

Aus der Klinik für Zahnärztliche Prothetik und Werkstoffkunde
der medizinischen Fakultät der Universität des Saarlandes, Homburg/Saar
Direktor: Prof. Dr. Matthias Karl

**Langzeit-Analyse des fazialen Alveolarfortsatzes
nach Implantation und Augmentation**

Dissertation zur Erlangung des Grad eines Doktors der Zahnheilkunde
der medizinischen Fakultät
der Universität des Saarlandes
2020

vorgelegt von David Klingert
geb. am 29.03.1988 in Lörrach

Tag der Promotion:	06.07.2020
Dekan:	Prof. Dr. M.D. Menger
Berichterstatter:	Prof. Dr. M. Karl
	Prof. Dr. Dr. K. Freier

Meiner Familie in Dankbarkeit

Inhaltsverzeichnis

I	Zusammenfassung	1
1	Einleitung	9
1.1	Alveolarknochenheilung	9
1.2	Knochendefekte und Augmentation	10
1.3	Ziel der Studie	12
2	Material und Methode	13
2.1	Patientenauswahl und Randomisierung	13
2.2	Studienablauf	13
2.3	Auswertung	14
3	Ergebnisse	22
3.1	Patientenkollektiv	22
3.2	Vergleich augmentierte vs. kontralaterale Kieferabschnitte 5-Jahres-Ergebnisse	23
3.2.1	Vergleich der 4 Gruppen 5-Jahres-Ergebnisse	23
3.2.2	Vergleich Sofort- und Frühimplantation 5-Jahres-Ergebnisse	24
3.2.3	Vergleich Sofort- und Frühversorgung 5-Jahres-Ergebnisse	25
3.2.4	Vergleich mittlere und seitliche Schneidezähne 5-Jahres-Ergebnisse	25
3.2.5	Vergleich aller Patienten 5-Jahres-Ergebnisse	26
3.3	Vergleich augmentierte Kieferabschnitte 0,5 Jahre vs. 5 Jahre postoperativ	27
3.3.1	Vergleich der vier Gruppen	27
3.3.2	Vergleich Sofort- und Frühimplantation	28
3.3.3	Vergleich Sofort- und Frühversorgung	30
3.3.4	Vergleich mittlere und seitliche Schneidezähne	31
3.3.5	Vergleich aller Patienten	32

3.4	Vergleich der kontralateralen natürlichen Kieferabschnitte 0,5 Jahre und 5 Jahre postoperativ	32
3.4.1	Vergleich der vier Gruppen der natürlichen Kieferabschnitte	32
3.4.2	Vergleich Sofort- und Frühimplantation auf der natürlichen Seite	34
3.4.3	Vergleich Sofort- und Frühversorgung	35
3.4.4	Vergleich mittlere und seitliche Schneidezähne	36
3.4.5	Vergleich der natürlichen Gegenseite aller Patienten	37
3.5	Volumenänderung augmentierte Seite und natürliche Seite	38
4	Diskussion	40
5.	Schlussfolgerung	46
6	Literaturverzeichnis	47
	Lebenslauf	
	Danksagung	

Zusammenfassung

Einleitung

Dem Verlust des Zahnes folgt die Resorption des Alveolarfortsatzes, was sich in funktioneller und vor allem ästhetischer Hinsicht ungünstig auswirken kann. Dies betrifft besonders den Oberkiefer-Frontzahnbereich mit seiner dünnen bukkalen Knochenwand. In der Implantationspraxis versucht man daher häufig, auf der vestibulären Seite Knochenmaterial zu augmentieren. Unabhängig vom verwendeten Material unterliegt diese Augmentation einer gewissen Schrumpfung. Bei der Implantatsetzung stellt sich dabei prinzipiell die Frage nach einer Überkonturierung des aufzubauenden Areals am Alveolarfortsatz.

Ziel dieser Arbeit ist es, nach Einzelimplantatversorgung mit simultaner Augmentation im Oberkiefer-Frontzahnbereich das Volumen an der Augmentationsstelle und am gegenüberliegenden natürlichen Zahn nach 5 Jahren zu bestimmen und das Ausmaß der Resorption zu analysieren. Die Hypothese war, dass durch ein entsprechendes Maß an Überkonturierung bei Augmentation ein harmonisches Langzeitergebnis erzielt werden kann.

Material und Methode

48 Patienten, die randomisiert in vier Gruppen Sofort- und Frühimplantation sowie Sofort- und Frühversorgung eingeteilt waren, erhielten ein Frontzahnimplantat und gleichzeitig eine Augmentation der vestibulären Knochenwand mit bovinem Hydroxylapatit (BioOss, Geistlich, Wolhusen, Schweiz). Dabei versuchte der Operateur, durch eine 10-20-prozentige Überkonturierung einer zu erwartenden Resorption zu begegnen.

Nach einer Tragedauer von sechs Monaten erfolgte eine Volumenbestimmung der vestibulären Region an den Implantaten und an den gegenüberliegenden gesunden Nachbarzähnen. Man fertigte dafür Gipsmodelle an, um sie im DVT (Morita 3D Accuitomo, Japan) zu scannen und den DICOM-Datensatz im Software Programm CoDiagnostiX (dental wings, Berlin, Deutschland) zu segmentieren und volumetrisch zu vermessen.

Nachdem die Implantatkronen 5 Jahre in situ waren, wurde bei 29 Patienten in der gleichen Verfahrensweise eine Untersuchung der bestehenden Volumenverhältnisse am Implantat und dem gegenüberliegenden natürlichen Zahn durchgeführt. Durch den Vergleich der Volumenwerte sollten Hinweise auf die Volumenstabilität des Augmentationsmaterials erbracht werden, die eine Empfehlung über das Ausmaß der Überkonturierung zuließen. Die statistische Analyse erfolgte mit Ein- und Zweistichproben-t-Tests.

Ergebnisse

Vergleich augmentierter Kieferabschnitt vs. natürlicher Kieferabschnitt

Nach einer Implantat-Tragedauer von 5 Jahren verglich man die Volumina der augmentierten Seiten mit denen der natürlichen Seiten. In den in den Gruppen der Sofortimplantation ergab sich eine Differenz von $4,3\text{mm}^3$, bei der Frühimplantation $2,0\text{mm}^3$ ($p=0,70$). Die Gruppen der Sofortversorgung wiesen eine Differenz von $13,6\text{mm}^3$ auf und die der Frühversorgung eine Differenz von $14,6\text{mm}^3$ ($p=0,20$). Der Volumenvergleich der mittleren Schneidezähne ergab einen Unterschied von $12,4\text{mm}^3$, bei den seitlichen Schneidezähnen $20,0\text{mm}^3$ ($p=0,10$). Das messtechnisch erfasste Volumen der vestibulär augmentierten Implantatregionen lag durchschnittlich bei $183,8\text{mm}^3$. Auf der Seite des natürlichen Zahnes bei $182,8\text{mm}^3$ bei einer Differenz von $1,0\text{mm}^3$ ($p=1,0$).

Augmentierter Kieferabschnitt 0,5 Jahre und 5 Jahre post operationem

Gruppe 1a wies eine Volumen-Abnahme von $12,4\%$ auf ($p=0,13$), Gruppe 1b von $15,0\%$ ($p=0,13$). In Gruppe 2a lag ein Verlust von $11,6\%$ vor ($p=0,38$), in Gruppe 2b waren es $8,7\%$ ($p=0,64$). Die Gruppen der Sofortimplantation zeigten eine Volumenabnahme von $14,1\%$ ($p=0,04$), die Gruppen der Frühimplantation von $10,4\%$ ($p=0,30$). Bei der Sofortversorgung zeigte sich eine Volumenreduktion von $12,0\%$ ($p=0,15$), bei der Frühversorgung von $12,7\%$ ($p=0,14$). Die mittleren Schneidezähne wiesen eine Abnahme von $17,8\%$ ($p=0,03$) auf, die seitlichen Schneidezähne eine Zunahme von $3,2\%$ ($p=0,68$).

Der Vergleich aller augmentierten Kieferabschnitte nach 6 Monaten und 5 Jahren postoperativ ergab eine Reduktion des Volumens um 12,4% ($p=0,03$).

Natürlicher Kieferabschnitt 0,5 Jahre und 5 Jahre post operationem

In Gruppe 1a wurde nach 5 Jahren eine Volumen-Zunahme von $18,0\text{mm}^3$ gemessen, in Gruppe 1b ein Volumenverlust von $55,5\text{mm}^3$. In Gruppe 2a lag ein Verlust von $8,8\text{mm}^3$ vor und in Gruppe 2b ein Verlust von $32,0\text{mm}^3$. Die Gruppen der Sofortimplantation zeigten eine Volumenabnahme von 12,2% ($p=0,18$), wobei die Gruppen der Frühimplantation eine Abnahme von 2,1% ($p=0,88$) aufwiesen. Bei der Sofortversorgung stellte man eine Volumen-Zunahme von 5,9% ($p=0,38$) fest, bei der Frühversorgung eine Reduktion von 15,8% ($p=0,25$). Die mittleren Schneidezähne wiesen eine Abnahme von 9,1% ($p=0,28$) auf, die seitlichen Schneidezähne von 9,5% ($p=0,95$). Der Vergleich aller natürlichen Kieferabschnitte nach 6 Monaten und 5 Jahren ergab eine Reduktion des Volumens um 5,4% ($p=0,49$).

Gesamte Volumenänderung an augmentierter Seite und natürlicher Seite

Auf der augmentierten Implantatseite lag der 0,5-Jahreswert bei $218,9\text{mm}^3$; nach 5 Jahren lag ein Wert von $184,1\text{mm}^3$ vor. Auf der kontralateralen natürlichen Seite waren es nach 0,5 Jahren $210,4\text{mm}^3$ und nach 5 Jahren $186,7\text{mm}^3$. Der gemittelte Volumenrückgang betrug somit auf der Implantatseite 12,4% und auf der gegenüberliegenden natürlichen Seite 5,4%.

Diskussion

Bei der Implantation im Oberkiefer-Frontbereich und gleichzeitiger vestibulärer Augmentation mit bovinem Hydroxylapatit wurde nach 0,5 Jahren und nach 5 Jahren Volumenbestimmungen durchgeführt. Es wurde eine 12-prozentige Volumenabnahme ($p=0,03$) des messtechnisch erfassten augmentierten Kieferabschnittes beobachtet, während am natürlichen Kieferabschnitt eine 5,4-prozentige Reduktion ($p=0,5$) gefunden wurde.

Da beim 5-Jahresvergleich der augmentierten Seite mit der gegenüberliegenden natürlichen Seite ein Gesamtunterschied von nur $1,0 \text{ mm}^3$ vorlag ($p=1,0$) kann man davon ausgehen, dass bei einer 10-20-prozentige Überkonturierung des Defekts mit bovinem Hydroxylapatit ein ästhetisch ansprechendes und ausgeglichenes Ergebnis zu erzielen ist. Mit der beschriebenen Vorgehensweise erreichte man ein weitgehend harmonisches Erscheinungsbild des Kieferkammes. Dies bestätigt die Hypothese, dass eine 10-20-prozentige Überkonturierung der vestibulären Augmentation mit xenogenem Knochenersatzmaterial im Oberkiefer-Frontbereich die zu erwartende Resorption angemessen kompensiert.

Da die vorgenommenen Messungen mittels Gipsmodelle erfolgten, die mit einem digitalen Volumetomographen gescannt wurden, ist die vollständige Vermeidung von Strahlenbelastungen für die Patienten als Vorteil zu erwähnen.

Summary

Introduction

The loss of a tooth is followed by the resorption of the alveolar process, which can be unfavourable from a functional and above all aesthetic point of view. This particularly affects the anterior maxilla with its thin buccal bone wall. In implantation practice, therefore, attempts are often made to augment bone material on the vestibular aspect. Regardless of the material used, this augmentation is subject to a certain degree of shrinkage. When placing the implant, the question of overcontouring arises with respect to the augmentation area at the alveolar ridge.

The aim of this study is to determine the volume at the augmentation site and at the opposite natural tooth site after 5 years following single implant treatment with simultaneous augmentation in the maxillary anterior region, and to analyze the extent of resorption. The hypothesis was that a harmonious long-term result should be achieved by an appropriate degree of overcontouring during augmentation.

Material and methods

48 patients, randomly divided into four groups of immediate and early implantation and immediate and early restoration, received an anterior implant and simultaneous augmentation of the vestibular bone wall using bovine hydroxyapatite (BioOss, Geistlich, Wolhusen, Switzerland). The surgeon tried to counteract expected resorption by a 10-20% overcontouring. After a wearing period of six months, a volume determination of the vestibular region at the implants and at the opposite healthy neighbouring teeth was carried out. Plaster models were made for this purpose, which were scanned in the DVT (Morita 3D Accuitomo, Japan) and the DICOM data set was segmented and volumetrically measured in the software program CoDiagnostiX (dental wings, Berlin, Germany).

After the implant crowns had been in situ for 5 years, an examination of the existing volume ratios on the implantss and the opposing natural teeth was performed on 29 patients using the same procedure. The comparison of the volume values was intended to provide indications of the volume stability of the augmentation material, which allowed a recommendation on the extent of overcontouring. Statistical analysis was performed with one- and two-sample t-tests.

Results

Comparison of augmented maxilla section vs. natural maxialla section

After an implant wearing period of 5 years, the volumes of the augmented sides were compared with those of the natural sides. In the groups of immediate implant placement there was a difference of 4.3mm³, in the early implant placement groups 2.0mm³ (p=0.70). The groups for immediate restoration showed a difference of 13.6mm³ and those for early restoration showed a difference of 14.6mm³ (p=0.20). The volume comparison of the middle incisors showed a difference of 12.4mm³, the lateral incisors 20.0mm³ (p=0.10). The measured volume of the vestibular augmented implant regions was 183.8mm³ on average. On the side of the natural tooth at 182.8mm³ with a difference of 1.0mm³ (p=1.0).

Augmented maxilla section 0.5 years and 5 years post operationem

Group 1a showed a volume decrease of 12.4% (p=0.13), Group 1b of 15.0% (p=0.13). Group 2a showed a loss of 11.6% (p=0.38), Group 2b 8.7% (p=0.64). The immediate implantation groups showed a volume decrease of 14.1% (p=0.04), the early implantation groups 10.4% (p=0.30). Immediate restoration showed a volume reduction of 12.0% (p=0.15), early restoration 12.7% (p=0.14). The central incisors showed a decrease of 17.8% (p=0.03), the lateral incisors an increase of 3.2% (p=0.68).

The comparison of all augmented jaw sections after 6 months and 5 years postoperatively showed a reduction in volume of 12.4% (p=0.03).

Natural maxilla section 0,5 years and 5 years post operationem

In group 1a an increase in volume of 18.0mm³ was measured after 5 years, in group 1b a loss of volume of 55.5mm³. In group 2a there was a loss of 8.8mm³ and in group 2b a loss of 32.0mm³. The immediate implantation groups showed a volume decrease of 12.2% (p=0.18), with the early implantation groups showing a decrease of 2.1% (p=0.88). Immediate restoration showed an increase in volume of 5.9% (p=0.38), early restoration showed a reduction of 15.8% (p=0.25). The central incisors showed a decrease of 9.1% (p=0.28), the lateral incisors 9.5% (p=0.95).

The comparison of all natural jaw sections after 6 months and 5 years showed a reduction in volume of 5.4% (p=0.49).

Overall volume change on the augmented side and natural side

On the augmented implant side, the 0.5-year value was 218.9 mm³; after 5 years, the value was 184.1 mm³. On the contralateral natural side, the value was 210.4mm³ after 0.5 years and 186.7mm³ after 5 years. The average volume decrease thus amounted to 12.4% on the implant side and 5.4% on the opposite

Discussion

In the case of implantation in the maxillary anterior region and simultaneous vestibular augmentation with bovine hydroxyapatite, volume measurements were performed after 0.5 years and after 5 years. A 12 percent volume reduction ($p=0.03$) of the augmented jaw section measured by measuring techniques was observed, while a 5.4 percent reduction ($p=0.5$) was found in the natural jaw section.

Since the 5-year comparison of the augmented side with the opposite natural side showed a total difference of only 1.0 mm^3 ($p=1.0$), it can be assumed that an aesthetically pleasing and balanced result can be achieved with a 10-20 percent overcontouring of the defect using bovine hydroxyapatite. With the described procedure, a largely harmonious appearance of the alveolar ridge was achieved. This confirms the hypothesis that a 10-20% overcontouring of the vestibular augmentation with xenogenic bone replacement material in the maxillary anterior region adequately compensates for the expected resorption.

Since the measurements were made using plaster casts scanned with a digital volume tomograph, the complete avoidance of radiation exposure for the patients should be mentioned as an advantage.

1. Einleitung

1.1 Alveolarknochenheilung

Nach dem Verlust eines Zahns gilt die Regel, möglichst zeitnah einen adäquaten Zahnersatz einzugliedern, um die kaufunktionelle Stabilität und die Ästhetik wiederherzustellen. Im Frontzahnbereich ist der ästhetische Aspekt besonders betroffen, da ein in diesem Gebiet fehlender Zahn das äußere Erscheinungsbild des Patienten wesentlich stärker beeinflusst als beispielsweise ein fehlender Molar. Aus diesem Grund findet die Sofort- bzw. Früh-Implantation vor allem in diesem Kieferabschnitt reges Interesse.

Sofort- und Früh-Implantation bergen jedoch gewisse Risiken, da sie in einem Zeitraum stattfinden, in dem der Alveolarknochen und das Weichgewebe gewissen Veränderungen durch Heilungsprozesse ausgesetzt sind (Schropp et al. 2003, Araujo et al. 2015). Experimente zeigten, dass die stärksten Veränderungen des Hartgewebes in den ersten 2 bis 3 Monaten nach Zahnextraktion stattfinden (Cardaropoli et al. 2003, Araujo & Lindhe 2005). Hierbei sind zum einen das Weichgewebe und zum anderen das Hartgewebe zu betrachten, Gewebearten also, die sich stets gegenseitig beeinflussen. Diese Tatsache betrifft besonders den Frontzahnbereich des Oberkiefers, der die Ästhetik maßgeblich prägt. Bei Implantaten kann es beispielsweise zu einer vertikalen Rezession der bukkalen Knochenlamelle kommen – es besteht also erhöhtes Risiko, dass das Weichgewebe zurückweicht (Benic et al. 2012, Kuchler et al. 2016), was in ungünstigen Fällen zu freiliegenden Implantatwindungen führen kann. Die vertikale Ausprägung der bukkalen Knochenwand hängt direkt von der Dicke der bukkalen Lamelle ab (Kuchler et al. 2016, Ferrus et al. 2010). Die Aufrechterhaltung der bukkalen Knochenwand ist einer der entscheidenden Faktoren für einen implantologischen Erfolg. Nach Zahnextraktion finden Resorptionsprozesse statt, die vor allem im marginalen und bukkalen Bereich des Alveolarfortsatzes auftreten (Misawa et al. 2015). Für die Sofort- bzw. Früh-Implantation ist es daher entscheidend, wie stark in vertikaler und in oro-vestibulärer Richtung die bukkale Wand ist.

Nach Sofortimplantation mit sich anschließender viermonatiger Heilungsphase wurde in einer Studie ein signifikanter Unterschied zwischen Alveolen mit einer bukkalen Wand mit einem Durchmesser $> 1\text{mm}$ und einer Wand $< 1\text{mm}$ festgestellt. So zeigte sich bei dünnen Wänden ein prozentualer Verlust von bis zu 43% im Vergleich zu 21% bei dicken Wänden, gemessen von der Implantatoberkante bis zum äußeren Knochenrand. Der Spalt zwischen Implantatoberfläche und innerer Knochenwand spielt vor allem in der Horizontalen eine entscheidende Rolle, da tendenziell mehr Knochenneubildung stattfindet, je größer der Abstand ist. Auch hier zeigte sich bis zu 17% mehr Defektfüllung mit bukkaler Lamelle $> 1\text{mm}$ Durchmesser (Ferrus et al. 2010).

Die Implantatposition in oro-vestibulärer Richtung ist mitentscheidend für einen implantologischen Erfolg. Um nach Zahnextraktion der Resorption der knöchernen Strukturen, insbesondere der bukkalen Lamelle, entgegenzuwirken, hat es sich in der Klinik etabliert, mit Eigenknochen oder Knochenersatzmaterial eine Socketpreservation durchzuführen oder bei Sofortimplantation den Spalt zwischen Implantat und Knochen aufzufüllen. Hartgewebsdefekte, die im Zuge einer Socketpreservation mit bovinem Knochenersatzmaterial aufgefüllt wurden, zeigten eine 3%ige Reduktion des Hartgewebes im Vergleich zu 25% der Testgruppe (Araujo et al. 2015). Auch andere Studien berichten von einem wesentlich geringeren Knochenabbau nach Socketpreservation (Cardaropoli et al. 2012). Zusammenfassend lässt sich folgern, dass auch bei der Verwendung von Knochenersatzmaterialien zwar den Resorptionsprozessen entgegengewirkt werden kann, diese allerdings nicht vollständig verhindert werden können. Die verschiedenen Arten und Zeitpunkte der Implantation in Verbindung mit Augmentation bei ausgeprägten Knochendefekten sollen kurz dargestellt werden.

1.2 Knochendefekte und Augmentation

In der vorliegenden Studie wurde nach unterschiedlichen Implantationsprotokollen in Anlehnung an den ITI-Treatment Guide verfahren. Zu untersuchen sind Typ I, die Sofortimplantation, bei der die Implantation am Tag der Zahnextraktion durchgeführt wird, und Typ II, bei der die Implantation 4 bis 8

Wochen nach Extraktion und vollständiger Weichgewebsheilung stattfindet (Hämmerle et. al. 2004). Des Weiteren wiesen alle Patienten knöcherne Defekte bzw. ein teilweises Fehlen der bukkalen Lamelle auf, was durch Augmentation ausgeglichen werden sollte.

Im Zuge der Knochenheilung finden Resorptionsprozesse statt, die zu einem Rückgang des Knochens führen. Hierbei treten verschiedene Ausprägungen des Defektes. Bei einem partiellen Defekt, wie z.B. einer apikalen Fenestration, bei der noch eine krestale knöcherne Brücke vorhanden ist, kann es zu einem sechsmal höheren Verlust des vertikalen Knochenangebots kommen. Bei v-förmigen Dehiszenz nach Extraktion kann bis zu dreimal mehr vertikale Höhe verloren gehen (Chen et. al. 2016). Diese Erkenntnisse sind von besonderer Bedeutung bei Sofort- und Früh-Implantationen, bei denen die Knochenheilung noch nicht bzw. nur partiell stattgefunden hat. Um die Chance zu erhöhen, den fazialen Restknochen zu stabilisieren und vor zu starker Resorption zu bewahren, hat sich die faziale Augmentation mit Eigenknochen oder verschiedenen Knochenersatzmaterialien bewährt (Buser et al. 2011, Ducommun et al. 2019). Dieses auch in dieser Studie angewandte Verfahren simultan zur Implantation setzt allerdings ein genügendes Knochenangebot für Primärstabilität des gesetzten Implantats voraus. Bei größeren Defekten, bei denen dies nicht gegeben ist, muss ggf. mit Knochenblöcken zweiphasig vorgegangen werden, d.h. erst Augmentation und nach mehrmonatiger Einheilung folgt die Implantation.

Für die Augmentation stehen autogene (Eigenknochen), xenogene (artfremde, d.h. von einer anderen Spezies stammende, beispielsweise deproteinierte Rinderknochen), allogene (von gleicher Spezies, aber von einem anderen Individuum stammende) oder alloplastische (künstliche oder aus natürlichen Quellen stammende, beispielsweise Kalziumkarbonat oder bioaktive Glaskeramik) Materialien zur Verfügung. Der Eigenknochen bietet mehrere Vorteile, da er neben osteokonduktiven auch osteoinduktive und osteogenetische Eigenschaften besitzt (Hahn et. al. 2006). Osteogenetisch bedeutet, dass das Transplantat selbst knochenbildende Zellen beinhaltet. Bei der Osteoinduktion werden die ortsständigen Knochen- und Mesenchymzellen zur verstärkten

Knochenbildung angeregt. Osteokonduktion bedeutet lediglich die Bereitstellung eines Matrixgerüsts für die körpereigenen knochenbildenden Zellen, die dieses als Leitschiene nutzen können.

Beim in dieser Studie verwendeten xenogenen Material BioOss (Geistlich, Puchheim, Deutschland) handelt es sich um deproteinierten bovinen Knochen (DBBM = Deproteinized Bovine Bone Mineral), der osteokonduktive Eigenschaften besitzt. Häufig werden gezielt mehrere Lagen aufgetragen - erst Eigenknochen, dann Knochenersatzmaterial - meist in Verbindung mit einer Membran, in diesem Fall einer Kollagenmembran BioGuide (Geistlich, Puchheim, Deutschland; von Arx & Buser 2006). Durch diese Membran soll verhindert werden, dass das schnell proliferierende Weichgewebe in den zu augmentierenden Bereich einwächst und die Knochenheilung stört oder gar verhindert. Dieses Vorgehen ist auch als gesteuerte Knochenregeneration bekannt (GBR=Guided Bone Regeneration; Hämmerle et. al. 2008).

In einem zuvor bereits publizierten Teil dieser Studie konnten keine signifikanten Unterschiede des augmentierten Volumens zwischen Sofort- und Früh-Implantation sowie zwischen Sofort- und Frühversorgung sechs Monate postoperativ festgestellt werden (Heckmann et. al. 2017).

1.3 Ziel der Studie

In der vorliegenden Studie wurde beim Augmentieren des vestibulären Bereichs vom Implantat eine 10 bis 20-prozentige Überkonturierung des Augmentationsmaterials angestrebt. Es sollte die Hypothese geprüft werden, ob dieses Maß an Überkonturierung der zu erwartenden Resorption entgegenwirkt und ein harmonisches Langzeitergebnis erzielen lässt.

2. Material und Methode

2.1 Patientenauswahl und Randomisierung

Im Zeitraum von 2010 bis 2016 wurden 48 Patienten mit einem nicht erhaltungswürdigen Zahn in der Oberkieferfront (mittlerer oder seitlicher Schneidezahn) für die Studie ausgewählt. Voraussetzung war, dass ein natürlicher kontralaterale Frontzahn vorlag, der ohne Füllung oder künstliche Krone war. Die Probanden waren ausschließlich Nicht-Raucher und durften unter keiner Allgemeinerkrankung leiden oder eine Dauermedikation vornehmen, die nachweislich die Wundheilung negativ beeinflusst hätte, wie z.B. Kortikoid- oder Bisphosphonattherapie. Die Aufteilung der Patienten wurde randomisiert mit der Software RANDOM (auf Basis von C+, Joern Loetsch, Institut für klinische Pharmakologie, Universität Frankfurt am Main, Deutschland) in 4 Gruppen zu je 12 Studienteilnehmern durchgeführt.

An der vorliegenden Studie nahmen insgesamt 17 Frauen und 12 Männer teil, wobei 17 mittlere und 12 seitliche ersetzte Schneidezähne vorlagen. Das Durchschnittsalter lag bei 54,7 Jahren (Männer 55,3 Jahre; Frauen 54,2 Jahre). Das verbliebene Studienkollektiv blieb in seiner ursprünglichen Einteilung der Gruppen, wobei Gruppe 1a noch 5 Teilnehmer, Gruppe 1b 9, Gruppe 2a 9 und Gruppe 2b 6 umfasste.

2.2 Studienablauf

Nach Genehmigung der Studie durch die Ethikkommission (Nr. 4242) wurden die Zahnlücken der Probanden mit 12 mm SLActive BL Implantaten (Straumann, Basel, Schweiz) in Verbindung mit einer vestibulären Augmentation versorgt. Als Augmentationsmaterial verwendete man BioOss (Geistlich, Puchheim, Deutschland), eine deproteinierte bovine Knochenmarix (DBBM ()), und BioGuide (Geistlich, Puchheim, Deutschland), eine Kollagenmembran. Die Operationen wurden alle vom selben MKG-Chirurgen durchgeführt. Die prothetische Versorgung der Implantate nahmen die jeweils behandelnden Zahnärzten vor. Alle zahntechnischen Arbeiten übernahm dasselbe Dentallabor (Hartwich,

Weiden). Alle Beteiligten waren an das Studienprotokoll gebunden. Die 48 Studienteilnehmer wurden randomisiert in zwei Haupt- mit jeweils zwei Untergruppen eingeteilt (Tabelle 1).

In Gruppe 1 (1a und 1b) führte man Sofortimplantation durch, wobei die Patienten von Gruppe 1a am Tage der Zahnextraktion ein Implantat und eine provisorische Krone erhielten. Nach einer 12-wöchigen Knochen- und Weichgewebsheilung erfolgte der definitive Zahnersatz. Gruppe 1b wurde ebenfalls sofort implantiert, die provisorische Versorgung erfolgte nach 4 bis 6 Wochen, der definitive Ersatz erfolgte weitere 6 bis 8 Wochen später.

Bei den Teilnehmern aus Gruppe 2 wurde eine Früh-Implantation (early implant placement), also 4 bis 6 Wochen nach Zahnextraktion durchgeführt. In Gruppe 2a wurde am selben Tag die provisorische Versorgung vorgenommen und die definitive Krone nach weiteren 10 bis 12 Wochen eingesetzt. Gruppe 2b erhielt die provisorische Krone nach einer weiteren Wartezeit von 4 bis 6 Wochen. Ebenfalls 4 bis 6 Wochen später wurde der definitive Zahnersatz eingesetzt. Somit war auch in dieser Gruppe die Therapie nach 14 bis 18 Wochen abgeschlossen (Tab. 1).

Tabelle 1: Behandlungsprotokoll der Untersuchungsgruppen

Behandlungsprotokoll der Untersuchungsgruppen	
1a	Sofortimplantation + Sofortversorgung
1b	Sofortimplantation + Frühversorgung
2a	Frühimplantation + Sofortversorgung
2b	Frühimplantation + Frühversorgung

2.3 Auswertung

Die erste studienbezogene Nachuntersuchung erfolgte 6 Monate nach Implantation. Bei allen Patienten wurden Oberkieferabformungen mit Alginat vorgenommen, wobei darauf geachtet wurde, dass das Vestibulum erfasst wurde. Anschließend wurden im selben Labor Modelle mit GC Fujirock EP (Leuven, Belgien) hergestellt. Die fertigen Gipsmodelle erfuhren ein Scanning mit

einem DVT (Morita 3D Accuitomo, Japan). Um die Modelle standardisiert und reproduzierbar im DVT untersuchen zu können, wurde eine Halterung, passend auf die Kinnauflage des DVTs hergestellt. Die Modelle wurden dann mittels Knetmasse und der „BEAM“-Einstellung des DVTs so auf der Halterung positioniert, dass der Inzisalpunkt und die vestibulären Höckerspitzen der ersten Prämolaren sagittal und horizontal justiert werden konnten (Abb. 1a und 1b).

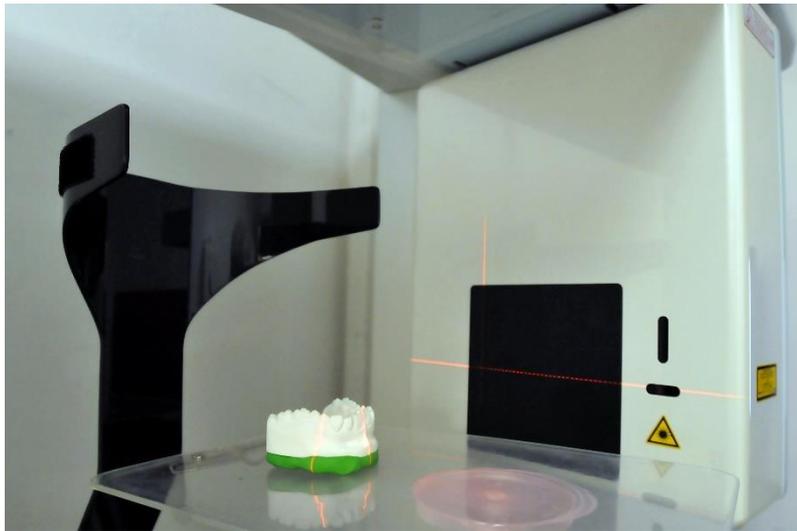


Abb. 1a: Platzierung des Modells mit Knetmasse auf der Halterung zur Ausrichtung in der Sagittalen und Horizontalen.

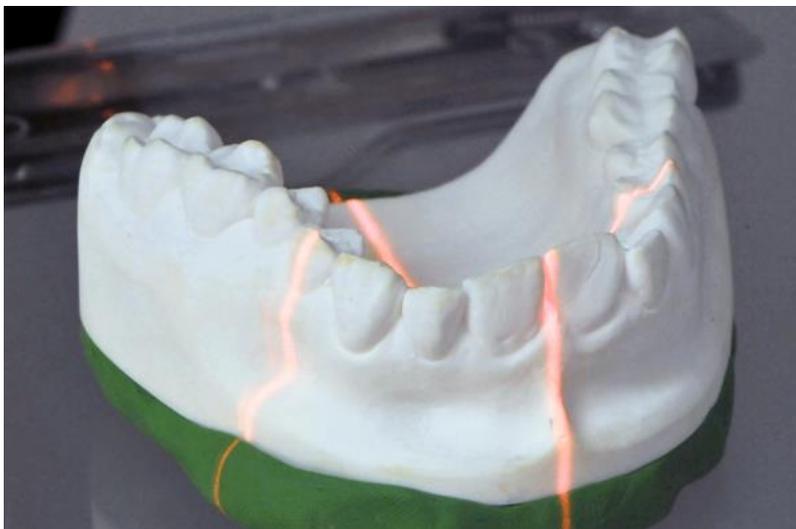


Abb. 1b: Ausrichtung in der BEAM-Einstellung auf den Inzisalpunkt und die bukkalen Höckerspitzen der ersten Prämolaren.

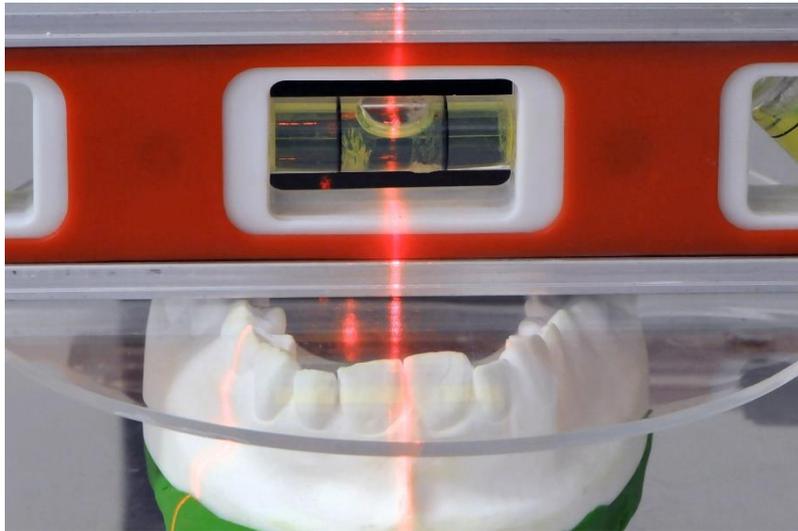


Abb. 2: Überprüfung und Korrektur der horizontalen Ausrichtung mit einer Plexiglas-Scheibe und einer Wasserwaage. Mithilfe der Scheibe wurde eine reproduzierbare okklusale Ebene festgelegt.

Die Waagerechte wurde mit Hilfe einer Scheibe, die auf den Höckern der Okklusalfächen auflag, und einer Wasserwaage eingestellt (Abb. 2).

Als Aufnahmevolumen wurde 80x80 ausgewählt. Nach Positionsüberprüfung mittels einer Scout-Aufnahme des DVTs wurde der Scan gefahren und der DICOM-Datensatz an die Software CoDiagnostiX (Dental Wings, Berlin, Deutschland) übermittelt. Die 3D-Aufnahmen wurden anschließend im Segmentierungsmodus wie folgt zugeschnitten: Alle für die Untersuchung irrelevanten Anteile wie Zahnbogen und Sockel wurden entfernt. Hierbei wurden bei jedem Modell die individuelle Segmenthöhe von der vorangegangenen Untersuchung (Heckmann et al. 2017) verwendet (Abb. 3).

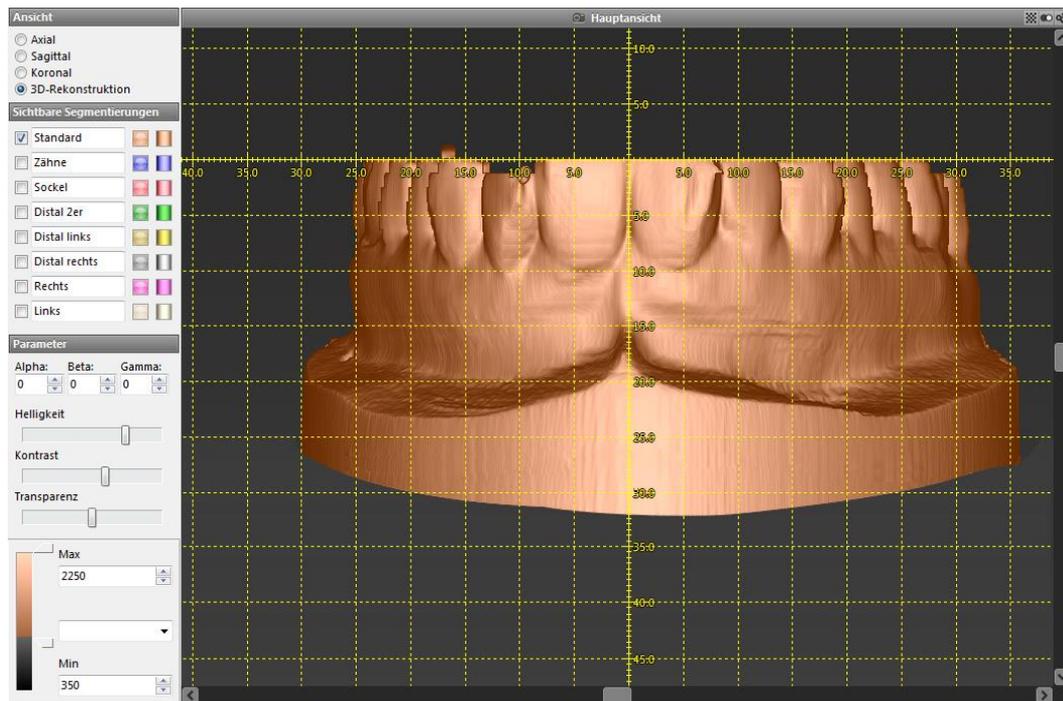


Abb. 3: DICOM-Datensatz in das Software-Programm CoDiagnostiX übertragen. Ausrichtung mithilfe der Gitternetzlinien auf den Inzisalpunkt zur Segmenthöhenbestimmung.

Anschließend wurde das Modell um 90° in die Okklusalanansicht gedreht. Mit der horizontalen Referenzlinie des Messgitters wurde erneut die Position der bukkalen Höckerspitzen der ersten Prämolaren überprüft (Abb. 4).

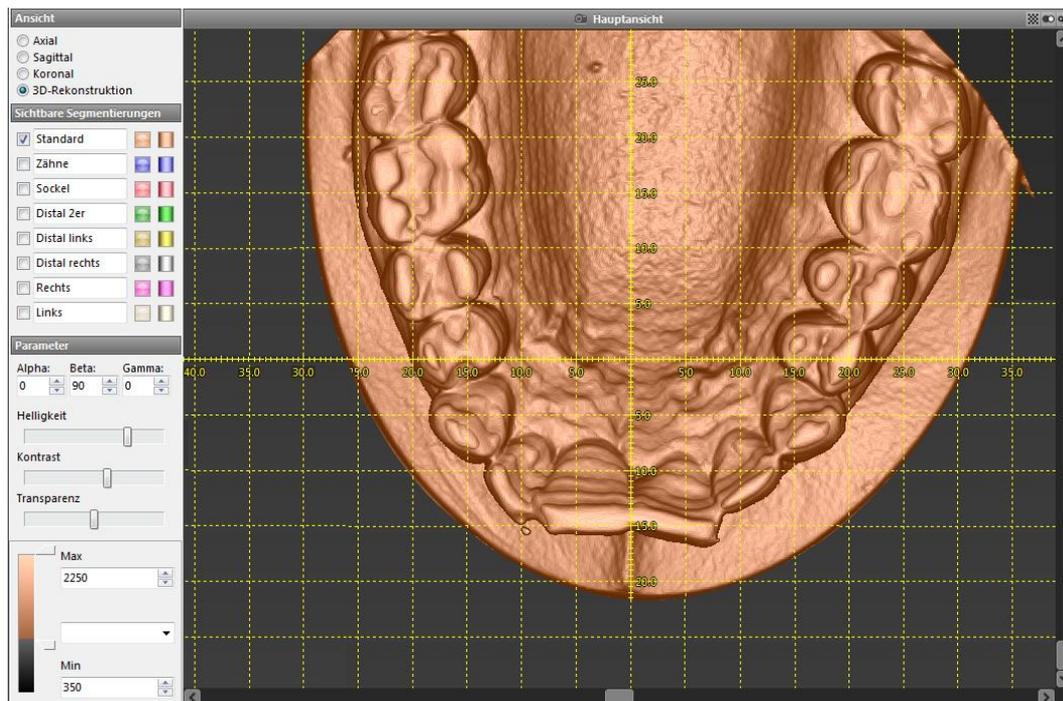


Abb. 4: Drehung um 90° und Ausrichtung der Gitternetz-Nulllinie auf die bukkalen Höckerspitzen der ersten Prämolaren zur weiteren Segmentierung.

Diese Linie wurde dann parallel bis zu den Approximalkontakten der seitlichen Schneidezähne zu den Eckzähnen verschoben, um die distalen Segmente abzutrennen (Abb. 5). Nach einer erneuten Drehung um 90° in die Ursprungsposition konnte mithilfe der Breite der Implantatkrone und der Breite des natürlichen Zahnes ein vertikaler Schnitt zur Unterteilung des Frontzahn-Segments in augmentierte/implantierte Seite und Gegenseite gesetzt werden (Abb. 5 und Abb. 6).

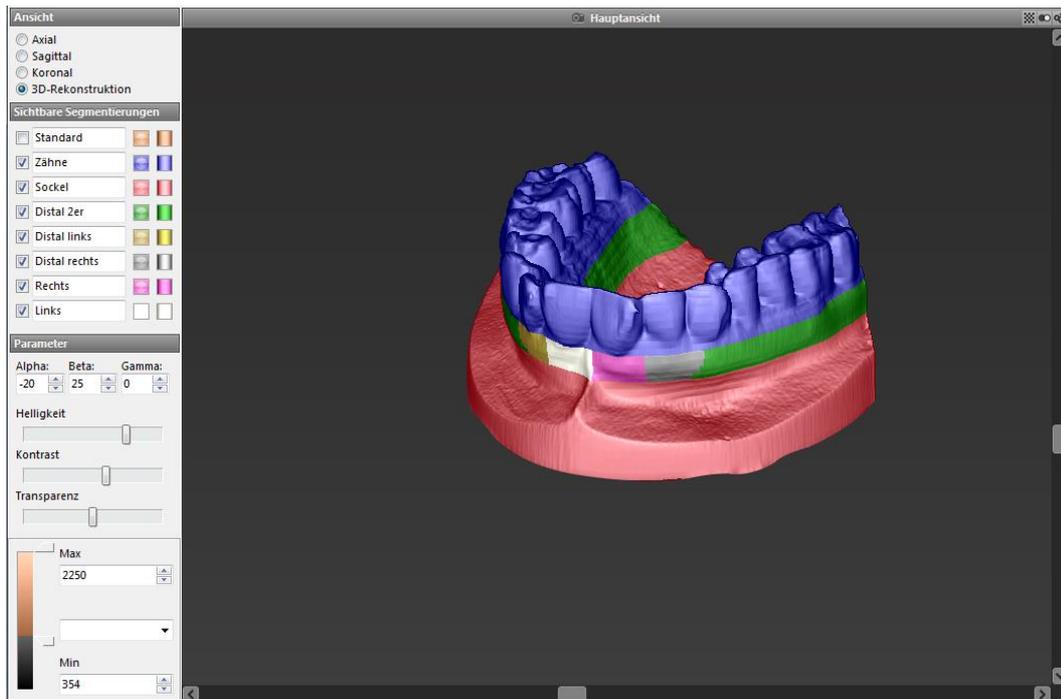


Abb. 5: Übersicht über ein vollständig segmentiertes Modell. Sockel (rot), Zahnbogen (blau), distal 2er (grün, keine Untersuchungsregion), Einzelzahnsegmente (gelb, weiß, violett und grau - Untersuchungsregionen).

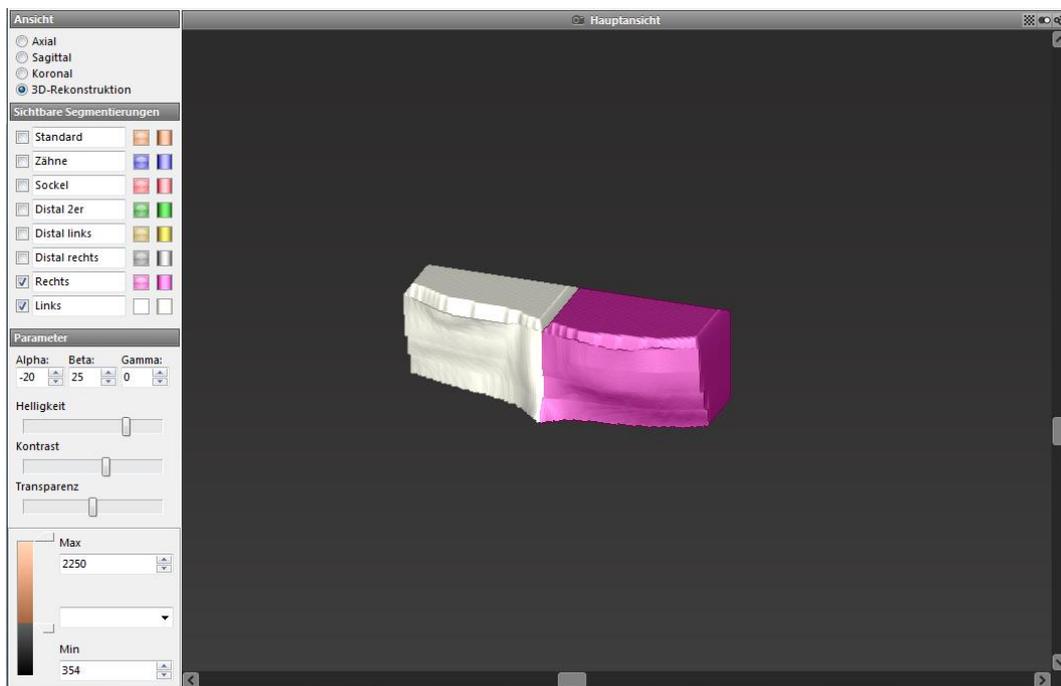


Abb. 6: Beispiel einer Segmentierung mit der augmentierten Seite (weiss) und der kontralateralen natürlichen Seite (violett)

Die verbliebenen Segmente umfassten somit jeweils die Region beider Schneidezähne eines Quadranten (Abb. 7 und Abb. 8).

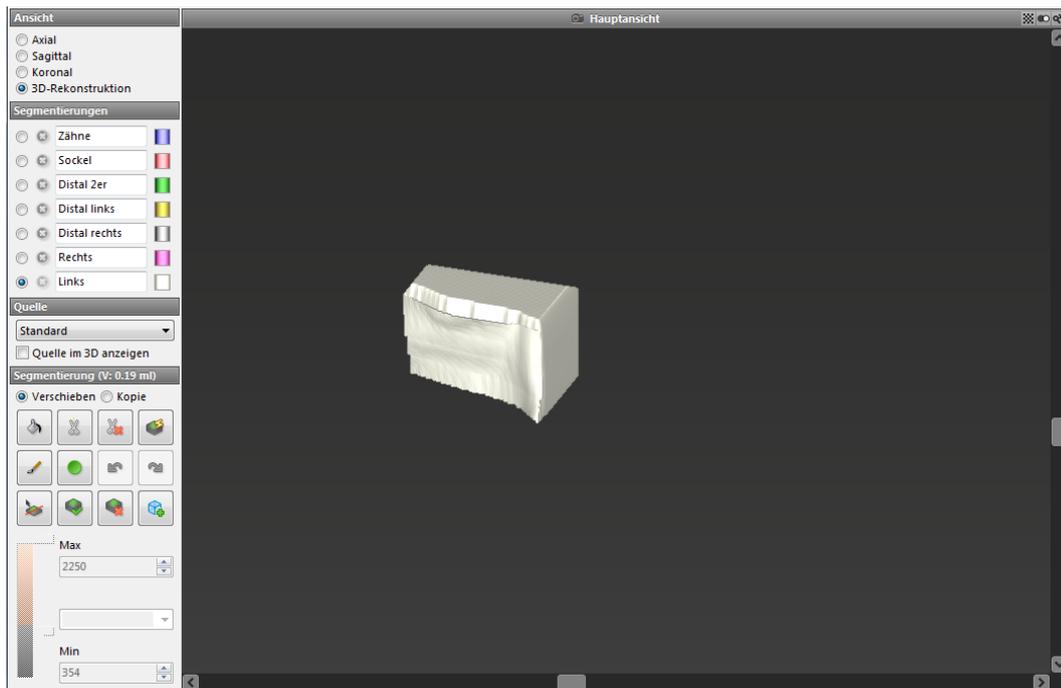


Abb. 7: Segment des augmentierten Bereichs zur volumetrischen Messung.

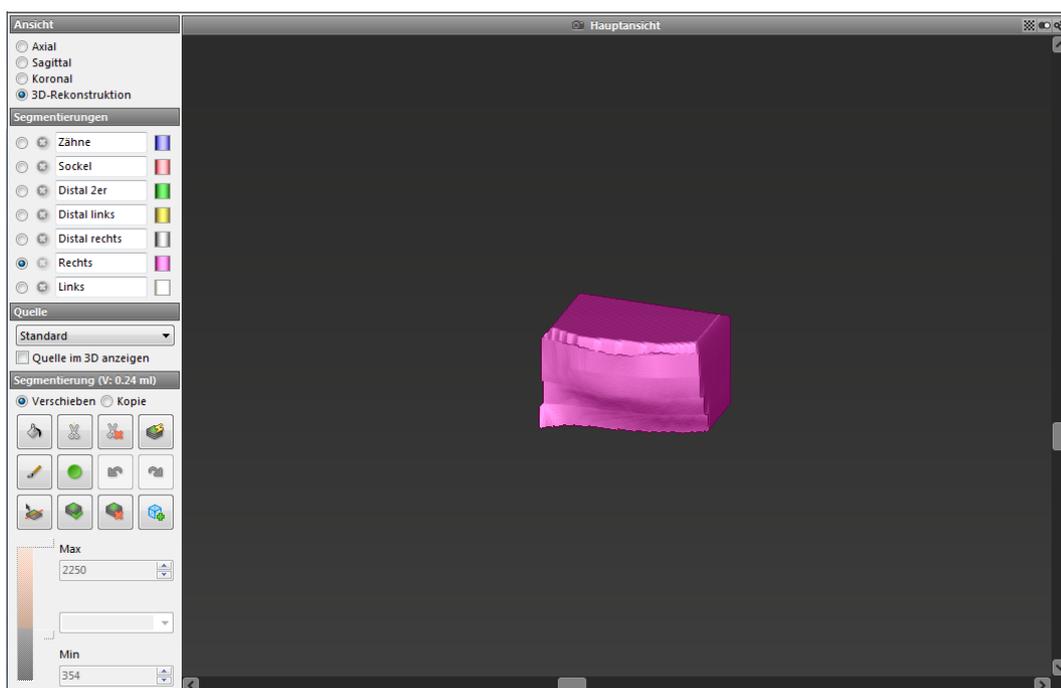


Abb. 8: Das Segment zur Volumenbestimmung des natürlichen Bereiches am kontralateralen Zahn.

Diese Volumina wurden gewählt, da eine Augmentation häufig über das Gebiet eines einzelnen Zahnfachs mit Knochenersatzmaterial überkonturiert werden und somit nicht auf den Defekt begrenzt ist.

Die Volumina der Segmente spiegelten die Hart- und Weichgewebsdimensionen der augmentierten/implantierten Seite und die der nicht-therapierten kontralateralen Seite wider.

Die ermittelten Segment-Volumina der augmentierten/implantierten Seite wurden zunächst mit der natürlichen kontralateralen Seite verglichen. Um die Langzeitstabilität der Augmentation zu ermitteln wurde die augmentierten/implantierten Seiten mit den entsprechenden Ausgangs-Werten vor 5 Jahren (Heckmann et al. 2017) verglichen. Im Sinne einer Kontrolle erfolgte schließlich der Vergleich der natürlichen kontralateralen Seiten, d.h. die nach 0,5 Jahren und nach 5 Jahren ermittelten Volumina.

Zur statistischen Analyse wurde die einfache Varianzanalyse (ANOVA) sowie Ein- und Zweistichproben-T-Tests verwendet. Als Signifikanzniveau wurde $\alpha=0.05$ festgelegt.

3. Ergebnisse

3.1 Patientenkollektiv

Von den zwischen 2010 bis 2012 teilnehmenden 48 Patienten konnten 29 für die Nachuntersuchung rekrutiert werden. Zur ersten Nachuntersuchung, die 6 Monate postoperativ war, konnten 3 Teilnehmer nicht erscheinen: einer durch Tod, zwei durch Änderungen des Wohnorts. In drei Fällen waren die Gipsmodelle für eine exakte Analyse nicht geeignet. Der Wiedervorstellungstermin nach 5 Jahren zählte weitere 13 Patienten weniger. Ein Patient war in ein Altersheim verzogen und laut eigener Auskunft ohne Möglichkeit zur Vorstellung in der Praxis, 12 Patienten waren postalisch und telefonisch nicht erreichbar oder antworteten nicht. In Gruppe 1a verblieben 0 Männer/5 Frauen, in 1b jeweils 5/4, in 2a jeweils 5/4 und in 2b jeweils 2/4. Für die in 3.2 angestellten Vergleiche der beiden Seiten nach 5 Jahren konnten die Daten von 29 Patienten verwendet werden. Den Volumenvergleich von 0,5 Jahren und 5 Jahren in 3.3 und 3.4 lagen die Daten von 27 Patienten vor, die zu beiden Untersuchungszeitpunkten erschienen waren.

3.2. Vergleich von augmentierten und kontralateralen Kieferabschnitten nach 5 Jahren

3.2.1 5-Jahres-Ergebnisse der 4 Gruppen

Für die vier Gruppen wurden die vestibulären Volumina der augmentierten Implantatregionen mit denen der natürlichen Seiten verglichen.

In Gruppe 1a (Sofortimplantation mit Sofortversorgung n= 5; mittlere Schneidezähne n=3, seitliche Schneidezähne n=2) wurde auf der Seite des Implantates ein Mittelwert von 158,0mm gemessen. Auf der Seite des natürlichen Zahnes lagen 184,0mm vor, was eine Diskrepanz von 26,0mm³ ausmachte (Diskrepanzen SD=13,4).

Gruppe 1b (Sofortimplantation mit früher Versorgung n=9; mittlere Schneidezähne n=4, seitliche Schneidezähne n=5) zeigte auf der Implantatseite einen Wert 176,7mm³ und auf der kontralateralen Seite 155,6 mm³, was zu einer Differenz von 21,1mm³ (SD = 42,8) führte.

In Gruppe 2a (Frühe Implantation und Sofortversorgung n=9; mittlere Schneidezähne n=7, seitliche Schneidezähne n=2) lag auf der Seite des Implantats ein Wert von 222,2mm³ vor, wohingegen auf kontralateraler Seite ein Wert von 228,9mm³ gemessen wurde. Somit lag die Diskrepanz bei 6,7mm³ (SD der Diskrepanzen = 70,0).

Gruppe 2b (Frühimplantation mit früher Versorgung n= 6; mittlere Schneidezähne n=3, seitliche Schneidezähne n=3) wies auf der augmentierten Seite 158,3mm³ und auf kontralateraler Seite 153,3mm³ auf, was eine Differenz von 5mm³ (SD = 51,7) ergab (Abb. 9). Der Anova-Test zeigte, dass die Unterschiede zwischen den vier Gruppen nicht signifikant waren (p=0,42).

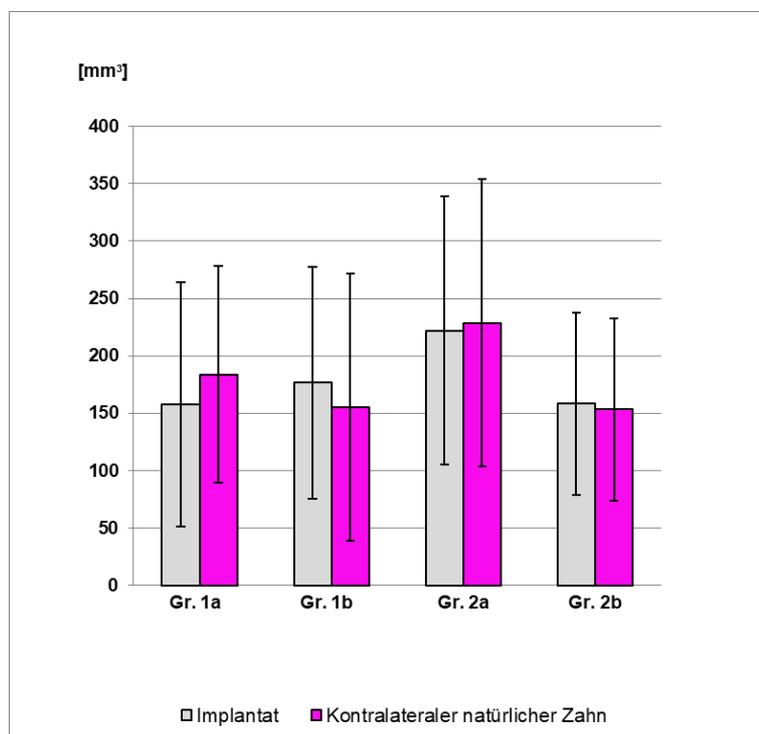


Abb. 9: Überblick der vier untersuchten Gruppen. Durchschnittsvolumina mit Standard-Abweichungen der augmentierten Alveolarfortsatzregion der Implantatseite (grau) und der kontralateralen Seite mit dem natürlichen Zahn (violett).

3.2.2 5-Jahres-Ergebnisse der Sofort- und Frühimplantation

Die Gruppen der Sofortimplantation 1a und 1b (n=14; mittlere Schneidezähne n=7, seitliche Schneidezähne n=7) ergaben auf Seiten der Implantate einen Wert von 170,0mm³ und auf kontralateraler, natürlicher Seite 165,7mm³, der Unterschied lag bei 4,3mm³ (SD = 41,64). Die Gegenüberstellung der Werte der Gruppen der frühen Implantation 2a und 2b (n=15; mittlere Schneidezähne n=10, seitliche Schneidezähne n=5) zeigte eine Differenz von 2mm³ (SD = 61,6); die Implantatseite betrug 196,7mm³ und die natürliche Seite 198,7mm³ (Abb. 10). Die statistische Analyse (Zweistichproben-t-Test) der Volumenunterschiede der beiden Versorgungsgruppen ergab p=0,70.

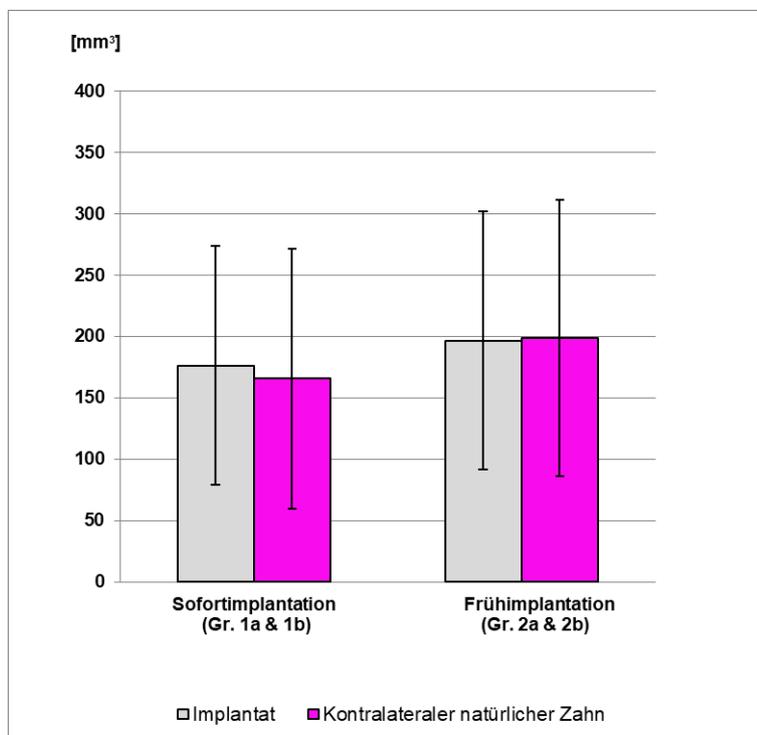


Abb. 10: Vergleich der Volumenunterschiede der augmentierten Implantatregionen mit den natürlichen Zähnen der Gegenseiten in den Gruppen der Sofortimplantation und Frühimplantation.

3.2.3 5-Jahres-Ergebnisse der Sofort- und Frühversorgung

Die Gruppen der Sofortversorgung 1a und 2a (n=14; mittlere Schneidezähne n=10; seitliche Schneidezähne n=4) wiesen auf Seiten des Implantats 199,3mm³ und auf kontralateraler Seite 212,9mm³ auf, was eine Diskrepanz von 13,6mm³ (SD der Differenzen = 56,2) ergab. Die Messwerte der zwei Gruppen der Frühversorgung 1b und 2b (n=15; mittlere Schneidezähne n=7; seitliche Schneidezähne n=8) lagen auf augmentierter Seite bei 169,3mm³ und auf natürlicher Seite bei 154,7mm³, was zu einem Differenzbetrag von 14,6mm³ (SD=45,5) führte (Abb. 11). Der p-Wert der Differenzen der beiden Gruppenpaare (Zweistichproben-t-Test) lag bei p=0,20.

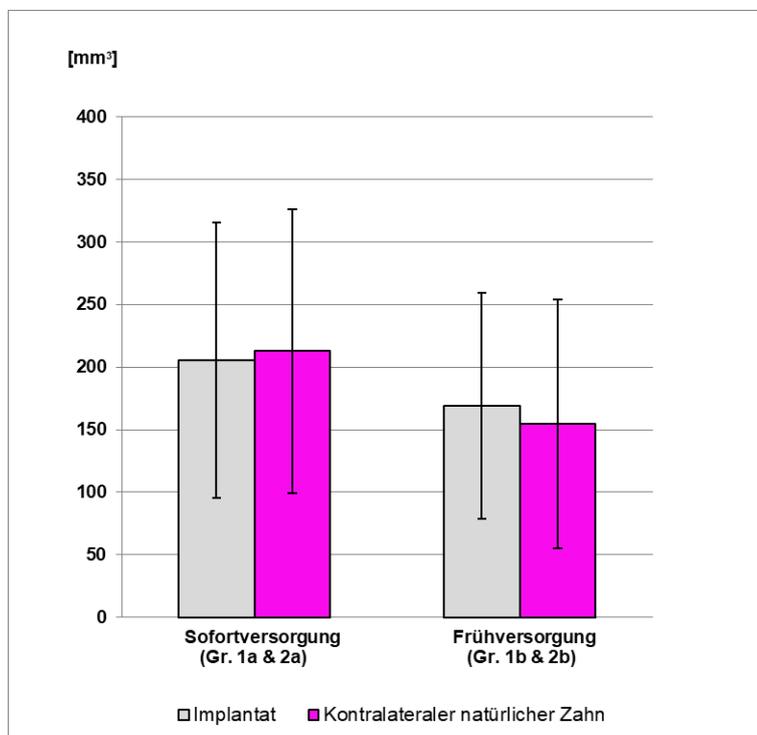


Abb. 11: Vergleich der Volumina mit Standardabweichung der augmentierten Implantatregionen mit den kontralateralen Seiten in den Gruppen der Sofortversorgung und Frühversorgung.

3.2.4 5-Jahres-Ergebnisse der mittleren und seitlichen Schneidezähne

Die mittleren Schneidezähne (n=17) zeigten im zeitlichen Verlauf eine Abweichung von 12,4mm³ (SD = 38,8), da auf der implantierten Seite ein Wert

von 218,8mm³ und auf der Vergleichsseite ein Wert von 231,2 gemessen wurde. Bei den seitlichen Schneidezähnen (n=12) war auf der therapierten Seite ein Wert von 134,2mm³ und auf der Referenzseite ein Wert von 114,2mm³ zu verzeichnen. Daraus ergab sich ein Unterschied von 20,0mm³ (SD = 63,5) (Abb. 12). Die Differenzen zwischen den Gruppen ergaben ein p=0,10 (Zweistichproben-t-Test).

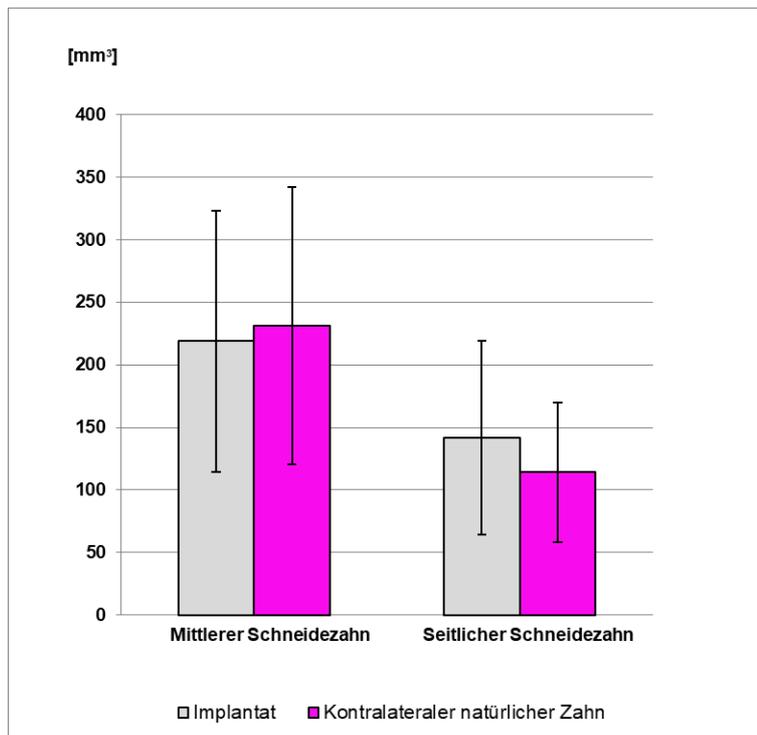


Abb. 12: Darstellung der Volumenunterschiede bei den mittleren und seitlichen Schneidezähnen

3.2.5 5-Jahres-Ergebnisse aller Patienten

Nach 5 Jahren wies das augmentierte Segment ein Durchschnittsvolumen von 183,8mm³ und das kontralaterale natürliche Segment 182,8mm³ auf. Die Differenz lag bei 1,0mm³ (SD = 52,2; Abb. 13). Der Unterschied der beiden Gruppen ist nicht signifikant bei p=1,0.

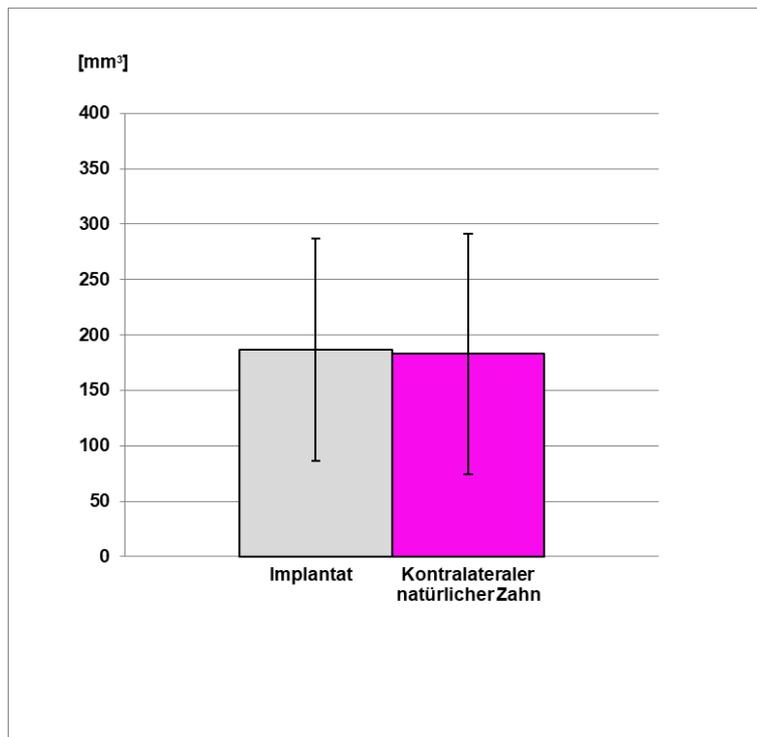


Abb. 13: Durchschnittsvolumina aller untersuchten Implantatbereiche und aller kontralateralen natürlichen Regionen mit Standardabweichungen.

3.3. Vergleich der augmentierten Kieferabschnitte 0,5 Jahre und 5 Jahre postoperativ

Für den Vergleich zwischen den 0,5-Jahresergebnissen und den 5-Jahresergebnissen wurden 27 der 29 Patienten herangezogen, da zwei Patienten zwar an der vorliegenden Studie teilnehmen, aber nicht an der 0,5-Jahres-Untersuchung teilgenommen hatten (ein Drop-out in Gruppe 2a und ein Drop-out in Gruppe 2b).

Zur Darstellung wurden die relativen Änderungen pro Patienten in % herangezogen. Zur statistischen Analyse diente der Einstichproben-t-Test.

3.3.1 Vergleich der vier Gruppen

Die Absolutwerte des Langzeitvergleiches der implantierten/augmentierten Kieferabschnitte innerhalb der 4 Gruppen sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Messwerte der 4 Untersuchungsgruppen 0,5 und 5 Jahre postoperativ

	0,5 Jahre	5 Jahre
Gruppe 1a	168,0mm ³	158,0mm ³
Gruppe 1b	231,1mm ³	176,7mm ³
Gruppe 2a	251,3mm ³	222,5mm ³
Gruppe 2b	196,0mm ³	162,0mm ³

Gruppe 1a weist eine Volumen-Abnahme von 12,36% auf (10,0mm³) (p=0,13; Einstichproben-t-Test). Gruppe 1b hat einen Volumenverlust von 14,96% (54,4mm³) (p=0,13). In Gruppe 2a liegt ein Verlust von 11,56% vor (28,8mm³) (p=0,38) und in Gruppe 2b ein Verlust von 8,7% (34,0mm³) (p=0,64; Abb. 14).

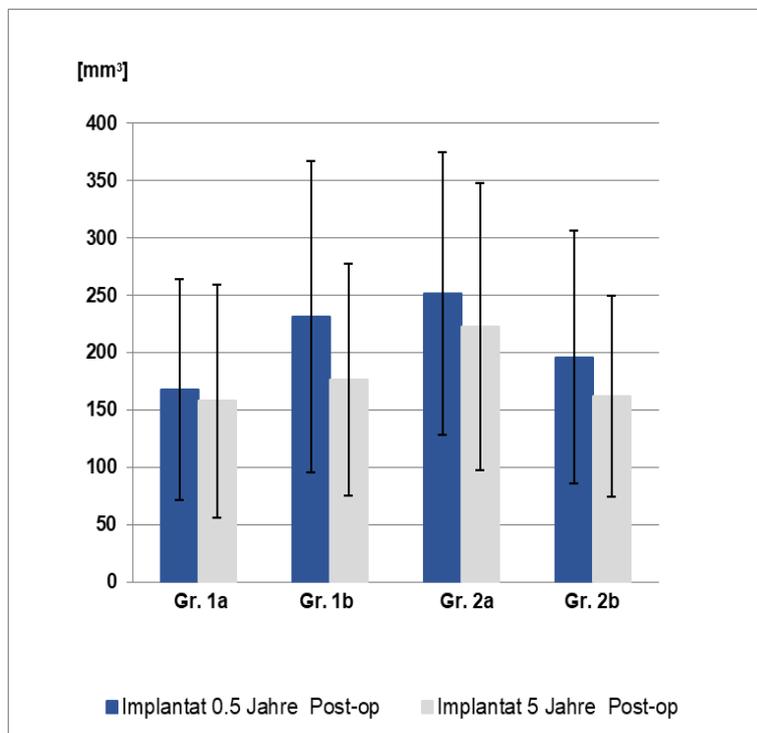


Abb. 14: Vergleich der Implantatregionen 0,5 Jahre (blau) und 5 Jahre postoperativ (grau).

3.3.2 Vergleich Sofort- und Frühimplantation

Die Absolutwerte der Sofortimplantation (Gruppen 1a und 1b) und der Frühimplantation (Gruppen 2a und 2b) sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Messwerte der Gruppen Sofortimplantation und Frühimplantation 0,5 und 5 Jahre post-operativ

	0,5 Jahre	5 Jahre
Sofortimpl. 1a + 1b	208,6mm ³	170,0mm ³
Frühimpl. 2a + 2b	230,0mm ³	199,2mm ³

Nach 5 Jahren erfolgte bei Sofortimplantation eine mittlere Volumenabnahme von 14,1%. Bei der Frühimplantation (Gruppen 2a und 2b) wurde eine Abnahme von 10,4% ermittelt (Abb. 15). Die prozentualen Unterschiede innerhalb der beiden Gruppen waren bei Sofortimplantation signifikant ($p=0,036$), bei Frühimplantation nicht signifikant ($p=0,30$, Einstichproben-t-Test).

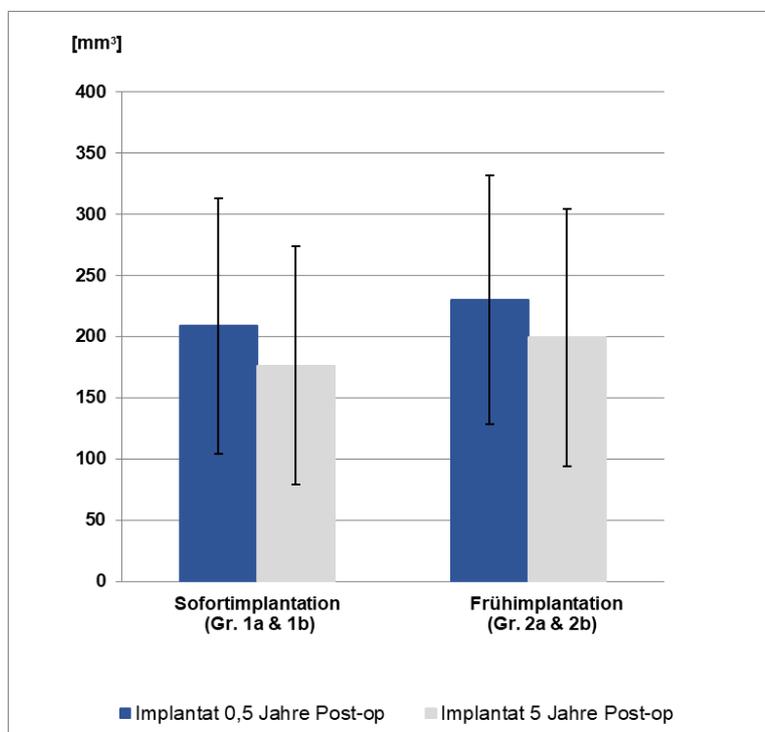


Abb. 15: Vergleich der Implantatregionen nach Sofortimplantation und Frühimplantation

3.3.3 Vergleich Sofort- und Frühversorgung

In Tabelle 4 sind die absoluten Messwerte dieser Versorgungsarten dargestellt.

Tabelle 4: Messwerte der Gruppen Sofortversorgung und Frühversorgung 0,5 und 5 Jahre post-operativ

	0,5 Jahre	5 Jahre
Sofortvers. 1a + 2a	219,2mm ³	170,0mm ³
Frühvers. 1b + 2b	218,6mm ³	171,4mm ³

Nach 5 Jahren zeigt sich in der Gruppe der Sofortversorgung (Gruppen 1a und 2a) eine Reduktion des Volumens um 12,0% ($p=0,15$). Bei der Gruppe der Frühversorgung (Gruppen 1b und 2b) lag eine Abnahme von 12,7% vor ($p=0,14$; Abb. 16).

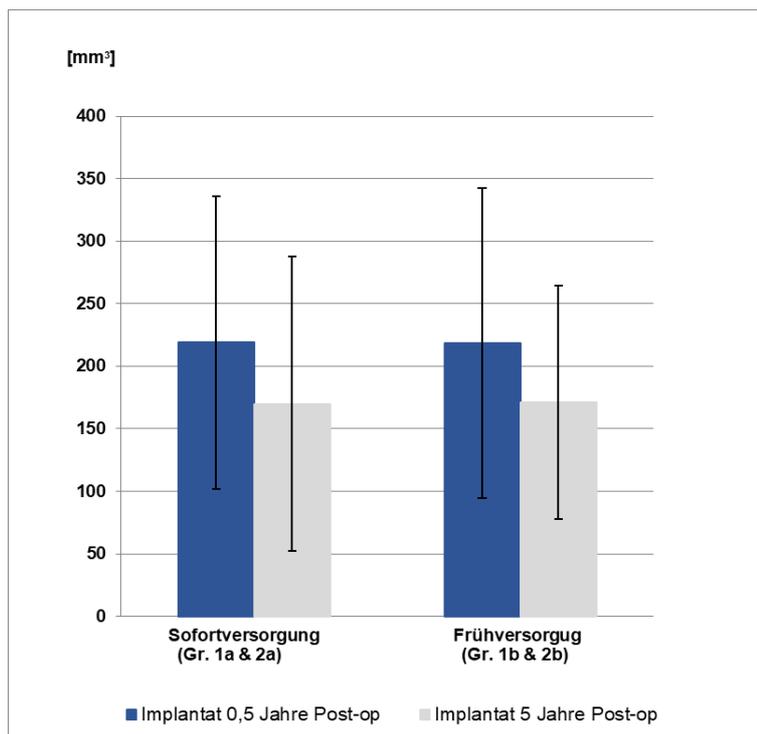


Abb. 16: Vergleich der Implantatregionen nach Sofortversorgung und Frühversorgung

3.3.4 Vergleich mittlere und seitliche Schneidezähne

Tabelle 5 zeigt die an den mittleren und seitlichen Schneidezähnen ermittelten absoluten Messwerte.

Tabelle 5: Messwerte an den mittleren und seitlichen Schneidezähnen 0,5 und 5 Jahre post-operativ

	0,5 Jahre	5 Jahre
Mittlere SZ 11,21	266,5mm ³	218,8mm ³
Seitliche SZ 12,22	138,0mm ³	125,0mm ³

Die augmentierte Region an den Implantaten der mittleren Schneidezähne zeigt eine Volumenreduktion von 17,8% ($p=0,03$), wobei die Region der seitlichen Schneidezähne eine Volumenabnahme um 3,2% aufweist ($p=0,68$; Abb. 17).

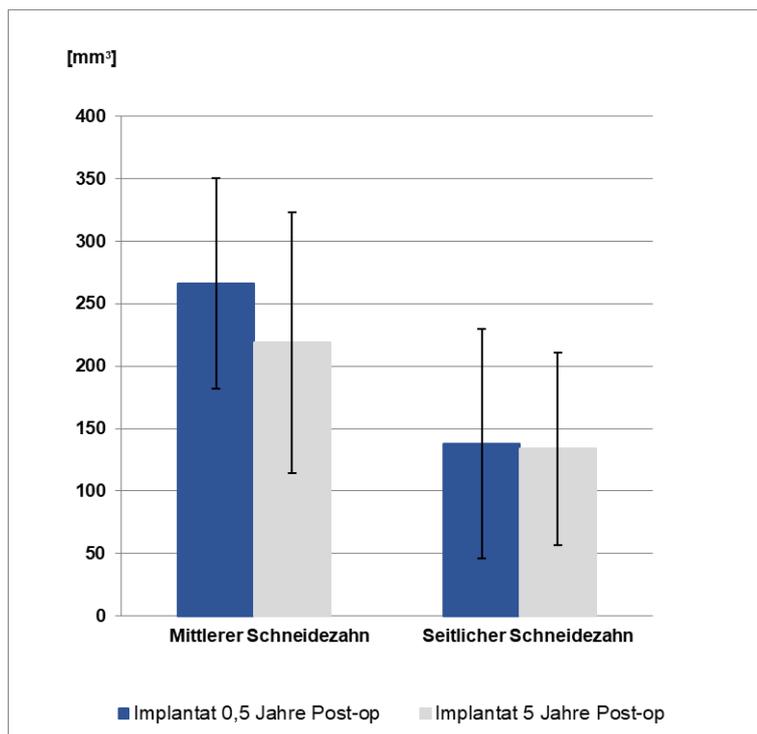


Abb. 17: Volumina der Implantatregionen nach 0,5 Jahren und 5 Jahren.

3.3.5 Vergleich aller Patienten

Der Vergleich aller augmentierten Bereiche zeigt nach 5 Jahren einen Wert von 184,1 gegenüber dem Ausgangswert nach 0,5 Jahren von 218,9. Dem entspricht die Reduktion des Volumens um 12,4% ($p=0,03$; Abb. 18).

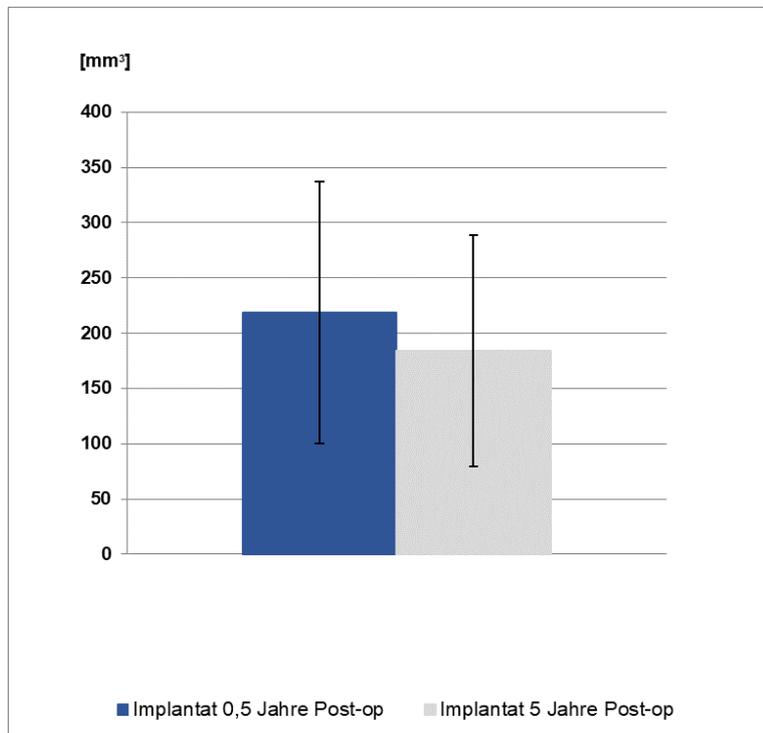


Abb. 18: Durchschnittsvolumina aller untersuchten Implantatregionen nach 0,5 Jahren und 5 Jahren (n=27) **5**

3.4 Vergleich der kontralateralen natürlichen Kieferabschnitte 0,5 Jahre und 5 Jahre postoperativ

Für die vier Gruppen wurden auch die vestibulären Volumina der natürlichen kontralateralen Seite zum Zeitpunkt von 0,5 Jahren nach Implantatbehandlung und nach 5 Jahren postoperativ analysiert (n=27).

3.4.1 Vergleich der vier Gruppen der natürlichen Kieferabschnitte

In Gruppe 1a (Sofortimplantation mit Sofortversorgung; n=5; mittlere Schneidezähne n=3, seitliche Schneidezähne n=2) wurden nach 0,5 Jahren ein

Mittelwert von 166,0mm³ gemessen, nach 5 Jahren waren es 184,0mm³. Der Unterschied betrug 18,0mm³ (SD=21,7).

Gruppe 1b (Sofortimplantation mit früher Versorgung; n=9; mittlere Schneidezähne n=4, seitliche Schneidezähne n=5) zeigte 0,5 Jahre postoperativ einen Wert 211,1mm³ und nach 5 Jahren 155,6mm³, was zu einer Differenz von 55,5mm³ (SD = 58,1) führte.

In Gruppe 2a (Frühe Implantation und Sofortversorgung; n=8; mittlere Schneidezähne n=7, seitliche Schneidezähne n=2) wurden nach 0,5 Jahren ein Mittelwert von 256,3mm³ gemessen, nach 5 Jahren waren es 247,5mm³. Der Unterschied betrug 8,8mm³ (SD=50,6).

Gruppe 2b (Sofortimplantation mit früher Versorgung; n=5; mittlere Schneidezähne n=4, seitliche Schneidezähne n=5) zeigte 0,5 Jahre postoperativ einen Wert 180,0mm³ und nach 5 Jahren 148,0mm³, was zu einer Differenz von 32,0mm³ (SD = 101,3) führte (Tabelle 6 und Abb. 19).

Tabelle 6: Messwerte der natürlichen Seite 0,5 und 5 Jahre post-operativ

	0,5 Jahre	5 Jahre
Gruppe 1a	166,0mm ³	184,0mm ³
Gruppe 1b	211,1mm ³	155,6mm ³
Gruppe 2a	256,3mm ³	247,5mm ³
Gruppe 2b	180,0mm ³	148,0mm ³

Im zeitlichen Verlauf zeigt Gruppe 1a auf der kontralateralen Seite eine relative Volumenzunahme 13,3% (p=0,077). In Gruppe 1b lag eine Abnahme um 26,4% vor, was mit p=0,034 auf einen signifikanten Unterschied hinweist. Gruppe 2a hatte eine Abnahme von 1,2% (p=0,91) und Gruppe 2b eine Abnahme um 3,4% (p=0,92; Abb. 19). Die p-Werte beziehen sich auf die prozentualen Unterschiede innerhalb der Gruppen (Einstichproben-t-Test).

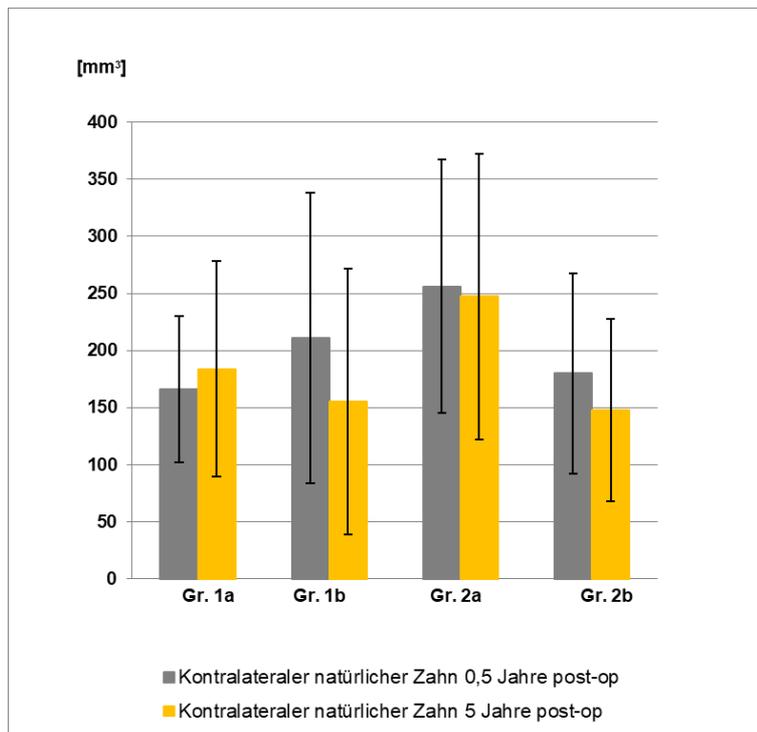


Abb. 19. Volumina der 4 Gruppen am kontralateralen natürlichen Zahn 0,5 und 5 Jahre nach Implantatsetzung und Augmentation

3.4.2 Vergleich Sofort- und Frühimplantation auf der natürlichen Seite

Die Absolutwerte der Sofortimplantation (Gruppen 1a und 1b) und der Frühimplantation (Gruppen 2a und 2b) sind in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Messwerte der Gruppen Sofortimplantation und Frühimplantation 0,5 und 5 Jahre post-operativ auf der natürlichen Seite

	0,5 Jahre	5 Jahre
Sofortimpl. 1a + 1b	195,0mm ³	165,7mm ³
Frühimpl. 2a + 2b	226,9mm ³	209,2mm ³

Nach 5 Jahren erfolgte eine mittlere Volumenabnahme von 12,2% bei der Gruppe der Sofortimplantation. Bei der Frühimplantation (Gruppen 2a und 2b) wurde eine Abnahme von 2,05% ermittelt (Abb. 20). Die prozentualen Unterschiede innerhalb der beiden Gruppen waren nicht signifikant ($p=0,18$ und $p=0,88$, Einstichproben-t-Test).

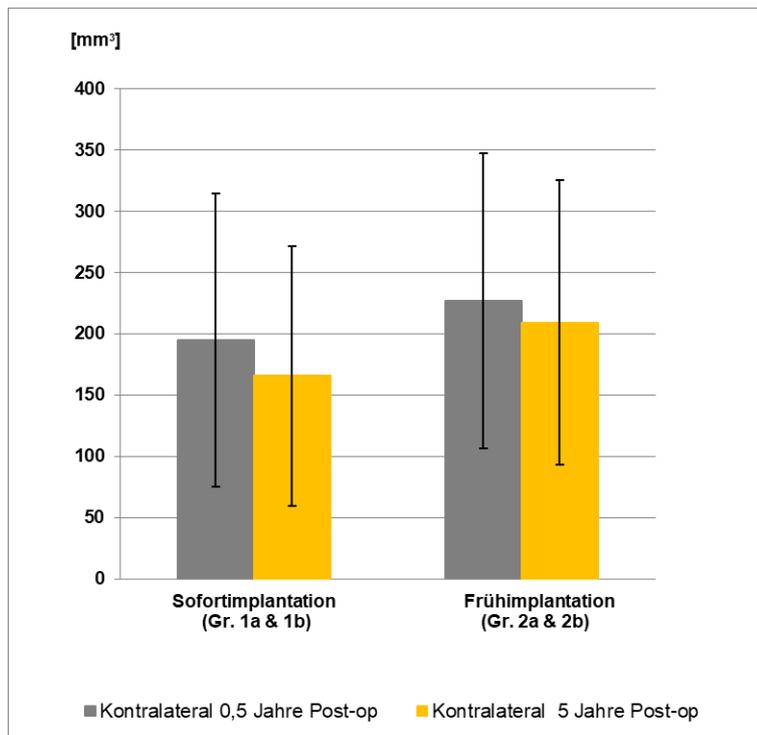


Abb. 20: Vergleich der natürlichen kontralateralen Seite nach Sofortimplantation und Frühimplantation

3.4.3 Vergleich Sofort- und Frühversorgung

In Tabelle 8 sind die absoluten Messwerte dieser Versorgungsarten dargestellt.

Tabelle 8: Messwerte der Gruppen Sofortversorgung und Frühversorgung 0,5 und 5 Jahre post-operativ auf der natürlichen Seite

	0,5 Jahre	5 Jahre
Sofortvers. 1a + 2a	221,5mm ³	223,1mm ³
Frühvers. 1b + 2b	200,0mm ³	152,9mm ³

Nach 5 Jahren zeigt sich in der Gruppe der Sofortversorgung (Gruppen 1a und 2a) eine Zunahme des Volumens um 5,9% ($p=0,38$). Bei der Gruppe der Frühversorgung (Gruppen 1b und 2b) lag eine Abnahme von 15,8% vor ($p=0,25$; Abb. 21).

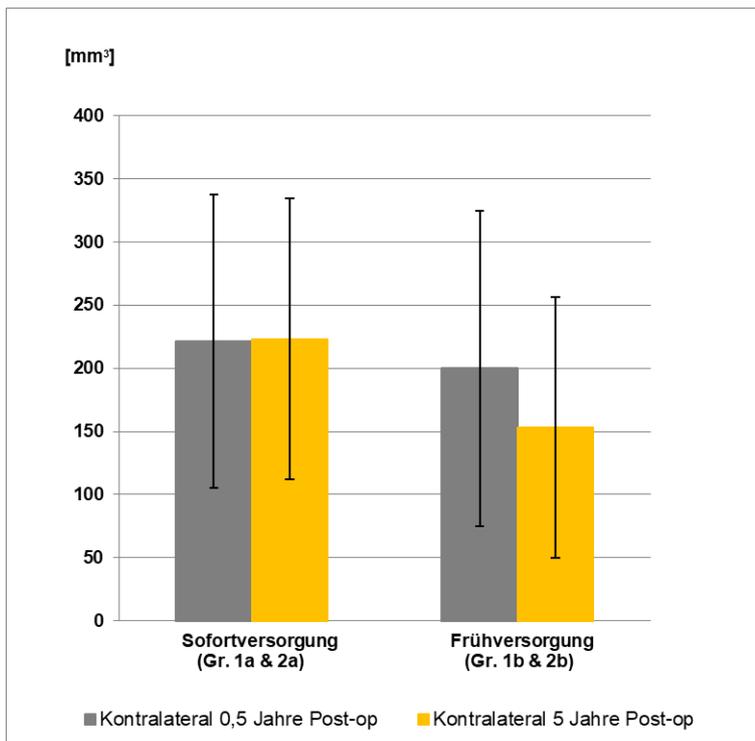


Abb. 21: Vergleich der natürlichen Seite nach Sofortversorgung und Frühversorgung

3.4.4 Vergleich mittlere und seitliche Schneidezähne

Tabelle 9 zeigt die an den mittleren und seitlichen Schneidezähnen der natürlichen Seite ermittelten absoluten Messwerte.

Tabelle 9: Messwerte an den natürlichen mittleren und seitlichen Schneidezähnen 0,5 und 5 Jahre post-operativ

	0,5 Jahre	5 Jahre
Mittlere SZ 11,21	264,1mm ³	231,2mm ³
Seitliche SZ 12,22	119,0xmm ³	111,0mm ³

Die kontralaterale Region der mittleren Schneidezähne zeigt eine Volumenreduktion von 9,1% ($p=0,28$), wobei die Region der seitlichen Schneidezähne eine Volumenabnahme um 9,5% aufweist ($p=0,95$; Abb. 22).

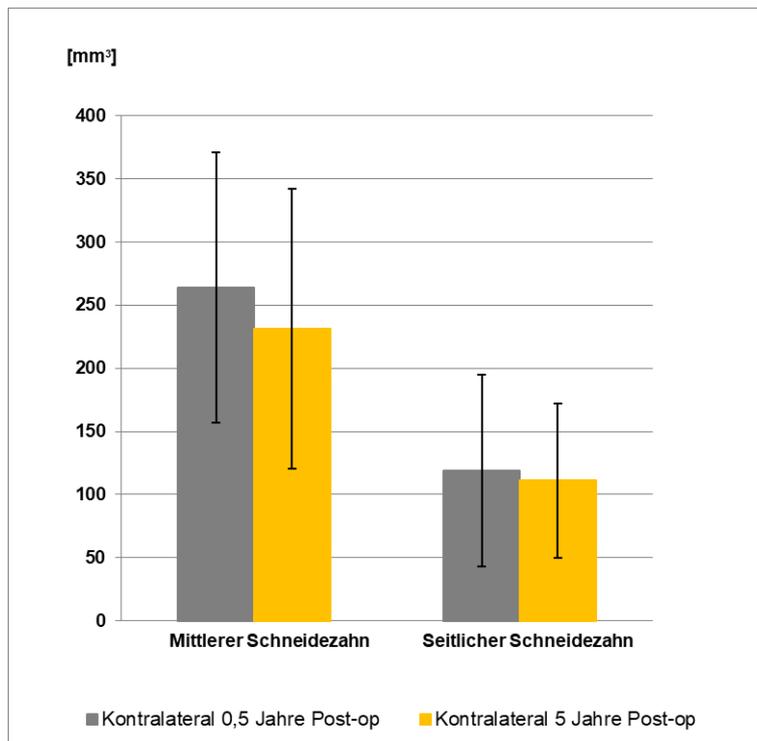


Abb. 22: Volumina der kontralateralen natürlichen Region nach 0,5 Jahren und 5 Jahren

3.4.5 Vergleich der natürlichen Gegenseite aller Patienten

Die natürlichen kontralateralen Seiten (n=27) weisen nach 0,5 Jahren einen Wert von $210,4\text{mm}^3$ auf, und nach 5 Jahren einen Wert von $186,7\text{mm}^3$. Die Differenz beträgt $23,7\text{mm}^3$ (SD = 64,4) und ergibt eine Volumenreduktion um 5,4% (p=0,49; Abb. 23).

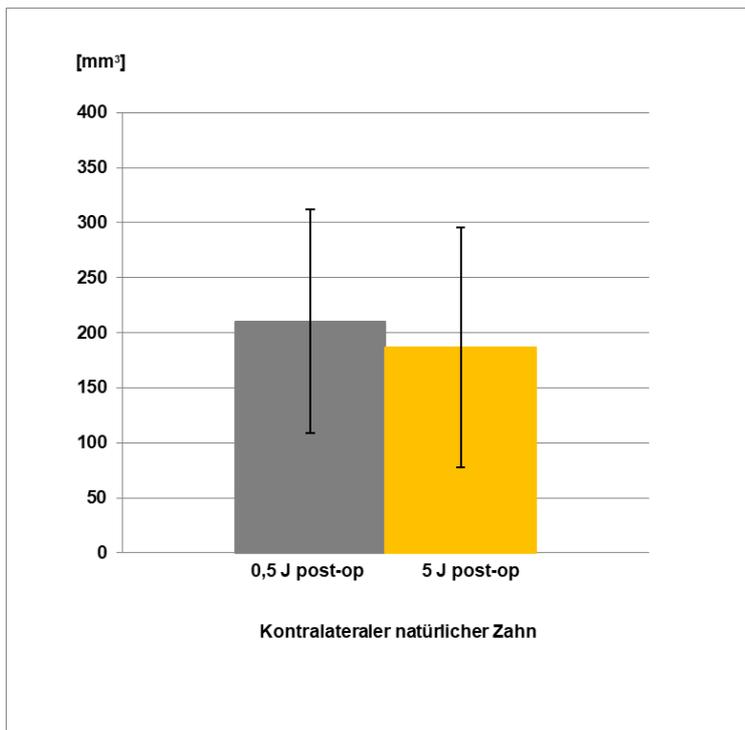


Abb. 23: Gesamtergebnis der Volumina am kontralateralen natürlichen Zahn nach 0,5 und 5 Jahren

3.5 Volumenänderung augmentierte Seite und natürliche Seite

Die Vergleiche der Implantatseite und der natürlichen Seite sind in Tabelle 10 und Abb. 24 dargestellt. Auf der Implantatseite lag der 0,5-Jahreswert bei 218,9 (SD 118,3), nach 5 Jahren lag ein Wert von 184,1 (SD 104,7) vor. Auf der kontralateralen natürlichen Seite waren es nach 0,5 Jahren 210,4 (SD 118,9) und nach 5 Jahren 186,7 (SD 111,0).

Tabelle 10: Messwerte der Implantatseite und der natürlichen Seite 0,5 und 5 Jahre post-operativ

	0,5 Jahre	5 Jahre
Implantatseite	218,9mm ³	184,1mm ³
Natürliche Seite	210,4mm ³	186,7mm ³

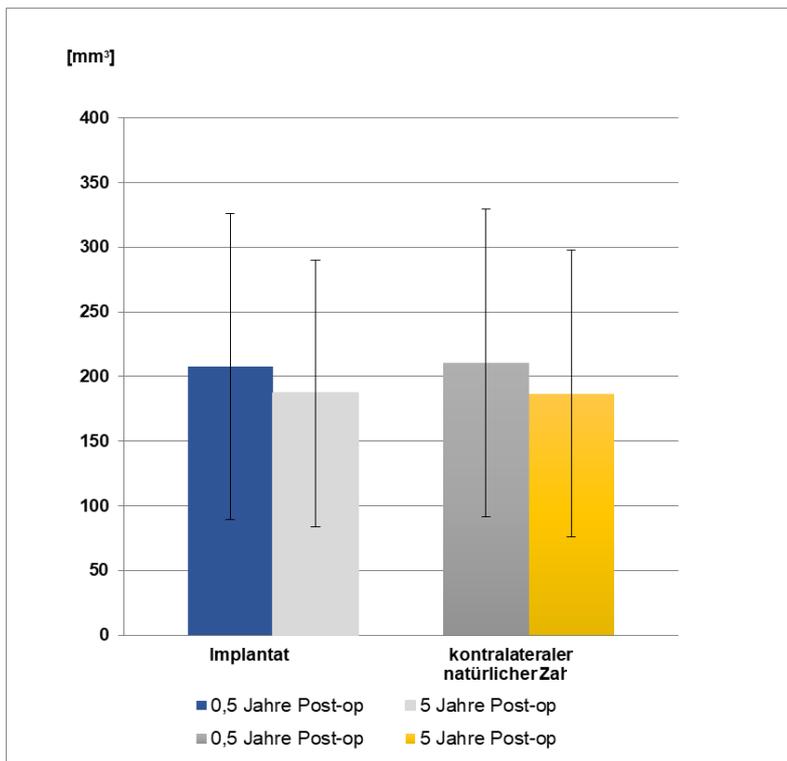


Abb. 24: Übersicht Implantat und kontralateraler natürlicher Zahn 0,5 Jahre/5 Jahre post-operativ

4. Diskussion

Die Implantatversorgung des Oberkiefer-Frontzahnbereiches stellt an den behandelnden Zahnarzt höchste ästhetische Anforderungen. Vorausgehende Untersuchungen zeigen, dass in diesem Kieferbereich für eine Implantatsetzung häufig eine horizontale Augmentation erforderlich ist (Tarnow et al. 2014, Roe et al. 2012).

In der vorliegenden Studie sollte die Volumenbeständigkeit des Augmentationsverfahrens mit bovinem Hydroxylapatit untersucht werden und zwar vor dem Hintergrund, dass bei der Augmentation eine 10-20-prozentige Überkonturierung des Defekts erfolgte. Hierzu wurden die Volumina der Alveolarfortsätze der augmentierten Regionen mit denen der natürlichen kontralateralen Seiten verglichen. In diesem Zusammenhang wurden die verschiedenen Implantationszeitpunkte (Sofortimplantation und Frühimplantation) sowie der Restaurationszeitpunkt (Sofortversorgung und Frühversorgung) analysiert. Auch wurden Vergleiche der augmentierten und der natürlichen gegenüberliegenden Regionen an den mittleren und seitlichen Schneidezähnen angestellt.

Vergleich augmentierter Kieferabschnitt vs. natürlicher Kieferabschnitt

Der Volumenvergleich in den 4 Gruppen zwischen augmentierter und kontralateraler Seite zeigte nach fünf Jahren unterschiedliche Ergebnisse (Abb. 9). In den Gruppen 1a und 2a war der Volumenschwund auf der Augmentationsseite ausgeprägter als auf der natürlichen Seite. Die Gruppen 1b und 2b mit Sofortversorgung zeigten sich volumenstabiler gegenüber der natürlichen Seite. Da der Anova-Test $p=0.42$ ergab, sind jedoch die festgestellten Unterschiede eher tendenziell zu werten. Auch beim Vergleich zwischen Sofort- und Frühimplantation (Abb. 10; $p=0,70$) sowie der Vergleich zwischen Sofort- und Frühversorgung (Abb. 11; $p=0,20$) sind keine statistisch signifikanten Veränderungen beobachtet worden. Auch wenn man die mittleren und seitlichen Schneidezähne der Augmentationsseite und der natürlichen Seite vergleicht lassen sich mit $p=0,10$ keine statistisch signifikanten Unterschiede ermitteln

(Abb.12). Dabei zeigten die mittleren Schneidezähne erwartungsgemäß höhere Volumina als die seitlichen. Auffallend ist die größere Differenz zwischen Augmentat und kontralateralem Segment bei den seitlichen Schneidezähnen. Wie bei der halbjährlichen postoperativen Untersuchung (Heckmann et al. 2017, Abb. 11) weist die augmentierte Seite ein höheres Volumen als das kontralaterale Segment auf. Diese Differenz lässt sich mit dem größeren Anteil an sofortimplantierten Patienten im Bereich der seitlichen Schneidezähne (7 Patienten; Frühimplantation 5 Patienten) erklären. Die Ursache dessen könnte darin liegen, dass der Operateur bei Sofortimplantation etwas mehr überaugmentiert hat.

Fasst man schließlich alle untersuchten Implantat-Bereiche und alle kontralateralen natürlichen Regionen zusammen, so weist ein $p=1,0$ auf keinen relevanten Unterschied hin (Abb. 13). Die Volumenstabilität des augmentierten Bereichs ähnelt den Ergebnissen der ersten Nachuntersuchung (vgl. Abb. 12 bei Heckmann et. al. 2017). Im beschriebenen Zeitraum von 5 Jahren haben sich offensichtlich keine wesentlichen Differenzen der Volumina für beide Gruppen ergeben, so dass ein harmonisches Langzeitergebnis vorliegt. Dies weist darauf hin, dass die erfolgte Überkonturierung das Resorptionsausmaß kompensiert haben dürfte.

Augmentierter Kieferabschnitt 0,5 Jahre und 5 Jahre post operationem

Von besonderem Interesse ist natürlich die Frage nach dem Resorptionsverhalten über den Zeitraum von 5 Jahren. Dabei wurde beim Vergleich auf die nach 6 Monaten erhobenen Werte zurückgegriffen. In allen 4 Untersuchungsgruppen war ein gewisses Ausmaß an Resorption zu beobachten (Abb. 14). In Gruppe 1a mit $p=0,13$, 1b mit $p=0,13$, 2a mit $p=0,38$ und 2b mit $p=0,64$ lagen aber auch hier keine statistisch signifikanten Unterschiede vor. Die in Gruppe 1a gemessene Volumenabnahme um $10,0 \text{ mm}^3$ stellte die geringste Abnahme der vier Gruppen dar. Dies lässt sich möglicherweise mit dem Vorgehen des Operateurs erklären, der im Bewusstsein von Sofortimplantation mit Sofortversorgung als Gruppencharakteristikum etwas mehr Augmentationsmaterial verwendet haben könnte. Zweifellos handelt es sich in dieser Gruppe um höchstmögliche ästhetische Anforderungen, so dass eventuell

auch einfach versucht wurde, der Resorption bewusst oder unbewusst mit einer vermehrten Augmentation entgegenzuwirken.

Wenn man die Gruppen in Sofort- und Frühimplantation zusammenfasst (Abb. 15) ergibt das für die Sofortimplantation einen p-Werte von 0,036, was einen signifikanten Unterschied zwischen den Volumina 0,5 Jahre und 5 Jahre post operationem bedeutet. Bei der Frühimplantation lag einen Wert von $p=0,30$ vor. Es ist davon auszugehen, dass in 4,5 Jahren bei den augmentierten Arealen nach Sofortimplantation etwas stärkere Resorptionsprozesse abgelaufen sind. Dies mag damit zusammenhängen, dass bei der Sofortimplantation der komplette Wundheilungsprozess mit der höchsten Umbau- und Resorptionsrate zu Beginn des Prozesses vollständig durchlaufen wird. Bei der Frühimplantation hingegen waren schon 6 Wochen Heilungsprozess vergangen bevor die Implantatsetzung erfolgte (Cardaropoli et al 2003, Buser et al. 2011).

Wenn man die Gruppen Sofortversorgung und Frühversorgung bildet, so ist jeweils nach 5 Jahren ein gewisses Ausmaß an Resorption zu beobachten (Abb.16), das jedoch mit $p=0,15$ bzw. $p=0,14$ sich als nicht signifikant darstellt. Bei der Analyse der mittleren Schneidezähne lag mit $p=0,03$ eine signifikante Resorption vor, nicht jedoch beim seitlichen Schneidezahn mit $p=0,68$ (Abb. 17). Dies könnte damit zusammenhängen, dass das mittlere Schneidezahnsegment in aller Regel eine höhere Defektgröße aufweist, was auch zu einer höheren Resorptionsrate führen kann. Bei dem weniger prominenten seitlichen Schneidezahn hingegen ist aufgrund der Prominenz des Alveolarfortsatzes des benachbarten mittleren Schneidezahns und des benachbarten Eckzahns von höherer lateral einwirkender osteogener Potenz auszugehen, was die geringere Resorptionsrate erklären könnte.

Die Gesamtheit aller vier Gruppen ergab eine Verminderung der gemessenen Volumina von $218,9 \text{ mm}^3$ (0,5 Jahre) auf $184,1 \text{ mm}^3$ (5 Jahre; Abb. 18), was eine Verringerung von 12,4% bedeutet. Der p-Wert von 0,03 zeigt, dass es sich hierbei um einen signifikanten Rückgang handelt. Dies weist drauf hin, dass auch bei der Verwendung von DBBM (BioOss, Geistlich, Wolhusen, Schweiz) mit einem gewissen Maß an Resorption zu rechnen ist. In einer anderen Studie mit

autologen Knochenblöcken, die durch DBBM ergänzt und durch eine Kollagenmembran abgedeckt wurden, beobachteten die Autoren nach 10 Jahren eine 7,7% Resorption des Augmentat-Volumens (Chappuis et al. 2017). Der Unterschied im Ergebnis zu unserer Studie könnte dadurch bedingt sein, dass im Studiendesign von Chappuis et al. unterschiedliche Messverfahren angewandt wurden. Dort wurde die AF-Breite einmal mechanisch bestimmt und nach 10 Jahren mit den im DVT gewonnenen Daten verglichen. Da bei Augmentationen mit Knochenblöcken der Hauptteil des augmentierten Volumens vom eigentlichen Block eingenommen wird und lediglich die Lücken bzw. Übergänge zum umgebenden Knochen mit Knochenersatzmaterial aufgefüllt werden, ist eine Vorhersage für die isolierte Resorption des xenogenen Materials schwierig.

Natürlicher Kieferabschnitt 0,5 Jahre und 5 Jahre post operationem

Interessant erschienen auch die Volumenbestimmungen der gegenüberliegenden natürlichen Seite über den Zeitraum von 5 Jahren. In den Gruppen 2a und 2b (Abb. 19) wurden geringe Resorptionsvorgänge beobachtet, die mit $p=0,91$ und $p=0,92$ nur tendenziell vorlagen. Der erhaltene Anstieg in Gruppe 1a nach 5 Jahren ist schwer zu erklären – er ist jedoch auch nicht statistisch signifikant. Möglicherweise kam es bei der OP im Bereich der mittleren Schneidezähne lateral zu einer Überaugmentations, die im Bereich des natürlichen Einsers die Volumenzunahme bedingte. In Gruppe 1b hingegen war der Unterschied mit $p=0,034$ signifikant, was schwer zu erklären ist, wenn man nicht von Messfehlern ausgeht. Die Gruppen der Sofort- und Frühimplantation zeigten mäßigen Volumenverlust (Abb. 20), der mit $p=0,18$ und $p=0,88$ auch nicht statistisch signifikant war. Bei Sofort- und Frühversorgung waren die Messergebnisse etwas uneinheitlich (Abb. 21), aber mit $p=0,28$ und $p=0,95$ nicht statistisch signifikant. Hier dürften sich die Problematik in Gruppe 1a, wie oben beschrieben, ausgewirkt haben. Der Vergleich der mittleren und seitlichen Schneidezähne ergab einen geringen Volumenverlust (Abb. 22), der mit $p=0,28$ und $p=0,95$ nicht signifikant war. Fasst man schließlich die Messwerte bei allen Patienten zusammen (Abb. 23), so ergibt sich nach 5 Jahren eine Volumenreduktion von $23,7 \text{ mm}^3$ oder $5,4 \%$, und $p=0,49$. Es kann also festgehalten werden, dass auf der gesunden natürlichen Seite über den 5-

Jahres-Zeitraum eine geringe Alveolarfortsatz-Resorption beobachtet wurde, die jedoch nicht statistisch signifikant war. Auf der augmentierten Implantatseite hingegen wurde ein statistisch signifikanter Volumenrückgang ermittelt.

Bio-Oss hat sich als Augmentationsmaterial bewährt und in klinischen Untersuchungen zur Reduktion von horizontalen Resorptionen des Alveolarfortsatzes nach Implantatsetzung geführt (Chen et al. 2007). In der vorliegenden Studie wurde Bio-Oss als alleiniges Augmentationsmaterial mit Abdeckung durch eine Kollagenmembran verwendet. Dies scheint genauso zu neugebildeten Knochen zu führen und die Alveolarfortsatz-Breite zu stabilisieren wie ein Vorgehen, bei dem Bio-Oss in Kombination mit autogenem Knochen Verwendung findet (Aludden et al. 2017). Die klinische Bedeutung der vestibulären Augmentationsmaßnahmen ist nach wie vor hoch aktuell, wenn man bedenkt, dass einer Trendanalyse zufolge bei 60,8 % der gesetzten Implantate Augmentationsmaßnahmen erforderlich sind. Wenn man nur die Implantate betrachtet, die in der ästhetisch anspruchsvollen anterioren Maxilla gesetzt werden, sind es sogar 83,5% (Ducommun et al. 2019).

Limitationen

Zunächst wurden von den Patienten Abdrücke genommen und Gipsmodelle angefertigt. Mit einem digitalen Volumetomographen (Morita 3D Accuitomo, Japan) wurden die Modelle gescannt und mit dem Software-Paket CoDiagnostiX (Dental Wings, Berlin) erfolgten die Volumenbestimmungen. Durch dieses Vorgehen wurde auch die Dicke der Gingiva mitbestimmt, so dass sich die Volumen-Ergebnisse stets auch dies beinhalten. Die eventuelle Veränderung der Gingiva-Dicke im Zuge der chirurgischen Lappenpräparation durch Mukoperiost-Abhebung und möglicher Narbenbildung über die Jahre sollte allerdings nicht unerwähnt bleiben. Beim Vergleich von 0,5 und 5 Jahren könnte ein gewisses Ausmaß an Narbenschumpfung das Ergebnis geringfügig beeinträchtigt haben. Bei zukünftigen Untersuchungen wäre zu überlegen, ob sich durch ein standardisiertes Bone-Mapping nach festgelegtem Muster die Dicke der Gingiva zu bestimmen wäre und der Fehler minimiert werden könnte.

Als Vorteil der angewandten Methode ist die vollständige Vermeidung einer Strahlenbelastung für die Patienten zu betrachten sowie die Möglichkeit, die Messungen mit dem DVT wiederholt durchzuführen, was dann auch zur Ermittlung der 10-Jahres-Ergebnisse erfolgen kann. Die Modelle könnten auch in weiteren Untersuchungsreihen mit weiterentwickelten DVT-Geräten verwendet werden, ohne dass Verfälschungen der Volumina eintreten. Allerdings ist auch davon auszugehen, dass die voranschreitende Entwicklung der Technik im DVT-Segment eine Verbesserung der Qualität mit immer stärkerer Reduzierung der Strahlenbelastung erwarten lässt (Feragalli et al. 2017, Chappuis et al. 2013), was gegebenenfalls auch die ethische Problematik mit in vivo-Untersuchungen verringern würde. Im DVT ließen sich möglicherweise die Abgrenzungen der zu vermessenden Areale noch genauer festlegen. Allerdings könnten dann Strahlungsartefakten, wie sie durch das metallische Implantat im Bereich des Augmentats auftreten, das Ergebnis beeinträchtigen.

Beim klinischen Vorgehen wird im Zuge der Augmentation überkonturiert. Dabei kann Augmentationsmaterial nur schwer exakt auf das zu untersuchende Gebiete begrenzt werden. Man muss daher davon ausgehen, dass geringe Mengen Augmentationsmaterial auch auf den fazialen Alveolarfortsatz der angrenzenden Zähne gelangen können. Dies gilt es zu berücksichtigen, vor allem wenn eine unerwartet geringe Resorption gemessen wird oder gar ein Volumenanstieg, wo es eigentlich nicht vorkommen kann.

In der vorliegenden Untersuchung wurde auf einen Vergleich des farblichen Ergebnisses wie in einer neueren Studie aus Dänemark nicht eingegangen. Da sowohl das von uns verwendete Hydroxylapatit als auch die Kollagenmembran einen weißlichen Farbton aufweisen haben wir diesem Parameter weniger Bedeutung beigemessen. Die in der dänischen Studie durchgeführten Bindegewebstransplantate vom weichen Gaumen können ganz offensichtlich eine farbliche Veränderung und bessere faziale Dimension bewirken (Hosseini et al. 2020).

Um eine möglichst hohe Präzision zu gewährleisten wurde in unserer Studie ein striktes Protokoll eingehalten. So wurde von denselben Mitarbeitern die

Abformungen ausgeführt, im Labor wurden vom selben Techniker die Arbeiten gefertigt und es wurde darauf geachtet, die gleichen Materialien zu verwenden.

5. Schlussfolgerung

Aus den Ergebnissen dieser Studie lässt sich ableiten, dass mit bovinem Hydroxylapatit als xenogenem Knochenersatzmaterial und Kollagenmembran relativ volumenstabile Ergebnisse zu erzielen sind. Wenn man bei der Augmentation auf eine 10-20-prozentige Überkonturierung des Defekts achtet, kann man davon ausgehen, dass sich eine zu erwartende Resorption zur Genüge ausgleicht und ein ästhetisch ansprechendes Langzeitergebnis zu erzielen ist.

6. Literaturverzeichnis

Aludden HC, Mordenfeld A, Hallman M, Dahlin C, Jensen T.
Lateral ridge augmentation with Bio-Oss alone or Bio-Oss mixed with
particulate autogenous bone graft: a systematic review.
International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery 2017;46:1030-1038.

Araújo MG, da Silva JC, de Mendonça AF, Lindhe J. Ridge alterations
following grafting of fresh extraction sockets in man. A randomized clinical
trial.
Clinical Oral Implants Research 2015;26:407-412.

Araújo MG, Lindhe J. Dimensional ridge alterations following tooth extraction.
An experimental study in the dog.
Journal of Clinical Periodontology 2005;32:212-218.

Benic GI, Mokti M, Chen CJ, Weber HP, Hämmerle CH, Gallucci GO.
Dimensions of buccal bone and mucosa at immediately placed implants after
7 years: a clinical and cone beam computed tomography study.
Clinical Oral Implants Research 2012;23:560-566.

Buser D, Wittneben J, Bornstein MM, Grütter L, Chappuis V, Belser UC.
Stability of contour augmentation and esthetic outcomes of implant-
supported single crowns in the esthetic zone: 3-year results of a prospective
study with early implant placement postextraction.
Journal of Periodontology 2011;82:342-349.

Cardaropoli G, Araújo M, Lindhe J. Dynamics of bone tissue formation in
tooth extraction sites. An experimental study in dogs.
Journal of Clinical Periodontology 2003;30:809-818.

Cardaropoli D, Tamagnone L, Roffredo A, Gaveglio L, Cardaropoli G. Socket
preservation using bovine bone mineral and collagen membrane: a
randomized controlled clinical trial with histologic analysis.

International Journal of Periodontics and Restorative Dentistry 2012;32:421-430.

Chappuis V, Cavusoglu Y, Buser D, von Arx T. Lateral Ridge Augmentation Using Autogenous Block Grafts and Guided Bone Regeneration: A 10-Year Prospective Case Series Study.

Clinical Implant Dentistry and Related Research 2017;19:85-96.

Chappuis V, Engel O, Reyes M, Shahim K, Nolte LP, Buser D. Ridge alterations post-extraction in the esthetic zone: a 3D analysis with CBCT.

Journal of Dental Research 2013;92:195-201.

Chen ST, Darby IB, Reynolds EC. A prospective clinical study of non-submerged immediate implants: clinical outcomes and esthetic results.

Clinical Oral Implants Research 2007;18:552-562.

Chen ST, Darby I. The relationship between facial bone wall defects and dimensional alterations of the ridge following flapless tooth extraction in the anterior maxilla.

Clinical Oral Implants Research 2016; 28:931-937.

Ducommun J, El Kholly K, Rahman L, Schimmel M, Chappuis V, Buser D. Analysis of trends in implant therapy at a surgical specialty clinic: Patient pool, indications, surgical procedures, and rate of early failures-A 15-year retrospective analysis. Clinical Oral Implants Research 2019;30:1097-1106.

Feragalli B, Rampado O, Abate C, Macrì M, Festa F, Stromei F, Caputi S, Guglielmi G. Cone beam computed tomography for dental and maxillofacial imaging: technique improvement and low-dose protocols.

Radiologia Medica 2017;122:581-588.

Ferrus J, Cecchinato D, Pjetursson EB, Lang NP, Sanz M, Lindhe J. Factors influencing ridge alterations following immediate implant placement into extraction sockets.

Clinical Oral Implants Research 2010;21:22-29.

Hahn TR, Kübler NR. Die Schaffung eines geeigneten Implantatlagers: Knochentransplantate, Knochenersatzmaterialien und Membranen.

Implantologie Journal 2006; 10:6-14.

Hämmerle Ch, Chen ST, Wilson TG Jr. Consensus statements and recommended clinical procedures regarding the placement of implants in extraction sockets.

International Journal of Oral & Maxillofacial Implants 2004;19:26-28.

Hämmerle Ch, Jung RE, Yaman D, Lang NP. Ridge augmentation by applying bioresorbable membranes and deproteinized bovine bone mineral: a report of twelve consecutive cases.

Clinical Oral Implants Research 2008;19:19-25.

Heckmann SM, Mörtlbauer B, Rieder D, Wichmann M, Krafft T, Moralis A. Alveolar Ridge Dimension 6 Months After Implant Placement with Simultaneous Hard Tissue Augmentation.

International Journal of Oral & Maxillofacial Implants 2017;32:408-414.

Hosseini M, Worsaae N, Gotfredsen K. Tissue changes at implant sites in the anterior maxilla with and without connective tissue grafting: A five-year prospective study. Clinical Oral Implants Research 2020;31:18-28.

Kuchler U, Chappuis V, Gruber R, Lang NP, Salvi GE. Immediate implant placement with simultaneous guided bone regeneration in the esthetic zone: 10-year clinical and radiographic outcomes.

Clinical Oral Implants Research 2016;27:253-257.

Misawa M, Lindhe J, Araújo MG. The alveolar process following single-tooth extraction: a study of maxillary incisor and premolar sites in man. *Clinical Oral Implants Research* 2016;27:884-889.

Roe P, Kan JY, Rungcharassaeng K, Caruso J, Zimmerman G, Mesquida J. Horizontal and vertical dimensional changes of peri-implant facial bone following immediate placement and provisionalization of maxillary anterior single implants: a 1-year cone beam computed tomography study. *International Journal of Oral and Maxillofacial Implants* 2012;27:393-400.

Schropp L, Wenzel A, Kostopoulos L, Karring T. Bone healing and soft tissue contour changes following single-tooth extraction: a clinical and radiographic 12-month prospective study. *International Journal of Periodontics and Restorative Dentistry* 2003;23:313-323.

Tarnow DP, Chu SJ, Salama MA, Stappert CF, Salama H, Garber DA, Sarnachiaro GO, Sarnachiaro E, Gotta SL, Saito H. Flapless postextraction socket implant placement in the esthetic zone: part 1. The effect of bone grafting and/or provisional restoration on facial-palatal ridge dimensional change-a retrospective cohort study. *International Journal of Periodontics and Restorative Dentistry* 2014;34:323-331.

von Arx T, Buser D. Horizontal ridge augmentation using autogenous block grafts and the guided bone regeneration technique with collagen membranes: a clinical study with 42 patients. *Clinical Oral Implants Research* 2006;17:359-66.

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

Danksagung

Herrn Prof. Dr. Matthias Karl, Direktor der Klinik für Zahnärztliche Prothetik und Werkstoffkunde, danke ich für die Möglichkeit, meine Doktorarbeit an seiner Klinik abschließen zu dürfen.

Ganz besonders möchte ich mich bei meinem Doktorarbeitsbetreuer Herrn Professor Dr. Dr. Siegfried Heckmann für seine wertvollen Ratschläge und die Unterstützung bedanken, die für das Gelingen der Arbeit so wertvoll waren.

Großer Dank geht an Dr. Dr. T. Krafft, Dr. Dr. J. Eggert und Ihr Praxisteam in Weiden für die Bereitstellung des Patientenkollektivs sowie der technischen Unterstützung.

Herrn Dr. Friedrich Gräf vom Institut für Angewandte Mathematik möchte ich für die statistische Auswertung der Ergebnisse danken.

Meiner Frau für die tatkräftige Unterstützung bei der Textbearbeitung und Formatierung der Dissertation.