

Vergleich verschiedener Überlagerungsmethoden zur Bestimmung kieferorthopädischer Zahnbewegungen

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades

der Hohen Medizinischen Fakultät

der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität

Bonn

Jana Schmitz

aus Siegburg

2023

Angefertigt mit der Genehmigung

der Medizinischen Fakultät der Universität Bonn

Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Christoph Bourauel

Gutachter: Priv. Doz. Dr. med. dent. Christoph Reichert

Tag der Mündlichen Prüfung: 02.10.2023

Aus der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik, Propädeutik
und Werkstoffwissenschaften der Universität Bonn

Direktor: Prof. Dr. med. dent. Helmut Stark

- Stiftungsprofessur für Oralmedizinische Technologie -

Prof. Dr. rer. nat. Christoph Bourauel

Meinen Eltern für ihre liebevolle Unterstützung

Inhaltsverzeichnis

	Abkürzungsverzeichnis	7
1.	Einleitung.....	8
1.1	Historie bildgebender Verfahren	8
1.2	Historie der Überlagerungstechniken	12
1.3	Aktueller Stand zur Verwendung digitaler 3D-Modelle und Überlagerungen....	14
1.4	Fragestellung und Ziele.....	16
2.	Material und Methoden	17
2.1	Material und Methoden für den experimentellen Abschnitt.....	17
2.1.1	Herstellung der Modelle	17
2.1.2	Versuchsaufbau	18
2.1.3	Scanvorbereitung	21
2.1.4	Zahnbewegungen.....	22
2.1.5	Versuchsdurchführung.....	24
2.1.6	Wiederholungsversuche.....	25
2.1.7	Vorbereitung der Überlagerungen.....	25
2.1.8	Überlagerungen.....	28
2.1.9	Auswertungstabellen	30
2.1.10	Statistische Methoden.....	31
2.2	Material und Methoden für den klinischen Abschnitt.....	32
2.2.1	Verwendete Patientendaten	32
2.2.2	Aufbereitung und Verarbeitung der Patientendaten.....	34
2.2.3	Statistische Methoden.....	36
3.	Ergebnisse.....	37
3.1	Ergebnisse des experimentellen Abschnitts.....	37
3.1.1	Ergebnisse der Wiederholungsversuche	37
3.1.2	Ergebnisse zu Messreihen von Zahnbewegungen	41
3.2	Ergebnisse des klinischen Abschnitts.....	48
4.	Diskussion	62
4.1	Diskussion der Methoden.....	62
4.1.1	Diskussion der Methoden des experimentellen Abschnitts.....	63
4.1.2	Diskussion der Methoden des klinischen Abschnitts.....	69

4.2	Diskussion der Ergebnisse	72
4.2.1	Diskussion der Ergebnisse des experimentellen Abschnitts	72
4.2.2	Diskussion der Ergebnisse des klinischen Abschnitts	79
5.	Zusammenfassung	90
6.	Abbildungsverzeichnis	92
7.	Tabellenverzeichnis	95
8.	Literaturverzeichnis.....	96
9.	Danksagung.....	102

Abkürzungsverzeichnis

2er-Modell	Modell mit beweglichem Incisivus 22
5er-Modell	Modell mit beweglichem Prämolare 25
6er-Modell	Modell mit beweglichem Molar 26
CT	Computertomografie
digitales 3D-Modell	digitales dreidimensionales Modell
DVT	digitale Volumetomografie
FRS	Fernröntgenseitenbild
HexMeS	Hexapod-Mess-System
KI	künstliche Intelligenzsysteme
MRT	Magnetresonanztomografie
OPG	Orthopantomogramm
STL-Datei	Datei im Format Standard Triangulation Language

1. Einleitung

Seitdem kieferorthopädische Behandlungen zur Korrektur von Kiefer- und/oder Zahnfehlstellungen durchgeführt werden, besteht ein Bedürfnis Zustände vor, während und nach erfolgten Behandlungen zu dokumentieren. Solche Dokumentationen dienen vielfältigen Zwecken: Genaue Ermittlung des Ist-Zustandes und Festlegung der Behandlungsziele, Festhalten des jeweiligen Behandlungsstandes und Kontrolle der Abweichungen vom gesetzten Behandlungsziel, Erfüllung von Dokumentationspflichten, Unterstützung der Kommunikation zwischen Patienten und Behandlern sowie mit Kollegen und Kostenträgern (Krankenkasse, Beihilfestellen, Berufsgenossenschaft, private Zusatzversicherungen, etc.), Gewinnung wissenschaftlicher Erkenntnisse, Erstellung von Lehrmaterialien etc..

1.1 Historie bildgebender Verfahren

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über die Entwicklung der derzeit verwendeten bildgebenden Verfahren in der Kieferorthopädie gegeben.

Zunächst nur handschriftlich erstellte Dokumentationen und Zeichnungen wurden nach dem jeweiligen Stand der verfügbaren Technik um Fotografien, Abdrücke (u.a. Alginat, Silikon) und physische Modelle (u.a. Gips, Kunststoffe) ergänzt.

Sobald verfügbar wurde die Röntgentechnik als weiteres bildgebendes Verfahren zur Dokumentation und Unterstützung kieferorthopädischer Behandlungen herangezogen. Schon 1922 wurden erste Röntgenaufnahmen in Form von Orthopantomogrammen (OPG) von Zulauf vorgestellt (Fuhrmann, 2013). Damit konnten der Ober- und Unterkiefer dargestellt werden, sowie alle Zähne, die Kiefergelenke und auch die Kieferhöhlen beidseits. Diese zweidimensionalen OPGs werden heute noch standardmäßig eingesetzt. Wegen der bei dieser Technik unvermeidlichen Verzerrungen, können damit zwar qualitative Beurteilungen durchgeführt werden, jedoch keine exakten quantitativen Messwerte für Kiefer- und Zahnfehlstellungen und deren Veränderungen infolge kieferorthopädischer Behandlungen gewonnen werden (Al Borney, 1999). Folgende Abbildung 1 zeigt ein typisches OPG nach aktuellem Standard.



Abb. 1: Orthopantomogramm (modifiziert nach Cosson, 2020)

Die Verzerrungen, die beim OPG auftreten, lassen sich stark reduzieren, wenn die Röntgenquelle aus größerer Entfernung (1,5 bis 2,5 m) auf einen nahe hinter dem Kopf angebrachten Film oder Detektor projiziert wird. Verbleibende Verzerrungen lassen sich infolge der projektionsgeometrischen Gegebenheiten berechnen und somit kompensieren (Schulze, 2019). Die erstmals von Broadbent (1931) und Hofrath (1931) vorgestellten Fernröntgenseitenbilder (FRS) ermöglichten damit zusätzlich zu qualitativen Beurteilungen auch quantitative Messungen von Kiefer- und Zahnfehlstellungen und deren Veränderungen durch kieferorthopädische Maßnahmen. Die daraus entwickelte FRS-Analyse gehört auch heute noch zur kieferorthopädischen Routinediagnostik. Mussten dazu früher mühevoll Referenzpunkte, Referenzgeraden, Abstände und Winkel auf dem Fernröntgenseitenbild eingezeichnet und ausgewertet werden, kann heutzutage einfach das Röntgenbild über einen Webbrowser an einen externen Dienstleister geschickt werden, der innerhalb weniger Sekunden dem Einsender eine per Software erstellte FRS-Analyse zurückliefert (Anbieter u.a. Dampsoft GmbH, Damp). Folgende Abbildung 2 zeigt a) ein typisches FRS nach aktuellem Standard sowie b) eine typische FRS-Durchzeichnung.

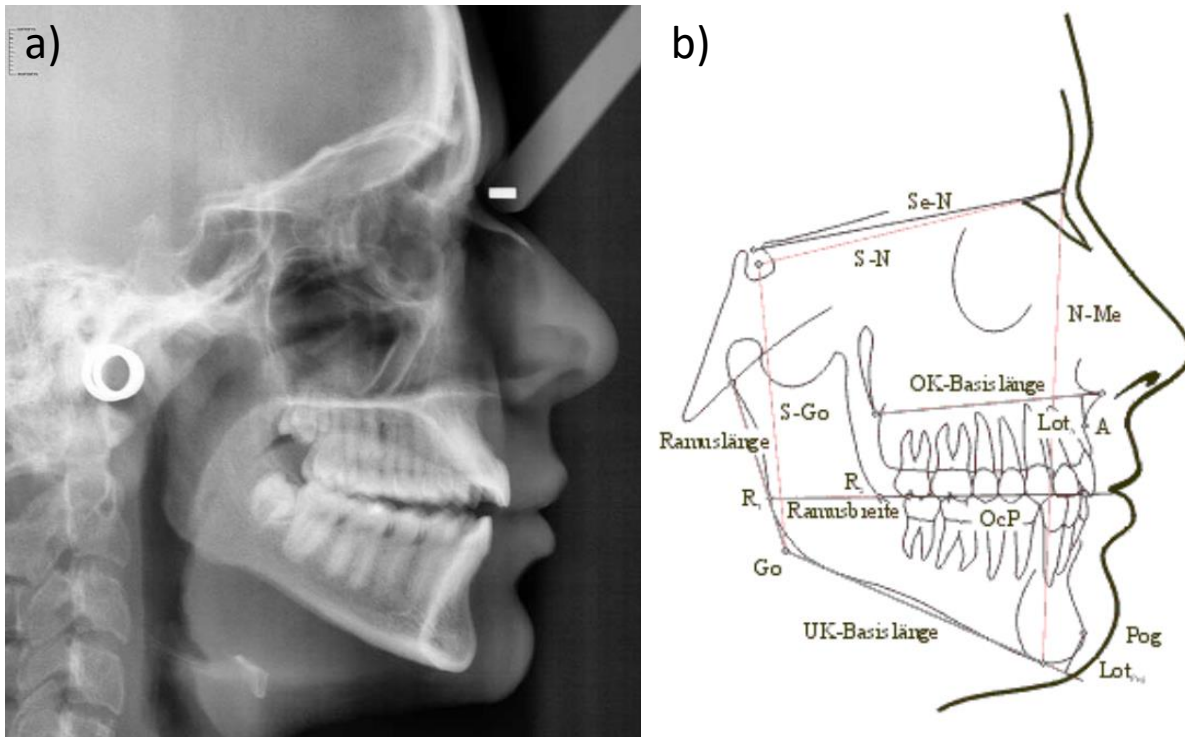


Abb. 2: a) Fernröntgenseitenbild (modifiziert nach Durão et al., 2015) und b) FRS-Durchzeichnung (modifiziert nach Nötzel, 2023)

Mit immer leistungsfähigeren Computern und fortschreitender Entwicklung der Informationstechnik eröffneten sich zunächst Möglichkeiten, schriftliche Aufzeichnungen und zweidimensionales fotografisches Material zu digitalisieren. Die Vorteile bei der Nutzung digital gespeicherter Daten waren überzeugend. Daher lag es einerseits nahe, auch dreidimensionale physische Strukturen wie zum Beispiel Gipsmodelle digital zu dokumentieren. Andererseits wurde intensiv daran gearbeitet, dreidimensionale Strukturen, wie Kiefer und Zähne direkt dreidimensional digital zu erfassen. Die Bilderzeugung mittels Tomografien erfordert eine sehr leistungsfähige Röntgentechnik, geeignete mathematische Algorithmen zur Signalverarbeitung und Bilderstellung sowie erhebliche Rechenkapazitäten, um die Auswertungen in angemessener Zeit durchführen zu können. Der Durchbruch von zweidimensionalen hin zu dreidimensionalen digitalen Darstellungen auf der Basis von Röntgenstrahlen gelang mit der Entwicklung der Computertomografie (CT), für die ab Anfang der 70er Jahre marktreife Geräte erhältlich waren (Schulze, 2019). Es folgte die digitale Volumentomografie (DVT) für die ab Ende der 90er Jahre marktreife Geräte erhältlich waren (Mozzo et al., 1998). Die folgende Abbildung 3 zeigt Ausschnitte einer DVT.

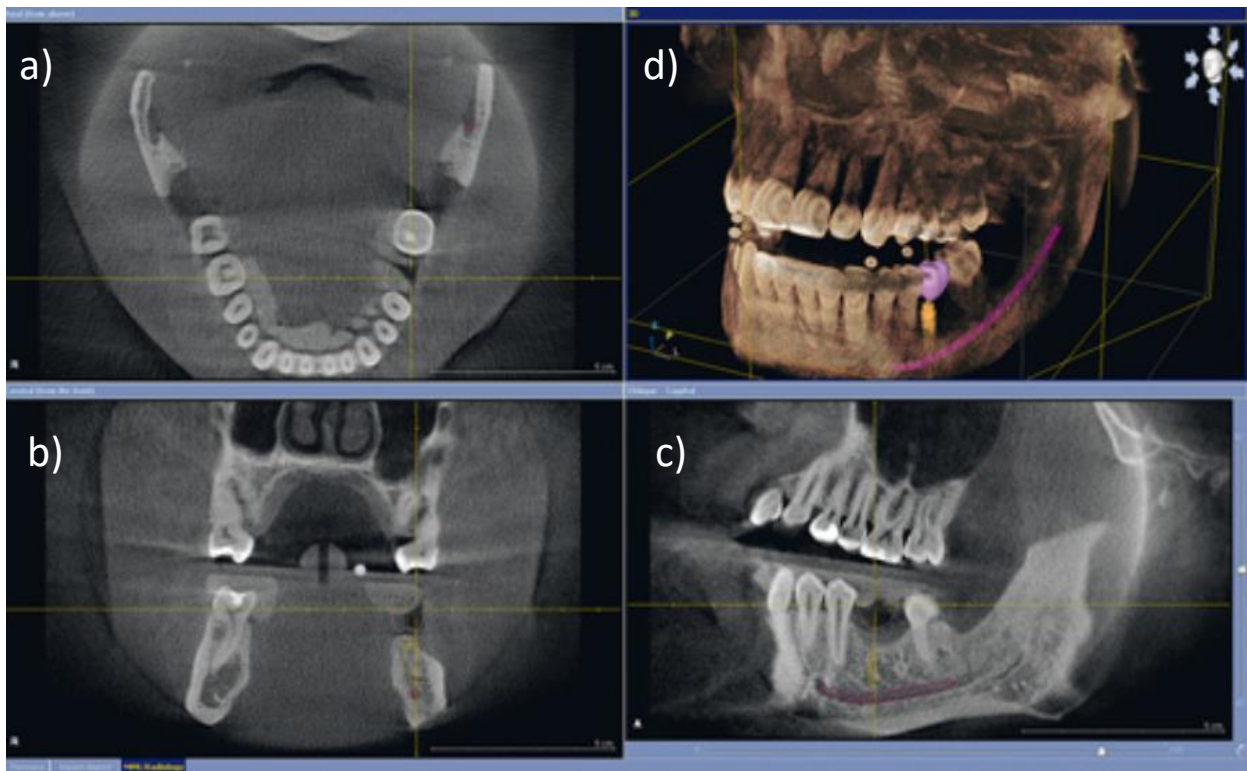


Abb. 3: Ausschnitte aus einer digitalen Volumentomografie in allen drei Ebenen a) axial, b) koronal, c) sagittal, d) 3D-Rekonstruktion (modifiziert nach Schlegel und Blanke, 2011)

Für die nicht auf Röntgenstrahlen, sondern auf Magnetspinresonanz basierende Magnetresonanztomografie (MRT) waren ab Anfang der 80er Jahre marktreife Geräte erhältlich (Grätzel von Grätz, 2020). In der Kieferorthopädie spielen MRTs eine untergeordnete Rolle.

Anfang der 90er Jahre präsentierten Chen und Medioni (1991) einen neuen Algorithmus (range image registration algorithm), um die Oberfläche von kompakten physischen Körpern digital abzubilden. Aus vielen verschiedenen Blickwinkeln aufgenommene Bilder eines dreidimensionalen Objektes mit hinreichend vielen überlappenden Regionen werden dabei mittels dieses Algorithmus zu einem kompletten Modell der Oberfläche als 3D-Punktwolke zusammengefasst. Chen und Medioni (1991) demonstrierten ihre Technik an einem 10 cm großen Gipsmodell eines Zahnes. Solche Algorithmen sind die mathematische Grundlage für die Erstellung digitaler 3D-Modelle der Oberflächen von physischen Objekten.

Eine entscheidende Weiterentwicklung zur digitalen Darstellung der Oberflächen physischer Körper wurde möglich durch den Einsatz von Lasertechnik. Fortschritte in der Entwicklung dieser Technik, bei der Rechenkapazität der Computer und den verwendeten Algorithmen ermöglichten hinreichend exakte digitale 3D-Modelle von Oberflächen zu erstellen. Kusnoto und Evans (2002) erzielten mittels eines Oberflächenlaserscanners Genauigkeiten im Zehntelmillimeter bis Millimeterbereich. Die zunächst entwickelten Extroralscanner benötigen klassische physische Abdrücke oder Modelle zum Scannen. Ein weiterer Meilenstein in der Entwicklung war daher die Einführung von Intraoralscannern, bei deren Verwendung dieser Zwischenschritt entfällt. Erste Intraoralscanner kamen Anfang der 80er Jahre auf den Markt (EINaghy et al. 2021).

1.2 Historie der Überlagerungstechniken

Zunächst standen nur zweidimensionale Abbildungen zur Verfügung. Zweidimensionale Bilder lassen sich durch Überlagerung eines transparenten Bildes über einem anderen Bild desselben Objektes leicht miteinander vergleichen, sofern die beiden Bilder im gleichen Maßstab und in gleicher Winkelgeometrie aufgenommen worden sind, wie dies z.B. mit vor und nach kieferorthopädischen Therapien erstellten FRS-Aufnahmen erfolgen kann.

Überlagerungen 3-dimensionaler Objekte sind wesentlich komplizierter durchzuführen. Physisch lässt sich dies meist gar nicht oder nur wenig passgenau durchführen, indem etwa von einem Objekt die Oberfläche als dünner Abdruck genommen wird und diese über das Vergleichsobjekt gelegt wird. Sobald jedoch mit oben beschriebenen Methoden digitale 3D-Modelle als Punktwolken in hinreichender Genauigkeit dargestellt werden konnten, änderte sich dies. Die mittels mathematischer Algorithmen mögliche Überlagerung von Punktwolken digitaler 3D-Modelle konnte in der Kieferorthopädie genutzt werden, um damit Zustände vor, während und nach kieferorthopädischen Behandlungen zu vergleichen. Damit eröffneten sich völlig neue Möglichkeiten, den Behandlungsfortschritt zu verfolgen und Vor- und Nachteile verschiedener kieferorthopädischer Behandlungen gegeneinander abzuwägen.

Cevitanes et al. (2005) kam hinsichtlich der Überlagerung mittels DVT erstellter digitaler 3D-Modelle zu dem Schluss, dass farbkodierte Überlagerungsbilder sich für solche Vergleiche sehr gut eignen. Folgende Abbildung 4 zeigt farbkodierte Überlagerungsbilder, wie sie nach dem Stand der Technik Anfang der 2000er Jahre erstellt werden konnten.

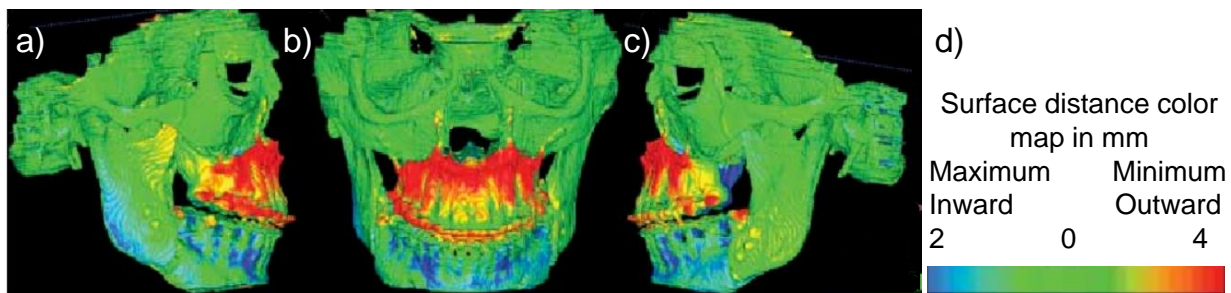


Abb. 4: Farbkodierte DVT-Überlagerungsmodelle von a) rechts lateral, b) frontal, c) links lateral d) Legende (modifiziert nach Cevitanes et al., 2005)

Die Abbildung 4 zeigt Überlagerungen von DVT-Modellen, die von einem Patienten vor und nach einer bimaxillären Umstellungsosteotomie aufgenommen worden waren. Deutlich sichtbar ist die maxilläre Vorverlagerung (in rot) und die mandibuläre Rückverlagerung (in blau).

Mittels DVT erstellte digitale 3D-Modelle - heute in hoher Auflösung verfügbar - sind das Mittel der Wahl, falls bei kieferorthopädischen Behandlungen genaue Informationen hinsichtlich Positionen und Bewegungen von Zahnwurzeln und Veränderungen am Kieferknochen benötigt werden, die durch zweidimensionale Röntgenbilder nicht hinreichend bzw. von Laserscannern gar nicht dargestellt werden können.

Laserscanner stellen nur Informationen hinsichtlich der Oberflächen von Zahnkronen und Weichgewebe bereit und demzufolge können nur diese Informationen von der zugehörigen Software weiterverarbeitet werden. Die Entwicklung bei Intraoralscannern und Software erfolgte gemäß dem von Weissheimer et al. (2015) aufgestellten Ideal. Dieses Ideal für klinische Anwendungen betont als wünschenswerte Eigenschaften: bequem für den Patienten (keine oder nur geringe Strahlenbelastung, keine lange Vorbereitung, kurze Scandauer), benutzerfreundlich für den Anwender (nur ein Programm mit intuitiver, nicht

trainingsintensiver, unkomplizierter Bedienungsführung, weitestgehend automatisiert), passend für einen weiten Anwendungsbereich (Maxilla und Mandibula, Kinder in der Wachstumsphase) und mit qualitativ hochwertigen Ergebnissen (hohe Auflösung, nur minimale Abweichungen zwischen den Oberflächen der Überlagerungsbilder). Eine detaillierte Übersicht der Entwicklung von Überlagerungsmethoden unter Nutzung unterschiedlicher Techniken in der Kieferorthopädie von den ersten Anfängen Mitte der 70er Jahre bis 2009 findet sich in der Dissertation von Talaat (2019).

1.3 Aktueller Stand zur Verwendung digitaler 3D-Modelle und Überlagerungen

Egal welche Technik zur Erstellung digitaler 3D-Modelle verwendet wird, stets beinhaltet diese spezifisch dafür entwickelte zugehörige komplexe Softwares, die zur Erstellung, Bearbeitung, Speicherung, Visualisierung etc. unverzichtbar sind. Für die Kieferorthopädie integrieren einige Anbieter diese technisch notwendigen Softwares in komplette Softwarepakete. Diese enthalten alle gewünschten Funktionen, um in einem einheitlichen Arbeitsablauf von der Erfassung der Patientendaten, über Behandlungsplanung, -ablauf und -dokumentation bis zur Abrechnungserstellung alle Vorgänge digital zu unterstützen. Typischerweise beinhalten derzeit angebotene Softwarepakete für die Kieferorthopädie Programmkomponenten für: Übernahme der Bilddateien von Extra- und Intraoralscannern oder aus anderen Quellen, digitale 2- und 3D-Bildgebung, Bildbearbeitung, Behandlungsplanung, Behandlungssimulationen, Visualisierung des angestrebten Zustands nach kieferorthopädischer Behandlung, kephalometrische Analysen, Dokumentation, Abrechnung und vieles mehr (u.a. OnyxCeph³™, Image Instruments GmbH, Chemnitz; Aligner Studio, 3shape, Kopenhagen, Dänemark).

Im Rahmen des eigenen Internetauftritts von kieferorthopädischen Praxen zur Selbstvermarktung und Rekrutierung neuer Patienten (Kratzer, 2016) finden sich zunehmend Hinweise und Bildmaterialien von kieferorthopädischen Behandlungen unter Verwendung moderner digitaler 3D-Modelle.

Heutzutage sind Smartphones und Tablets aus dem Alltag nicht mehr wegzudenken. Dies ist auch im medizinischen Bereich festzustellen. Für die Kieferorthopädie sind sowohl zur Unterstützung der Behandler als auch zur Information der Patienten und Verbesserung

der Patientencompliance Apps entwickelt worden (Gupta und Vaid, 2017). Wenn der Patient über eine App die Fortschritte seiner kieferorthopädischen Behandlung verfolgen kann, ist ein starker Anreiz gegeben, die Therapie aktiv zu unterstützen (Li et al., 2016).

Als neueste Entwicklung ist die Einführung von Programmen anzusehen, die auf der Basis fortgeschrittener selbstlernender künstlicher Intelligenzsysteme (KI) arbeiten. Es wird prognostiziert, dass in den kommenden Jahren sehr viele KI-basierte Programme entwickelt und für die Kieferorthopädie nutzbar gemacht werden (Strunga et al., 2023; Subramanian et al., 2022).

Überlagerungsbilder von vor, während und nach der kieferorthopädischen Behandlung gewonnenen digitalen 3D-Modellen werden in oben genannten Anwendungen auf vielfältige Weise verwendet. Derzeit nutzen zur kephalometrischen Superimposition entwickelte digitale 3D-Modelle unterschiedliche Ansätze (Voxel-, Landmark- oder Oberflächenbasiert) und alle sollen brauchbare Informationen zur klinischen Beurteilung von Zahnbewegungen liefern (Franco, 2018). Farbige Überlagerungsbilder ermöglichen eine qualitative visuelle Kontrolle der Zustände vor und nach einem Behandlungsschritt. Da die Modelle in Form von digitalen Daten vorliegen, liegt es nahe, nicht nur visuelle Vergleiche, sondern auch quantitative Vergleiche durchzuführen. Hinreichend zuverlässige quantitative Vergleiche können Behandlungsfortschritte objektivieren. Bei allen derzeit zu Verfügung stehenden Techniken mangelt es jedoch noch an hinreichender Evidenz für deren jeweilige tatsächliche reale Messgenauigkeit. Ein Goldstandard zum Vergleich der Messgenauigkeit hat sich bei den bisher vorliegenden Studien noch nicht etabliert (Ponce-Garcia et al., 2018). Neueste Studien ziehen als Referenz digitale 3D-Modelle heran, in denen Zahnbewegungen virtuell simuliert werden und dann das ursprüngliche Modell mit dem virtuellen verglichen wird (Samar et al., 2022a; Samar et al., 2022b). Eine Vielzahl von Untersuchungen beschäftigt sich mit der Fragestellung der Messgenauigkeit bei Zahnbewegungen, wobei naturgemäß Aussagen nur hinsichtlich der jeweils verwendeten Apparaturen, Methoden und Algorithmen präsentiert werden können (u.a. Akyalcin et al., 2013; Ashmore et al., 2002; Talaat et al., 2015; Talaat et al., 2017; Thiruvengkatachari et al., 2009). Ob die bei physischen oder virtuellen Modellen erzielten Messgenauigkeiten auch im klinischen Alltag erreicht werden, ist unklar.

1.4 Fragestellung und Ziele

Die vorliegende Arbeit zielt darauf ab, drei verschiedene Überlagerungsmethoden von OnyxCeph³ (™ Image Instruments GmbH, Chemnitz, Release Version 3.2, Programm Version 3D Pro) zur Darstellung kieferorthopädischer Zahnbewegungen zu untersuchen und miteinander zu vergleichen. Die Arbeit umfasst einen experimentellen und einen klinischen Abschnitt. Im experimentellen Abschnitt werden Zahnbewegungen mit selbst erstellten physischen Modellen simuliert, mit der Zielsetzung, die Frage zu beantworten, wie gut jede dieser Überlagerungsmethoden diese vorgegebenen Zahnbewegungen abbildet. Im klinischen Abschnitt werden Zahnbewegungen, welche bei kieferorthopädischen Behandlungen durchgeführt wurden, retrospektiv untersucht und es wird der Frage nachgegangen, wie gut diese in digitalen 3D-Modellen dokumentierten klinischen Zahnbewegungen durch die drei Überlagerungsmethoden abgebildet werden.

Da es keinen etablierten Goldstandard für die Messung der tatsächlichen realen Messgenauigkeit von klinischen Zahnbewegungen gibt, ist es das Ziel des klinischen Abschnitts, Antworten auf die vorangestellte Fragestellung zu finden, ob die drei untersuchten Überlagerungsmethoden beim intraindividuellen Vergleich von Messwerten annähernd übereinstimmende Ergebnisse liefern.

2. Material und Methoden

In dieser Arbeit wurden sowohl anhand selbst hergestellter physischer Modelle erstellte digitale 3D-Modelle als auch unter klinischen Bedingungen bei kieferorthopädischen Behandlungen gewonnene digitale 3D-Modelle von Oberkiefern unter Verwendung der Software OnyxCeph³ paarweise überlagert, um quantitative Aussagen über die Güte von damit gewonnenen Daten zu erhalten.

2.1 Material und Methoden für den experimentellen Abschnitt

Im experimentellen Abschnitt wurden vorgegebene Zahnbewegungen mit selbst hergestellten physischen Modellen durchgeführt, Anfangs- und Endzustände der Bewegungen gescannt, Überlagerungen mit OnyxCeph³ durchgeführt, die Güte der Überlagerungen bestimmt und statistisch ausgewertet.

2.1.1 Herstellung der Modelle

Frasaco-Oberkiefermodelle wurden unter Verwendung von Technovit (Technovit 4004, Kulzer GmbH, Wehrheim) dubliert. Um später bewegliche Zähne in verschiedenen Modellen in einer definierten Ausgangsposition fixieren zu können, wurde eine Tiefziehschiene hergestellt. Anschließend wurden aus den dublierten Frasaco-Oberkiefermodellen jeweils einzelne Zähne ausgeschnitten, so dass am Ende drei verschiedene Modelltypen entstanden. Das 6er-Modell (siehe Abbildung 5a) ist durch den beweglichen Molar 26 gekennzeichnet. Um diesen Zahn herum wurde Material ausgefräst, um genügend Platz für die beabsichtigten Bewegungen zu schaffen. Spielraum für eine massive Mesialbewegung wurde durch Wegfräsen des gesamten Zahns 25 geschaffen. Distal von Zahn 26 hingegen wurde nur minimal Material abgetragen. In Richtung palatinal wiederum wurde großzügig ausgefräst. Das 5er-Modell (siehe Abbildung 5b) ist durch den beweglichen Prämolaren 25 gekennzeichnet. Ähnlich wie bei dem 6er-Modell wurde nach mesial großzügig Material abgetragen und Zahn 24 komplett entfernt, nach distal wurde nur minimal und nach palatinal wiederum großzügig ausgefräst. Das 2er-Modell (siehe Abbildung 5c) ist durch den beweglichen Incisivus 22 gekennzeichnet. Nach distal und

nach mesial wurde nur wenig, nach palatinal jedoch - wie bei den zuvor genannten Modellen - großzügig Material abgetragen. Bei allen Modellen wurde der so freigelegte Zahn als bewegliches Element verwendet.

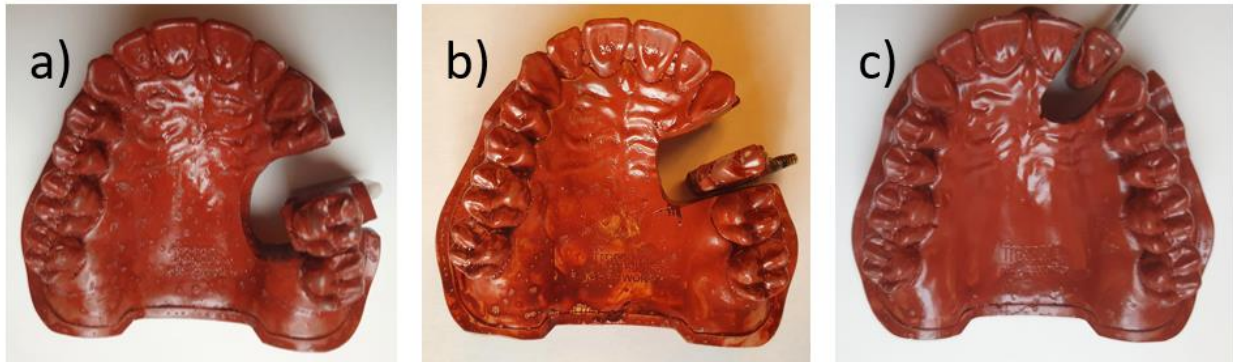


Abb. 5: Fotos von a) 6er-Modell mit beweglichem Molar 26, b) 5er-Modell mit beweglichem Prämolare 25, c) 2er-Modell mit beweglichem Incisivus 22

Die in obigen Abbildungen 5 a) bis c) abgebildeten Modelle sind mit einer braunen Lack-schicht versehen. Die in Folge der Verwendung von Technovit ursprünglich transparenten Modelle konnten mit dem Intraoralscanner TRIOS (Serie 3, 3Shape, Kopenhagen, Dänemark) nicht gut gescannt werden. Dieses Problem wurde nach mehreren Versuchen durch Besprühen der Modelle mit braunem Lack (Motip Acryl Lack Spray 42000 48993 rost-braun, Wolvega, Niederlande) behoben.

2.1.2 Versuchsaufbau

Zur kontrollierten Durchführung von verschiedenen Bewegungen mit dem jeweils beweglichen Zahn der Modelle wurde der biomechanische Messaufbau Hexapod-Mess-System (HexMeS; Keilig et al., 2004) eingesetzt. Mit der Positioniereinheit Hexapod (M-850.50, Physik Instrumente, Karlsruhe) des HexMeS können sehr exakte Translations- und Rotationsbewegungen durchgeführt werden. Die Positions- und Wiederholgenauigkeit dieses Gerätes liegt für Translationen in allen Raumachsen unter $2\ \mu\text{m}$ sowie für Rotationsbewegungen unter $10\ \mu\text{rad}$. Die folgenden Abbildungen 6 und 7 zeigen den Versuchsaufbau.

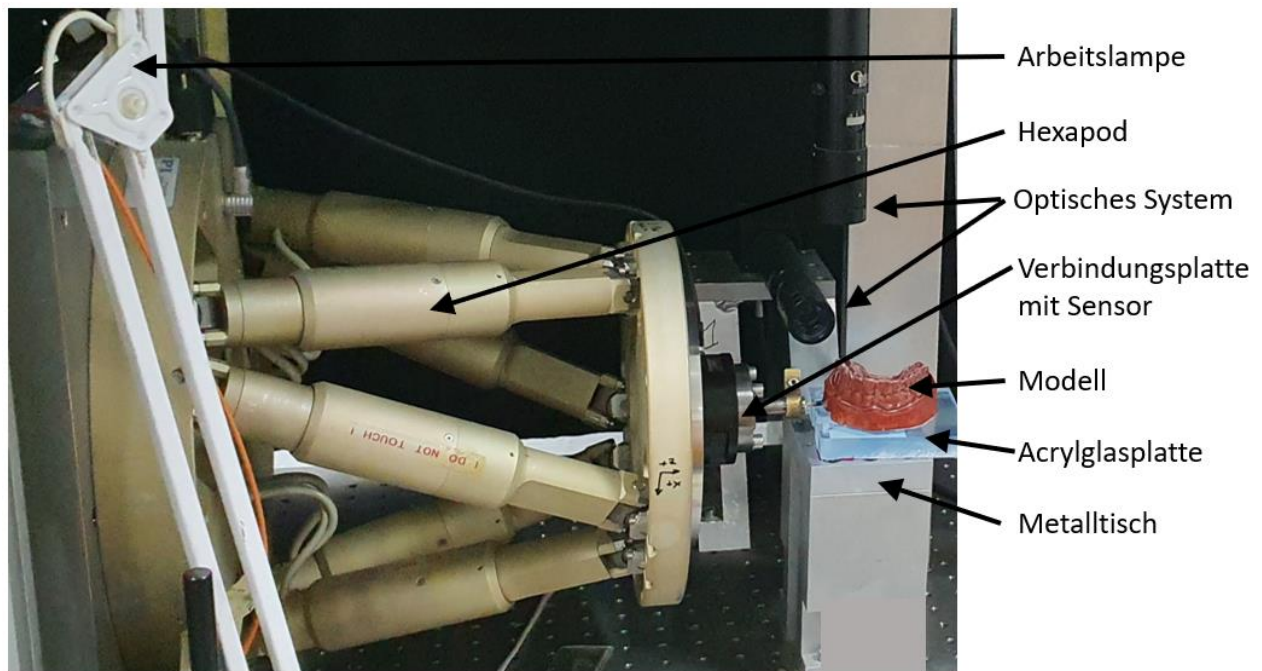


Abb. 6: Biomechanischer Messaufbau HexMeS mit montiertem Modell

Das optische System des Messaufbaus wurde in dieser Arbeit nicht verwendet.

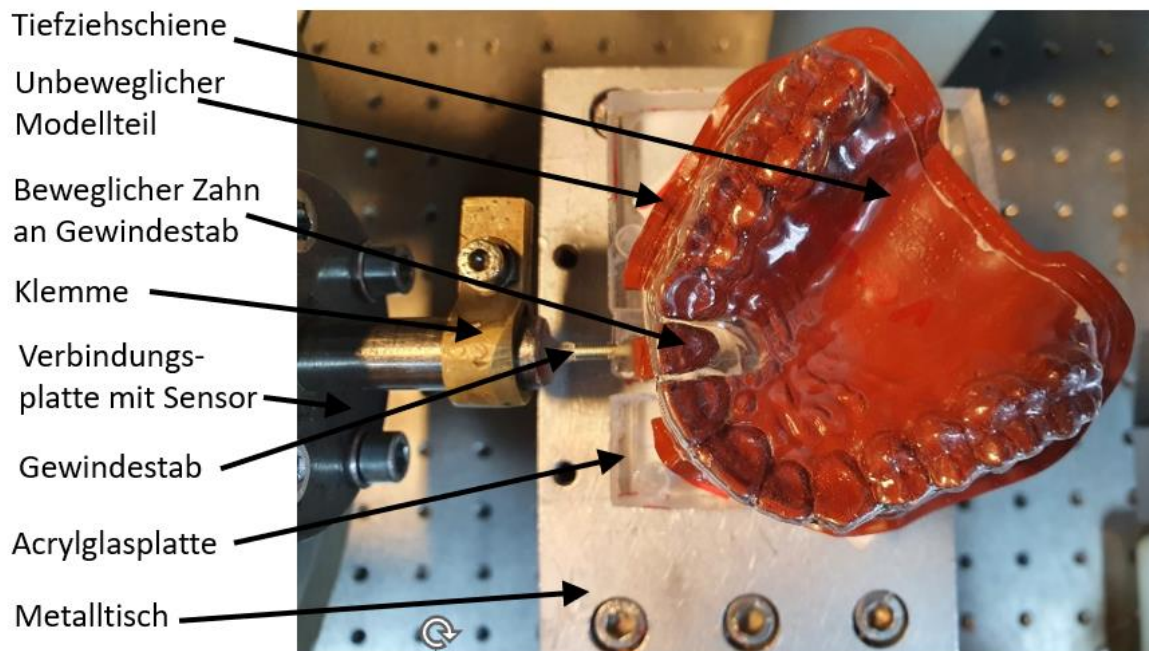


Abb. 7: Detaillierte Ansicht des montierten 2er-Modells vor Entfernung der Tiefziehschiene

Zur Aufnahme des unbeweglichen Modellteils diene ein flacher Metalltisch. Um ausreichend Bewegungsspielraum für Intrusionen gewähren zu können, wurde der unbewegliche Modellteil nicht direkt auf diesem Tisch, sondern auf einer 15 mm dicken Acrylglasplatte positioniert. Diese und der unbewegliche Modellteil wurden mit doppelseitigem Klebeband und punktuell angebrachtem Klebewachs gegen Verrutschen fixiert. Um den Zahn an der Verbindungsplatte des Hexapoden befestigen zu können, wurde vestibulär im Bereich des Zahnsockels ein kleines Loch gebohrt, ein Gewindestab eingeführt und dieser mit Kunststoff (PalaXpress, Kulzer GmbH, Hanau) fixiert. Der bewegliche Zahn wurde mittels dieses Gewindestabs an der Verbindungsplatte des Hexapoden zunächst locker angeklemt. Um Spielraum für Intrusionsbewegungen des beweglichen Zahns zu gewährleisten, wurde die Acrylglasplatte unterhalb dieses Zahnes ausgeschnitten. Das ausgeschnittene Stückchen wurde zur genauen Ausrichtung unter dem beweglichen Zahn eingesetzt.

Mithilfe der Tiefziehschiene wurde der bewegliche Zahn in der Position, die er vor dem Separieren hatte (Ausgangsposition) so ausgerichtet, dass die vorgesehenen Bewegungen mit dem Hexapoden durchgeführt werden konnten und diese Bewegungen möglichst entlang des Zahnbogens erfolgen konnten. Dann wurde der Gewindestab an der Verbindungsplatte endgültig festgeklemmt und zusätzlich mit Kunststoff (PalaXpress) fixiert. Nach Aushärtung des Kunststoffes wurden Tiefziehschiene und Acrylglasstückchen entfernt. Unerwünschte Bewegungen erscheinen mit dieser Versuchsanordnung nicht möglich, so dass die Positions- und Wiederholgenauigkeit des Hexapoden auf den beweglichen Zahn übertragen wird. Anschließend wurde am beweglichen Zahn ein Referenzmarker befestigt. Dieser Referenzmarker mit 5 mm langen Achsen war mit einem 3D-Drucker hergestellt worden. Für die Befestigung an der vestibulären Zahnfläche wurde Klebewachs verwendet. Die Ausrichtung der Koordinatenachsen des Referenzmarkers erfolgte parallel und senkrecht zur Verbindungsplatte und parallel zum Metalltisch. Zur Ausrichtung wurde eine Schiene und eine Winkellehre verwendet. Die Orientierung des Referenzmarkers am beweglichen Zahn gibt dessen Orientierung relativ zur Verbindungsplatte des Hexapoden wieder.

2.1.3 Scanvorbereitung

Bei Vorversuchen zum Scannen traten Probleme bei der Abbildung des Spalts zwischen beweglichem Zahn und unbeweglichem Modellteil auf. Der verwendete Intraoralscanner TRIOS konnte den Spalt nicht korrekt abbilden. Eine Füllung dieser Bereiche mit dichteren Materialien (Papierfasern, (Zahn-)Pasten, verschiedene Schaumstoffe etc.) verbesserte den Scan. Zu dichtes, nicht genügend komprimierbares Material wiederum beeinträchtigte die Bewegungen des Hexapoden. Versuche mit unterschiedlichen Materialien ergaben, dass ein Ausfüllen des Spaltes mit sehr weichem, fein gelochtem Schaumstoff von geringer Dichte die Bewegungen nicht beeinträchtigte, aber die Erfassung des Spaltes wesentlich verbesserte. Daher wurden die finalen, zur weiteren Auswertung verwendeten Scans mit einer solchen Schaumstofffüllung durchgeführt. Die folgende Abbildung 8 zeigt ein fertig montiertes Modell.

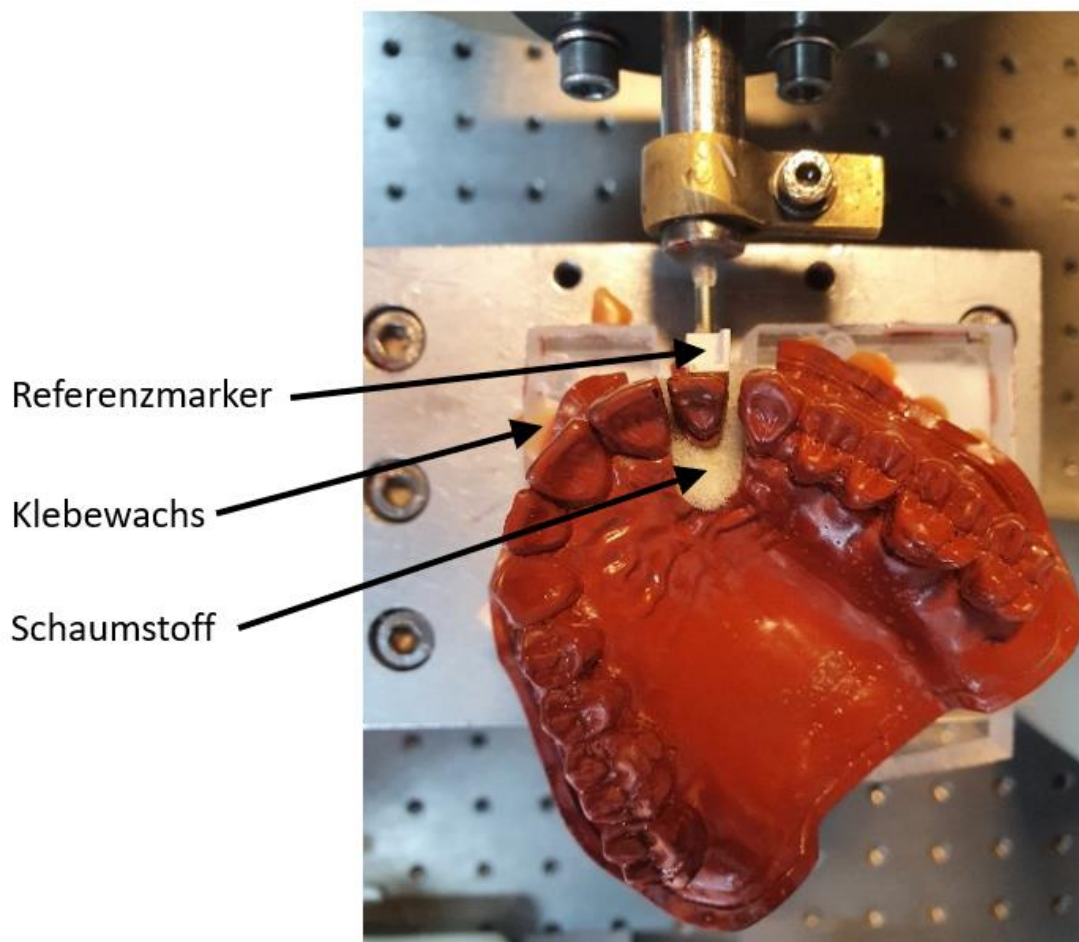


Abb. 8: Fertig montiertes 2er-Modell

In Abbildung 8 sind der am beweglichen Zahn befestigte Referenzmarker und die Schaumstofffüllung des Spaltes zwischen unbeweglichem Modellteil und beweglichem Zahn deutlich erkennbar.

2.1.4 Zahnbewegungen

Mit dem am Hexapoden fixierten Zahn können relativ zum unbeweglichen Modell Translationsbewegungen auf unter $2\ \mu\text{m}$ und Rotationsbewegungen unter $10\ \mu\text{rad}$ sehr exakt durchgeführt werden. Damit ist die Voraussetzung gegeben, zu überprüfen, wie gut unterschiedliche Überlagerungsmethoden die vorgegebenen Bewegungen abbilden.

Der Versuchsaufbau ermöglichte Translationen in Richtung aller Raumachsen sowie Angulationen und Inklinationen. Dementsprechend wurden Zahnbewegungen mit Translationen in alle Richtungen untersucht. Angulationen und Inklinationen bedingen immer auch dem jeweiligen Winkel entsprechende Translationen in mesialer/distaler bzw. vestibulärer/palatinaler Richtung mit Anteilen an Translationen in Intrusionsrichtung. Sie wurden demzufolge durch Untersuchungen von Translationsbewegungen mit abgedeckt. Daher wurden repräsentativ nur Angulationen untersucht. Der in dieser Arbeit verwendete Versuchsaufbau mit flach auf dem Metalltisch liegendem Modell ermöglichte keine Rotationen. Um Rotationen zu ermöglichen, hätte das Modell vertikal auf dem Metalltisch stehend montiert werden müssen. Die Modellausrichtung immer wieder zu ändern, erschien nicht sinnvoll, da bei jedem dieser Umbauten die komplette Grundjustierung und -orientierung verloren gegangen wäre und die Ergebnisse nicht mehr vergleichbar gewesen wären.

Bei der Auswahl von zu untersuchenden Zahnbewegungen sind weiter folgende Gegebenheiten berücksichtigt worden: Bei allen kieferorthopädischen Behandlungen treten immer auch kleinere Bewegungen auf. Selbst wenn nur ein Zahn bewegt werden soll, werden Nachbarzähne von dieser Bewegung mehr oder weniger miterfasst. Deshalb wurden kleine Translationsbewegungen von $1\ \text{mm}$ und Rotationsbewegungen von 1° durchgeführt. Kieferorthopädische Behandlungen führen je nach Indikation (funktionelle, ästhetische, prothetische etc.) oder Maßnahme (z.B. Zahnextraktionen von Prämolaren, Aufrichtung von stark gekippten Zähnen) zu großen Translations- und Rotationsbewegungen. Diese können den für OnyxCeph³ laut Herstellerangaben zuverlässigen Messbereich

(Translationsbewegungen bis etwa 5 mm, Rotationsbewegungen bis etwa 10 °) durchaus überschreiten. Daher wurden hier Zahnbewegungen bis an, aber auch etwas oberhalb der Herstellerangaben durchgeführt. Da von vorneherein nicht absehbar war, ab wann sehr kleine oder sehr große Bewegungen zu nicht mehr gut verwertbaren Auswertungen führen, wurden Bewegungen im Zwischenbereich durchgeführt. Zusätzliche Restriktionen ergaben sich daraus, dass der ausgefräste Bereich beim 2er-Modell Translationen in mesialer bzw. distaler Richtung von maximal 1 mm sowie Angulationen in mesialer Richtung von maximal 4 ° und in distaler Richtung von maximal 3 ° zuließ. Beim 5er- und 6er-Modell erlaubte der ausgefräste Bereich keine distale Translation. Die folgenden Tabellen 1 bis 3 listen die vorgegebenen Bewegungen auf.

Tab. 1: Vorgegebene experimentell durchgeführte Bewegungen beim 6er-Modell

Translationsbewegungen		Angulationen	
Mesial in mm	1, 2, 3, 4, 5	Mesial in °	1, 2, 5, 10
Palatinal in mm	1, 3, 5	Distal in °	1, 2, 5, 10
Vestibulär in mm	2, 4, 5		
Intrusion in mm	1, 2, 4		
Extrusion in mm	1, 2, 4		

Tab. 2: Vorgegebene experimentell durchgeführte Bewegungen beim 5er-Modell

Translationsbewegungen		Angulationen	
Mesial in mm	1, 2, 3, 4, 5	Mesial in °	1, 2, 5, 10
Palatinal in mm	1, 3, 5	Distal in °	1, 2, 5, 10
Vestibulär in mm	2, 4, 6		
Intrusion in mm	1, 2, 4		
Extrusion in mm	1, 2, 4		

Tab. 3: Vorgegebene experimentell durchgeführte Bewegungen beim 2er-Modell

Translationsbewegungen		Angulationen	
Mesial in mm	1	Mesial in °	1, 2, 4
Distal in mm	1	Distal in °	1, 2, 3
Palatinal in mm	1, 3, 5		
Vestibulär in mm	2, 4, 6		
Intrusion in mm	1, 2, 4		
Extrusion in mm	1, 2, 4		

Insgesamt wurden im experimentellen Abschnitt somit 70 verschiedene Zahnbewegungen durchgeführt.

2.1.5 Versuchsdurchführung

Die Neutralposition ergab sich aus dem Versuchsaufbau. Mithilfe der Tiefziehschiene war diese Position jederzeit erneut reproduzierbar. Die Koordinaten der Neutralposition wurden vom Hexapoden bestimmt. Durch manuelle Eingabe der Koordinaten einer gewünschten Position wurde der Hexapod veranlasst, eine gewünschte Bewegung von der Neutralposition hin zu dieser gewünschten Position vorzunehmen. Folgende Abbildung 9 zeigt den beweglichen Zahn in Neutralposition und nach Durchführung einer vestibulären Translationsbewegung.

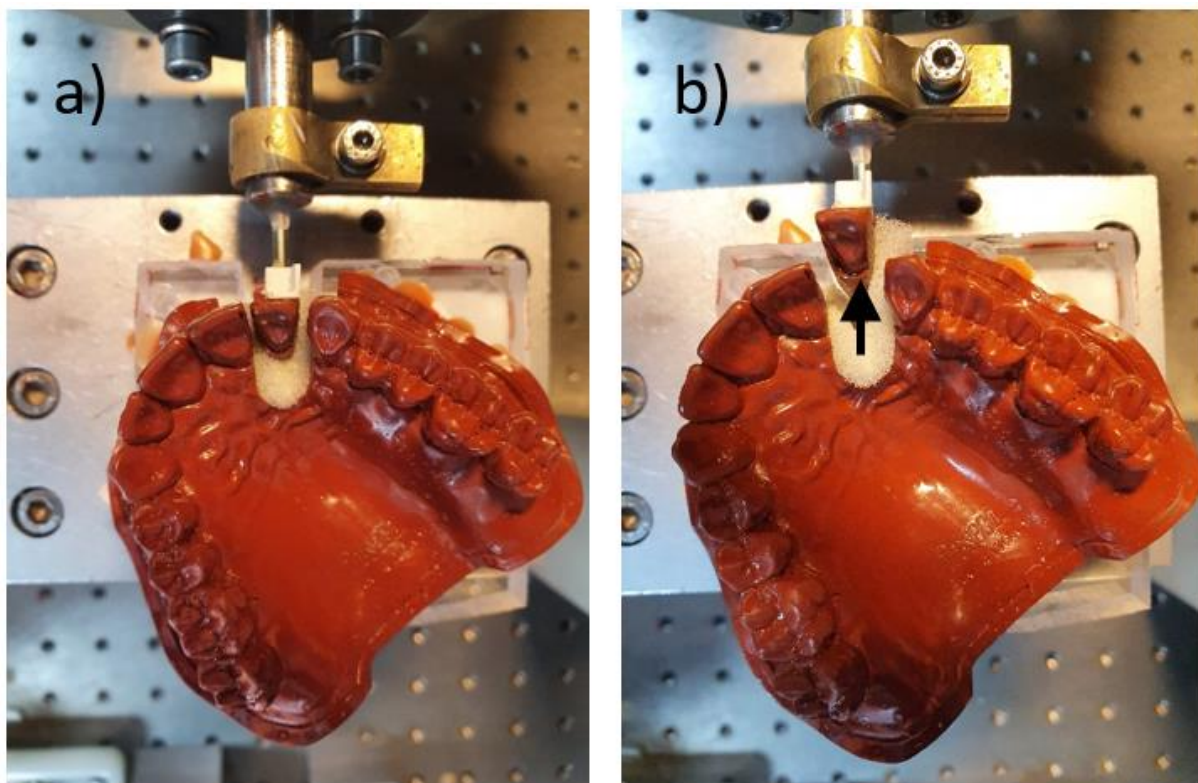


Abb. 9: 2er-Modell mit beweglichem Incisivus 22 a) in Neutralposition b) nach Translation in vestibulärer Richtung

Das Modell wurde in der Neutralposition vor Durchführung und in der Position nach Durchführung der Bewegung mit Hilfe von TRIOS gescannt. Der Vorgang wurde für weitere gewünschte Bewegungen wiederholt, wobei jedes Mal Anfangs- und Endpunkt der Bewegung über Koordinaten vorgegeben worden waren. Die jeweiligen Scans wurden für die weitere Verarbeitung nach OnyxCeph³ importiert. Da das Ausgabeformat (STL-Datei) von

TRIOS von OnyxCeph³ unterstützt wird, war eine zusätzliche Konvertierung der Scandaten nicht notwendig.

2.1.6 Wiederholungsversuche

Um zu prüfen, ob mit dem Versuchsaufbau reproduzierbare Ergebnisse erzielt werden konnten, wurden Wiederholungsversuche durchgeführt. Dazu wurde für einige Konstellationen der Versuch zusätzlich weitere fünf Mal wiederholt. Die Versuchsanordnung wurde bei jeder dieser Wiederholungen vollständig und komplett ab- und aufgebaut und die Bewegungen, Scans und Auswertungen erneut durchgeführt. Die Wiederholungen wurden mit dem 5er-Modell je für kleine und große Translations- und Rotationsbewegungen durchgeführt. Dabei wurden die drei Überlagerungsmethoden verwendet, die in dieser Arbeit untersucht werden sollten. Folgende Tabelle 4 listet die durchgeführten Bewegungen bei den Wiederholungsversuchen auf.

Tab. 4: Wiederholungsversuche für vorgegebene Bewegungen beim 5er-Modell

Translationsbewegungen		Angulationen	
Palatinal in mm	1, 5	Mesial in °	1, 10
Intrusion in mm	1, 4		

Insgesamt wurden somit 36 Zahnbewegungen in Wiederholungsversuchen und ursprünglichem Versuch durchgeführt.

2.1.7 Vorbereitung der Überlagerungen

Das Programm OnyxCeph³ ermöglicht, digitale 3D-Modelle auf verschiedene Arten zu überlagern. In dieser Arbeit wurden drei verschiedene Überlagerungsmethoden des Programms miteinander verglichen. Dabei ist die Vorbereitung für alle drei Überlagerungsmethoden identisch. Anhand der als STL-Datensätze vorliegenden digitalen 3D-Modelle stellt OnyxCeph³ den Oberkiefer bildlich in Frontalebene, Sagittalebene von rechts und Transversalebene von oben und unten dar. Nach dem Import sind die Modelle noch nicht am Koordinatensystem von OnyxCeph³ ausgerichtet, sondern können diesbezüglich beliebige andere Orientierungen im Raum aufweisen. Daher erfolgte zunächst eine möglichst exakte Ausrichtung an das Koordinatensystem von OnyxCeph³. In der Frontalebene wurde der Oberkiefer so ausgerichtet, dass der Kontaktpunkt der beiden mittleren Incisivi

genau auf der Mittellinie lag. In der Sagittalebene wurde der Oberkiefer anhand der vermuteten Okklusionsebene ausgerichtet. In der Transversalebene wurde der Oberkiefer anhand der Sutura palatina auf der Mittellinie ausgerichtet. Da sich bei der Ausrichtung in einer Ebene die Lage des Oberkiefers in anderen Ebenen verschiebt, wurden diese Anpassungsvorgänge iterativ durchgeführt, bis ein optisch ansprechendes Ergebnis erzielt wurde.

Anschließend wurde das digitale 3D-Modell mittels der in OnyxCeph³ integrierten Scan-Reparatur auf Scanfehler untersucht (ungültige Elemente identifizieren, Inseln entfernen, Löcher schließen, Brücken entfernen, Elementorientierung verbessern, Überschneidungen entfernen). Gefundene Fehler wurden automatisch behoben. Folgende Abbildung 10 zeigt die Aufsicht eines Oberkiefers nach Ausrichtung.

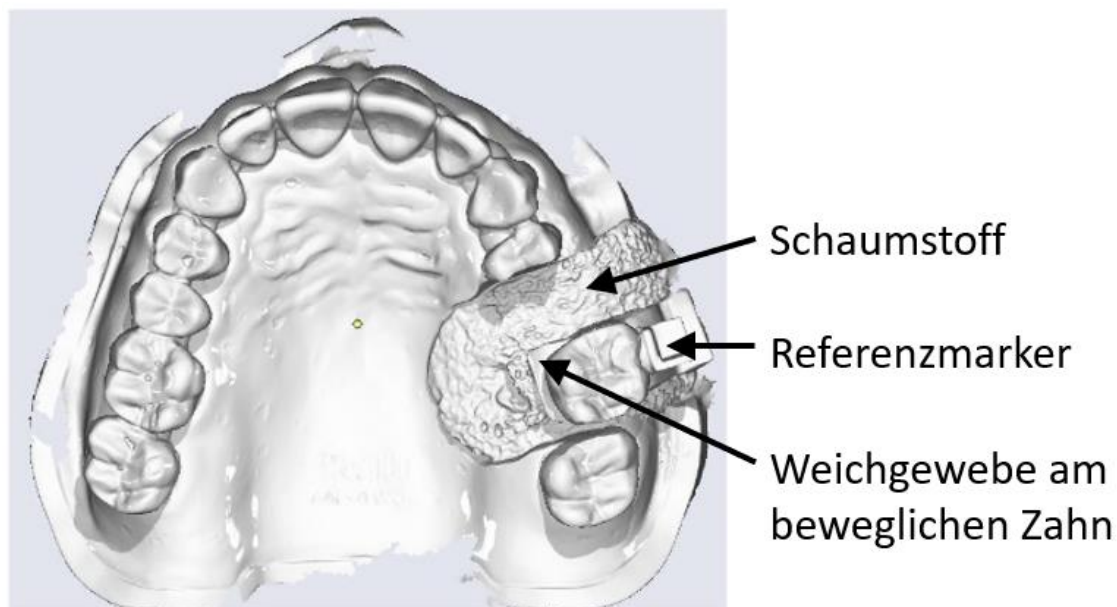


Abb. 10: Bild eines 6er-Modells nach Import und Ausrichtung

Hinsichtlich der später vorzunehmenden Segmentierung in Zahnhartgewebe und Weichgewebe trat das Problem auf, dass OnyxCeph³ den Schaumstoff, der zur Verbesserung des Scanergebnisses erforderlich war, als Weichgewebe interpretierte. Der Schaumstoff im Spalt wurde bei Positionsveränderungen des beweglichen Zahns verformt. Da später Überlagerungen anhand von Weichteilen vorgenommen wurden, hätte der Schaumstoff

solche Überlagerungen verfälscht. Aus diesem Grunde war es erforderlich, den Schaumstoff mit Hilfe der manuellen Scan-Reparatur auszuschneiden. Das gleiche galt für am bewegten Zahn haftende Weichgewebeteile. Weiter wurden die Bilder der Modelle zirkulär beschnitten, der gesamte Sockel entfernt und vom Gingiva-Rand um den Zahnkranz nur rund 5 mm belassen.

Zur Segmentierung in Zahnoberflächen und Weichteiloberflächen wurden den einzelnen Zähnen manuell die zutreffenden Zahnbezeichnungen zugeordnet. Anschließend segmentierte OnyxCeph³ automatisch die Zahnoberflächen von den Weichteiloberflächen am Übergang zwischen Zahnkrone und Weichgewebe. Diese Segmentierung musste stellenweise manuell nachgebessert werden. Der am bewegten Zahn befestigte Referenzmarker wurde gelegentlich von der Software teilweise als Weichgewebe klassifiziert. Manuell wurde der Referenzmarker komplett als zur Zahnoberfläche zugehörig markiert. Folgende Abbildung 11 zeigt ein Bild des 6er-Modells nach der Segmentierung.

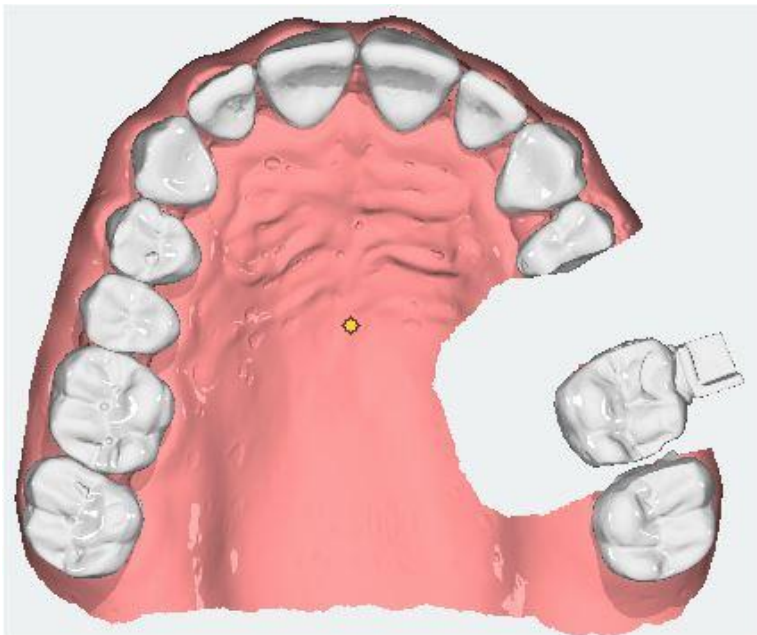


Abb. 11: Bild des 6er-Modells nach der Segmentierung

Die segmentierten, klar abgegrenzten Zahnoberflächen sind in Weiß, die Weichgeweboberflächen in rosa eingefärbt. Der Schaumstoff und das am bewegten Zahn anhaftende

Weichgewebe sind entfernt. Seitlich am separierten Zahn ist der Referenzmarker zu erkennen.

Der Befehl „Synthetische Wurzeln kurz“ vervollständigte die Zahnkronen automatisch mit Wurzeln. Hierzu ist anzumerken, dass diese Vervollständigung für unsere Zwecke eigentlich nicht notwendig aber vom Programmablauf bei OnyxCeph³ zwingend vorgeschrieben war. Der Befehl wirkt sich nur in der Optik aus, denn die Wurzeln werden von OnyxCeph³ später in den Überlagerungen nicht berücksichtigt.

Für die Überlagerung war die Segmentierung nur für eines der beiden überlagerten digitalen 3D-Modelle erforderlich. Das andere digitale 3D-Modell wurde unsegmentiert dem segmentierten überlagert.

2.1.8 Überlagerungen

Mit dem Tool „Inspect 3D“ von OnyxCeph³ können digitale 3D-Modelle paarweise überlagert werden. In dieser Arbeit wurden drei verschiedene Überlagerungsmethoden verwendet.

Überlagerungsmethode Maxilla an Maxilla

Für die Überlagerung werden die segmentierten Zahnoberflächen genutzt. Dabei besteht die Möglichkeit, einzelne segmentierte Zähne auszuschließen. Hiervon wurde für den jeweils bewegten Zahn Gebrauch gemacht. Diese Überlagerungsmethode wird in Anlehnung an die Bezeichnungen von OnyxCeph³ in vorliegender Arbeit kurz „Maxilla an Maxilla“ genannt.

Überlagerungsmethode Maxilla an Weichteile

Für die Überlagerung werden die Weichteiloberflächen in ihrer Gesamtheit genutzt. In vorliegender Arbeit wird diese Überlagerungsmethode kurz „Maxilla an Weichteile“ bezeichnet.

Überlagerungsmethode Maxilla an Maxilla verlässlich

Für die Überlagerung werden als verlässlich eingeschätzte Oberflächenbereiche genutzt, bei denen davon ausgegangen werden kann, dass diese unverändert bleiben. Hier verwendet wurden die Oberflächen der Rugae palatinae, die manuell markiert wurden. In vorliegender Arbeit wird diese Überlagerungsmethode kurz „Maxilla an Maxilla verlässlich“ benannt.

In folgender Abbildung 12 sind von OnyxCeph³ mit den drei unterschiedlichen Überlagerungsmethoden erstellte Überlagerungsbilder zum Vergleich der Zustände vor und nach einer Zahnbewegung nebeneinandergestellt.

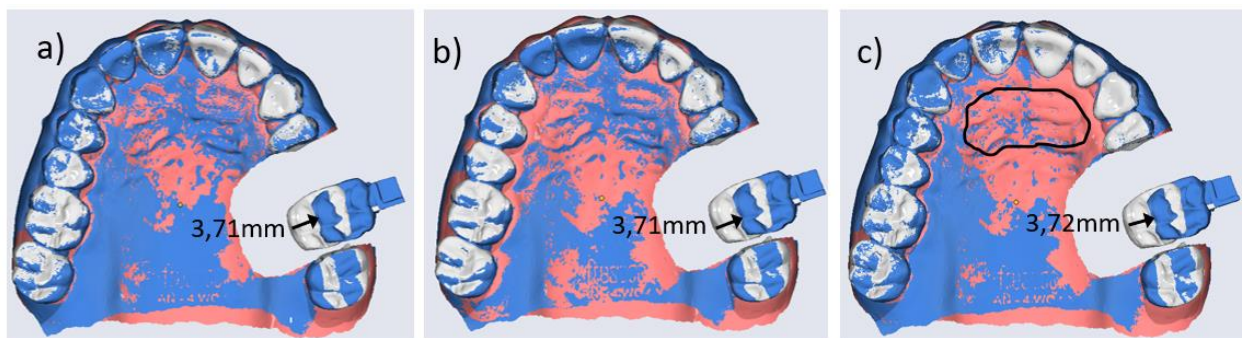


Abb. 12: Bilder von paarweisen Überlagerungen des 6er-Modells vor und nach einer Vestibulärbewegung von 4 mm des Zahnes 26 mit Überlagerungsmethode a) Maxilla an Maxilla, b) Maxilla an Weichteile, c) Maxilla an Maxilla verlässlich

In obiger Abbildung 12 ist einem segmentierten Modell mit beweglichem Zahn 26 in Neutralposition ein Modell überlagert worden, in welchem dieser Zahn 4 mm vestibulär bewegt worden ist. Das Bild des segmentierten Modells stellt die Zahnkronen in Weiß und das Weichgewebe in Rosa dar. Das Bild des überlagerten Modells ist blau eingefärbt. Die als verlässlich markierte Oberfläche der Rugae palatinae ist in c) schwarz umrahmt. Die Bilder für alle drei Überlagerungsmethoden zeigen, dass Zahn 26 aus seiner Neutralposition im segmentierten Modell im überlagerten Modell deutlich in vestibulärer Richtung bewegt worden ist. OnyxCeph³ gibt für die Translationsbewegung in vestibulärer Richtung folgende Werte an: a) 3,71 mm, b) 3,71 mm und c) 3,72 mm.

2.1.9 Auswertungstabellen

OnyxCeph³ erstellt für jede Überlagerung Auswertungstabellen, in denen die Zahnbewegungen für jeden einzelnen im Modell vorhandenen Zahn relativ zur Ausgangsposition aufgelistet werden. Die Tabellen enthalten für jeden Zahn Daten zu: Inklination +/- in °, Angulation +/- in °, Rotation +/- in °, Mesial +/- in mm, Vestibulär +/- in mm, Okklusal +/- in mm. Mit Mesial +/- ist dabei eine Translationsbewegung in mesialer Richtung (+) bzw. in gegenläufiger distaler Richtung (-) gemeint. Mit Angulation +/- ist dabei eine Rotationsbewegung in mesialer Richtung (+) bzw. in gegenläufiger distaler Richtung (-) gemeint. Andere Bewegungen sind entsprechend bezeichnet. Folgende Tabelle 5 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt aus einer solchen Auswertungstabelle.

Tab. 5: Ausschnitt aus einer Auswertungstabelle von OnyxCeph³

Maxilla									
Zahn		17	16	15	14	...	26	27	
Inklination +/- in °		-0,1	-0,2	-0,3	-0,2		-0,1	-0,1	
Angulation +/- in °		0,1	0,1	-0,1			-0,1	-0,2	
Rotation +/- in °		0,1		0,2	0,2		0,2	0,2	
Mesial +/- in mm		-0,02	-0,02	-0,01			1,11		
Vestibulär +/- in mm		-0,04	-0,02	-0,01			3,72	-0,06	
Okklusal +/- in mm		-0,01	-0,01		0,01		0,87	-0,02	

Die Tabelle 5 zeigt einen Ausschnitt aus einer Auswertungstabelle von OnyxCeph³. Im Original weist die erste Zeile vollständig alle im digitalen 3D-Modell vorhandenen Zähne des Oberkiefers auf. In obiger Darstellung sind der Übersichtlichkeit halber die Spalten für die Zähne 13 bis 25 weggelassen worden. Der Zahn 18 ist nicht aufgelistet (leere Spalte), da er im Modell nicht vorhanden ist. Die erste Spalte der Tabelle gibt die Bewegungsrichtungen an. Für jeden vorhandenen Zahn werden die festgestellten Bewegungen protokolliert. Rotationsbewegungen vom Absolutbetrag kleiner als 0,1 ° und Translationsbewegungen vom Absolutbetrag kleiner als 0,01 mm werden in der Tabelle als Leerzelle dargestellt (z.B. bei Zahn 16 für Rotation). Die obenstehende Tabelle gibt die mit OnyxCeph³ erhaltenen Ergebnisse für Zahn 26 bei Vorgabe einer Vestibulärtranslation von 4 mm wieder. Die Tabelle gibt in dieser Richtung einen ermittelten Wert von 3,72 mm an. Sie weist aber auch nicht vorgegebene Bewegungen dieses Zahns in andere Richtungen aus (Rotationsbewegungen von maximal 0,2 °, Translationsbewegungen von maximal 1,11 mm).

Alle anderen Zähne können sich wegen des Versuchsaufbaus nicht bewegt haben. Die Tabelle weist für diese nicht bewegten Zähne jedoch geringe Bewegungen auf.

2.1.10 Statistische Methoden

In dieser Arbeit wurden vorgegebene Bewegungen mit den durch OnyxCeph³ ermittelten Bewegungen verglichen. Dies wurde für jede der drei oben genannten Überlagerungsmethoden durchgeführt. Die so erhaltenen Werte wurden rechnerisch, statistisch und grafisch ausgewertet.

Die Daten der im experimentellen Abschnitt von OnyxCeph³ für jedes Überlagerungspaar ermittelten Auswertungstabellen wurden in eine Exceltabelle exportiert. Diese Tabelle enthält demnach für alle Modelle (6er-, 5er- und 2er-Modell), für jede durchgeführte Bewegung und für jede verwendete Überlagerungsmethode die jeweils erzielten Werte. Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse wurden beim 5er-Modell für einige vorgegebene Bewegungen (Palatinal, Intrusion, Angulation) jeweils fünf Wiederholungen durchgeführt und ebenfalls in die Exceltabelle exportiert. Für das 6er-, 5er- und 2er-Modell liegen Daten für 70 Zahnbewegungen vor, aus den Wiederholungsversuchen mit dem 5er-Modell liegen weitere Daten für 30 Zahnbewegungen vor. Jede dieser 100 Zahnbewegungen wurde mit jeder der drei Überlagerungsmethoden untersucht, somit liegen für die Auswertungen 300 Daten vor. Gelegentlich auftretende Leerzellen (Rotationsbewegungen vom Absolutbetrag kleiner als $0,1^\circ$ und Translationen vom Absolutbetrag kleiner als $0,01\text{ mm}$) wurden für statistische Auswertungen mit den Werten $0,0^\circ$ bzw. $0,00\text{ mm}$ belegt. Alle von OnyxCeph³ ermittelten Werte sind mit Nachkommastellen entsprechend der Messgenauigkeit von OnyxCeph³ ausgewiesen (Translationen zwei Nachkommastellen, Rotationsbewegungen eine Nachkommastelle). Alle berechneten Werte sollten mit einer Nachkommastelle mehr ausgewiesen werden, damit beim Runden keine Verzerrungen auftreten. Z.B. sollte der Mittelwert von 1 und 2 richtigerweise als 1,5 ausgewiesen werden und nicht aufgerundet als 2 erscheinen. Bei Berechnungen für Translationen sind somit drei Nachkommastellen, bei Rotationsbewegungen eigentlich nur zwei erforderlich. Im Hinblick auf ein einheitliches Erscheinungsbild werden jedoch auch bei Berechnungen für Rotationsbewegungen drei Nachkommastellen angegeben. Die so erstellte Exceltabelle liegt allen weiteren vorgenommenen Auswertungen zugrunde.

Bei vorgegebenen Translationsbewegungen längs einer vorgegebenen Koordinatenachse (Hauptbewegung) weist OnyxCeph³ stets auch kleinere Translationen längs der anderen Koordinatenachsen auf (Nebenbewegungen). Die Ursache für diese Nebenbewegungen wird in der Diskussion eingehend besprochen (siehe Abschnitt 4.1.1). Durch die Nebenbewegungen in andere als die vorgegebene Richtung fällt die Hauptbewegung kleiner aus. Für den Vergleich zwischen vorgegebenen Translationsbewegungen und mit OnyxCeph³ ermittelten Werten wurde zur Berücksichtigung der Nebenbewegungen die Gesamttranslation herangezogen. Die Gesamttranslation wird als Wurzel aus der Summe der quadrierten Haupt- und Nebenbewegungen definiert.

Für die Auswertungen der Daten im experimentellen Abschnitt wurden gängige, als Standard anzusehende statistische Methoden angewendet: arithmetische Mittelwerte, Stichprobenstandardabweichungen, Bestimmtheitsmaße sowie Ortsverschiebungen (location-shift), Maßstabsänderungen (scale-shift) und Konkordanz-Korrelationskoeffizienten nach Lin (Hilgers et al., 2018; Koch und Spörl, 2007). Für grafische Auswertungen wurden Balkendiagramme und Streudiagramme mit linearen Regressionsgeraden verwendet.

2.2 Material und Methoden für den klinischen Abschnitt

Im klinischen Abschnitt wurden in digitaler Form vorliegende Patientendaten zu Anfangs-, Zwischen- und Endzuständen bei kieferorthopädischen Behandlungen verwendet. Es wurden - wie im experimentellen Abschnitt – paarweise Überlagerungen mit OnyxCeph³ durchgeführt und ausgewertet.

2.2.1 Verwendete Patientendaten

Die im klinischen Abschnitt verwendeten Datensätze von digitalen 3D-Modellen des Oberkiefers wurden von der Poliklinik für Kieferorthopädie am Universitätsklinikum Bonn zur Verfügung gestellt. Fast allen diesen digitalen 3D-Modellen lagen physische Modelle der Oberkiefer von Patienten zugrunde. Diese wurden ursprünglich im Rahmen kieferorthopädischer Behandlungen als Alginatabdruck genommen und in Gips ausgegossen. Aus diesen Gipsmodellen wurden mit einem extraoralen 3D-Modellscanner des Typs S 600 Arti (Zirkonzahn GmbH, Gais (BZ), Italien), digitale 3D-Modelle erzeugt und in der KFO-

Bonn-Datenbank gespeichert. Einige digitale 3D-Modelle wurden direkt mit dem intraoralen Scanner TRIOS erstellt. Diese Daten sind im Zeitraum von 2003 bis 2021 entstanden. Zum Zeitpunkt der Entstehung dieser Arbeit lagen digitale 3D-Modelle der Oberkiefer von circa 150 Patienten vor.

Von diesen vorliegenden digitalen 3D-Modellen konnten jedoch nicht alle für Zwecke dieser Arbeit verwendet werden. Bei der Auswahl der in diese Untersuchung einbezogenen digitalen 3D-Modelle wurden folgende Einschluss- und Ausschlusskriterien verwendet: Es wurden nur Modelle des Oberkiefers nach Abschluss der zweiten Wechselgebissphase berücksichtigt. In einem Wechselgebiss vereiteln anfangs noch vorhandene Milchzähne oder Zahnlücken, die später nicht mehr vorhanden sind, eine sinnvolle Überlagerung. Es wurde weder nach der Art der kieferorthopädischen Behandlung selektiert (Multiband-, Aligner-, Aktivatortherapie etc.), noch wurden Modelle mit Multibandbrackets oder Retainern ausgeschlossen, weil es sich hierbei um gängige und häufig angewandte Behandlungsmethoden handelt. Aussortiert werden mussten Modelle, die für die Zwecke dieser Arbeit wegen qualitativ minderwertiger Alginatabformungen, unsauberer Gipsausgüsse mit Blasen oder Gipsperlen etc. erkennbar unzureichend waren. Aussortiert wurden auch Modelle mit großen Lücken in der Modelloberfläche des Scans, da in diesen Fällen von vorneherein Probleme bei der Überlagerung zu erwarten sind. Waren während der kieferorthopädischen Behandlung erkennbar größere konservierende bzw. prothetische Versorgungen oder Zahnextraktionen durchgeführt worden, liefert OnyxCeph³ keine sinnvollen Ergebnisse beim paarweisen Vergleich von dem Modell vor und nach diesen Maßnahmen, daher wurden diese Modelle ebenfalls aussortiert.

Bei einigen Patienten waren bei den digitalen 3D-Modellen Behandlungsfortschritte über mehrere Zwischenstadien vom Anfangs- bis zum Endzustand dokumentiert worden. In diesen Fällen wurden nicht nur paarweise Vergleiche von Anfangs- und Endzustand, sondern auch paarweise Vergleiche hinsichtlich verschiedener Zwischenstadien durchgeführt. Dadurch erhöhte sich die Anzahl der möglichen paarweisen Vergleiche.

Im Nachhinein hat sich für einige wenige der so ausgewählten Modelle bei den OnyxCeph³ Auswertungen herausgestellt, dass OnyxCeph³ keine sinnvolle Überlagerung

liefern konnte. Es handelte sich um Fälle, bei denen erst dann festgestellt worden ist, dass die Rugae palatina doch nicht hinreichend gut abgeformt oder ausgegossen worden war, bei denen in paarweise überlagerten Modellen die Zahnanzahl ungleich war (z.B. Zahn für kieferorthopädische Behandlung extrahiert, Weisheitszahn während kieferorthopädischer Behandlung durchgebrochen) oder bei denen sehr große Zahnbewegungen vorlagen. Im Endeffekt verblieben so rund 100 geeignet erscheinende digitale 3D-Modelle, die für weitere Auswertungen genutzt werden konnten.

2.2.2 Aufbereitung und Verarbeitung der Patientendaten

Die Vorbereitungsarbeiten bei den klinischen digitalen 3D-Modellen erfolgten – soweit erforderlich - wie im experimentellen Abschnitt (Datenübernahme, manuelle Anpassungen der Darstellungsebenen, Scanreparatur, Ausrichtung, zirkuläres Beschneiden, Zuordnung manueller Zahnbezeichnungen, Segmentierung). Die manuelle Nachbesserung der Segmentierung war hier aufwendiger als im experimentellen Abschnitt. Die den digitalen 3D-Modellen zugrundeliegenden, für klinische Zwecke erstellten Alginatabdrücke und die daraus resultierenden Gipsmodelle waren größtenteils nicht so sorgfältig gearbeitet, wie die im experimentellen Abschnitt unter Laborbedingungen selbst erstellten Modelle.

Es wurden die gleichen Überlagerungsmethoden wie im experimentellen Abschnitt eingesetzt. Allerdings gibt es einen erheblichen Unterschied hinsichtlich der bei der Überlagerung verwendeten digitalen 3D-Modelle. Bei allen Modellen des Oberkiefers im experimentellen Abschnitt war durch den Versuchsaufbau vorgegeben, dass nur ein Zahn bewegt wird, hingegen alle anderen Zähne und auch das Weichgewebe unbewegt bleiben. Im Gegensatz dazu ist bei den Oberkiefern im klinischen Abschnitt alles mehr oder weniger in Bewegung und damit haben die digitalen 3D-Modelle vor und nach der kieferorthopädischen Behandlung typischerweise keine nicht bewegten unveränderten Bereiche. Da das kieferorthopädische Ziel zumeist eine Ausformung des Zahnkranzes und Einstellen einer Normokklusion ist, werden nicht nur Zähne mit offensichtlichen Fehlstellungen bewegt, sondern die Zähne in ihrer Gesamtheit und somit auch das Weichgewebe verändert. Für die Überlagerungen wurden im klinischen Abschnitt den im experimentellen Abschnitt vergleichbaren Bereiche herangezogen.

Überlagerungsmethode Maxilla an Maxilla

Für die Überlagerung werden alle segmentierten Zahnoberflächen verwendet. Im Unterschied zum experimentellen Abschnitt wurde kein Zahn ausgeschlossen.

Überlagerungsmethode Maxilla an Weichteile

Für die Überlagerung werden alle Weichteiloberflächen in ihrer Gesamtheit genutzt, insofern besteht kein Unterschied zum experimentellen Abschnitt.

Überlagerungsmethode Maxilla an Maxilla verlässlich

Für die Überlagerung werden die Oberflächen der Rugae palatinae als verlässlicher Bereich manuell markiert (Garib et al., 2019), insofern besteht kein Unterschied zum experimentellen Abschnitt.

In der folgenden Abbildung 13 sind von OnyxCeph³ mit den drei unterschiedlichen Überlagerungsmethoden erstellte Überlagerungsbilder zum Vergleich der Zustände vor und nach einer kieferorthopädischen Behandlung nebeneinandergestellt.

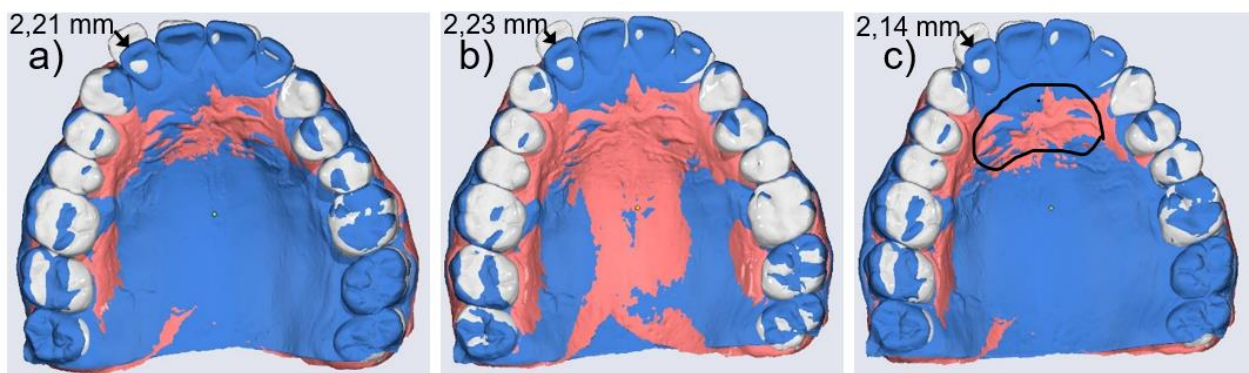


Abb. 13: Bilder von paarweisen Überlagerungen vor und nach einer kieferorthopädischen Behandlung mit Überlagerungsmethode a) Maxilla an Maxilla, b) Maxilla an Weichteile, c) Maxilla an Maxilla verlässlich

Die Farbwahl entspricht derjenigen von Abbildung 12 im experimentellen Abschnitt (segmentiertes Modell weiß und rosa, überlagertes Modell blau). Die als verlässlich markierte Oberfläche der Rugae palatinae ist in c) schwarz umrahmt. Für die deutlich sichtbare Bewegung des Zahnes 12 gibt OnyxCeph³ für die Translation in palatinaler Richtung folgende Werte an: a) 2,21 mm b) 2,23 mm c) 2,14 mm.

Bei rund 100 digitalen 3D-Modellen wurden repräsentativ für alle Zähne Bewegungen für Molar 26, für Prämolare 25 und für Incisivi 22 untersucht. Von den Bewegungsrichtungen wurden Translationen in alle drei Richtungen (mesial +/-, vestibulär +/- und okklusal +/-) und von den Rotationsbewegungen repräsentativ die Angulationen +/- ausgewertet. Dabei wurden jedes Mal alle drei Überlagerungsmethoden angewendet. Die so generierten 3600 Daten wurden in einer Exceltabelle für weitere Auswertungen zusammengestellt.

2.2.3 Statistische Methoden

Im Unterschied zum experimentellen Abschnitt ist es im klinischen Abschnitt nicht möglich, vorgegebene Bewegungen mit durch OnyxCeph³ ermittelten Bewegungen zu vergleichen. Es ist nur möglich von OnyxCeph³ für eine der Überlagerungsmethoden ermittelte Werte mit den für eine andere Überlagerungsmethode ermittelten Werten zu vergleichen. In dieser Arbeit wurde jede der drei oben genannten Überlagerungsmethoden paarweise mit jeder anderen verglichen. Somit ergaben sich Werte für den Vergleich von Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Weichteile, Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Maxilla verlässlich und Maxilla an Weichteile mit Maxilla an Maxilla verlässlich, die statistisch ausgewertet werden konnten.

Für die Auswertungen der Daten wurden im klinischen Abschnitt die gleichen rechnerischen Methoden und grafischen Auswertungen, wie im experimentellen Abschnitt, jedoch ergänzt um Bland-Altman-Diagramme verwendet.

3. Ergebnisse

Sowohl für den experimentellen Abschnitt als auch für den klinischen Abschnitt ist festzuhalten, dass bei mehrfach durchgeführten Überlagerungen von jeweils gleichen Modellpaaren mittels des Tools Inspect 3D unabhängig von der gewählten Überlagerungsmethode die jeweils generierten Auswertungstabellen – wenn auch nur sehr geringfügig – voneinander abwichen.

3.1 Ergebnisse des experimentellen Abschnitts

Es liegen Ergebnisse für Wiederholungsversuche zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und Ergebnisse von Messreihen zur Überprüfung der Güte der unterschiedlichen Überlagerungsmethoden vor. Die Messreihen liefern das Datenmaterial zur Beantwortung der eigentlichen Fragestellung im experimentellen Abschnitt, während die vorhergehenden Wiederholungsversuche Auskunft darüber geben sollten, ob die gewählte Vorgehensweise zur Beantwortung dieser Fragestellung hinreichend zuverlässig ist.

3.1.1 Ergebnisse der Wiederholungsversuche

Die Wiederholungsversuche liefern Informationen über die Reproduzierbarkeit des Versuchsaufbaus, die Güte des Scanvorgangs mit TRIOS und die Zuverlässigkeit der Auswertungen mit OnyxCeph³.

Zunächst werden die ermittelten Ergebnisse für vorgegebene Translationsbewegungen betrachtet.

Folgende Tabelle 6 weist beispielhaft für die Wiederholungsversuche beim 5er-Modell die bei einer Vorgabe für Palatinalbewegungen von 1 mm erhaltenen Gesamttranslationen aus. Die erhaltenen Ergebnisse wurden um Mittelwerte und Stichprobenstandardabweichungen ergänzt.

Tab. 6: Bei Wiederholungsversuchen im 5er-Modell mit Vorgabe 1 mm Palatinalbewegung für die Gesamttranslation erzielte Ergebnisse

Versuch	Gesamttranslation bei Vorgabe 1 mm palatinal			Mittelwert in mm	Stichproben- standard- abweichung in mm
	Maxilla an Maxilla in mm	Maxilla an Weichteile in mm	Maxilla an Maxilla verlässlich in mm		
0	0,997	1,004	0,996	0,999	0,004
1	1,114	1,192	1,129	1,145	0,041
2	0,945	0,932	0,960	0,946	0,014
3	1,000	1,027	0,999	1,009	0,016
4	0,899	0,878	0,912	0,896	0,017
5	0,900	0,868	0,923	0,897	0,028
Mittelwert in mm	0,976	0,983	0,987	* 0,982	
Stichprobenstandard- abweichung in mm	0,081	0,121	0,078		** 0,090

* Mittelwert bzw. ** Stichprobenstandardabweichung für alle Messungen

Die Tabelle 6 weist z.B. für den ersten Durchgang (Versuch 0) in der Spalte Maxilla an Maxilla den für eine vorgegebene Palatinalbewegung von 1 mm ermittelten Wert für die Gesamttranslation aus (hier 0,997 mm). Spaltenweise für die drei Überlagerungsmethoden (Maxilla an Maxilla, Maxilla an Weichteile, Maxilla an Maxilla verlässlich) und zeilenweise für die Versuche (0 bis 5) wurden arithmetische Mittelwerte und Stichprobenstandardabweichungen berechnet. Die Zellen rechts unten enthalten den arithmetischen Mittelwert beziehungsweise die Stichprobenstandardabweichung für sämtliche 18 Messungen. Die Tabelle weist unabhängig vom durchgeführten Versuch und unabhängig von der verwendeten Überlagerungsmethode nahe beim Vorgabewert von 1 mm liegende Werte auf (kleinster Wert 0,868 mm, größter Wert 1,192 mm). Die Werte für den jeweiligen Versuch liegen innerhalb des Versuchs jeweils näher beieinander (höchste Stichprobenstandardabweichung 0,041 mm), als die Werte über alle Versuche und Überlagerungsmethoden (Gesamtstichprobenstandardabweichung 0,090 mm).

In gleicher Weise wurden Tabellen für Palatinalbewegungen von 5 mm und Intrusionsbewegungen von 1 und 4 mm erstellt. Informationen aus den so entstandenen Tabellen sind in untenstehenden Balkendiagrammen (siehe Abbildungen 14 und 15) optisch dargestellt.

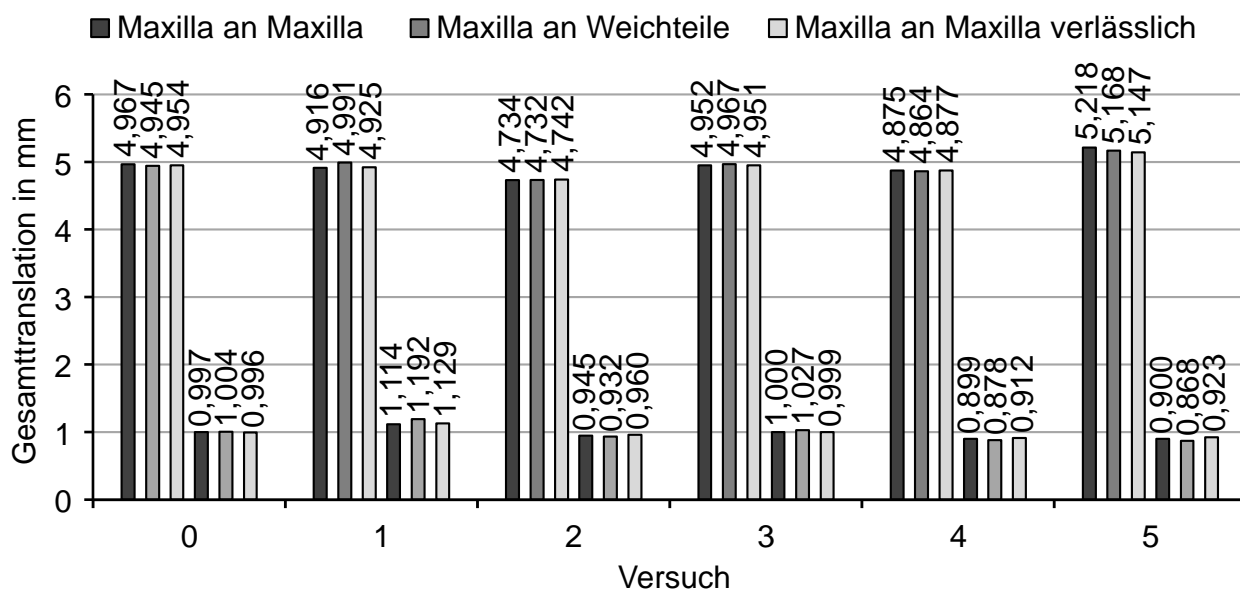


Abb. 14: Ergebnisse für Gesamttranslationen für vorgegebene Palatinalbewegungen von 5 bzw. 1 mm für sechsmalige Versuchsdurchführungen

Die Abbildung 14 zeigt die Ergebnisse für die Gesamttranslation, die bei fünfmaliger Wiederholung (1 – 5) eines Versuchs (0) bei vorgegebenen Palatinalbewegungen (1 oder 5 mm) jeweils erzielt wurden. Die beim jeweiligen Versuch erzielten Ergebnisse der jeweils drei angewandten verschiedenen Überlagerungsmethoden sind als Balken dargestellt. Oberhalb jedes Balkens steht die jeweils ermittelte Gesamttranslation. Schwarze Balken stehen für die Methode Maxilla an Maxilla, dunkelgraue Balken für die Methode Maxilla an Weichteile, hellgraue Balken für die Methode Maxilla an Maxilla verlässlich. Die jeweils vorgegebenen Bewegungen von 1 bzw. 5 mm führten zu nahe bei diesen Werten liegenden Gesamttranslationen (große Balken nahe bei 5 mm, kleine Balken nahe bei 1 mm). Innerhalb der jeweiligen Versuche weisen die Balken näher beieinander liegende Werte aus als über alle Versuche hinweg. Zum Beispiel ergaben sich bei einer Vorgabe von 5 mm bei Versuch 2 Werte von 4,734 mm; 4,732 mm und 4,742 mm; hingegen bei Versuch 5 Werte von 5,218 mm; 5,168 mm und 5,147 mm.

Ebenso wie Abbildung 14 ist die folgende Abbildung 15 für Intrusionsbewegungen entstanden.

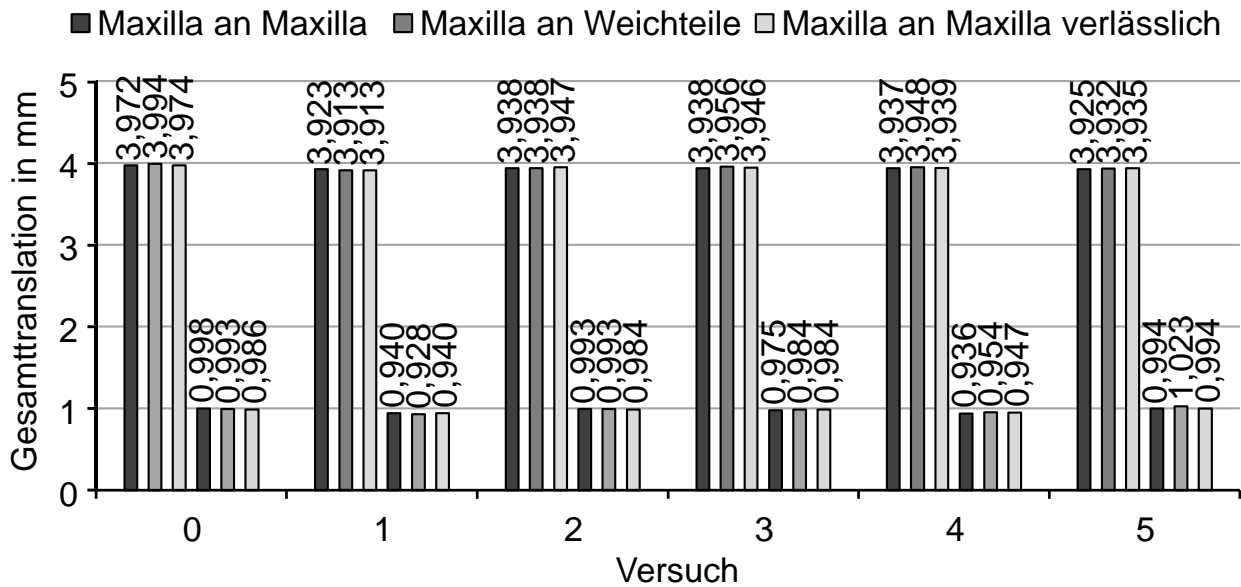


Abb. 15: Ergebnisse für Gesamttranslationen für vorgegebene Intrusionsbewegungen von 4 bzw. 1 mm für sechsmalige Versuchsdurchführungen

In Abbildung 15 sind die kleinen Abweichungen von den Vorgabewerten kaum zu sehen.

Bei Rotationsbewegungen zeigt beispielhaft folgende Tabelle 7 die erhaltenen Ergebnisse für Angulationen am 5er-Modell bei einer Vorgabe von 1 ° Angulation.

Tab. 7: Bei Wiederholungsversuchen im 5er-Modell mit Vorgabe 1 ° Angulation erzielte Ergebnisse für die Angulation

Versuch	Vorgabe 1° Angulation			Mittelwert in °	Stichprobenstandardabweichung in °
	Maxilla an Maxilla in °	Maxilla an Weichteile in °	Maxilla an Maxilla verlässlich in °		
0	1,0	1,0	1,0	1,000	0,000
1	0,8	0,8	0,8	0,800	0,000
2	1,0	1,2	1,1	1,100	0,100
3	1,0	1,1	1,1	1,067	0,058
4	1,0	0,9	1,0	0,967	0,058
5	0,9	0,8	0,8	0,833	0,058
Mittelwert in °	0,950	0,967	0,967	* 0,961	
Stichprobenstandardabweichung in °	0,084	0,163	0,137		** 0,124

* Mittelwert bzw. ** Stichprobenstandardabweichung für alle Messungen

Die Tabelle 7 weist z.B. für den ersten Durchgang (Versuch 0) in der Spalte Maxilla an Maxilla den für eine vorgegebene Angulation von 1° ermittelten Wert aus (hier $1,0^\circ$). Zeilenweise und spaltenweise werden arithmetische Mittelwerte und Stichprobenstandardabweichungen ausgewiesen. Die Zellen rechts unten enthalten den arithmetischen Mittelwert beziehungsweise die Stichprobenstandardabweichung für sämtliche 18 Messungen.

In gleicher Weise wurde eine Tabelle mit den Ergebnissen für vorgegebene Angulationen von 10° erstellt. Informationen aus beiden Tabellen sind in untenstehendem Balkendiagramm (Abbildung 16) optisch dargestellt.

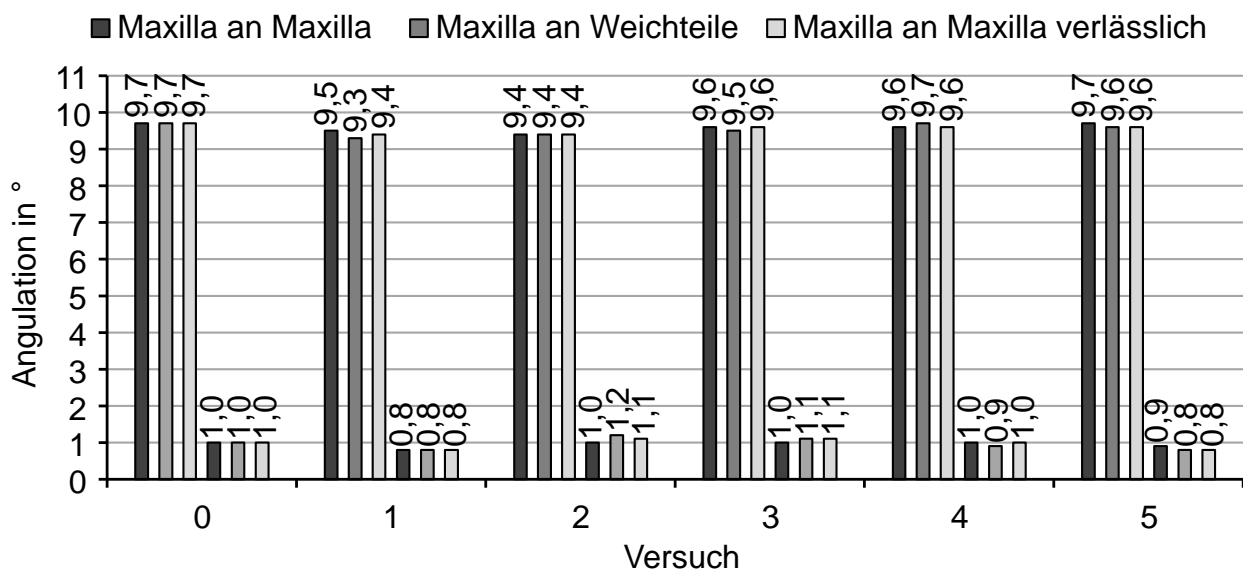


Abb. 16: Ergebnisse für die Angulation für vorgegebene Angulationsbewegungen von 10° bzw. 1° für sechsmalige Versuchsdurchführungen

Beschreibung siehe Abbildung 14, mit dem Unterschied, dass hier vorgegebene Angulationsbewegungen mit erzielten Angulationen verglichen werden. Wie bei Abbildung 14 weisen die Balken innerhalb der jeweiligen Versuche näher beieinander liegende Werte aus als über alle Versuche hinweg.

3.1.2 Ergebnisse zu Messreihen von Zahnbewegungen

Anhand des 6er-Modells wird beispielhaft dargestellt, wie mit OnyxCeph³ erhaltene Werte

zu Messreihen von Zahnbewegungen gewonnen wurden und dann rechnerisch und grafisch weiterverarbeitet wurden. Als erstes werden Ergebnisse bei vorgegebenen Translationsbewegungen betrachtet.

In folgender Tabelle 8 sind die von OnyxCeph³ ermittelten Ergebnisse für vorgegebene Mesialbewegungen, ergänzt um die jeweils berechnete Gesamttranslation, dargestellt.

Tab. 8: Ergebnisse bei vorgegebenen Mesialbewegungen für die Überlagerungsmethode Maxilla an Maxilla beim 6er-Modell

Vorgegebene Mesialbewegung in mm	Inklination +/- in °	Angulation +/- in °	Rotation +/- in °	Mesial +/- in mm	Vestibulär +/- in mm	Okkusal +/- in mm	Gesamttranslation in mm
1	* 0,0	-0,1	-0,1	0,77	-0,50	-0,11	0,925
2	-0,1	-0,1	-0,1	1,62	-1,03	-0,21	1,931
3	-0,2	-0,3	-0,3	2,44	-1,49	-0,27	2,872
4	-0,2	-0,1	-0,3	3,27	-2,00	-0,38	3,852
5	0,1	-0,1	-0,2	4,03	-2,54	-0,50	4,790

* Zelle ohne Messwert mit 0,0 belegt (Inklination kleiner als Messgenauigkeit von 0,1 °)

Die Tabelle 8 zeigt zeilenweise die beim 6er-Modell für vorgegebene Mesialbewegungen von 1, 2, 3, 4 und 5 mm mit OnyxCeph³ mit der Methode Maxilla an Maxilla erhaltenen Ergebnisse, ergänzt um die errechnete Gesamttranslation. Die mit * gekennzeichnete Zelle ist mit 0,0 belegt worden, da sie keinen Messwert enthielt (Inklination kleiner als Messgenauigkeit von 0,1 °, siehe Abschnitt 2.1.10). Bei jeder vorgegebenen Translationsbewegung in mesialer Richtung sind geringfügige Rotationsbewegungen knapp oberhalb der Messgenauigkeit festzustellen. Bei jeder vorgegebenen Translationsbewegung bleibt die ermittelte Bewegung in vorgegebene Richtung hinter der Vorgabe zurück, dafür sind Nebenbewegungen in nicht vorgegebene Translationsrichtungen ausgewiesen. Die aus Hauptbewegung und Nebenbewegungen errechneten Gesamttranslationen kommen den Vorgabewerten nahe.

Die folgende Abbildung 17 zeigt die in obiger Tabelle erhaltenen Werte für Translationen als Streudiagramm in einer Gesamtdarstellung.

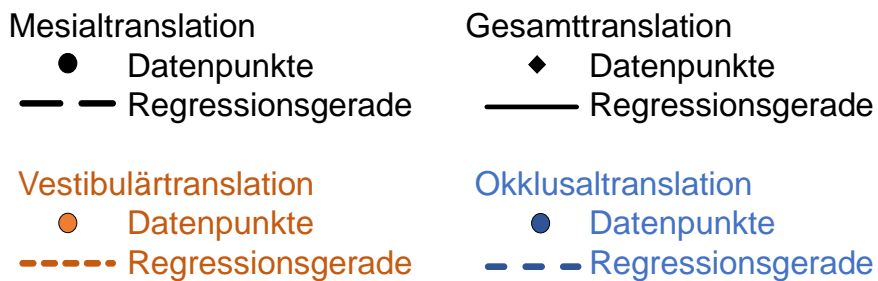
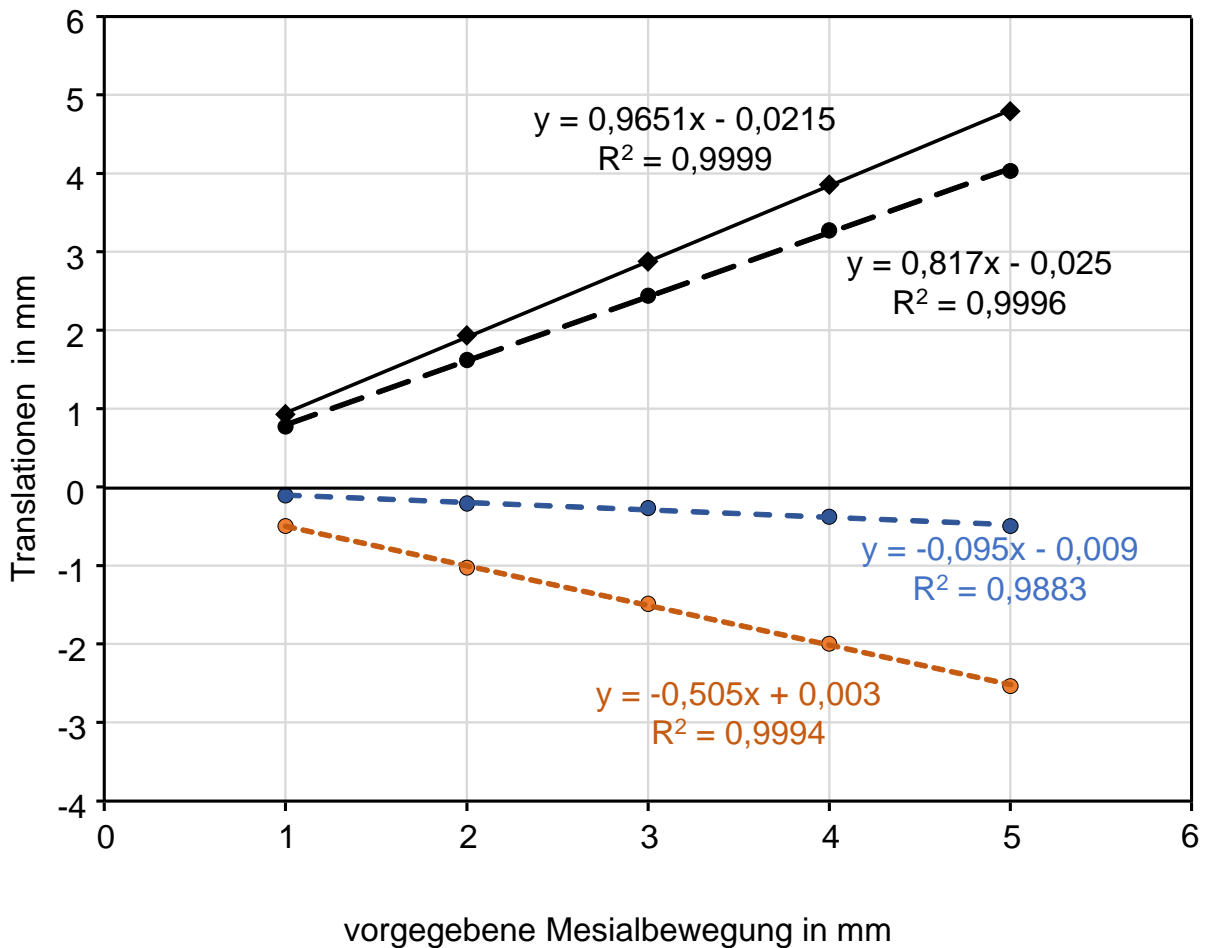


Abb. 17: Werte für Translationen über Wert für vorgegebene Mesialbewegung für das 6er-Modell für die Überlagerungsmethode Maxilla an Maxilla

In der Abbildung 17 sind die bei vorgegebenen Mesialbewegungen von 1, 2, 3, 4 und 5 mm mittels OnyxCeph³ am 6er-Modell mit der Überlagerungsmethode Maxilla an Maxilla erhaltenen Werte für Translationen in vorgegebener Richtung (Hauptbewegung) und nicht vorgegebene Richtungen (Nebenbewegungen) als Punkte dargestellt. Die Werte für

die jeweils errechnete Gesamttranslation sind als Rauten dargestellt. Weiter sind die jeweils entsprechenden linearen Regressionsgeraden mit Geradengleichung und Bestimmtheitsmaß ausgewiesen.

In der folgenden Abbildung 18 sind für das 6er-Modell die bei vorgegebenen Mesialbewegungen erhaltenen Gesamttranslationen jeweils einzeln für jede Überlagerungsmethode aufgezeichnet.

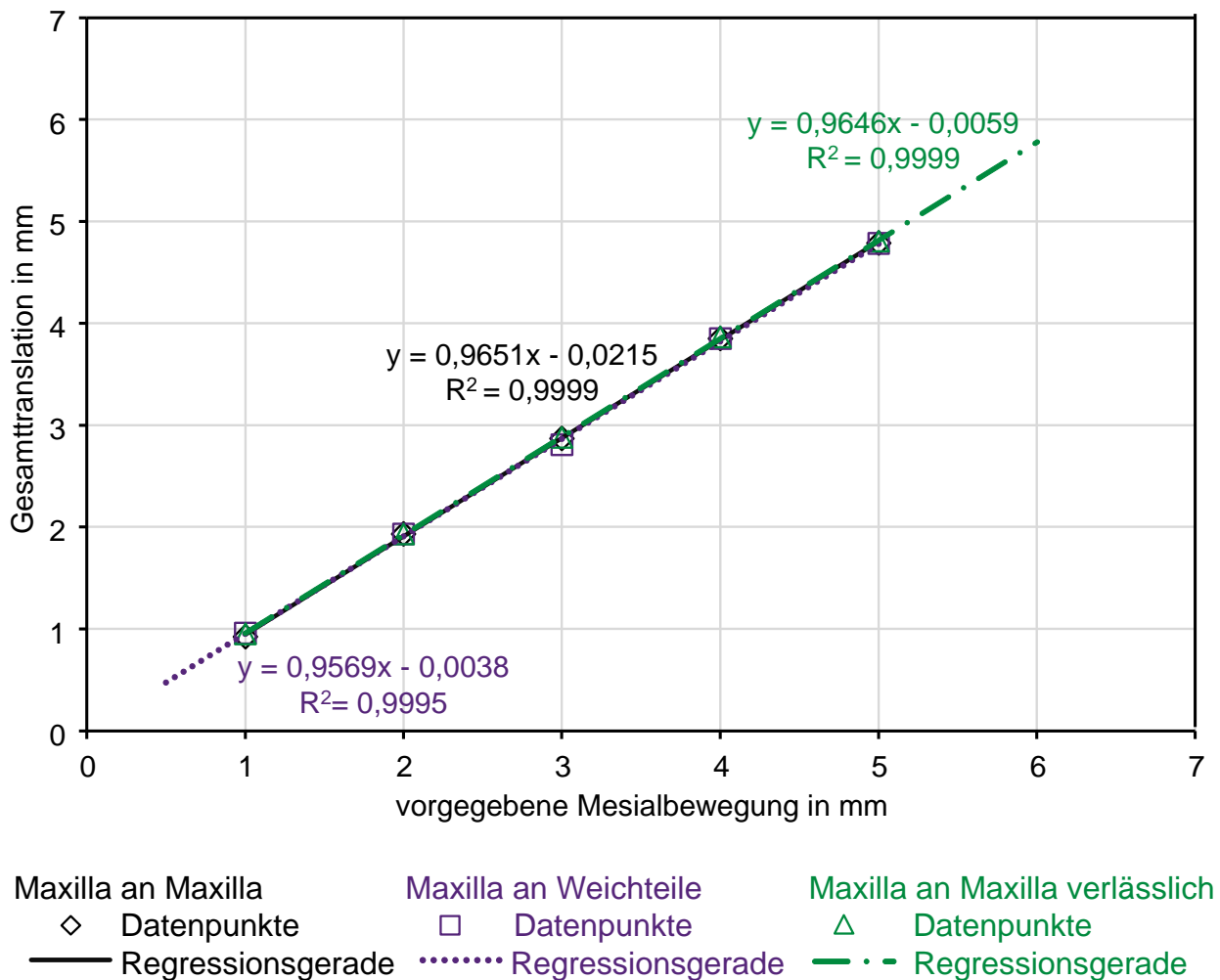


Abb. 18: Wert für Gesamttranslation über Wert für vorgegebene Mesialbewegung für das 6er-Modell für alle drei Überlagerungsmethoden

Diese Abbildung 18 enthält zu vorgegebenen Mesialbewegungen von 1, 2, 3, 4 und 5 mm die dazu jeweils erhaltenen Gesamttranslationen mit zugehörigen linearen Regressionsgeraden und dazugehörigen Regressionsgleichungen sowie Bestimmtheitsmaßen für alle

drei Überlagerungsmethoden. Alle Punkte und Geraden liegen so dicht beieinander, dass sie kaum voneinander unterschieden werden können. Um die Geraden unterscheiden zu können, ist die Regressionsgerade für die Überlagerungsmethode Maxilla an Weichteile über den Anfangspunkt hinaus verlängert worden, die Regressionsgerade für die Überlagerungsmethode Maxilla an Maxilla verlässlich über den Endpunkt hinaus verlängert worden und die Regressionsgerade für die Überlagerungsmethode Maxilla an Maxilla unverändert.

Ebenfalls beispielhaft anhand des 6er-Modells wird dargestellt, wie die mit OnyxCeph³ erzielten Ergebnisse für Angulationen rechnerisch und grafisch weiterverarbeitet werden.

Folgende Tabelle 9 zeigt die von OnyxCeph³ ermittelten Ergebnisse für vorgegebene Angulationen.

Tab. 9: Ergebnisse bei vorgegebenen Angulationen

Vorgegebene Angulation in °	Inklination +/- in °	Angulation +/- in °	Rotation +/- in °	Mesial +/- in mm	Vestibulär +/- in mm	Okklusal +/- in mm
1	* 0,0	1,0	0,2	0,26	-0,11	-0,06
2	-0,5	2,0	-0,1	0,81	-0,22	-0,13
5	-1,0	4,9	-0,3	2,10	-0,47	-0,29
10	-1,9	9,7	-0,3	4,15	-0,88	-0,75

* Zelle ohne Messwert mit 0,0 belegt (Inklination kleiner als Messgenauigkeit von 0,1 °)

Die Tabelle 9 zeigt für vorgegebene Angulationen von 1, 2, 5 und 10 ° erhaltene Ergebnisse mit OnyxCeph³ beim 6er-Modell mit der Methode Maxilla an Maxilla. Bei einer Vorgabe von 1 ° Angulation wurde für die dabei ermittelte Inklination eine leere Zelle angezeigt, d.h. diese Inklination muss vom Absolutbetrag kleiner als die Messgenauigkeit von 0,1 ° sein. Für statistische Auswertungen ist diese Leerzelle mit 0,0 ° belegt worden (markiert mit einem Stern).

Die folgende Abbildung 19 zeigt die in obiger Tabelle erhaltenen Werte für Angulationen als Streudiagramm in einer Gesamtdarstellung.

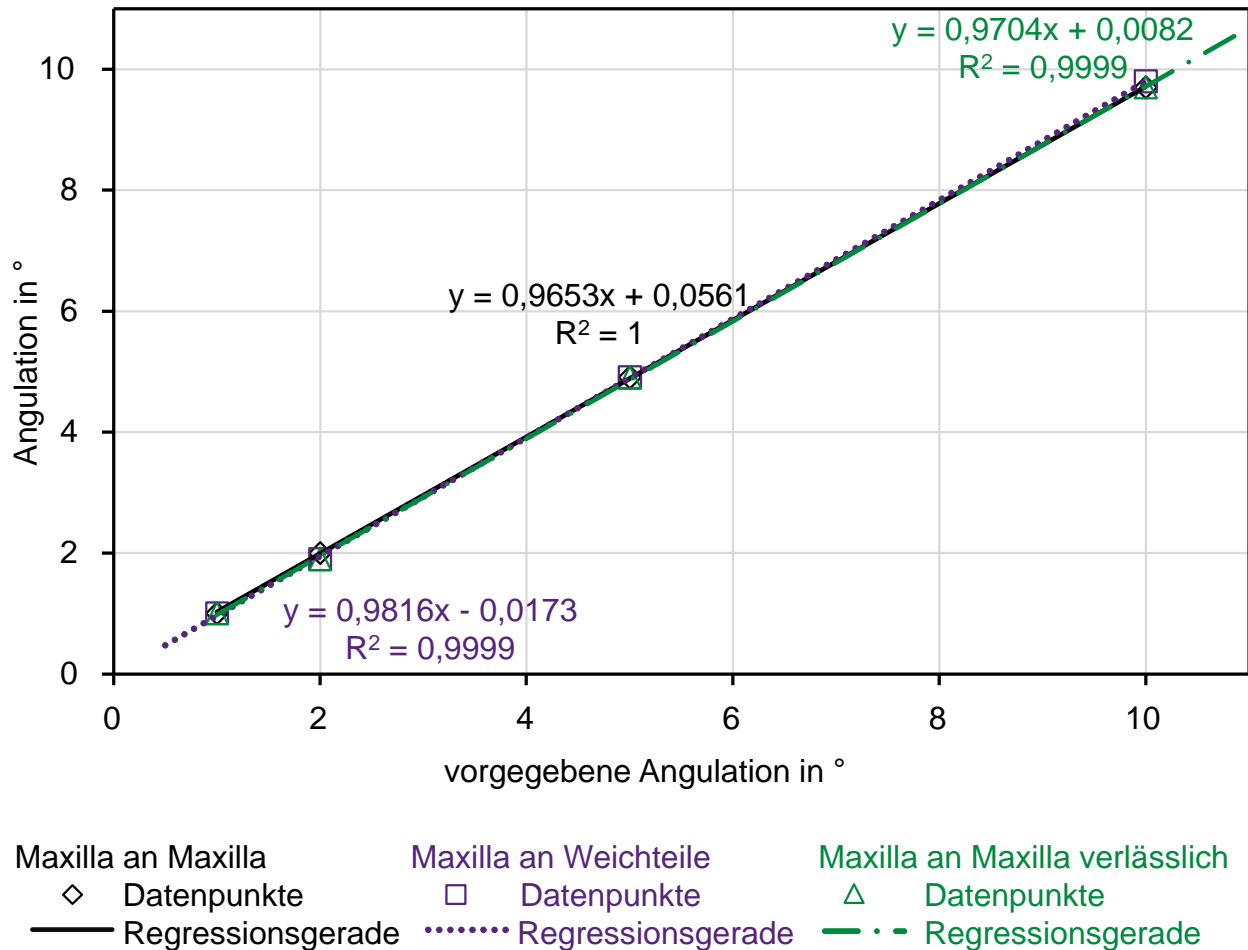


Abb. 19: Wert für Angulation über Wert für vorgegebene Angulation für das 6er-Modell für alle drei Überlagerungsmethoden

Erläuterungen wie Abbildung 18, mit dem Unterschied, dass Angulationen statt Translationen verglichen werden. Da es zu unübersichtlich werden würde, alle im experimentellen Abschnitt gewonnenen Ergebnisse mittels Streudiagrammen darzustellen, wird im Folgenden eine Gesamtübersicht in Form von Kennzahlen gegeben (Ortsverschiebungen, Maßstabsänderungen und Konkordanz-Korrelationskoeffizienten nach Lin).

Für das 6er-, 5er- und 2er-Modell sind für Translationen und Angulationen und die drei Überlagerungsmethoden die in folgender Tabelle 10 dargestellten Kennzahlen ermittelt worden. Insgesamt wurden dazu rund 200 Einzelergebnisse erhoben und verarbeitet.

Tab. 10: Kennzahlen für Messreihen zur Übereinstimmung der Ergebnisse von OnyxCeph³ mit jeweils vorgegebenen Bewegungen

Zahn	Bewegungsrichtung	vorgegebene Richtung Translation in mm / Angulation in °	Ortsverschiebung			Maßstabsänderung			Konkordanz-Korrelationskoeffizient		
			Maxilla an Maxilla	Maxilla an Weichteile	Maxilla an Maxilla verlässlich	Maxilla an Maxilla	Maxilla an Weichteile	Maxilla an Maxilla verlässlich	Maxilla an Maxilla	Maxilla an Weichteile	Maxilla an Maxilla verlässlich
26	Mesialtranslation	1, 2, 3, 4, 5	0,057	0,061	0,051	0,025	0,031	0,025	0,996	0,995	0,997
26	Palatinaltranslation	1, 3, 5	0,007	0,005	0,005	0,002	0,002	0,004	1,000	1,000	1,000
26	Vestibulärtranslation	2, 4, 5	-0,008	-0,015	-0,009	-0,014	-0,019	-0,017	0,999	0,999	0,999
26	Intrusionstranslation	1, 2, 4	0,007	-0,004	0,002	0,004	0,002	0,008	1,000	1,000	1,000
26	Extrusionstranslation	1, 2, 4	0,022	0,022	0,018	0,000	0,002	0,006	0,999	0,999	1,000
26	Mesialangulation	1, 2, 5, 10	0,018	0,018	0,022	0,025	0,013	0,021	0,999	0,999	0,999
26	Distal-angulation	1, 2, 5, 10	-0,058	-0,050	-0,050	0,038	0,042	0,042	0,995	0,996	0,996
25	Mesialtranslation	1, 2, 3, 4, 5	0,018	0,018	0,027	0,025	0,020	0,022	0,999	0,998	0,999
25	Palatinaltranslation	1, 3, 5	0,005	0,007	0,008	0,005	0,011	0,007	1,000	1,000	1,000
25	Vestibulärtranslation	** 2, 4, 6	0,216	0,236	0,144	0,237	0,256	0,157	0,873	0,855	0,945
25	Intrusionstranslation	1, 2, 4	0,009	0,005	0,010	0,005	-0,001	0,002	1,000	1,000	1,000
25	Extrusionstranslation	1, 2, 4	0,014	0,008	0,011	0,001	0,002	0,003	1,000	1,000	1,000
25	Mesialangulation	1, 2, 5, 10	0,015	0,019	0,019	0,025	0,022	0,022	0,999	0,999	0,999
25	Distal-angulation	1, 2, 5, 10	-0,032	-0,022	-0,022	0,042	0,033	0,033	0,997	0,998	0,998
22	Palatinaltranslation	1, 3, 5	-0,003	-0,004	-0,002	0,002	-0,029	0,002	1,000	1,000	1,000
22	Vestibulärtranslation	** 2, 4, 6	0,161	0,334	0,320	0,227	0,415	0,403	0,901	0,652	0,672
22	Intrusionstranslation	1, 2, 4	0,025	0,020	0,027	0,008	0,006	0,005	0,999	1,000	0,999
22	Extrusionstranslation	1, 2, 4	-0,002	-0,001	-0,002	0,010	0,005	0,005	1,000	1,000	1,000
22	Mesialangulation	* 1, 2, 4	0,175	0,162	0,175	-0,077	-0,065	-0,077	0,902	0,917	0,902
22	Distal-angulation	1, 2, 3	-0,048	-0,048	-0,072	0,036	0,036	0,033	0,996	0,996	0,990

* Vermutlich fehlerhafte Messreihe, ** Messreihen mit Vorgabewerten außerhalb des lt. Herstellerangaben zulässigen Bereiches (siehe untenstehende Erläuterungen)

Die Tabelle 10 weist z.B. in Zeile 1 aus, dass für das 6er-Modell für eine Messreihe mit vorgegebenen Mesialtranslationen von 1, 2, 3, 4 und 5 mm im Vergleich mit den zugehörigen Gesamttranslationen unter Verwendung der Überlagerungsmethode Maxilla an Maxilla eine Ortsverschiebung von 0,057, eine Maßstabsänderung von 0,025 und ein Konkordanz-Korrelationskoeffizient von 0,996 erzielt wurden. Für die anderen Überlagerungsmethoden sind in dieser Zeile entsprechende Kennzahlen angegeben. Für weitere aufgeführte Translationsbewegungen beim 6er-, 5er- und 2er-Modell sind dementsprechende Kennzahlen aufgelistet. Bei Angulationen wurden die Kennzahlen jeweils im Vergleich der vorgegebenen Angulation zur ermittelten Angulation berechnet. Bei der mit * gekennzeichneten Messreihe ist wahrscheinlich ein Fehler unterlaufen. Anstelle der Vorgabe von 2 ° war wohl versehentlich eine Vorgabe von nur 1 ° gemacht worden. Dies lässt sich im Nachhinein nicht mehr zweifelsfrei feststellen. Die Messreihe wurde daher beibehalten. Bei den mit ** gekennzeichneten beiden Messreihen wurden bewusst Translationen von 6 mm vorgegeben, obwohl laut Herstellerangaben OnyxCeph³ bei Translationen über 4 bis 5 mm an seine Grenzen stößt. Abgesehen von den mit * beziehungsweise ** gekennzeichneten Messreihen, ist für alle anderen Messreihen deutlich zu erkennen, dass gegenüber den vorgegebenen Bewegungen nur sehr geringe Ortsverschiebungen für Translationen (von -0,015 bis 0,061) bzw. für Angulationen (von -0,072 bis 0,022) und auch nur geringe Maßstabsänderungen für Translationen (von -0,029 bis 0,031) bzw. für Angulationen (von 0,013 bis 0,042) zu verzeichnen sind. Ebenso ergeben sich Konkordanz-Korrelationskoeffizienten sehr nahe bei 1 (für Translationen von 0,990 bis 1,000; für Angulationen von 0,995 bis 1,000).

3.2 Ergebnisse des klinischen Abschnitts

Den Auswertungen im klinischen Abschnitt liegen Daten zugrunde, die aus rund 100 digitalen 3D-Modellen für Molar 26, Prämolare 25 und Incisivi 22 für die jeweiligen Überlagerungsmethoden gewonnen worden sind. Diese Daten wurden für Auswertungen in einer Exceltabelle gesammelt. Um die drei verschiedenen Überlagerungsmethoden zu vergleichen, wurden für den paarweisen Vergleich jeweils die arithmetischen Mittelwerte der Dif-

ferenzen zweier Überlagerungsmethoden und 95 %-Konfidenzintervalle für die arithmetischen Mittelwerte der Differenzen errechnet. Diese sind in der folgenden Tabelle 11 aufgelistet.

Tab. 11: Arithmetische Mittelwerte und Konfidenzintervalle der Differenzen beim paarweisen Vergleich der drei Überlagerungsmethoden für die Zähne 26, 25 und 22 für alle untersuchten Bewegungen

Zahn	Bewegungsrichtung	Mittelwert der Differenzen in mm / °			95 % Konfidenzintervall der Differenzen in mm / °		
		Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Weichteile	Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Maxilla verlässlich	Maxilla an Weichteile mit Maxilla an Maxilla verlässlich	Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Weichteile	Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Maxilla verlässlich	Maxilla an Weichteile mit Maxilla an Maxilla verlässlich
26	mesial	-0,031	-0,037	-0,006	[-0,036; -0,025]	[-0,040; -0,033]	[-0,011; -0,001]
26	vestibulär	-0,014	0,013	0,028	[-0,017; -0,012]	[0,012; 0,015]	[0,026; 0,029]
26	okklusal	-0,067	-0,092	-0,026	[-0,072; -0,061]	[-0,097; -0,088]	[-0,029; -0,022]
26	angulation	-0,133	-0,009	0,124	[-0,143; -0,123]	[-0,021; 0,003]	[0,113; 0,134]
25	mesial	-0,086	-0,024	0,062	[-0,092; -0,079]	[-0,027; -0,020]	[0,057; 0,068]
25	vestibulär	0,017	0,009	-0,008	[0,015; 0,019]	[0,008; 0,010]	[-0,010; -0,006]
25	okklusal	-0,049	-0,088	-0,040	[-0,053; -0,044]	[-0,092; -0,085]	[-0,043; -0,036]
25	angulation	-0,105	0,063	0,168	[-0,121; -0,089]	[0,042; 0,084]	[0,147; 0,189]
22	mesial	-0,051	-0,025	0,026	[-0,054; -0,047]	[-0,028; -0,022]	[0,022; 0,030]
22	vestibulär	0,021	0,013	-0,009	[0,019; 0,024]	[0,011; 0,015]	[-0,011; -0,006]
22	okklusal	0,028	-0,023	-0,051	[0,025; 0,030]	[-0,025; -0,021]	[-0,054; -0,048]
22	angulation	-0,201	-0,227	-0,026	[-0,217; -0,185]	[-0,246; -0,207]	[-0,040; -0,011]

Für Zahn 26 ergibt sich in mesialer Bewegungsrichtung beim Methodenvergleich Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Weichteile als arithmetisches Mittel für alle Differenzen ein Wert von -0,031 mm mit zugehörigem 95 %-Konfidenzintervall von [-0,036 mm; -0,025 mm]. Für alle aufgeführten Zähne, Bewegungsrichtungen und paarweisen Vergleiche von Überlagerungsmethoden sind entsprechende Werte angegeben. Durchweg sind nur kleine Differenzen und kleine Spannweiten bei den zugehörigen Konfidenzintervallen zu verzeichnen.

Für weitere paarweise Vergleiche der Überlagerungsmethoden werden im Folgenden Streudiagramme herangezogen. In untenstehender Abbildung 20 sind die jeweils erhaltenen Werte aus OnyxCeph³ für den paarweisen Vergleich Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Weichteile in einem Streudiagramm dargestellt.

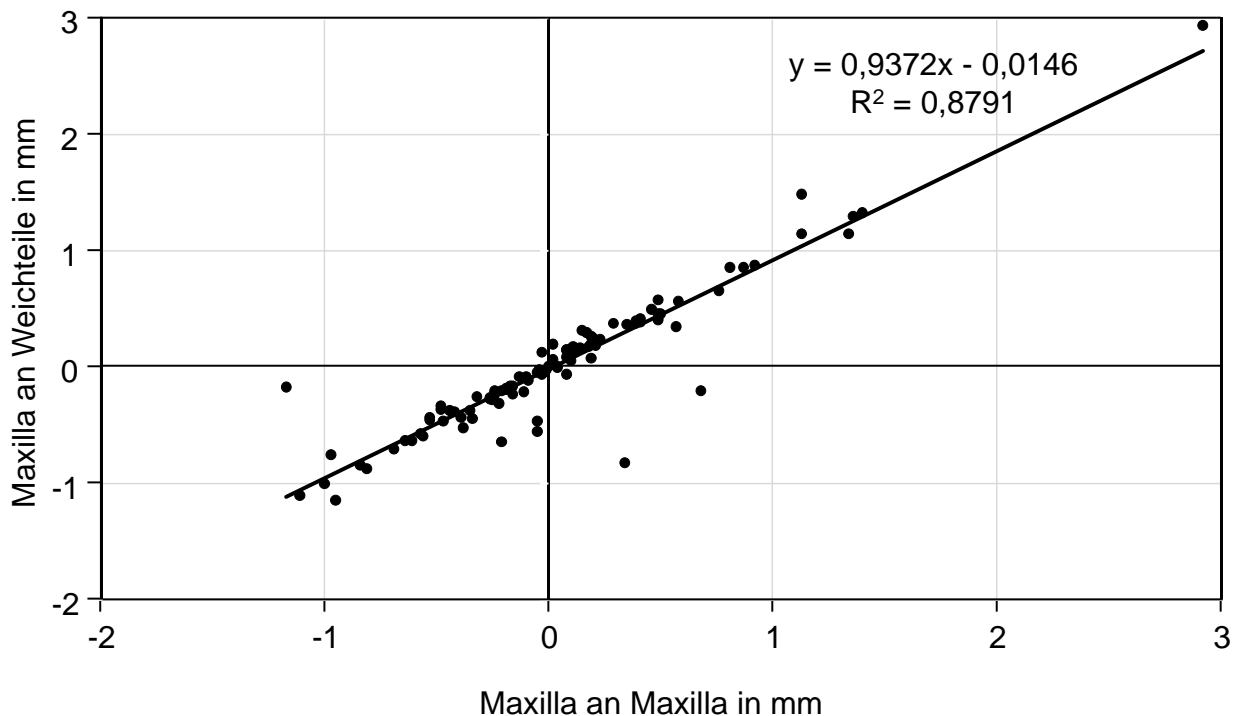


Abb. 20: Streudiagramm für Werte von Maxilla an Weichteile über Werte von Maxilla an Maxilla für Zahn 25 für Vestibulärbewegungen

In Abbildung 20 ist für jede der vorliegenden Vestibulärbewegungen des Zahnes 25 jeweils ein Punkt mit dem erhaltenen Wert nach der Methode Maxilla an Maxilla als x-Koordinate und mit dem erhaltenen Wert nach der Methode Maxilla an Weichteile auf der y-Koordinate aufgetragen, ergänzt um die lineare Regressionsgerade mit zugehöriger Geradengleichung und Bestimmtheitsmaß. Die meisten Wertepaare haben nahe beieinander liegende x- und y-Koordinaten, so dass sich ihnen die lineare Regressionsgerade gut anpasst.

Nach obigem Muster sind zwei weitere Streudiagramme für die Vestibulärbewegung von Zahn 25 für die Überlagerungsmethoden Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Maxilla verlässlich und Maxilla an Weichteile mit Maxilla an Maxilla verlässlich gefertigt und dann alle

drei Streudiagramme in einer Gesamtdarstellung in Abbildung 21 zusammengefasst worden.

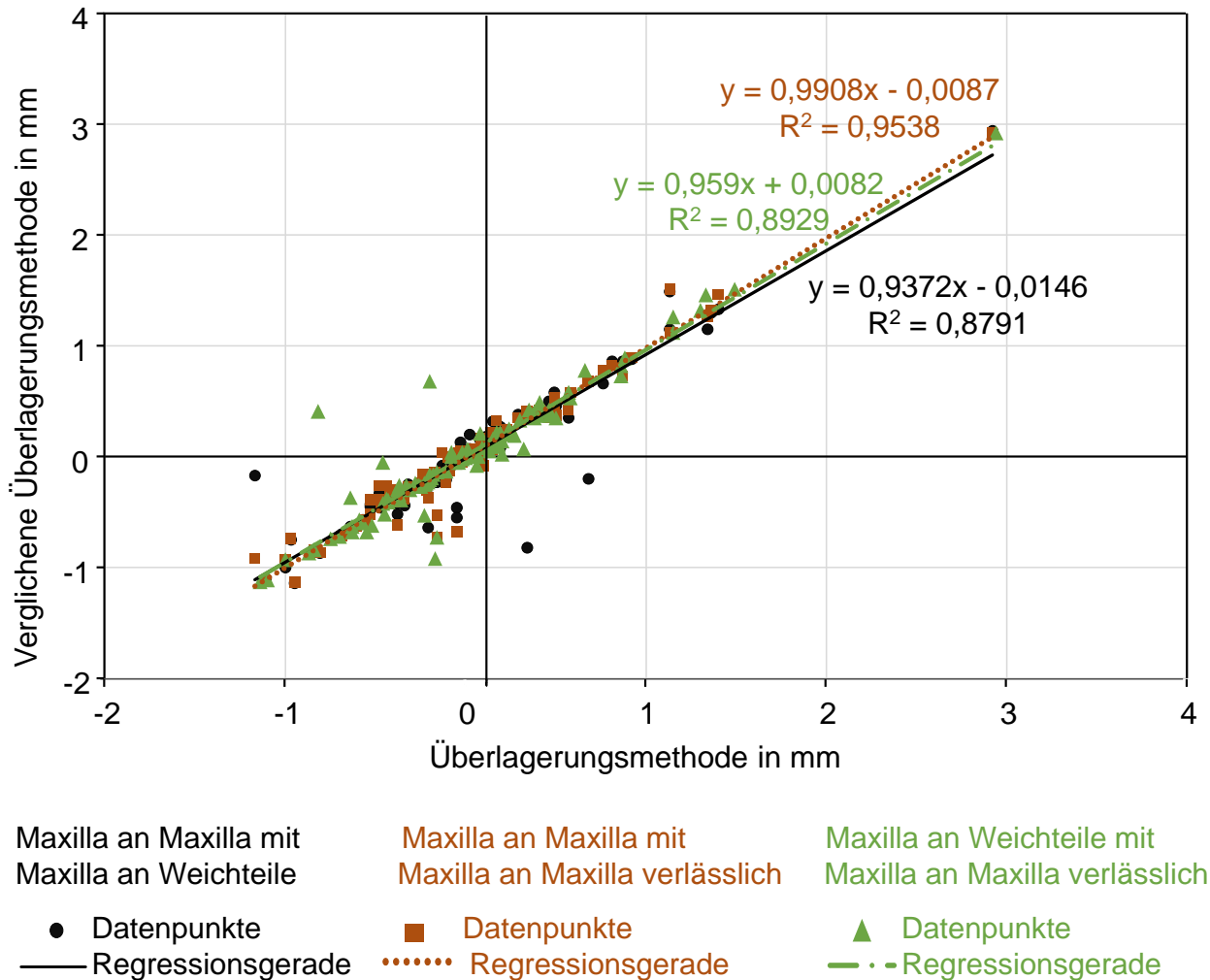
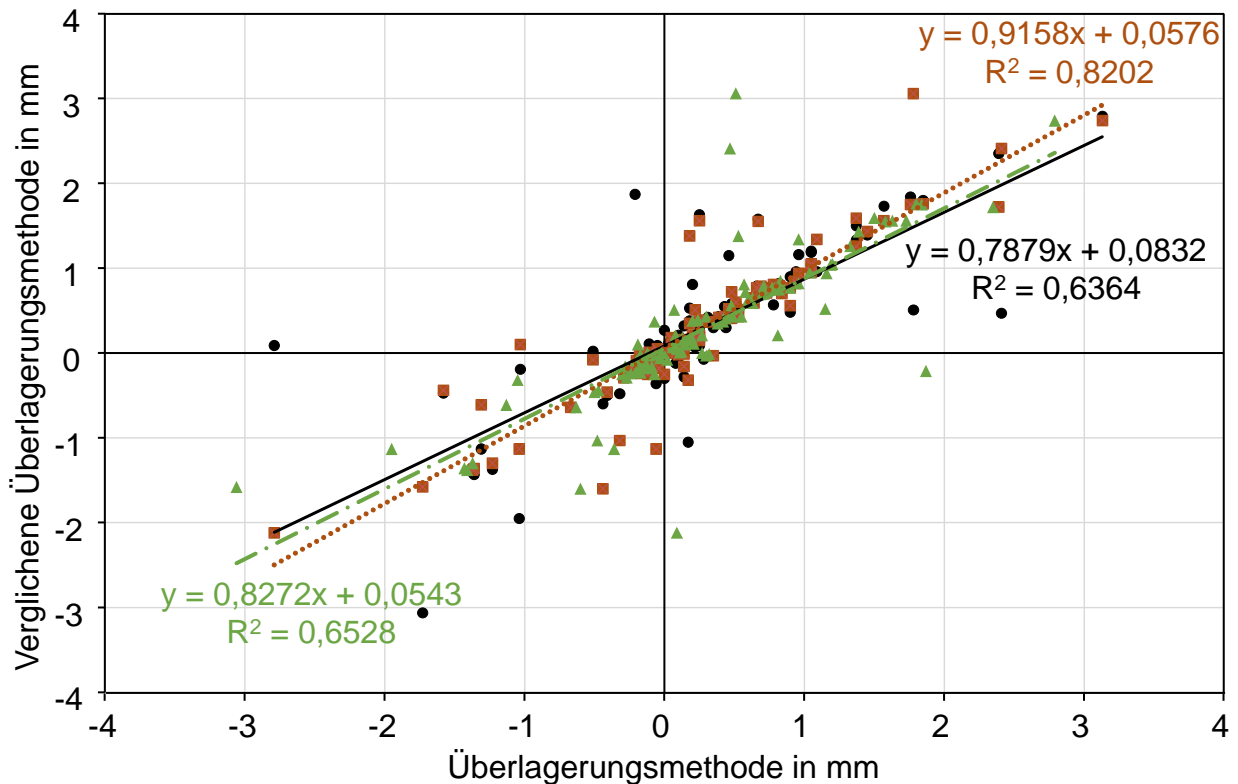


Abb. 21: Streudiagramme für Werte einer Überlagerungsmethode über Werte einer anderen Überlagerungsmethode für alle drei Überlagerungsmethoden für Zahn 25 für Vestibulärbewegungen

Die Abbildung 21 zeigt die für die jeweiligen paarweisen Vergleiche jeweils ermittelten Datenpunkte mit zugehöriger linearer Regressionsgerade sowie Regressionsgleichung und Bestimmtheitsmaß. Es ist zu erkennen, dass unabhängig von der gewählten Überlagerungsmethode sich gut angepasste lineare Regressionsgeraden, die zudem noch nahe beieinander liegen, bestimmen lassen.

In der gleichen Weise sind untenstehende Abbildungen für Mesialbewegungen von Zahn 26 (siehe Abbildung 22), für Okklusalbewegungen von Zahn 22 (siehe Abbildung 23) und für Angulationen von Zahn 25 (siehe Abbildung 24) erstellt worden.



Maxilla an Maxilla mit
Maxilla an Weichteile

Maxilla an Maxilla mit
Maxilla an Maxilla verlässlich

Maxilla an Weichteile mit
Maxilla an Maxilla verlässlich

● Datenpunkte

■ Datenpunkte

▲ Datenpunkte

— Regressionsgerade

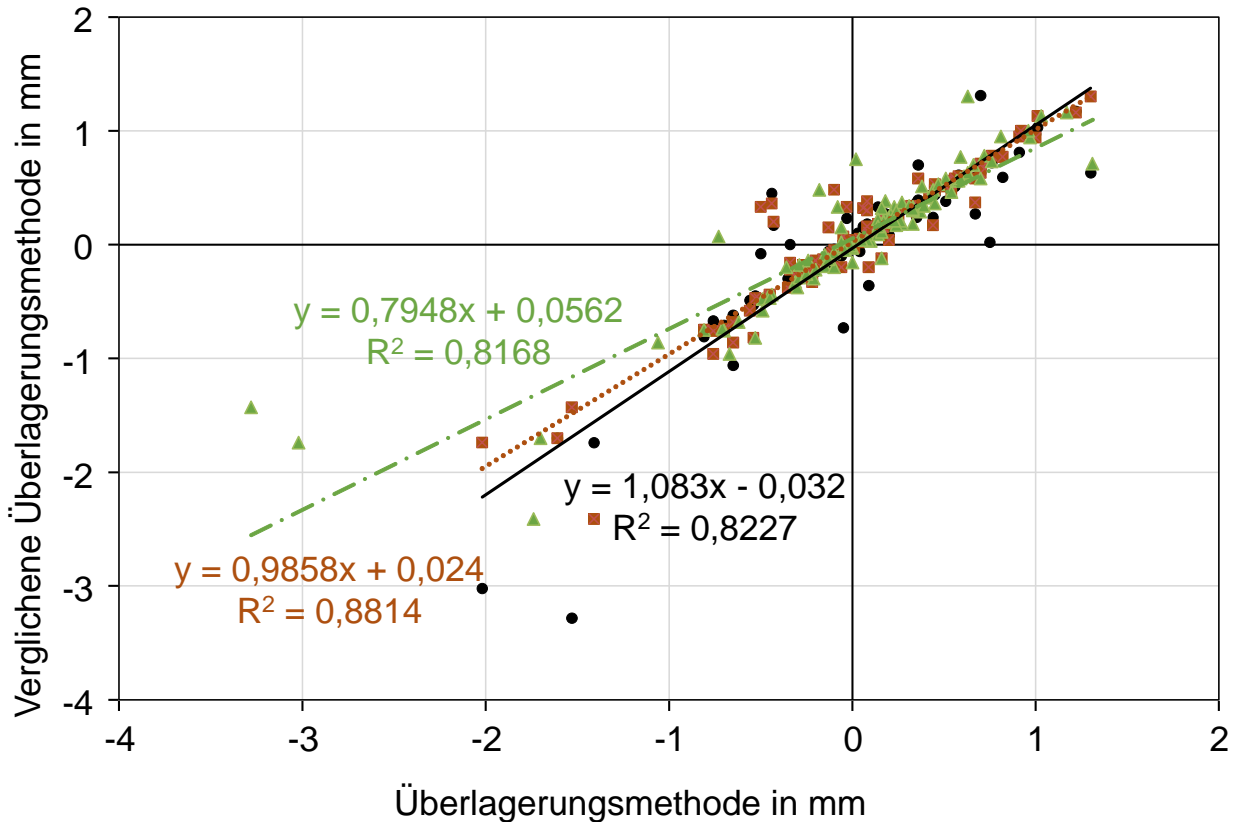
..... Regressionsgerade

- . - Regressionsgerade

Abb. 22: Streudiagramme für Werte einer Überlagerungsmethode über Werte einer anderen Überlagerungsmethode für alle drei Überlagerungsmethoden für Zahn 26 für Mesialbewegungen

In Abbildung 22 ist zu erkennen, dass sich trotz vorhandener einzelner größerer Abweichungen für die gewählten Überlagerungsmethoden nahe beieinander liegende lineare Regressionsgeraden ergeben. Es ist jedoch anzumerken, dass beim Vergleich von Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Weichteile (schwarz) ein Bestimmtheitsmaß von nur 0,6364 und beim Vergleich von Maxilla an Weichteile mit Maxilla an Maxilla verlässlich (grün) ein

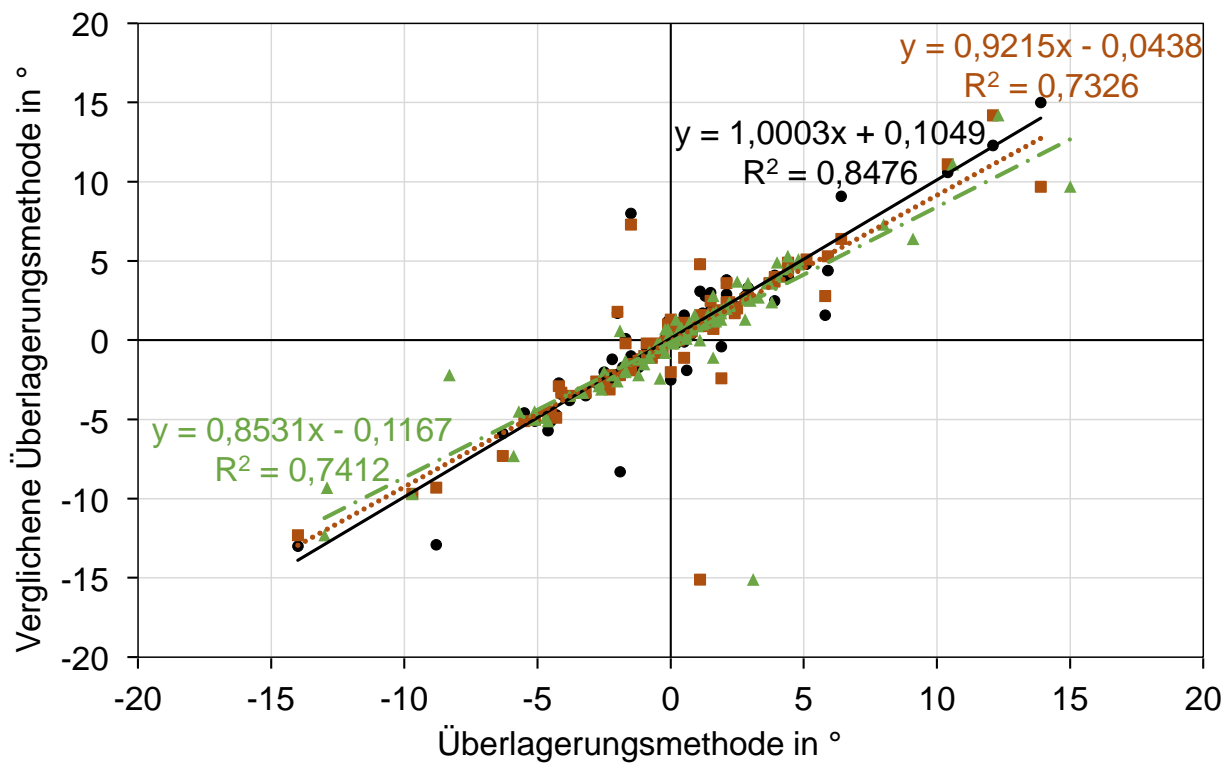
Bestimmtheitsmaß von nur 0,6528 erzielt wurde. Außerdem sind einige Datenpunkte weiter entfernt von den zugehörigen Regressionsgeraden zu erkennen.



Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Weichteile	Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Maxilla verlässlich	Maxilla an Weichteile mit Maxilla an Maxilla verlässlich
● Datenpunkte	■ Datenpunkte	▲ Datenpunkte
— Regressionsgerade Regressionsgerade	- · - Regressionsgerade

Abb. 23: Streudiagramme für Werte einer Überlagerungsmethode über Werte einer anderen Überlagerungsmethode für alle drei Überlagerungsmethoden für Zahn 22 für Okklusalbewegungen

In Abbildung 23 fällt auf, dass die Regressionsgerade für den Vergleich Maxilla an Weichteile mit Maxilla an Maxilla verlässlich (grün) sich von den Regressionsgeraden für die Vergleiche Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Weichteile (schwarz) und Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Maxilla verlässlich (braun) abhebt. Die Steigung der Regressionsgerade für den Vergleich Maxilla an Weichteile mit Maxilla an Maxilla verlässlich (grün) ist mit 0,7948 deutlich geringer als die Steigungen der beiden Regressionsgeraden für Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Weichteile mit einem Wert von 1,083 (schwarz) bzw. Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Maxilla verlässlich mit einem Wert von 0,9858 (braun).



Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Weichteile	Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Maxilla verlässlich	Maxilla an Weichteile mit Maxilla an Maxilla verlässlich
● Datenpunkte — Regressionsgerade	■ Datenpunkte Regressionsgerade	▲ Datenpunkte - . - Regressionsgerade

Abb. 24: Streudiagramme für Werte einer Überlagerungsmethode über Werte einer anderen Überlagerungsmethode für alle drei Überlagerungsmethoden für Zahn 25 für Angulationen

Abbildung 24 zeigt für Angulationen, dass sich unabhängig von der gewählten Überlagerungsmethode gut angepasste lineare Regressionsgeraden, die zudem noch nahe beieinander liegen, bestimmen lassen.

In obigen Streudiagrammen (siehe Abbildungen 20 bis 24) sind Vergleiche der paarweisen Messwerte für jeweils zwei Überlagerungsmethoden dargestellt. Um die Ergebnisse noch einmal aus einer anderen Sichtweise zu betrachten, wurden die Differenzen der paarweisen Messwerte in Form von Bland-Altman-Diagrammen dargestellt. Beim Bland-Altman-Diagramm werden die Differenzen der beiden paarweisen Messwerte über den

Mittelwerten der beiden Messwerte aufgetragen (Giavarina, 2015). In der folgenden Abbildung 25 sind die in Abbildung 20 zu einem Streudiagramm verarbeiteten Daten als Bland-Altman-Diagramm dargestellt.

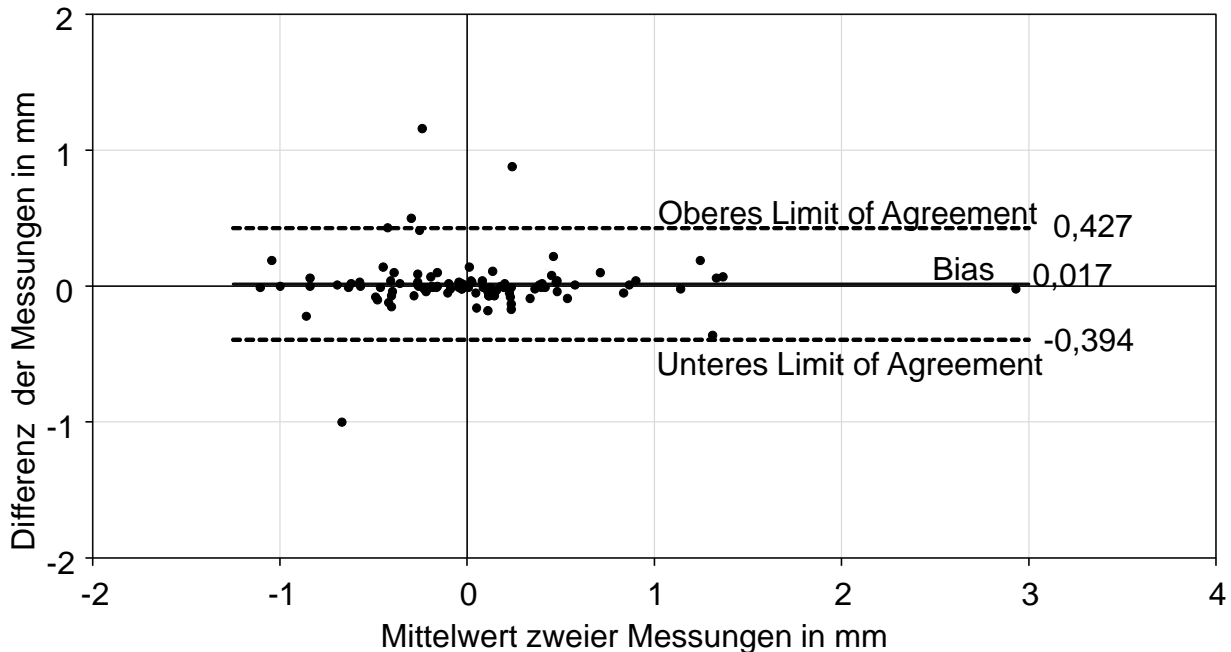
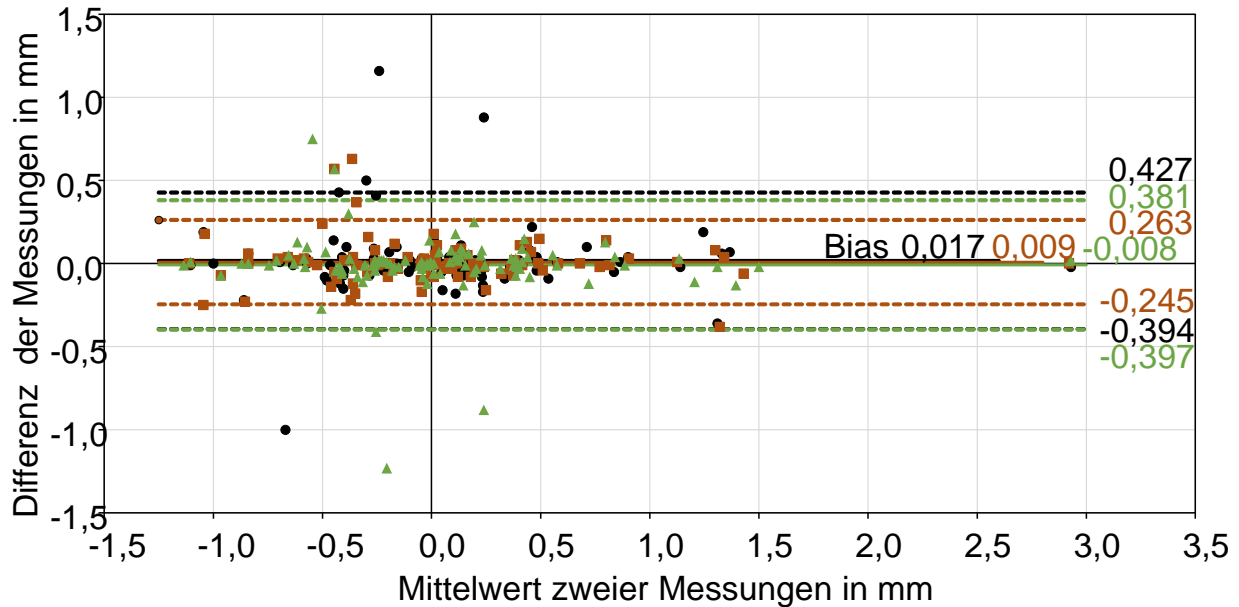


Abb. 25: Differenz zwischen Wert von Maxilla an Maxilla und Maxilla an Weichteile über dem Mittelwert beider Messwerte für Zahn 25 für Vestibulärbewegung

In obiger Abbildung 25 wird die Methode Maxilla an Maxilla mit der Methode Maxilla an Weichteile für Vestibulärbewegungen von Zahn 25 verglichen. Für jede dieser Methoden lieferte OnyxCeph³ einen Wert für die Vestibulärbewegung des Zahnes 25 im jeweils untersuchten Modell. Aus diesen beiden Werten wurde die Differenz und der Mittelwert der beiden Werte errechnet. Ein Datenpunkt im Diagramm hat als x-Koordinate den Mittelwert der beiden Werte und als y-Koordinate die Differenz der beiden Werte. Der arithmetische Mittelwert aller Differenzen (Bias) ist als durchgezogene schwarze Linie eingezeichnet und wird rechts neben der Linie angezeigt (hier 0,017 mm). Der Toleranzbereich für die Differenzen der Einzelwerte wird durch die gestrichelten oberen und unteren Linien begrenzt (Limits of Agreement, definiert als Mittelwert $\pm 1,96 \times$ Stichprobenstandardabweichung) und rechts neben der jeweiligen Linie angezeigt (hier -0,394 mm bzw. 0,427 mm). Die meisten Datenpunkte liegen nahe der x-Achse, es zeigen sich also überwiegend nur kleinere Differenzen zwischen den Messwerten.

Nach dem obenstehenden Muster wurden zwei weitere Bland-Altman-Diagramme für die Vestibulärbewegung von Zahn 25 für die Überlagerungsmethoden Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Maxilla verlässlich und Maxilla an Weichteile mit Maxilla an Maxilla verlässlich gefertigt und dann alle drei Bland-Altman-Diagramme in einer Gesamtdarstellung in folgender Abbildung 26 zusammengefasst.



Maxilla an Maxilla mit
Maxilla an Weichteile

• Datenpunkte
— Bias
- - - Limits of agreement

Maxilla an Maxilla mit
Maxilla an Maxilla verlässlich

■ Datenpunkte
— Bias
- - - Limits of agreement

Maxilla an Weichteile mit
Maxilla an Maxilla verlässlich

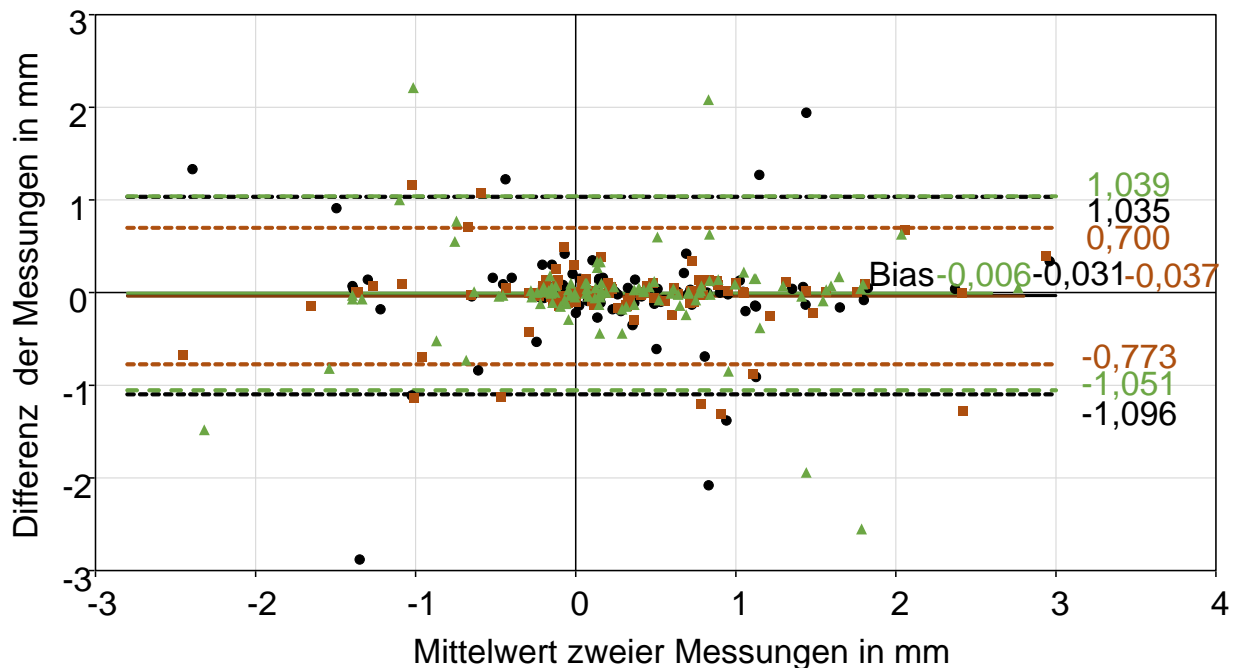
▲ Datenpunkte
— Bias
- - - Limits of agreement

Abb. 26: Differenz zwischen Wert einer Überlagerungsmethode und einer anderen Überlagerungsmethode über dem Mittelwert beider Messwerte für alle drei Überlagerungsmethoden für Zahn 25 für Vestibulärbewegungen

Die Abbildung 26 zeigt die für die jeweiligen paarweisen Vergleiche ermittelten Datenpunkte mit zugehörigen Geraden für den jeweiligen arithmetischen Mittelwert (Bias) sowie zugehörigen Geraden (Limits of Agreement) zur Abgrenzung der Toleranzbereiche. Die Werte für Bias sowie obere und untere Limits of Agreement sind jeweils rechts neben den entsprechenden Linien ausgewiesen. Da die Werte für den Bias für alle drei Methoden sehr nahe beieinander liegen, sind die zugehörigen Geraden so nah beieinander, dass

sie optisch kaum voneinander zu unterscheiden sind. Deshalb sind diese Linien an ihren rechten Enden unterschiedlich lang ausgezogen. Die drei paarweisen Vergleiche führen zu fast gleichem Bias, lediglich bei den Toleranzbereichen ergeben sich optisch erkennbare Unterschiede. Der Toleranzbereich bei dem Vergleich Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Maxilla verlässlich (braun) ist deutlich enger als bei den anderen beiden Vergleichen.

In der gleichen Weise wurden untenstehende Diagramme für Mesialbewegungen von Zahn 26 (siehe Abbildung 27), für Okklusalbewegungen von Zahn 22 (siehe Abbildung 28) und für Angulationen von Zahn 25 (siehe Abbildung 29) erstellt.



Maxilla an Maxilla mit
Maxilla an Weichteile

Maxilla an Maxilla mit
Maxilla an Maxilla verlässlich

Maxilla an Weichteile mit
Maxilla an Maxilla verlässlich

• Datenpunkte

■ Datenpunkte

▲ Datenpunkte

— Bias

— Bias

— Bias

---- Limits of agreement

---- Limits of agreement

---- Limits of agreement

Abb. 27: Differenz zwischen Wert einer Überlagerungsmethode und einer anderen Überlagerungsmethode über dem Mittelwert beider Messwerte für alle drei Überlagerungsmethoden für Zahn 26 für Mesialbewegungen

In Abbildung 27 treten bei allen drei Vergleichen vereinzelt größere Differenzen, auch außerhalb der Toleranzbereiche auf. Die drei paarweisen Vergleiche führen zu fast gleichem Bias, lediglich bei den Toleranzbereichen ergeben sich optisch erkennbare Unterschiede. Der Toleranzbereich bei dem Vergleich Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Maxilla verlässlich (braun) ist deutlich enger als bei den anderen beiden Vergleichen.

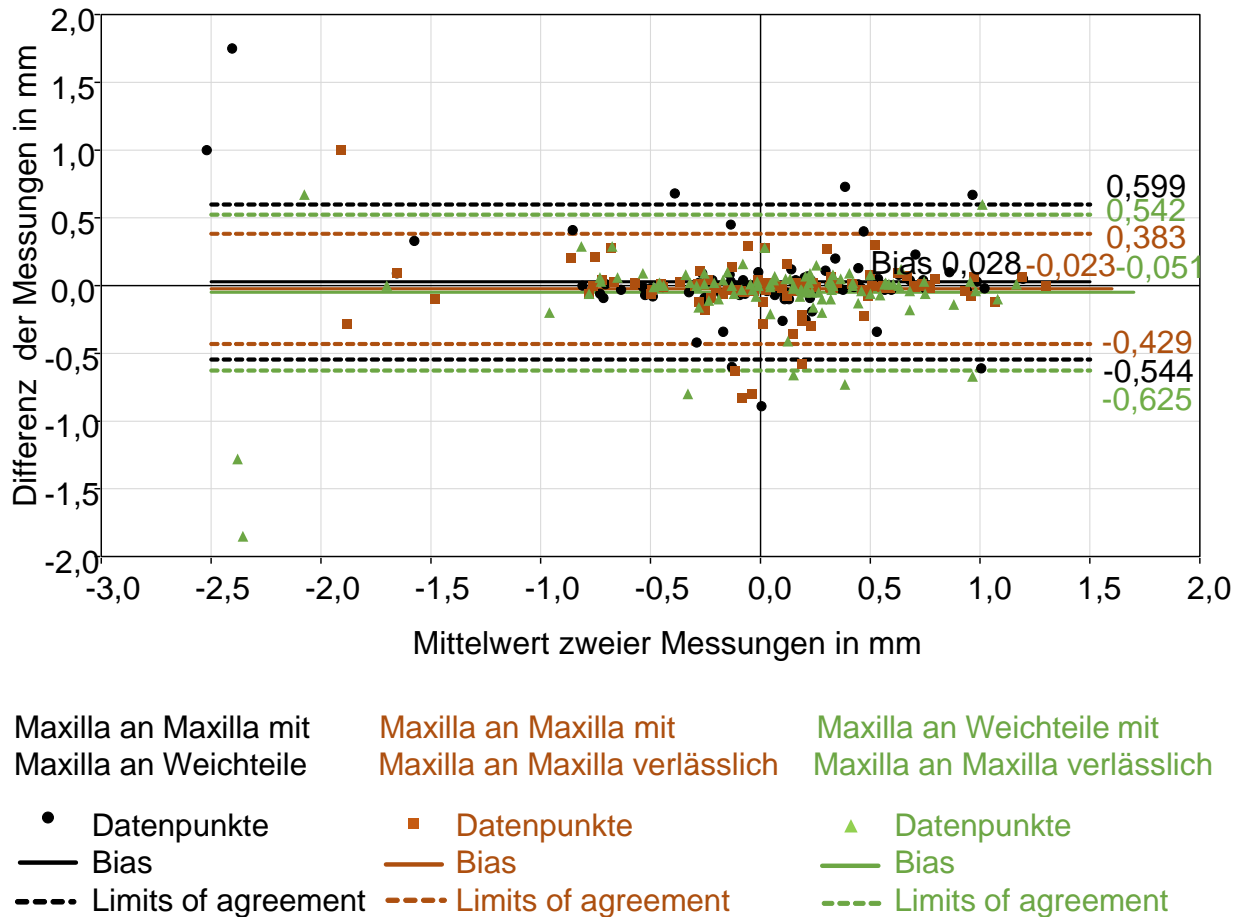
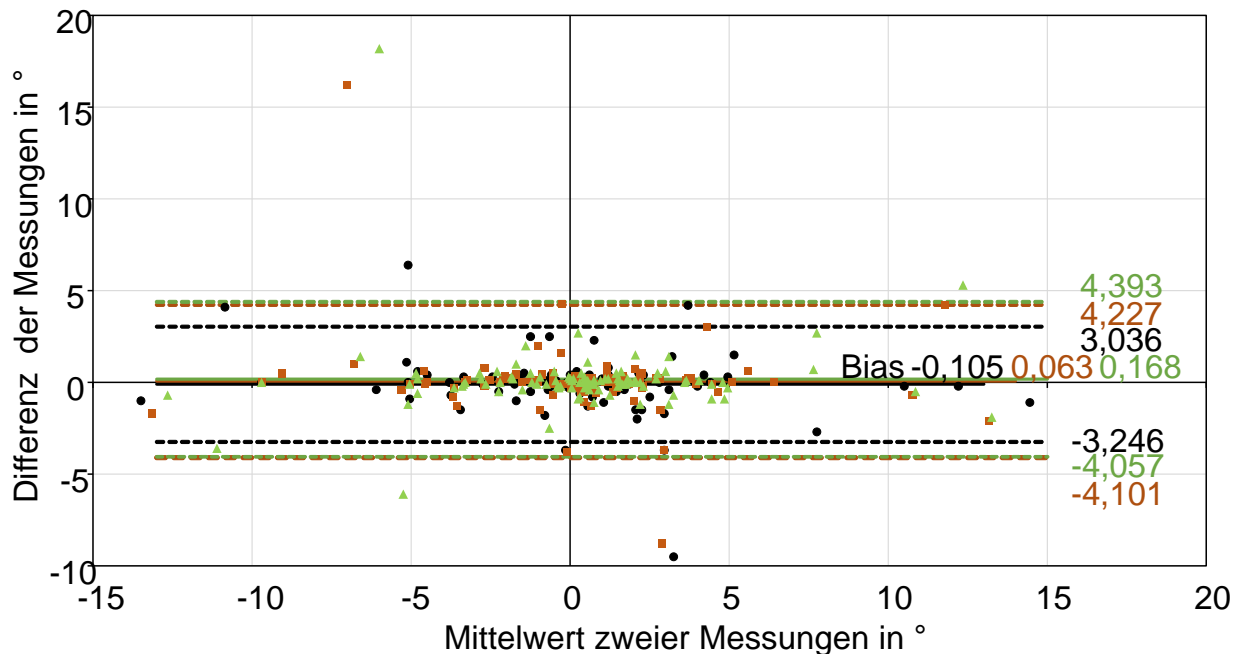


Abb. 28: Differenz zwischen Wert einer Überlagerungsmethode und einer anderen Überlagerungsmethode über dem Mittelwert beider Messwerte für alle drei Überlagerungsmethoden für Zahn 22 für Okklusalbewegungen

In Abbildung 28 können die Bias optisch so gerade eben unterschieden werden. Lediglich bei den Toleranzbereichen ergeben sich optisch erkennbare Unterschiede. Der Toleranzbereich bei dem Vergleich Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Maxilla verlässlich (braun) ist deutlich enger und liegt innerhalb der gegeneinander verschobenen Toleranzbereiche der beiden anderen Vergleiche.



Maxilla an Maxilla mit
Maxilla an Weichteile

Maxilla an Maxilla mit
Maxilla an Maxilla verlässlich

Maxilla an Weichteile mit
Maxilla an Maxilla verlässlich

• Datenpunkte

■ Datenpunkte

▲ Datenpunkte

— Bias

— Bias

— Bias

--- Limits of agreement

--- Limits of agreement

--- Limits of agreement

Abb. 29: Differenz zwischen Wert einer Überlagerungsmethode und einer anderen Überlagerungsmethode über dem Mittelwert beider Messwerte für alle drei Überlagerungsmethoden für Zahn 25 für Angulationen

In Abbildung 29 fallen einige wenige große Differenzen ins Auge. Die Linien für den Bias lassen sich optisch nicht unterscheiden. Der Toleranzbereich bei dem Vergleich Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Weichteile (schwarz) ist deutlich enger und liegt innerhalb der optisch nicht unterscheidbaren Toleranzbereiche der beiden anderen Vergleiche.

Da es zu aufwendig ist und unübersichtlich werden würde, alle im klinischen Abschnitt gewonnenen Ergebnisse mittels Diagrammen darzustellen, wird im Folgenden eine Gesamtübersicht über die Ergebnisse in Form von Kennzahlen gegeben. Um die Übereinstimmung der Ergebnisse von OnyxCeph³ für die paarweisen Vergleiche der drei Überlagerungsmethoden hinsichtlich verschiedener Bewegungen zu beurteilen, wurden als

Kennzahlen Ortsverschiebung, Maßstabsänderung und Konkordanz-Korrelationskoeffizient nach Lin herangezogen. Für den experimentellen Abschnitt waren Modelle hergestellt worden, die Untersuchungen von vorgegebenen Bewegungen der Zähne 26, 25 und 22 ermöglichten (6er-, 5er- und 2er-Modell). Für den klinischen Abschnitt wurden korrespondierend die in Folge von kieferorthopädischen Behandlungen auftretenden Bewegungen bei den Zähnen 26, 25 und 22 untersucht. Folgende Tabelle 12 enthält Kennzahlen für die Bewegungen dieser Zähne.

Tab. 12: Kennzahlen für die Übereinstimmung der Ergebnisse von OnyxCeph³ für paarweise miteinander verglichene Überlagerungsmethoden

Zahn	Bewegungsrichtung	Ortsverschiebung			Maßstabsänderung			Konkordanz-Korrelationskoeffizient		
		Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Weichteile	Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Maxilla verlässlich	Maxilla an Weichteile mit Maxilla an Maxilla verlässlich	Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Weichteile	Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Maxilla verlässlich	Maxilla an Weichteile mit Maxilla an Maxilla verlässlich	Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Weichteile	Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Maxilla verlässlich	Maxilla an Weichteile mit Maxilla an Maxilla verlässlich
26	mesial	-0,010	-0,012	-0,002	0,009	-0,008	-0,017	0,797	0,905	0,808
26	vestibulär	-0,015	0,015	0,029	-0,022	0,006	0,028	0,896	0,922	0,945
26	okklusal	-0,018	-0,026	-0,006	-0,098	-0,071	0,027	0,820	0,863	0,943
26	angulation	-0,004	0,000	0,004	0,048	-0,039	-0,086	0,937	0,921	0,932
25	mesial	-0,031	-0,008	0,023	0,026	-0,007	-0,033	0,683	0,907	0,748
25	vestibulär	0,012	0,006	-0,005	0,000	-0,010	-0,010	0,937	0,976	0,945
25	okklusal	-0,022	-0,042	-0,016	-0,105	-0,061	0,045	0,841	0,874	0,913
25	angulation	-0,002	0,001	0,003	-0,059	-0,052	0,006	0,917	0,853	0,860
22	mesial	-0,036	-0,016	0,018	0,051	-0,013	-0,064	0,805	0,867	0,804
22	vestibulär	0,016	0,009	-0,006	-0,055	-0,062	-0,007	0,925	0,939	0,924
22	okklusal	0,018	-0,017	-0,031	-0,126	-0,035	0,091	0,892	0,937	0,894
22	angulation	-0,003	-0,003	0,000	0,028	-0,021	-0,049	0,925	0,895	0,940

Die in der ersten Zeile der Tabelle 12 ausgewiesenen Kennzahlen wurden aus Messwerten für Mesialbewegungen des Zahnes 26 mit OnyxCeph³ bei rund 100 Modellen berechnet. Für die Messwerte der Überlagerungsmethode Maxilla an Maxilla im Vergleich zu den Messwerten der Überlagerungsmethode Maxilla an Weichteile sind eine Ortsverschiebung von -0,010, eine Maßstabsänderung von 0,009 und ein Konkordanz-Korrelationskoeffizient von 0,797 ausgewiesen. Für die anderen Zähne, Bewegungsrichtungen und paarweisen Vergleiche wurden entsprechende Kennzahlen ermittelt. Die in der Tabelle 12 enthaltenen 108 Kennzahlen fassen für drei Zähne 26, 25 und 22 mit jeweils etwa 100 Zahnbewegungen die in jeweils vier Bewegungsrichtungen mit jeweils drei Überlagerungsmethoden von OnyxCeph³ ermittelten Werte zusammen (insgesamt rund 3600). Generell liegen nur geringe Ortsverschiebungen für Translationen (von -0,042 bis 0,029) bzw. für Angulationen (von -0,004 bis 0,004) und nur geringe Maßstabsänderungen für Translationen (von -0,126 bis 0,091) bzw. für Angulationen (von -0,086 bis 0,048) vor. Die Werte für die Konkordanz-Korrelationskoeffizienten reichen von 0,683 bis 0,976, wobei nur drei davon (mit den Werten 0,683; 0,748; 0,797) unter 0,8 liegen, alle anderen sind größer, davon mehr als die Hälfte sogar größer als 0,9.

4. Diskussion

Die Diskussion erfolgt getrennt nach angewandten Methoden und Ergebnissen jeweils für den experimentellen und den klinischen Abschnitt.

4.1 Diskussion der Methoden

Für die Gewinnung der Messdaten sowohl im experimentellen als auch im klinischen Abschnitt ist auf einschränkende Randbedingungen hinzuweisen.

Wenn Überlagerungen von Modellpaaren mittels Inspect 3D mehrfach durchgeführt wurden, also Auswertungstabellen für gleiche Modellpaare mehrfach erzeugt wurden, wichen die generierten Auswertungstabellen – wenn auch nur sehr geringfügig – voneinander ab. Dies dürfte auf die in OnyxCeph³ verwendete Überlagerungstechnik „iterative closest point algorithm“ zurückzuführen sein. Bei den zu überlagernden digitalen 3D-Modellen handelt es sich im Kern um Punktwolken, dargestellt im STL-Format, die mittels Translation und Rotation möglichst gut zur Deckung gebracht werden sollen. Dabei wird ausgehend von näherungsweise bestimmten Anfangswerten durch Translationen und Rotationen iterativ versucht, die Summe der Abstandsquadrate einander nächstgelegener Punkte zu minimieren (Chen und Medioni, 1991). Nur näherungsweise bestimmte Anfangswerte, nicht identische Iterationswege und unterschiedliche Iterationsanzahlen bis zum Ende des Iterationsvorgangs dürften für die beobachteten kleinen Differenzen in den von OnyxCeph³ generierten Auswertungstabellen verantwortlich sein. Dieser Effekt ist unvermeidlich und daher hinzunehmen und zudem für die Zielsetzungen dieser Arbeit nicht relevant. Bei der Fragestellung, ob OnyxCeph³ vorgegebene Translationsbewegungen und Rotationsbewegungen zutreffend abbildet (experimenteller Abschnitt) und ob die drei verglichenen unterschiedlichen Überlagerungsmethoden zu annähernd gleichen Ergebnissen führen (klinischer Abschnitt), ist es letztendlich unerheblich, welche Fluktuationen bei den zugrunde liegenden Auswertungstabellen von OnyxCeph³ vorkommen.

Werte von OnyxCeph³ unterhalb der Messgenauigkeit (Rotationsbewegungen vom Absolutbetrag kleiner als $0,1^\circ$, Translationsbewegungen vom Absolutbetrag kleiner als $0,01\text{ mm}$) wurden für statistische Auswertungen mit den Werten $0,0^\circ$ oder $0,00\text{ mm}$ belegt und gingen so in die Berechnungen ein. Dadurch werden die berechneten Werte -

allerdings sehr geringfügig - verfälscht. Die Alternative, Datensätze, bei denen Leerzellen zu vermerken sind, komplett zu entfernen, erscheint unsinnig, da dann kaum noch Datensätze zur weiteren Auswertung zur Verfügung stehen. Als weitere Möglichkeit hätten bei Datensätzen mit Leerzellen die Berechnungen nur mit den nach Entfernung der einzelnen Leerzelle verbliebenen und vorhandenen Daten durchgeführt werden können. Auch dies verfälscht die berechneten Werte. Die Methode, Werte unterhalb der Messgenauigkeit durch 0 zu ersetzen, scheint hier die geeignetere, da damit die Information „hier liegt ein sehr kleiner Wert vor“ nicht ganz verloren geht.

4.1.1 Diskussion der Methoden des experimentellen Abschnitts

Im experimentellen Abschnitt wurden Bewegungen mit Hilfe des Hexapoden ausgeführt und dann untersucht, wie gut diese Bewegungen mit OnyxCeph³ nachvollzogen werden können. Als bewegliche Zähne wurden repräsentativ der Molar 26, der Prämolare 25 und der Incisivus 22 ausgewählt. Es hätten noch weitere Modelle mit anderen beweglichen Zähnen hergestellt werden können. Es ist fraglich, ob der dadurch entstandene ganz erhebliche Mehraufwand zu besseren Erkenntnissen hätte beitragen können. Die Ergebnisse und die aus diesen abgeleiteten Schlussfolgerungen weisen jedenfalls nicht darauf hin.

Die gewählten ausgefrästen Bereiche der Modelle hätten anders gestaltet werden können. Hier musste ein Kompromiss bei der Wahl der Größe des Ausschnitts gefunden werden. Ein großer Ausschnitt bietet mehr Bewegungsspielraum als ein kleinerer Ausschnitt, dafür verbleibt bei Modellen mit kleineren Ausschnitten mehr Oberfläche für bessere Überlagerungen. Beim Molar 26 und Prämolare 25 wurden eher größere Ausschnitte gewählt. Damit bilden die so möglichen experimentellen Bewegungen eher die bei kieferorthopädischen Behandlungen häufig durch Extraktion des Prämolaren 24 ausgelösten größeren Bewegungen in mesialer Richtung ab. Beim Incisivus 22 wurde der Ausschnitt klein gehalten, da bei den verbleibenden Frontzähnen die kleinen und wenig strukturierten Flächen der Schneidekanten im Gegensatz zu den großen strukturierten Flächen mit Höckern und Fissuren bei Molaren und Prämolaren womöglich die Überlagerung beeinträchtigt hätten.

Der Hexapod kann Bewegungen mit einer Genauigkeit von unter 2 μm für Translationen in allen Raumachsen sowie unter 10 μrad für Rotationsbewegungen ausführen (Keilig et al., 2004). Damit ist die Positions- und Wiederholgenauigkeit dieses Gerätes so hoch, dass hierdurch keine relevanten Einschränkungen gegeben sind. Beim Versuchsaufbau wurde große Sorgfalt und Mühe darauf verwandt, die selbst hergestellten Modelle so zu befestigen, dass diese keine Eigenbewegungen ausführen konnten. Inwieweit dies gelungen ist, kann nicht zweifelsfrei verifiziert werden.

Die zahnmedizinischen Begriffe mesial, distal, vestibulär und palatinal beschreiben die relative Bewegung eines Zahnes bezogen auf den Zahnbogen. Mit dem Hexapoden durchgeführte vorgegebene Bewegungen sind geradlinig und folgen nicht dem Zahnbogen, sondern einem systemeigenen Koordinatensystem. Eine vorgegebene Mesial- bzw. Distalbewegung wird vom Hexapoden daher als Tangentialbewegung längs des Zahnbogens ausgeführt. Die Abweichung der Tangentialbewegung von der Mesialbewegung wächst mit der Größe der Bewegung. Weiter wurde versucht, beim Ausrichten des feststehenden Modells und des zu bewegenden Zahns, alles so aufeinander auszurichten, dass die vom Hexapoden durchzuführende gewünschte Bewegung des Zahnes mit dem Zahn in Ausgangsstellung möglichst exakt anhand des Zahnbogens positioniert erfolgt. Dazu wurde die Ausrichtung am jeweils zu bewegenden Zahn unter optischer Kontrolle vorgenommen. Selbst eine nochmalige Überprüfung der Ausrichtung mittels des Referenzmarkers ändert nichts daran, dass eine ganz exakte Ausrichtung so nicht erreicht werden kann. Der Referenzmarker verblieb am Zahn, da sich bei dessen Entfernung möglicherweise die Ausrichtung des zu bewegenden Zahnes verändert hätte. Die vorbeschriebenen Probleme haben zur Folge, dass bei Vorgabe z.B. von Translationen in mesialer Bewegungsrichtung immer auch Anteile in den Richtungen vestibulär / palatinal und Intrusion / Extrusion vorliegen. Dies muss bei den Auswertungen berücksichtigt werden.

Beim Scanner TRIOS handelt es sich um einen per Hand geführten Intraoralscanner. Während des Scanvorgangs werden hunderte von Aufnahmen der Oberflächen aufgenommen. Diese werden von der Scanner-Software zu einem einheitlichen digitalen 3D-Modell zusammengefügt. Dabei schließt die Software selbsttätig erkannte kleinere Scanlücken durch Interpolation. Infolge möglichst sorgfältig durchgeführter Scans – 1500

anstatt empfohlener mindestens 800 Einzelaufnahmen - kam die Software zur Füllung erkannter Lücken nur in geringem Umfang zum Einsatz. Der Scanvorgang ist jedoch nicht exakt reproduzierbar. Lim et al. (2018) weisen darauf hin, dass die sichere Verwendung von Intraoralscannern ein gewisses Training voraussetzt. Mit TRIOS konnte das Team von Lim schon nach kurzem Training Genauigkeiten von im Durchschnitt weniger als 52,30 μm erreichen. Welche Genauigkeit in der vorliegenden Arbeit erreicht wurde, ist unklar. Cui et al. (2021) vergleichen und diskutieren die Genauigkeit von zwei extraoralen und einem intraoralen Scanner. Als intraoralen Scanner verwendeten sie den auch in dieser Arbeit verwendeten TRIOS. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass in vitro bei iterativen closest point matching-Experimenten Abweichungen typischerweise innerhalb eines akzeptablen Bereichs von weniger als 0,01 mm liegen. Explizit wird darauf hingewiesen, dass die Genauigkeit der Scans von vielen Randbedingungen abhängt: Benutzer, Reflektionseigenschaften unterschiedlicher Strukturen (Weichgewebe, Dentin, Schmelz, Keramiken, Metalle, Kunststoffe etc.), Scanwinkel, Temperatur, Feuchtigkeit, Speichel, Blut, Patientenbewegungen, Mundöffnung. Einige dieser Randbedingungen kommen auch in der vorliegenden Arbeit zum Tragen.

Um die ursprünglich transparenten Modelle scannen zu können, war es erforderlich, diese mit einer braunen Lackschicht zu überziehen, die es dem Scanner ermöglichte die Oberfläche zu erkennen. Es ist darauf geachtet worden, nur eine hauchdünne Lackschicht aufzutragen, die demzufolge keinen verformenden Einfluss auf die vom Scanner erfassten Oberflächen hat. Da der Scanner lediglich die Oberfläche erfasst, ist es für den Scanvorgang unbeachtlich, welche Farbe diese hat oder welches Material unterhalb liegt. Die spätere Differenzierung (Segmentierung mit OnyxCeph³) und in den bildlichen Darstellungen unterschiedlich gefärbten Zahnoberflächen (weiß) bzw. Weichgewebeoberflächen (rosa) erfolgen allein anhand von Oberflächenstrukturen, nicht anhand von verwendeten Materialien oder Farben.

Das Ziel der Wiederholungsversuche war, deren Reproduzierbarkeit zu validieren. Daher wurden die Wiederholungsversuche nur am 5er-Modell durchgeführt und die Anzahl der durchgeführten Bewegungen bei den Wiederholungen beschränkt. Bei den Translationen wurden je eine kleine und eine große Palatinal- und Intrusionsbewegung durchgeführt,

denn es ist zu vermuten, dass die anderen Translationsrichtungen ähnliche Ergebnisse liefern. Die Beschränkung der Translationsbewegungen auf den kleinsten und den größten Wert in der jeweiligen Richtung folgte dem Gedanken, dass Zwischenwerte zu keinem großen Erkenntnisgewinn führen dürften. Bei den Rotationsbewegungen wurden ebenfalls nur je eine kleine und eine große Angulation durchgeführt. Da die Wiederholungsversuche lediglich dazu dienten festzustellen, ob sich die Versuchsergebnisse reproduzieren lassen, fließen deren Ergebnisse nicht in die späteren Messreihen von Zahnbewegungen und deren statistische Analysen ein.

Bei den Wiederholungsversuchen wurde Wert darauf gelegt, den jeweiligen Versuch vollständig von Anfang bis Ende aufs Neue mit komplett neu aufgebauter Versuchsanordnung durchzuführen. Daher können diese Versuche als voneinander unabhängig angesehen werden.

Um die beim Scannen erhaltenen digitalen 3D-Modelle für OnyxCeph³ auswertbar zu machen, mussten diese trotz automatischer Korrekturen nachbearbeitet werden (manuelle Scanreparaturen, zirkuläres Beschneiden des Modells, manuelle Korrektur der Segmentierung). Diese Korrekturen unterliegen einer gewissen Willkür und sind trotz größter Sorgfalt nicht hundertprozentig exakt durchführbar.

Im Versuch simulierte Weichteilüberlagerungen machen nur für den als Weichgewebe zu betrachtenden Bereich des feststehenden Modellteils Sinn. Am bewegten Zahn haftendes Weichgewebe folgt der Bewegung des Zahns und darf daher nicht für Überlagerungen herangezogen werden. Aus diesem Grunde wurden mit Hilfe der manuellen Scan-Reparatur alle am bewegten Zahn abgebildeten Weichgewebeteile herausgeschnitten.

Auch der am Zahn fixierte Referenzmarker hätte eigentlich (da weder Zahn noch Weichgewebe) entfernt werden müssen. Er kann jedoch nicht entfernt werden, ohne Gefahr den Zahn, an dem er befestigt ist, aus seiner Position zu verrücken. Daher musste er bleiben. OnyxCeph³ ordnete bei der automatischen Segmentierung den Referenzmarker teilweise als Bestandteil der Zahnkrone und teilweise als Bestandteil des Weichgewebes ein. Um

den Referenzmarker eindeutig dem bewegten Zahn zuzuordnen, wurde er bei der manuellen Korrektur der Segmentierung diesem vollständig zugeordnet.

Neueste Studien umgehen die aufwendige Herstellung physischer Modelle, indem sie aus einem vorhandenen digitalen 3D-Modell ein virtuelles Referenzmodell in der Weise erzeugen, dass segmentierte Zähne in diesem digitalen 3D-Modell virtuellen Zahnbewegungen unterzogen werden und dann dieses virtuelle Referenzmodell mit dem ursprünglichen überlagert wird (Samar et al., 2022a; Samar et al., 2022b).

Hinsichtlich aller drei verwendeten Überlagerungsmethoden war im experimentellen Abschnitt aufgrund des Versuchsaufbaus sichergestellt, dass alles außer dem bewegten Zahn unverändert und unbewegt blieb. Dies erleichtert Überlagerungen, da die im experimentellen Abschnitt verwendeten Überlagerungsmethoden die Oberflächen dieser unbewegten Strukturen nutzen.

Überlagerungsmethode Maxilla an Maxilla

Bei dieser Überlagerungsmethode wurde die Oberfläche des beweglichen Zahns von der Überlagerung ausgeschlossen, da dessen Position nach einer Bewegung von vornherein nicht mit dessen Position vor der Bewegung zur Deckung gebracht hätte werden können.

Überlagerungsmethode Maxilla an Weichteile

Am beweglichen Zahn noch vorhandene Reste von Weichteiloberflächen wurden bei der manuellen Scanreparatur ausgeschnitten, da diese mit dem Zahn mitbewegten Weichteilreste nach einer Bewegung von vornherein nicht mit ihrer Position vor der Bewegung zur Deckung gebracht hätten werden können.

Überlagerungsmethode Maxilla an Maxilla verlässlich

Als verlässlicher Bereich wurden die Oberflächen der Rugae palatinae ausgewählt. An deren Stelle hätten auch andere Bereiche genommen werden können. Bei kieferorthopädischen Behandlungen treten bei den Rugae palatinae nur geringe Veränderungen auf. Daher bieten sich die Rugae palatinae bei klinischen Fragestellungen für Überlagerungen an (Garib et al., 2019). Die Verwendung desselben Bereiches auch im experimentellen

Abschnitt schien daher sinnvoll. Wie sich der Sachverhalt, dass alle drei Überlagerungsmethoden nur unbewegte - wenn auch verschiedene - Oberflächen benutzen, auf die erhaltenen Ergebnisse auswirkt, wird bei deren Diskussion weiter erörtert.

OnyxCeph³ erstellt für die jeweils vorgegebenen Bewegungen Auswertungstabellen, die Werte für alle vorhandenen Zähne und alle möglichen Translations- und Rotationsbewegungen dieser Zähne enthalten. Die protokollierten Werte für nicht bewegte Zähne waren der Erwartung entsprechend sehr klein, nur knapp oberhalb der Messgenauigkeit von OnyxCeph³ und für die Fragestellung im experimentellen Abschnitt nicht von Relevanz.

Für den bewegten Zahn werden bei vorgegebenen Translationen immer kleinere Rotationsbewegungen knapp oberhalb der Messgenauigkeit von OnyxCeph³ ausgewiesen. Bei Auswertungen von Translationsbewegungen wurden diese kleinen Rotationsbewegungen nicht berücksichtigt, da sie für die Fragestellung, ob die vorgegebene Translationsbewegung zutreffend wiedergegeben worden ist, irrelevant sind.

Bei vorgegebenen Rotationsbewegungen verbleibt der Zahn vor und nach der Rotationsbewegung am selben Ort. Jedoch werden bei jeder Rotationsbewegung auch immer Translationsbewegungen mit angezeigt. Z. B. wird bei einer Angulation in mesialer Richtung der Zahnhöcker bewegt, was von OnyxCeph³ zusätzlich zur angezeigten Angulation zutreffend als Mesialtranslation gewertet und ausgewiesen wird. Diese Translationsbewegungen können bei Auswertungen hinsichtlich der Rotationsbewegungen jedoch vernachlässigt werden, da es genügt, die Wiedergabe dieser Rotationsbewegungen allein anhand der von OnyxCeph³ ermittelten Rotationswinkel zu beurteilen.

Ebenso weist OnyxCeph³ z.B. bei einer vorgegebenen Angulation außer der dazu ermittelten Angulation (Hauptrotationsbewegung) geringfügige Inklinationen und Rotationen aus (Nebenrotationsbewegungen). Diese geringfügigen Nebenrotationsbewegungen wurden bei der Auswertung nicht weiter beachtet.

Hinsichtlich der im experimentellen Abschnitt verwendeten Methoden ist generell anzumerken, dass es nicht möglich ist festzustellen, inwieweit die Ursachen für die Streuung

der Messergebnisse in den oben diskutierten Unzulänglichkeiten (beim Versuchsaufbau, beim Scanvorgang durch den TRIOS, beim Auswertungsprogramm OnyxCeph³ usw.) oder in einem nicht näher zuzuordnenden statistischen Rauschen vielfältigster Art zu verorten sind. Das Ziel der Untersuchungen im experimentellen Abschnitt war es, festzustellen, ob die auf dem hier verfolgten Weg von OnyxCeph³ ermittelten Werte für vorgegebene Zahnbewegungen diese hinreichend zuverlässig abbilden, daher ist es nicht von Relevanz, worauf eventuell auftretende Abweichungen zurückzuführen sind.

Für die Auswertungen der Daten wurden gängige, als Standard anzusehende statistische Methoden verwendet. Begrenzungen hinsichtlich deren Anwendbarkeit werden in der Diskussion der Ergebnisse jeweils beim betroffenen Einzelfall angesprochen.

4.1.2 Diskussion der Methoden des klinischen Abschnitts

Im klinischen Abschnitt wurden paarweise Überlagerungen vorliegender digitaler 3D-Modelle des Oberkiefers, die bei kieferorthopädischen Behandlungen gewonnen worden waren, mit OnyxCeph³ durchgeführt. Dann wurde untersucht, ob drei verschiedene in OnyxCeph³ verfügbare Überlagerungsmethoden quantitativ annähernd gleiche Ergebnisse liefern.

Die digitalen 3D-Modelle können nur so, wie sie in der KFO-Bonn-Datenbank gespeichert worden sind, verwendet werden. Wie, unter welchen Zielsetzungen und welchen Bedingungen sie gewonnen wurden, lässt sich nicht rekonstruieren. Meist handelt es sich um Gipsmodelle, die erst nach mehrjähriger Lagerung gescannt und digitalisiert worden sind. Etliche der in der Diskussion zu den Methoden des experimentellen Abschnitts beschriebenen Schwierigkeiten insbesondere bei Scanvorgängen und andere hier gar nicht angesprochene Schwierigkeiten dürften auch bei der Erstellung der klinischen digitalen 3D-Modelle aufgetreten sein (Cui et al., 2021). Hinzu kommt, dass die hier ausgewerteten Modelle über einen Zeitraum von fast zwei Jahrzehnten von unterschiedlichen Personen unter Verwendung unterschiedlicher Materialien und Geräte gefertigt wurden. Damit besteht keine Kontinuität. Obwohl für unsere Zwecke von vorneherein erkennbar ungeeignete Modelle gemäß den Ausschlusskriterien mittels visueller Inspektion der Bilder der digitalen 3D-Modelle aussortiert worden sind, ist davon auszugehen, dass unvermeidlich bei den

verbliebenen Modellen Schwächen vorhanden sind, die bei der Überlagerung stören. In der Tat wurden auch noch einige wenige digitale 3D-Modelle im Nachhinein wegen erst dann erkennbarer Mängel aussortiert. Damit stellen die etwa 100 dieser Untersuchung zugrunde liegenden digitalen 3D-Modelle weder eine zufällige Auswahl aus der Fülle möglicher kieferorthopädischer Behandlungen des Oberkiefers noch eine systematische Auswahl für eine bestimmte abgegrenzte Gruppe solcher Behandlungen dar.

Es ist nicht sinnvoll, für alle Zähne und für alle Bewegungen der digitalen 3D-Modelle Auswertungen durchzuführen. Wohl zu Recht ist zu vermuten, dass Ergebnisse für Zahnbewegungen der Zähne des zweiten Quadranten als repräsentativ für Zahnbewegungen des ersten Quadranten angesehen werden können. Innerhalb eines Quadranten ist zu vermuten, dass Zahnbewegungen eines Molars repräsentativ für Zahnbewegungen der anderen Molaren angesehen werden können. Aus dem gleichen Grund dürfte es genügen, nur einen Prämolaren und nur einen Incisivus zu untersuchen. Für die Untersuchungen im klinischen Abschnitt wurden daher der Molar 26, der Prämolare 25 und der Incisivus 22 herangezogen. Dies sind die gleichen Zähne, für die im experimentellen Abschnitt fest vorgegebene Zahnbewegungen durchgeführt worden waren.

Während in den Modellen des experimentellen Abschnitts jeweils nur ein Zahn und nur dieser kontrolliert bewegt wurde, bewegen sich bei den Modellen im klinischen Abschnitt in Folge der kieferorthopädischen Behandlung meist alle Zähne, dabei werden mitunter recht große Bewegungen veranlasst. Generell erschwert dies Überlagerungen.

Überlagerungsmethode Maxilla an Maxilla

Da sich bei den klinischen Modellen alle Zähne bewegen, wäre es schwierig und letzten Endes willkürlich zu versuchen, durch optische Inspektion zu entscheiden, welche Zähne sich stark und welche Zähne sich nur wenig bewegt haben, um dann die Überlagerungen nur an den Oberflächen wenig bewegter Zähne auszurichten. Deshalb wurden im klinischen Abschnitt alle Zahnoberflächen für die Überlagerung genutzt. Daraus resultierende Ungenauigkeiten sind unvermeidlich.

Überlagerungsmethode Maxilla an Weichteile

Anders als im experimentellen Abschnitt ist hier klar, dass sich mit fortschreitender kieferorthopädischer Behandlung im Weichteilbereich unvermeidliche Änderungen ergeben. Dies erschwert die Überlagerung, inwieweit dies die Ergebnisse negativ beeinträchtigt, ist unklar.

Überlagerungsmethode Maxilla an Maxilla verlässlich

Während im experimentellen Abschnitt in Folge des Versuchsaufbaus sicher davon ausgegangen werden konnte, dass in einem als verlässlich markierten Bereich tatsächlich gar keine Veränderung stattgefunden hat, gilt dies bei den klinischen Modellen nicht. Jedoch kann hier die Rugae palatinae als zwar nicht absolut aber immerhin hinreichend verlässlich angesehen werden (Chen et al., 2011; Garib et al., 2019). Daher wurde die Rugae palatinae in dieser Arbeit als verlässlicher Bereich gewählt.

Bei der Nutzung von Erkenntnissen aus dem experimentellen Abschnitt zur Interpretation von Ergebnissen im klinischen Abschnitt ist Vorsicht geboten. Ein wesentlicher Punkt hinsichtlich der Beurteilung der Überlagerungsmethoden und deren Ergebnisse im experimentellen Abschnitt ist, dass hier - unabhängig von der gewählten Überlagerungsmethode - immer feste, unveränderte gleiche Strukturen der jeweils überlagerten Modelle für die Überlagerungen herangezogen werden. Das ändert sich nicht, wenn Zahnbewegungen anstatt mit physischen Modellen mit digitalen 3D-Modellen simuliert werden (Samar et al., 2022a; Samar et al., 2022b). Auch dann bleibt bis auf die virtuell bewegten Zähne alles andere unverändert. Solche mit Sicherheit unbewegten und unveränderten Strukturen gibt es bei realen kieferorthopädischen Behandlungen nicht.

Im experimentellen Abschnitt ist es möglich, die mit einer Überlagerungsmethode von OnyxCeph³ ermittelten Werte für Zahnbewegungen mit vom Hexapoden hochpräzise vorgegebenen Bewegungen zu vergleichen (Goldstandard). Im Gegensatz dazu steht für die mit einer Überlagerungsmethode von OnyxCeph³ ermittelten Werte für klinische Zahnbewegungen keine allgemein anerkannte Methode als Goldstandard zur Verfügung, die zuverlässige quantitative Werte für solche Bewegungen liefert (Ponce-Garcia et al., 2018). Im Rahmen dieser Arbeit ist es nur möglich von OnyxCeph³ ermittelte Werte mit einer der

Überlagerungsmethoden mit ermittelten Werten von OnyxCeph³ mit einer anderen Überlagerungsmethode zu vergleichen.

Für die Auswertungen der Daten wurden - wie im experimentellen Abschnitt - gängige, als Standard anzusehende statistische Methoden verwendet. Begrenzungen hinsichtlich deren Anwendbarkeit werden in der Diskussion der Ergebnisse jeweils beim betroffenen Einzelfall angesprochen.

4.2 Diskussion der Ergebnisse

Im Folgenden werden die oben erhaltenen Ergebnisse getrennt nach experimentellem und klinischem Abschnitt diskutiert.

4.2.1 Diskussion der Ergebnisse des experimentellen Abschnitts

Die in Abbildung 12 nebeneinander gestellten Überlagerungsbilder für die drei Überlagerungsmethoden bestätigen, dass alle drei Überlagerungsmethoden optisch akzeptable Ergebnisse liefern. Bei allen drei Bildern ist die Darstellung der Positionen des beweglichen Zahnes vor und nach der Bewegung optisch gut zu sehen. In diesem Beispiel war eine Bewegungsvorgabe für eine Translation von 4 mm in vestibulärer Richtung gemacht worden. Generell lieferte OnyxCeph³ für den in dieser Arbeit verwendeten Versuchsaufbau bei vorgegebenen Translationsbewegungen in eine vorgegebene Richtung eine starke Bewegung in diese Richtung (Hauptbewegung), allerdings auch kleinere Bewegungen in nicht vorgegebene Richtungen (Nebenbewegungen). Für die vorgegebene Zahnbewegung für Zahn 26 von 4 mm in vestibulärer Richtung ermittelte OnyxCeph³ mittels Überlagerung der digitalen 3D-Modelle vor und nach der Zahnbewegung als Werte in vestibulärer Richtung: Maxilla an Maxilla 3,71 mm, Maxilla an Weichteile 3,71 mm und Maxilla an Maxilla verlässlich 3,72 mm. Die drei unterschiedlichen Überlagerungsmethoden liefern im Vergleich untereinander sehr nahe beieinander liegende Werte, scheinen jedoch alle die tatsächliche Bewegung in vestibulärer Richtung zu unterschätzen (Hauptbewegung). Werden zusätzlich die von OnyxCeph³ angegebenen Werte für die Translationen in nicht vorgegebene Bewegungsrichtungen berücksichtigt und werden unter deren Einbeziehung Gesamttranslationen berechnet, dann ergeben sich für die unterschiedlichen Überlagerungsmethoden folgende Werte: Maxilla an Maxilla 3,966 mm, Maxilla an

Weichteile 3,971 mm und Maxilla an Maxilla verlässlich 3,978 mm. Diese Werte sind wieder einander sehr nahe, jetzt liegen sie aber auch sehr nahe beim vorgegebenen Wert von 4 mm. Dass die Werte für Gesamttranslationen näher bei dem vorgegebenen Wert liegen, ist aufgrund der Geometrie des Zahnbogens und der verwendeten Koordinatensysteme für die Steuerung des Hexapoden und die Ausgabe der Werte von OnyxCeph³ zu erwarten. Dies wurde bereits in Abschnitt 4.1.1 diskutiert.

Ob die drei Überlagerungsmethoden nicht nur im hier betrachteten Einzelfall im Vergleich untereinander nahe liegende Werte liefern und auch nahe an vorgegebene Werte herankommen, wird anhand der insgesamt erhaltenen Ergebnisse des experimentellen Abschnitts weiter erörtert.

Im experimentellen Abschnitt wurden zusätzlich zu den Messreihen von Zahnbewegungen Wiederholungsversuche zu einigen dieser Messreihen durchgeführt. Da die Wiederholungsversuche die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse der Messreihen verifizieren sollten, werden zunächst deren Ergebnisse diskutiert und erst anschließend die Ergebnisse der Messreihen.

4.2.1.1 Diskussion der Ergebnisse der Wiederholungsversuche

Die bei den Wiederholungsversuchen für die Gesamttranslation und bei den Angulationen erzielten Ergebnisse weisen nahe bei den Vorgabewerten liegende Werte, demzufolge auch sehr nahe bei den Vorgabewerten liegende Mittelwerte mit sehr geringen Stichprobenstandardabweichungen aus (siehe Tabelle 6 und 7). Dies deutet daraufhin, dass sich die Versuche gut reproduzieren lassen. Von daher gibt es keine Hinweise auf einen möglicherweise fehlerhaften Versuchsaufbau. Für weitere Auswertungen wurden Balkendiagramme gefertigt (siehe Abbildungen 14 bis 16).

Die in Abbildung 14 als Balkendiagramm dargestellten Ergebnisse für Palatinalbewegungen von 1 bzw. 5 mm bei sechsmaliger Versuchsdurchführung lassen sich wie folgt interpretieren: Beim Vergleich der erhaltenen Ergebnisse für die Überlagerungsmethoden jeweils innerhalb eines Versuchs, lieferten alle angewandten Überlagerungsmethoden so-

wohl bei 1 als auch 5 mm Palatinalbewegung jeweils nahe beieinander und nahe bei dieser Vorgabe liegende Werte. Das heißt, die Ergebnisse innerhalb eines Versuchs sind von der angewandten Überlagerungsmethode weitestgehend unabhängig. Ein Vergleich der erhaltenen Ergebnisse für die Überlagerungsmethoden über alle sechs Versuche hinweg zeigt, dass bei den Versuchen 2 und 4 etwas niedrigere, von den Vorgaben abweichende Werte, als bei den anderen Versuchen erzielt wurden (maximal 0,122 mm bei Vorgabe von 1 mm und 0,268 mm bei Vorgabe von 5 mm). Jedoch ist festzuhalten, dass im Hinblick auf die Fragestellung dieser Arbeit, Vergleich der drei verschiedenen Überlagerungsmethoden, alle drei Überlagerungsmethoden fast identische Werte mit fast identischer Differenz zur jeweiligen Vorgabe lieferten. Worauf diese etwas niedrigeren Werte zurückzuführen sind, lässt sich nicht mit Sicherheit bestimmen. Am ehesten könnte es mit der Ausrichtung des beweglichen Zahns am Zahnbogen zusammenhängen (siehe Abschnitt 4.1.1), da diese bei jedem Wiederholungsversuch neu vorgenommen wurde. Beim Vergleich der erhaltenen Ergebnisse nach Vorgabewerten (1 oder 5 mm) ist keine eindeutige Tendenz in Bezug auf Abweichungen entweder nach oben oder nach unten von den Vorgabewerten und hinsichtlich deren Größenordnung zu erkennen.

Während in Abbildung 14 die oben beschriebenen allerdings geringfügigen Unterschiede festgestellt werden können, sind rein optisch in Abbildung 15 fast gar keine Unterschiede festzustellen. Eine mögliche Erklärung hierfür könnte sein, dass bei Intrusionsbewegungen anders als bei Palatinal- und Mesialbewegungen keine Abhängigkeit von der Ausrichtung am Zahnbogen gegeben ist. Letzteres wird dadurch bestätigt, dass bei Intrusionsbewegungen auftretende Nebenbewegungen nur sehr gering sind und sich somit errechnete Gesamttranslationen nur geringfügig von den ermittelten Intrusionsbewegungen unterscheiden.

Bei den in Abbildung 16 dargestellten Angulationsbewegungen gilt, wie bei den Translationen, dass die Überlagerungsmethoden jeweils innerhalb eines Versuchs nahe beieinander liegende Werte lieferten. Auch ein Vergleich zwischen den Versuchen zeigt keine wesentlichen Unterschiede. Beim Vergleich der erhaltenen Ergebnisse nach Vorgabewerten (1 oder 10 °) fällt auf, dass der größere Vorgabewert bei allen Überlagerungsmetho-

den und bei allen Versuchen tendenziell etwas unterschätzt wurde. Das letztere mag damit zusammenhängen, dass 10° am Rande des zulässigen Messbereichs laut Herstellerangaben von OnyxCeph³ liegt.

Generell lagen die bei Translationen und Angulationen erhaltenen Werte unabhängig von Überlagerungsmethode, Versuchsaufbau und Größe der Vorgabe recht nah bei den vorgegebenen Werten. Als Gesamtfazit aus den Wiederholungsversuchen ist somit festzustellen, dass der Versuchsaufbau, die Scans mittels TRIOS und die Auswertung mittels OnyxCeph³ unabhängig von der angewandten Überlagerungsmethode sinnvoll interpretierbare und reproduzierbare Ergebnisse liefern. Letzteres wird im Folgenden mit deutlich mehr Daten weiter statisch ausgewertet und erörtert.

4.2.1.2 Diskussion der Ergebnisse zu Messreihen von Zahnbewegungen

Die Ergebnisse der Messreihen von Zahnbewegungen bestätigen die Erwartung, dass bei Translationen der Wert für die errechnete Gesamttranslation die vorgegebene Bewegung stets besser wiedergibt als der allein für die vorgegebene Richtung durch OnyxCeph³ ermittelte Wert (siehe z.B. Tabelle 8). Die grafische Darstellung der Tabellenwerte in Abbildung 17 zeigt diesen Zusammenhang ebenfalls sehr deutlich. Die dort abgebildete Regressionsgerade für die Gesamttranslation würde die y-Achse fast im Nullpunkt (0; -0,0215) schneiden und hat mit einem Wert von 0,9651 eine Steigung sehr nahe bei 1. Das heißt, es besteht eine sehr gute Übereinstimmung der vorgegebenen Mesialbewegungen mit den errechneten Gesamttranslationen. Das Bestimmtheitsmaß von 0,9999 zeigt an, dass die Regressionsgerade den Zusammenhang zwischen vorgegebenen Mesialbewegungen und zugehörigen errechneten Gesamttranslationen sehr zutreffend abbildet. Demgegenüber ist keine so gute Übereinstimmung der vorgegebenen Mesialbewegungen mit den von OnyxCeph³ ermittelten nur für die mesiale Richtung gegeben. Deren Steigung von nur noch 0,817 zeigt, dass die Werte für die ermittelten Mesialtranslationen mit zunehmender Größe der vorgegebenen Mesialbewegungen systematisch unterschätzt werden. Wobei das Bestimmtheitsmaß von 0,9996 bestätigt, dass die hier vorliegende Regressionsgerade den Zusammenhang zwischen vorgegebener Mesialbewegung und zugehörigen von OnyxCeph³ ermittelten Mesialbewegungen sehr zutreffend abbildet. Die Regressionsgeraden für Nebenbewegungen (okklusal und vestibulär)

zeigen entsprechend bei größeren Vorgabewerten für Mesialbewegungen ebenfalls größere Nebenbewegungen. Da Vestibulärbewegungen abhängig von der Ausrichtung am Zahnbogen sind, Okklusalbewegungen jedoch nicht, verwundert es nicht, dass die vestibulären Nebenbewegungen wesentlich größer ausfallen als die okklusalen. Diese Ausführungen geben Anlass dazu, für die durchgeführten Untersuchungen der drei Überlagerungsmethoden im experimentellen Abschnitt die Gesamttranslation heranzuziehen.

Die in Abbildung 18 dargestellten Ergebnisse für den Vergleich vorgegebener Mesialbewegungen mit den anhand der drei Überlagerungsmethoden ermittelten Gesamttranslationen zeigen eine hervorragende Übereinstimmung. Im Messbereich von 1 bis 5 mm werden, unabhängig von der angewendeten Überlagerungsmethode, immer sehr gute Übereinstimmungen zwischen vorgegebener Bewegung und ermittelter Gesamttranslation erzielt. Es lässt sich kein Unterschied zwischen den angewandten drei Überlagerungsmethoden erkennen.

Gemäß Tabelle 9 und Abbildung 19 ergeben sich für Angulationen ähnliche Ergebnisse wie bei den Translationen. Es ergibt sich eine hervorragende Übereinstimmung zwischen vorgegebenen Angulationen und durch OnyxCeph³ ermittelten Angulationen, und dies unabhängig davon, welche Überlagerungsmethode verwendet wird.

Obige Ergebnisse gelten streng genommen nur für die dort diskutierten Bewegungen des Zahnes 26. Die Ergebnisse lassen sich verallgemeinern, indem mehr Zähne und mehr Bewegungen betrachtet werden. Dabei stößt eine Aufbereitung der erhaltenen Ergebnisse mittels Streudiagrammen hinsichtlich des damit verbundenen Zeitaufwandes und in Bezug auf Übersichtlichkeit schnell an ihre Grenzen. Deshalb wurden weitere Ergebnisse in Form von Kennzahlen verarbeitet und in einer Tabelle dargestellt. Als Kennzahlen wurden Ortsverschiebung, Maßstabsänderung und Konkordanz-Korrelationskoeffizient nach Lin verwendet (Hilgers et al., 2018; Koch und Spörl, 2007). Die in Tabelle 10 dargestellten Ergebnisse für obengenannte Kennzahlen für Messreihen zur Überprüfung der Übereinstimmung der Ergebnisse von OnyxCeph³ mit jeweils vorgegebenen Bewegungen geben zu folgenden Interpretationen und Schlussfolgerungen Anlass:

Die mit einem * gekennzeichnete vermutlich mit einer fehlerhaften Vorgabe durchgeführte Messreihe weist im Vergleich zu allen nicht gekennzeichneten Messreihen augenfällig große Ortsverschiebungen und Maßstabsveränderungen bei allen angewandten Überlagerungsmethoden auf. Beides wäre nicht verwunderlich, wenn anstelle einer gewünschten Vorgabe von 2° eine tatsächliche Vorgabe von 1° gemacht worden wäre und OnyxCeph³ konsequenterweise dann ziemlich korrekt bei allen Überlagerungsmethoden Werte sehr nahe der vermutlich gemachten Vorgabe von 1° liefert. Konsequenterweise zeigen die Konkordanz-Korrelationskoeffizienten keine Werte so nahe bei 1 wie bei den anderen Messreihen. Diese Messreihe wird daher für die weiteren Betrachtungen ausgeschlossen.

Den mit ** gekennzeichneten Vestibulärtranslationen liegen Messreihen zu Grunde, bei denen bewusst Translationen von 6 mm vorgegeben wurden, obwohl laut Herstellerangaben OnyxCeph³ bei Translationen über 4 bis 5 mm an seine Grenze stoßen soll. Es ist daher nicht verwunderlich, wenn bei diesen Messreihen keine hohen Übereinstimmungen mit den Vorgabewerten erzielt wurden. Tatsächlich lieferten die drei Überlagerungsmethoden Ortsverschiebungen und Maßstabsänderungen, die erheblich größer waren als bei Messreihen, bei denen die Grenze von 5 mm für Translationsbewegungen nicht überschritten wurde. Auch die Konkordanz-Korrelationskoeffizienten lieferten keine Werte so nahe bei 1 wie die anderen Messreihen. Diese zwei Messreihen bestätigen die Herstellerangabe von OnyxCeph³ und werden für weitere Betrachtungen daher ausgeschlossen.

Alle anderen Messreihen lieferten gegenüber den vorgegebenen Bewegungen nur sehr geringe Ortsverschiebungen und Maßstabsänderungen. Weiter ergaben sich Konkordanz-Korrelationskoeffizienten sehr nahe bei 1. Als Gesamtfazit ist also festzuhalten, dass OnyxCeph³ im experimentellen Abschnitt für Translationen im Messbereich von 1 bis 5 mm und bei Angulationen im Messbereich von 1° bis 10° unabhängig von der gewählten Überlagerungsmethode sehr gute Übereinstimmungen von ermittelten mit vorgegebenen Werten liefert.

Choi et al. (2010) beschreiben eine ähnliche Untersuchung. Sie verwendeten 20 Gipsmodelle von Patienten, bei denen jeweils rechte und linke Eckzähne, Prämolaren und Molaren ausgesägt und randomisierten Translationsbewegungen unterzogen wurden. Die Bewegungen wurden konventionell mit dem Reference Measurement Instrument vermessen (Auflösung 0,01 mm in x-, y-, und z-Richtung). Von den Gipsmodellen wurden mit einem Orapix 3D-Scanner (Messgenauigkeit +/- 20 µm) digitale Modelle erstellt, und die Modelle vor und nach der Bewegung anhand der gesamten Gaumenfläche inklusive Gaumenfalten (Rugae palatinae) überlagert. Die Bewegungen wurden dann rechnerisch ermittelt. Die Mittelwerte der Translationsbewegungen in Richtungen x-, y- oder z-Achse unterschieden sich nicht signifikant (paarweiser t-Test), ebenfalls wiesen die Messungen in jeder Koordinatenrichtung hohe Korrelationen auf. Der in dieser Arbeit verwendete Hexapod hat bei Translationen eine wesentlich höhere Genauigkeit von 2 µm. Zur Auswertung wurden in dieser Arbeit außer arithmetischen Mittelwerten und Korrelationskoeffizienten weitere Kennzahlen, wie Ortsverschiebung, Maßstabsänderung und Konkordanz-Korrelationskoeffizient nach Lin, verwendet, sowie Streudiagramme gefertigt. Anstelle paarweiser t-Tests wurden 95 %-Konfidenzintervalle verwendet. Außerdem wurde nicht nur ermittelt, ob das verwendete Verfahren akzeptable Ergebnisse liefert, sondern drei verschiedene Überlagerungsmethoden miteinander verglichen. Die vorliegende Arbeit bestätigt, präzisiert und erweitert die von Choi et al. (2010) vorgestellten Ergebnisse für den hier verwendeten Versuchsaufbau und die Software OnyxCeph³.

Samar et al. (2022a; 2022b) beschreiben eine Untersuchung, bei der aus 20 vorhandenen digitalen 3D-Modellen mittels vorgegebener virtueller Zahnbewegungen virtuelle Referenzmodelle erzeugt wurden. Nach Überlagerung des ursprünglichen mit dem virtuellen Modell wurde untersucht, wie gut drei verschiedene Überlagerungssoftwares (Geomagic, Geomagic U.S., Research Triangle Park, New York City, USA; OrthoAnalyzer, 3Shape Ortho System, Kopenhagen, Dänemark; eModel 9.0 "Compare", Geodigm Corporation, Chanhassen, Minnesota, USA) die virtuellen Zahnbewegungen wiedergaben. Zur Auswertung wurden arithmetische Mittelwerte, Stichprobenstandardabweichungen, Korrelationskoeffizienten für paarweise Vergleiche und 95 %-Konfidenzintervalle herangezogen. Samar et al. (2022a; 2022b) kamen insgesamt zu dem Ergebnis, dass unabhängig von

der gewählten Software akzeptable Übereinstimmungen von ermittelten mit vorgegebenen Werten erzielt wurden. In der vorliegenden Arbeit wurde nur die Software OnyxCeph³ verwendet, innerhalb dieser aber drei verschiedene Überlagerungsmethoden untersucht. Es wurden jedoch - wie oben ausgeführt - wesentlich umfangreichere statistische Auswertungen vorgenommen. Die vorliegende Arbeit bestätigt, dass die untersuchten Überlagerungsmethoden von OnyxCeph³ ähnlich akzeptable Ergebnisse, wie die von Samar et al. (2022a; 2022b) untersuchten Softwares liefern.

4.2.2 Diskussion der Ergebnisse des klinischen Abschnitts

Im klinischen Abschnitt wurden in Folge von kieferorthopädischen Behandlungen auftretende Bewegungen bei den Zähnen 26, 25 und 22 untersucht. Dies sind diejenigen Zähne, für die im experimentellen Abschnitt untersucht wurde, wie gut OnyxCeph³ vorgegebene Zahnbewegungen wiedergeben kann. Dabei ist festzuhalten, dass OnyxCeph³ für Translationen bis zu 5 mm und Angulationen bis zu 10 ° vorgegebene Bewegungen einzelner Zähne sehr gut wiedergegeben hat. Dabei liefern alle drei Überlagerungsmethoden gleich gute Ergebnisse. Wie bei der Diskussion der Methoden des klinischen Abschnitts schon ausgeführt, kann hier nur untersucht werden, inwieweit die mit einer der Überlagerungsmethoden ermittelten Werte mit denen einer anderen Überlagerungsmethode übereinstimmen. Bei kieferorthopädischen Behandlungen bewegen sich nicht nur einzelne Zähne, sondern meist mehr oder weniger alle Zähne. Dies könnte sich negativ auf die Übereinstimmung von mit verschiedenen Überlagerungsmethoden ermittelten Werten auswirken.

Die in Abbildung 13 nebeneinander gestellten Überlagerungsbilder zeigen die Zustände vor und nach Durchführung kieferorthopädischer Behandlungen für alle drei Überlagerungsmethoden. Deutlich ist z.B. zu erkennen, dass Zahn 12 nach palatinal in den annähernd ausgeformten Zahnbogen eingegliedert wurde. Ebenso ist zu sehen, dass andere Zähne mit bewegt wurden. Es ist es allerdings fraglich, ob OnyxCeph³ mit den diesen Bildern zugrundeliegenden digitalen 3D-Modellen auch hinreichend zuverlässige und aussagekräftige Werte zur quantitativen Beurteilung der kieferorthopädischen Maßnahmen liefert. Diese Arbeit geht dazu einer vorgelagerten Fragestellung nach. Da OnyxCeph³

verschiedene Überlagerungsmethoden zur Auswahl anbietet, wurden drei dieser Überlagerungsmethoden paarweise miteinander verglichen: Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Weichteile, Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Maxilla verlässlich, Maxilla an Weichteile mit Maxilla an Maxilla verlässlich. Es wurde untersucht, ob die jeweils paarweise miteinander verglichenen Überlagerungsmethoden im Wesentlichen gleiche Ergebnisse erbringen. Sollten die drei von OnyxCeph³ verwendeten Überlagerungsmethoden weit auseinander liegende Werte liefern, können die so gewonnenen Werte nicht zuverlässig verwendet werden, denn es kann nicht entschieden werden, welche dieser Überlagerungsmethoden der Realität näher liegende Werte liefert.

Um belastbare Aussagen zur Übereinstimmung oder Nichtübereinstimmung der Überlagerungsmethoden machen zu können, wurden bei rund 100 digitalen 3D-Modellen paarweise Überlagerungen durchgeführt und statistische Auswertungen vorgenommen. Angesichts des hohen Stichprobenumfangs dürften statistische Auswertungen unter Normalverteilungsannahme zulässigerweise verwendet werden.

Die Tabelle 11 fasst 3600 Messergebnisse von OnyxCeph³ zusammen, indem dort aus diesen Messergebnissen errechnete arithmetische Mittelwerte und 95 %-Konfidenzintervalle für die paarweisen Differenzen bei den verschiedenen Überlagerungsmethoden aufgelistet werden. Bei Translationen ergeben sich arithmetische Mittelwerte für die Differenzen zweier Überlagerungsmethoden von absolut höchstens 0,092 mm und bei Angulationen von absolut höchstens 0,227 °, wobei sehr kleine 95 %-Konfidenzintervalle mit Spannweiten von höchstens $\pm 0,009$ mm für Translationen und $\pm 0,039$ ° für Angulationen ausgewiesen werden. Meist liegen die Werte erheblich unter den genannten Höchstwerten. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass die drei miteinander verglichenen Überlagerungsmethoden im Durchschnitt sehr nahe beieinander liegende Messwerte liefern und hinsichtlich Durchschnittswertermittlungen keine der Überlagerungsmethoden gegenüber einer der anderen wesentlich abweichende Werte liefert.

Ein Vergleich der Überlagerungsmethoden nur anhand von Mittelwerten und Konfidenzintervallen ist relativ grob, daher werden zur Verfeinerung des Vergleichs Streudiagramme herangezogen. Exemplarisch für alle weiteren Streudiagramme zeigt der in Abbildung 20

vorgenommene Vergleich der Überlagerungsmethoden Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Weichteile für Zahn 25 für Vestibulärbewegungen einen typischen Befund. Die meisten Wertepaare haben nahe beieinander liegende x- und y-Koordinaten, so dass sich ihnen sehr gut eine lineare Regressionsgerade anpassen lässt, die fast durch den Koordinatenursprung verläuft und eine Steigung nahe dem Wert 1 hat. Es besteht also eine sehr gute Übereinstimmung der mit der Methode Maxilla an Maxilla und mit der Methode Maxilla an Weichteile erhaltenen Werte. Das Bestimmtheitsmaß von 0,8791 weist auf eine hohe Übereinstimmung der Messwerte mit der Regressionsgeraden hin. Gelegentlich auftretende Ausreißer beeinflussen dies nur wenig. Für Vestibulärbewegungen des Zahnes 25 liefern die Überlagerungsmethoden Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Weichteile somit meist annähernd gleiche Ergebnisse und sind insoweit gleichwertig.

Abbildung 21 zeigt eine Gesamtdarstellung der paarweisen Vergleiche für alle drei Überlagerungsmethoden für Zahn 25 für Vestibulärbewegungen. Mit der gleichen Argumentation wie oben lässt sich begründen, dass alle drei Überlagerungsmethoden annähernd gleiche Ergebnisse liefern und insoweit gleichwertig sind.

Abbildung 22 zeigt eine Gesamtdarstellung der paarweisen Vergleiche für alle drei Überlagerungsmethoden für Zahn 26 für die Mesialbewegungen. Auf den ersten Blick liefern alle drei Überlagerungsmethoden im paarweisen Vergleich sehr nahe beieinander liegende Regressionsgeraden, was für annähernd gleiche Ergebnisse unabhängig von der angewandten Überlagerungsmethode spricht. Gegenüber Abbildung 21 sind jedoch deutlich mehr Ausreißer zu verzeichnen und eine Asymmetrie dahingehend, dass deutlich mehr und größere Bewegungen in mesialer Richtung (+), als in distaler Richtung (-) zu verzeichnen sind. Die Asymmetrie könnte dadurch bedingt sein, dass es bei Zahnengständen und Platzmangel im Rahmen von kieferorthopädischen Behandlungen oft zu Extraktionen der ersten Prämolaren kommt. Dies führt zu großen Bewegungen für den Lückenschluss durch Distalbewegungen von den Frontzähnen von vorne her und / oder zu einem Lückenschluss durch Mesialbewegungen von Prämolaren und Molaren von hinten her. In der Tat ergab eine Durchsicht der verwendeten digitalen 3D-Modelle, dass in

22 Modellen der erste Prämolare im 2. Quadranten (24) nicht vorhanden war. Die Asymmetrie zwischen mesialen und distalen Bewegungen hat auf die Fragestellung dieser Arbeit keinen Einfluss.

Eine genauere Betrachtung der einzelnen paarweisen Vergleiche ergibt noch einige Details. Der Vergleich von Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Maxilla verlässlich liefert die am besten übereinstimmenden Werte. Alle Datenpunkte liegen bis auf wenige Ausreißer nahe einer Regressionsgeraden die fast durch den Nullpunkt geht und eine Steigung nahe dem Wert 1 hat. Das Bestimmtheitsmaß zeigt eine hohe Übereinstimmung der Regressionsgeraden mit den Datenpunkten. Demgegenüber weisen die Regressionsgeraden für die Vergleiche Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Weichteile und Maxilla an Weichteile mit Maxilla an Maxilla verlässlich etwas geringere Steigungen auf und die zugehörigen Bestimmtheitsmaße nur noch eine mittelmäßige Übereinstimmung. Diese Überlagerungsmethoden liefern mithin nicht ganz so gut übereinstimmende Werte. Dies dürfte auf die bei diesen Vergleichen etwas häufiger zu beobachtenden größeren Ausreißer zurückzuführen sein.

Abbildung 23 zeigt eine Gesamtdarstellung der paarweisen Vergleiche für alle drei Überlagerungsmethoden für Zahn 22 für Okklusalebewegungen. Auf den ersten Blick weicht die Regressionsgerade für den Vergleich Maxilla an Weichteile mit Maxilla an Maxilla verlässlich von den Regressionsgeraden für die anderen beiden Vergleiche ab. Eine genauere Betrachtung der einzelnen paarweisen Vergleiche liefert folgende Details: Der Vergleich von Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Maxilla verlässlich liefert die am besten übereinstimmenden Werte. Alle Datenpunkte liegen hierfür bis auf wenige Ausreißer nahe einer Regressionsgeraden, die fast durch den Nullpunkt geht, eine Steigung nahe dem Wert 1 hat und über das Bestimmtheitsmaß eine hohe Übereinstimmung der Regressionsgeraden mit den Datenpunkten zeigt. Demgegenüber zeigen sich bei den beiden anderen paarweisen Vergleichen bei den Datenpunkten mehr und größere Ausreißer und eine nicht ganz so gute Übereinstimmung der Regressionsgeraden mit den Datenpunkten. Es fällt auf, dass beim Vergleich der Überlagerungsmethoden Maxilla an Weichteile mit Maxilla an Maxilla verlässlich für die Regressionsgerade eine Steigung kleiner als 1 ausgewiesen

wird. Dies deutet daraufhin, dass die Überlagerungsmethode Maxilla an Maxilla verlässlich im Vergleich zur Überlagerungsmethode Maxilla an Weichteile tendenziell für Intrusionen kleinere und für Extrusionen größere Werte liefert. Auffällig ist, dass unabhängig von der angewandten Überlagerungsmethode Ausreißer vor allem bei Intrusionsbewegungen auftreten und besonders auffällig sind erhebliche Ausreißer bei größeren Intrusionsbewegungen über 1,5 mm. OnyxCeph³ scheint für die Erfassung von Intrusionsbewegungen über 1,5 mm nicht hinreichend präzise zu sein.

Die in Abbildung 24 wiedergegebene Auswertung der Ergebnisse für Angulationen von Zahn 25 zeigt ein ähnliches Bild wie die entsprechenden Auswertungen von Translationsbewegungen. Alle Regressionsgeraden verlaufen fast durch den Koordinatenursprung und haben Steigungen nahe bei 1. Die Bestimmtheitsmaße weisen auf eine relativ hohe Übereinstimmung der Regressionsgeraden mit den Datenpunkten hin. Es gibt einige wenige, jedoch große Ausreißer. Eine genauere Betrachtung der einzelnen Vergleiche liefert noch einige Details. Der Vergleich der Überlagerungsmethoden Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Weichteile liefert eine Regressionsgerade mit Steigung fast gleich 1, was einander fast perfekt gleichende Messwerte anzudeuten scheint. Es ist jedoch anzumerken, dass etliche Ausreißer bei den Angulationen sowohl in distaler als auch in mesialer Richtung auftreten und das Bestimmtheitsmaß zwar auf eine hohe Übereinstimmung, nicht jedoch auf eine sehr hohe Übereinstimmung zwischen Regressionsgerade und Datenpunkten hinweist. Dies relativiert die obige, zunächst nur anhand der Regressionsgerade nach dem ersten Augenschein geäußerte Vermutung. Die Werte der Überlagerungsmethode Maxilla an Maxilla stimmen mit den Werten der Überlagerungsmethode Maxilla an Weichteile gut, aber nicht sehr gut überein. Bei den zwei anderen Vergleichen der Überlagerungsmethoden Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Maxilla verlässlich und Maxilla an Weichteile mit Maxilla an Maxilla verlässlich sind größere Ausreißer zu vermerken. Diese Ausreißer haben starken Einfluss auf die Bestimmtheitsmaße und haben wohl auch wesentlich zur Abweichung der Steigungen vom Wert 1 beigetragen.

Um beim paarweisen Vergleich der Überlagerungsmethoden besser beurteilen zu können, ob eine der Methoden tendenziell eher größere oder kleinere Werte als die andere

liefert (systematischer Messfehler), ob die Größe der Differenzen von der Größe der gemessenen Werte abhängig ist und wie groß die Schwankungsbreite der Differenzen ist, wurden Bland-Altman-Diagramme (siehe Abbildungen 25 bis 29) erstellt (Giavarina, 2015).

In den Bland-Altman-Diagrammen werden die Werte einer Überlagerungsmethode mit den Werten einer anderen Überlagerungsmethode für eine bestimmte Bewegungsrichtung eines Zahnes verglichen, indem die Differenz der erhaltenen Werte in Relation zu einer Bezugsgröße gestellt wird. In dieser Arbeit wurde als Bezugsgröße der Mittelwert der beiden Werte gewählt. Als Bezugsgröße hätten auch nur die Einzelwerte einer der jeweiligen Überlagerungsmethoden genommen werden können. Das ist sinnvoll, wenn es einen Goldstandard geben würde. Hier gibt es keinen etablierten Goldstandard, daher wurde mit dem Mittelwert verglichen.

Exemplarisch für alle weiteren Bland-Altman-Diagramme zeigt der in Abbildung 25 vorgenommene Vergleich der Überlagerungsmethoden Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Weichteile für Zahn 25 für Vestibulärbewegungen einen typischen Befund (zugehöriges Streudiagramm siehe Abbildung 20). Meist sind die Differenzen der Messwerte für die beiden Methoden klein und daher liegen die Datenpunkte nahe an der x-Achse. Der Bias ist demzufolge sehr nahe bei 0. Somit liegen allenfalls sehr geringfügige systematische Abweichungen der einen gegenüber der anderen Überlagerungsmethode vor. Die Datenpunkte für die meisten Differenzen liegen innerhalb des Toleranzbereichs. Allerdings gibt es - wenn auch wenige - erhebliche Ausreißer. Aus dem Diagramm ergeben sich keine Hinweise darauf, dass die Größe der Differenzen zwischen den Messwerten der beiden Überlagerungsmethoden abhängig von der Größe der gemessenen Werte ist. Für Vestibulärbewegungen des Zahnes 25 liefern die Überlagerungsmethoden Maxilla an Maxilla und Maxilla an Weichteile somit meist annähernd gleiche Ergebnisse und sind insoweit gleichwertig. Das Bland-Altman-Diagramm (siehe Abbildung 25) bestätigt die anhand des zugehörigen Streudiagramms (siehe Abbildung 20) vorgenommene Beurteilung, liefert jedoch noch die Zusatzinformation, dass die Differenzen zwischen den Messwerten nicht von der Größe der Messwerte abhängen.

Abbildung 26 enthält eine Gesamtdarstellung für alle drei Überlagerungsmethoden für Zahn 25 für Vestibulärbewegungen in einem Diagramm (zugehöriges Streudiagramm siehe Abbildung 21). Mit der gleichen Argumentation wie oben lässt sich begründen, dass beim paarweisen Vergleich aller drei Überlagerungsmethoden allenfalls nur geringfügige systematische Messfehler vorliegen und nichts darauf hindeutet, dass die Größe der Differenzen zwischen den Messwerten der Überlagerungsmethoden abhängig von der Größe der gemessenen Werte ist. Die Toleranzbereiche für die drei Vergleiche überdecken sich beziehungsweise liegen ineinander, d.h. es gibt keine Hinweise auf statistisch signifikante Unterschiede zwischen den paarweise verglichenen Überlagerungsmethoden. Der Toleranzbereich für den paarweisen Vergleich der Überlagerungsmethoden Maxilla an Maxilla mit der Überlagerungsmethode Maxilla an Maxilla verlässlich ist kleiner als bei den anderen beiden Vergleichen, das heißt, die mittels dieser Überlagerungsmethoden ermittelten Werte liegen öfter näher beieinander als bei den anderen miteinander verglichenen Überlagerungsmethoden. Dieser kleine Unterschied ändert nichts an der Einschätzung, dass alle drei Überlagerungsmethoden als gleichwertig anzusehen sind. Dies bestätigt die anhand des zugehörigen Streudiagramms (siehe Abbildung 21) vorgenommene Beurteilung.

Abbildung 27 enthält eine Gesamtdarstellung für alle drei Überlagerungsmethoden für Zahn 26 für Mesialbewegungen in einem Diagramm (zugehöriges Streudiagramm siehe Abbildung 22). Der jeweilige Bias beim paarweisen Vergleich der Differenzen der drei Überlagerungsmethoden liegt nahe bei 0. Die Toleranzbereiche für die drei Vergleiche überdecken sich beziehungsweise liegen ineinander, d.h. es gibt keine Hinweise auf statistisch signifikante Unterschiede zwischen den paarweise verglichenen Überlagerungsmethoden. Der Toleranzbereich für den paarweisen Vergleich der Überlagerungsmethoden Maxilla an Maxilla mit der Überlagerungsmethode Maxilla an Maxilla verlässlich ist kleiner als bei den anderen beiden Vergleichen. Insoweit gelten die gleichen Aussagen wie bei Abbildung 26. Auffällig ist, dass die Differenzen beim Vergleich Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Maxilla verlässlich geringer streuen als bei den anderen beiden Vergleichen. Außerdem sind bei diesem Vergleich weniger Ausreißer und diese auch nur knapp außerhalb des Toleranzbereiches zu sehen. Diese beiden Überlagerungsmethoden lie-

fern im paarweisen Vergleich also eher besser übereinstimmende Ergebnisse als die anderen. Dies deckt sich mit dem entsprechenden Befund beim zugehörigen Streudiagramm (siehe Abbildung 22). Während bei diesem Streudiagramm die rein optische Auswertung um eine ausführliche Argumentation unter Verwendung von Steigung und Bestimmtheitsmaß ergänzt werden musste, ergibt sich dies aus dem Bland-Altman-Diagramm (siehe Abbildung 27) schon rein optisch durch Vergleich der dort ausgewiesenen Toleranzbereiche. Nichts deutet daraufhin, dass die Größe der Differenzen zwischen den Messwerten der Überlagerungsmethoden oder das Auftreten von Ausreißern abhängig von der Größe der gemessenen Werte ist.

Abbildung 28 enthält eine Gesamtdarstellung für alle drei Überlagerungsmethoden für Zahn 22 für Okklusalbewegungen in einem Diagramm (zugehöriges Streudiagramm siehe Abbildung 23). Die Schlussfolgerungen sind insoweit ähnlich, wie bei den vorstehend besprochenen Diagrammen (siehe Abbildungen 26 und 27). Hinsichtlich der Toleranzbereiche ist anzumerken: Der Toleranzbereich des Vergleichs Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Maxilla verlässlich wird von den Toleranzbereichen der beiden anderen paarweisen Vergleiche (Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Weichteile und Maxilla an Weichteile mit Maxilla an Maxilla verlässlich) überdeckt (liegt innerhalb dieser Toleranzbereiche). Der Toleranzbereich des Vergleichs Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Weichteile und der Toleranzbereich des Vergleichs Maxilla an Weichteile mit Maxilla an Maxilla verlässlich sind geringfügig gegeneinander verschoben, überdecken sich aber zum größten Teil. Es gibt somit keinen Hinweis auf statistisch signifikante Unterschiede zwischen dem Vergleich Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Maxilla verlässlich und dem Vergleich Maxilla mit Maxilla an Maxilla an Weichteile und auch keinen Hinweis auf statistisch signifikante Unterschiede zwischen dem Vergleich Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Maxilla verlässlich und Maxilla an Weichteile mit Maxilla an Maxilla verlässlich. Die Toleranzbereiche von Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Weichteile und Maxilla an Weichteile mit Maxilla an Maxilla verlässlich haben einen sehr großen Überdeckungsbereich. Die geringfügige Verschiebung dieser Toleranzbereiche gegeneinander ist daher nicht als ein Hinweis auf statistisch signifikante Unterschiede zwischen diesen beiden Methoden anzusehen.

Auffällig ist jedoch, dass Ausreißer insbesondere bei Intrusionsbewegungen größer als 1,5 mm auftreten. Wie bei der Diskussion des Streudiagramms (siehe Abbildung 23) schon angemerkt, liefert auch das Bland-Altman-Diagramm (siehe Abbildung 28) einen Hinweis darauf, dass OnyxCeph³ für die Erfassung von Intrusionsbewegungen über 1,5 mm nicht hinreichend genau zu sein scheint. Für den Vergleich Maxilla an Weichteile mit Maxilla an Maxilla verlässlich ist im zugehörigen Streudiagramm (siehe Abbildung 23) optisch gut zu erkennen, dass die dazu ermittelte Regressionsgerade eine deutlich kleinere Steigung als die Regressionsgeraden der anderen Vergleiche hat. Dies deutet daraufhin, dass die Überlagerungsmethode Maxilla an Maxilla verlässlich im Vergleich zur Überlagerungsmethode Maxilla an Weichteile tendenziell für Intrusionen kleinere und für Extrusionen größere Werte liefert. Dies ist beim Bland-Altman-Diagramm (siehe Abbildung 28) nicht so augenfällig.

Abbildung 29 enthält eine Gesamtdarstellung für alle drei Überlagerungsmethoden für Zahn 25 für Angulationen in einem Diagramm (zugehöriges Streudiagramm siehe Abbildung 24). Die weit überwiegende Anzahl an paarweisen Vergleichen weist nur geringe Differenzen zwischen den paarweisen Messwerten auf. Dementsprechend liegen die jeweiligen Werte für den Bias nahe bei 0. Nichts deutet daraufhin, dass die Größe der Differenzen zwischen den Messwerten der Überlagerungsmethoden abhängig von der Größe der gemessenen Werte ist. Die Toleranzbereiche für die drei Vergleiche überdecken sich und liegen ineinander; eine sehr geringfügige Verschiebung des Toleranzbereiches des Vergleichs Maxilla an Maxilla mit Maxilla an Maxilla verlässlich gegenüber dem Toleranzbereich des Vergleichs Maxilla an Weichteile mit Maxilla an Maxilla verlässlich ist optisch kaum wahrnehmbar. Es gibt somit keine Hinweise auf statistisch signifikante Unterschiede zwischen den paarweise verglichenen Überlagerungsmethoden. Auffällig sind jedoch einige wenige große Ausreißer weit außerhalb der Toleranzbereiche.

Die vorstehend diskutierten Diagramme (siehe Abbildungen 20 bis 29) eignen sich sehr gut, um einzelne Bewegungen differenziert zu analysieren. Eine Gesamtübersicht kann jedoch besser in Form einer Tabelle mit Kennzahlen vermittelt werden. Tabelle 12 weist für die exemplarisch im zweiten Quadranten ausgewählten Zähne für alle untersuchten Bewegungen als Kennzahlen die ermittelten Ortsverschiebungen, Maßstabsänderungen

und Konkordanz-Korrelationskoeffizienten nach Lin (Hilgers et al., 2018, Koch und Spörl, 2007) aus. Die dort ausgewiesenen Ortsverschiebungen für Translationen bewegen sich im Bereich von -0,042 bis 0,029 bzw. für Angulationen im Bereich von -0,004 bis 0,004. Die Maßstabsänderungen bewegen sich für Translationen im Bereich von -0,126 bis 0,091 bzw. für Angulationen im Bereich von -0,086 bis 0,048. Werte für die Konkordanz-Korrelationskoeffizienten reichen von 0,683 bis 0,976. Die sehr geringen Ortsverschiebungen deuten darauf hin, dass beim paarweisen Vergleich der drei Überlagerungsmethoden hinsichtlich dieses Parameters keine wesentlichen Unterschiede bestehen. Keine der Überlagerungsmethoden liefert tendenziell größere Werte als die anderen und dies gilt im gesamten Messbereich. Die geringen Maßstabsänderungen deuten darauf hin, dass beim paarweisen Vergleich der drei Überlagerungsmethoden hinsichtlich dieses Parameters keine wesentlichen Unterschiede bestehen. Keine der Überlagerungsmethoden verzerrt tendenziell im Vergleich mit den anderen den Maßstab (Stauchung, Streckung). Von den Konkordanz-Korrelationskoeffizienten liegen nur drei (mit den Werten 0,683; 0,748; 0,797) unter 0,8, alle anderen sind größer, davon mehr als die Hälfte sogar größer als 0,9. In dieser Gesamtübersicht (siehe Tabelle 12) zeigt sich also eine sehr hohe Übereinstimmung zwischen den jeweils paarweise verglichenen Überlagerungsmethoden. Es fällt auf, dass die drei oben genannten kleinsten Konkordanz-Korrelationskoeffizienten jeweils bei den Seitenzähnen (25 und 26) mit mesialer Bewegungsrichtung auftreten. Die Mesialbewegung von Zahn 26 ist unter zu Hilfenahme eines Streudiagramms (siehe Abbildung 22) und eines Bland-Altman-Diagramms (siehe Abbildung 27) detailliert beschrieben und diskutiert worden. Dass die drei kleinsten Konkordanz-Korrelationskoeffizienten bei Mesialbewegungen von Molar 26 und Prämolaren 25 auftreten, ist im Hinblick auf die dortigen Befunde stimmig.

Generell ist hier noch auf eine allen statistischen Verfahren gemeinsame Eigentümlichkeit hinzuweisen. Wenn ein solches Verfahren in einer Vielzahl von Fällen zur Anwendung kommt, treten unvermeidlich unter den Ergebnissen auch solche auf, die weiter von den ansonsten erzielten Ergebnissen abweichen. Wenn wie hier eine Tabelle (siehe Tabelle 12) mit 108 Kennzahlen zusammengestellt wird, könnten darunter einige sein, bei denen dieses Phänomen aufgetreten ist. Insofern ist nicht ganz auszuschließen, dass es sich hier um ein rein statistisches Phänomen handelt.

Als Gesamtfazit für den klinischen Abschnitt ist festzuhalten, dass die drei hier verglichenen Überlagerungsmethoden im paarweisen Vergleich gut übereinstimmende Werte liefern, dabei jedoch – wenn auch selten – mit Ausreißern gerechnet werden muss. Für Untersuchungen, bei denen eine Vielzahl von Überlagerungen durchgeführt werden und aus diesen ein Gesamtergebnis abgeleitet wird, kann davon ausgegangen werden, dass sich die Gesamtergebnisse wenig voneinander unterscheiden, egal welche der drei hier untersuchten Überlagerungsmethoden angewandt wird. Wird nur für einen Einzelfall eine Überlagerung durchgeführt, dann könnte es durchaus sein, dass in diesem Einzelfall die drei Überlagerungsmethoden erheblich voneinander abweichende Ergebnisse liefern. Letzteres ist jedoch nur selten der Fall.

5. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden drei verschiedene Überlagerungsmethoden von OnyxCeph³ zur Bestimmung kieferorthopädischer Zahnbewegungen untersucht und miteinander verglichen. Die Arbeit umfasst einen experimentellen und einen klinischen Abschnitt.

Im experimentellen Abschnitt wurden Zahnbewegungen mit selbst hergestellten physischen Modellen simuliert. Die Zahnbewegungen wurden hochpräzise mit einem Hexapoden auf $\pm 2 \mu\text{m}$ bzw. $\pm 10 \mu\text{rad}$ vorgegeben, Anfangs- und Endpositionen mit dem Intraoralscanner TRIOS, als digitale 3D-Modelle erfasst und dann wurde untersucht, ob die vorgegebenen Bewegungen von der Auswertungssoftware OnyxCeph³ zuverlässig ermittelt werden. Durchgeführte Wiederholungsversuche ergaben keine Hinweise auf Mängel im Versuchsaufbau. Dieser lieferte unabhängig davon, welche der drei untersuchten Überlagerungsmethoden angewendet wurde, sinnvoll interpretierbare und reproduzierbare Ergebnisse. Umfangreiche Messreihen bestätigten dieses Ergebnis. Sehr geringe Ortsverschiebungen für Translationen (von $-0,015$ bis $0,061$) bzw. für Angulationen (von $-0,072$ bis $0,022$), nur geringe Maßstabsänderungen für Translationen (von $-0,029$ bis $0,031$) bzw. für Angulationen (von $0,013$ bis $0,042$) und Konkordanz-Korrelationskoeffizienten sehr nahe bei 1 (für Translationen von $0,990$ bis $1,000$; für Angulationen von $0,995$ bis $1,000$) verifizierten die Aussage, dass sich unabhängig von der verwendeten Überlagerungsmethode für die damit ermittelten Werte sehr gute Übereinstimmungen mit den vorgegebenen Werten ergeben.

Im klinischen Abschnitt wurde untersucht, ob die drei Überlagerungsmethoden zu übereinstimmenden Ergebnissen bei durch kieferorthopädische Behandlungen bewirkten Zahnbewegungen kommen. Ein Vergleich mit genauen Referenzgrößen (Goldstandard) für die Messung von solchen Bewegungen steht nicht zur Verfügung. Typischerweise verändert eine kieferorthopädische Behandlung mehr oder weniger den gesamten Zahnbogen, so dass keine festen unveränderten Bereiche für die Überlagerung genutzt werden können. Trotz der dadurch bedingten Erschwernisse lieferten alle drei Überlagerungsmethoden gut übereinstimmende Werte. Die Ortsverschiebungen für Translationen lagen im Bereich von $-0,042$ bis $0,029$ bzw. für Angulationen im Bereich von $-0,004$ bis $0,004$. Die

Maßstabsänderungen lagen für Translationen im Bereich von -0,126 bis 0,091 bzw. für Angulationen im Bereich von -0,086 bis 0,048. Die Werte für Konkordanz-Korrelationskoeffizienten reichten von 0,683 bis 0,976, wobei nur drei (mit den Werten 0,683; 0,748; 0,797) unter 0,8 lagen, alle anderen größer, davon mehr als die Hälfte sogar größer als 0,9. Insbesondere lieferte keine der Überlagerungsmethoden tendenziell höhere Werte als eine andere und keine arbeitete im Vergleich zu einer anderen mit einem tendenziell verzerrten Maßstab. Bei allen Überlagerungsmethoden traten jedoch mitunter Ausreißer auf. Insgesamt erscheint es daher gerechtfertigt, alle drei untersuchten Überlagerungsmethoden als gleichwertig anzusehen, die akzeptabel übereinstimmende Werte liefern.

Mit welcher Zuverlässigkeit die Bestimmung von kieferorthopädischen Zahnbewegungen mit einer dieser Überlagerungsmethoden erfolgt, kann durch den Vergleich der Überlagerungsmethoden untereinander nicht ermittelt werden. Die sehr gute Übereinstimmung im experimentellen Abschnitt zwischen gemessenen und vorgegebenen Zahnbewegungen und die gute Übereinstimmung der Messwerte im klinischen Abschnitt beim Vergleich verschiedener Überlagerungsmethoden untereinander ist jedoch ein Indiz dafür, dass klinische kieferorthopädische Zahnbewegungen in etwa zutreffend ermittelt werden.

6. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Orthopantomogramm (modifiziert nach Cosson, 2020)	9
Abb. 2: a) Fernröntgenseitenbild (modifiziert nach Durão et al., 2015) und b) FRS-Durchzeichnung (modifiziert nach Nötzel, 2023).....	10
Abb. 3: Ausschnitte aus einer digitalen Volumentomografie in allen drei Ebenen a) axial, b) koronal, c) sagittal, d) 3D-Rekonstruktion (modifiziert nach Schlegel und Blanke, 2011)	11
Abb. 4: Farbcodierte DVT-Überlagerungsmodelle von a) rechts lateral, b) frontal, c) links lateral d) Legende (modifiziert nach Cevitanes et al., 2005)	13
Abb. 5: Fotos von a) 6er-Modell mit beweglichem Molar 26, b) 5er-Modell mit beweglichem Prämolare 25, c) 2er-Modell mit beweglichem Incisivus 22	18
Abb. 6: Biomechanischer Messaufbau HexMeS mit montiertem Modell	19
Abb. 7: Detaillierte Ansicht des montierten 2er-Modells vor Entfernung der Tiefziehschiene	19
Abb. 8: Fertig montiertes 2er-Modell	21
Abb. 9: 2er-Modell mit beweglichem Incisivus 22 a) in Neutralposition b) nach Translation in vestibulärer Richtung.....	24
Abb. 10: Bild eines 6er-Modells nach Import und Ausrichtung.....	26
Abb. 11: Bild des 6er-Modells nach der Segmentierung	27
Abb. 12: Bilder von paarweisen Überlagerungen des 6er-Modells vor und nach einer Vestibulärbewegung von 4 mm des Zahnes 26 mit Überlagerungsmethode a) Maxilla an Maxilla, b) Maxilla an Weichteile, c) Maxilla an Maxilla verlässlich.....	29
Abb. 13: Bilder von paarweisen Überlagerungen vor und nach einer kieferorthopädischen Behandlung mit Überlagerungsmethode a) Maxilla an Maxilla, b) Maxilla an Weichteile, c) Maxilla an Maxilla verlässlich	35
Abb. 14: Ergebnisse für Gesamttranslationen für vorgegebene Palatinalbewegungen von 5 bzw. 1 mm für sechsmalige Versuchsdurchführungen	39
Abb. 15: Ergebnisse für Gesamttranslationen für vorgegebene Intrusionsbewegungen von 4 bzw. 1 mm für sechsmalige Versuchsdurchführungen	40

Abb. 16: Ergebnisse für die Angulation für vorgegebene Angulationsbewegungen von 10 bzw. 1 ° für sechsmalige Versuchsdurchführungen	41
Abb. 17: Werte für Translationen über Wert für vorgegebene Mesialbewegung für das 6er-Modell für die Überlagerungsmethode Maxilla an Maxilla	43
Abb. 18: Wert für Gesamttranslation über Wert für vorgegebene Mesialbewegung für das 6er-Modell für alle drei Überlagerungsmethoden	44
Abb. 19: Wert für Angulation über Wert für vorgegebene Angulation für das 6er-Modell für alle drei Überlagerungsmethoden	46
Abb. 20: Streudiagramm für Werte von Maxilla an Weichteile über Werte von Maxilla an Maxilla für Zahn 25 für Vestibulärbewegungen	50
Abb. 21: Streudiagramme für Werte einer Überlagerungsmethode über Werte einer anderen Überlagerungsmethode für alle drei Überlagerungsmethoden für Zahn 25 für Vestibulärbewegungen	51
Abb. 22: Streudiagramme für Werte einer Überlagerungsmethode über Werte einer anderen Überlagerungsmethode für alle drei Überlagerungsmethoden für Zahn 26 für Mesialbewegungen.....	52
Abb. 23: Streudiagramme für Werte einer Überlagerungsmethode über Werte einer anderen Überlagerungsmethode für alle drei Überlagerungsmethoden für Zahn 22 für Okklusalbewegungen	53
Abb. 24: Streudiagramme für Werte einer Überlagerungsmethode über Werte einer anderen Überlagerungsmethode für alle drei Überlagerungsmethoden für Zahn 25 für Angulationen.....	54
Abb. 25: Differenz zwischen Wert von Maxilla an Maxilla und Maxilla an Weichteile über dem Mittelwert beider Messwerte für Zahn 25 für Vestibulärbewegung ..	55
Abb. 26: Differenz zwischen Wert einer Überlagerungsmethode und einer anderen Überlagerungsmethode über dem Mittelwert beider Messwerte für alle drei Überlagerungsmethoden für Zahn 25 für Vestibulärbewegungen	56
Abb. 27: Differenz zwischen Wert einer Überlagerungsmethode und einer anderen Überlagerungsmethode über dem Mittelwert beider Messwerte für alle drei Überlagerungsmethoden für Zahn 26 für Mesialbewegungen	57

- Abb. 28:** Differenz zwischen Wert einer Überlagerungsmethode und einer anderen Überlagerungsmethode über dem Mittelwert beider Messwerte für alle drei Überlagerungsmethoden für Zahn 22 für Okklusalbewegungen 58
- Abb. 29:** Differenz zwischen Wert einer Überlagerungsmethode und einer anderen Überlagerungsmethode über dem Mittelwert beider Messwerte für alle drei Überlagerungsmethoden für Zahn 25 für Angulationen 59

7. Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Vorgegebene experimentell durchgeführte Bewegungen beim 6er-Modell.....	23
Tab. 2:	Vorgegebene experimentell durchgeführte Bewegungen beim 5er-Modell.....	23
Tab. 3:	Vorgegebene experimentell durchgeführte Bewegungen beim 2er-Modell.....	23
Tab. 4:	Wiederholungsversuche für vorgegebene Bewegungen beim 5er-Modell	25
Tab. 5:	Ausschnitt aus einer Auswertungstabelle von OnyxCeph ³	30
Tab. 6:	Bei Wiederholungsversuchen im 5er-Modell mit Vorgabe 1 mm Palatinalbewegung für die Gesamttranslation erzielte Ergebnisse.....	38
Tab. 7:	Bei Wiederholungsversuchen im 5er-Modell mit Vorgabe 1 ° Angulation erzielte Ergebnisse für die Angulation	40
Tab. 8:	Ergebnisse bei vorgegebenen Mesialbewegungen für die Überlagerungsmethode Maxilla an Maxilla beim 6er-Modell	42
Tab. 9:	Ergebnisse bei vorgegebenen Angulationen	45
Tab. 10:	Kennzahlen für Messreihen zur Übereinstimmung der Ergebnisse von OnyxCeph ³ mit jeweils vorgegebenen Bewegungen	47
Tab. 11:	Arithmetische Mittelwerte und Konfidenzintervalle der Differenzen beim paarweisen Vergleich der drei Überlagerungsmethoden für die Zähne 26, 25 und 22 für alle untersuchten Bewegungen.....	49
Tab. 12:	Kennzahlen für die Übereinstimmung der Ergebnisse von OnyxCeph ³ für paarweise miteinander verglichene Überlagerungsmethoden	60

8. Literaturverzeichnis

Al Borney M, 1999: Verwendung des Fernröntgenseitenbildes des Kopfes und des Orthopantomogramms zur metrischen Analyse des Schädels in der Kieferorthopädie. Eine vergleichende Studie. Med Diss Universität Gießen. <http://geb.uni-giessen.de/geb/volltexte/1999/92/pdf/AlBorneyMajed-1999-11-23.pdf> (Zugriffsdatum 17.05.2023)

Akyalcin S, Dyer DJ, English JD, Sar C. Comparison of 3-dimensional dental models from different sources: Diagnostic accuracy and surface registration analysis. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2013; 144: 831-837

Ashmore AL, Kurland BF, King GJ, Wheeler TT, Ghafari J, Ramsay DS. A 3-dimensional analysis of molar movement during headgear treatment, *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2002; 121:18-29

Broadbent BH. A new x-ray technique and its application to orthodontia. *The Angle Orthod* 1931; 1: 45-66

Cevitanes LHS, Bailey LJ, Tucker Jr GR, Styner MA, Mol A, Phillips CL, Proffit WR, Turvey T. Superimposition of 3D cone-beam CT models of orthognathic surgery patients. *Dentomaxillofac Radiol* 2005; 34: 369-375

Chen G, Chen S, Zhang XY, Jiang RP, Liu Y, Shi FH, Xu TM. Stable region for maxillary dental cast superimposition in adults, studied with the aid of stable miniscrews. *Orthod Craniofac Res* 2011; 14: 70-79

Chen Y, Medioni G, 1991: Object modeling by Registration of Multiple Range Images. In: Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Sacramento, CA, 2724-2729. <http://dx.doi.org/10.1109/ROBOT.1991.132043> (Zugriffsdatum 15.03.2023)

Choi D-S, Jeong Y-M, Jang I, Jost-Brinkmann PG, Cha B-K. Accuracy and reliability of palatal superimposition of three-dimensional digital models. *Angle Orthod* 2010; 80: 685-691

Cosson J, 2020: Interpreting an orthopantomogram. *Aust J Gen Pract* 2020; 49: 550-555. doi: 10.31128/AJGP-07-20-5536 (Zugriffsdatum 20.05.2023)

Cui N, Wang J, Hou X, Sun S, Huang Q, Lim HK, Cai H, Jia Q, Lee ES, Jiang HB, 2021: Bias Evaluation of the Accuracy of Two Extraoral Scanners and an Intraoral Scanner Based on ADA Standards. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8213502/pdf/SCANNING2021-5535403.pdf> (Zugriffsdatum: 03.10.2021)

Durão AR, Alqerban A, Ferreira AP, Jacobs R. Influence of lateral cephalometric radiography in orthodontic diagnosis and treatment planning. *Angle Orthod* 2015. 85: 206-120

ElNaghy R, Amin S, Hasanin M. 2021: 'Concepts and Clinical Applications of Intraoral 3D Scanning in the Management of Patients with Orofacial Clefts'. *Recent Advances in the Treatment of Orofacial Clefts*. IntechOpen. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.99166> (Zugriffsdatum 14.05.2023)

Franco CS, 2018: A comparison of two 3-dimensional mandibular superimposition techniques and a 2-dimensional superimposition technique against Bjork's structural method. Thesis, The University of Queensland, School of Dentistry, Faculty of Health and Behavioral Sciences. <https://doi.org/10.14264/uql.2019.5> (Zugriffsdatum: 16.07.2021)

Fuhrmann A. *ZMK Praxis Zahnärztliche Radiologie*. Stuttgart, Georg Thieme Verlag KG, 2013: 93

Garib D, Miranda F, Yatabe MS, Lauris JRP, Massaro C, McNamara Jr JA, Kim-Berman H, Janson G, Behrents RG, Cevidanes LHS, de Oliveira Ruellas AC. Superimposition of maxillary digital models using the palatal rugae: Does ageing affect the reliability? *Orthod Craniofac Res* 2019; 22: 183-193

Giavarina D. Understanding Bland Altman analysis. *Biochem Med* 2015; 25:141-151. <http://dx.doi.org/10.11613/BM.2015.015> (Zugriffsdatum 11.03.2022)

Grätzel von Grätz P, 2020: MRT: Der lange Weg zum Patienten. <https://www.siemens-healthineers.com/deu/perspectives/mri-history-long-path#:~:text=Im%20Jahr%201978%20fertigte%20ein,folgte%20noch%20im%20selben%20Jahr> (Zugriffsdatum: 12.05.2023)

Gupta G, Vaid N. The World of Orthodontic apps. *APOS Trends in Orthod* 2017; 7: 73

Hilgers R-D, Heussen N, Stanzel S. Konkordanz-Korrelationskoeffizient nach Lin. In: Gressner A, Arndt T, eds. *Lexikon der Medizinischen Laboratoriumsdiagnostik*. Springer Reference Medizin. Berlin, Heidelberg: Springer, 2018: https://doi.org/10.1007/978-3-662-49054-9_1748-1 (Zugriffsdatum: 18.01.2023)

Hofrath H. Die Bedeutung von Röntgenfern- und Abstandsaufnahme für die Diagnostik der Kieferanomalien. *Fortschritte der Orthodontik in Theorie und Praxis* 1931; 1: 232-258

Keilig L, Bourauel C, Grüner M, Hültenschmidt R, Bayer S, Utz K-H, Stark H. Aufbau und Erprobung eines neuartigen Meßsystems für die dentale Biomechanik – Meßprinzip und Beispielmessungen des Hexapod-Meß-Systems. *Biomed Technik* 2004; 49: 208-215

Koch R, Spörl E. Statistische Verfahren zum Vergleich zweier Messmethoden und zur Kalibrierung: Konkordanz-, Korrelations- und Regressionsanalyse am Beispiel der Augennendruckmessung *Statistical Methods for Comparison of Two Measuring Procedures and for Calibration: Analysis of Concordance, Correlation and Regression in the Case of Measuring Intraocular Pressure*. *Klin Monatsbl Augenheilkd* 2007; 224: 52-57

Kratzer LD, 2016: Kriterienbasierte Evaluation von Internetauftritten niedergelassener Kieferorthopäden. *Med Diss Universität Hamburg*. <https://ediss.sub.uni-hamburg.de/bitstream/ediss/7229/1/Dissertation.pdf> (Zugriffsdatum 17.05.2023)

Kusnoto B, Evans CA. Reliability of a 3D surface laser scanner for orthodontic applications. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2002; 122: 342-348

Li X, Xu Z-R, Tang N, Ye C, Zhu X-L, Zhou T, Zhao Z-H. Effect of intervention using a messaging app on compliance and duration of treatment in orthodontic patients. *Clinical Oral Investigations* 2016; 20: 1849-1859

Lim JH, Park JM, Kim M, Heo SJ, Myung JY. Comparison of digital intraoral scanner reproducibility and image trueness considering repetitive experience. *J Prosthet Dent* 2018; 119: 225-232

Mozzo P, Procacci C, Tacconi A, Martini PT, Andreis IA. A new volumetric CT machine for dental imaging based on the cone-beam technique: preliminary results. *Eur Radiol* 1998; 8: 1558-1564

Nötzel F: 2023. Fachpraxis für Kieferorthopädie. <https://www.zahnbewegung.info/fernroentgenanalyse.html> (Zugriffsdatum 20.05.2023)

Ponce-Garcia C, Lagravere-Vich M, Soares Cevidanes LH, de Olivera Ruellas AC, Carey J, Flores-Mir C. Reliability of three-dimensional anterior cranial base superimposition methods for assessment of overall hard tissue changes: A systematic review. *Angle Orthod* 2018; 88: 233-245

Samar MA, Nikhilesh RV, Nadia E-H, Hassan K, Abbas RZ. TIP, TORQUE & ROTATIONS: How accurately do digital superimposition software packages quantify tooth movement? *Progress in Orthodontics* 2022; 23: 8

Samar MA, Nikhilesh RV, Nadia E-H, Hassan K, Abbas RZ. Digital model superimpositions: are different software algorithms equally accurate in quantifying linear tooth movements? *BMC Oral Health* 2022; 22: 103

Schlegel H, Blanke D: 2011. DVT bietet erstaunliche Möglichkeiten. <https://www.zwp-online.info/fachgebiete/implantologie/digitale-verfahren/dvt-bietet-erstaunliche-moeglichkeiten> (Zugriffsdatum 20.05.2023)

Schulze R. Lehrbuch Zahnärztliches Röntgen: Grundlagen, Technik, Anwendung Hintergrundinformationen. Johannes Gutenberg-Universität Mainz, 2019; 209-210

Strunga M, Urban R, Surovková J, Thurzo A. Artificial Intelligence Systems Assisting in the Assessment of the Course and Retention of Orthodontic Treatment. *Healthcare* 2023; 11: 683

Subramanian AK, Chen Y, Almalki A, Sivamurthy G, Kafle D. Cephalometric Analysis in Orthodontics Using Artificial Intelligence - A Comprehensive Review. *BioMed Research International* 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/1880113> (Zugriffsdatum 12.05.2023)

Talaat S. Novel methods for superimposition of digital maxillary models and 3D assessment of orthodontic tooth movement. PhD Diss Universität Bonn 2019

Talaat S, Kaboudan A, Breuning H, Ragy N, Elshebiny T, Kula K, Ghoneima A. Reliability of linear and angular dental measurements with the OrthoMechanics Sequential Analyzer. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2015; 147: 264-269

Talaat S, Kaboudan A, Bourauel C, Ragy N, Kula K, Ghoneima A. Validity and reliability of three-dimensional palatal superimposition of digital dental models. *Eur J Orthod* 2017; 39: 365-370

Thiruvengkatachari B, Al-Abdallah M, Akram NC, Sandler J, O'Brien K. Measuring 3-dimensional tooth movement with a 3-dimensional surface laser scanner. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2009; 135: 480-485

Weissheimer A, Menezes LM, Koerich L, Pham J, Cevidanes LHS. Fast three-dimensional superimposition of cone beam computed tomography for orthopaedics and orthognathic surgery evaluation. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2015; 44: 1188-1196

9. Danksagung

Von den ersten Überlegungen zu möglichen Fragestellungen und der Recherche diesbezüglich relevanter Literatur, über die Präzisierung der aufgeworfenen Fragen und die Erstellung des Konzeptes zu deren Beantwortung, das Anfertigen von Modellen, dem zweckmäßigen Einsatz der Laborgeräte, der Erhebung von Messreihen, deren Visualisierungen und statistischer Auswertungen und schließlich der Formulierung der erzielten Ergebnisse tauchen mancherlei Hindernisse auf, bis eine Promotionsschrift vorgelegt werden kann. Auf dem Weg dahin und bei der Überwindung der dabei im Weg stehenden Hindernisse haben mich viele freundliche und hilfsbereite Menschen tatkräftig unterstützt:

An erster Stelle gilt meinem Doktorvater Herr Prof. Bourauel außerordentlicher Dank für seine fortwährende geduldige Unterstützung in allen Bearbeitungsphasen dieser Dissertation: Von der ersten Fragestellung mit Hinweisen auf einschlägige Publikationen, über Lösungsvorschläge bei methodischen Problemen im Labor, Fachgespräche hinsichtlich der Relevanz der erzielten Ergebnisse bis hin zu Einzelproblemen wie z.B. die Erstellung von auch in DIN A5 lesbaren Grafiken, stets stand er hilfreich, konstruktiv und motivierend zur Seite.

An zweiter Stelle möchte ich mich bei Herrn Dr. Keilig bedanken, der mich insbesondere in der Versuchsdurchführung und bei den statistischen Auswertungen unterstützt hat. Ohne seine gründliche Einweisung in die Labortechnik, insbesondere die Bedienung des Hexapoden und seine Hinweise zu statistischen Auswertungen der damit erhaltenen Messreihen hätten die hier vorgelegten Ergebnisse nicht erzielt werden können.

Besonderer Dank gilt Herrn Dr. Daratsianos, für die zur Verfügung gestellten Patientendaten aus der KFO-Datenbank der Poliklinik für Kieferorthopädie am Universitätsklinikum Bonn und die sorgfältige Einweisung in die Bedienung des Interoralscanners TRIOS.

Ebenfalls besonderer Dank gilt Frau Klinikhammer. Ihre sachkundigen Hinweise und die von Ihr hinsichtlich der benötigten Auswertungen passgenau zur Verfügung gestellte Literatur liegen den statistischen Auswertungen dieser Arbeit zu Grunde.

Weiter gilt mein Dank Frau Kühnert, Herrn Dr. R Kühnert, Herrn Dr. T. Kühnert, Herrn Hennig und weiteren Mitarbeiter*innen der Firma Image Instruments GmbH. Die mir kostenfrei zur Verfügung gestellte Einzelplatzlizenz der Software OnyxCeph³ wäre ohne deren geduldige, ausführliche und sehr kompetenten Hinweise und Ratschläge zur Bedienung nicht nutzbar gewesen.

Last but not least möchte ich meinen Eltern, Geschwistern und Freunden für Ihre großartige Unterstützung und Motivierung danken