchungsgruppen eine vergleichsweise große Streuung. Die Standardabweichungen waren teilweise deutlich größer als die Mittelwerte der Stichprobe. Bei einer großen Streuung der Ergebnisse kann es bei gleichbleibender Teststärke und Signifikanzniveau schwer sein, einen statistisch signifikanten Effekt nachzuweisen, und es besteht die Gefahr, einen Alphafehler zu begehen, d.h., dass die Nullhypothese abgelehnt wird, obwohl sie eigentlich wahr ist (RÖHRIG et al., 2010).

Die Erhebung von Parametern, die einen subjektiv wahrgenommenen Gesundheitszustand des Patienten wiedergeben, erfordern in der Regel aufgrund einer ausgeprägten interindividuellen Variabilität größere Fallzahlen, um vorhandene Effekte als statistisch signifikant erkennen zu können (JOHNSTON et al., 2013).

5.3.2. Kritik an der praktischen Durchführung

Die Verwendung einer dreidimensionalen Bildgebung im Sinne einer DVT-Aufnahme ist die einzige Möglichkeit, das Augmentat in seiner oro-vestibulären Dimension ohne chirurgischen Re-Entry abzubilden. DVT-Datensätze sind insgesamt sehr dimensionstreu und geben die dargestellten Strukturen mit ausreichender Genauigkeit in Originalgröße wieder (HORNER et al., 2013). Bei der radiologischen Auswertung besteht durch eine potenzielle Abweichung bei der Festlegung der Referenzebenen jedoch die Gefahr von Messfehlern. Um zu den unterschiedlichen Messzeitpunkten die Orientierung der Referenzebene reproduzieren zu können, wurde in der vorliegenden Untersuchung nach einer Ausrichtung an der Implantatachse und tangential zum Kieferkamm die horizontale Referenzebene auf dem Messlevel L2 durch einen Screenshot dokumentiert und die sagittale und frontale Referenzebene in den darauffolgenden Messungen anhand dieser Dokumentation ausgerichtet. Da zum

Messzeitpunkt direkt nach der Augmentation noch kein Implantat zur Orientierung vorhanden war, wurde, in der Annahme einer prospektiven Implantation in einer achsengerechten Orientierung und in der Mitte der Lücke, die oro-vestibuläre Referenzebene orthogonal zum Kieferkamm in der Mitte der Strecke zwischen den beiden benachbarten Zahnwurzeln positioniert und anhand der Achsen der Nachbarzähne ausgerichtet. Durch die arbiträre Orientierung der Referenzebenen anhand anatomischer Parameter zum Messzeitpunkt T1 und die Orientierung anhand des Implantatkörpers zu den Messzeitpunkten T2, T3 und T4 ist die Gefahr von Abweichungen hier am größten. Um eine bessere Reproduktion der Referenzebenen zu ermöglichen, wäre die Verwendung einer Orientierungsschablone mit radioopaken Markierungen überlegenswert. Dies ist technisch jedoch nur begrenzt durchführbar, da die Schablone durch die zwischenzeitliche Versorgung des Implantats mit einer Restauration nicht im gesamten Beobachtungszeitraum zur Anwendung gebracht werden kann.

Die radiologische Auswertung kann darüber hinaus auch durch das Auftreten von Artefakten beeinträchtigt werden. In der vorliegenden Untersuchung ist vor allem mit dem Auftreten von Aufhärtings- und Auslöschungsartefakten zu rechnen. Aufhärtingsartefakte entstehen durch die Absorption des energiearmen, langwelligen Anteils des polychromatischen Röntgenspektrums bei Durchtritt durch röntgendichte Materie, wie z.B. einem konventionellen Titanimplantat. Daraus resultiert eine „Aufhärtung“ der Strahlung, im Sinne einer Verschiebung zur energiereicheren, kurzwelligeren Strahlung. Der Detektor nimmt dadurch höhere Intensitäten wahr, was sich nach der Rekonstruktion des Volumens in der Aufnahme als dunkle Streifen darstellt. Durch diese Artefakte kann die Messung, gerade in Bereichen mit relativ dünnen Knochenschichten auf den Implantatoberflächen, erheblich beeinträchtigt werden (SCHULZE et al., 2010). DVT-Aufnahmen sind im Vergleich zu CT-Aufnahmen anfälliger für Aufhärtingsartefakte, da die verwendete Spannung im Vergleich niedriger ist und die Ausprägung der Aufhärtingsartefakte mit Zunahme der Energie abnimmt (SCARFE, FARMAN, 2008). Auslöschungsartefakte treten auf, wenn die Röntgenstrahlung durch stark röntgendichte Materie fast vollständig absorbiert wird, wodurch hinter dem absorbierenden Körper vom Detektor kein bzw. kaum ein Signal wahrgenommen werden kann. Daraus resultiert eine transluzente Zone in der direkten Umgebung der röntgendichten Materie. Die Interpretation der periimplantären Hartgewebe kann dadurch erheblich beeinträchtigt werden. Die auftretenden Artefakte können im Zweifel als periimplantärer Knochenabbau fehlgedeutet werden (PARSA et al., 2015; SCHULZE et al., 2010).

Bei der Bewertung der postoperativen Beschwerden wurde von den Patienten nicht zwischen Beschwerden in der Spender- und Empfängerregion differenziert. In der BST-Gruppe erfolgte die Entnahme des Knochens und die Augmentation zeitgleich, wodurch die Patienten die auftretenden Beschwerden sowohl in der Spender- als auch in der Empfängerregion bewerteten. In der TST-Gruppe bewerteten die Patienten zu diesem Zeitpunkt jedoch lediglich die Empfängerregion, da die Gewinnung des Augmentats bereits im Vorfeld im Rahmen der Zahntfernung erfolgt war. Konsequenterweise wäre eine Trennung zwischen der Empfänger- und Spenderregion sowie eine Bewertung der postoperativen Beschwerden durch die Zahntfernung in der TST-Gruppe sinnvoll gewesen, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleisten zu können. In dieser Untersuchung wurde die Gesamtheit der postoperativen Beschwerden als ausreichend erachtet.

Als primärer Endpunkt der Beobachtung wurde die klinische und radiologische Untersuchung ein Jahr nach dem augmentativen Eingriff definiert. Die Beobachtungszeit von einem Jahr ist ausreichend, um den primären Augmentationserfolg und das Auftreten von klinischen Komplikationen im Kontext der Augmentat- und der Implantateinheilung bewerten zu können. Sie ist jedoch nur begrenzt ausreichend, um die Langzeitstabilität des Augmentats und den langfristigen Implantaterfolg zu beurteilen.

5.4. Diskussion der Ergebnisse

Durch die Augmentation konnte in der vorliegenden Untersuchung sowohl mit der Bone-Shell-Technique als auch mit der Tooth-Shell-Technique in allen behandelten Fällen ein Kieferkamm geschaffen werden, der die Insertion eines adäquat dimensionierten, konventionellen Titanimplantats zuließ. Nach der Exposition des augmentierten Kieferkamms vor der Implantatinsertion stellte sich in beiden Gruppen gleichermaßen ein homogenes, knochenartiges, gut durchblutetes Hartgewebe dar. Die knochenartige Konsistenz und die homogene Struktur ohne makroskopisch erkennbares, residuelles Partikulat können als Integration des Augmentats und eine knöcherne Regeneration durch Remodelling interpretiert werden.

Das biologische Prinzip der Bone-Shell-Technique beruht auf der Kombination aus einer resorptionsstabilen Schale aus kortikalem Knochen, die auf Distanz zum Knochenlager fixiert wird, und einem Partikulat aus Kortikalis, mit dem der Spaltraum zwischen Schale und Knochenlager aufgefüllt wird. Das partikulierte Material bietet im Vergleich zu kompaktem kortikalem Knochen, wie er z.B. bei monokortikalen Onlayplastiken angewendet wird, gute

Voraussetzungen für eine Vaskularisation und die Migration von vitalen Knochenzellen in das Augmentat entlang einer Leitschiene.

Histologische Untersuchungen von Günzl und Khoury konnten zeigen, dass über 50% der Regeneration bei kortikalem Knochen aus dem retromolaren Unterkiefer auf osteokonduktive Vorgänge zurückzuführen ist (GÜNZL, KHOURY, 1993). Die Regenerationsfähigkeit durch Osteokonduktion korreliert dabei mit der freien Augmentatoberfläche. Das heißt, je mehr freie Augmentatoberfläche verfügbar ist, umso größer wird der Anteil der Osteokonduktion an der knöchernen Regeneration sein und umso schneller wird die Regeneration ablaufen. Bei der Bone-Shell-Technique wird diese Vergrößerung der Augmentatoberfläche durch das Partikulieren des kortikalen Knochens erreicht (KHOURY et al., 2010). In dem vorwiegend kortikalen Knochen aus dem retromolaren Unterkiefer sind im Vergleich zu kortikospongiösem Knochen, z.B. aus dem Beckenkamm, nur wenig Osteozyten bzw. Osteoblasten vorhanden, so dass das osteogenetische Potenzial von kortikalen Knochentransplantaten begrenzt ist und nur maximal 10-15% der knöchernen Regeneration ausmacht. Fraglich ist zudem, inwieweit die Osteozyten den Vorgang der Transplantatentnahme und der Partikulation überleben (KHOURY et al., 2010). Der restliche Anteil der Regeneration ist auf das osteoinduktive Potenzial von autologem Knochen zurückzuführen. Bei der Osteoinduktion differenzieren sich pluripotente Zellen, wie z.B. BMP, in der Transplantatumgebung unter dem Einfluss von osteoinduktiven Zytokinen aus dem Transplantat zu osteogenetisch aktiven Zellen, den Osteoblasten, die sich wiederum zu Osteozyten differenzieren können.

Das Prinzip der Tooth-Shell-Technique basiert auf der Annahme, dass autologes Dentin aufgrund seiner anorganischen und organischen Zusammensetzung dem Knochen so ähnlich ist, dass das biologische Prinzip der Bone-Shell-Technique darauf anwendbar ist. Für autologes Dentin konnten sowohl osteokonduktive als auch osteoinduktive Eigenschaften nachgewiesen werden, die mit autologem Knochen vergleichbar sind. Im Hinblick auf die osteokonduktiven Eigenschaften konnte gezeigt werden, dass Dentin in den knöchernen Remodellingprozess miteinbezogen und sukzessive durch Knochen ersetzt wird (ANDERSSON, 2010; ANDERSSON et al., 2009; BORMANN et al., 2012; CATANZARO-GUIMARÃES et al., 1986; QIN et al., 2014). Nach etwa 15 Wochen ist in Dentinaugmentaten histomorphometrisch eine Osteoneogenese mit parallelfaserigem Geflechtknochen im selben Ausmaß wie bei Knochenblocktransplantaten festzustellen (SCHWARZ et al., 2016a). Immunhistochemisch zeigt sich eine Osteocalcin-Antigen-Reaktivität als Zeichen für Mineralisierungsprozesse in ähnlichem Umfang wie bei Augmentaten aus autologem Knochen (BECKER et al., 2017).

Nach ca. 6 Monaten ist das Remodelling durch knöcherne Ersatzresorption so weit fortgeschritten, dass histologisch kein residuelles Dentin mehr nachweisbar ist (SHEJALI et al., 2020).

In der vorliegenden Untersuchung ergaben sich während des gesamten Beobachtungszeitraumes bei beiden Gruppen weder klinische noch technische Komplikationen. Eine retrospektive Untersuchung von Sakkas et al., bei der augmentative Maßnahmen unter der Verwendung von autologem Knochen von 279 Patienten ausgewertet wurden, stellte eine Inzidenz klinischer Komplikationen von ca. 21% fest. Am häufigsten traten mit 6,3% Dehiszenzen in der Empfängerregion auf, gefolgt von Infektionen der Spenderregionen mit 5,8% und Augmentatexpositionen in 5,5% der Fälle. In 4,4% der Fälle kam es zu einem vollständigen Verlust und in 1,3% zu einem partiellen Verlust des Augmentats. Knochenblocktransplantate aus dem Ramus der Mandibula zeigten dabei mit 6,7% Totalverlusten und 2% partiellen Verlusten eine geringfügig höhere Inzidenz. Die Definition einer Komplikation und die Einteilung in Früh- und Spät komplikationen entsprachen in etwa der Definition der vorliegenden Untersuchung, mit der Ausnahme, dass bei der Studie von Sakkas et al. das Auftreten einer Nachblutung bereits als Frühkomplikation gewertet wurde. Die in dieser Studie dokumentierten Nachblutungen waren mit 0,3% jedoch vernachlässigbar gering und erklären nicht den Unterschied zur vorliegenden Untersuchung. Ein entscheidender Unterschied besteht jedoch in der Tatsache, dass bei dieser retrospektiven Untersuchung Patientendaten aus der Routineversorgung ausgewertet wurden. In die Auswertung wurden dabei z.B. auch Daten von Patienten, die anamnestisch einen Nikotinkonsum angaben, einbezogen. Die Inzidenz klinischer Komplikationen war bei Rauchern mit 68,8% signifikant höher als bei Nichtrauchern, wo lediglich bei 7,5% eine klinische Komplikation auftrat (SAKKAS et al., 2017). In der vorliegenden Untersuchung wurden Raucher a priori gemäß den Ausschlusskriterien von der Teilnahme an der Studie ausgenommen.

Vergleicht man die Daten dieser retrospektiven Untersuchung mit Studien, die einen prospektiven Ansatz und definierte Ein- und Ausschlusskriterien zugrunde legten, so lassen sich deutlich weniger klinische Komplikationen feststellen. In einer prospektiven Untersuchung von Bartols et al., bei der die Definition von postoperativen Komplikationen und die Ein- und Ausschlusskriterien denjenigen der vorliegenden Untersuchung entsprachen, traten bei Augmentationen mittels autologer Knochenblocktransplantation nach Khoury nur in 7% der Fälle postoperative Komplikationen auf (BARTOLS et al., 2018).

Da die Verwendung von Dentin als alternatives autologes Knochenersatzmaterial ein relativ neues Forschungsfeld darstellt, ist die Datenlage hinsichtlich des Auftretens von klinischen Komplikationen nicht so umfangreich wie z.B. für autologe Knochenblocktransplantationen oder Knochenersatzmaterialien. Die Literatur war anfänglich von Fallberichten und tierexperimentellen Studien dominiert. In den letzten Jahren wurden jedoch vermehrt auch klinische Studien mit größeren Fallzahlen und prospektiven, kontrollierten Studiendesigns veröffentlicht, die insgesamt jedoch eine sehr heterogene Qualität aufweisen. Die am häufigsten untersuchte Indikation für den Einsatz von autologem Dentin als Knochenersatzmaterial ist die Versorgung von frischen Extraktionsalveolen mit partikuliertem Dentin im Sinne einer Socket preservation. Die klinischen Studien und Case series beobachteten bei allen Extraktionsalveolen, die mit partikuliertem autologem Dentin aufgefüllt wurden, eine unauffällige Heilung ohne klinische Komplikationen, unabhängig von der Art und Weise der Augmentataufbereitung. Das in den Untersuchungen verwendete Augmentationsmaterial wurde dabei direkt aus dem extrahierten Zahn gewonnen, dessen Alveole versorgt wurde, d.h., alle Zähne standen im Kontakt zum Mundhöhlenmilieu und waren potenziell kontaminiert. Das Zahnmaterial wurde dabei teilweise als natives Partikulat verwendet (VALDEC et al., 2017) oder lediglich mit Ethanol dekontaminiert (ELFANA et al., 2021; POHL et al., 2017). In den meisten Studien wurde jedoch ein Aufbereitungsprotokoll angewandt, das sowohl partielle Demineralisierung (z.B. mit Salzsäure, EDTA oder Milchsäure) sowie eine Dekontamination umfasste (CERVERA-MAILLO et al., 2021; DEL CANTO-DÍAZ et al., 2019; ELFANA et al., 2021; MINETTI et al., 2020; SANTOS et al., 2021). Ziel der partiellen Demineralisierung ist es, das Kollagenetzwerk zu exponieren und im Dentin enthaltene Wachstumsfaktoren freizugeben, wodurch das osteoinduktive Potenzial des Augmentationsmaterial verstärkt werden soll (KOGA et al., 2016; LI et al., 2011). In der Studie von Elfana et al. wurde der Einfluss der Demineralisierung auf die Regeneration untersucht. Dabei wurden zwei Aufbereitungsverfahren mit und ohne Demineralisierung verglichen. In der histologischen und histomorphometrischen Auswertung zeigten sich bei dem partiell demineralisierten Augmentationsmaterial mehr neu gebildetes Knochengewebe und weniger residuelle Augmentatpartikel im Vergleich zur Kontrollgruppe (ELFANA et al., 2021).

Eine Übersichtsarbeit von Gual-Vasqués evaluierte Methoden, die partikuliertes Dentin im Rahmen von Sinusbodenaugmentationen und GBR-Techniken verwendeten. Die mittlere Dehiszenzrate bei den GBR Techniken lag dabei bei 29,1% (GUAL-VAQUÉS et al., 2018).

Die hohe Komplikationsrate ist vergleichbar mit der in der Literatur beschriebenen Komplikationsrate für GBR-Techniken im Allgemeinen (KIM et al., 2014c; LIM et al., 2018).

Für die Anwendung blockförmiger autologer Dentinaugmentate wird in der Literatur über eine geringe Inzidenz klinischer Komplikationen berichtet. Schwarz et al. konnten für eine Technik, bei der eine Zahnwurzel als solider Block zur horizontalen Augmentation von lateralen Kieferkammdefekten verwendet wurde, eine unauffällige Wundheilung ohne Auftreten von Dehiszenzen oder Augmentatexpositionen aufzeigen. Es war lediglich in einem Fall in der Studiengruppe eine Exposition einer Osteosyntheseschraube, mit der das Augmentat auf dem Defekt fixiert wurde, zu verzeichnen. Es waren dabei keine Infektionszeichen am Augmentat feststellbar. Die Zähne, die bei dieser Untersuchung zur Augmentation verwendet wurden, waren Weisheitszähne, die teilweise oder vollständig retiniert bzw. impaktiert waren und keine Pathologien aufwiesen. Die Aufbereitung des Zahnes beschränkte sich hier auf die Dekapitierung des Zahnes auf der Höhe der Schmelz-Zement-Grenze und einer Anpassung der Zahnwurzel an die Defektmorphologie. Dabei wurden die Pulpa sowie das Parodontalligament und das Wurzelzement auf der defektabgewandten Seite belassen. Im defektzugewandten Aspekt der Zahnwurzel wurden das Parodontalligament und das Wurzelzement vollständig entfernt, um eine Ankylose des Wurzelsegments am ortständigen Knochen zu erreichen. Eine zusätzliche Aufbereitung im Sinne einer Demineralisierung oder Dekontamination wurde nicht durchgeführt (SCHWARZ et al., 2018). Eine weitere Studie von Schwarz et al. untersuchte kombiniert horizontale und vertikale Augmentationen, die mit der im Vorigen beschriebenen Technik erfolgten. Dabei traten in der Studiengruppe bei 28,5% der Augmentationen Komplikationen im Sinne von Weichgewebsdehiszenzen auf, während in der Kontrollgruppe (autologer monokortikaler Knochenblock) keine Komplikationen festzustellen waren (SCHWARZ et al., 2022).

Xiao et al. konnten für eine Schalenteknik mit Dentinpartikulat, die der in der vorliegenden Untersuchung verwendeten Tooth-Shell-Technique ähnlich ist, eine komplikationslose Wundheilung ohne das Auftreten von Dehiszenzen oder Wundheilungsstörungen aufzeigen. In zwei Fällen kam es während der Präparation des Implantatbetts zu einem Lösen der Dentinschale. Zur Gewinnung der Dentinschale und des Partikulats wurden ausschließlich impaktierte Weisheitszähne ohne Verbindung zum Mundhöhlenmilieu verwendet. Wie bei den Studien von Schwarz et al. wurde weder eine Demineralisierung noch eine Dekontamination des Dentins vorgenommen (XIAO et al., 2019).

Die ausschließliche Verwendung von retinierten bzw. impaktierten Zähnen schränkt das mögliche Einsatzspektrum für diese Techniken deutlich ein, da nur in wenigen klinischen Fällen derartige Zähne vorzufinden sind. Nicht erhaltungsfähige bzw. -würdige Zähne stehen jedoch sehr häufig zu Verfügung, vor allem, wenn der zu entfernende Zahn in der prospektiven Implantatregion noch vorhanden ist. In der vorliegenden Untersuchung wurden ausschließlich Zähne verwendet, die aufgrund einer Pathologie oder einer Fraktur nicht erhaltungsfähig waren. Die klinische Anwendbarkeit wird dadurch deutlich erweitert, jedoch stellt die Verwendung von potenziell kontaminierter Zahnschubstanz erhöhte Anforderungen an die Aufbereitung, insbesondere an die Dekontamination. Anfängliche Bedenken, dass die Verwendung von kompromittierten Zähnen mit einem erhöhten Risiko für das Auftreten von klinischen Komplikationen, im Speziellen von Infektionen des Augmentats, verbunden sein könnte, wurden durch die vorliegende Untersuchung nicht bestätigt. In retrospektiven Untersuchungen unserer Arbeitsgruppe konnte gezeigt werden, dass bei Augmentationen nach dem Konzept der Tooth-Shell-Technique, bei denen das Augmentat aus endodontisch behandelten oder parodontal kompromittierten Zähnen gewonnen wurde, keine erhöhte Inzidenz für das Auftreten klinischer Komplikationen vorliegt (KORSCH, PEICHL, 2021; KORSCH et al., 2022).

In der vorliegenden Untersuchung wurde zur Aufbereitung des Dentins ein kommerziell verfügbares Verfahren verwendet. Dieses beinhaltet eine partielle Demineralisierung des Dentins mit 10%-iger EDTA-Lösung und eine Dekontamination mit einer Lösung aus 0,5 molarem Natriumhydroxid und 20%-igem Ethanol. Ziel der Aufbereitung ist es, durch eine partielle Demineralisierung das osteoinduktive Potenzial der Dentinmatrix zu verstärken und durch eine Dekontamination vor allem Bakterien und Proteine, die adverse Effekte mit sich bringen können, wie z.B. bakterielle Endotoxine, zu eliminieren, ohne dass das biologische Potenzial des Dentins negativ beeinflusst wird.

EDTA ist als Chelator, der divalente Ionen, wie z.B. Calciumionen, komplexiert, in der Lage, Hydroxylapatitstrukturen in Dentin anzulösen (GANDOLFI et al., 2018). Dadurch wird die organische Matrix des Dentins exponiert, wodurch die Anhaftung von Zellen, insbesondere von Osteoblasten, erleichtert wird (KOGA et al., 2016). Durch die Demineralisierung werden zudem im Dentin konservierte osteoinduktive Wachstumsfaktoren und Zytokine, wie z.B. BMPs, freigesetzt (LI et al., 2011). Gandolfi et al. konnten für lange Einwirkzeiten und höhere Konzentrationen an EDTA jedoch auch strukturelle Veränderungen an der Kollagenstruktur

nachweisen, die sich möglicherweise negativ auf die Eigenschaften des Dentins auswirken können (GANDOLFI et al., 2018).

Während für die Wirkung von EDTA und Ethanol auf Dentinstrukturen eine gute Datenlage zur Verfügung steht, da diese in der Endodontie standardmäßig eingesetzt werden, ist für die Wirkung von Natriumhydroxid auf Dentin nahezu keine wissenschaftliche Evidenz vorhanden.

Natriumhydroxid wirkt durch basische Hydrolyse stark denaturierend auf Proteine (BLOCK, 2001) und ist dadurch in der Lage, Bakterien (MCCULLOCH, 1933) und deren Endotoxine, wie z.B. Lipopolysaccharide, zu deaktivieren (NETER et al., 1956; NIWA et al., 1969). In einer in-vitro-Untersuchung von Calvo-Guidardo et al. zeigte sich ein bakterizider Effekt einer 0,5 molaren Natriumhydroxid-Lösung mit 20%igem Ethanol auf *Escherichia coli*, *Enterococcus faecalis* und *Porphyromonas gingivalis* in Dentinpräparaten (CALVO-GUIRADO et al., 2021). Es ist jedoch nicht abschließend geklärt, inwieweit durch die Einwirkung von Natriumhydroxid auch osteoinduktiv wirksame Wachstumsfaktoren und Zytokine oder Strukturproteine der organischen Matrix durch eine mögliche Desintegration von Proteinen in ihrer Funktionalität beeinträchtigt werden.

Als eine Alternative zur chemischen Dekontamination von autologem Dentin wird in der Literatur die Sterilisation durch Autoklavieren beschrieben. Schwarz et al. untersuchten im Tierexperiment den Effekt des Autoklaviervorgangs auf Dentinaugmentate. Das Verfahren erwies sich als praktikabel und sicher in Bezug auf das Auftreten von Komplikationen, jedoch war der mittlere Knochen-Implantat-Kontakt bei den autoklavierten Dentinaugmentaten, vor allem im vestibulären Aspekt, signifikant geringer als bei unbehandelten Augmentaten (SCHWARZ et al., 2019b). Ein suffizienter Knochen-Implantat-Kontakt durch die Apposition von neuem Knochen und einem Remodelling am Knochen-Implantat-Interface ist eine wichtige Grundbedingung für die Osseointegration eines Implantats im periimplantären Knochen. Ziel der Aufbereitung sollte es daher sein, eine ausreichende Dekontamination des Dentins sicherzustellen, um Infektionen des Augmentats zu verhindern. Eine strukturelle Veränderung des Dentins, die die Regenerationsfähigkeit des Augmentats und die Osseointegration behindert, sollte jedoch vermieden werden.

Bis heute ist jedoch kein diagnostisches Verfahren beschrieben worden, welches in der Lage ist, noninvasiv die Osseointegration eines Implantats nachzuweisen. In der Annahme, dass sich das Ausmaß der Osseointegration durch eine Bestimmung der Dämpfungskapazität und der Biegefestigkeit des Implantats als Funktion der Steifigkeit durch den Knochen-Implantat-

Kontakt quantifizieren lässt, wurde von Sennerby und Meredith die Resonanzfrequenzanalyse eingeführt und der damit ermittelte ISQ-Wert als Surrogatparameter für Osseointegration vorgeschlagen (MEREDITH et al., 1996; SENNERBY, MEREDITH, 1998). Histomorphometrische Untersuchungen von Scarano et al., in denen ein signifikanter Zusammenhang zwischen dem gemessenen ISQ und dem Knochen-Implantat-Kontakt nachgewiesen werden konnte, unterstützen diese Annahme (SCARANO et al., 2006). Andere Studien hingegen konnten die Beobachtung nicht bestätigen, sondern stellten lediglich einen linearen Zusammenhang zwischen dem ISQ und der Steifigkeit des umgebenden Knochens fest, bedingt durch den Anteil an kortikalem Knochen, vor allem im krestalen Bereich (SENNERBY et al., 2012; TANAKA et al., 2018). Die RFA findet daher vor allem zur Bestimmung der mechanischen Stabilität eines Implantats (Primärstabilität), aber auch der biologischen Stabilität (Sekundärstabilität), Verwendung und hat sich hierfür als sehr sensitiv und spezifisch erwiesen (SENNERBY, 2013). Der Vorteil der RFA ist die klinische Anwendbarkeit, da die Methode im Gegensatz zu anderen in der Literatur beschriebenen Methoden, wie z.B. Ausdrehtests, histomorphometrischen Analysen (SENNERBY et al., 1992) oder push-in/pull-out-Methoden (SEONG et al., 2013), non-invasiv ist. Andere non-invasive Verfahren, wie z.B. der Periotest, erwiesen sich hinsichtlich Sensitivität und Spezifität als nicht ausreichend, um die Implantatstabilität zuverlässig bestimmen zu können (ANDREOTTI et al., 2017).

Eine essenzielle Grundbedingung für eine suffiziente Sekundärstabilität und eine erfolgreiche Osseointegration ist eine ausreichende Primärstabilität des Implantats, die eine mechanische Ruhe für eine ungestörte Einheilung gewährleistet. Bei Bewegungen des Implantats, die über minimale Mikrobewegungen hinausgehen, kommt es nicht zu einem knöchernen Remodelling und zur Apposition von neuem Knochen auf der Implantatoberfläche, sondern zur Ausbildung einer fibrösen Abscheidung (BRUNSKI, 1993).

Neben der RFA wird die Bestimmung des maximalen Drehmoments bei der Implantatinserterion als eine valide Methode zur Beurteilung der Primärstabilität beschrieben (TURKYILMAZ, 2006). Beide Verfahren wurden in der vorliegenden Untersuchung zur Bestimmung der Primärstabilität angewendet.

Das mittlere maximale Eindrehmoment bei der Implantatinserterion war mit $12,7 \pm 9,45$ Ncm im Vergleich mit Daten aus der Literatur eher niedrig. In einer Übersichtsarbeit von Monje et al. wird über mittlere maximale Eindrehmomente von ca. 35 Ncm berichtet (MONJE et al., 2019b).

Das mittlere Einbringdrehmoment in der BST-Gruppe war mit $14,6 \pm 11,65$ Ncm etwas größer als in der TST-Gruppe mit $10,8 \pm 6,7$ Ncm.

In der Resonanzfrequenzanalyse waren in der BST-Gruppe mit $63,1 \pm 9,6$ und in der TST-Gruppe mit $57,7 \pm 12,9$ ISQ-Werte festzustellen, die mit den Werten in der Literatur vergleichbar sind. So konnten Rasmusson et al. für Implantate, die in einem zweizeitigen Vorgehen in Regionen inseriert wurden, die mit einem monokortikalen Knochenblock augmentiert worden waren, mittlere ISQ-Werte von $60,7 \pm 6,1$ nach Implantation dokumentieren. Die Werte unterschieden sich dabei nicht von GBR-Techniken ($62,8 \pm 4,9$) oder Sinusbodenaugmentationen ($61,1 \pm 5,5$) unter Verwendung von autologem Knochen. Es war ebenso kein Unterschied zu Implantationen in nichtaugmentierte Regionen festzustellen ($62,3 \pm 5,1$) (RASMUSSON et al., 2012). Sjöström et al. und Degidi et al. dokumentierten ähnliche Ergebnisse (DEGIDI et al., 2013; SJÖSTRÖM et al., 2005).

Die Studienlage zu Augmentationen mit autologem Dentin, bei denen eine Resonanzfrequenzanalyse zur Bestimmung der Implantatstabilität eingesetzt wurde, ist begrenzt. Lee et al. und Minetti et al. konnten in Studien, in der GBR-Techniken mit und ohne Membran unter der Verwendung von partiell demineralisiertem autologem Dentinpartikulat untersucht wurden, primäre ISQ-Werte von $63,64 \pm 11,81$ bzw. $69,8 \pm 3,87$ für die GBR mit Membran und $65,53 \pm 8,14$ bzw. $62,1 \pm 4,22$ für die GBR ohne Membran feststellen (LEE et al., 2013; MINETTI et al., 2022). Die ISQ-Werte für Sinusbodenaugmentationen mit partiell demineralisiertem autologem Dentinpartikulat waren mit $64,92$ ebenso vergleichbar (JUN et al., 2014).

In der vorliegenden Untersuchung zeigte sich eine statistisch signifikante Zunahme der Implantatstabilität zwischen der Implantation und der Freilegung um im Mittel $15,2 \pm 11,7$ ISQ-Skalenpunkte. Vergleicht man die in der vorliegenden Untersuchung festgestellte Zunahme des ISQ mit anderen Studien, so fällt auf, dass diese verhältnismäßig stark ausgeprägt ist. In den bereits erwähnten Untersuchungen von Rasmusson et al., Sjöström et al. und Degidi et al. konnte für Knochenaugmentate keine signifikante Zunahme des ISQ zwischen der Implantation und zum Zeitpunkt der Versorgung nach 6 Monaten festgestellt werden (DEGIDI et al., 2013; RASMUSSON et al., 2012; SJÖSTRÖM et al., 2005). In einer Studie von Karl et al. konnte eine signifikant positive Veränderung des ISQ nach der Einheilphase nachgewiesen werden. Diese lag jedoch mit ca. 4 ISQ-Skalenpunkten deutlich unter den Werten, die sich in der vorliegenden Untersuchung zeigten (KARL et al., 2008). Im Kontrast dazu konnten Lee et al.

für autologes Dentinpartikulat, welches in einer GBR-Technik mit und ohne Membran angewendet wurde, eine deutliche Zunahme des ISQ-Wertes nachweisen. Die mittlere Zunahme war mit 14,7 ISQ-Skalenpunkten für die GBR mit Membran bzw. 10,6 ISQ-Skalenpunkten für die GBR ohne Membran mit den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung vergleichbar (LEE et al., 2013). In der Studie von Minetti et al. konnte für die gleiche Augmentationstechnik lediglich eine geringfügige mittlere Zunahme von 2,5 bzw. 3,8 ISQ-Skalenpunkten dokumentiert werden (MINETTI et al., 2022).

In ihrer Übersichtsarbeit konnten Sennerby und Meredith darstellen, dass sich die Veränderung des ISQ-Wertes von der Primärstabilität zur Sekundärstabilität reziprok zur Qualität des Knochens verhält. Implantate, die in Knochen der Qualitäten D1 und D2 inseriert wurden, zeigten hohe mittlere ISQ-Werte von 81 bzw. 76. Die Werte fielen bis zur prothetischen Versorgung nach 8 Monaten auf mittlere ISQ-Werte von 78 bzw. 75 ab und waren 20 Monaten nach der Implantation bei 76 bzw. 77. Die Abnahme der ISQ-Werte ist dabei auf ein Remodelling des kortikalen Knochens im krestalen Aspekt und der damit verbundenen Abnahme der Steifigkeit zurückzuführen. Knochen der Qualität D3 und D4 zeigten dagegen einen signifikanten Anstieg der ISQ-Werte. Die mittleren ISQ-Werte nach der Implantation für Knochen der Qualität D4 beispielweise lagen in dieser Untersuchung bei 61 und zeigten einen Anstieg auf 68 bei der prothetischen Versorgung sowie auf 76 bei der Kontrolle 20 Monate nach Implantation. Die Zunahme der Stabilität wird als ein Remodelling mit einer Zunahme des Knochen-Implantat-Kontakts interpretiert (SENNERBY, MEREDITH, 2008). Die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Augmentationstechniken, die auf einer autologen Schalenteknik und partikuliertem Material basieren, zeigen dabei ähnliche mechanische Eigenschaften wie Knochen der Qualität D3 und D4, wie er z.B. im posterioren Oberkiefer oder bei kortikospongiosen Transplantaten aus dem Beckenkamm vorzufinden ist. Die zu erreichende mechanische Stabilität ist im Vergleich zu Knochen der Qualitäten D1 und D2 bzw. zu monokortikalen Augmentaten niedrig. Das Regenerationspotenzial erscheint, gemessen an der umfangreichen Zunahme der Stabilität hin zur biomechanischen Stabilität (Sekundärstabilität), ähnlich günstig zu sein wie für Knochen der Qualitäten D3 und D4 oder für spongiöse Augmentate. Dabei scheint kein Unterschied zwischen autologem Knochen und Dentin zu bestehen. Selbst bei kompakten Dentinaugmentaten ist ein periimplantäres Remodelling zu beobachten, das mit dem Remodelling im Knochen vergleichbar ist. Histologische Untersuchungen von Schwarz et al. konnten im Tiermodell bei Dentinaugmentaten bereits 3 Wochen nach der Implantatinsertion einen mittleren Knochen-

Implantat-Kontakt zwischen 36,9 und 50,4%, feststellen. Im Vergleich dazu zeigte sich bei monokortikalen Knochenblockaugmentaten ein mittlerer Knochen-Implantat-Kontakt von 32,5-64,1% (SCHWARZ et al., 2016a). Untersuchungen von Becker et al. konnten mittels immunhistochemischer Verfahren im Kontaktbereich zur Implantatoberfläche eine erhöhte Osteocalcin-Antigen-Reaktivität als Zeichen für Mineralisierungsprozesse im Rahmen eines Remodellings dokumentieren. Hohe mittlere Ausdrehmomente von 62 Ncm in Dentinaugmentaten gegenüber 44 Ncm in Knochenblockaugmentaten unterstützen diese Annahme (BECKER et al., 2017).

Bei der klinischen Untersuchung ein Jahr nach der Augmentation stellten sich alle Implantate klinisch unauffällig dar. Es waren an keinem Implantat makroskopisch erkennbare Entzündungszeichen der periimplantären Weichgewebe im Sinne einer Schwellung, Rötung oder Suppuration auf Fingerbeerendruck festzustellen. An allen Implantaten war eine ausreichende Manschette an keratinisierter Mukosa vorhanden. Ein Fehlen von befestigter Mukosa um Implantatstrukturen wird in der Literatur als möglicher Risikofaktor für Implantatmisserfolge diskutiert. Es konnte jedoch bisher kein Zusammenhang zwischen einem Fehlen keratinisierter periimplantärer Mukosa und erhöhten Implantatverlusten nachgewiesen werden. Es existieren allerdings Hinweise, dass die vertikale Lage des periimplantären Weichgewebes bei einer keratinisierten Weichgewebsmanschette stabiler ist als bei einer Manschette aus beweglicher, auskleidender Alveolarmukosa (BÜHLER-FREY, BURKHARDT, 2008). Dies ist gerade in der ästhetischen Zone des anterioren Oberkiefers von besonderer Bedeutung. Die Sondierung der periimplantären Weichgewebe zeigte unauffällige periimplantäre Sondertiefen zwischen 1 und 4 mm. Bei 35% der Implantate (n= 7) stellte sich eine Blutung auf die Sondierung hin dar. Ein Bluten auf Sondierung gilt in der Literatur als Schlüsselparameter für das Vorliegen einer periimplantären Mukositis (LANG, BERGLUNDH, 2011). Die in der vorliegenden Untersuchung festgestellte Häufigkeit deckt sich mit der Prävalenz an periimplantärer Mukositis, die in der Literatur beschrieben wird. So konnten Schwarz et al. in einer Querschnittsuntersuchung mit 512 Implantaten nach einer medianen Beobachtungszeit von 23 Monaten eine mittlere Prävalenz periimplantärer Mukositis von 35,6% aufzeigen (SCHWARZ et al., 2017).

Betrachtet man in der vorliegenden Untersuchung die Prävalenz periimplantärer Mukositis hinsichtlich der Augmentationstechnik, so besteht sich zwischen der BST-Gruppe (n=3) und der TST-Gruppe (n=4) kein signifikanter Unterschied. In Untersuchungen von Schwarz et al. zeigte nahezu die Hälfte der Zahnwurzelaugmentate nach dem Beobachtungszeitraum von

26 Wochen Zeichen einer periimplantären Mukositis im Sinne von einem Bluten auf Sondieren, während dies bei autologen Knochenblockaugmentaten nur bei einem Fünftel der Fälle festzustellen war (SCHWARZ et al., 2019a).

Groß et al. untersuchten, inwieweit sich die Mikrobiologie des periimplantären Gewebes bei Dentinaugmentaten und Knochenaugmentaten unterscheidet und ob dies einen Einfluss auf das Auftreten von periimplantären Entzündungen hat. Hinsichtlich des Ausmaßes an bakterieller Besiedlung war kein Unterschied zwischen Dentin- und Knochenaugmentaten festzustellen. Implantate, bei denen eine Augmentation mit Dentin stattfand, wiesen jedoch gegenüber Augmentationen mit autologem Knochen erhöhte Werte an *Mycoplasma salivarium* auf. In Fällen, bei denen neben *M. salivarium* auch *Tannerella forsythia* in der periimplantären Flora nachweisbar war, wurden häufiger erhöhte Sondiertiefen festgestellt. Es konnte in dieser Studie jedoch kein Zusammenhang zwischen BoP als Marker für eine periimplantäre Mukositis und dem Vorliegen erhöhter Sondiertiefen sowie der Anwesenheit von *M. salivarium* oder *T. forsythia* alleine bzw. dem gemeinsamen Nachweis von beiden Spezies aufgezeigt werden (GROß et al., 2022).

In der wissenschaftlichen Literatur werden zahlreiche Methoden zur Ermittlung postoperativer Beschwerden und Einschränkungen beschrieben (FERREIRA-VALENTE et al., 2011; HAWKER et al., 2011). Während körperlich feststellbare Beeinträchtigungen wie Schwellung oder Funktionseinschränkung klinisch messbar sind, kann Schmerz als subjektive Empfindung nicht gemessen werden und muss vom Patienten berichtet werden (patient reported outcome measures, PROM). Zu den bekanntesten Methoden, die der Erfassung postoperativer Schmerzen dienen, gehören die visuelle Analogskala (VAS), die numerische Rating-Skala (NRS) oder die verbale Rating-Skala (VRS). In der vorliegenden Untersuchung wurden anhand visueller Analogskalen sowohl das Ausmaß der postoperativen Schmerzen als auch der postoperativen Schwellung über einen Zeitraum von 28 Tagen nach dem Eingriff dokumentiert. Eine Differenzierung zwischen Spender- und Empfängerregion wurde dabei von den Patienten nicht vorgenommen. In der wissenschaftlichen Literatur sind nur wenige Studien zu identifizieren, bei denen im Rahmen von augmentativen Eingriffen eine Messung von postoperativen Schmerzen oder Schwellungen durchgeführt wurde. Die meisten Studien untersuchten vorwiegend die postoperativen Einschränkungen alleine in Bezug auf die Spenderregion zur Entnahme von autologen Knochentransplantaten (ANDERSSON, 2008; BARONE et al., 2011; GELLRICH et al., 2013; NKENKE et al., 2004) und nur selten auf die augmentierte Region (KORSCH et al., 2014; THOMA et al., 2018).

Bis auf einen Patienten aus der BST-Gruppe, der mit 71 einen starken Schmerz angab, lagen alle anderen Patienten unter 20, was gemäß der Einteilung der deutschen Schmerzgesellschaft als leichter Schmerz zu beurteilen ist. Die Schmerzen wurden von den Patienten aus der BST-Gruppe dabei im Mittel stärker empfunden als in der TST-Gruppe. Der Unterschied war jedoch statistisch nicht signifikant. Am ersten postoperativen Tag waren die Schmerzen bei beiden Gruppen am größten mit einem medianen VAS-Wert von 8 in der BST-Gruppe und einem medianen VAS-Wert von 4 in der TST-Gruppe. Nach 7 Tagen wurde in beiden Gruppen kein Schmerz mehr festgestellt. In einer Untersuchung von Korsch et al., bei der das gleiche Befragungsschema wie in der vorliegenden Untersuchung angewendet wurde, gaben Patienten nach einer Augmentation nach dem Konzept der Bone-Shell-Technique in der Empfängerregion vergleichbare Werte an. Die Abnahme der Schmerzen zeigte in dieser Untersuchung einen ähnlichen zeitlichen Verlauf (KORSCH et al., 2014).

Es konnten nur zwei Studien identifiziert werden, die das Auftreten postoperativer Beschwerden nach Augmentationen mit autologem Dentin untersucht haben. In einer Studie von Wang et al. wird bei 26,3% der Patienten über starke postoperative Schmerzen nach GBR mit autologem Dentin berichtet (WANG et al., 2022). Unklar ist bei dieser Studie jedoch, wie „starker Schmerz“ definiert und mit welcher Methodik dieser bestimmt wurde. Santos et al. berichteten, dass nach Socket preservation mit autologem Dentin die postoperativen Schmerzen signifikant geringer waren als in der Kontrollgruppe, in der die Socket preservation mit einem xenogenen KEM durchgeführt wurde. Die Beschwerden wurden in dieser Untersuchung mit einer VAS ermittelt. Es wurden von den Autoren jedoch keine VAS-Werte im Manuskript wiedergegeben (SANTOS et al., 2021).

Das Ausmaß der postoperativen Schwellung wurde von den Patienten in der vorliegenden Untersuchung schwerwiegender wahrgenommen als die postoperativen Schmerzen. Die berichtete Schwellung war dabei in der TST-Gruppe größer als in der BST-Gruppe. In der TST-Gruppe war die Schwellung am ersten postoperativen Tag mit einem medianen VAS-Wert von 52 am stärksten. Danach zeigte sich eine kontinuierliche Abnahme der Schwellung. In der BST-Gruppe wurde dagegen am dritten postoperativen Tag das größte Ausmaß an Schwellung mit einem medianen VAS-Wert von 40 übermittelt. Nach einer Woche gaben die Patienten aus der TST-Gruppe eine signifikant größere mediane Schwellung an als die Patienten der BST-Gruppe. Die von der BST-Gruppe dokumentierte Schwellung deckt sich in Ausmaß und Verlauf mit Daten aus der Literatur. So konnten Korsch et al. für Augmentationen mit autologem Knochen nach dem Konzept der Bone-Shell-Technique in der Empfängerregion ein

Schwellungsmaximum am dritten postoperativen Tag mit einem mittleren VAS-Wert von 46,7 feststellen.

Das Ausmaß postoperativer Beschwerden, insbesondere von postoperativer Schwellung, wird vorrangig durch den Umfang und der Art der Weichgewebsmanipulation, wie z.B. Schlitzung des Periosts an der Lappenbasis, beeinflusst (ESPOSITO et al., 2012). Der mittlere Zuwachs an Kieferkammbreite durch die Augmentation war in beiden Gruppen gleich (BST: 6,8mm; TST: 6,9mm), wodurch in beiden Gruppen von einem vergleichbaren Weichgewebstrauma ausgegangen werden kann. Die Freisetzung proinflammatorischer Mediatoren, wie z.B. Leukotriene oder Prostaglandine, führen durch eine erhöhte Gefäßdilatation und Kapillarpermeabilität zur Ödembildung, zur Migration von Leukozyten und Makrophagen in das OP-Gebiet und zu einer erhöhten Schmerzempfindlichkeit (JAIN, MARIA, 2011). Die Symptome können dabei interindividuell deutlich unterschiedlich ausgeprägt sein (KIM et al., 2009). Die Anwendung von nicht-steroidalen Antiphlogistika kann durch eine Hemmung der Prostaglandinsynthese neben der analgetischen Wirkung auch die Ausbildung eines postoperativen Ödems begrenzen (BAMGBOSE et al., 2005). Die Patienten haben als standardisierte Bedarfsmedikation 400mg Ibuprofen, das zu den nicht-steroidalen Antiphlogistika gezählt wird, eingenommen. Die mittlere kumulative Analgetikaeinnahme war in der TST-Gruppe mit 4,5 Tabletten etwas höher als bei der BST-Gruppe mit 2,8 Tabletten. Die postoperativen Analgetikadosierungen beider Gruppen zeigten keinen signifikanten Unterschied, weder in Bezug auf die kumulative Dosis noch auf die Tagesdosis. Die mittlere kumulative Analgetikaeinnahme war im Verhältnis zu vergleichbaren dento-alveolären Eingriffen, wie z.B. die Entfernung von unteren Weisheitszähnen, deutlich geringer (GOSWAMI et al., 2018). Die Anwendung von physikalischen Maßnahmen, wie die lokale Applikation von Kälte, kann durch eine Vasokonstriktion und einen verringerten Gewebsmetabolismus die Ausbildung eines postoperativen Ödems und die Stärke postoperativer Schmerzen ebenfalls signifikant reduzieren (VAN DER WESTHUIJZEN et al., 2005). Die Anwendung von Kälte wurde nicht als standardisierte postoperative Maßnahme angeordnet. Es stand jedem Patienten frei, bei Bedarf Kälte zur Linderung der Beschwerden anzuwenden. Die Anwendung wurde nicht dokumentiert.

Neben der physiologischen Ausprägung von postoperativen Beschwerden unterliegt auch deren Wahrnehmung einer großen interindividuellen Variabilität und wird von einer Vielzahl an Faktoren beeinflusst. Durch die Art, Umfang und Dauer des operativen Eingriffs allein lässt

sich das Ausmaß der postoperativen Beschwerden daher nicht vorhersagen (GERBERSHAGEN et al., 2013).

Die Dimensionsveränderungen des augmentierten Kieferkammes wurden in der vorliegenden Untersuchung mittels radiologischer Methoden evaluiert. Anhand einer konventionellen, zweidimensionalen Bildgebung, wie sie in der klinischen Routine und auch in vielen implantologischen Studien verwendet wird, kann nur das vertikale Knochenniveau in Relation zur Implantatschulter bewertet werden. Es kann jedoch keine Aussage über die Veränderung des augmentierten Kieferkammes in oro-vestibulärer Dimension getroffen werden. Da die vorliegende Untersuchung der Evaluation zweier Techniken zur Augmentation transversaler Kieferkammdefizite diente, war die Darstellung dieser Dimension von besonderer Bedeutung. Zur Beurteilung des periimplantären Knochens und des Augmentationserfolges in transversaler Dimension hat sich die dreidimensionale Bildgebung im Sinne einer digitalen Volumentomographie als geeignet erwiesen (BENIC et al., 2017; JUNG et al., 2015; NAITOH et al., 2010). In der vorliegenden Untersuchung wurde nach dem augmentativen Eingriff, nach der Implantation, nach der Freilegung des Implantats und ein Jahr nach der Augmentation eine DVT zur Beurteilung der Kieferkammbreiten und der Resorption angefertigt.

Die mittlere Resorption zwischen der Augmentation und der 1-Jahres-Kontrolle betrug auf dem Messlevel L2 1,2 mm und auf dem Messlevel L4 0,95 mm der Gesamtbreite, wobei in der BST-Gruppe mit 1,42 mm auf Höhe L2 und 0,87 mm auf Höhe L4 eine geringfügig größere Resorption festzustellen war als in der TST-Gruppe mit 0,98 mm bzw. 1,03 mm. Dies entsprach einer relativen mittleren Resorptionsrate von ca. 17% auf Höhe L2 bzw. ca. 10% auf Höhe L4 in der BST-Gruppe und ca. 11% auf Höhe L2 bzw. ca. 10% auf Höhe L4 in der TST-Gruppe.

Für die Khoury-Technik sind in der Literatur nur begrenzt Daten hinsichtlich der Resorption zu finden. In einem systematischen Review von Sánchez-Sánchez konnten in der Literaturrecherche nur zwei Studien identifiziert werden, die die Resorption nach horizontaler Kieferkammaugmentation mit der Knochenschalentechnik nach Khoury evaluiert haben (SÁNCHEZ-SÁNCHEZ et al., 2021). Die mittlere Resorption nach einem Jahr war mit 2,33 mm Resorption der Gesamtbreite bzw. 26% relativer Resorption höher als in der vorliegenden Untersuchung.

Die Resorption der bukkalen Lamelle auf Höhe L2 und L4 von jeweils 1 mm zwischen dem Implantationszeitpunkt und der Jahreskontrolle entspricht ca. 45% bzw. 43% Resorption. In der vorliegenden Untersuchung fällt dies mit 0,65 mm auf Höhe L2 und 0,6 mm auf Höhe L4,

gleichbedeutend mit etwa 34% bzw. 27% Resorption, ebenso geringer aus. Dabei fanden in der BST-Gruppe über 90% der Resorption im krestalen Aspekt, sprich, auf Höhe L2, zwischen dem Zeitpunkt der Augmentation und der Freilegung statt. Zwischen der Freilegung und der Jahreskontrolle ist dagegen nur noch eine geringfügige Resorption festzustellen. In der TST-Gruppe ist dagegen zwischen der Augmentation und der Implantation keine Resorption zu bemerken. Diese zeigt sich erst ab dem Zeitpunkt der Implantation.

Für Zahnwurzelaugmentate konnten Schwarz et al. eine mittlere Resorption der transversalen Kieferkambbreite 6 Monate nach Augmentation von $0,13 \pm 0,97$ mm feststellen (SCHWARZ et al., 2018). In dieser Studie fand die Implantation erst nach 26 Wochen statt, das heißt, der klinische Endpunkt entsprach dem Zeitpunkt der Implantation. In der vorliegenden Untersuchung hingegen wurde die Implantation bereits nach 3 Monaten durchgeführt und nach 6 Monaten das Implantat freigelegt. Für diesen Zeitpunkt kann für die TST-Gruppe eine vergleichsweise größere Resorption der transversalen Kieferkambbreite von $0,40 \pm 0,55$ mm festgestellt werden. Die Tatsache, dass zwischen dem Zeitpunkt der Augmentation und der Implantation in der TST- Gruppe keine Resorption festgestellt werden kann, wirft die Frage auf, inwieweit die Implantation die Resorption beeinflusst.

Die erhöhte Resorptionsrate für Dentinaugmentate nach dem TST-Konzept gegenüber dem Vorgehen, das von Schwarz et. al beschrieben wurde, ist möglicherweise auch dadurch zu begründen, dass durch die Präparation einer Scheibe aus dem Wurzelzement und der Entfernung des Wurzelzements eine Augmentatoberfläche aus Dentin entsteht, die dem Weichgewebe zugewandt ist und von dessen Periost bedeckt wird. Das Periost ist ein spezialisiertes Bindegewebe, das in seiner inneren Schicht, dem Stratum osteogenicum, ein umfangreiches Reservoir osteoblastischer Zellen enthält, die beim appositionellen Knochenwachstum, aber auch beim knöchernen Remodelling, z.B. im Rahmen von Heilungsprozessen, beteiligt sind (ALLEN et al., 2004; DIAZ-FLORES et al., 1992). Untersuchungen von Wedenberg et al. konnten im Tierversuch zeigen, dass auch Dentinstrukturen in das periostale Knochenremodelling involviert sind (WEDENBERG et al., 1987). Verbleibt jedoch eine intakte Schicht aus Wurzelzement und Parodontalligament auf der weichgewebszugewandten Seite auf dem Augmentat, bildet sich eine Bindegewebsschicht, während bei der Entfernung von Wurzelzement und Parodontalligament eine Ersatzresorption zu beobachten ist (KARRING et al., 1980; NYMAN et al., 1980). Bei der von Schwarz beschriebenen Technik wird aus diesen Gründen nur auf der Seite, die dem Augmentatlager zugewandt ist, das Wurzelzement und Parodontalligament entfernt. Durch den flächigen Kontakt des Augmentats

soll eine Ankylose des Dentins auf dem Empfängerknochen provoziert werden. Auf dem dem Weichgewebe zugewandten Teil der Wurzel wird das Wurzelzement und das Parodontalligament hingegen belassen, um eine Ersatzresorption in diesem Aspekt zu vermeiden (SCHWARZ et al., 2016a). Betrachtet man andere Studien, in denen block- oder schalenförmige Dentinaugmentate untersucht wurden, bei denen man im Zuge der Augmentataufbereitung das Wurzelzement und Parodontalligament entfernt hat, so zeigt sich auch hier eine verstärkte Resorption. In der bereits im Vorgegangenen erwähnten Untersuchung von Xiao et al., in der eine Schalenteknik begutachtet wurde, die der Tooth-Shell-Technique ähnlich ist, wurde nach 24 Wochen eine mittlere Resorption der transversalen Kieferkambbreite von 2,41 mm bei 2 mm und von 1,49 mm bei 4 mm unterhalb des höchsten Punktes des Alveolarkamms dokumentiert. Dies entspricht in der vorliegenden Untersuchung den Messhöhen L2 und L4.

Ein weiterer Unterschied des TST-Konzepts gegenüber dem Vorgehen nach Schwarz et al. besteht in der Aufbereitung der Augmentate. Während die Zahnwurzeln bei der Technik nach Schwarz über die oben genannte Bearbeitung der defektzugewandten Seite hinaus nicht weiter aufbereitet wurden, erfolgte bei den Dentinaugmentaten nach dem TST-Konzept neben einer Dekontamination eine partielle Demineralisierung, um das Kollagenetzwerk des Dentins zu exponieren und darin konservierte, osteoinduktive Zytokine freizugeben. Das Ziel dieser Demineralisierung ist es, die Adhäsion von knochenbildenden Zellen zu erleichtern und dadurch die knöcherne Regeneration zu fördern. Durch eine enzymatische Degradation des exponierten Kollagenetzwerkes ist jedoch ein größeres Ausmaß an Resorption zu beobachten als bei nativem Dentin. Die Resorption nimmt dabei mit dem Grad der Demineralisierung des Dentins zu (KOGA et al., 2016; MORDENFELD et al., 2011).

Durch die Verwendung eines kompakten Zahnwurzelaugmentats, das im flächigen Kontakt am Empfängerbett fixiert wird, unterliegt die von Schwarz beschriebene Technik jedoch Indikationseinschränkungen. Das Ausmaß der möglichen Augmentationsbreite wird durch die Breite der verwendeten Zahnwurzel determiniert. Bei einer Schalenteknik wie der Tooth-Shell-Technique kann jedoch durch die Fixierung der Schale auf Distanz und der Füllung des Hohlraumes mit dem partikulierten Dentin des restlichen Zahnes ein deutlich größeres Volumen augmentiert werden. Bei einem Mangel an Partikulat kann zudem die zusätzliche Verwendung von Knochenersatzmaterial, wie z.B. xenogenem KEM bovinen Ursprungs, in Erwägung gezogen werden, um das Füllvolumen zu erhöhen. Analog zur Knochenschalenteknik nach Khoury ist bei der Tooth-Shell-Technique aufgrund einer

erleichterten Osteokonduktion durch das Partikulat eine bessere Revaskularisierung und Regeneration des Augmentats zu erwarten (KHOURY, HANSER, 2019). Ein weiterer Vorteil von Schalentechiken ist die Möglichkeit einer simultanen Augmentation und Implantation, da die Schale auf Distanz zum bereits inserierten Implantat fixiert und Spaltraum mit Partikulat gefüllt werden kann, sofern Defektgröße und -morphologie dies zulassen (KHOURY et al., 2010). Dies kann die Behandlungsdauer für den Patienten verkürzen. Bei kompakten Zahnwurzelaugmentaten hingegen ist, wie bei monokortikalen Onlayplastiken, ein zweizeitiges Vorgehen obligat, da das Transplantat zunächst einheilen muss und bei einer vorzeitigen Implantation die Gefahr der Separation des Augmentats vom Empfängerbett besteht (MCALLISTER, HAGHIGHAT, 2007; SCHWARTZ-ARAD, LEVIN, 2005).

5.5. Schlussfolgerungen

Nach einer Beobachtungszeit von einem Jahr liefert das Konzept der Tooth-Shell-Technique hinsichtlich des Augmentations- und Implantaterfolgs vergleichbare Ergebnisse wie die Knochenschalentechnik nach Khoury. Das Verfahren erweist sich als äußerst sicher und zeigt kein erhöhtes Auftreten klinischer Komplikationen oder periimplantärer Mukositis.

Die postoperativen Beschwerden, insbesondere die postoperative Schwellung, scheinen bei diesem Verfahren möglicherweise ausgeprägter zu sein als bei der Knochenschalentechnik nach Khoury. Die Patienten waren durch die postoperative Schwellung mehr beeinträchtigt als durch die postoperativen Schmerzen.

Untersuchungen über einen längeren Beobachtungszeitraum mit einer radiologischen Evaluation der Kieferkambreiten zur Bewertung der Langzeitstabilität der Augmentate und die Ermittlung von Langzeitüberlebensraten der Implantate sind von hohem wissenschaftlichem Interesse.

6. Literaturverzeichnis

1. Aizcorbe-Vicente J, Peñarrocha-Oltra D, Canullo L, Soto-Peñaloza D, Peñarrocha-Diago M (2020) Influence of Facial Bone Thickness After Implant Placement into the Healed Ridges on the Remodeled Facial Bone and Considering Soft Tissue Recession: A Systematic Review. *Int J Oral Maxillofac Implants* 35:107-119
2. Al-Asfour A, Andersson L, Kamal M, Joseph B (2013) New bone formation around xenogenic dentin grafts to rabbit tibia marrow. *Dent Traumatol* 29:455-460
3. Al-Asfour A, Farzad P, Al-Musawi A, Dahlin C, Andersson L (2017) Demineralized Xenogenic Dentin and Autogenous Bone as Onlay Grafts to Rabbit Tibia. *Implant Dent* 26:232-237
4. Albrektsson T, Jacobsson M (1987) Bone-metal interface in osseointegration. *J Prosthet Dent* 57:597-607
5. Allen MR, Hock JM, Burr DB (2004) Periosteum: biology, regulation, and response to osteoporosis therapies. *Bone* 35:1003-1012
6. Amler MH (1969) The time sequence of tissue regeneration in human extraction wounds. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 27:309-318
7. Amler MH (1999) Disturbed healing of extraction wounds. *J Oral Implantol* 25:179-184
8. Andersson L, Bodin I, Sörensen S (1989) Progression of root resorption following replantation of human teeth after extended extraoral storage. *Endod Dent Traumatol* 5:38-47
9. Andersson L (2008) Patient self-evaluation of intra-oral bone grafting treatment to the maxillary frontal region. *Dent Traumatol* 24:164-169
10. 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
11. Andersson L (2010) Dentin xenografts to experimental bone defects in rabbit tibia are ankylosed and undergo osseous replacement. *Dent Traumatol* 26:398-402
12. Andreasen JO, Hjørting-Hansen E (1966) Replantation of teeth. I. Radiographic and clinical study of 110 human teeth replanted after accidental loss. *Acta Odontol Scand* 24:263-286
13. Andreasen JO (1980a) Analysis of topography of surface- and inflammatory root resorption after replantation of mature permanent incisors in monkeys. *Swed Dent J* 4:135-144
14. Andreasen JO (1980b) Analysis of pathogenesis and topography of replacement root resorption (ankylosis) after replantation of mature permanent incisors in monkeys. *Swed Dent J* 4:231-240
15. Andreasen JO, Andreasen FM, Andersson L (2018) *Textbook and Color Atlas of Traumatic Injuries of the Teeth*, 5 edn, Wiley-Blackwell).
16. Andreotti AM, Goiato MC, Nobrega AS, Freitas da Silva EV, Filho HG, Pellizzer EP, Micheline Dos Santos D (2017) Relationship Between Implant Stability Measurements Obtained by Two Different Devices: A Systematic Review. *J Periodontol* 88:281-288
17. Araújo MG, Lindhe J (2005) Dimensional ridge alterations following tooth extraction. An experimental study in the dog. *J Clin Periodontol* 32:212-218
18. Artzi Z, Netanel E, Renert U (2022) Autogenous Particulate Dentin in Socket Site Preservation Procedures: Histologic and Histomorphometric Observations. *Int J Oral Maxillofac Implants* 37:373-380
19. Atiya BK, Shanmuhasuntharam P, Huat S, Abdulrazzak S, Oon H (2014) Liquid nitrogen-treated autogenous dentin as bone substitute: an experimental study in a rabbit model. *Int J Oral Maxillofac Implants* 29:e165-170

20. Azuma Y, Kaji K, Katogi R, Takeshita S, Kudo A (2000) Tumor necrosis factor-alpha induces differentiation of and bone resorption by osteoclasts. *J Biol Chem* 275:4858-4864
21. Bamgbose BO, Akinwande JA, Adeyemo WL, Ladeinde AL, Arotiba GT, Ogunlewe MO (2005) Effects of co-administered dexamethasone and diclofenac potassium on pain, swelling and trismus following third molar surgery. *Head Face Med* 1:11
22. Bang G, Urist MR (1967) Bone induction in excavation chambers in matrix of decalcified dentin. *Arch Surg* 94:781-789
23. Barboza E, Caúla A, Machado F (1999) Potential of recombinant human bone morphogenetic protein-2 in bone regeneration. *Implant Dent* 8:360-367
24. Barone A, Ricci M, Mangano F, Covani U (2011) Morbidity associated with iliac crest harvesting in the treatment of maxillary and mandibular atrophies: a 10-year analysis. *J Oral Maxillofac Surg* 69:2298-2304
25. Bartols A, Kasprzyk S, Walther W, Korsch M (2018) Lateral alveolar ridge augmentation with autogenous block grafts fixed at a distance versus resorbable Poly-D-L-Lactide foil fixed at a distance: A single-blind, randomized, controlled trial. *Clin Oral Implants Res* 29:843-854
26. Becker K, Drescher D, Hönscheid R, Golubovic V, Mihatovic I, Schwarz F (2017) 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* 28:334-340
27. Becker K, Jandik K, Stauber M, Mihatovic I, Drescher D, Schwarz F (2019) Microstructural volumetric analysis of lateral ridge augmentation using differently conditioned tooth roots. *Clin Oral Investig* 23:3063-3071
28. Benic GI, Thoma DS, Jung RE, Sanz-Martin I, Unger S, Cantalapiedra A, Hämmerle CHF (2017) Guided bone regeneration with particulate vs. block xenogenic bone substitutes: a pilot cone beam computed tomographic investigation. *Clin Oral Implants Res* 28:e262-e270
29. Bessho K, Tagawa T, Murata M (1990) Purification of rabbit bone morphogenetic protein derived from bone, dentin, and wound tissue after tooth extraction. *J Oral Maxillofac Surg* 48:162-169
30. Bessho K, Tanaka N, Matsumoto J, Tagawa T, Murata M (1991) Human dentin-matrix-derived bone morphogenetic protein. *J Dent Res* 70:171-175
31. Block SS (2001) *Disinfection, sterilization and preservation* (Philadelphia, Lippincott Williams and Wilkins).
32. Bormann KH, Suarez-Cunqueiro MM, Sinikovic B, Kampmann A, von See C, Tavassol F, Binger T, Winkler M, Gellrich NC, Rucker M (2012) Dentin as a suitable bone substitute comparable to β -TCP--an experimental study in mice. *Microvasc Res* 84:116-122
33. Brånemark PI, Adell R, Breine U, Hansson BO, Lindström J, Ohlsson A (1969) Intra-osseous anchorage of dental prostheses. I. Experimental studies. *Scand J Plast Reconstr Surg* 3:81-100
34. Briguglio F, Falcomatà D, Marconcini S, Fiorillo L, Briguglio R, Farronato D (2019) The Use of Titanium Mesh in Guided Bone Regeneration: A Systematic Review. *Int J Dent* 2019:9065423
35. Brogi E, Wu T, Namiki A, Isner JM (1994) Indirect angiogenic cytokines upregulate VEGF and bFGF gene expression in vascular smooth muscle cells, whereas hypoxia upregulates VEGF expression only. *Circulation* 90:649-652
36. Brunski JB (1993) Avoid pitfalls of overloading and micromotion of intraosseous implants. *Dent Implantol Update* 4:77-81

37. Bühler-Frey C, Burkhardt R (2008) Evidenz für die Bedeutung mastikatorischer Mukosa rund um enossale Implantate - Eine kritische Literaturübersicht. *Implantologie*:155-169
38. Burchardt H (1983) The biology of bone graft repair. *Clin Orthop Relat Res*:28-42
39. Buser D, Martin W, Belser UC (2004) Optimizing esthetics for implant restorations in the anterior maxilla: anatomic and surgical considerations. *Int J Oral Maxillofac Implants* 19 Suppl:43-61
40. Butler WT, Mikulski A, Urist MR, Bridges G, Uyeno S (1977) Noncollagenous proteins of a rat dentin matrix possessing bone morphogenetic activity. *J Dent Res* 56:228-232
41. Butler WT, Ritchie H (1995) The nature and functional significance of dentin extracellular matrix proteins. *Int J Dev Biol* 39:169-179
42. Calvo-Guirado J, Garc, #233, s-Villal, #225, M, Mahesh L, De Carlos-Villafranca F (2021) Effectiveness of chemical disinfection in discarding pathogenic bacteria of human particulate tooth graft: An *in vitro* study. *Indian Journal of Dental Sciences* 13:277-282
43. Canalis E, Pash J, Varghese S (1993) Skeletal growth factors. *Crit Rev Eukaryot Gene Expr* 3:155-166
44. Cardaropoli G, Araújo M, Lindhe J (2003) Dynamics of bone tissue formation in tooth extraction sites. An experimental study in dogs. *J Clin Periodontol* 30:809-818
45. Catanzaro-Guimarães SA, Catanzaro Guimarães BP, Garcia RB, Alle N (1986) Osteogenic potential of autogenic demineralized dentin implanted in bony defects in dogs. *Int J Oral Maxillofac Surg* 15:160-169
46. Cervera-Maillo JM, Morales-Schwarz D, Morales-Melendez H, Mahesh L, Calvo-Guirado JL (2021) Autologous Tooth Dentin Graft: A Retrospective Study in Humans. *Medicina (Kaunas)* 58
47. Chappuis V, Araújo MG, Buser D (2017) Clinical relevance of dimensional bone and soft tissue alterations post-extraction in esthetic sites. *Periodontol* 2000 73:73-83
48. Chen J, Shapiro HS, Sodek J (1992) Development expression of bone sialoprotein mRNA in rat mineralized connective tissues. *J Bone Miner Res* 7:987-997
49. Chiapasco M, Abati S, Romeo E, Vogel G (1999) Clinical outcome of autogenous bone blocks or guided bone regeneration with e-PTFE membranes for the reconstruction of narrow edentulous ridges. *Clin Oral Implants Res* 10:278-288
50. Chiapasco M, Casentini P, Zaniboni M (2009) Bone augmentation procedures in implant dentistry. *Int J Oral Maxillofac Implants* 24 Suppl:237-259
51. Chrcanovic BR, Albrektsson T, Wennerberg A (2017) Bone Quality and Quantity and Dental Implant Failure: A Systematic Review and Meta-analysis. *Int J Prosthodont* 30:219-237
52. Conover MA, Urist MR (1979) Transmembrane bone morphogenesis by implants of dentin matrix. *J Dent Res* 58:1911
53. Cornell CN, Lane JM (1998) Current understanding of osteoconduction in bone regeneration. *Clin Orthop Relat Res*:S267-273
54. Daly BJ, Sharif MO, Jones K, Worthington HV, Beattie A (2022) Local interventions for the management of alveolar osteitis (dry socket). *Cochrane Database Syst Rev* 9:Cd006968
55. Davies J, Turner S, Sandy JR (1998) Distraction osteogenesis--a review. *Br Dent J* 185:462-467
56. Degidi M, Daprile G, Piattelli A (2013) Primary stability determination of implants inserted in sinus augmented sites: 1-step versus 2-step procedure. *Implant Dent* 22:530-533

57. Del Canto-Díaz A, de Elío-Oliveros J, Del Canto-Díaz M, Alobera-Gracia MA, Del Canto-Pingarrón M, Martínez-González JM (2019) Use of autologous tooth-derived graft material in the post-extraction dental socket. Pilot study. *Med Oral Patol Oral Cir Bucal* 24:e53-e60
58. Delloye C, Cornu O, Druetz V, Barbier O (2007) Bone allografts: What they can offer and what they cannot. *J Bone Joint Surg Br* 89:574-579
59. Diaz-Flores L, Gutierrez R, Lopez-Alonso A, Gonzalez R, Varela H (1992) Pericytes as a supplementary source of osteoblasts in periosteal osteogenesis. *Clin Orthop Relat Res*:280-286
60. Ebelseder K, Glockner K (1999) Folgen des dentalen Traumas. *Endodontie* 113-124
61. Elfana A, El-Kholy S, Saleh HA, Fawzy El-Sayed K (2021) Alveolar ridge preservation using autogenous whole-tooth versus demineralized dentin grafts: A randomized controlled clinical trial. *Clin Oral Implants Res* 32:539-548
62. Ernst N, Adolphs N (2016) Role of distraction osteogenesis in craniomaxillofacial surgery. *Innov Surg Sci* 1:97-103
63. Esposito M, Maghaireh H, Grusovin MG, Ziounas I, Worthington HV (2012) Soft tissue management for dental implants: what are the most effective techniques? A Cochrane systematic review. *Eur J Oral Implantol* 5:221-238
64. Faul F, Erdfelder E, Buchner A, Lang AG (2009) Statistical power analyses using G*Power 3.1: tests for correlation and regression analyses. *Behav Res Methods* 41:1149-1160
65. Ferreira-Valente MA, Pais-Ribeiro JL, Jensen MP (2011) Validity of four pain intensity rating scales. *Pain* 152:2399-2404
66. 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* 35:356-363
67. Fincham AG, Moradian-Oldak J, Simmer JP (1999) The structural biology of the developing dental enamel matrix. *J Struct Biol* 126:270-299
68. Fuss Z, Tsesis I, Lin S (2003) Root resorption--diagnosis, classification and treatment choices based on stimulation factors. *Dent Traumatol* 19:175-182
69. Gandolfi MG, Taddei P, Pondrelli A, Zamparini F, Prati C, Spagnuolo G (2018) Demineralization, Collagen Modification and Remineralization Degree of Human Dentin after EDTA and Citric Acid Treatments. *Materials (Basel)* 12
70. Gellrich NC, Bormann KH, Tehranchian S, Kokemüller H, Suarez-Cunqueiro MM (2013) Containment and contouring (CoCoon) technique: a biologically adequate approach to less invasive autogenous preimplant augmentation of bone. *Br J Oral Maxillofac Surg* 51:880-886
71. Gerbershagen HJ, Aduckathil S, van Wijck AJ, Peelen LM, Kalkman CJ, Meissner W (2013) Pain intensity on the first day after surgery: a prospective cohort study comparing 179 surgical procedures. *Anesthesiology* 118:934-944
72. Ghosh A, Aggarwal VR, Moore R (2022) Aetiology, Prevention and Management of Alveolar Osteitis-A Scoping Review. *J Oral Rehabil* 49:103-113
73. Goiato MC, dos Santos DM, Santiago JF, Jr., Moreno A, Pellizzer EP (2014) Longevity of dental implants in type IV bone: a systematic review. *Int J Oral Maxillofac Surg* 43:1108-1116
74. Goodacre CJ, Bernal G, Rungcharassaeng K, Kan JY (2003) Clinical complications in fixed prosthodontics. *J Prosthet Dent* 90:31-41
75. Goswami D, Jain G, Mohod M, Baidya DK, Bhutia O, Roychoudhury A (2018) Randomized controlled trial to compare oral analgesic requirements and patient satisfaction in using oral non-steroidal anti-inflammatory drugs versus benzydamine

- hydrochloride oral rinses after mandibular third molar extraction: a pilot study. *J Dent Anesth Pain Med* 18:19-25
76. Groß K, Sahin D, Kohns Vasconcelos M, Pfeffer K, Schwarz F, Henrich B (2022) Simultaneous presence of *Mycoplasma salivarium* and *Tannerella forsythia* in the implant sulcus after lateral augmentation with autogenous root grafts is associated with increased sulcus probing depth. *PLoS One* 17:e0270962
 77. Gual-Vaqués P, Polis-Yanes C, Estrugo-Devesa A, Ayuso-Montero R, Mari-Roig A, López-López J (2018) Autogenous teeth used for bone grafting: A systematic review. *Med Oral Patol Oral Cir Bucal* 23:e112-e119
 78. Günzl H-J, Khoury F (1993). Morphologische Untersuchungen von Knochenbiopsien nach autogener Alveolar-Extensionsplastik am unentkalkten, kunststoffeingebetteten Schliffpräparat. In *Gesellschaft für orale Implantologie. Jahrbuch für orale Implantologie* (Berlin, Quintessence), pp. 153.
 79. Hämmerle CH, Chiantella GC, Karring T, Lang NP (1998) The effect of a deproteinized bovine bone mineral on bone regeneration around titanium dental implants. *Clin Oral Implants Res* 9:151-162
 80. Hariton E, Locascio JJ (2018) Randomised controlled trials - the gold standard for effectiveness research: Study design: randomised controlled trials. *Bjog* 125:1716
 81. Hawker GA, Mian S, Kendzerska T, French M (2011) Measures of adult pain: Visual Analog Scale for Pain (VAS Pain), Numeric Rating Scale for Pain (NRS Pain), McGill Pain Questionnaire (MPQ), Short-Form McGill Pain Questionnaire (SF-MPQ), Chronic Pain Grade Scale (CPGS), Short Form-36 Bodily Pain Scale (SF-36 BPS), and Measure of Intermittent and Constant Osteoarthritis Pain (ICOAP). *Arthritis Care Res (Hoboken)* 63 Suppl 11:S240-252
 82. Horner K, Jacobs R, Schulze R (2013) Dental CBCT equipment and performance issues. *Radiat Prot Dosimetry* 153:212-218
 83. Jain N, Maria A (2011) Randomized double blind comparative study on the efficacy of Ibuprofen and aceclofenac in controlling post-operative sequelae after third molar surgery. *J Maxillofac Oral Surg* 10:118-122
 84. Jimi E, Nakamura I, Duong LT, Ikebe T, Takahashi N, Rodan GA, Suda T (1999) Interleukin 1 induces multinucleation and bone-resorbing activity of osteoclasts in the absence of osteoblasts/stromal cells. *Exp Cell Res* 247:84-93
 85. Johnston BC, Patrick DL, Busse JW, Schünemann HJ, Agarwal A, Guyatt GH (2013) Patient-reported outcomes in meta-analyses--Part 1: assessing risk of bias and combining outcomes. *Health Qual Life Outcomes* 11:109
 86. Joshi CP, Dani NH, Khedkar SU (2016) Alveolar ridge preservation using autogenous tooth graft versus beta-tricalcium phosphate alloplast: A randomized, controlled, prospective, clinical pilot study. *J Indian Soc Periodontol* 20:429-434
 87. Jun SH, Ahn JS, Lee JI, Ahn KJ, Yun PY, Kim YK (2014) A prospective study on the effectiveness of newly developed autogenous tooth bone graft material for sinus bone graft procedure. *J Adv Prosthodont* 6:528-538
 88. Jung RE, Benic GI, Scherrer D, Hämmerle CH (2015) Cone beam computed tomography evaluation of regenerated buccal bone 5 years after simultaneous implant placement and guided bone regeneration procedures--a randomized, controlled clinical trial. *Clin Oral Implants Res* 26:28-34
 89. Kabisch M, Ruckes C, Seibert-Grafe M, Blettner M (2011) Randomized controlled trials: part 17 of a series on evaluation of scientific publications. *Dtsch Arztebl Int* 108:663-668

90. Karl M, Graef F, Heckmann S, Krafft T (2008) Parameters of resonance frequency measurement values: a retrospective study of 385 ITI dental implants. *Clin Oral Implants Res* 19:214-218
91. Karring T, Nyman S, Lindhe J (1980) Healing following implantation of periodontitis affected roots into bone tissue. *J Clin Periodontol* 7:96-105
92. Khanijou M, Zhang R, Boonsiriseth K, Srisatjaluk RL, Suphangul S, Pairuchvej V, Wongsirichat N, Seriwatanachai D (2021) Physicochemical and osteogenic properties of chairside processed tooth derived bone substitute and bone graft materials. *Dent Mater J* 40:173-183
93. Khoury F, Hanser T, Khoury C, Neugebauer J, Terpelle T, Tunkel J, Zöller JE (2010) *Augmentative Verfahren in der Implantologie* (Berlin, Quintessenz Verlags-GmbH).
94. Khoury F, Hanser T (2014) Lateral bone block augmentation: A biologic concept. *Implantologie* 22:233-246
95. Khoury F, Hanser T (2019) Three-Dimensional Vertical Alveolar Ridge Augmentation in the Posterior Maxilla: A 10-year Clinical Study. *Int J Oral Maxillofac Implants* 34:471-480
96. Kim K, Brar P, Jakubowski J, Kaltman S, Lopez E (2009) The use of corticosteroids and nonsteroidal antiinflammatory medication for the management of pain and inflammation after third molar surgery: a review of the literature. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 107:630-640
97. Kim SY, Kim YK, Park YH, Park JC, Ku JK, Um IW, Kim JY (2017) Evaluation of the Healing Potential of Demineralized Dentin Matrix Fixed with Recombinant Human Bone Morphogenetic Protein-2 in Bone Grafts. *Materials* (Basel) 10
98. Kim Y, Rodriguez AE, Nowzari H (2016a) The Risk of Prion Infection through Bovine Grafting Materials. *Clin Implant Dent Relat Res* 18:1095-1102
99. Kim YK, Kim SG, Byeon JH, Lee HJ, Um IU, Lim SC, Kim SY (2010) Development of a novel bone grafting material using autogenous teeth. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 109:496-503
100. Kim YK, Lee J, Um IW, Kim KW, Murata M, Akazawa T, Mitsugi M (2013) Tooth-derived bone graft material. *J Korean Assoc Oral Maxillofac Surg* 39:103-111
101. Kim YK, Kim SG, Bae JH, Um IW, Oh JS, Jeong KI (2014a) Guided bone regeneration using autogenous tooth bone graft in implant therapy: case series. *Implant Dent* 23:138-143
102. Kim YK, Lee J, Yun JY, Yun PY, Um IW (2014b) Comparison of autogenous tooth bone graft and synthetic bone graft materials used for bone resorption around implants after crestal approach sinus lifting: a retrospective study. *J Periodontal Implant Sci* 44:216-221
103. Kim YK, Yun PY, Um IW, Lee HJ, Yi YJ, Bae JH, Lee J (2014c) Alveolar ridge preservation of an extraction socket using autogenous tooth bone graft material for implant site development: prospective case series. *J Adv Prosthodont* 6:521-527
104. Kim YK, Lee JH, Um IW, Cho WJ (2016b) Guided Bone Regeneration Using Demineralized Dentin Matrix: Long-Term Follow-Up. *J Oral Maxillofac Surg* 74:515.e511-519
105. Koga T, Minamizato T, Kawai Y, Miura K, I T, Nakatani Y, Sumita Y, Asahina I (2016) Bone Regeneration Using Dentin Matrix Depends on the Degree of Demineralization and Particle Size. *PLoS One* 11:e0147235
106. Kolk A, Handschel J, Drescher W, Rothamel D, Kloss F, Blessmann M, Heiland M, Wolff KD, Smeets R (2012) Current trends and future perspectives of bone substitute materials - from space holders to innovative biomaterials. *J Craniomaxillofac Surg* 40:706-718

107. Korsch M, Robra B, Kasprzyk S, Walther W (2014) Patientenwahrnehmung postoperativer Beschwerden nach Knochenentnahme Randomisierte klinische Vergleichsstudie zweier Techniken für die laterale Augmentation. *Implantologie* 22:379–388
108. Korsch M (2020) Tooth shell technique: A proof of concept with the use of autogenous dentin block grafts. *Aust Dent J* 2;159-168
109. Korsch M, Walther W, Robra BP, Sahin A, Hannig M, Bartols A (2020) Pre-implantological treatment routines for alveolar ridge atrophy - an investigation among maxillofacial and oral surgeons in southern Germany. *BMC Oral Health* 20:195
110. Korsch M, Peichl M (2021) Retrospective Study on Tooth Shell Technique Using Endodontically Treated Teeth in Lateral Ridge Augmentation. *Applied Sciences* 11:5882
111. Korsch M, Peichl M, Bartols A (2022) Lateral Alveolar Ridge Augmentation with Autologous Dentin of Periodontally Compromised Teeth: A Retrospective Study. *Int J Environ Res Public Health* 19
112. Lang NP, Wilson TG, Corbet EF (2000) Biological complications with dental implants: their prevention, diagnosis and treatment. *Clin Oral Implants Res* 11 Suppl 1:146-155
113. Lang NP, Berglundh T (2011) Periimplant diseases: where are we now?--Consensus of the Seventh European Workshop on Periodontology. *J Clin Periodontol* 38 Suppl 11:178-181
114. Lee J-Y, Lee J, Kim Y-K (2013) Comparative analysis of guided bone regeneration using autogenous tooth bone graft material with and without resorbable membrane. *Journal of Dental Sciences* 8:281-286
115. Lekholm U, Zarb GA (1985). Patient selection and preparation. In *Tissue-Integrated Prostheses: Osseointegration in Clinical Dentistry*, Albrektsson T, ed. (Berlin, Quintessence Publishing), pp. 195-205.
116. Leonhardt H (1990). Histologie, Zytologie und Mikroanatomie des Menschen, Taschenlehrbuch der gesamten Anatomie. In (Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York), pp. 419-425.
117. Li R, Guo W, Yang B, Guo L, Sheng L, Chen G, Li Y, Zou Q, Xie D, An X, Chen Y, Tian W (2011) Human treated dentin matrix as a natural scaffold for complete human dentin tissue regeneration. *Biomaterials* 32:4525-4538
118. Lim G, Lin GH, Monje A, Chan HL, Wang HL (2018) Wound Healing Complications Following Guided Bone Regeneration for Ridge Augmentation: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Int J Oral Maxillofac Implants* 33:41–50
119. Linde A (1989) Dentin matrix proteins: composition and possible functions in calcification. *Anat Rec* 224:154-166
120. Linde A, Thorén C, Dahlin C, Sandberg E (1993) Creation of new bone by an osteopromotive membrane technique: an experimental study in rats. *J Oral Maxillofac Surg* 51:892-897
121. Marx RE, Garg AK (1998) Bone structure, metabolism, and physiology: its impact on dental implantology. *Implant Dent* 7:267-276
122. McAllister BS, Haghghat K (2007) Bone augmentation techniques. *J Periodontol* 78:377-396
123. McCulloch EC (1933) The Germicidal Efficiency of Sodium Hydroxide. *J Bacteriol* 25:469-493
124. Meredith N, Alleyne D, Cawley P (1996) Quantitative determination of the stability of the implant-tissue interface using resonance frequency analysis. *Clin Oral Implants Res* 7:261-267

125. Meredith N (1998) Assessment of implant stability as a prognostic determinant. *Int J Prosthodont* 11:491-501
126. Mertens C, Decker C, Seeberger R, Hoffmann J, Sander A, Freier K (2013) Early bone resorption after vertical bone augmentation--a comparison of calvarial and iliac grafts. *Clin Oral Implants Res* 24:820-825
127. Minetti E, Palermo A, Savadori P, Barlattani A, Jr., Franco R, Michele M, Gianfreda F, Bollero P (2019) Autologous tooth graft: a histological comparison between dentin mixed with xenograft and dentin alone grafts in socket preservation. *J Biol Regul Homeost Agents* 33:189-197
128. Minetti E, Giacometti E, Gambardella U, Contessi M, Ballini A, Marenzi G, Celko M, Mastrangelo F (2020) Alveolar Socket Preservation with Different Autologous Graft Materials: Preliminary Results of a Multicenter Pilot Study in Human. *Materials (Basel)* 13
129. Minetti E, Gianfreda F, Palermo A, Bollero P (2022) Autogenous Dentin Particulate Graft for Alveolar Ridge Augmentation with and without Use of Collagen Membrane: Preliminary Histological Analysis on Humans. *Materials (Basel)* 15
130. Miron RJ, Zhang Q, Sculean A, Buser D, Pippenger BE, Dard M, Shirakata Y, Chandad F, Zhang Y (2016) Osteoinductive potential of 4 commonly employed bone grafts. *Clin Oral Investig* 20:2259-2265
131. Misch C (1990a) Classifications and treatment options of the completely edentulous arch in implant dentistry. *Dent Today* 9:26, 28-30
132. Misch CE (1990b) Divisions of available bone in implant dentistry. *Int J Oral Implantol* 7:9-17
133. Misch CE, Dietsch F (1993) Bone-grafting materials in implant dentistry. *Implant Dent* 2:158-167
134. Misch CM (2022) Autogenous Bone is Still the Gold Standard of Graft Materials in 2022. *J Oral Implantol* 48:169-170
135. Monje A, Chappuis V, Monje F, Muñoz F, Wang HL, Urban IA, Buser D (2019a) The Critical Peri-implant Buccal Bone Wall Thickness Revisited: An Experimental Study in the Beagle Dog. *Int J Oral Maxillofac Implants* 34:1328–1336
136. Monje A, Ravidà A, Wang HL, Helms JA, Brunski JB (2019b) Relationship Between Primary/Mechanical and Secondary/Biological Implant Stability. *Int J Oral Maxillofac Implants* 34:s7-s23
137. Mordenfeld A, Hallman M, Lindskog S (2011) Tissue reactions to subperiosteal onlays of demineralized xenogenous dentin blocks in rats. *Dent Traumatol* 27:446-451
138. Naitoh M, Nabeshima H, Hayashi H, Nakayama T, Kurita K, Ariji E (2010) Postoperative assessment of incisor dental implants using cone-beam computed tomography. *J Oral Implantol* 36:377-384
139. Neter E, Westphal O, Luderitz O, Gorzynski EA, Eichenberger E (1956) Studies of enterobacterial lipopolysaccharides; effects of heat and chemicals on erythrocyte-modifying, antigenic, toxic and pyrogenic properties. *J Immunol* 76:377-385
140. Niwa M, Milner KC, Ribic E, Rudbach JA (1969) Alteration of physical, chemical, and biological properties of endotoxin by treatment with mild alkali. *J Bacteriol* 97:1069-1077
141. Nkenke E, Weisbach V, Winckler E, Kessler P, Schultze-Mosgau S, Wiltfang J, Neukam FW (2004) Morbidity of harvesting of bone grafts from the iliac crest for preprosthetic augmentation procedures: a prospective study. *Int J Oral Maxillofac Surg* 33:157-163

142. Nyman S, Karring T, Lindhe J, Plantén S (1980) Healing following implantation of periodontitis-affected roots into gingival connective tissue. *J Clin Periodontol* 7:394-401
143. Okumura N, Stegaroiu R, Kitamura E, Kurokawa K, Nomura S (2010) Influence of maxillary cortical bone thickness, implant design and implant diameter on stress around implants: a three-dimensional finite element analysis. *J Prosthodont Res* 54:133-142
144. Palmer LC, Newcomb CJ, Kaltz SR, Spoerke ED, Stupp SI (2008) Biomimetic systems for hydroxyapatite mineralization inspired by bone and enamel. *Chem Rev* 108:4754-4783
145. Pang KM, Um IW, Kim YK, Woo JM, Kim SM, Lee JH (2017) Autogenous demineralized dentin matrix from extracted tooth for the augmentation of alveolar bone defect: a prospective randomized clinical trial in comparison with anorganic bovine bone. *Clin Oral Implants Res* 28:809-815
146. Parsa A, Ibrahim N, Hassan B, van der Stelt P, Wismeijer D (2015) Bone quality evaluation at dental implant site using multislice CT, micro-CT, and cone beam CT. *Clin Oral Implants Res* 26:e1-7
147. Pohl S, Binderman I, Tomac J (2020) Maintenance of Alveolar Ridge Dimensions Utilizing an Extracted Tooth Dentin Particulate Autograft and PlateletRich Fibrin: A Retrospective Radiographic ConeBeam Computed Tomography Study. *Materials (Basel)* 13
148. Pohl V, Schuh C, Fischer MB, Haas R (2016) A New Method Using Autogenous Impacted Third Molars for Sinus Augmentation to Enhance Implant Treatment: Case Series with Preliminary Results of an Open, Prospective Longitudinal Study. *Int J Oral Maxillofac Implants* 31:622-630
149. Pohl V, Pohl S, Sulzbacher I, Fuerhauser R, Mailath-Pokorny G, Haas R (2017) Alveolar Ridge Augmentation Using Dystopic Autogenous Tooth: 2-Year Results of an Open Prospective Study. *Int J Oral Maxillofac Implants* 32:870–879
150. Prasad M, Butler WT, Qin C (2010) Dentin sialophosphoprotein in biomineralization. *Connect Tissue Res* 51:404-417
151. Qin X, Raj RM, Liao XF, Shi W, Ma B, Gong SQ, Chen WM, Zhou B (2014) Using rigidly fixed autogenous tooth graft to repair bone defect: an animal model. *Dent Traumatol* 30:380-384
152. Quayle AA (1990) Atraumatic removal of teeth and root fragments in dental implantology. *Int J Oral Maxillofac Implants* 5:293-296
153. Raghoobar GM, Batenburg RH, Vissink A, Reintsema H (1996) Augmentation of localized defects of the anterior maxillary ridge with autogenous bone before insertion of implants. *J Oral Maxillofac Surg* 54:1180-1185; discussion 1185-1186
154. Rasmusson L, Thor A, Sennerby L (2012) Stability evaluation of implants integrated in grafted and nongrafted maxillary bone: a clinical study from implant placement to abutment connection. *Clin Implant Dent Relat Res* 14:61-66
155. Register AA, Scopp IW, Kassouny DY, Pfau FR, Peskin D (1972) Human bone induction by allogeneic dentin matrix. *J Periodontol* 43:459-467
156. Retzepi M, Donos N (2010) Guided Bone Regeneration: biological principle and therapeutic applications. *Clin Oral Implants Res* 21:567-576
157. Roberts-Clark DJ, Smith AJ (2000) Angiogenic growth factors in human dentine matrix. *Arch Oral Biol* 45:1013-1016
158. Röhrig B, du Prel JB, Wachtlin D, Kwiecien R, Blettner M (2010) Sample size calculation in clinical trials: part 13 of a series on evaluation of scientific publications. *Dtsch Arztebl Int* 107:552-556

159. Sakkas A, Wilde F, Heufelder M, Winter K, Schramm A (2017) Autogenous bone grafts in oral implantology-is it still a "gold standard"? A consecutive review of 279 patients with 456 clinical procedures. *Int J Implant Dent* 3:23
160. Sakkas A, Schramm A, Winter K, Wilde F (2018) Risk factors for post-operative complications after procedures for autologous bone augmentation from different donor sites. *J Craniomaxillofac Surg* 46:312-322
161. Sánchez-Sánchez J, Pickert FN, Sánchez-Labrador L, Gf Tresguerres F, Martínez-González JM, Meniz-García C (2021) Horizontal Ridge Augmentation: A Comparison between Khoury and Urban Technique. *Biology (Basel)* 10
162. Santos A, Botelho J, Machado V, Borrecho G, Proença L, Mendes JJ, Mascarenhas P, Alcoforado G (2021) Autogenous Mineralized Dentin versus Xenograft granules in Ridge Preservation for Delayed Implantation in Post-extraction Sites: A Randomized controlled clinical trial with an 18 months follow-up. *Clin Oral Implants Res* 32:905-915
163. Scarano A, Degidi M, Iezzi G, Petrone G, Piattelli A (2006) Correlation between implant stability quotient and bone-implant contact: a retrospective histological and histomorphometrical study of seven titanium implants retrieved from humans. *Clin Implant Dent Relat Res* 8:218-222
164. Scarfe WC, Farman AG (2008) What is cone-beam CT and how does it work? *Dent Clin North Am* 52:707-730, v
165. Schettler D, Holtermann W (1977) Clinical and experimental results of a sandwich-technique for mandibular alveolar ridge augmentation. *J Maxillofac Surg* 5:199-202
166. Schroeder A, Pohler O, Sutter F (1976) [Tissue reaction to an implant of a titanium hollow cylinder with a titanium surface spray layer]. *SSO Schweiz Monatsschr Zahnheilkd* 86:713-727
167. 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* 23:313-323
168. Schulze RK, Berndt D, d'Hoedt B (2010) On cone-beam computed tomography artifacts induced by titanium implants. *Clin Oral Implants Res* 21:100-107
169. Schwartz-Arad D, Levin L (2005) Intraoral autogenous block onlay bone grafting for extensive reconstruction of atrophic maxillary alveolar ridges. *J Periodontol* 76:636-641
170. Schwartz Z, Weesner T, van Dijk S, Cochran DL, Mellonig JT, Lohmann CH, Carnes DL, Goldstein M, Dean DD, Boyan BD (2000) Ability of deproteinized cancellous bovine bone to induce new bone formation. *J Periodontol* 71:1258-1269
171. Schwarz F, Mihatovic I, Golubovic V, Becker J (2013) Dentointegration of a titanium implant: a case report. *Oral Maxillofac Surg* 17:235-241
172. 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* 43:345-353
173. 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
174. 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
175. Schwarz F, Becker K, Sahm N, Horstkemper T, Rousi K, Becker J (2017) The prevalence of peri-implant diseases for two-piece implants with an internal tube-in-tube connection: a cross-sectional analysis of 512 implants. *Clin Oral Implants Res* 28:24-28

176. Schwarz F, Hazar D, Becker K, Sader R, Becker J (2018) Efficacy of autogenous tooth roots for lateral alveolar ridge augmentation and staged implant placement. A prospective controlled clinical study. *J Clin Periodontol* 45:996-1004
177. Schwarz F, Hazar D, Becker K, Parvini P, Sader R, Becker J (2019a) Short-term outcomes of staged lateral alveolar ridge augmentation using autogenous tooth roots. A prospective controlled clinical study. *J Clin Periodontol* 46:969-976
178. Schwarz F, Mihatovic I, Popal-Jensen I, Parvini P, Sader R (2019b) Influence of autoclavation on the efficacy of extracted tooth roots used for vertical alveolar ridge augmentation. *J Clin Periodontol* 46:502-509
179. Schwarz F, Obreja K, Mayer S, Ramanauskaite A, Sader R, Parvini P (2022) Efficacy of autogenous tooth roots for a combined vertical and horizontal alveolar ridge augmentation and staged implant placement. A prospective controlled clinical study. *J Clin Periodontol* 49:496-505
180. Sculean A, Gruber R, Bosshardt DD (2014) Soft tissue wound healing around teeth and dental implants. *J Clin Periodontol* 41 Suppl 15:S6-22
181. Sennerby L, Thomsen P, Ericson LE (1992) A morphometric and biomechanic comparison of titanium implants inserted in rabbit cortical and cancellous bone. *Int J Oral Maxillofac Implants* 7:62-71
182. Sennerby L, Meredith N (1998) Resonance frequency analysis: measuring implant stability and osseointegration. *Compend Contin Educ Dent* 19:493-498, 500, 502; quiz 504
183. Sennerby L, Meredith N (2008) Implant stability measurements using resonance frequency analysis: biological and biomechanical aspects and clinical implications. *Periodontol* 2000 47:51-66
184. Sennerby L, Andersson P, Verrocchi D, Viinamäki R (2012) One-year outcomes of Neoss bimodal implants. A prospective clinical, radiographic, and RFA study. *Clin Implant Dent Relat Res* 14:313-320
185. Sennerby L (2013) 20 years of experience with resonance frequency analysis. *Implantologie* 21:21-33
186. Seong WJ, Grami S, Jeong SC, Conrad HJ, Hodges JS (2013) Comparison of push-in versus pull-out tests on bone-implant interfaces of rabbit tibia dental implant healing model. *Clin Implant Dent Relat Res* 15:460-469
187. Shejali J, Thomas R, Kumar T, Shah R, Mehta DS, Gayathri GV (2020) Immediate Ridge Augmentation Using Autogenous Tooth Root as a Block Graft in a Periodontally Hopeless Extraction Site: A Pilot Study. *J Oral Implantol* 46:41-49
188. Sjöström M, Lundgren S, Nilson H, Sennerby L (2005) Monitoring of implant stability in grafted bone using resonance frequency analysis. A clinical study from implant placement to 6 months of loading. *Int J Oral Maxillofac Surg* 34:45-51
189. Sweet JB, Butler DP (1977) Increased incidence of postoperative localized osteitis in mandibular third molar surgery associated with patients using oral contraceptives. *Am J Obstet Gynecol* 127:518-519
190. Tan WL, Wong TL, Wong MC, Lang NP (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
191. Tanaka K, Sailer I, Iwama R, Yamauchi K, Nogami S, Yoda N, Takahashi T (2018) Relationship between cortical bone thickness and implant stability at the time of surgery and secondary stability after osseointegration measured using resonance frequency analysis. *J Periodontal Implant Sci* 48:360-372
192. Thoma DS, Payer M, Jakse N, Bienz SP, Hüsler J, Schmidlin PR, Jung UW, Hämmerle CHF, Jung RE (2018) Randomized, controlled clinical two-centre study using

- xenogeneic block grafts loaded with recombinant human bone morphogenetic protein-2 or autogenous bone blocks for lateral ridge augmentation. *J Clin Periodontol* 45:265-276
193. Troeltzsch M, Troeltzsch M, Kauffmann P, Gruber R, Brockmeyer P, Moser N, Rau A, Schliephake H (2016) Clinical efficacy of grafting materials in alveolar ridge augmentation: A systematic review. *J Craniomaxillofac Surg* 44:1618-1629
194. Turkyilmaz I (2006) A comparison between insertion torque and resonance frequency in the assessment of torque capacity and primary stability of Brånemark system implants. *J Oral Rehabil* 33:754-759
195. Urist MR (1971) Bone histogenesis and morphogenesis in implants of demineralized enamel and dentin. *J Oral Surg* 29:88-102
196. Valdec S, Pasic P, Soltermann A, Thoma D, Stadlinger B, Rucker M (2017) Alveolar ridge preservation with autologous particulated dentin-a case series. *Int J Implant Dent* 3:12
197. Van der Weijden F, Dell'Acqua F, Slot DE (2009) Alveolar bone dimensional changes of post-extraction sockets in humans: a systematic review. *J Clin Periodontol* 36:1048-1058
198. van der Westhuijzen AJ, Becker PJ, Morkel J, Roelse JA (2005) A randomized observer blind comparison of bilateral facial ice pack therapy with no ice therapy following third molar surgery. *Int J Oral Maxillofac Surg* 34:281-286
199. Wang W, Jiang Y, Wang D, Mei D, Xu H, Zhao B (2022) Clinical efficacy of autogenous dentin grafts with guided bone regeneration for horizontal ridge augmentation: a prospective observational study. *Int J Oral Maxillofac Surg* 51:837-843
200. Wedenberg C, Pierce A, Lindskog S (1987) Resorbing potential of different connective tissue types. *Scand J Dent Res* 95:270-271
201. Witte MB, Barbul A (1997) General principles of wound healing. *Surg Clin North Am* 77:509-528
202. Wozney JM, Rosen V, Byrne M, Celeste AJ, Moutsatsos I, Wang EA (1990) Growth factors influencing bone development. *J Cell Sci Suppl* 13:149-156
203. Xiao W, Hu C, Chu C, Man Y (2019) Autogenous Dentin Shell Grafts Versus Bone Shell Grafts for Alveolar Ridge Reconstruction: A Novel Technique with Preliminary Results of a Prospective Clinical Study. *Int J Periodontics Restorative Dent* 39:885-893
204. Xiao YT, Xiang LX, Shao JZ (2007) Bone morphogenetic protein. *Biochem Biophys Res Commun* 362:550-553
205. Yeomans JD, Urist MR (1967) Bone induction by decalcified dentine implanted into oral, osseous and muscle tissues. *Arch Oral Biol* 12:999-1008
206. Yüceer-Çetiner E, Özkan N, Önger ME (2021) Effect of Autogenous Dentin Graft on New Bone Formation. *J Craniofac Surg* Publish Ahead of Print
207. Zhang M, Powers RM, Jr., Wolfenbarger L, Jr. (1997) Effect(s) of the demineralization process on the osteoinductivity of demineralized bone matrix. *J Periodontol* 68:1085-1092
208. Zins JE, Whitaker LA (1979) Membranous vs endochondral bone autografts: implications for craniofacial reconstruction. *Surg Forum* 30:521-523
209. Zins JE, Whitaker LA (1983) Membranous versus endochondral bone: implications for craniofacial reconstruction. *Plast Reconstr Surg* 72:778-785

7. Eigene Publikationen

Groener JB, Gelen D, Mogler C, Herpel E, Toth C, Kender Z, **Peichl M**, Haufe S, Haberkorn U, Sulaj A, Zemva J, Kopf S, Nawroth PP, Brune M, Rudofsky G.
BRAF V600E and Retinoic Acid in Radioiodine-Refractory Papillary Thyroid Cancer.
Horm Metab Res. 2019 Jan;51(1):69-75.

Korsch M, **Peichl M**.
Retrospective Study: Lateral Ridge Augmentation Using Autogenous Dentin: Tooth-Shell Technique vs. Bone-Shell Technique.
Int J Environ Res Public Health. 2021 Mar 19;18(6):3174

Korsch, M.; **Peichl, M**.
Retrospective Study on Tooth Shell Technique Using Endodontically Treated Teeth in Lateral Ridge Augmentation. Appl. Sci. 2021, 11, 5882.

Korsch M, **Peichl M**, Bartols A.
Lateral Alveolar Ridge Augmentation with Autologous Dentin of Periodontally Compromised Teeth: A Retrospective Study.
Int J Environ Res Public Health. 2022 Apr 10;19(8):4560.

8. Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen meinen Dank ausdrücken, die mich in den letzten Jahren unterstützt haben und zum Gelingen dieser Promotion beigetragen haben:

Ich danke meinem Doktorvater und Betreuer Herrn Prof. Dr. Michael Korsch für die freundliche Überlassung dieses sehr interessanten Themas, die wertvolle Unterstützung bei wissenschaftlichen Fragen und die engagierte Betreuung.

Besonders möchte ich den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Abteilung für Oralchirurgie der Akademie für zahnärztliche Fortbildung für die Hilfe bei der Betreuung der Studienpatientinnen und -patienten und für die gewissenhafte Dokumentation der Studiendaten danken.

Herrn Prof. Dr. Matthias Hannig, ärztlicher Direktor der Klinik für Zahnerhaltung, Parodontologie und präventive Zahnheilkunde der Universität des Saarlandes, möchte ich für Annahme meines Promotionsvorhabens danken.

Mein außerordentlicher Dank gilt auch meiner gesamten Familie für den emotionalen Rückhalt, die unermüdliche Unterstützung und vor allem das entgegenbrachte Verständnis. Ihnen ist diese Arbeit gewidmet.

9. Lebenslauf

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

10. Anhang

Anhang 1: Patientenaufklärung



Patienteninformation

Sehr geehrter Patient, sehr geehrte Patientin,

vielen Dank für Ihr Interesse an der Teilnahme an der Studie „*Augmentation transversaler Kieferkammdefizite zur Aufnahme dentaler Implantate: Vergleich der Knochenblocktransplantation nach Khoury mit einer Schalenteknik unter Verwendung von autologem Dentin (tooth-shell-technique)*“

Bei Ihnen ist ein Zahn nicht zu erhalten und die entstehende Lücke soll mit implantatgetragener Zahnersatz versorgt werden. Der Ersatz von Zähnen mit Implantaten setzt einen ausreichend breiten Knochen voraus. In vielen Fällen ist dies jedoch nicht gegeben, sodass vor der Implantation der Knochen in der Breite aufgebaut werden muss. Dies kann z.B. mit speziellen Techniken unter Verwendung von eigenem Knochen durchgeführt werden. Neuere Studien haben gezeigt, dass auch Zahnbein (Dentin) aus Zahnwurzeln eigener Zähne aufgrund seiner Ähnlichkeit zum Knochen für knochenbauende Maßnahmen eingesetzt werden kann.

Wir werden in dieser Studie zwei Techniken verwenden, um schmalen Knochen zu verbreitern:

1. Knochenblocktransplantation mit Distanzschrauben nach Prof. Dr. Khoury:

Bei dieser Technik wird aus dem Kieferwinkel (Bereich des unteren Weisheitszahns) ein Stück Knochen entnommen. Von diesem Knochenstück wird eine dünne Knochenscheibe abgetrennt und mit Schrauben auf Distanz zum Knochendefekt im Bereich der geplanten Implantation fixiert. Der Rest des Knochenstückes wird zerkleinert und damit der neu geschaffene Hohlraum zwischen der Knochenscheibe und dem Knochendefekt aufgefüllt. Dadurch wird eine deutliche Knochenverbreiterung erreicht. Abschließend wird die Wunde vernäht.

Nach 3 Monaten wird durch einen weiteren Eingriff das Implantat eingesetzt. Zeitgleich werden die Schrauben, welche zur Fixierung der Knochenscheibe dienten, entfernt.

2. Schalenteknik unter Verwendung von Zahnbein (Dentin)

Bei dieser Technik wird anstatt der oben beschriebenen Knochenscheibe eine dünne Scheibe aus der Zahnwurzel des entfernten, nicht erhaltungsfähigen Zahnes mit Schrauben auf Distanz zum Knochendefekt fixiert. Der entstandene Hohlraum zwischen der Dentinscheibe und dem Knochendefekt wird mit Spänen aus der kleingemahlten restlichen Zahnwurzel aufgefüllt. Nach 3 Monaten erfolgt die Implantation entsprechend der Knochenblocktransplantation mit Distanzschrauben nach Prof. Dr. Khoury.

Die Aufbereitung des Zahnes (Präparation der Dentinscheibe und der Dentinspäne) erfolgt direkt nach der Zahnentfernung. Die Dentinscheibe und die zermahlene Dentinspäne werden in einem speziellen Verfahren gereinigt und teilweise demineralisiert, um für das Knochenwachstum wichtige Proteine, die im Zahnbein in ausreichenden Mengen vorhanden sind, freizugeben.

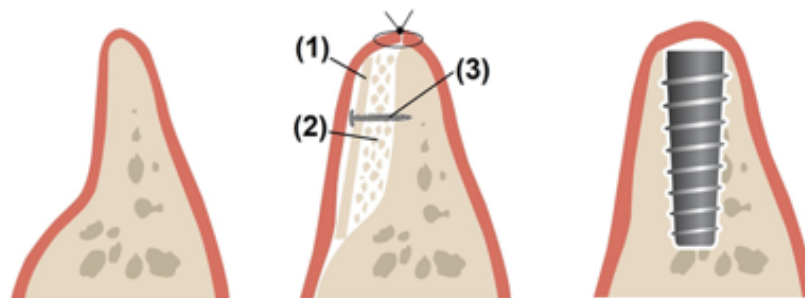
Das aufbereitete und gereinigte Zahnmaterial wird bis zum Knochenaufbau unter sterilen Bedingungen tiefgekühlt (-18°C) aufbewahrt.

In Studien konnte gezeigt werden, dass es sich bei der Verwendung von Zahnbein als Knochenersatzmaterial um ein sicheres Verfahren handelt. Obwohl ein Überleben von Bakterien durch den Reinigungsvorgang nicht vollständig ausgeschlossen werden kann, war in den vorangegangenen Studien keine erhöhte Wahrscheinlichkeit für Wundheilungsstörungen oder Infektionen festzustellen.

Das verbleibende Zahnmaterial, was nicht für den Knochenaufbau benötigt wird, wird verworfen. Eine Weitergabe, z.B. an eine Gewebebank, ist ausgeschlossen.

Welches dieser Verfahren bei Ihnen angewendet wird, wird durch ein Losverfahren (Randomisierung) direkt vor dem Eingriff entschieden.

Schematische Darstellung des Knochenaufbaus:



schmaler Knochen, der für eine Implantation nicht ausreicht

Knochen- bzw. Dentinscheibe (1) und zerkleinerter Knochen bzw. Dentin (2) fixiert mit Distanzschraube (3)

ausreichend breiter Knochen mit eingebrachtem Implantat

Aufklärung über spezielle Risiken und mögliche Komplikationen:

Wie bei jedem chirurgischen Eingriff sind Schwellungen, Wundschmerz, Nachblutungen und Blutergussbildungen im Bereich der Knochenentnahmestelle oder im Bereich des Knochenaufbaus möglich.

In seltenen Fällen (< 2%) kann es zu Wundheilungsstörungen oder Entzündungen kommen, die im Normalfall durch lokale Maßnahmen (Spülen) und ggf. durch Gabe eines Antibiotikums behandelt werden können. In schweren Fällen kann es jedoch sein, dass der Knochenaufbau nicht anheilt und entfernt werden muss.

In sehr seltenen Fällen (<1%) kann speziell bei der Knochenblockentnahme aus der Weisheitszahnregion der Unterkiefer nerv irritiert oder verletzt werden, was zu einem vorübergehenden oder sehr selten auch dauerhaften Taubheitsgefühl (< 0,1%) der Unterlippe führen kann.

Die Teilnahme an der Studie ist freiwillig und kann von Ihnen jederzeit, ohne Nennung von Gründen, widerrufen werden. Sollten Sie nicht an dieser Studie teilnehmen oder die Einwilligung zur Teilnahme widerrufen, entstehen für Sie keinerlei Nachteile für Ihre medizinische Versorgung.



Die in dieser Studie erhobenen Daten und bildgebenden Datensätze werden in pseudonymisierter Form, d.h. verschlüsselt, gespeichert. Die Ergebnisse der Studie werden nur in allgemein statistischer Aussage formuliert. Wir werden keine individuellen Daten veröffentlichen, aus denen Sie persönlich identifiziert werden könnten.

Probandenversicherung:

Für die Studie hat die Akademie für Zahnärztliche Fortbildung Karlsruhe eine Probandenversicherung abgeschlossen. Der Umfang des Versicherungsschutzes ergibt sich aus den Versicherungsunterlagen, die Sie auf Wunsch ausgehändigt bekommen.

Während der Dauer der Studie dürfen Sie sich einer anderen zahnmedizinischen Behandlung – außer in Notfällen – nur nach vorheriger Rücksprache mit dem Prüfarzt unterziehen. Von einer erfolgten Notfallbehandlung und/oder eventuell eingetretenen Gesundheitsschäden müssen Sie den Prüfarzt unverzüglich unterrichten.

Nicht versichert sind grundsätzlich Gesundheitsschäden, die durch ein grob fahrlässiges Verhalten oder vorsätzliche Zuwiderhandlung gegen die ärztlichen Anweisungen des Prüfarztes eingetreten sind.

Die Kontaktdaten des Versicherers lauten:

HDI Global SE
Ganghoferstraße 37-39
80339 München
Tel: 089-9243-262
Vers.Nr.: 76011752 03010 390 5305001

Wenn Sie sich für die Teilnahme an der Studie entscheiden, bitten wir Sie, die Einwilligungserklärung zu unterschreiben.

Für Ihre Mitarbeit möchten wir uns bei Ihnen herzlich bedanken.

PD Dr. Michael Korsch M.A.
Leiter der Chirurgie

Anhang 2: Einwilligungserklärung



Pat.:

Straße

Ort

Pat.Nr.:

Einwilligungserklärung

Titel der Studie:

„Augmentation transversaler Kieferkammdefizite zur Aufnahme dentaler Implantate: Vergleich der Knochenblocktransplantation nach Khoury mit einer Schalenteknik unter Verwendung von autologem Dentin (tooth-shell-technique)“

Ich habe die Informationsschrift gelesen und wurde zudem mündlich durch Herrn/Frau _____ über das Ziel und den Ablauf der Studie sowie über die Risiken ausführlich und verständlich aufgeklärt. Im Rahmen des Aufklärungsgesprächs hatte ich die Gelegenheit, Fragen zu stellen. Alle meine Fragen wurden zu meiner Zufriedenheit beantwortet. Ich stimme der Teilnahme an der Studie zu. Die Teilnahme ist freiwillig und kann von mir jederzeit ohne Nennung von Gründen und ohne Nachteile für meine gesundheitliche Versorgung widerrufen werden. Für meine Entscheidung hatte ich ausreichend Zeit.

Ein Exemplar der Informationsschrift und der Einwilligungserklärung habe ich erhalten.

Datenschutz

Im Rahmen wissenschaftlicher Untersuchungen werden persönliche Daten von Ihnen erhoben und verarbeitet. Die Verarbeitung der Daten erfolgt nach gesetzlichen Bestimmungen und setzt gemäß Art. 6 Abs. 1 lit. a der Datenschutz-Grundverordnung (DSGVO) folgende Einwilligungserklärung voraus:

Ich wurde darüber aufgeklärt und stimme freiwillig zu, dass meine in der Studie erhobenen Daten, insbesondere Angaben über meine Gesundheit, zu den in der Informationsschrift beschriebenen Zwecken in pseudonymisierter (verschlüsselter) Form aufgezeichnet, ausgewertet und zum Zwecke der wissenschaftlichen Auswertung weitergegeben werden können. Dritte erhalten keinen Einblick in personenbezogene Unterlagen. Bei der Veröffentlichung von Ergebnissen der Studie wird mein Name ebenfalls nicht genannt.

Zu den personenbezogenen Daten haben nur der Studienleiter und die studienbetreuenden Ärzte Zugang. Diese unterliegen der ärztlichen Schweigepflicht und müssen den Datenschutz beachten.

Für die Datenverarbeitung im Rahmen dieser Studie sind verantwortlich:

PD Dr. Michael Korsch M.A. (Studienleiter)
ZA Marco Peichl M.A.
Akademie für zahnärztliche Fortbildung, Lorenzstraße 7, 76135 Karlsruhe
Tel.: 0721-9181-130, e-mail: poliklinik@za-karlsruhe.de

Der Datenschutzbeauftragte der Akademie für zahnärztliche Fortbildung, als Institution der Landeszahnärztekammer Baden-Württemberg, ist:

RA Stefan Oschmann
Landeszahnärztekammer Baden-Württemberg, Albstadtweg 9, 70567 Stuttgart



Tel: 0711-2284552, e-mail: Oschmann@lzk-bw.de

Personenbezogene Daten werden solange gespeichert, wie sie zur Erfüllung des Zweckes erforderlich sind. Die pseudonymisierten Datensätze werden nach Studienabschluss 10 Jahre aufbewahrt.

Der Betroffene hat ein Recht auf Auskunft über die zu seiner Person gespeicherten Daten nach Art. 15 DSGVO. Er hat ein Recht auf Berichtigung oder Ergänzung fehlerhafter oder unvollständiger personenbezogener Daten nach Art. 16 DSGVO und auf Löschung seiner Daten nach Art. 17 DSGVO.

Für die Dauer der Bearbeitung von Anträgen auf Berichtigung oder Löschung hat der Betroffene ein Recht auf Einschränkung der Verarbeitung nach Art. 18 DSGVO.

Der Betroffene kann zudem die Herausgabe seiner personenbezogenen Daten in einem strukturierten, gängigen und maschinenlesbaren Format (Recht auf Datenübertragbarkeit) nach Art. 20 DSGVO verlangen. Der Betroffene hat das Recht, erteilte Einwilligungen zur Verarbeitung seiner personenbezogenen Daten nach Art. 6 Abs. 1 a) oder Art. 9 Abs. 2 a) jederzeit zu widerrufen (Art. 7 DSGVO).

Der Betroffene hat das Recht, bei einer Aufsichtsbehörde Beschwerde einzulegen. Für Baden-Württemberg ist dies:

Landesbeauftragter für Datenschutz und Informationsfreiheit Baden-Württemberg
Königstraße 10a, 70173 Stuttgart
Tel.: 0711 / 61 55 41 – 0, e-mail: poststelle@lfdi.bwl.de

Mir ist bekannt, dass diese Einwilligung jederzeit schriftlich oder mündlich ohne Angabe von Gründen widerrufen werden kann, ohne dass mir dadurch Nachteile für meine medizinische Versorgung entstehen. Die Rechtmäßigkeit der bis zum Widerruf erfolgten Datenverarbeitung wird davon nicht berührt. In diesem Fall kann ich entscheiden, ob die von mir erhobenen Daten gelöscht werden sollen oder weiterhin für die Zwecke der Studie verwendet werden dürfen.

Ort, Datum

Name, Vorname des Teilnehmers (in Druckbuchstaben)

Unterschrift des Teilnehmers

Aufklärende Person

Der Patient wurde von mir im Rahmen eines Gesprächs über das Ziel und den Ablauf der Studie sowie über die Risiken aufgeklärt. Ein Exemplar der Informationsschrift und der Einwilligungs- bzw. Datenschutzerklärung habe ich dem Patienten ausgehändigt.

Ort, Datum

Druckbuchstaben)

Name, Vorname der aufklärenden Person (in

Unterschrift der aufklärenden Person

Anhang 3: Erfassung postoperativer Beschwerden/Analgetikaverbrauch

Patientenname:

geb.:

Pat. Nr.:

Behandler:

Schmerzen

Datum:

1. Tag postoperativ:

Keine Schmerzen

unerträgliche Schmerzen



Datum:

2. Tag postoperativ:

Keine Schmerzen

unerträgliche Schmerzen



Datum:

3. Tag postoperativ:

Keine Schmerzen

unerträgliche Schmerzen



Datum:

7. Tag postoperativ:

Keine Schmerzen

unerträgliche Schmerzen



Datum:

14. Tag postoperativ:

Keine Schmerzen

unerträgliche Schmerzen



Schwellung

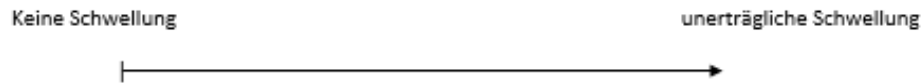
Datum:

1. Tag postoperativ:



Datum:

2. Tag postoperativ:



Datum:

3. Tag postoperativ:



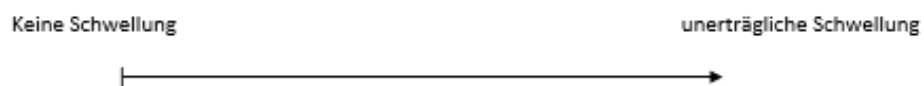
Datum:

7. Tag postoperativ:



Datum:

14. Tag postoperativ:



Name:	
Geburtsdatum:	
Pat. Nr.:	
Tage nach der OP	Anzahl der Schmerztabletten
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	
14	

Anleitung zum Ausfüllen des Schmerz- und Schwellungsbogens

Sehr geehrte Patientin,

sehr geehrter Patient,

vielen Dank, dass Sie sich die Zeit nehmen unseren Schmerz- und Schwellungsbogen auszufüllen. Unser Ziel ist es hierbei eine anonyme Untersuchung zu den Beschwerden nach verschiedenen zahnärztlichen und oralchirurgischen Maßnahmen durchzuführen, die es ermöglichen soll, einen Vergleich zwischen verschiedenen Behandlungen wie Füllungen, Wurzelkanalbehandlungen oder Implantaten zu ziehen.

Ihre Bewertung erfolgt dabei mit der unten abgebildeten Pfeilskala (sogenannte „visuelle Analogskala“):

Keine Schmerzen unerträgliche Schmerzen



Um eine Verfälschung der Ergebnisse zu verhindern, muss der Bogen immer um 12:00 Uhr mittags ausgefüllt werden. Wir würden Sie bitten an den jeweils angegebenen Tagen nach dem Eingriff einen vertikalen Strich an der Stelle zu machen, an der Sie Ihre Beschwerden einordnen. Dies kann beispielsweise so aussehen (rote Markierung):

„Ich habe fast keine Schmerzen“:



„Ich habe mittelstarke Schmerzen“:



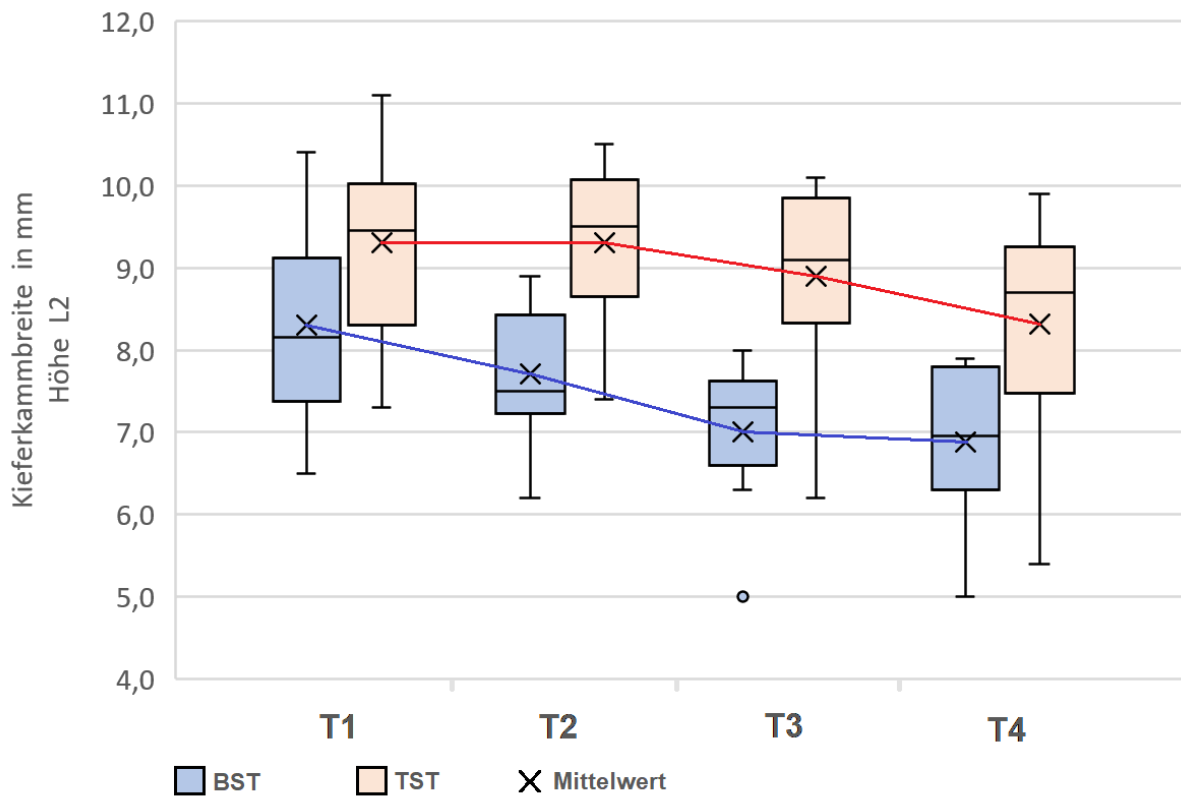
„Ich habe unerträgliche Schmerzen“:



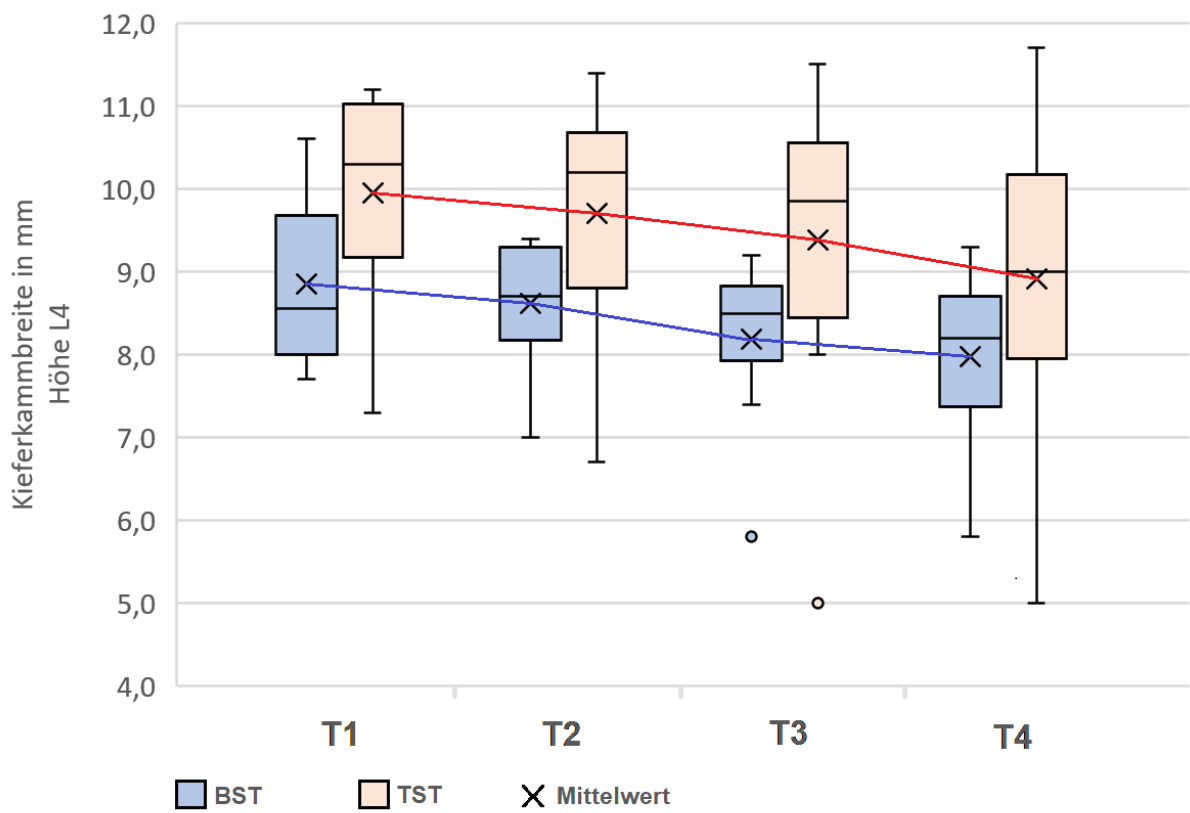
Sobald Sie keine Schmerzen und keine Schwellung mehr spüren würden wir Sie bitten uns den ausgefüllten Fragebogen wieder mitzubringen. Ihre Daten werden von uns selbstverständlich anonymisiert verarbeitet. Vielen Dank für Ihre Mitarbeit!

Ihr Akademie-Team

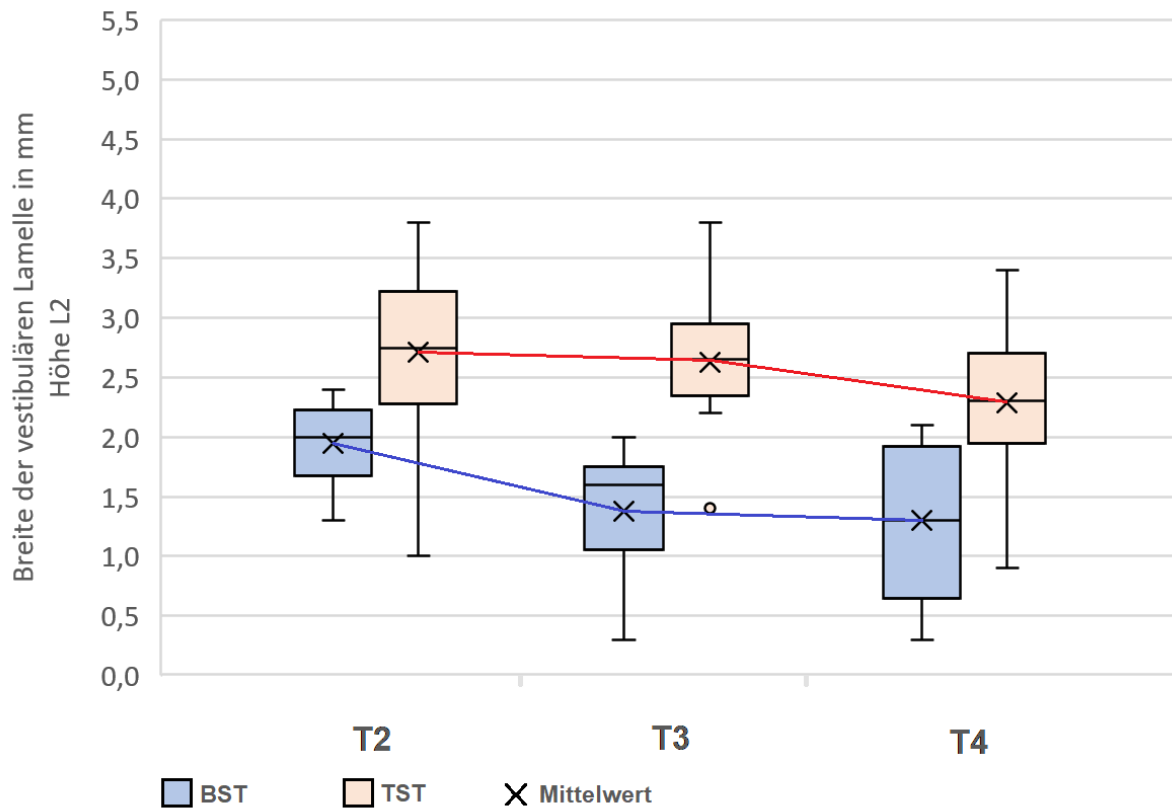
Anhang 4: Darstellung der Mittelwerte und der Standardabweichungen der Kieferkammbreite auf Höhe L2 zu den Zeitpunkten T1-T4



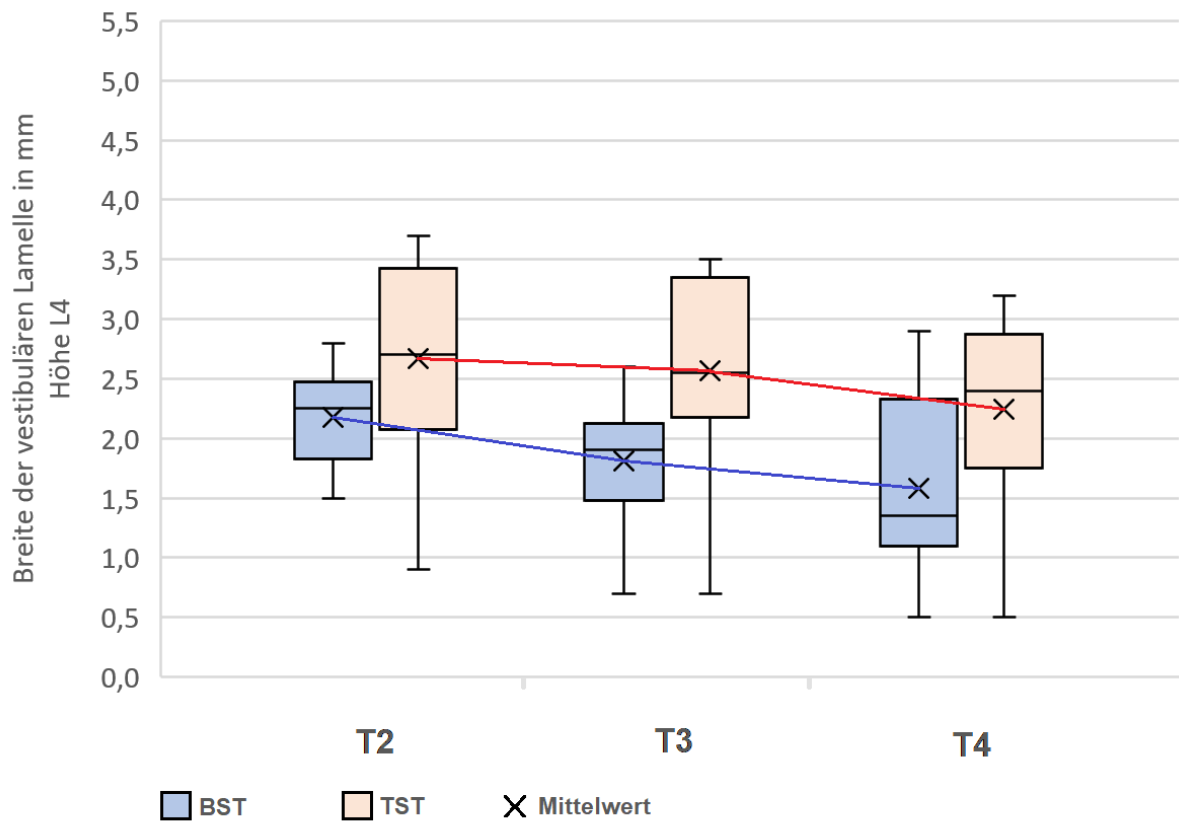
Anhang 5: Darstellung der Mittelwerte und der Standardabweichungen der Kieferkammbreite auf Höhe L4 zu den Zeitpunkten T1-T4



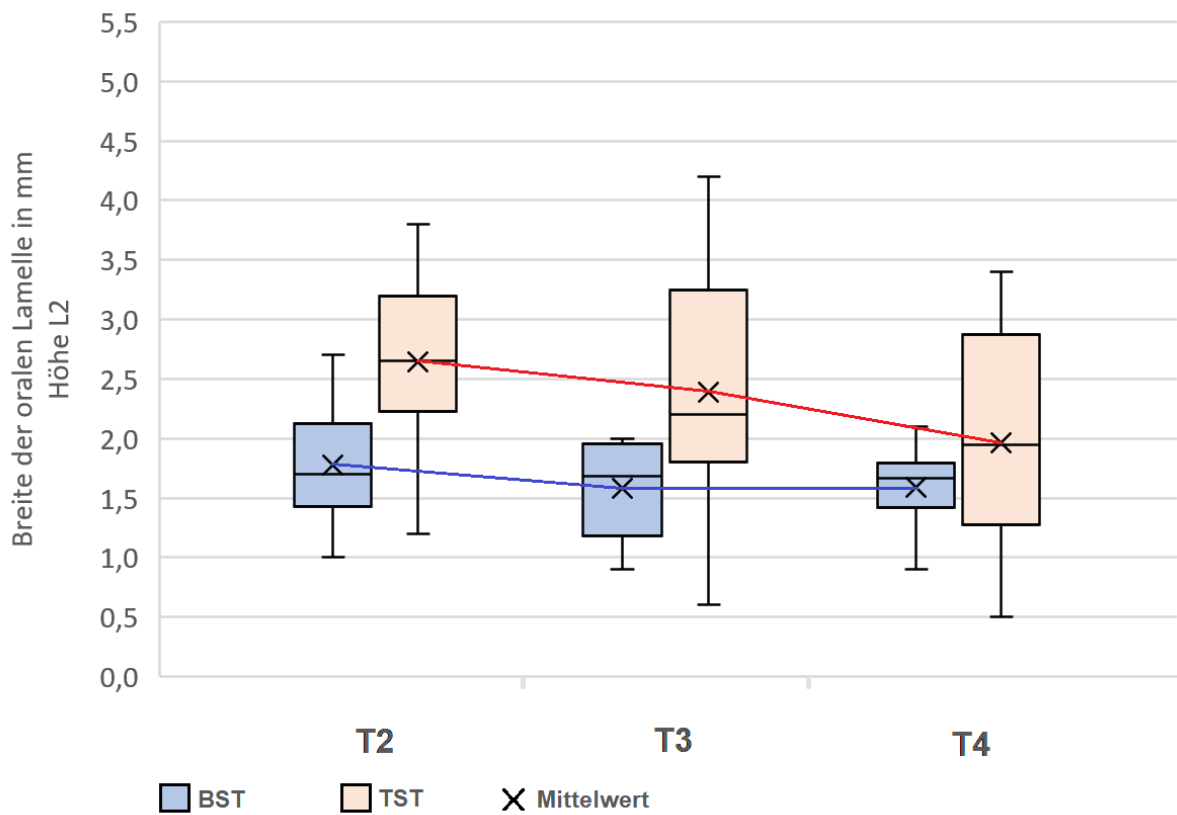
Anhang 6: Darstellung der Mittelwerte und der Standardabweichungen der Breite der vestibulären Lamelle auf Höhe L2 zu den Zeitpunkten T2-T4



Anhang 7: Darstellung der Mittelwerte und der Standardabweichungen der Breite der vestibulären Lamelle auf Höhe L4 zu den Zeitpunkten T2-T4



Anhang 8: Darstellung der Mittelwerte und der Standardabweichungen der Breite der oralen Lamelle auf Höhe L2 zu den Zeitpunkten T2-T4



Anhang 9: Darstellung der Mittelwerte und der Standardabweichungen der Breite der oralen Lamelle auf Höhe L4 zu den Zeitpunkten T2-T4

