

**Messung der relativen Bisskraftverteilung nach
Implantation mit Hilfe der T-Scan™ III Okklusalanalyse
Eine Pilotstudie**

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades (Dr. med. dent.)

der Medizinischen Fakultät

der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität

Bonn

Mandy Katharina Birkhoff

aus Grevenbroich

2026

Angefertigt mit der Genehmigung
der Medizinischen Fakultät der Universität Bonn

1. Gutachter: Prof. Dr. Christoph Bourauel
2. Gutachter: PD Dr. Benedikt Eggers (MHBA)

Tag der Mündlichen Prüfung: 02.02.2026

Aus der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik, Propädeutik und Werkstoffwissenschaften
Oralmedizinische Technologie

Für Doc Mike
In omnia paratus

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	7
1. Einleitung	8
1.1 Einführung in die Grundlagen von Implantaten	8
1.2 Implantologie	10
1.3 Digitale Okklusionsanalyse	12
1.4 Stand der Forschung	14
1.5 Fragestellung dieser Arbeit	16
2. Material und Methoden	17
2.1 Studienentwurf	17
2.2 Versuchs- und Kontrollgruppe	18
2.2.1 Charakterisierung der Studienpopulation	19
2.3 Behandlungsablauf	20
2.3.1 Implantation	20
2.3.2 Prothetik	24
2.3.3 Okklusion	25
2.3.4 Messung mithilfe des T-Scan™ III	27
2.4 Auswertung der erhobenen Daten	28
2.4.1 Auswertung der relativen Kraftverteilung pro Areal (%MA)	28
2.4.2 Semiquantitative Auswertung des maximalen Kraftanteils pro Messareal (VIS)	30
2.4.3 Auswertung der Kraftverteilung pro Messquadrant (%Q)	31
2.4.4 Statistik	32
3. Ergebnisse	33
3.1 Behandlungsergebnisse	33
3.1.1 Implantation und Prothetik	33
3.1.2 Okklusionsanalyse	33
3.1.2.1 Auswertung der relativen Kraftverteilung pro Messareal (%MA)	33
3.1.2.2 Visuelle Auswertung des maximalen Kraftanteils pro Messareal (VIS)	36
3.1.2.3 Auswertung der relativen Kraftverteilung pro Messquadrant (%Q)	40

4.	Diskussion	41
4.1	Diskussion der Methodik	41
4.1.1	T-Scan™-System	41
4.1.2	Validität der Messverfahren	42
4.2	Mögliche Gründe für Veränderungen der Okklusion	45
4.2.1	Antagonistenelongation	45
4.2.2	Mechanischer Verschleiß	46
4.2.3	Zahnwanderungen	46
4.3	Analyse vergleichbarer Studien	47
4.4	Limitationen der Patientenkohorte	49
4.5	Klinische Relevanz	50
4.6	Limitationen und zukünftige Forschungsansätze	53
5.	Zusammenfassung	54
6.	Abbildungsverzeichnis	56
7.	Tabellenverzeichnis	57
8.	Literaturverzeichnis	58
9.	Erklärung zum Eigenanteil	67
10.	Danksagung	68

Abkürzungsverzeichnis

%MA	Relative Kraftverteilung pro Areal (%MA)
%Q	Kraftverteilung pro Messquadrant
DIST	Distal des Implantationsgebietes
IMPL	Implantationsgebiet
IPO	Implantatschützende Okklusion (implant protecting occlusion; IPO)
IQR	Interquartilsabstand
KONTRA	Kontralateral des Implantationsgebietes
MES	Mesial des Implantationsgebietes
Ncm	Newtonzentimeter
VIS	Visuelle Auswertung des maximalen Kraftanteils pro Messareal

1. Einleitung

1.1 Einführung in die Grundlagen von Implantaten

Zahnimplantate werden zur Rekonstruktion eines partiellen oder totalen Zahnverlustes genutzt. Sie sind ein wesentlicher Bestandteil der modernen Zahnmedizin mit einer hohen Akzeptanz, sowohl von Behandler- als auch Patientenseite. Einer der führenden Gründe dafür ist ihre ausgezeichnete Überlebenswahrscheinlichkeit (Osseoperzeption, 2022; Prieto-Barrio et al., 2022). Obwohl die Langlebigkeit von Zahnimplantaten gut dokumentiert ist (Tomasi et al., 2008) gilt es, Risikofaktoren für den Implantationserfolg zu erkennen und diese im klinischen Alltag zu verhindern. Im Vergleich zu natürlichen Zähnen sind Implantate direkt im Knochen statt im Periodont verankert (siehe Abbildung 1).

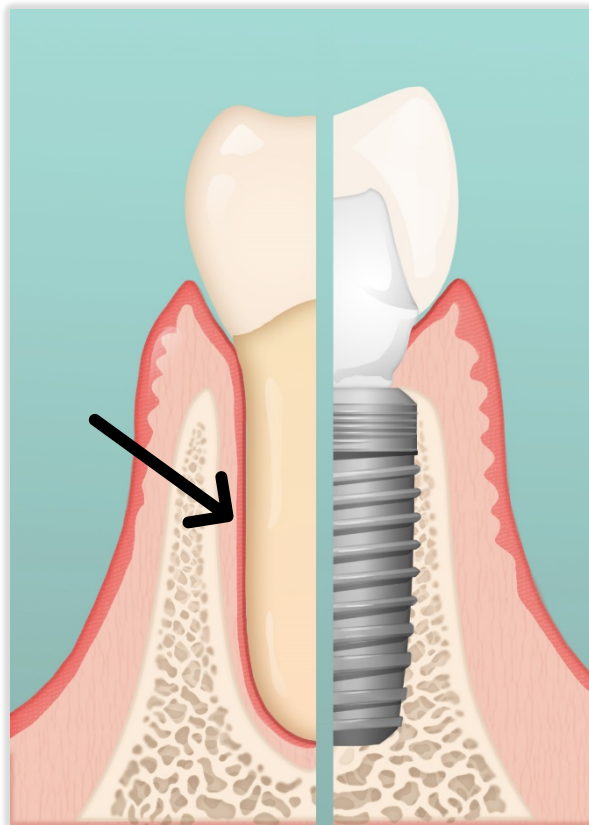


Abbildung 1: Schematische Darstellung einer natürlichen Zahnkrone (links) gegenüber einem Implantat (rechts). Die natürliche Zahnkrone ist über parodontale Ligamente (Pfeil) mit dem Kieferknochen verbunden. Der Implantatkrone fehlen diese Verbindungen, da sie operativ direkt im Knochen verankert wird.

Durch diesen strukturellen Unterschied kann das Implantat im Vergleich zum natürlichen Zahn bei axialer Belastung deutlich weniger nachgeben (Carlsson, 2009; Gross, 2008; Prieto-Barrio et al., 2022). Dieser Mechanismus steht im Verdacht, die Okklusion sowie die Überlebensrate des Implantates und der dazugehörigen Suprakonstruktion negativ zu beeinflussen (Kim, 2020). Deswegen wird für die Planung von Implantatkronen häufig eine implantatschützende Okklusion (implant protecting occlusion; IPO) zur Gestaltung der Okklusion verwendet. Die IPO sieht vor, dass die Implantatkrone bei leichter Okklusion keinen Kontakt zum Gegenzahn aufweist und bei maximal ausgeübter Kaukraft weniger Kontakt hat als die Nachbarzähne (siehe Abbildung 2). So soll eine Überbelastung der Suprakonstruktion und des Knochenbettes des Implantats vermieden werden. Ob diese Infraokklusion jedoch konstant bleibt oder sich aufgrund von Antagonistenelongation, okklusalem Abrieb der Nachbarzähne oder Mesialtrieb der natürlichen Molaren verändert (Luo et al., 2020) oder überhaupt notwendig ist, wird nach wie vor erforscht.

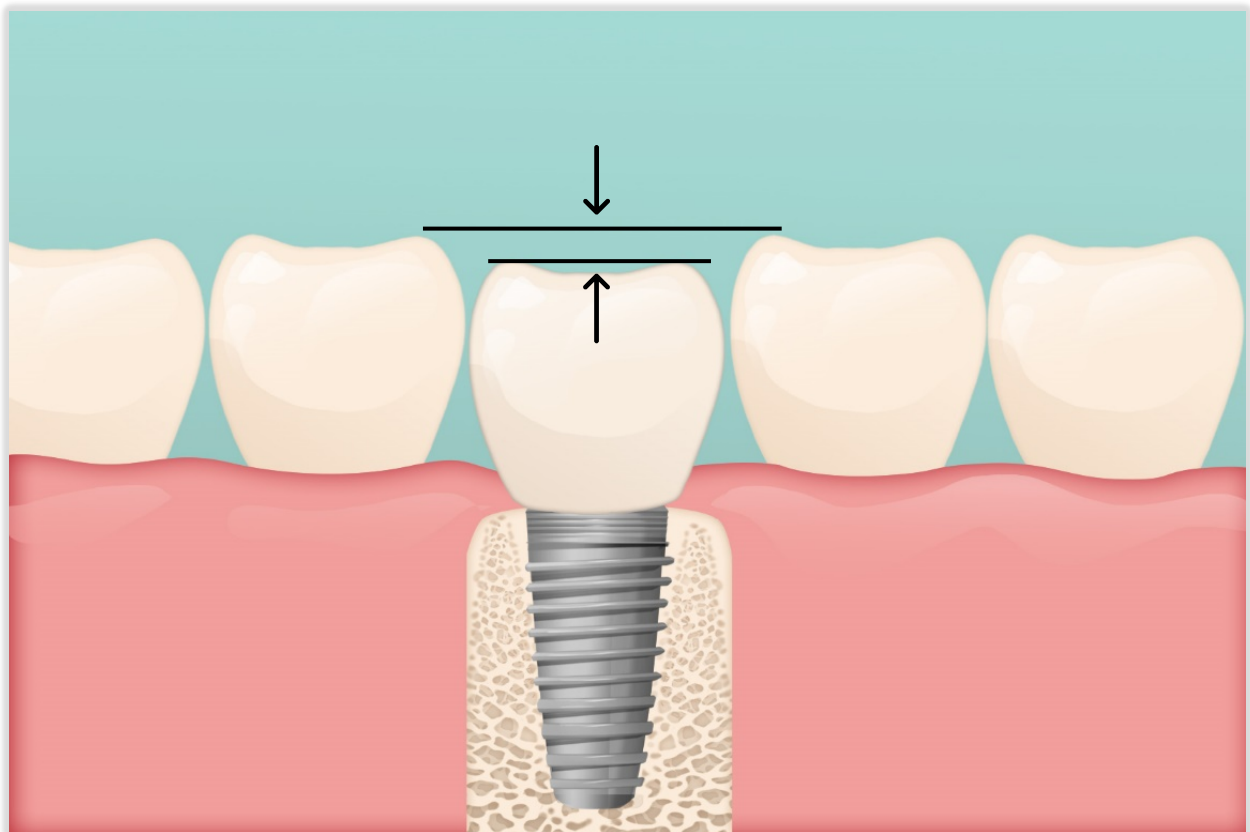


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Implantates, welches gemäß der implantat schützenden Okklusionsplanung in leichter Infraokklusion zu den Nachbar Zähnen steht.

Das Ziel dieser Arbeit war es, in einem Patientenkollektiv mithilfe des T-Scan™-Systems eine computerassistierte Analyse der Okklusion vor und nach Zahnimplantation durchzuführen um in einem Zeitintervall von insgesamt drei, sechs und zwölf Monaten eventuelle Veränderungen der Bisskraftverteilung, insbesondere hinsichtlich des Implantats, nachweisen zu können. Dazu wird in diesem Kapitel zunächst das Konzept der implantatschützenden Okklusion betrachtet. Anschließend wird das T-Scan™-System als Mittel der Wahl zur computerassistierten Okklusionsanalyse vorgestellt. Es folgt ein Überblick über den Stand der Forschung und die Fragestellung dieser Arbeit.

1.2 Implantologie

Diese Arbeit basiert auf dem Konzept der Implantologie, insbesondere auf den grundlegenden Unterschieden zwischen natürlichen Zähnen und zahnärztlichen Implantaten. Implantate sind meist Zahnersatz erster Wahl bei Einzelzahnlücken (Henry et al., 1995). Sie werden jedoch auch zur Verankerung von implantatgetragenen und implantatgestützten Brücken und Prothesen verwendet. Sie ersetzen nicht nur den Zahn, sondern erhalten auch das angrenzende Knochengewebe (Schropp et al., 2003). Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass benachbarte Zähne nicht, wie bei herkömmlichem Zahnersatz, wie Brücken, beschliffen oder belastet werden müssen.

Es gibt verschiedene Implantationskonzepte, welche sich hinsichtlich des verwendeten Materials, dem Implantatanbieter oder aufgrund der Präferenzen der jeweiligen Behandelnden unterscheiden. Letztlich beruhen sie jedoch alle auf dem Prinzip der Osseointegration (Brånemark, 1983). Dieses auf den schwedischen Zahnarzt Brånemark zurückzuführende Konzept beschreibt den physiologischen Verbund zwischen Knochengewebe und Implantatoberfläche als sogenannte funktionelle Ankylose (Reitemeier et al., 2006). Während die Überlebensrate von Einzelimplantaten sowohl nach fünf Jahren (97,7 %) als auch nach zehn Jahren (94,9%), die höchste Erfolgsquote aller Zahnersatzmethoden aufweist (Albrektsson & Donos, 2012), treten bei bis zu jedem vierten Implantat Entzündungsreaktionen im Sinne einer Periimplantitis auf, die zu erheblichen Beschwerden bis hin zur notwendigen Explantation führen können. Um dies zu verhindern, müssen

präoperativ mögliche Kontraindikationen ausgeschlossen und eventuelle Risikofaktoren beachtet werden.

Nebst interindividuellen Faktoren wie Alter, Lebensgewohnheiten und Compliance des Patienten (Carlsson, 2009), entscheiden auch die anatomischen und funktionellen Begebenheiten über den langfristigen Erfolg der Zahnimplantation. Doch selbst nach optimaler Durchführung der Implantation, Weichgewebemanagement und Prothetik, steht ein essenzieller Erfolgsfaktor aus, eine funktionelle und physiologische Okklusion. Zahnimplantate scheinen aus verschiedenen Gründen anfälliger für okklusale Komplikationen zu sein als natürliche Zähne. Die mechanische Kraft, die auf das Implantat ausgeübt wird, insbesondere wenn sie durch unerwünschte okklusale Kontakte schlecht verteilt wird, kann Komplikationen wie Periimplantitis, Knochenverlust in der Implantatregion, Materialversagen und periprothetische Frakturen nach sich ziehen (Schwarz, 2000). Die Ursachen für diese Anfälligkeit sollen sich im parodontalen Weichgewebe finden. Natürliche Zähne sind gegen axiale Belastung gut geschützt durch ihre Aufhängung an parodontalen Ligamenten. Dabei handelt es sich um kollagenhaltige, schrägverlaufende Fasern zwischen dem Zahn und der Zahnalveole, welche diesen im Knochen fixieren. Diese Ligamente ermöglichen dem Zahn bei Belastung eine gewisse Elastizität in Form einer axialen Verschieblichkeit von ca. 25-100 μm . Ein solcher Mechanismus fehlt dem enossal eingebrachten Implantat, hier ist lediglich entlang der ossären Grenzfläche eine minimale Verschiebung von ca. 3-5 μm möglich (Carlsson, 2009).

Neben der axialen Verschieblichkeit bieten die parodontalen Ligamente natürlicher Zähne auch weitere Vorteile. In diesen Ligamenten lokalisiert finden sich unterschiedliche Rezeptoren für die Wahrnehmung von Druck, Berührung und Schmerzen. Wenn Zähne okkludieren, übernehmen die parodontalen Mechanorezeptoren somit zahlreiche Aufgaben. Interessant sind in diesem Zusammenhang insbesondere die sogenannten langsam adaptierenden Rezeptoren des Zahnhalteapparates, welche für die Registrierung hoher Bisskräfte zuständig sind (Trulsson und Johansson, 1996). Hugger et al. konnten 2006 zum Beispiel durch unilaterale Anästhesie dieser Rezeptoren zeigen, dass diese eine wichtige Rolle beim Kauvorgang spielen (Hugger et al., 2006), während Ebert durch unilaterale Anästhesie keine signifikanten Änderungen fand (Ebert, 2010).

Diese para- bzw. interdentalen Mechanorezeptoren werden bei Zahnverlust nekrotisch und letztlich vom Körper resorbiert, was folglich einen Verlust des propriozeptiven Feedbacks mit sich bringen kann (Lee et al., 2023). Ohne diese neurophysiologischen Rezeptoren kann die entsprechende Region anfällig für eine pathologische Hyperokklusion werden, da die verbleibenden Rezeptoren in Haut und Kiefermuskulatur die Funktionalität des Feedbackmechanismus nicht vollständig erhalten können. Eine derartige Belastung jenseits der physiologischen Grenzen könnte eine Ursache für Knochenverlust rund um das entsprechende Implantat darstellen (Misch, 1996).

Aufgrund dieser Annahme wurde von Misch und Bidez bereits 1994 das Konzept der implantatgeschützten Okklusion (IPO) entwickelt (Misch und Bidez, 1994). Ziel der IPO ist es, die biomechanische Belastung auf der Kontaktebene des Implantats zu reduzieren. Die Langzeitstabilität des angrenzenden Knochens, der Weichteile, wie auch des Implantats sollen durch eine Optimierung des Okklusionsschemas geschützt werden. Ein Teil dieses Ziels kann bereits bei der Planung des Implantats erreicht werden. Die Überwachung der postoperativ erreichten Okklusion sowie eventueller Veränderungen im langfristigen Verlauf stellt im klinischen Alltag jedoch eine Herausforderung dar (Zhou et al., 2021). Es ist fraglich, ob durch die Infraokklusion des Implantats eine Elongation des Antagonistenzahnes begünstigt wird. Außerdem stehen sowohl die Abnutzung der Zähne sowie die kontinuierliche Mesialbewegung (Mesialdrift), die jährlich 0,1 bis 0,2 mm beträgt, im Verdacht, die Okklusion zu verändern (Luo et al., 2020).

1.3 Digitale Okklusionsanalyse

Über die Jahre wurden verschiedene Systeme entwickelt, um die genaue Lokalisation und Kraft der Zahnkontakte zu objektivieren. Während Okklusionspapier immer noch den Goldstandard der Behandlung darstellt (Heuser et al., 2020; Malta Barbosa et al., 2018), ist die Interpretation der erzeugten Papiermarkierungsfläche vom Behandler abhängig und nicht quantifizierbar. So weisen ähnlich große Markierungsflächen in keiner Weise ähnlich große okklusale Kräfte auf (Carey et al., 2007). Auch weitere gängige qualitative Messmethoden, wie Shimstockfolie, Wachsbisse, Silikonbisse und Okklusionssprays ermöglichen keine sichere quantitative Auswertung der Daten. Im Gegensatz dazu

werden in den letzten Jahren vermehrt digitale Lösungen, wie das OccluSense-System (Bausch, Deutschland) und das langjährig etablierte T-Scan™-System (Tekscan, Inc, South Boston, MA, USA) eingesetzt (siehe Abbildung 3).

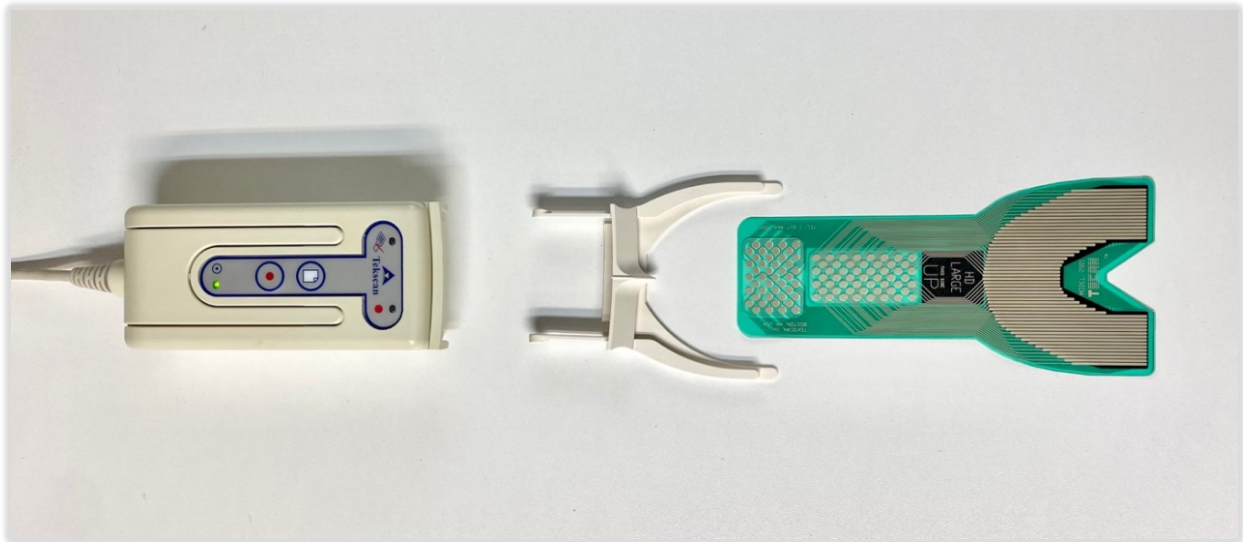


Abbildung 3: Handstück, Sensorhalter und hochauflösende Sensorfolie des T-Scan™-Systems (von links).

Das T-Scan™-System ist seit 36 Jahren auf dem Markt und hat kontinuierliche Verbesserungen sowohl in der Hardware als auch in der begleitenden Analysesoftware erfahren. Es wird von vielen Zahnärzten als der neue Goldstandard in der digitalen Okklusionsanalyse angesehen (Bozhkova et al., 2021; Dias et al., 2020; Jedliński et al., 2021). Im Gegensatz dazu gibt es weniger veröffentlichte Daten über das OccluSense-System, welches erst seit wenigen Jahren auf dem Markt ist (Schütze, 2023; Sutter, 2019).

Das T-Scan™-System kann qualitative Daten in quantitative Parameter umwandeln und digital anzeigen (Bozhkova, 2016). Die Folie misst den Druck in N/cm^2 und die Analysesoftware stellt den Anteil der Kraft pro Messareal dar. Die aufgenommenen Daten werden in Echtzeit angezeigt sowie in einem Film abgespeichert. Nach Abschluss der Aufnahme kann die Software den Zeitpunkt der maximal applizierten Kraft detektieren und die Bisskraftverteilung zu diesem Zeitpunkt in 2D- und 3D-Graphen anzeigen (Wu et al., 2023). Diese objektive Auswertung verhindert subjektive Fehlinterpretationen der

Okklusion und bietet einen Einblick in den Zeitpunkt und die Verteilung der maximal applizierten Kraft (Bozhkova, 2016).

Das T-Scan™-System soll die Limitationen konventioneller Methoden zur Bewertung der okklusalen Funktion überwinden. Durch die Möglichkeit, sowohl die relative Kraft als auch den Kontaktzeitpunkt zu bestimmen, kann der genaue Ablauf der Okklusion relativ einfach und effektiv ermittelt werden. Dies ermöglicht es dem Zahnarzt zu identifizieren, welcher Zahn zuerst auftrifft und gegebenenfalls therapeutische Maßnahmen zu ergreifen. Die Handhabung des T-Scan™-Systems ist unkompliziert und zeiteffizient, was seinen Einsatz in Praxen begünstigt. Die Nutzung des T-Scan™-Systems im Rahmen der klinischen Behandlung von Patienten erscheint daher angemessen und sinnvoll. Über den Nutzen des Gerätes im Rahmen klinischer Studien wird jedoch kontrovers diskutiert. Trotz häufiger Verwendung in zahlreichen Studien besteht berechtigter Zweifel an der Genauigkeit der dargestellten Okklusionsanalyse, vor allem der prozentual angegebenen Kraftverteilung.

Der häufige Gebrauch in klinischen Studien, trotz umstrittener Genauigkeit (Heuser et al., 2020), lässt sich auf den unkomplizierten Umgang mit dem Gerät, hohe Akzeptanz durch Patienten und die weite Verbreitung in den Praxen zurückführen. So ist das T-Scan™-System aktuell die wahrscheinlich einfachste Methode für Behandler und Wissenschaftler, quantitative Daten aufzunehmen und zu vergleichen.

1.4 Stand der Forschung

Der bisherige Forschungsstand zeichnet sich durch eine Vielfalt an Ergebnissen aus, die in Teilen uneinheitlich oder sogar widersprüchlich erscheinen. Prieto-Barrio et al. (2022) untersuchten die Okklusionsverteilung nach Platzierung einer implantatgetragenen Krone und stellten fest, dass sich diese Verteilung nach zwei Jahren nicht wesentlich veränderte. Eine Begründung für den Mangel an Supraeruption der Antagonistenzähne fanden sie in der Tatsache, dass die Antagonistenzähne nicht nur mit dem in Infraokklusion stehenden Implantat okkludierten. 18 von 20 Zähnen okkludierten auch mit den benachbarten natürlichen Zähnen, die in regulärer Okklusion standen und so eine mögliche Abstützung geben könnten. Die Autoren vermuteten, dass Faktoren wie Parafunktionen, Abnutzung

der natürlichen Zähne sowie der Implantatkrone und eine gute parodontale Unterstützung der Supraeruption entgegenwirken könnten.

Zhou et al. (2021) zeigten dagegen eine Bisskraftzunahme auf posterioren Einzelimplantatversorgungen über einen Zeitraum von sechs Monaten nach Implantation. Dabei ist jedoch anzumerken, dass obwohl die Okklusionskraft auf den Implantaten zunahm, sie signifikant weniger zunahm als auf den distalen Nachbarzähnen. Ebenso identifizierten Aradya et al. (2022) über Messungen mit dem T-Scan™-System signifikante Veränderungen der Okklusionskraft innerhalb der ersten sechs Monate nach der Einsetzung der Implantatprothesen (Aradya et al., 2022). Madani et al. (2017) beobachteten ebenso eine Zunahme der relativen Okklusionskraft von Implantatkronen, die mit natürlichen Zähnen okkludierten. Sie schlugen regelmäßige okklusale Anpassungen vor, um mögliche Überlastungen zu verhindern.

Ähnlich fanden Wu et al. (2023) eine Veränderung der Okklusionskraft nach Insertion von implantatgetragenen Freierendversorgungen und begründeten die fehlende Signifikanz ihrer Ergebnisse mit einer geringen Fallzahl. Lee et al. (2023) forschten ebenso über das Themengebiet der okklusalen Überlastung und deren Einfluss auf Implantatkomplikationen und periimplantäre Erkrankungen. Sie schlugen vor, die Implantatokklusion zu optimieren, um unphysiologische Überlastungen und damit verbundene Komplikationen zu minimieren. Dagegen stellten Koyano et al. (2012) fest, dass es keinen ausreichenden wissenschaftlichen Beleg dafür gibt, dass ein bestimmtes Implantationskonzept, z.B. die IPO, für implantatgetragene Prothesen anderen überlegen ist.

Carlsson et al. (2009) fanden, dass Faktoren wie Bisskraft, Parafunktionen und Okklusion weniger Relevanz für den periimplantären Knochenabbau darstellten als Faktoren wie Rauchen und Mundhygiene. Sie betonten erfolgreiche Behandlungsergebnisse trotz Abweichungen von idealen Okklusionen und empfahlen, dass konventionelle prothetische Prinzipien auf die Implantatprothetik angewendet werden. Goldstein et al. (2021) erforschten den Einfluss okklusaler Faktoren auf Implantate und diskutierten das Fehlen einer direkten Beziehung zwischen okklusalem Material und der Kraftübertragung auf

Implantate. Sie betonten potenzielle kompensatorische Mechanismen bei Patienten mit umfangreichen implantatgetragenen Restaurationen, die keine parodontalen propriozeptiven Nervenenden aufwiesen und trotzdem ähnliche taktile Sensibilität wie natürliche Zähne hatten.

1.5 Fragestellung dieser Arbeit

Im Zentrum dieser Dissertation steht die retrospektive Untersuchung der zeitlichen Veränderungen der Bisskraftverteilung nach einer Zahnimplantation mithilfe des T-Scan-Systems. Dabei soll analysiert werden, wie sich die Kraftverteilung auf die Implantatkrone, die benachbarten Zähne und die antagonistischen Zähne im gegenüberliegenden Kiefer über einen Zeitraum von zwölf Monaten entwickelt.

Die zentralen Forschungsfragen dieser Arbeit waren:

Unterscheiden sich die Veränderungen der Bisskraftverteilung in einer Versuchsgruppe mit natürlichen Antagonistenzähnen im Vergleich zu einer Kontrollgruppe mit antagonistischen Brückenversorgungen?

Wie beeinflussen die Implantatkrone und ihre benachbarten Zähne die okklusale Stabilität?

Inwiefern trägt die Untersuchung der Bisskraftverteilung zur Beurteilung der Notwendigkeit der implantatschützenden Okklusion (IPO) bei?

Die Ergebnisse dieser Studie sollen dazu beitragen, die Stabilität der Okklusion bei Zahnimplantaten besser zu verstehen, die klinische Relevanz der IPO zu diskutieren und somit die Behandlungsmethoden und die Lebensdauer von Implantaten zu verbessern.

2. Material und Methoden

Wie beschrieben, scheint eine Optimierung der Okklusion der Zahnimplantate für die orale Funktion und die Prävention von implantatbedingten Komplikationen je nach Studienlage von entweder größter oder ohne jegliche Bedeutung zu sein. In dieser Arbeit wurde daher in einem Patientenkollektiv mithilfe des T-Scan™-Systems eine computerassistierte Analyse der Okklusion vor und nach Zahnimplantation durchgeführt. Dabei wurden Zeitintervalle von jeweils drei, sechs und zwölf Monaten nach Implantation gewählt, um eventuelle Veränderungen der Bisskraftverteilung, insbesondere hinsichtlich des Implantats, nachweisen zu können. Da insbesondere die Elongation der Antagonistenzähne als eine mögliche Erklärung von Veränderungen der relativen Okklusionskraft diskutiert wird, wurden die Ergebnisse der Versuchsgruppe mit einer eng definierten Kontrollgruppe verglichen. Während die Versuchsgruppe aus Patienten mit natürlichen Antagonistenzähnen im Gegenkiefer bestand, bestand die Kontrollgruppe aus einem Patientenkollektiv mit bereits vorbestehendem Zustand nach antagonistischer Brückenversorgung im Gegenkiefer. Eine weitere Besonderheit dieser Studie stellt die Vergleichbarkeit des Patientenkollektives dar, da alle Patienten vom gleichen Behandler operiert wurden. So ließ sich ein einheitlicher Ablauf der Implantation sowie die Verwendung identischer Materialien bei jedem Patienten sicherstellen. Ebenso soll eruiert werden, inwiefern eventuelle Veränderungen der Okklusion klinisch relevant erscheinen und somit den Behandlungsverlauf verändern können.

2.1 Studienentwurf

Es handelt sich um eine retrospektive Kohortenstudie aller Patienten, die sich zwischen Januar 2019 und Dezember 2021 in der Praxis Dr. Horst Michael Birkhoff (Grünstraße 2, 41516 Grevenbroich) für eine Implantatversorgung vorgestellt haben und den Kriterien für Versuchs- oder Kontrollgruppe entsprachen. Dieser Studientyp bot sich an, da die Zahnarztpraxis durch standardisierte Abläufe umfassende Patientendaten aufnahm und speicherte. Beachtenswert ist, dass sämtliche Implantatverfahren und prothetische Behandlungen von demselben erfahrenen Zahnarzt durchgeführt wurden, was eine hohe Vergleichbarkeit und Konsistenz in der Studienkohorte gewährleistete.

2.2 Versuchs- und Kontrollgruppe

In der Versuchsgruppe (n = 9) dieser Arbeit wurden Patienten eingeschlossen bei denen in dem Zeitraum vom 01.01.2019 bis 31.12.2021 in der Zahnarztpraxis Dr. med. dent. Horst-Michael Birkhoff eine enostale Zahnimplantation durchgeführt wurde, mit einem natürlichen Gebiss in dem kontralateralen Quadranten. Weitere Einschlusskriterien waren ein Alter von mindestens 18 Jahren und das Vorhandensein eines normalen skelettalen Bisses. Ausgeschlossen wurden Patienten mit Gesichtsdeformitäten, Zahnersatz, akuter Parodontalerkrankung oder einer klinisch manifesten temporomandibulären Dysfunktion. Es wurden ausschließlich Implantate des Implantatsystems tiologic® ST (Dentaurum, Ispringen, Deutschland) verwendet.

Die Kontrollgruppe bestand aus (n = 5) Patienten, welche in demselben Zeitraum eine Versorgung mittels Einzelimplantat erhalten haben, bei Zustand nach bereits prätherapeutisch eingebrachten Brücken der okkludierenden Gegenseite. Diese Kontrollgruppe wurde gewählt, da die Brücken die okkludierenden Antagonisten miteinander verbinden und damit eine singuläre Antagonistenelongation als Ursache eventueller Okklusionsveränderungen ausgeschlossen werden konnte. Aufgrund dieser strikten, spezifischen Einschlusskriterien bestand die Kontrollgruppe lediglich aus fünf Patienten. Diese Kontrollgruppe wurde parallel zur Versuchsgruppe über den Versuchszeitraum beobachtet und zu den gleichen Zeiten vermessen. Nicht alle in dem angegebenen Zeitraum implantierten Patienten konnten in diese Studie aufgenommen werden, aufgrund der strengen Kriterien, die angewandt wurden. Aus anfänglich über 40 infrage kommenden Patienten mussten deshalb zahlreiche Patienten ausgeschlossen werden, hauptsächlich weil bereits diverse prothetische Versorgungen vorhanden waren. Bei allen Patienten erfolgte bei Erstvorstellung in der Praxis eine ausführliche klinische Erhebung des Zahnstatus. Sowohl bei den Patienten der Versuchs- als auch der Kontrollgruppe erfolgte mehrzeitig, über einen Gesamtzeitraum von zwölf Monaten, eine klinische Verlaufskontrolle sowie eine umfangreiche, computerassistierte Okklusionsanalyse mithilfe des T-Scan™-Systems (Tekscan, Boston, MA, USA, T-Scan 9.1). Auch das subjektive Wohlbefinden der Patienten im Verlauf des Beobachtungszeitraums wurde im Rahmen der klinischen Untersuchung erhoben. Die vier Untersuchungszeitpunkte, an denen die standardisierte Okklusionsanalyse

durchgeführt wurde, waren unmittelbar nach Eingliederung der prothetischen Versorgung, nach drei Monaten, nach sechs Monaten und zwölf Monate nach Eingliederung. Diese Verlaufskontrollen stellen den Standard in dieser Zahnarztpraxis dar und wurden bei jedem Patienten, der in dem angegebenen Zeitraum implantiert wurde, unabhängig von Inklusion in diese Studie, durchgeführt.

Alle Verfahren, die im Rahmen von Studien mit menschlichen Teilnehmern durchgeführt wurden, entsprachen den ethischen Standards des institutionellen und/oder nationalen Forschungsausschusses sowie der Deklaration von Helsinki von 1964 und ihren späteren Änderungen oder vergleichbaren ethischen Standards. Eine Genehmigung wurde im Rahmen einer umfassenderen Studie mit dem T-Scan™-System von der Ethikkommission des Universitätsklinikums Bonn eingeholt (Lfd. Nr. 244/16). Freiwillige Teilnehmer und ihre Familien oder rechtliche Vertreter haben schriftliche Einwilligungen unterzeichnet. Von allen individuellen Teilnehmern, die an der Studie teilgenommen haben, wurde eine informierte Zustimmung eingeholt.

2.2.1 Charakterisierung der Studienpopulation

Die Testgruppe bestand aus 9 Patienten zwischen 22 und 74 Jahren, von denen 5 männlich und 4 weiblich waren. Die Kontrollgruppe bestand aus 5 Patienten zwischen 52 und 77 Jahren, von denen 3 männlich und 2 weiblich waren.

Tabelle 1: Lokalisation und Spezifikationen der Implantate der Testgruppe.

Patient	Implantat Regio	Implantat Länge	Implantat Durchmesser
T1	35	13mm	3,7mm
T2	45	13mm	3,7mm
T3	36	11mm	3,7mm
T4	46	11mm	3,7mm
T5	16	13mm	4,2mm
T6	36	11mm	3,7mm
T7	46	11mm	3,7mm
T8	46	9mm	3,7mm
T9	15	13mm	3,7mm

Tabelle 2: Lokalisation und Spezifikationen der Implantate der Kontrollgruppe.

Patient	Implantat Regio	Implantat Länge	Implantat Durchmesser
K1	17	7mm	4,8mm
K2	47	9mm	4,8mm
K3	46	11mm	3,7mm
K4	17	7mm	4,8mm
K5	26	7mm	4,8mm

2.3 Behandlungsablauf

2.3.1 Implantation

Die Implantate wurden in einem ambulanten Eingriff, unter örtlicher Betäubung, in den Kiefer eingesetzt. Der Eingriff wurde von einem auf Implantologie und Prothetik spezialisierten Zahnarzt mit langjähriger Erfahrung durchgeführt. Zuvor erfolgte die ausführliche, dokumentierte Aufklärung der Patienten. Vor der Implantation wurde das Knochenangebot, die Weichgewebssituation sowie die Compliance des Patienten genau geprüft. Dabei wurde besonderer Wert auf die intensive Aufklärung der Patienten gelegt, um möglichen Ursachen des periimplantären Knochenverlusts, wie z.B. Rauchen oder mangelhafte Mundhygiene, vorzubeugen. Entsprechend des vorhandenen Knochens wurden Implantatlänge und Durchmesser ausgewählt.

Am Tag der Implantation wurde zuerst der zu behandelnde Bereich mittels Lokalanästhesie betäubt. Nach Inzision des Zahnfleisches wurde der Knochenkamm freipräpariert (siehe Abbildung 4A). Darauf folgte die Markierungsbohrung, um die Position für die Insertionsstelle des Implantates zu kennzeichnen (siehe Abbildung 4B). Anschließend wurde mit dem Tiefenbohrer die Tiefe und Richtung des Implantatbettes aufbereitet (siehe Abbildung 4C). Ein ebenes Knochenniveau wurde mit Hilfe eines Planfräasers auf der Kompakta erreicht, danach wurde das Implantatbett auf den festgelegten Implantatdurchmesser geweitet. Mit Hilfe des Gewindeschneiders wurde das Implantatbett für die Aufnahme eines Implantates vorbereitet. Schließlich wurde das Implantat (siehe Abbildung 4D). mit Hilfe eines Eindreh Schlüssels und einer Drehmomentratsche eingebracht (siehe Abbildung 5A). Um das innere Gewinde des

Implantates in der Einheilungsphase zu schützen, wurde eine Verschlusschraube genutzt (siehe Abbildungen 5B, C). Letztlich wurde das eingebrachte Implantat wieder mit Schleimhaut bedeckt und die Wunde verschlossen und zugenäht (siehe Abbildung 5D). Die Einheilungsphase des Implantats betrug im Oberkiefer mindestens sechs Monate und im Unterkiefer mindestens drei Monate, entsprechend konservativer Empfehlungen (Carlsson, 2009). Sobald diese abgeschlossen war, wurde die prothetische Versorgung vorbereitet. Zuerst wurden das Implantat unter Lokalanästhesie operativ freigelegt und die Verschlusschraube entfernt. Dann wurde eine Einheitschraube, auch Gingivaformer genannt, eingegliedert, welche das Zahnfleisch für die Prothetik vorformte. Ungefähr zwei Wochen später, nachdem sich das Zahnfleisch an die Form des Gingivaformers angepasst hatte, konnte dieser entfernt werden. Hiermit waren Implantat, Knochen und Gingiva für die prothetische Versorgung vorbereitet.

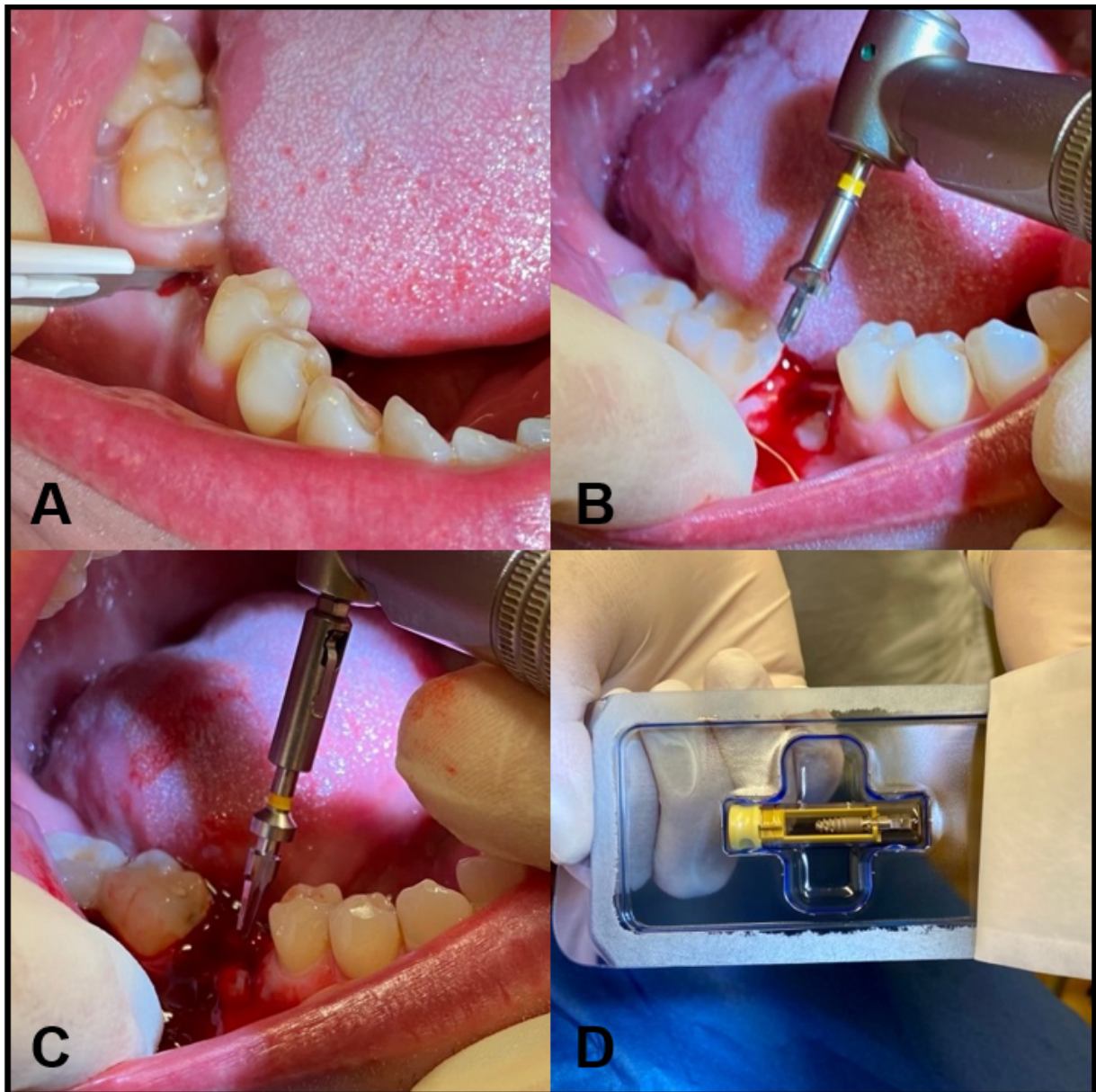


Abbildung 4: Ablauf einer Implantation. Zunächst erfolgte die Inzision des Zahnfleisches und die Freilegung des Knochenkamms (A). Es folgte eine Markierungsbohrung, zur Kennzeichnung der Insertionsstelle des Implantates und anschließend die Tiefenbohrung (B und C). Bild D zeigt das steril verpackte Implantat.

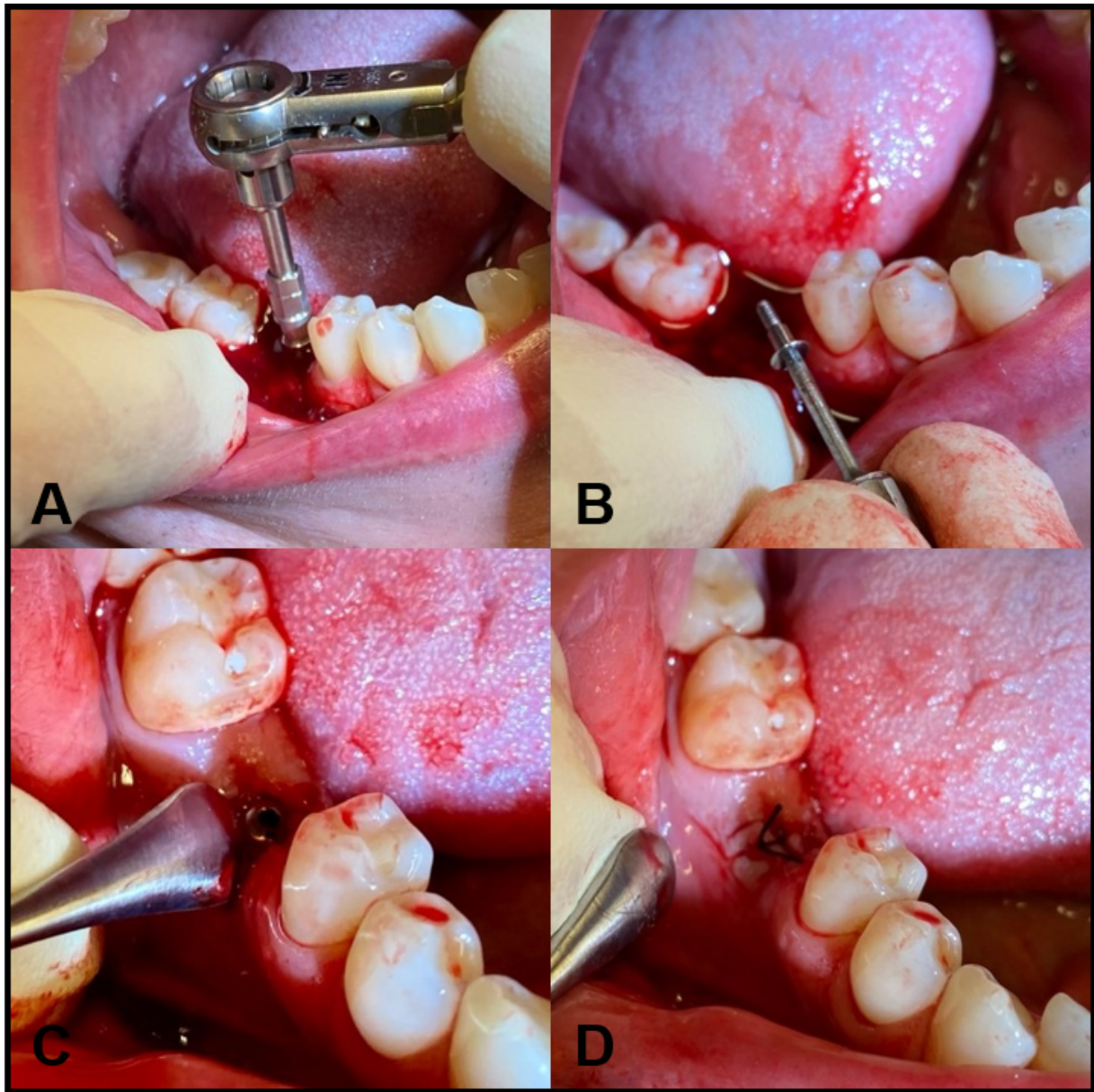


Abbildung 5: Dargestellt ist die Einbringung des Implantats mit einer Drehmomentratsche (A). Es folgte die Integration der Verschlusschraube (B und C). Der letzte Schritt der Implantation stellt die Schleimhautabdeckung mit Naht dar (D).

2.3.2 Prothetik

Nach erfolgreicher Osseointegration und Freilegung wurde als nächstes die Krone hergestellt und auf dem Implantat befestigt. Dies stellte den prothetischen Anteil der Versorgung dar. Alle Patienten wurden mit Keramikkrone versorgt, die vom gleichen Zahnarzt mit einem CAD/CAM-System hergestellt wurden (CEREC, Dentsply Sirona, Charlotte, NC, USA). Nach Entfernung der Einheitschraube wurde eine Ti-Base auf das Implantat geschraubt. Die Ti-Base ist eine Titan-Keramik-Verbindung, mit einem Element zur Verbindung mit dem Implantat und einer Verbindung in einen keramischen Block in den es verklebt wird (Conejo et al., 2017). Die Ti-Base diente dabei sowohl als Basis für den Scanbody wie auch als Verbindung zwischen Implantat und prothetischer Konstruktion. Als Nächstes wurde der Scanbody auf die Ti-Base platziert. Dieser Scanbody ermöglichte eine genaue Erfassung der Position und Ausrichtung des Implantats (Conejo et al., 2017). Daraufhin wurde der zu scannende Bereich vorbereitet. Die betroffene Region wurde gepudert (CEREC® Optispray, Dentsply Sirona, NC, USA), um eine klare und präzise digitale Erfassung während des Scanvorgangs zu gewährleisten. Durch die Bepuderung mit CEREC® Optispray wurde der Bereich mattiert, getrocknet und so folglich nicht durch Speichel, Lichtreflektion oder natürliche Farbunterschiede beeinflusst. Dies war von Bedeutung, um eine hochwertige Aufzeichnung der Implantatposition und der umgebenden Strukturen zu gewährleisten.

Die Digitalscannung erfolgte mithilfe des CEREC®-Systems (Dentsply Sirona). Verwendet wurde eine CEREC® BlueCam, Softwareversion 4.4 Premium. CEREC® ist eines der führenden CAD/CAM-Systeme in der Zahnmedizin. Nach der Digitalerfassung wurde die Heilkappe erneut eingesetzt, um das Implantat zu schützen und Verformungen des Zahnfleisches zu verhindern, während die Prothetik fertiggestellt wurde. Dies war entscheidend, um sicherzustellen, dass der Sitz der späteren Krone nicht von der Gingiva beeinträchtigt werden würde. Die prothetische Konstruktion wurde anhand dieser Scandaten erstellt, wobei alle Kronen aus Vita Enamic IS Blöcken (VITA Zahnfabrik, Bad Säckingen) gefertigt wurden, in die herstellerseitig ein passendes Loch für die Ti-Base eingearbeitet wurde. Die Vita Enamic IS Blöcke wurden mit einer MCXL Schleifkammer (Dentsply Sirona) geschliffen. Die Suprakonstruktion wurde nach Abschluss der Fertigung mit der Ti-Base außerhalb des Mundes unter Sauerstoffausschluss verklebt, wobei eine

Nut in der Ti-Base in Verbindung mit einer Kerbe im Enamic-Block für eine exakte Positionierung und Verdrehfestigkeit sorgten. Die Verklebung außerhalb des Mundes verringerte das Risiko eines Klebstoffüberschusses und eliminierte so eine häufige Lokalisation für Plaque und das damit einhergehende Risiko auf Periimplantitis (Conejo et al., 2017). Die fertige Krone wurde dann mit einem Drehmoment von 35 Ncm auf dem Implantat befestigt. Um die Schraube zu schützen, wurde ein Schaumstoffstück in das Loch eingelegt und das Loch mit Kunststoff verschlossen. Durch diesen Schutz der innenliegenden Schraube kann man zu einem späteren Zeitpunkt die Krone nicht-invasiv von dem im Knochen eingebrachten Implantat trennen. Dies ist zum Beispiel nach Zahntraumata oder Kronenfrakturen unabdinglich, da so keine hochinvasive Implantatentfernung und Reimplantation notwendig werden würden. Der eingebrachte Kunststoff im Schraubloch verleiht der Gesamtkonstruktion nicht nur Stabilität, sondern auch eine ästhetisch ansprechende Oberfläche.

2.3.3 Okklusion

Die optimale Okklusion wurde mithilfe diverser Techniken eingestellt. Zunächst wurde die Implantatkrone vor Eingliederung mithilfe des CEREC® Systems entworfen, welches Ober- und Unterkiefer digital über einen okkludierten Scan zusammenführte. Dadurch wurde der Kontakt der okkludierenden Zähne digital angezeigt, sodass dieser bei der Gestaltung der Krone berücksichtigt werden konnte (siehe Abbildung 6). Mit dieser Methodik konnten intraorale Einschleifmaßnahmen zu einem großen Teil vermieden werden (Bohner et al., 2016).

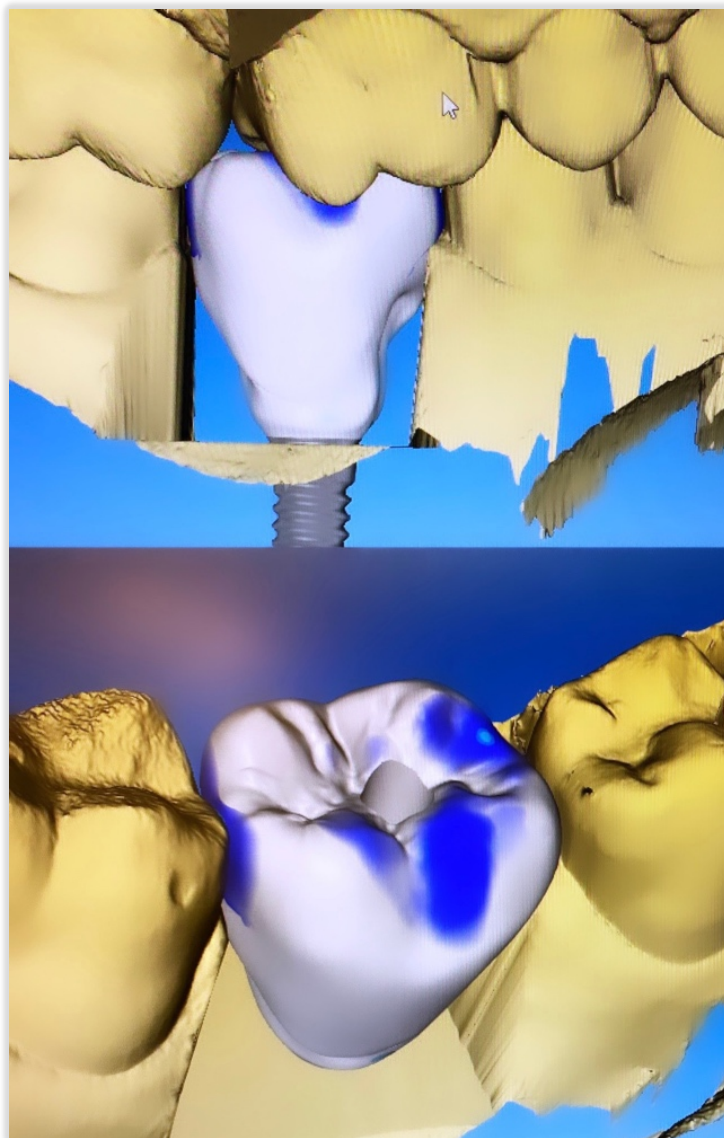


Abbildung 6: Digitale Darstellung der Okklusion der Zahnkrone in der CAD/CAM-Software (CEREC®). Die blauen Flächen markieren die errechneten Kontaktpunkte des Antagonisten auf der Implantatkrone.

Nach Eingliederung der Krone wurde die Okklusion ebenso mit Artikulationsfolie (Bausch Artikulationspapier mit progressiver Farbtönung 200 μ , Bausch, Köln) kontrolliert, danach wurde das individuelle Befinden des Patienten erfragt und sobald dieser keine Störungen in der Okklusion empfand, war die Okklusion final durch den Behandler eingestellt. Dabei wurde das implantatschützende Okklusionskonzept (IPO, implant-protective occlusion) angewandt.

Diese Infraokklusion bei leichtem Kontakt wurde mithilfe einer 8 µm dicken Shimstockfolie (Coltene, Altstätten, Schweiz) verifiziert. Das interokklusale Tastvermögen der Patienten, sowohl zwischen natürlichen Zähnen sowie Implantaten, ist so genau, dass es oft feiner ist, als die dünnsten Okklusionsfolien (Osseoperzeption, 2022). Daher wurde vor der ersten digitalen Messung die Okklusion mit Hilfe von Okklusionspapier sowie individuellem Patientenempfinden eingestellt. Die erfolgreich eingestellte Okklusion wurde mit der ersten T-Scan™-Messung verifiziert. Die gesamte prothetische Sitzung erfolgte im Gegensatz zur Implantation und Freilegung ohne Anästhesie, um die volle Sensorik des Patienten zu gewährleisten.

2.3.4 Messung mithilfe des T-Scan™ III

Das T-Scan™-System III (Tekscan, Inc., South Boston, MA, USA), wurde verwendet um eine vollständige Okklusionsanalyse unmittelbar vor und nach Einbringung der Prothetik und im Verlauf von drei, sechs und zwölf Monaten durchzuführen. Zu Beginn der Messung saßen die Patienten aufrecht auf einem Behandlungsstuhl mit der Frankfurter-Horizontalebene parallel zum Boden. Um reproduzierbare Messungen generieren zu können, wurden die Patienten zunächst angewiesen mit einem Handspiegel mehrmals die Okklusion in der Messschiene zu üben. Anschließend wurde nach Herstellervorgaben ein geeigneter Sensor auf der Okklusionsfläche des Oberkieferbogens platziert (siehe Abbildung 7). Die Breite der ersten Oberkieferinzisiven wurde gemessen und eingegeben, um die Zahnbögen des Systems auf die jeweiligen Patienten zu individualisieren. Während der Aufzeichnung wurden alle Patienten gebeten, dreimal für drei Sekunden maximal auf die Schiene zu beißen. Von den drei aufgezeichneten Messungen wurde die mit der maximalen Okklusionskraft ausgewählt. Diese Methodik verhindert eine Datenverfälschung durch Fehlbisse der Patienten (Madani et al., 2017). Zur Auswertung wurde in der T-Scan™-Software die Funktion „maximum area of contact“ (MA) ausgewählt und als maximale Interkuspidation gewertet. Die von der T-Scan™-Software erhobenen Ergebnisse wurden zeitaufgelöst in 2D- und 3D-Datensätzen angezeigt. Die Rohdaten der Analyse wurden anonymisiert und auf einen praxisinternen Rechner für die weitere Analyse überführt. Dieses Messverfahren wurde zu den vier jeweiligen Messzeitpunkten standardisiert durchgeführt.



Abbildung 7: Messung der Okklusion mit dem T-Scan™-System. Handstück, Sensorhalter und Sensorfolie wurden zunächst verbunden. Der Patient wurde anschließend instruiert mit maximaler Kraft auf die Sensorfolie zuzubeißen.

2.4 Auswertung der erhobenen Daten

2.4.1 Auswertung der relativen Kraftverteilung pro Areal (%MA)

Das T-Scan™-System bietet eine sehr breite Auswahl an Datenverarbeitungs- und Darstellungsmöglichkeiten. Viele dieser Möglichkeiten sind auf die klinische Behandlung ausgelegt und dafür geeignet, eine optimale Okklusion einzustellen, Frühkontakte zu finden und zu korrigieren sowie pathologische Bissmuster zu erkennen und vermeiden. Da das System die gemessene Kraft nicht absolut, sondern prozentual wiedergibt, ist eine Vergleichbarkeit über mehrere Messungen an verschiedenen Messzeitpunkten eine

Herausforderung. Die gängigste Vergleichsmethode, die in ähnlichen Studien gewählt wurde (Luo et al., 2020; Madani et al., 2017), ist die automatisierte Auswertung der relativen Kraftverteilung pro Areal (%MA, siehe Abbildung 8) in den vom System vorgegebenen Zahnarealen.

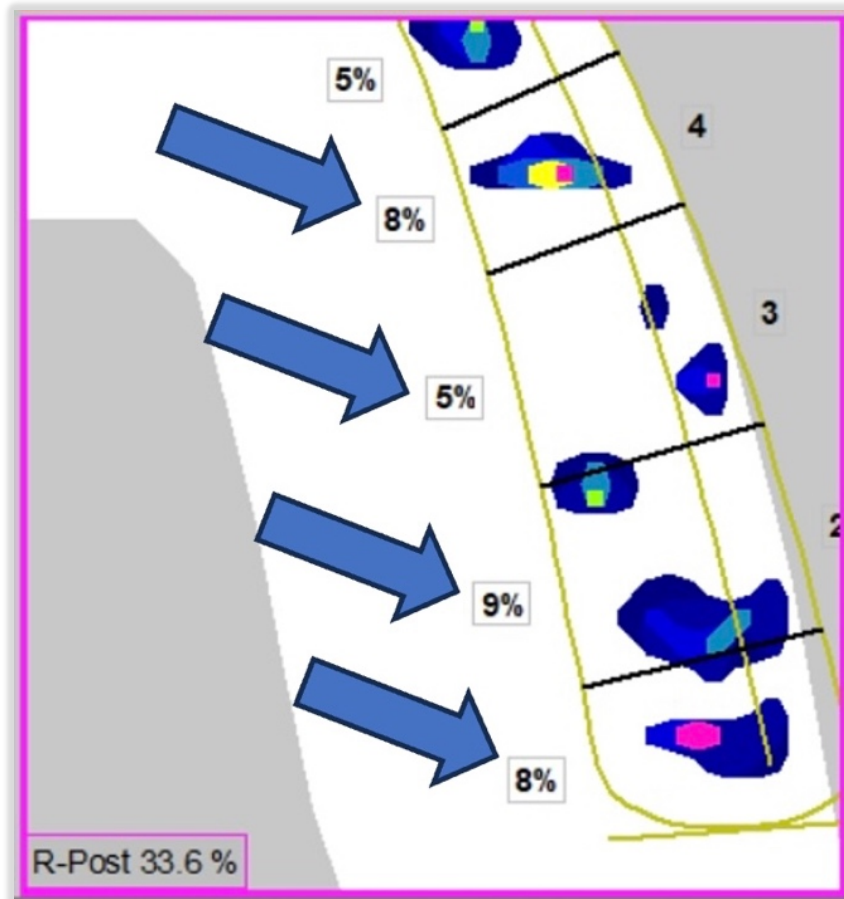


Abbildung 8: Die Okklusionsfläche und -kraft wird in der T-Scan™-Software farbkodiert dargestellt. Die Messregionen sind numerisch gekennzeichnet und die insgesamt gemessene, relative Kraft pro Messregion wird in Prozent von der Gesamtkraft angegeben (blaue Pfeile).

Neben der %MA in dem Messareal des Implantates wurde auch die relative Kraft in den mesialen und distalen Nachbarregionen gemessen sowie auch in dem korrespondierenden Messareal des Gegenkiefers (%MA_mes, %MA_dist; %_kontra). Durch die digitale Einstellung der Inzisivenbreite können diese Messareale individualisiert werden. Eine manuelle Nachadjustierung der gemessenen Areale ist möglich und sinnvoll, wenn z.B. nach intraoraler Okklusionskontrolle die Areale nicht mit der okkludierenden Implantatfläche übereinstimmen. In Anlehnung an vorhandene Literatur wurden die Werte nach dieser

Methodik in den Messarealen, in welchen sich die Implantate befanden, aufgenommen und verglichen (Ding et al., 2022; Luo et al., 2020; Madani et al., 2017; Prieto-Barrio et al., 2022).

2.4.2 Semiquantitative Auswertung des maximalen Kraftanteils pro Messareal (VIS)

Es handelt sich bei den Messwerten der oben genannten Methodik demnach um den Prozentsatz der Gesamtkraft pro Messareal. Die absolute, maximal auf das Implantat einwirkende Kraft kann mit dem T-Scan™-System nicht dargestellt werden. Um eine Aussage über die maximale, relative Krafteinwirkung auf das Implantat zu ermöglichen, gibt es in der T-Scan™-Software jedoch eine Lösung: Mithilfe einer zweidimensionalen Farbkarte kann dargestellt werden, wie hoch die relative Krafteinwirkung bei Okklusion ist, unabhängig von der Okklusionsfläche. Daher wurde auch diese Darstellung der maximalen Kraft der Folie ausgewertet. Diese wird in der T-Scan™-Software nicht in Werten, sondern anhand einer farbkodierten Skala bzw. mithilfe von Balkendiagrammen wiedergegeben (siehe Abbildung 9). Dabei ermöglicht eine Farbskala von blau zu rosa insgesamt 14 Abstufungen eine semiquantitative Auswertung vom prozentualen Anteil der maximal gemessenen Kraft an den Sensoren. Zunächst wurde das Implantat anhand der farbkodierten Okklusionskarte lokalisiert.

Die maximale Kraft auf dem Implantat im Vergleich zur maximalen Kraft auf den Nachbarzähnen wurde, unabhängig von der Größe des besagten Areals, dokumentiert. Dieses Vorgehen wurde sowohl auf Höhe des Implantats durchgeführt als auch auf Höhe der mesialen und distalen Nachbarzähne sowie auf Höhe des korrespondierenden Zahnes im Gegenkiefer (Vis_impl, Vis_mes, Vis_dist, Vis_kontra). Diese Messung wurde in der Versuchs- und Kontrollgruppe zu allen Zeitpunkten wiederholt, analog zum Vorgehen bei der Bestimmung der relativen Kraftverteilung pro Areal (%MA).

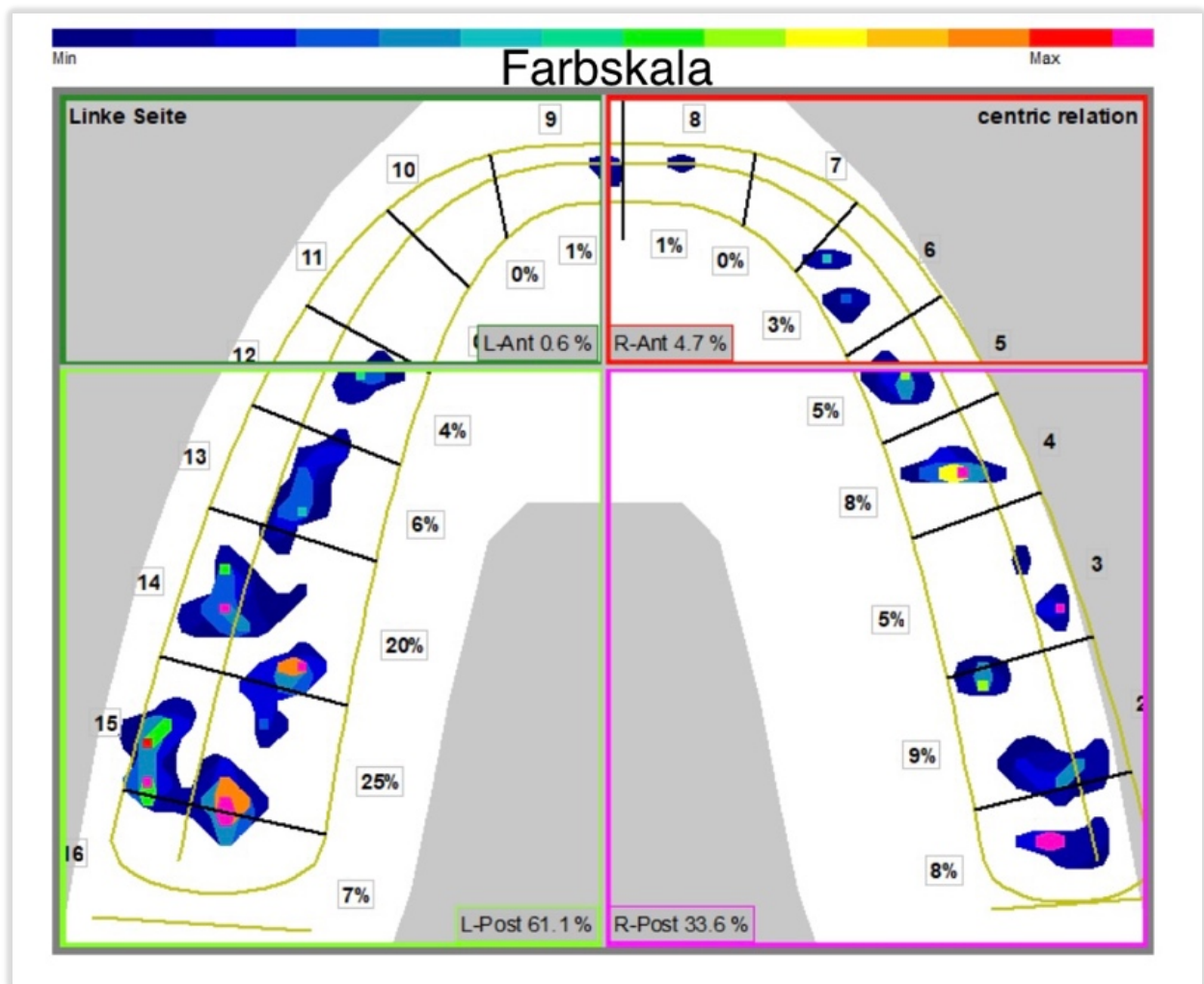


Abbildung 9: Farkodierte Darstellung der maximalen Krafteinwirkung. Die maximal einwirkende Kraft wird, unabhängig von der Fläche der Bisskraft, durch 14 Farbstufen visualisiert. Blautöne stellen schwache Kontaktpunkte dar, während rot und rosa die Punkte mit der höchsten Okklusionskraft zeigen.

2.4.3 Auswertung der Kraftverteilung pro Messquadrant (%Q)

Da sowohl bei der Erhebung von %MA_impl, als auch von Vis_impl eine manuelle Adjustierung der Messareale stattfanden, könnte es bei diesen Verfahren zu Manipulation der Datenerhebung gekommen sein. Daher wurde noch eine weitere Methode der Datenerhebung angewandt, welche keinerlei Änderung bedurfte. Durch das System lässt sich der angezeigte Zahnbogen in Viertel unterteilen: Links anterior, rechts anterior, links posterior und rechts posterior. Analog zur Methodik unter 3.3.6 kann die T-Scan™-

Software die Kraftverteilung pro Messquadranten automatisch angeben, ohne manuelle Adjustierung der Quadrantengröße. Dabei wurden die Quadranten, in dem sich das Implantat befand, mit dem kontralateralen Quadranten verglichen. Insgesamt wurden somit drei verschiedenen Methoden der Datenerhebung in der T-Scan™-Software verwendet. Durch diese intensive Aufbereitung der Messungen wurde eine möglichst differenzierte Auswertung angestrebt, die sowohl die individuellen Patientensituationen berücksichtigte, als auch eine angemessene Vergleichbarkeit der Ergebnisse darstellte. Alle Werte wurden erneut sowohl bei der Versuchs- als auch in der Kontrollgruppe aufgenommen und miteinander verglichen.

2.4.4 Statistik

Die Auswertungen erfolgten mit dem Statistikprogramm IBM Corp. Released 2023. IBM SPSS Statistics for Macintosh, Version 29.0.1. (IBM Corp, Armonk, NY, USA). Aufgrund der geringen Fallzahl war die Annahme der Normalverteilung nicht sinnvoll prüfbar und somit waren für die Auswertung non-parametrische Tests angezeigt. Mit diesen Tests werden nicht die konkret gemessenen Werte verglichen, sondern deren Höhe/Relation. So wurde mit dem Friedman-Test geprüft, ob sich die Höhe der Werte zwischen den Messungen veränderte. Ein signifikantes Ergebnis ($p < 0,05$) zeigte an, dass es mindestens eine Veränderung gab. Welche Messungen sich konkret unterschieden, wurde mit Hilfe des paarweisen Vergleichs getestet. Zum Vergleich der zwei Gruppen pro Zeitpunkt wurde der Mann-Whitney-Test verwendet. Hier zeigte ein signifikantes Ergebnis an, dass sich die zwei Gruppen hinsichtlich der betrachteten Angabe unterscheiden. Welche Gruppe den höheren oder kleineren Wert hat, ist den deskriptiven Statistiken zu entnehmen.

3. Ergebnisse

3.1 Behandlungsergebnisse

3.1.1 Implantation und Prothetik

Alle Patienten, die nach Abschluss der letzten Messung in diese Studie aufgenommen wurden, hatten ein komplikationsfreies chirurgisches Ergebnis. Bei keinem der Patienten in der Versuchs- oder Kontrollgruppe kam es im Verlauf der Implantation zu periprozeduralen Komplikationen oder postoperativen Einheilungsstörungen. In keinem der Fälle musste die Implantatkrone im Verlauf der Behandlung nachadjustiert werden. Es wurden im Untersuchungszeitraum keine Fälle von Chipping oder Implantatversagen beobachtet. Das im Rahmen der klinischen Untersuchung erhobene, subjektive Wohlbefinden der Patienten im Verlauf des Beobachtungszeitraums wurde von allen Patienten als positiv bewertet.

3.1.2 Okklusionsanalyse

3.1.2.1 Auswertung der relativen Kraftverteilung pro Messareal (%MA)

Bei dieser Methodik wurde der Prozentwert verglichen, welcher laut T-Scan™-Software den relativen Kraftanteil in verschiedenen Messarealen an der gesamten Okklusionskraft ausmachte. Dafür wurde die Okklusion intraoral mit dem Okklusionsschema der Software verglichen und bei suboptimaler Lage der Okklusionspunkte zwischen zwei Messfeldern die Breite der Messfelder manuell angepasst, um das Implantat komplett einzuschließen. Hinsichtlich der Versuchsgruppe zeigte bei der gemessenen relativen Krafteinwirkung in dem Messareal des Implantates der Friedman-Test, dass es statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Messwerten der unterschiedlichen Zeitpunkte gab ($p = 0,003$). Die mediane Kraftverteilung im Areal des Implantates betrug unmittelbar nach Implantation in der Versuchsgruppe 4,0 % der Gesamtkraft (Interquartilsabstand (IQR) 8,0 %; Spanne 0 – 11,0 %; siehe Tabelle 1 und Abbildung 10). Nach 12 Monaten war dieser Wert auf 6,0 % (IQR 5,5 %; Spanne 1,0 – 12,0 %) angestiegen. Dieser Trend war jedoch nicht statistisch signifikant ($p = 0,13$).

Im Vergleich oben genannter Messwerte der Versuchsgruppe untereinander war lediglich die Zunahme der relativen Kraft im Messareal des Implantats vom dritten zum sechsten

Monat statistisch signifikant ($p = 0,049$). Hierbei zeigte sich eine mediane Zunahme der relativen Kraft von 1,0 % (IQR 2,0 %; Spanne 1,0 – 12,0 %). Die relative Krafteinwirkung im Messareal des Implantats der Versuchsgruppe zeigte interhalb der Zeitintervalle 0-3, 0-6, 0-12, 3-12 und 6-12 Monate keine statistisch signifikante Zunahme ($p = 1,00$; $p = 0,11$; $p = 0,13$; $p = 0,064$; $p = 1,00$). Analog dazu zeigte sich hinsichtlich der mesialen und distalen Nachbarregionen weder in der Versuchs- noch in der Kontrollgruppe eine signifikante Veränderung der relativen Krafteinwirkung im Verlauf (siehe Abbildungen 11 und 12).

Dasselbe Ergebnis wurde in beiden Gruppen ebenso für die Kraft in dem korrespondierenden Messareal des Gegenkiefers verzeichnet (siehe Abbildung 13). In der Kontrollgruppe zeigten sich im Friedman-Test der Messzeitpunkte untereinander hingegen keine signifikanten Unterschiede ($p = 0,10$). Zum Vergleich der Versuchs- und Kontrollgruppe untereinander zu den jeweiligen Zeitpunkten wurde der Mann-Whitney-Test verwendet. Hierbei konnten zu keinem der Zeitpunkte signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen nachgewiesen werden. Zusammenfassend konnte mit dieser Messmethodik in beiden Gruppen lediglich eine statistisch signifikante Veränderung der relativen Okklusionskraft pro Messareal festgestellt werden: In der Versuchsgruppe kam es vom dritten zum sechsten Monat zu einer signifikanten Zunahme der gemessenen Kraft.

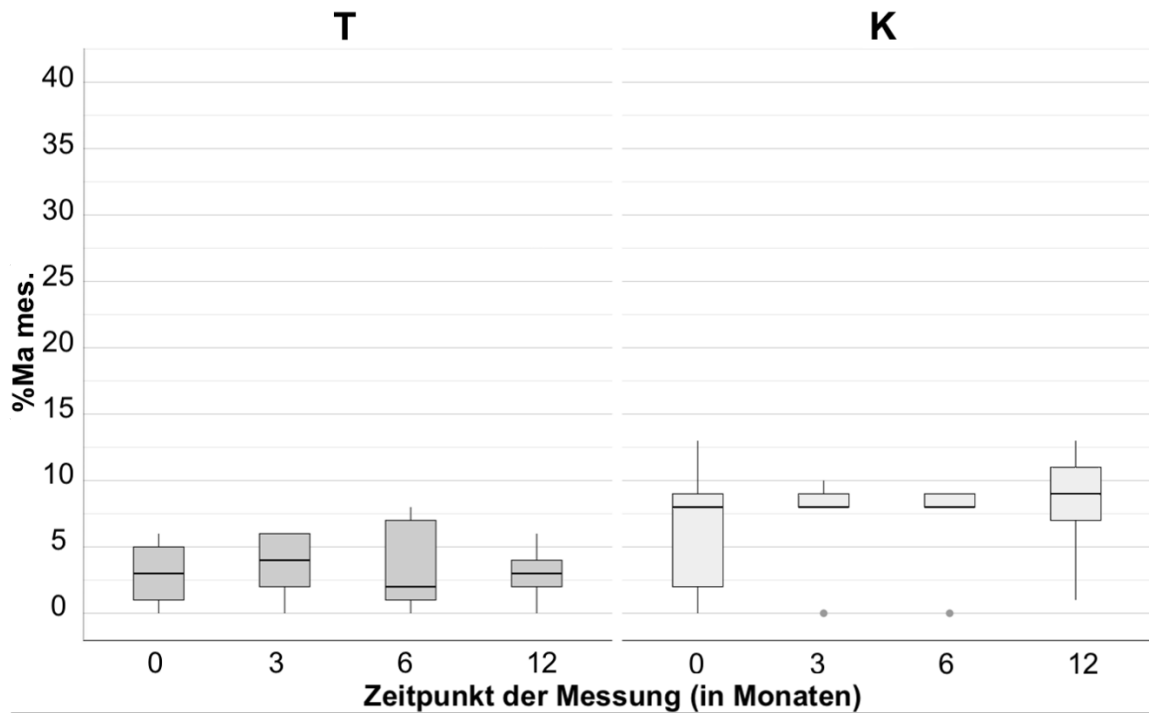


Abbildung 10: Die relative Okklusionskraft (%MA) in der mesialen Nachbarregion des Implantats zeigt weder in der Versuchsgruppe (T) noch der Kontrollgruppe (K) eine statistisch signifikante Zunahme der gemessenen Kraft. Alle Angaben in Prozent. Einzelne Punkte stellen potenzielle statistische Ausreißer dar.

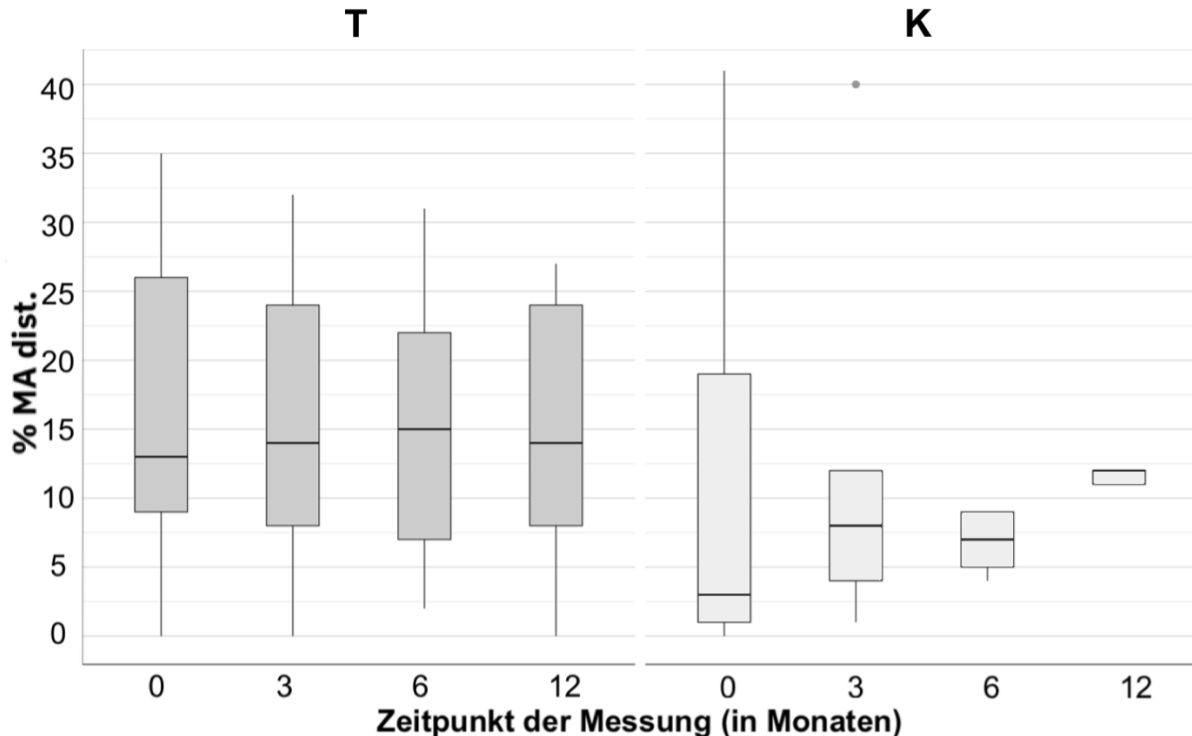


Abbildung 11: Die relative Okklusionskraft (%MA) in der distalen Nachbarregion des Implantats zeigt in der Versuchsgruppe (T) eine konstante Verteilung über alle Messzeitpunkte. Alle Angaben in Prozent. Einzelne Punkte stellen potenzielle statistische Ausreißer dar.

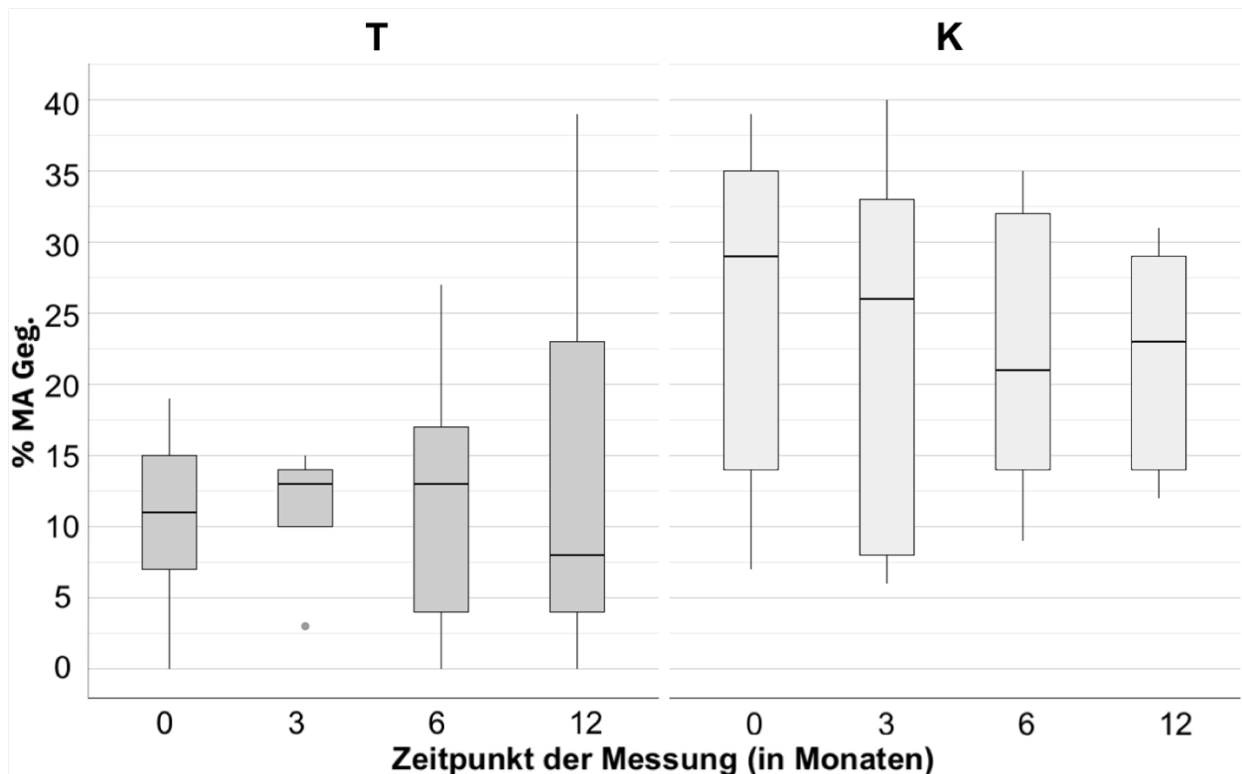


Abbildung 12: Die relative Okklusionskraft (%MA) im korrespondierenden Messareal des Gegenkiefers zeigt in der Versuchsgruppe (T) eine zunehmende Variation über die Messzeitpunkte. Alle Angaben in Prozent. Einzelne Punkte stellen potenzielle statistische Ausreißer dar.

3.1.2.2 Visuelle Auswertung des maximalen Kraftanteils pro Messareal (VIS)

Die visuelle Analyse bezieht sich auf eine Auswertung der zweidimensionalen Okklusionsdaten anhand der vorgegebenen Farbskala. Die maximal gemessene Krafteinwirkung auf das Implantat und der Nachbarzähne wurde, unabhängig von der Fläche des okkludierenden Areals, zu den verschiedenen Untersuchungszeitpunkten bestimmt und gegeneinander verglichen. Die visuelle Auswertung der maximalen Kraft zeigte innerhalb der Versuchsgruppe signifikante Unterschiede ($p < 0,001$). Innerhalb der Kontrollgruppe gab es hingegen keine signifikanten Unterschiede (siehe Tabelle 2). Die Messwerte wurden nachfolgend paarweise zu den unterschiedlichen Messzeitpunkten weiter verglichen. Dabei zeigte sich, dass die maximal registrierte Kraft des Implantats über drei verschiedene Zeiträume signifikant zugenommen hatte (siehe Abbildung 13): Unmittelbar postoperativ zum dritten Monat ($p = 0,049$; mediane Zunahme der

Maximalkraft 2,0 % (IQR 6,0 %; Spanne 0,0 – 7,0 %)); unmittelbar postoperativ zum zwölften Monat ($p < 0,001$; mediane Zunahme der Maximalkraft 4,00 % (IQR 6,00 %; Spanne 2,00 – 13,00 %)) und vom dritten zum zwölften Monat ($p = 0,005$; mediane Zunahme der Maximalkraft 1,0 % (IQR 2,0 %; Spanne 0,0 – 8,0 %)).

Innerhalb der Kontrollgruppe konnten bei der Okklusionsanalyse hingegen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Messzeitpunkten festgestellt werden ($p = 0,09$). Die visuelle Kraftanalyse der mesialen bzw. distalen Nachbarzähne des Implantats sowie des korrespondierenden Zahnes im Gegenkiefer zeigte keine statistisch signifikanten Unterschiede, weder in der Versuchs- noch in der Kontrollgruppe (siehe Abbildung 14 und 15).

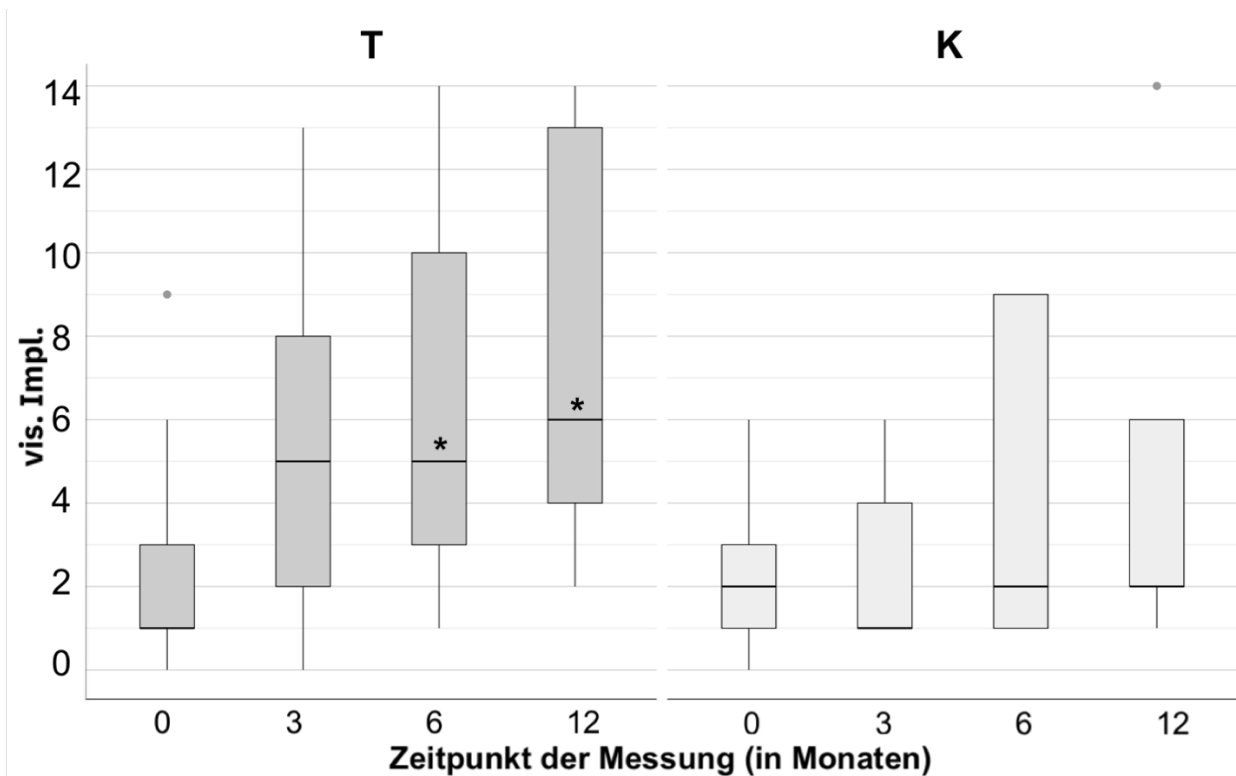


Abbildung 13: Die maximale Krafteinwirkung (VIS) auf das Implantat zeigt in der Versuchsgruppe (T) eine stetige Zunahme über die Zeit, mit dem höchsten Wert nach 12 Monaten. In der Kontrollgruppe (K) ist die Kraftverteilung variabler, ohne eine klare Tendenz über die Messzeitpunkte. Die Auswertung basiert auf der semiquantitativen Analyse der farbkodierten Okklusionskarten. Alle Angaben in Prozent. Einzelne Punkte stellen potenzielle statistische Ausreißer dar. Signifikanzen sind mit Asterisk hervorgehoben.

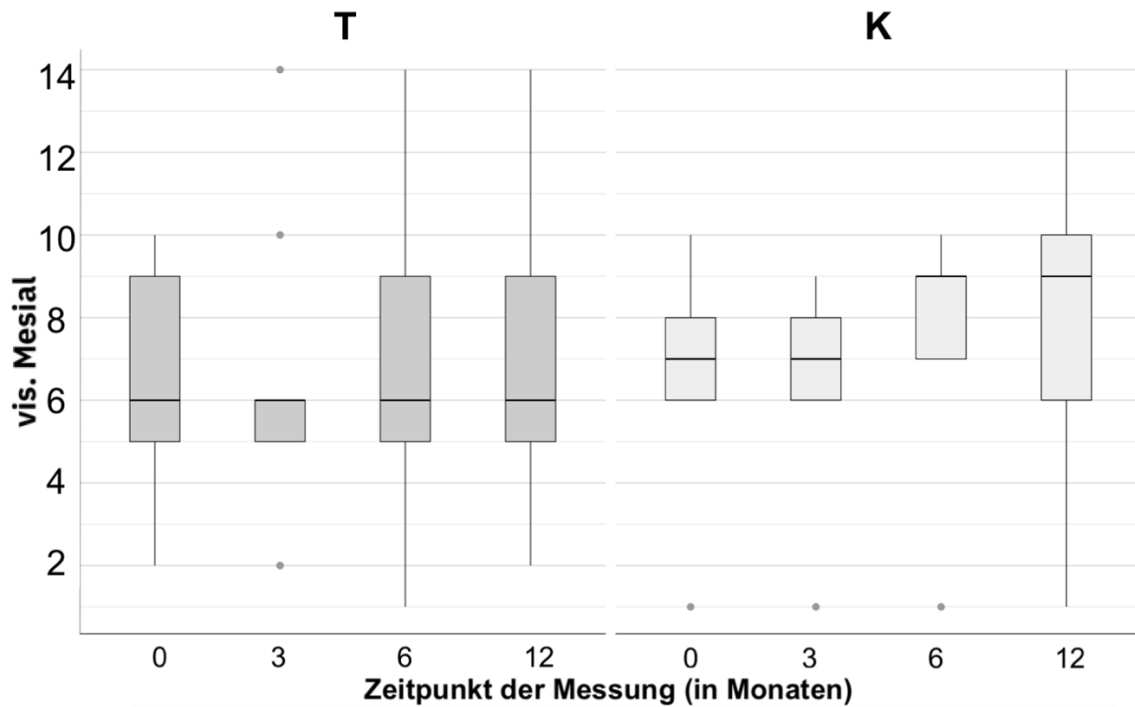


Abbildung 14: Die maximale Krafteinwirkung (VIS) auf die mesiale Nachbarregion des Implantats zeigt in der Versuchsgruppe (T) eine erhöhte Variabilität. In der Kontrollgruppe (K) bleiben die Messwerte über die Zeit stabil. Alle Angaben in Prozent. Einzelne Punkte stellen potenzielle statistische Ausreißer dar.

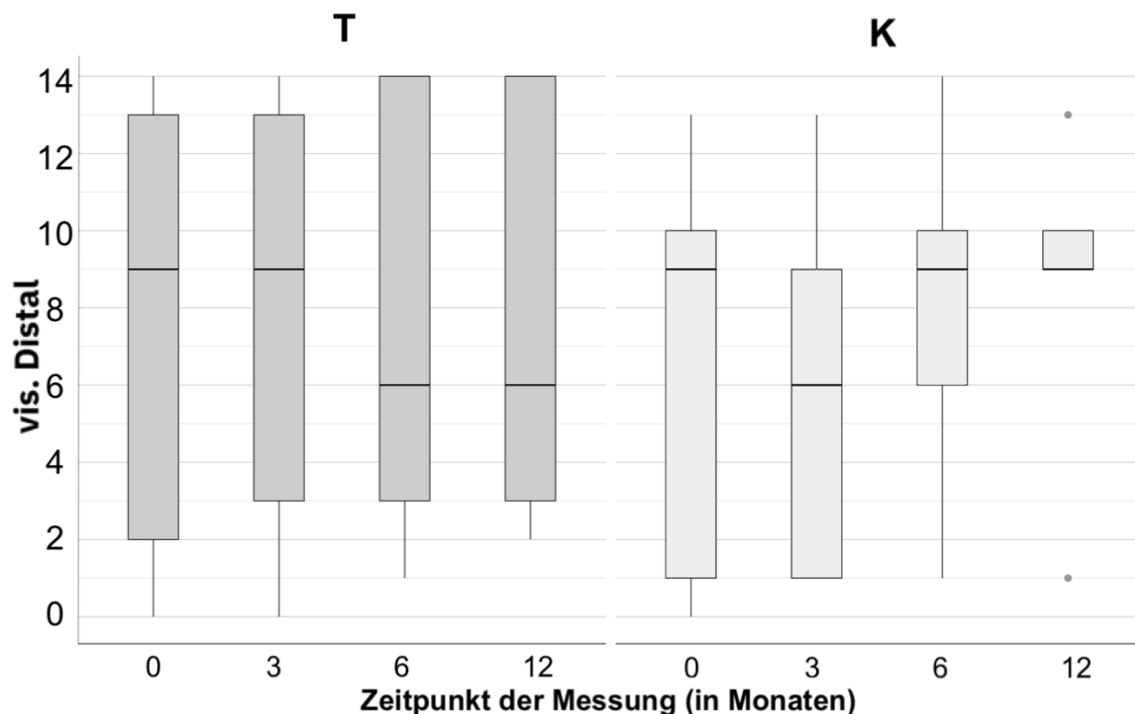


Abbildung 15: Die maximale Krafteinwirkung (VIS) auf die distale Nachbarregion des Implantats zeigt in der Versuchsgruppe (T) eine gleichmäßige Verteilung über die Messzeitpunkte, ohne signifikante Veränderungen. In der Kontrollgruppe (K) wurden hingegen Schwankungen beobachtet. Alle Angaben in Prozent. Einzelne Punkte stellen potenzielle statistische Ausreißer dar.

Tab. 1: Relative Krafteinwirkung in dem Messareal des Implantats in Versuch- und Kontrollgruppe. Alle Angaben in Prozent.

Gruppe	Zeitpunkt	Min	Max	25. Perzentile	50. Perzentile	75. Perzentile
T	Post-OP	0,0	11,0	0,5	4,0	8,5
	3 M	0,0	21,0	2,0	4,0	9,0
	6 M	1,0	33,0	3,0	6,0	10,0
	12 M	1,0	12,0	3,0	6,0	8,5
K	Post-OP	0,0	17,0	0,0	2,0	13,0
	3 M	1,0	15,0	1,0	4,0	12,0
	6 M	0,0	19,0	0,5	5,0	16,0
	12 M	1,0	20,0	1,5	4,0	14,5

Tab. 2: Semiquantitative Auswertung der maximalen Krafteinwirkung auf das Implantat, unabhängig von der Größe oder Kontaktfläche. Alle Angaben in Prozent.

Gruppe	Zeitpunkt	Min	Max	25. Perzentile	50. Perzentile	75. Perzentile
T	Post-OP	0,0	9,0	1,0	1,0	4,5
	3 M	0,0	13,0	1,5	5,0	10,5
	6 M	1,0	14,0	2,5	5,0	11,5
	12 M	2,0	14,0	3,5	6,0	13,5
K	Post-OP	0,0	6,0	0,5	2,0	4,5
	3 M	1,0	6,0	1,0	1,0	5,0
	6 M	1,0	9,0	1,0	2,0	9,0
	12 M	1,0	14,0	1,5	2,0	10,0

3.1.2.3 Auswertung der relativen Kraftverteilung pro Messquadrant (%Q)

Durch das T-Scan™-System lässt sich der angezeigte Zahnbogen in Viertel unterteilen: links anterior, rechts anterior, links posterior und rechts posterior. Im Verlauf der 12 Monate kam es dabei in dem Quadranten des Implantats zu keiner signifikanten Änderung der Kraft ($p = 0,27$; siehe Abbildung 16). Innerhalb der Kontrollgruppe konnten ebenfalls keine statistisch signifikanten Änderungen der Kraftverteilung pro Messquadrant festgestellt werden ($p = 0,06$). Hinsichtlich der Kraftverteilung im Gegenkiefer konnten analog zum o.g. Vorgehen ebenso keine signifikanten Unterschiede nachgewiesen werden. Innerhalb der Kontrollgruppe konnten keine statistisch signifikanten Änderungen der Kraftverteilung pro Messquadrant festgestellt werden ($p = 0,06$). Hinsichtlich der Kraftverteilung des Gegenkiefers konnte analog zum o.g. Vorgehen ebenso keine signifikanten Unterschiede nachgewiesen werden.

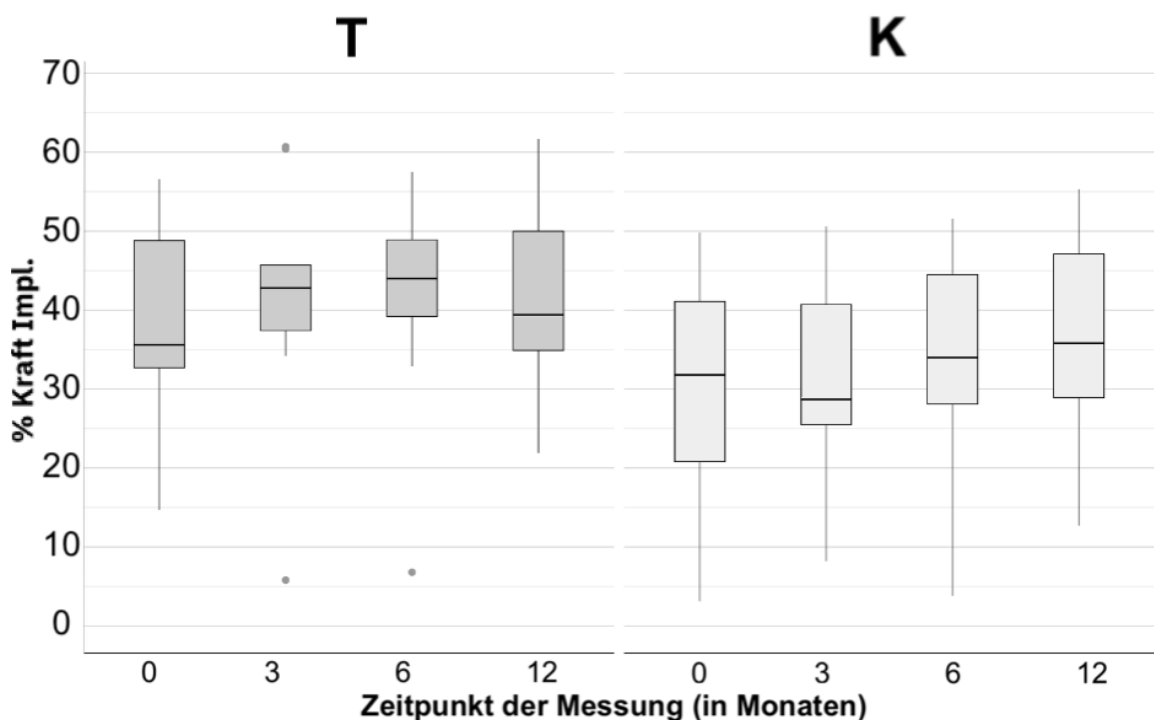


Abbildung 16: Die relative Kraftverteilung pro Messquadrant (%Q) im Quadranten des Implantats zeigt in der Versuchsgruppe (T) eine gleichmäßige Verteilung über die Zeitpunkte, mit einer leichten Zunahme bei t12. In der Kontrollgruppe (K) bleiben die Werte weitgehend konstant ohne signifikante Veränderungen. Alle Angaben in Prozent. Einzelne Punkte stellen potenzielle statistische Ausreißer dar.

4. Diskussion

4.1 Diskussion der Methodik

4.1.1 T-Scan™-System

In zahlreichen Studien konnte bereits gezeigt werden, dass das T-Scan™-System in der Lage ist, viele Limitierungen herkömmlicher Methoden zur Beurteilung der Okklusion zu überwinden (Ayuso-Montero et al., 2020; Bostancioğlu et al., 2022; M. Cerna et al., 2015a; Kerstein, 2010). Das System gilt als zuverlässig und valide bei der Messung der okklusalen Kontaktverteilung, der Kontaktzeit und der Kontaktfläche (Bozhkova, 2016; Koos, 2020; Koos et al., 2010). Dabei ist die T-Scan™-Software in der Lage, unterschiedliche Messwerte zu generieren, allen voran die relative Kraft pro Messareal (%MA) (Wu et al., 2023). Zakkour et al. (2024) zeigten mithilfe kombinierter digitaler Okklusionsanalyse (T-Scan™ und EMG), dass okklusale Überlastungen an Implantaten klinisch häufig nicht zuverlässig erkannt werden, was die Bedeutung objektiver Messverfahren zur Kontrolle der IPO-Prinzipien unterstreicht.

In ähnlichen Studien, in denen das T-Scan™-System zur Beurteilung der Okklusion verwendet wurde, kommt diese Methodik häufig zum Einsatz (Ding et al., 2022; Madani et al., 2017; Wu et al., 2023). Dabei steht der Anwender der T-Scan™-Software vor der Wahl, die Messregionen der Software nach Kalibrierung in der vorgegebenen Größe zu belassen oder diese manuell anzupassen. Die Größe der Messregionen nicht zu verändern, führt möglicherweise zu einer verbesserten Reproduzierbarkeit der Messungen, da sie auf Basis der Frontzahnbreite vollständig unabhängig vom Anwender geschehen (Kerstein, 2020). Um den zu untersuchenden Zahn auf den farbkodierten Grafiken in der Software eindeutig identifizieren zu können, wird in vielen Studien der direkte Vergleich mit Artikulationspapier genutzt (Bozhkova, 2016; Ding et al., 2022; Heuser et al., 2020; Prieto-Barrio et al., 2022; Zhou et al., 2021).

Auch im postoperativen Verlauf der Versuchs- und Kontrollgruppe dieser Arbeit wurde durch den behandelnden Zahnarzt eine Kombination aus T-Scan™ und Artikulationspapier eingesetzt. Im Gegensatz zu den meisten anderen Studien wurde in dieser Studie bei der Auswertung der relativen Kraft pro Messregion (%MA) jedoch die Größe der Messregion in der T-Scan™-Software manuell an die Form des Implantates

angepasst. Dieser Schritt wurde als notwendig empfunden, da bei vielen Patienten ansonsten die relative Kraft, die das Implantat ausübt, auf zwei Messregionen verteilt worden wäre. Ob dieser Zwischenschritt in anderen Arbeiten ebenso erfolgt ist, fand in o.g. Studien keine Erwähnung.

4.1.2 Validität der Messverfahren

Es zeigte sich in der Versuchsgruppe über den Gesamtzeitraum von 12 Monaten eine tendenzielle Zunahme der relativen Kraft pro Messregion auf dem Implantat. Die Veränderung der Kraft war allerdings nur im Zeitraum vom dritten bis zum sechsten Monat statistisch signifikant. Die Kontrollgruppe zeigte im zeitlichen Verlauf keine Unterschiede in der Kraftverteilung. Bei den Messungen handelt es sich nicht um absolute Werte, sondern um den relativen Anteil an der insgesamt ausgeübten Kraft. Folglich wäre bei einer Zunahme der Kraft in der Messregion des Implantats eine Abnahme der Kraft in anderen Regionen zu erwarten. In der Versuchsgruppe konnte keine signifikante Änderung der Krafteinwirkung auf den mesialen bzw. distalen Nachbarzahn des Implantates festgestellt werden. Auch in der korrespondierenden Messregion des Gegenkiefers zeigte sich keine Dynamik. Dies kann einerseits darauf hinweisen, dass die Kraft ungleichmäßig von verschiedenen Regionen abnahm oder lediglich auf mehrere Regionen aufgeteilt wurde, sodass es in keiner Messregion zu einer messbaren Abnahme der relativen Kraft kam. Es ist andererseits auch möglich, dass der Trend der Zunahme insgesamt zu gering war, um eine eindeutige Abnahme an einem anderen Ort zu identifizieren.

Die Methodik mit der wohl höchsten Reproduzierbarkeit stellt der Vergleich der relativen Kraft pro Quadranten (%Q) dar. Hierbei werden die beiden Kieferseiten in eine anteriore und eine posteriore Hälfte unterteilt, sodass insgesamt vier Messquadranten entstehen. In dieser Arbeit konnte lediglich eine tendenzielle Zunahme der relativen Kraft in den Quadranten des Implantats registriert werden. Dass keine statistische Signifikanz erreicht wurde, könnte daran liegen, dass diskrete Änderungen in der Messregion des Implantats bei einer ansonsten konstanten Okklusion statistisch nicht auffallen würden. Eine alternative Erklärung wäre, dass sich eine Kraftänderung auf das Implantat und die beiden Nachbarzähne umgekehrt proportional zueinander ausgleicht – diese Hypothese kann

anhand der vorliegenden Daten jedoch verworfen werden, da es in den Messregionen des mesialen bzw. distalen Nachbarzahnes zu keiner signifikanten Änderung kam. Daher scheint die Auswertung pro Messquadrant in der T-Scan™-Software eine eher für den klinischen Alltag geeignete Funktion, da sie im Vergleich zu der Messung pro Regio (%MA) zu ungenau erscheint und auch in ähnlichen Studien wenig Anwendung fand (Afrashtehfar und Qadeer, 2016).

Die visuelle semiquantitative Analyse der maximalen Relativkraft des Implantats (VIS) zeigte hingegen zu mehreren Zeitpunkten eine signifikante Zunahme, u.a. von der unmittelbar postoperativen Messung zur Messung nach zwölf Monaten. Während die Messung der relativen Kraft pro Regio (%MA) bzw. pro Quadrant (%Q) unabhängig vom Anwender reproduzierbare Ergebnisse liefert, stellt die visuelle Analyse der farbkodierten Okklusionskarte ein Hybridverfahren dar. Es kombiniert die quantitative Komponente des T-Scan™-Systems mit einer Visualisierung des Kontaktes wie bei der Verwendung von Artikulationspapier. Dieses Vorgehen stellt eine neuartige Methode dar.

Dabei bietet diese Methodik Vorteile gegenüber herkömmlichen Messverfahren, da kleinste, fokale und klinisch durchaus relevante Änderungen der einwirkenden Kraft dargestellt werden können. Dies wird klar, wenn man die in Studien häufigste Methode zur Darstellung der Okklusionskraft genauer betrachtet. Dafür wird in der T-Scan™-Software die relative Kraft pro Messregion (%MA) verwendet. Die Kraft wird dabei in Prozent vom Anteil der insgesamt ausgeübten Kraft angegeben. Diese Angabe in Prozent birgt ein mögliches Problem: Eine Zunahme der Kraft kann demnach sowohl eine sehr schwache, aber großflächige, als auch eine kleinflächige, aber starke Änderung bedeuten. Gerade letzteres hat eine große klinische Signifikanz, da dies eine direkte Behandlungskonsequenz darstellen würde. Punktuelle, starke Kontakte sind generell zu vermeiden, können für Vorkontakte sprechen und sollten schnellstmöglich entfernt werden (Morikawa, 2003).

Im Alltag ist es für den behandelnden Zahnarzt somit nicht nur von größter Bedeutung zu wissen, ob die relative Kraft zugenommen hat, sondern auch die Lokalisation des maximalen Kontaktes zu kennen. Ein derartiger lokal erhöhter Kontakt gilt als ein

Risikofaktor für Chipping (Swain, 2009) und bei vielen Patienten muss im Verlauf der Behandlung daher die Implantatkrone eingeschliffen werden (Schwarz et al., 2012). Klinisch ergab sich in den beiden Gruppen dieser Arbeit kein Hinweis auf einen unphysiologischen Vorkontakt. Folglich wurde keines der Implantate im Verlauf der Behandlung nachgeschliffen, weder in der Kontroll- noch der Versuchsgruppe.

In diversen Studien wurde bereits versucht, den T-Scan™ auf absolute Werte zu kalibrieren (Cerna et al., 2015; Throckmorton et al., 2009). Dies scheiterte bisher aufgrund der Tatsache, dass das T-Scan™-System nicht für diesen Einsatz entwickelt und folglich auch nicht dafür validiert werden konnte (Cerna et al., 2015). Jedoch ist die Farbkarte, die die relative Kraftverteilung darstellt, ein nützliches Tool in der klinischen Bewertung der Okklusion, da exakt visualisiert wird, an welchem Okklusionspunkt des Zahnes die Krafteinwirkung am höchsten ist und gegebenenfalls angepasst werden muss (Trpevska et al., 2014). Sollte das Implantat auf der Farbskala einen höheren Wert als der mesiale oder distale Nachbarzahn aufweisen, stünde es an mindestens einem Messpunkt in stärkerer Okklusion als die Nachbarzähne. Damit wäre die anfängliche IPO aufgehoben.

Während die visuelle Maximalkraft im Areal des Implantats in dieser Versuchsgruppe 0-6, 0-12 und 3-12 Monaten signifikant zunahm, gab es hinsichtlich der Nachbarzähne keine Veränderung der Okklusion. Dies spricht dafür, dass das Implantat langsam an Okklusion gewann, aber zu keinem Zeitpunkt die Okklusion der Nachbarzähne überstieg. Wie auch bei den anderen Messverfahren (%MA und %Q) zeigten sich bei der visuellen Analyse der Farbskala (VIS) in der Kontrollgruppe keinerlei signifikante Änderungen. Somit kann bei allen drei verwendeten Messmethoden darauf geschlossen werden, dass die teils beobachtete Zunahme der relativen Bisskraft bzw. der Maximalkraft des Implantats auf eine Elongation der Antagonisten im Gegenkiefer zurückzuführen sind. Die Veränderungen der Okklusion der Gegenseite scheinen hingegen vernachlässigbar. Dieses Ergebnis unterstreicht, dass die beobachteten Veränderungen in der Versuchsgruppe mit den unverblochten Antagonisten zusammenhängen und dass diese Dynamik durch die eingebrachte gegenüberliegende Zahnbrücke in der Kontrollgruppe verhindert wird.

4.2 Mögliche Gründe für Veränderungen der Okklusion

4.2.1 Antagonistenelongation

Derartige Veränderungen der Okklusion infolge von Elongation der Antagonistenzähne wurden bereits in anderen Studien beschrieben, unter anderem von Luo et al., die Veränderungen der okklusalen Kontaktzeit nach Einzelzahnimplantation auf die Eruption der Zähne im Gegenkiefer zurückgeführt haben (Luo et al., 2020). Dieses Phänomen scheint die Haupterklärung für die in dieser Arbeit beschriebenen Veränderungen zu sein, da die Zahnbrücke im Gegenkiefer der Kontrollgruppe keine derartige Antagonisten Elongation erlaubt (Rindaşu et al., 1989). Compagnon und Woda (1991) stellten fest, dass in den ersten Jahren nach Antagonistenzahnverlust die Elongation hauptsächlich auf Wachstum des Periodonts zurückzuführen ist und erst später mit aktiver Eruption über die Okklusionsebene hinaus zu rechnen ist. Eine langfristige Zahnlosigkeit kann so die Okklusion beeinflussen und erschwert die Planung und Durchführung von prothetischen Versorgungen (Landes et al., 2008).

Dabei scheint es eine Variabilität in der Reaktion der Zähne auf das Fehlen eines Antagonisten zu geben, denn nicht alle Zähne elongieren notwendigerweise oder bewegen sich signifikant (Kiliaridis et al., 2000). So fand zum Beispiel Papageorgiou (2017), dass ungefähr 80 % der unopponierten Molaren elongierten, wobei Oberkiefermolaren stärker zu elongieren schienen als Unterkiefermolaren (Papageorgiou, 2017). Dabei spielt die parodontale Gesundheit bzw. das Fehlen dessen eine tragende Rolle (Compagnon und Woda, 1991; Lindskog-Stokland et al., 2012). Roux et al. (1993) zeigten, dass die Anwesenheit eines Antagonisten die physiologische Zahnwanderung signifikant reduziert (Roux et al., 1993). Dies deutet darauf hin, dass ein gegenseitiger Kontakt zwischen den Zähnen dazu beiträgt, die Position der Zähne zu stabilisieren und deren unerwünschte Bewegung zu verhindern.

Des Weiteren haben die Antagonistenzähne in der Versuchsgruppe häufig nicht nur Okklusionskontakt mit dem Implantat selbst, sondern auch mit den direkten Nachbarzähnen (Prieto-Barrio et al., 2022). Auch wenn feststeht, dass die Elongation durch Kontakt zweier Zähne reduziert wird, ist nach aktueller Datenlage nicht geklärt, wie

stark dieser Kontakt sein oder wie häufig er vorkommen muss. Wenn das Implantat also intermittierend in Kontakt zu den Nachbarzähnen steht, könnte dieser partielle Kontakt ausreichen, um einer Elongation vorzubeugen. Dies könnte ein möglicher Grund dafür sein, dass in der Versuchsgruppe teils keine signifikanten Änderungen der relativen Okklusionskraft verzeichnet werden konnten. Außerdem ist zu beachten, dass lediglich die maximale Interkuspidation beurteilt wurde, obwohl die Zähne im dynamischen Kauakt durchaus anders in Kontakt treten können. Diese Variation im okklusalen Kontakt kann intermittierenden Kontakt mit diversen Antagonisten bedeuten (Koos et al., 2012). Ein weiterer Grund für die geringe okklusale Veränderung könnte sein, dass der leichte Kontakt bei maximalem Biss ausreicht, um einer Elongation entgegenzuwirken.

4.2.2 Mechanischer Verschleiß

Neben der Antagonistenelongation gilt als weitere mögliche Erklärung für eine Veränderung der Okklusionskraft der mechanische Verschleiß der Nachbarzähne, welcher sich auf die Kraftverteilung im betroffenen Bereich auswirken kann. Lambrechts et al. (1989) fanden eine jährliche Abnutzung von 29 µm bei Molaren und 15 µm bei Prämolaren (Lambrechts et al., 1989). Hinsichtlich dieser Arbeit gilt dabei zu bedenken, dass die Antagonisten der Kontrollgruppe Zahnbrücken waren, während die Implantate in der Versuchsgruppe natürlichen Zähnen gegenüberstanden. Zahnbrücken bestehen aus unterschiedlichen Keramiken, welche abrasiver sind als natürliche Zähne (Mundhe et al., 2015; Sripetchdanond und Leevailoj, 2014; Yip et al., 2004). Somit wäre zu erwarten gewesen, dass eine Veränderung der Okklusion infolge der Abnutzung von Nachbarzähnen in der Kontrollgruppe stärker ausgeprägt gewesen wäre als in der Versuchsgruppe. Da es in der Kontrollgruppe jedoch zu keiner messbaren Zunahme der Okklusionskraft am Implantat kam, scheint diese Veränderung in unserem Messzeitraum von 12 Monaten eine vernachlässigbare Rolle zu spielen. Eine Veränderung der Okklusion infolge eines mechanischen Verschleißes könnte jedoch theoretisch auch in diesem Patientenkollektiv auf lange Sicht zu einem Verlust der IPO führen.

4.2.3 Zahnwanderungen

Neben der Antagonistenelongation gilt auch die natürliche Zahnwanderung nach mesial, ein sogenannter Mesialdrift, als wichtiger Faktor, welcher nach Zahnextraktion oder

Implantation zu Veränderungen der Okklusionskraft beitragen kann. Da ein Implantat einen Zahnverlust ausgleicht ist zu beachten, wann der Zahn extrahiert wurde und wie der Status der direkten Nachbarzähne ist. In der Abwesenheit eines Nachbarzahnes bewegt sich der Apex eines Molaren mesial um etwa 0,6 mm pro Jahr, und die Molar-Kuspe bewegt sich mesial um etwa 1,2 mm pro Jahr (Papandreas et al., 1993). Es ist mit einer Kippung und Mesialwanderung der Molaren zu rechnen, jedoch keiner Rotation oder vertikalen Änderung (Teng et al., 2019). Wenn kein Provisorium nach Implantation inseriert wird, weil dies zum Beispiel nicht vom Patienten gewünscht oder getragen wird, kann in der Einheilungsphase des Implantates, die drei bis sechs Monate beträgt, eine solche Kippung stattfinden. Teng et al. (2019) fanden, dass nach der Extraktion der oberen Prämolaren die durchschnittliche Dauer des physiologischen Driftes etwa $81,6 \pm 70,0$ Tage betrug. Molaren bewegen sich nach Extraktion des Nachbarzahnes nach mesial, während Prämolaren sich nach distal bewegen (Moss und Picton, 1967). Diese Faktoren können die Okklusion nach Implantation auf verschiedene Weise beeinflussen. Zum Beispiel kann die Kippung und der Mesialdrift eines Molaren zu einem stärkeren Antagonistenkontakt führen, da sich dadurch die maximale Interkuspitation verändert. Während die Implantatkrone diese Veränderung nicht rückgängig machen kann, kann sie durch Insertion eines Provisoriums oder der finalen Arbeit arretiert werden (Miura et al., 2019).

Bei bis zu 43 % der Implantatkronen tritt ein Verlust des interproximalen Kontakts zwischen Implantatkronen und benachbarten Zähnen auf, besonders häufig mesial (Koori et al., 2010). Ein solch fehlender Approximalkontakt kann eine Wanderung oder Kippung begünstigen (Roux und Woda, 1994), was mögliche Erklärungen für Okklusionsveränderungen nach Insertion einer Implantatkrone sind.

4.3 Analyse vergleichbarer Studien

Der Vergleich mit anderen Studien ermöglicht es, die Bedeutung der Erkenntnisse dieser Studie im breiteren wissenschaftlichen Diskurs zu positionieren. Wie bereits ausgeführt, wurden eventuelle Änderungen der Okklusion mit drei verschiedenen Messverfahren der T-Scan™-Software untersucht: der relativen Kraftverteilung pro Areal (%MA), der visuellen Auswertung des maximalen Kraftanteils pro Messareal (Vis) und der

Kraftverteilung pro Messquadrant (%Q). Der direkte Vergleich der Ergebnisse mit anderen Arbeiten, aber auch der Ergebnisse anderer Autoren untereinander, wird dadurch erschwert, dass in der Literatur kein Konsens über die bestmögliche Messmethodik des T-Scan™-Systems besteht. Die meisten Studien variieren hinsichtlich Messmethodik, Studiendauer und Patientenzahl, was entscheidend für das Verständnis der Unterschiede in den Ergebnissen ist. In Bezug auf die Messmethodik werden in vielen Studien, einschließlich der eigenen, T-Scan™-Geräte zur Analyse der Okklusion, jedoch mit unterschiedlichen Parametern und Zeiträumen verwendet (Ding et al., 2022; Madani et al., 2017; Prieto-Barrio et al., 2022).

Die verwendeten Materialien und die Methoden der Datenerfassung und -auswertung unterscheiden sich ebenfalls zwischen den Arbeiten, was einen direkten Vergleich der Ergebnisse komplex macht. Hierin liegt ein intrinsisches Problem der Verwendung der T-Scan™-Software in Studien: Im klinischen Alltag vertraut der behandelnde Zahnarzt nie allein auf die softwaregestützte Analyse der Okklusion nach Implantation, sondern vergleicht diese mit herkömmlichen Methoden, wie der Artikulationsfolie. Selbstverständlich wird auch das individuelle Befinden des Patienten bei der Einstellung der Okklusion beachtet.

Die Unterschiede in den Studiendesigns, insbesondere in Bezug auf die Dauer der Beobachtung und die Anzahl der Patienten, beeinflussen die Interpretation der Ergebnisse erheblich und unterstreichen die Notwendigkeit, jede Studie im Kontext ihrer spezifischen Methodik zu betrachten. Madani et al. (2017) beobachteten in einem ähnlichen Studienaufbau mit dem T-Scan™-System eine signifikante Zunahme der prozentualen Okklusionskraft nach Implantation über sechs Monate bei 21 Patienten und kamen zu dem Ergebnis, dass regelmäßige Anpassungen notwendig seien, um eine unphysiologische Überlastung des Implantats zu vermeiden. Dabei heben sie jedoch auch hervor, dass es weder randomisierte kontrollierte Studien noch eine prospektive Studie gibt, in welcher das IPO-Konzept und die für das natürliche Gebiss empfohlenen Okklusionskonzepte direkt miteinander verglichen werden (Koyano et al., 2012; Madani et al., 2017).

Prieto-Barrio et al. (2022) fanden im Gegensatz dazu bei 14 Patienten über zwei Jahre keine signifikanten Veränderungen im Okklusionsschema. Dafür wurde die Okklusion sowohl mithilfe der T-Scan™-Software analysiert als auch mithilfe einer Bissanalyse von Silikonschienen. Ding et al. (2022) berichteten über einen signifikanten Anstieg der relativen Okklusionskraft, insbesondere in den ersten 36 Monaten, bei 33 Patienten und einem Kontrollzeitraum von fünf Jahren. In einer aktuellen Studie aus 2023 konnten Zhou et al. bei 30 Patienten über sechs Monate mit der T-Scan™-Software ebenfalls eine signifikante Zunahme der Bisskraft feststellen. Analog zu der vorliegenden Arbeit kam es bei keinem der Patienten zu einem Versagen des Implantats. Somit erreichen sie dasselbe Ergebnis: Die Analyse der relativen Okklusionskraft ist ein wichtiges Werkzeug, letztlich ist die Kontrolle klinischer Parameter, wie der parodontale Status, die Knochendichte und das Patientenwohlbefinden, jedoch von mindestens genau so großer Bedeutung (Zhou et al., 2021).

Thongdee (2022) Während Lehmann et al. (2024)

4.4 Limitationen der Patientenkohorte

Die Antagonistenelongation steht laut oben genannter Autoren als mögliche Erklärung einer Zunahme der Bisskraft im Zentrum. Dabei steht eine übermäßige Elongation oft im Zusammenhang mit schlechter parodontaler Gesundheit (Compagnon und Woda, 1991; Lindskog-Stokland et al., 2012). Patienten mit akuter parodontaler Erkrankung wurden jedoch sowohl von Zhou et al. (2023) als auch in dieser Arbeit ausgeschlossen, was zu einer Stichprobenverzerrung führen kann. Auch Patienten mit Parafunktionen, wie die kranio-mandibuläre Dysfunktion und Bruxismus, wurden ausgeschlossen, dabei wäre der Vergleich durchaus sinnvoll, da die nächtliche Bisskraft bei Bruxismus oft die tägliche Bisskraft überschreitet (Nishigawa et al., 2001) und so eine deutlich stärkere Abrasion zu erwarten wäre (Dıraçoğlu et al., 2011). Diese Abrasion führt zu größeren Kontaktflächen (Todic et al., 2017) und hat somit direkte Auswirkungen auf die Kraftverteilung der Okklusionspunkte. Eine systematische Literaturübersicht zur Prävalenz von Bruxismus bei Erwachsenen macht zudem deutlich, dass Wachbruxismus (22–31 %) und Schlafbruxismus (12,8±3,1 %) Volkskrankheiten und deren Auswirkung auf die Okklusionskraft daher von großem Interesse sind (Manfredini et al., 2013). Da in der vorliegenden Studie ausschließlich verschraubte Einzelkronen untersucht wurden, sind die Ergebnisse primär

auf dieses Versorgungskonzept übertragbar; potenzielle Effekte zementierter Versorgungen wurden nicht untersucht.

4.5 Klinische Relevanz

Die Relevanz der Erhaltung der implantatgeschützten Okklusion, genauso wie ihre primäre Notwendigkeit, ist umstritten. Die Ziele der IPO bestehen darin, die okklusale Belastung an der Implantat-Knochen-Schnittstelle und an der Implantatkrone zu reduzieren, die Implantatbelastung innerhalb der physiologischen Grenzen der individuellen Okklusion zu halten und so die langfristige Stabilität von Implantaten und Implantatprothesen zu gewährleisten (Bharali et al., 2020; Swaminathan, 2013). Daher gelten die Prinzipien der implantatgeschützten Okklusion als relevante Kriterien für die Langlebigkeit von Implantaten und Prothesen. Sie soll sowohl die Langlebigkeit des Implantates, als auch der Implantatkrone verbessern (Prakash, 2022). Dabei wird stets betont, dass es derzeit kein evidenzbasiertes, implantatspezifisches Okklusionskonzept gibt (Jacob, 2013; Kim et al., 2005; Koyano und Esaki, 2015). Es gibt konträr dazu diverse Studien, in denen argumentiert wird, dass kein Okklusionskonzept einem anderen überlegen ist, stattdessen die gleichen Okklusionskonzepte wie bei natürlichen Zähnen und zahngetragener Prothetik verwendet werden sollten (Carlsson, 2009; Koyano et al., 2012).

Als Argument für die klinische Relevanz der IPO wird in vielen Studien diskutiert, dass die okklusale Überlastung neben Infektionen die häufigste Ursache für Implantatverlust sei (Dănilă und Augustin, 2010; Koyano und Esaki, 2015). Als möglicher Pathomechanismus soll dabei eine exzessive okklusale Belastung degenerative Veränderungen in der Osseointegration und im Knochen um Dentalimplantate verursachen (Nagasawa et al., 2013). Die externe Geometrie von Implantatsystemen und die Größe der okklusalen Belastung sollen einen Einfluss auf die Versagensraten des Knochens haben (Bozkaya et al., 2004). Sowohl Entzündungsreaktionen als auch okklusale Überlastung sollen die Langlebigkeit von oralen Implantaten negativ beeinflussen, wobei raue Oberflächen die Plaquebildung erhöhen und Mikrofrakturen das Risiko von marginalem Knochenverlust steigern sollen (van Steenberghe et al., 1999).

Die Basis all dieser Theorien liegt dabei in dem Fehlen von parodontalen Ligamenten beim Implantat. Diese Ligamente ermöglichen dem Zahn eine axiale Verschieblichkeit von ca. 25-100 μm , während das Implantat lediglich entlang der ossären Grenzfläche eine minimale Verschiebung von ca. 3-5 μm erreichen kann (Carlsson, 2009). Dadurch wird der natürliche Zahn in Theorie bei Okklusion stärker verschoben, während das Implantat in einer ungünstigen Position verbleibt und mehr belastet wird. Allerdings zeigt sich im Vergleich der relativen Verschiebungen, dass das Implantat fast symmetrisch mit dem Zahn bewegt wird (Száva et al., 2022). Dies könnte bedeuten, dass große Kräfte in Richtung des periimplantären Knochengewebes übertragen werden, ohne diesen zu schädigen. Um solche Komplikationen zu vermeiden, wurden sogar neuartige Abutments entwickelt, die diese Elastizität durch eine interne Mikro-Beweglichkeit ausgleichen sollen (Chen et al., 2014).

Ob die Okklusion tatsächlich einen negativen Einfluss auf den periimplantären Knochen hat, ist umstritten. Tierversuche zeigen widersprüchliche Ergebnisse und es gibt keinen belegten Zusammenhang zwischen Okklusion und Implantaterfolg im Menschen (Chang et al., 2013). Dabei sind auch die Daten zu okklusaler Überlastung widersprüchlich und stark limitiert. Während eine okklusale Überlastung bei schlechter Mundhygiene zu Knochenverlust führen kann, kann sie bei einem gesunden Zahnstatus sogar zu einer Zunahme der Knochendichte führen (Chambrone et al., 2010).

Eine stets aufgeführte Begründung für die höhere Anfälligkeit für okklusale Überbelastung von Implantatkronen ist die fehlende Propriozeption des Implantates (Isidor, 2006). Durch die direkte Osseointegration des Implantates fehlen die parodontalen Ligamente der natürlichen Zähne, die für einen Großteil des Tastempfindens verantwortlich sein sollen. Diese These konnte inzwischen widerlegt werden, da man fand, dass die taktile Sensibilität von Implantaten ähnlich derer natürlicher Zähne ist (Enkling, 2022). Die genaue physiologische Basis für diese osseoperzeptive Sensibilität von Implantaten ist noch nicht abschließend geklärt. Es werden verschiedene Theorien diskutiert, darunter die Aktivierung von Nervenenden im Periost und die Aktivierung entfernterer Rezeptoren, wie den Kaumuskeln, der Mundschleimhaut und den Kiefergelenken (Ebert, 2010; Enkling, 2022; Goldstein et al., 2021). Goldstein et al. (2021) bestätigten, dass die taktile

Empfindlichkeit von Implantaten, die natürlichen Zähnen gegenüberstehen, ähnlich war wie bei natürlichen Zähnen, die sich gegenüberstanden. So können im Rahmen der Implantatokklusion die Bedenken über eine unphysiologische Überbelastung auf dem Implantat durch mangelndes Feedback vernachlässigt werden.

Auch Thongdee (2022) und Dhami et al. (2024) stellen das Implant-Protected-Occlusion- (IPO-)Konzept als biomechanisch sinnvollen Ansatz dar, zeigen jedoch, dass sich unterschiedliche Okklusionsdesigns nicht zwingend in einem signifikant unterschiedlichen marginalen Knochenverlust widerspiegeln. Während Thongdee (2022) zwischen IPO und dem konventionellen Okklusionsdesign mit gleichmäßiger Lastverteilung keine klinisch relevanten Unterschiede im Knochenverhalten feststellen konnte, betonen Lehmann et al. (2024) und Stilwell (2024) demgegenüber die hohe klinische Relevanz einer gezielten Reduktion okklusaler Kontakte sowie einer konsequenten Okklusionskontrolle zur Vermeidung technischer und biologischer Komplikationen.

Es lässt sich zusammenfassen, dass es zwar kein evidenzbasiertes, Implantat-spezifisches Okklusionskonzept gibt, aber die meisten Zahnärzte die IPO als biomechanisch plausibles Konzept akzeptieren und nutzen. Auch bei dem Patientenkollektiv, das dieser Studie zugrunde lag, wurde die IPO eingestellt und kontrolliert, ob nach zwölf Monaten ein Behandlungsbedarf bestand. Interessanterweise war trotz tendenzieller Zunahme der Okklusionskraft der Implantatkronen bei keinem Patienten eine Okklusionsanpassung notwendig. Diese Ergebnisse in Kombination mit der bisher erwähnten Literatur lassen auf ein Phänomen schließen: Die Okklusion nach Implantation ist zu einem gewissen Grad in der Lage, sich selbst physiologisch einzustellen. Die durch die IPO eingestellte leichte Infraokklusion wird hauptsächlich durch Antagonistenelongation aufgehoben, die jedoch beim gesunden Patienten physiologisch stoppt, sobald ausreichend okklusale Abstützung vorhanden ist. Dafür sprechen auch die Ergebnisse von Ding et al. (2022): In einem ähnlichen Studienaufbau wurde mithilfe der T-Scan™-Software eine initiale Zunahme der Okklusionskraft auf die Implantate festgestellt, welche zu den späteren Kontrollzeitpunkten nach vier bzw. fünf Jahren kontinuierlich abnahm (Ding et al., 2022).

Diese Erkenntnisse sind für die zahnärztliche Praxis von Bedeutung, da sie zeigen, dass die engmaschige Kontrolle und stetige Anpassung der Okklusion in den ersten Monaten nach der Implantation, trotz messbarer Veränderung der Krafteinwirkung, nicht immer notwendig ist. Zudem wäre es denkbar, die IPO nach Implantation bei Antagonistenbrücken zu reduzieren, da man aufgrund der fehlenden Elongation dort keine Bewegungen der Antagonisten erwartet. Final lässt sich auch in dieser Studie die Abwesenheit von evidenzbasiertem Zusammenhang zwischen Okklusion und Implantaterfolg betonen.

4.6 Limitationen und zukünftige Forschungsansätze

Diese Arbeit liefert wichtige Erkenntnisse über die Veränderungen der Okklusionskraft nach Implantation. Insgesamt ist die größte Limitation dieser Studie die kleine Patientenkohorte, die gegebenenfalls zu eng definiert wurde. Da in der Gesamtbevölkerung Parafunktionen und schlechte parodontale Verhältnisse häufig vorkommen, sollten diese in zukünftigen Studien inkludiert und differenziert bewertet werden. Da es Jahre dauern kann bis sich die finale Okklusion nach Implantation eingestellt hat, sind weitere Studien über einen längeren Zeitraum notwendig. Zukünftige Forschungen sollten sich somit auf die Langzeitwirkungen und die Verbesserung der Messmethoden konzentrieren, um ein tieferes Verständnis der okklusalen Dynamik nach Implantation zu gewinnen.

5. Zusammenfassung

Die operative Implantation von enostalem Zahnersatz ist in der modernen Zahnheilkunde ein etabliertes Verfahren und nimmt einen großen Stellenwert ein. Die Optimierung der postoperativen Okklusion der Implantate ist dabei für die orale Funktion sowie der Prävention von Komplikationen von größter Bedeutung. Es gibt verschiedene Methoden die Okklusion in situ zu messen, wobei das digitale T-Scan™-System gegenüber konventionellen Methoden, wie der Artikulationsfolie, zahlreiche Vorteile bietet. Das Ziel dieser Arbeit war es, in einem Patientenkollektiv mithilfe des T-Scan™-Systems eine computerassistierte Analyse der Okklusion vor und nach Implantation durchzuführen, um in einem Zeitintervall von insgesamt drei, sechs und zwölf Monaten post-OP eventuelle Veränderungen der Bisskraftverteilung, insbesondere hinsichtlich des Implantats, nachweisen zu können.

Als Versuchsgruppe dienten $n = 11$ Patienten welche ein unilaterales Einzelimplantat erhielten, mit einem natürlichen Gebiss auf der kontralateralen Seite. Als Kontrollgruppe diente ein Patientenkollektiv ($n = 5$), dessen Patienten ebenso ein unilaterales Einzelimplantat bekommen haben, jedoch bei Zustand nach Versorgung des Gegenkiefers mittels Zahnbrücke. Bei allen Patienten wurden die Implantate in implantatschützender Okklusion (IPO) gesetzt. Zur Analyse der Bisskraftverteilung wurden in der T-Scan™-Software drei verschiedene Messmethoden eingesetzt: die relative Kraft pro Messregion (%MA), die relative Kraft pro Quadrant (%Q) und eine semiquantitative Analyse der maximalen Krafteinwirkung auf das Implantat (VIS). Die Krafteinwirkung auf die mesialen bzw. distalen Nachbarzähne sowie in der korrespondierenden Region des Gegenkiefers wurde ebenso untersucht.

Die relative Kraft der Messregion des Implantats zeigte in der Versuchsgruppe von unmittelbar post-OP zu zwölf Monaten eine tendenzielle Zunahme, während die relative Kraft in dem Quadranten des Implantats keine signifikante Dynamik zeigte. Die visuelle Analyse der Maximalkraft (VIS) zeigte in der Versuchsgruppe zu mehreren Zeitpunkten eine signifikante Zunahme (0-3, 0-12 und 3-12 Monaten). In der Kontrollgruppe zeigten die Implantate zu keinem Zeitpunkt eine signifikante Veränderung der relativen Bisskraft.

Bei keinem der Patienten kam es zu einem Implantatversagen oder zu Komplikationen, ebenso musste in keinem der Fälle die Okklusion manuell angepasst werden.

Diese Ergebnisse unterstreichen die Theorie, dass es nach Einzelzahnimplantation in IPO insbesondere durch Antagonistenelongation zu einer Veränderung der Bisskraftverteilung kommt, diese jedoch in den meisten Fällen keine klinische Relevanz zu haben scheint.

6. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Darstellung einer natürlichen Zahnkrone gegenüber einem Implantat – selbst erstellt	8
Abbildung 2:	Darstellung eines Implantates in implantatschützender Okklusion – selbst erstellt	9
Abbildung 3:	Das T-Scan™-System	13
Abbildung 4:	Ablauf einer Implantation I	22
Abbildung 5:	Ablauf einer Implantation II	23
Abbildung 6:	Digitale Darstellung der Okklusion der Zahnkrone in der CAD/CAM-Software (CEREC®)	26
Abbildung 7:	Messung der Okklusion mit dem T-Scan™-System	28
Abbildung 8:	Okklusionsfläche und -kraft Darstellung in der T-Scan™-Software	29
Abbildung 9:	Farkodierte Darstellung der maximalen Krafteinwirkung	31
Abbildung 10:	Darstellung der relativen Okklusionskraft (%MA) in der mesialen Nachbarregion des Implantates	35
Abbildung 11:	Darstellung der relativen Okklusionskraft (%MA) in der distalen Nachbarregion des Implantates	35
Abbildung 12:	Darstellung der relativen Okklusionskraft (%MA) in dem korrespondierenden Messareal des Gegenkiefers	36
Abbildung 13:	Darstellung der maximalen Krafteinwirkung (VIS) auf das Implantat	37
Abbildung 14:	Darstellung der maximalen Krafteinwirkung (VIS) auf die mesiale Nachbarregion des Implantates	38
Abbildung 15:	Darstellung der maximalen Krafteinwirkung (VIS) auf die distale Nachbarregion des Implantates	38
Abbildung 16:	Darstellung der relativen Kraftverteilung pro Messquadrant (%Q) in dem Quadranten des Implantates	40

7. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Relative Kraftverteilung in dem Messareal des Implantates	39
Tabelle 2:	Auswertung der maximalen Krafteinwirkung auf das Implantat	39

8. Literaturverzeichnis

Afrashtehfar KI, Qadeer S. Computerized occlusal analysis as an alternative occlusal indicator. *Cranio J Craniomand Pract* 2016; 34: 52-57

Albrektsson T, Donos N. Implant survival and complications. The Third EAO consensus conference 2012. *Clin Oral Impl Res* 2012; 23: 63-65

Aradya A, Nagarajagowda RSK, Basavaraju RM, Srinivas S, Kumararama SS. Influence of T-scan System on Occlusion Correction of Implant Supported Prostheses: A Systematic Review. *J Contemp Dent Pract* 2022; 23: 105-117

Ayuso-Montero R, Mariano-Hernandez Y, Khoury-Ribas L, Rovira-Lastra B, Willaert E, Martinez-Gomis J. Reliability and Validity of T-scan and 3D Intraoral Scanning for Measuring the Occlusal Contact Area. *J Prosthodont* 2020; 29: 19-25

Bharali K, Das M, Nongthombam RS, Kumar A, Quazi SSN. Occlusal considerations in implant dentistry. *Int J Med Biomed Stud* 2020; 4: 173-177

Bohner LOL, Neto PT, Ahmed AS, Mori M, Laganá DC, Sesma N. CEREC Chairside System to Register and Design the Occlusion in Restorative Dentistry: A Systematic Literature Review. *J Esthet Restor Dent* 2016; 28: 208-220

Bostancioğlu SE, Toğay A, Tamam E. Comparison of two different digital occlusal analysis methods. *Clin Oral Investig* 2022; 26: 2095-2109

Bozhkova T, Musurlieva N, Slavchev D, Dimitrova M, Rimalovska S. Occlusal indicators used in dental practice: A survey study. *BioMed Res Int* 2021; 2021: 2177385

Bozhkova TP. The T-SCAN System in evaluating occlusal contacts. *Folia Med* 2016; 58: 122-130

Bozkaya D, Muftu S, Muftu A. Evaluation of load transfer characteristics of five different implants in compact bone at different load levels by finite elements analysis. *J Prosthet Dent* 2004; 92: 523-530

Brånemark PI. Osseointegration and its experimental background. *J Prosthet Dent* 1983; 50: 399-410

Carey JP, Craig M, Kerstein RB, Radke J. Determining a relationship between applied occlusal load and articulating paper mark area. *Open Dent J* 2007; 1: 1-7

Carlsson GE. Dental occlusion: modern concepts and their application in implant prosthodontics. *Odontology* 2009; 97: 8-17

Cerna M, Ferreira R, Zaror C, Navarro P, Sandoval P. Validity and reliability of the T-Scan III for measuring force under laboratory conditions. *J Oral Rehabil* 2015; 42: 544-551

Chambrone L, Chambrone LA, Lima LA. Effects of occlusal overload on peri-implant tissue health: a systematic review of animal-model studies. *J Periodontol* 2010; 81: 1367-1378

Chang M, Chronopoulos V, Mattheos N. Impact of excessive occlusal load on successfully-osseointegrated dental implants: a literature review. *J Investig Clin Dent* 2013; 4: 142-150

Chen YY, Chen WP, Chang HH, Huang SH, Lin CP. A novel dental implant abutment with micro-motion capability—development and biomechanical evaluations. *Dent Mater* 2014; 30: 131-137

Compagnon D, Woda A. Supraeruption of the unopposed maxillary first molar. *J Prosthet Dent* 1991; 66: 29-34

Conejo J, Kobayashi T, Anadioti E, Blatz MB. Performance of CAD/CAM monolithic ceramic implant-supported restorations bonded to titanium inserts: a systematic review. *Eur J Oral Implantol* 2017; 10 (Suppl 1): 139-146

Dănilă V, Augustin M. Occlusal overload—a risk factor in implant-based prostheses. *Rev Med Chir Soc Med Nat Iasi* 2010; 114: 214-217

Dhami R, Kumar V, Talele S. Mastering occlusion: The key to implant success. *Int J Oral Health Dent* 2024; 10: 147-152

Dias RAB, Rodrigues MJP, Messias ALA, Guerra FADA, Manfredini D. Comparison between conventional and computerized methods in the assessment of an occlusal scheme. *J Oral Rehabil* 2020; 47: 221-228

Ding Q, Luo Q, Tian Y, Zhang L, Xie Q, Zhou Y. Occlusal change in posterior implant-supported single crowns and its association with peri-implant bone level: a 5-year prospective study. *Clin Oral Investig* 2022; 26: 4217-4227

Diraçoğlu D, Alptekin K, Çifter ED, Güçlü B, Karan A, Aksoy C. Relationship between maximal bite force and tooth wear in bruxist and non-bruxist individuals. *Arch Oral Biol* 2011; 56: 1569-1575

Ebert T. Zum Einfluss verschiedener Mechanorezeptoren auf die bisssperrungsabhängige relative Aktivierung der Kieferelevatoren bei isometrischem Beißen. Dissertationsschrift aus der Medizinischen Fakultät der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (2010)

Enkling N. Osseoperception: tactile sensibility of dental implants? *ZFA* 2022; 98: 112-118

Goldstein G, Goodacre C, Taylor T. Occlusal schemes for implant restorations: best evidence consensus statement. *J Prosthodont* 2021; 30 (Suppl 1): 84-90

Gross MD. Occlusion in implant dentistry. A review of the literature of prosthetic determinants and current concepts. *Aust Dent J* 2008; 53 (Suppl 1): 60-68

Henry PJ, Rosenberg IR, Bills IG, ..., Halliday KG. Osseointegrated implants for single tooth replacement in general practice: a 1-year report from a multicentre prospective study. *Aust Dent J* 1995; 40: 173-181

Heuser F, Bourauel C, Stark H, Dörsam I. Clinical investigations of the comparability of different methods used to display occlusal contact points. *Int J Comput Dent* 2020; 23: 245-255

Hugger A, Türp JC, Kerschbaum T. Curriculum orale Physiologie: Okklusion, Unterkieferbewegungen, orale Mechanosensorik, Kauphysiologie, Kieferreflexe, Speichel und Bioadhäsion, Schmecken, Riechen und Sprechen, Knochen und Implantate, Ästhetik,

Ernährung und Alterung, Biokompatibilität, Zahnschmerz (Curriculum). Berlin: Quintessenz Verl 2006

Isidor F. Influence of forces on peri-implant bone. Clin Oral Impl Res 2006; 17 (Suppl 2): 8-18

Jacob SA. Occlusal principles and considerations for the osseointegrated prosthesis. IOSR J Dent Med Sci 2013; 3: 47-54

Jedliński M, Mazur M, Grocholewicz K, Janiszewska-Olszowska J. 3D scanners in orthodontics-current knowledge and future perspectives-a systematic review. Int J Environ Res Public Health 2021; 18: 1121

Kerstein RB. Time-sequencing and force-mapping with integrated electromyography to measure occlusal parameters. In: Daskalaki A, Hrsg. Informatics in Oral Medicine. Hershey: IGI Global, 2010: 88-110

Kerstein RB. The evolution of the T-Scan I system from 1984 to the present day T-Scan 10 system. In: Kerstein RB, Hrsg. Advances in Medical Technologies and Clinical Practice. Hershey: IGI Global, 2020: 1-54

Kiliaridis S, Lyka I, Friede H, Carlsson GE, Ahlqvist M. Vertical position, rotation, and tipping of molars without antagonists. Int J Prosthodont 2000; 13: 480-486

Kim J. Controlling the implant supported occlusion utilizing the T-Scan system. In: Kerstein RB, Hrsg. Advances in Medical Technologies and Clinical Practice. Hershey: IGI Global, 2020: 996-1055

Kim Y, Oh T, Misch CE, Wang H. Occlusal considerations in implant therapy: clinical guidelines with biomechanical rationale. Clin Oral Impl Res 2005; 16: 26-35

Koori H, Morimoto K, Tsukiyama Y, Koyano K. Statistical analysis of the diachronic loss of interproximal contact between fixed implant prostheses and adjacent teeth. Int J Prosth 2010; 23: 535-540

Koos B. Precision and reliability of the T-Scan III system: analyzing occlusion and the resultant timing and distribution of forces in the dental arch. In: Kerstein RB, Hrsg. *Advances in Medical Technologies and Clinical Practice*. Hershey: IGI Global, 2020: 100-128

Koos B, Godt A, Schille C, Göz G. Precision of an instrumentation-based method of analyzing occlusion and its resulting distribution of forces in the dental arch. *J Orofac Orthop* 2010; 71: 403-410

Koos B, Höller J, Schille C, Godt A. Time-dependent analysis and representation of force distribution and occlusion contact in the masticatory cycle. *J Orofac Orthop* 2012; 73: 204-214

Koyano K, Esaki D. Occlusion on oral implants: current clinical guidelines. *J Oral Rehabil* 2015; 42: 153-161

Koyano K, Tsukiyama Y, Kuwatsuru R. Rehabilitation of occlusion: science or art? *J Oral Rehabil* 2012; 39: 513-521

Lambrechts P, Braem M, Vuylsteke-Wauters M, Vanherle G. Quantitative in vivo wear of human enamel. *J Dent Res* 1989; 68: 1752-1754

Landes CA, Glasl B, Kopp S, Sader R, Ludwig B. Microanchor mediated upper molar intrusion in deep posterior bite after long-term edentulousness for prosthetic reconstruction with dental implants. *Oral Maxillofac Surg* 2008; 12: 155-158

Lee SJ, Alamri O, Cao H, Wang Y, Gallucci GO, Lee JD. Occlusion as a predisposing factor for peri-implant disease: A review article. *Clin Implant Dent Relat Res* 2023; 25: 734-742

Lehmann KM, Kämmerer PW. Bedeutung der Okklusionsgestaltung und -kontrolle bei implantatgetragenen Einzelkronenversorgungen. *ZI Zahnärztl Implantol* 2024; 1: 202-205

Lindskog-Stokland B, Hansen K, Tomasi C, Hakeberg M, Wennström JL. Changes in molar position associated with missing opposed and/or adjacent tooth: a 12-year study in women. *J Oral Rehabil* 2012; 39: 136-143

Luo Q, Ding Q, Zhang L, Xie Q. Analyzing the occlusion variation of single posterior implant–supported fixed prostheses by using the T-scan system: A prospective 3-year follow-up study. *J Prosthet Dent* 2020; 123: 79-84

Madani AS, Nakhaei M, Alami M, Haghi HR, Moazzami SM. Post-insertion posterior single-implant occlusion changes at different intervals: A T-scan computerized occlusal analysis. *J Contemp Dent Pract* 2017; 18: 927-932

Malta Barbosa J, Urtula AB, Hirata R, Caramês J. Thickness evaluation of articulating papers and foils. *J Esthet Restor Dent* 2018; 30: 70-72

Manfredini D, Winocur E, Guarda-Nardini L, Paesani D, Lobbezoo F. Epidemiology of bruxism in adults: a systematic review of the literature. *J Orofac Pain* 2013; 27: 99-110

Misch CE. Early bone loss etiology and its effect on treatment planning. *Dent Today* 1996; 15: 44-51

Misch CE, Bidez MW. Implant-protected occlusion: a biomechanical rationale. *Compend Contin Educ Dent* 1994; 15: 1330-1344

Miura S, Fujisawa M, Komine F, Maseki T, Ogawa T, Takebe J, et al. Importance of interim restorations in the molar region. *J Oral Sci* 2019; 61: 195-199

Morikawa O. Influence of occlusal contacts of implant on adjacent teeth and antagonists displacements. *J Stomatol Soc Jpn* 2003; 70: 224-233

Moss JP, Picton DCA. Experimental mesial drift in adult monkeys (*Macaca irus*). *Arch Oral Biol* 1967; 12: 1313-1318

Mundhe K, Jain V, Pruthi G, Shah N. Clinical study to evaluate the wear of natural enamel antagonist to zirconia and metal ceramic crowns. *J Prosth Dent* 2015; 114: 358-363

Nagasawa M, Takano R, Maeda T, Uoshima K. Observation of the bone surrounding an overloaded implant in a novel rat model. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2013; 28: 109-116

Nishigawa K, Bando E, Nakano M. Quantitative study of bite force during sleep associated bruxism. *J Oral Rehabil* 2001; 28: 485-491

Papageorgiou SN. On the results of clinical studies. J Orthod 2017; 44: 137-138

Papandreas SG, Buschang PH, Alexander RG, Kennedy DB, Koyama I. Physiologic drift of the mandibular dentition following first premolar extractions. Angle Orthod 1993; 63: 127-134

Prakash O. Occlusal considerations and principles in dental implant: A review of literature. Nat Med Organ 2022; 16: 40-45

Prieto-Barrio P, Khoury-Ribas L, Rovira-Lastra B, Ayuso-Montero R, Martinez-Gomis J. Variation in dental occlusal schemes two years after placement of single-implant posterior crowns: A preliminary study. J Oral Implantol 2022; 48: 110-116

Reitemeier B, Schwenzer N, Ehrenfeld M. Einführung in die Zahnmedizin: Zahn-Mund-Kiefer-Heilkunde (ZMK-Heilkunde). 1. Edition. Berlin: Thieme, 2006

Rindaşu I, Donciu V, Serb H, Blănaru D, Pătraşcu I, Trăistaru T. Parodonto-prophylactic restoration of occluding stops by dental bridges. Rev Chir Oncol Radiol ORL Oftalmol Stomatol 1989; 36: 199-212

Roux D, Meunier C, Woda A. A biometric analysis in the rat of the horizontal component of physiological tooth migration and its response to altered occlusal function. Arch Oral Biol 1993; 38: 957-963

Roux D, Woda A. Biometric analysis of tooth migration after approximal contact removal in the rat. Arch Oral Biol 1994; 39: 1023-1027

Schropp L, Kostopoulos L, Wenzel A. Bone healing following immediate versus delayed placement of titanium implants into extraction sockets: A prospective clinical study. J Prosthet Dent 2003; 90: 269-275

Schütze P. Reliabilität der digitalen Okklusionsanalyse von OccluSense und verschiedenen Intraoralscannern im Vergleich zur klassischen instrumentellen Okklusionsanalyse. Dissertationsschrift aus der Medizinischen Fakultät der Charité – Universitätsmedizin Berlin (2023)

Schwarz M. Mechanical complications of dental implants. Clin Oral Impl Res 2000; 11: 156-158

Schwarz S, Schröder C, Hassel A, Bömicke W, Rammelsberg P. Survival and chipping of zirconia-based and metal-ceramic implant-supported single crowns. Clin Implant Dent Relat Res 2012; 14: 119-125

Sripetchdanond J, Leevailoj C. Wear of human enamel opposing monolithic zirconia, glass ceramic, and composite resin: an in vitro study. J Prosth Dent 2014; 112: 1141-1150

Stilwell C. Occlusal considerations in maintaining health of implants and their restorations. Br Dent J 2024; 236: 773-779

Sutter BA. Digital occlusion analyzers: A product review of T-Scan 10 and Occlusense. Adv Dent Technol Tech 2019; 2: 1-31

Swain MV. Unstable cracking (chipping) of veneering porcelain on all-ceramic dental crowns and fixed partial dentures. Acta Biomater 2009; 5: 1668-1677

Swaminathan Y. Implant protected occlusion. IOSR J Dent Med Sci 2013; 11: 20-25

Száva DT, Száva A, Száva J, Gálfi B, Vlase S. Dental implant and natural tooth micro-movements during mastication: In vivo study with 3D VIC method. J Pers Med 2022; 12: 1690

Teng F, Du FY, Chen HZ, Jiang RP, Xu TM. Three-dimensional analysis of the physiologic drift of adjacent teeth following maxillary first premolar extractions. Sci Rep 2019; 9: 14549

Thongdee T. Effect of occlusal design on relative occlusal force and marginal bone level of posterior implant-supported single crowns. Dissertationsschrift aus der Faculty of Dentistry der Chulalongkorn University (2022)

Throckmorton GS, Rasmussen J, Caloss R. Calibration of T-Scan sensors for recording bite forces in denture patients. J Oral Rehabil 2009; 36: 636-643

Todic J, Mitic A, Lazic D, Radosavljevic R, Staletovic M. Effects of bruxism on the maximum bite force. Vojn Pregl 2017; 74: 138-144

Tomasi C, Wennström JL, Berglundh T. Longevity of teeth and implants: A systematic review. *J Oral Rehabil* 2008; 35 (Suppl 1): 23-32

Trpevska V, Kovacevska G, Benedeti A, Jordanov B. T-Scan III system diagnostic tool for digital occlusal analysis in orthodontics – a modern approach. *Prilozi* 2014; 35: 155-160

Trulsson M, Johansson RS. Encoding of tooth loads by human periodontal afferents and their role in jaw motor control. *Prog Neurobiol* 1996; 49: 267-284

Van Steenberghe D, Naert I, Jacobs R, Quirynen M. Influence of inflammatory reactions vs. occlusal loading on peri-implant marginal bone level. *Adv Dent Res* 1999; 13: 130-135

Wu ML, Lai PY, Cheong F, Zhou WC, Xu SH, Li H, et al. Application in the analysis of the occlusal force of free-end missing tooth implant restoration with T-Scan III. *Front Bioeng Biotechnol* 2023; 11: 1039518

Yip KHK, Smales RJ, Kaidonis JA. Differential wear of teeth and restorative materials: clinical implications. *Int J Prosth* 2004; 17: 350-356

Zakkour R, Al-Omiri MK, Al-Wahadni A, Lynch CD. Digital occlusal analysis combined with electromyography for the assessment of implant-supported restorations. *Prosthesis* 2024; 6: 10, e1-e14

Zhou T, Wongpairojpanich J, Sareethammanuwat M, Lilakhunakon C, Buranawat B. Digital occlusal analysis of pre and post single posterior implant restoration delivery: A pilot study. *PLOS One* 2021; 16: e0252191

9. Erklärung zum Eigenanteil

Die vorliegende retrospektive Dissertation wurde am Universitätsklinikum Bonn unter der Betreuung von Prof. Dr. Christoph Bourauel angefertigt. Die für die Studie verwendeten Patientendaten stammen aus der Zahnarztpraxis Dr. Birkhoff (Grünstraße 2, 41516 Grevenbroich), in der ich zum Zeitpunkt der Datenerhebung angestellt war.

Die Konzeption und Planung der wissenschaftlichen Arbeit erfolgten eigenständig durch mich, in Rücksprache mit Prof. Dr. Christoph Bourauel. Die Auswahl der Fragestellung sowie die Strukturierung der Auswertung wurden von mir selbstständig vorgenommen.

Die Datenerhebung erfolgte im Rahmen der zahnärztlichen Routinebehandlungen mittels des digitalen T-Scan-Systems. Die Erfassung und Dokumentation der relevanten Daten wurden vollständig durch mich selbst durchgeführt. Es wurden keine zusätzlichen experimentellen oder laboranalytischen Verfahren eingesetzt.

Die statistische Auswertung wurde von mir eigenständig durchgeführt. Zur Auswahl geeigneter Verfahren sowie zur methodischen Beratung wurde ich durch Herrn Sebastian Waßenberg (Punkt05 Statistikberatung, Merowingerplatz 1, 40225 Düsseldorf) unterstützt.

Die Interpretation der Ergebnisse sowie deren wissenschaftliche Einordnung erfolgten durch mich selbstständig.

Zur sprachlichen und stilistischen Optimierung einzelner Passagen habe ich das Sprachmodell GPT-4o (OpenAI) verwendet. Dieses diente ausschließlich der Verbesserung der Lesbarkeit und sprachlichen Kohärenz. Alle durch das Tool unterstützten Textstellen wurden von mir sorgfältig geprüft und überarbeitet. Ich übernehme die volle Verantwortung für den Inhalt der vorliegenden Dissertationsschrift.

Ich versichere, die Dissertation selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet zu haben.

10. Danksagung

Zuallererst möchte ich meinem Doktorvater, Professor Dr. Christoph Bourauel, meinen herzlichen Dank aussprechen. Seine fachliche Unterstützung und die Möglichkeit, dieses spannende Thema zu bearbeiten, waren für mich von unschätzbarem Wert.

Darüber hinaus möchte ich Herrn Professor Oh Kyung-Cheol meinen aufrichtigen Dank aussprechen. Er hat mein wissenschaftliches Arbeiten in besonderer Weise geprägt, indem er mir nicht nur die Freude an der Forschung nähergebracht, sondern mich auch nachhaltig inspiriert hat. Seine fachliche Kompetenz, sein strukturierter klinischer Behandlungsansatz sowie sein wissenschaftliches Engagement waren für mich ein wichtiges Vorbild.

Ein besonderer Dank gilt meiner Familie, insbesondere meinen Eltern Brigitte und Dr. Horst Michael Birkhoff, Michi, Frauke, Jonas sowie Meme, Elke und Friedmund, für ihre beständige Unterstützung und Liebe. Besonderer Respekt gebührt meinem Vater für seine unendliche Geduld; ihm danke ich von Herzen für sein Vertrauen in mich. Meiner Mutter danke ich für ihre engagierte Begleitung und ihre stetige Erinnerung an die Bedeutung des erfolgreichen Abschlusses dieser Arbeit. Meinem Bruder Michi danke ich für seine Bereitschaft, sich stets meiner (Formatierungs-)notfälle anzunehmen. Frauke, die als wahre Bibliothekarin nicht nur beruflich, sondern auch persönlich eine unerschöpfliche Quelle des Wissens für mich war, gilt mein ganz besonderer Dank.

Auch Christofer danke ich für das gründliche Korrekturlesen und seine Unterstützung während dieser Arbeit. Unser Austausch war für mich sehr wertvoll, und ich bin dankbar für die Zeit, die du in mich und meine Entwicklung investiert hast.

Mein herzlicher Dank gilt zudem meinen Chefs, Dr. John F. Jenneßen und Dr. Tim Graf, die mich und meine zum Teil sehr wilden Ideen seit jeher unterstützt haben. Ich bin jeden Tag dankbar, in einem solch inspirierenden Umfeld arbeiten zu dürfen.

Meinen liebsten Menschen Victor, Alex, Luisa, Theresa, Dima, Jess und Jihoon möchte ich für ihre beständige Ermutigung danken. Ihr seid eine unerschöpfliche Quelle der Freude für mich, und ich schätze mich sehr glücklich, euch in meinem Leben zu haben.

Besonderer Dank gebührt auch den Oberärzten Dr. Carolin Busch und Dr. Hassan Hassanein für ihre wertvolle Unterstützung.

Nicht zuletzt möchte ich dem VnD Café und seinem Team danken, wo ich unzählige Stunden verbracht habe. Es war der Ort, an dem ein Großteil dieser Arbeit entstanden ist.