

Aus dem Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin und der
MESANTIS 3D DENTAL-RADIOLOGIE Berlin

DISSERTATION

**Genauigkeit von digitalen Ganzkiefermodellen mit
Desktopscannern im Vergleich zu Intraoralscannern
und DVT-Scan**

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor medicinae dentariae
(Dr. med. dent.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Roxana Nowak

aus Berlin

Datum der Promotion: 7.12.2018

**Für meine Eltern Monika und Michal
und meine Schwester Patricia**

Anmerkung

Die vorliegende kumulative Dissertation bildet eine Zusammenfassung der folgenden veröffentlichten und angenommenen Teilergebnisse:

Publikation 1

Nowak R, Wesemann C, Robben J, Muallah J, Bumann A. An in-vitro study comparing the accuracy of full-arch casts digitized with desktop scanners. Quintessence Int. 2017; 48(8): 667-676

Publikation 2

Muallah J, Wesemann C, Nowak R, Robben J, Mah J, Pospiech P, Bumann A. Accuracy of full-arch scans using intraoral and extraoral scanners: an in vitro study using a new method of evaluation. Int J Comput Dent. 2017; 20(2):151-164

Publikation 3

Robben J, Muallah J, Wesemann C, Nowak R, Mah J, Pospiech P, Bumann A. Suitability and accuracy of CBCT model scan: An in vitro study. Int J Comput Dent. 2017;20(4):363-375

Publikation 4

Wesemann C, Muallah J, Nowak R, Robben J, Bumann Genauigkeit von digitalisierten Ganzkiefermodellen – Ein Überblick direkter und indirekter Verfahren für die Kieferorthopädie. A. Quintessenz Zahntechnik. 2017; 43(10):2-12.

Abkürzungsverzeichnis

<i>AL</i>	<i>Arch Length</i>
<i>CT</i>	<i>Computertomographie</i>
<i>DGZMK</i>	<i>Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde</i>
<i>DICOM</i>	<i>Digital Imaging and Communications in Medicine</i>
<i>DVT</i>	<i>Digitale Volumetomographie</i>
<i>ICW</i>	<i>Intercanineweite</i>
<i>IMW</i>	<i>Intermolarenweite</i>
<i>STL</i>	<i>Standard-Tessellation-Language</i>

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung.....	6
1.1. <i>Abstract</i>	6
1.2. <i>Einführung</i>	8
1.3. <i>Methodik</i>	11
1.4. <i>Ergebnisse</i>	14
1.5. <i>Diskussion</i>	16
1.6. <i>Schlussfolgerung</i>	20
1.7. <i>Literaturverzeichnis</i>	21
2. Eidesstattliche Versicherung & ausführliche Anteilserklärung.....	23
<i>Eidesstattliche Versicherung</i>	23
<i>Anteilserklärung an den erfolgten Publikationen</i>	24
3. Druckexemplare der ausgewählten Publikationen.....	26
3.1. <i>Publikation 1</i>	27
3.2. <i>Publikation 2</i>	37
3.3. <i>Publikation 3</i>	50
3.4. <i>Publikation 4</i>	62
4. Lebenslauf.....	73
5. Publikationsliste.....	74
5.1. <i>Publikationen</i>	74
5.2. <i>Poster</i>	74
6. Danksagung.....	76

1. Zusammenfassung

1.1 Abstract

Abstract – Deutsch

Zielsetzung: Ziel der hier vorliegenden Arbeit war es, die Genauigkeit digitaler Ganzkiefermodelle, welche durch die Digitalisierung mittels Modellscanner, Intraoralscanner und DVT-Scan entstanden sind, in Vergleich zu setzen und ihre Einsetzbarkeit im klinischen Alltag zu untersuchen.

Methodik: Das Mastermodell wurde mit fünf Würfeln versehen, an denen jeweils eine Bohrung angebracht wurde. Die dadurch entstandenen Strecken Intermolarenweite (IMW), Intercaninenweite (ICW) und Zahnbogenlänge (AL) wurden mit einem Koordinatenmessgerät (Zeiss O-Inspect 422) vermessen. Das Modell wurde in Typ 3 Gips dubliert und ebenfalls vermessen. Die Intraoralscanner Apollo DI, CS 3500, iTero, PlanScan, True Definition und Trios, die Modellscanner Aadvä Lab Scan, Colori, CS Ultra, D104i, Grande, MDS 400, OrthoX Scan, R500, R1000, R2000, R700 und die DVT – Geräte, CS 9300, CS 9300 Select, CS 8100 3D Whitefox und Promax 3D wurden untersucht. Je Gerät wurden 37 Scans angefertigt. Die Stereolithografie – Daten wurden mit einer speziellen Messsoftware (Convince™ Premium 2012 (3Shape)) vermessen und den Masterwerten gegenübergestellt.

Ergebnisse: Die Digitalisierungsverfahren zeigten signifikante Unterschiede zueinander. Auch innerhalb der einzelnen Geräteklassen gab es signifikante Abweichungen. Die genauesten Ergebnisse bei den Modellscannern wiesen der D104i und R700 auf. Bei den Intraoralscannern erzielten Trios und iTero die genauesten Werte. Bei den DVT – Geräten zeigte der Whitefox die geringsten Abweichungen vom Masterwert.

Schlussfolgerung: Trotz statistisch signifikanter Abweichungen bei Intraoral - und Modellscannern, zeigen diese Geräteklassen für den kieferorthopädischen Gebrauch klinisch akzeptable Ergebnisse und eignen sich daher zum digitalen Archivieren, zur Diagnostik und zur Behandlungsplanung. Die Genauigkeit des indirekten Digitalisierungsverfahrens mittels DVT sollte in weiteren Studien evaluiert werden.

Abstract - English

Objective: The aim of this study was to compare the accuracy of full-arch scans digitized with desktop scanners, intraoral scanners and cone beam computed tomography (CBCT). Furthermore the applicability in everyday clinical practise was investigated.

Method: The ranges intermolar width (IMW), intercanine width (ICW) and arch length (AL) of the resin master model were measured using a coordinate measuring machine. (Zeiss O-Inspect 422).

The model was duplicated in type 3 plaster and measured as well.

The intraoral scanners Apollo DI, CS 3500, iTero, PlanScan, True Definition and the Trios, the desktop scanners Aadvia Lab Scan, Colori, CS Ultra, D104i, Grande, MDS 400, OrthoX Scan, R500, R1000, R2000, R700 and the CBCT devices CS 9300, CS 9300 Select, CS 8100 3D Whitefox and Promax 3D were evaluated. The master model was scanned 37 times. Using a special measuring software (Convince™ Premium 2012 (3Shape)) the ranges were measured and put into relation with the reference master model.

Results: Significant differences between the devices were shown. Looking at the desktop scanner, the most accurate results were yielded by the D104i and R700. In the group of intraoral scanner, Trios and iTero produced the most accurate data. Examining the CBCT devices, it is clearly shown that the Whitefox has the least discrepancy from the reference data.

Conclusion: Despite the statistically significant differences between the intraoral scanner and the desktop scanner, both devices show clinically acceptable results. Therefore both ways of digitization can be recommended for archiving, diagnostic and for treatment planning. The accuracy of the indirect digitization by CBCT devices should be examined in further studies.

1.2 Einführung

Die Abformung ist in der zahnärztlichen Prothetik und Kieferorthopädie die Arbeitsgrundlage für Diagnostik, Behandlungsplanung und Archivierung. Die Genauigkeit ist stark von der Erfahrung und den Fähigkeiten des Behandlers, den jeweiligen Materialeigenschaften und dem ausgewählten Abformlöffel abhängig. Gegenwärtig rückt neben der konventionellen Durchführung auch die digitale Abformung in den Fokus der Aufmerksamkeit. Auf diese Art wird versucht, die möglichen Fehlerquellen der konventionellen Abformung zu umgehen, Behandlungsabläufe zu beschleunigen und deren Erfolg zu maximieren.¹⁻³ Vorteilhaft zeigen sich dabei unter anderem die Reproduzierbarkeit, der Patientenkomfort, die Qualitätskontrolle und die Platzersparnis durch Datenarchivierung.⁴ Das Indikationsfeld beschränkte sich anfangs auf den prothetischen Bereich, in dem die detailgenaue Erfassung von Präparationsgrenzen im Mittelpunkt des Interesses stand. Seit Ende des 20. Jahrhunderts wird eine Vielzahl von Softwares für den kieferorthopädischen Gebrauch angeboten. Diese ermöglichen dem Behandler unter anderem digitale Modellanalysen, Alignertherapien und Darstellungen von Therapieverläufen.^{5,6} Darüber hinaus bieten einzelne Softwareanwendungen bereits den virtuellen Artikulator an.

Während in der Prothetik weitestgehend Wert auf kurze- bis mittelspannige Distanzen gelegt wird,⁷ werden in der Kieferorthopädie Ganzkieferscans für die Behandlung benötigt.⁸ Mehrere Untersuchungen bestätigen die Anwendbarkeit digitaler Scans in Prothetik und Kieferorthopädie.^{5-7,9}

Es werden direkte von den indirekten Digitalisierungsverfahren differenziert.

Die Modellscanner vertreten die Gruppe der indirekten Digitalisierungsgeräte und werden zurzeit am Häufigsten benutzt.^{8,10} Diese benötigen zur Herstellung eines digitalen Modells entweder eine Abformung oder ein physisches Modell.^{5,9,11}

Dementsprechend bleiben die potentiellen Fehlerquellen bestehen.

Optische Modellscanner bedienen sich des Triangulationsverfahrens. Dabei wird die dreidimensionale Datensatzberechnung innerhalb eines Dreiecks aus Lichtquelle, zu scannendem Objekt und Sensor mit Hilfe einer Winkel- und Abstandsmessung vollzogen. Die Lichtquellen sind entweder Laserstrahlen oder musterförmige Streifenlichtprojektionen. Mechanische Scanner erfassen die Daten mithilfe einer Kugel, die die Objektoberfläche abfährt.

Intraoralscanner digitalisieren direkt. Der konventionelle Prozess der Abformung in der Praxis, der die Auswahl des Abformlöffels und das Abwarten von Abbinde- und Desinfektionszeiten beinhaltet, sowie die Modellherstellung im Labor entfällt.

Stattdessen wird der Kiefer des Patienten in der Praxis gescannt und das digitale Modell steht unmittelbar zur Verfügung. Die Vorteile sind mannigfaltig. Gerade bei Patienten mit Würgereiz oder Zahnarztangst kann die Abformung wesentlich angenehmer gestaltet werden. Anhand der Echtzeitdarstellung besteht die Möglichkeit einer initialen Analyse und bei Bedarf einer Korrektur der Abformung. Im Vergleich zu den Modellscannern liegen mehrere Aufnahmeprinzipien vor, unter anderem: Die konfokale Mikroskopie, die Stereovermessung und ebenfalls das Triangulationsverfahren. Während die Stereovermessung sich für die Digitalisierung mehrerer Kameras im Intraoralscannerkopf bedient, werden bei der konfokalen Mikroskopie Strahlen parallel zum scannenden Objekt gesandt und wieder zurückgeworfen. Metallische Restaurationen oder Amalgamfüllungen lassen sich mit Intraoralscannern hervorragend abbilden. Limitationen treten bei schwer einsehbaren Bereichen, wie der Umschlagfalte und Schleimhautarealen auf. Außerdem wird bei längeren Distanzen eine höhere Anzahl an Bildern zusammengeführt, was zu Verzerrungen und Ungenauigkeiten führen kann.⁷ Dieser Matching – Prozess ist entscheidend für die Genauigkeit eines Intraoralscanners.

Eine weitere Digitalisierungsmöglichkeit, ob direkt¹² oder indirekt¹³, stellt die digitale Volumentomographie (DVT) dar. Im Gegensatz zur Computertomographie (CT) sind die Strahlenbelastung¹⁴ und Artefaktbildung geringer. Bei der Benutzung erfasst ein konusförmiger Strahlenkegel mit einer Vielzahl von Einzelprojektionen den aufzunehmenden Bereich. Mit Hilfe von Algorithmen wird ein dreidimensionales Bild rekonstruiert. In der direkten Benutzung ist die Anwendung nur dann indiziert, wenn eine weitere rechtfertigende Indikation besteht. Diesbezüglich ist die S2k-Leitlinie der Deutschen Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde (DGZMK), 'Dentale digitale Volumentomographie' richtungsweisend. Die indirekte Digitalisierung von Abformungen mittels DVT erfordert zudem die Benutzung von Kunststofflöffeln. Die Evaluierung und Gegenüberstellung unterschiedlicher Digitalisierungsverfahren basiert im Großteil der bisherigen Untersuchungen meist auf einem oder wenigen Stellvertretern der jeweiligen Gerätegruppe.^{7,9} Mehrere Studien beschäftigen sich sogar nur mit einem Digitalisierungsverfahren.^{11, 15-17} Die Vergleichbarkeit bleibt somit aufgrund unterschiedlicher Studiendesigns aus. Infolgedessen sollte die Gestaltung der hier vorliegenden Untersuchungen eine möglichst große Geräteanzahl beinhalten und in der Methodik vergleichbar aufgestellt sein. Entsprechend wurde die Genauigkeit mit Hilfe klinisch relevanter Strecken und reliabler Fallzahlen evaluiert. Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, einen systematischen Überblick über die Unterschiede innerhalb der Gerätegruppen und der Digitalisierungsverfahren zu

schaffen. Der Vergleich soll Aussage über die Einsetzbarkeit und Indikation direkter und indirekter Digitalisierungsverfahren treffen.

Tabelle 1 listet die evaluierten Geräte auf.

<u>Intraoralscanner</u>	<u>DVT</u>	<u>Modellscanner</u>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Apollo DI (Sirona, Bensheim, Deutschland) ▪ CS 3500 (Carestream, Rochester, New York, USA) ▪ iTero (Cadent Inc., Carlstadt, USA) ▪ PlanScan (Planmeca, Helsinki, Finnland) ▪ Trios Color (3Shape, Kopenhagen, Dänemark) ▪ True Definition (3M ESPE, St. Paul, USA) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ CS 9300, CS 9300 Select, CS 8100 3D (Carestream Health Inc. Rochester, USA) ▪ Promax 3D Mid™ (Planmeca, Helsinki, Finnland) ▪ Whitefox® (Acteon group, Mérignac, Frankreich) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ R500, R700, R1000 und R2000 (3Shape, Kopenhagen, Dänemark) ▪ CS Ultra (Dentacore, Murg, Deutschland) ▪ OrthoX Scan (Dentaurum, Ispringen, Deutschland) ▪ MDS 400 (Maestro 3D, Pisa, Italien) ▪ Grande and Colori (MedianetX, Detmold, Deutschland) ▪ Lab Scan (GC, Leuven, Belgien) ▪ D104i (Imetric, Courgenay, Schweiz)

Tabelle 1: Untersuchte Geräte

1.3 Methodik

An einen eugnathen Oberkiefer wurden an den Stellen #16, #13, #23, #26 und auf dem Inzisalpunkt fünf Würfel befestigt. Dieses Modell wurde von einem Stereolithografie-Drucker (D35, Dreve®) aus FotoDent-LED®-Harz gedruckt. In jeden Würfel wurden mit einer Tischbohrmaschine (Metabo Magnum TBE 4512; Nürtingen, Deutschland) senkrechte Bohrungen mit der Tiefe von 4 mm und einem Durchmesser von 2 mm angebracht. Damit die Messpunkte alle in einer Messebene liegen, wurde die Oberfläche der Würfel parallel zur Unterseite getrimmt.

(Abbildung 1) Der reproduzierbare Messpunkt wurde definiert als der Schnittpunkt der Mittellinie eines Bohrzylinders mit der Trimmebene der Würfel. (Abbildung 3) Es ergaben sich die Messstrecken Intermolarenweite (IMW), Intercanineweite (ICW) und Zahnbogenlänge (AL), deren Werte am Durchschnitt der westlichen Bevölkerung ausgerichtet waren.¹⁸

Zur Herstellung des Gips – Mastermodells erfolgte eine Doppelmischabformung mit einem A-Silikon (Flexitime® medium flow + putty, Heraeus Kulzer, Dormagen). Anschließend wurde die Abformung in Typ III Kanistone KFO Spezial Hartgips (Kanedenta, Herford) überführt. (Abbildung 2) Die Modelle wurden mit einem Koordinatenmessgerät (Zeiss O-Inspect 422) und der Bedienungssoftware Calypso 5.4.20 im Fraunhofer-Institut IPK, Schwerpunkt Mikromesstechnik in Berlin taktil vermessen. Um den exakten Durchmesser zu bestimmen, wurden 169-200 Punkte je Bohrung vermessen. Anschließend folgte die Vermessung der einzelnen Mittelpunkte der Bohrzylinder und Messstrecken. Hierbei beträgt die Messunsicherheit $1,9 \mu\text{m} + L/250$ (ISO 20360). Dies führt auf einer Distanz von 50 mm zu einer maximalen Abweichung von $2,1 \mu\text{m}$.



Abbildung 1: Mastermodell aus FotoDent-LED®-Harz



Abbildung 2: Mastermodell aus Gips

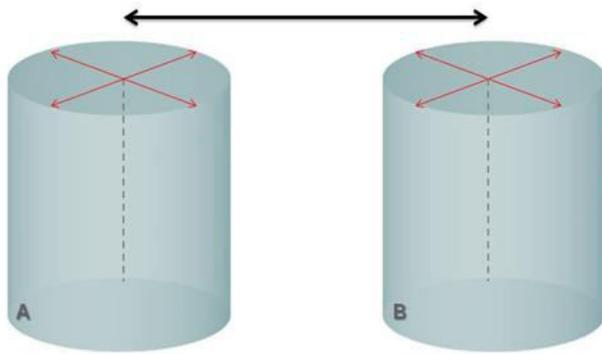


Abbildung 3: Messprinzip

In der ersten Untersuchung wurden pro Gerät $n = 64$ Messungen durchgeführt. Damit wurden Differenzen von $< 5 \mu\text{m}$ signifikant dargestellt. Um die statistische Signifikanz der klinischen Relevanz für die weiteren Untersuchungen anzunähern wurde die Fallzahl auf $n = 37$ verringert, womit Abweichungen von $< 10 \mu\text{m}$ bestimmt werden konnten.

Das Mastermodell aus Harz diente der Untersuchung der Intraoralscanner, während das Mastermodell aus Gips für die DVT- Geräte und Modellscanner verwendet wurde. Die Modelle wurden unter Standardbedingungen gelagert. Es wurde sowohl die Kalibrierung aller Geräte gewährleistet, als auch dass alle Scans unter annähernden Standardbedingungen ($22\text{--}5^\circ\text{C}$; $1013,25 \text{ hPa}$) durchgeführt wurden. Die Untersuchung der Carestream Geräte erfolgte jeweils nur in einem Modus. Der Whitefox wurde mit hoher, normaler und mittlerer Qualitätseinstellung betrieben, während der Promax 3D Mid mit normaler und schneller Aufnahmeeinstellung überprüft wurde. Für die Vermessung mit der Software Convince™ Premium 2012 (3Shape, Kopenhagen) wurden die DICOM – Datensätze von den einzelnen Softwares in STL- Dateien konvertiert.

Bei der Evaluierung der Intraoralscanner wurden je Gerät acht Probescans durchgeführt, um anfängliche Fehler zu vermeiden. Der Scanpfad richtete sich jeweils nach den Herstellerangaben. Zudem wiederholte der Operator einen Scan, wenn der Pfad wegen überhöhter Geschwindigkeit oder falschem Abstand zwischen Scanner und Modell verloren wurde. Dies diente der Vermeidung möglicher Matching-Fehler der Bilddaten.

Die Vermessung der Stereolithographie – Dateien (STL) erfolgte mit der Software Convince™ Premium 2012. Dabei wurden bei den fünf Bohrzylindern Markierungen gesetzt, durch die sowohl die jeweiligen Mittelachsen, als auch die Schnittpunkte mit

der Oberfläche der Referenzwürfel berechnet werden konnten. Somit wurden auf allen drei Ebenen reproduzierbare Messpunkte gewonnen. Im Anschluss wurden ebenfalls mittels der Messsoftware die einzelnen Strecken vermessen und mit den Masterwerten verglichen. (Abbildung 4)

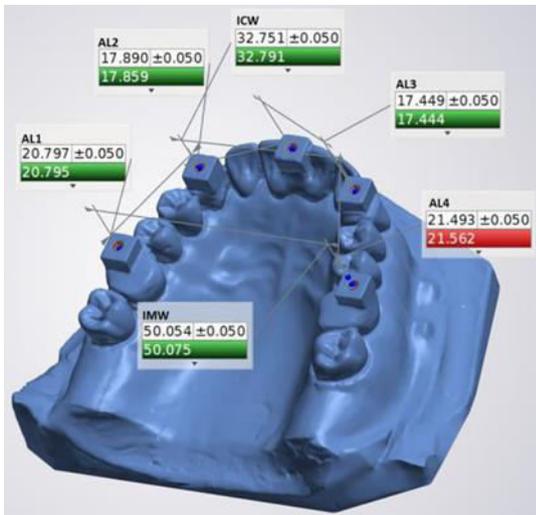


Abbildung 4: Vermessung des digitalen Mastermodells

Die Nullhypothese N^0 wurde erreicht, sobald die Geräte keine signifikanten Unterschiede zu den Masterwerten aufgewiesen haben. Als Genauigkeit wurde das simultane Auftreten von Präzision und Richtigkeit bezeichnet, wobei die Präzision eine Aussage über die Streuung der Werte trifft und die Richtigkeit die Annäherung der Mittelwerte zu den Masterwerten beschreibt.

Statistische Analyse

Ab einer Fallzahl $n = 30$ zeigt sich nach dem zentralen Grenzwerttheorem eine Normalverteilung. Durch die Bestimmung der Abweichungen der einzelnen Scans zum jeweiligen Masterwert und Durchführung unabhängiger t-Tests, sollten Aussagen über die Richtigkeit der Geräte getroffen werden. Paarweise Levene – Tests wurden durchgeführt, um signifikante Differenzen ($p < 0,05$) zwischen den Varianzen zu ermitteln und damit die Präzision zu evaluieren. Die statistische Analyse erfolgte mit SPSS Statistics (Version 22, IBM) und wurde unterstützt von PHIMEA, Berlin, und Medistat, Kiel.

1.4 Ergebnisse

Die *Tabelle 2* fasst in Form einer deskriptiven Statistik eine Übersicht zusammen.

Abbildung 5-7 zeigen jeweils die Abweichungen der Interkaninenweite,

Intermolarenweite und Zahnbogenlänge in Form eines Boxplots. Die ausführlichen

Auswertungen und Angaben hinsichtlich des Signifikanzniveaus sind den einzelnen

Publikationen zu entnehmen.

Gerät	Interkaninenweite			Intermolarenweite			Zahnbogenlänge		
	MW	SD	max	MW	SD	max	MW	SD	Max
Apollo	44,3	33,3	170,0	102,2	57,7	262	171,0	63,4	315,0
CS3500	35,9	28,5	113,0	97,1	66,2	233	65,0	75,8	315,0
iTero	28,0	15,6	75,0	76,4	57,9	229	171,3	30,7	217,0
PlanScan	170,4	80,8	341,0	163,4	136,7	540	397,5	91,9	589,0
Trios	27,2	18,6	65,0	50,0	39,2	150	37,2	21,7	80,0
True Definition	54,8	32,9	116,0	158,1	95,6	299	43,2	23,3	353,0
Aadva Lab Scan	13,8	8,1	31,0	14,3	7,2	30,0	10,0	7,4	28,0
Colori	19,5	10,1	47,0	37,7	13,2	76,0	55,8	14,8	83,0
CS Ultra	26,6	7,5	38,0	22,6	8,7	35,0	40,9	14,0	66,0
D104i	9,1	4,9	22,0	11,0	8,9	35,0	13,5	7,1	30,0
Grande	15,1	3,4	23,0	38,0	4,5	45,0	48,3	6,1	62,0
MDS 400	21,9	4,5	28,0	16,7	7,8	27,0	55,2	12,7	77,0
OrthoX	31,1	24,0	96,0	34,2	25,6	93,0	45,4	37,1	155,0
R500	21,9	12,7	47,0	14,5	12,9	61,0	23,5	16,7	60,0
R700	7,4	5,9	24,0	13,2	4,7	22,0	15,4	9,3	39,0
R1000	11,2	3,4	20,0	18,2	4,3	27,0	36,8	5,6	49,0
R2000	15,9	7,0	35,0	22,4	6,9	38,0	43,9	8,3	58,0
CS 8100 3D	93,0	6,4	106,0	81,2	7,4	96	37,2	12,4	61,0
CS 9300	19,2	4,8	28,0	15,1	7,4	31	26,1	6,6	48,0
CS 9300 Select	92,6	5,7	105,0	82,2	6,6	93	37,5	13,0	63,0
Promax 3D Mid	89,1	5,3	102,0	126,1	4,9	135,0	216,5	5,0	225,0
Promax 3D Mid fast	96,5	13,0	110,0	136,8	18,1	237,0	228,6	13,5	282,0
WhiteFox (NQ)	17,4	7,6	37,0	6,8	4,1	14,0	53,6	13,8	82,0
WhiteFox (MQ)	17,6	8,7	35,0	7,1	4,2	15,0	55,7	11,9	74,0
WhiteFox (HQ)	13,3	15,1	86,0	12,8	7,9	31,0	35,5	31,3	161,0

Tabelle 2: Deskriptive Statistik (Werte in μm)

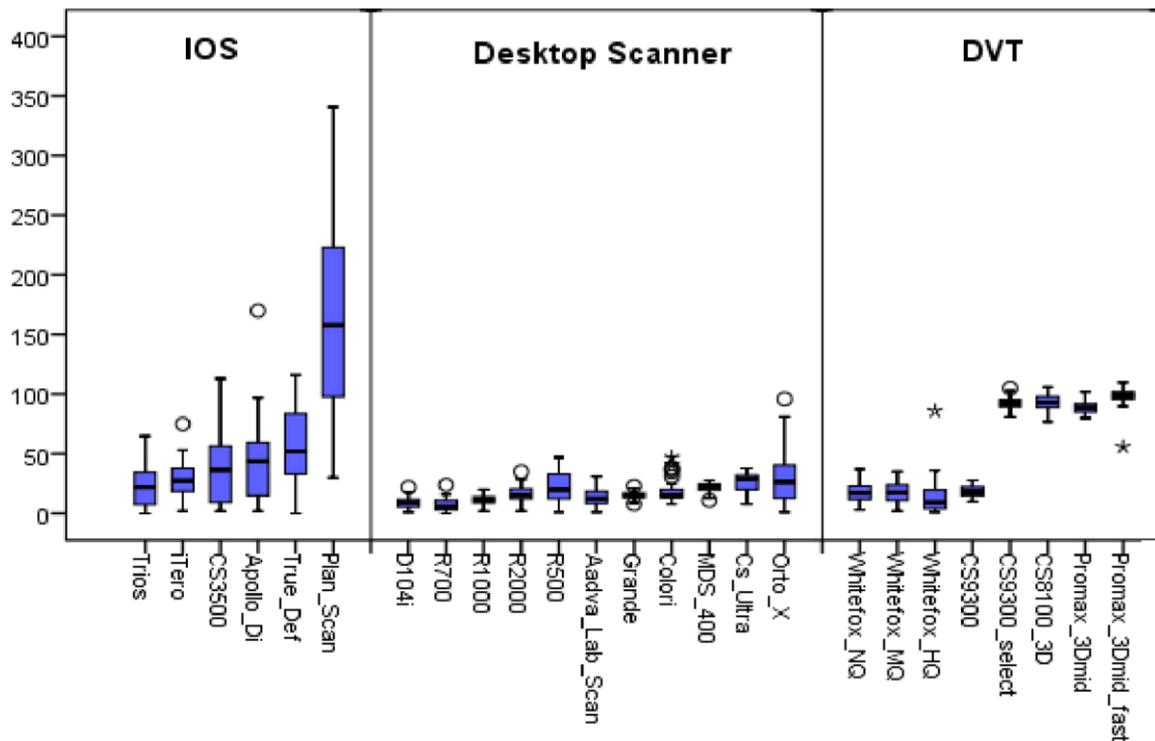


Abbildung 5: Abweichungen der Interkaninenweite als Boxplot dargestellt (Werte in µm)

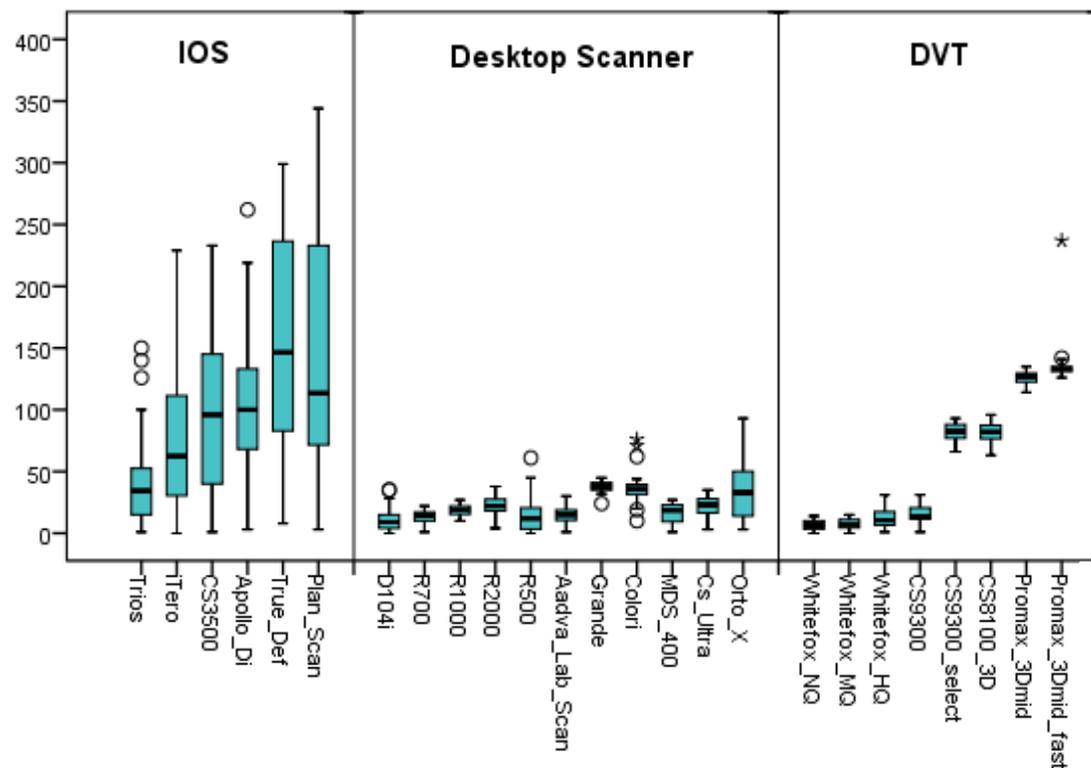


Abbildung 6: Abweichungen der Intermolarenweite als Boxplot dargestellt (Werte in µm)

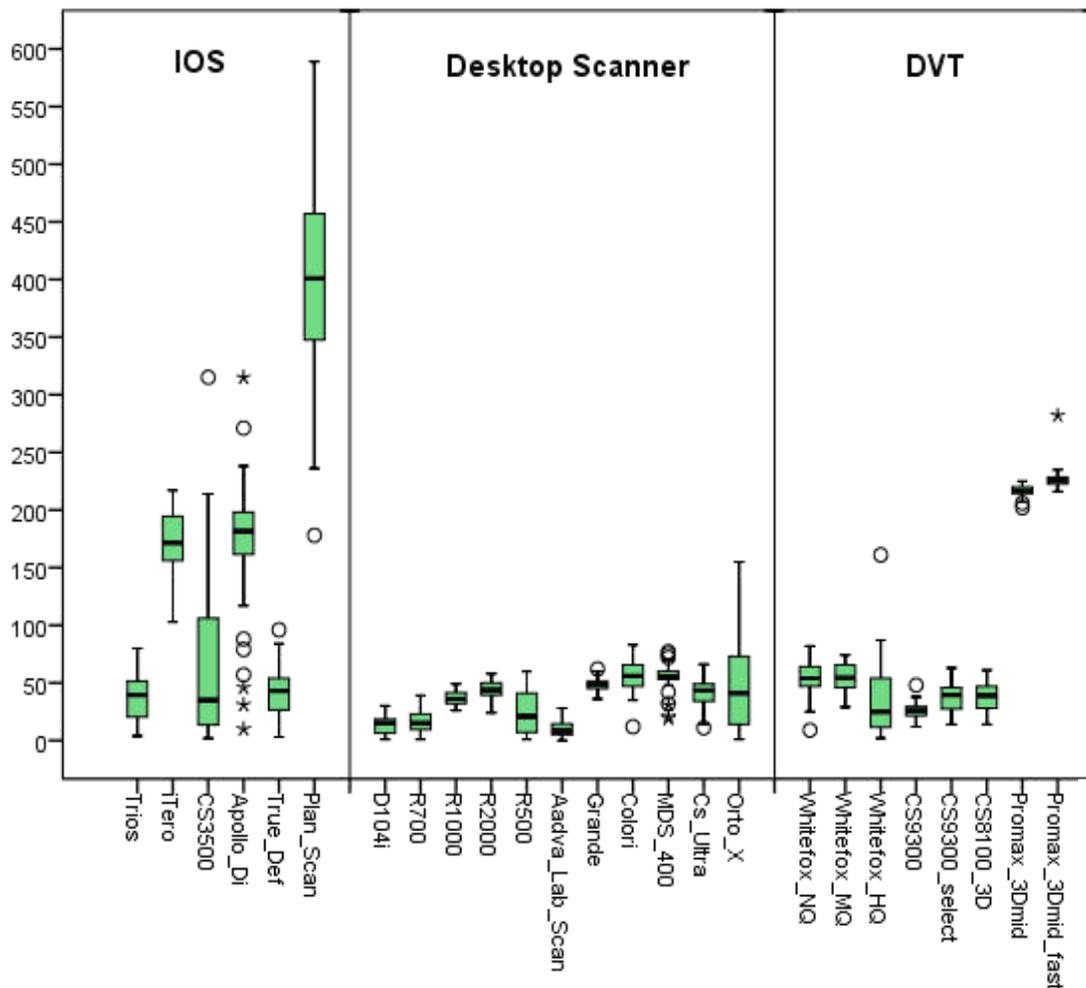


Abbildung 7: Abweichungen der Zahnbogenlänge als Boxplot dargestellt (Werte in μm)

1.5 Diskussion

Ziel der vorgelegten Arbeit war es, die Genauigkeit von Digitalisierungsverfahren zu evaluieren. Mit Hilfe unabhängiger, reproduzierbarer Messpunkte und klinisch relevanter Strecken wurden unterschiedliche Modellscanner, Intraoralscanner und digitale Volumentomographen (DVT) gegenübergestellt. Die gleichartige Methodik erlaubt eine qualitativ hochwertige Bewertung der Untersuchungen. Sonstige Studien zur Bestimmung der Genauigkeit digitaler Modelle bedienen sich meist der Superimpositionsmessung^{8, 9, 19}, welche vor allem der Evaluierung von mittleren Oberflächendifferenzen dient, oder der Messung mit einem digitalen Messschieber.^{5, 15, 20}

Kritisch zu betrachten sind bei der vorliegenden Methodik die trotzdem entstandenen Messungenauigkeiten, die sowohl bei der Ermittlung des Masterwertes, als auch

beim Vermessen der digitalen Modelle möglich waren (*Abbildung 8*). Im Hinblick darauf ist beim Mastermodell aus FotoDent-LED®-Harz eine Abweichung von bis zu 13 μm und beim Mastermodell aus Gips bis zu 17 μm anzunehmen. Diese resultiert aus der Vermessung der Bohrzylinder unter Verwendung des Koordinatenmessgerätes. Der interindividuelle Fehler betrug dabei 2 μm für das Kunstharzmodell und 3,7 μm für das Gipsmodell. Die maximale Abweichung des Durchmessers innerhalb eines Bohrzylinders, definiert als intraindividueller Fehler, betrug 1,6 μm für das Kunstharzmodell und 3,5 μm für das Gipsmodell. Der Messfehler durch die Messsoftware liegt bei maximal 8 μm und wurde durch die Auswertung wiederholter Messung eines Scans erfasst.

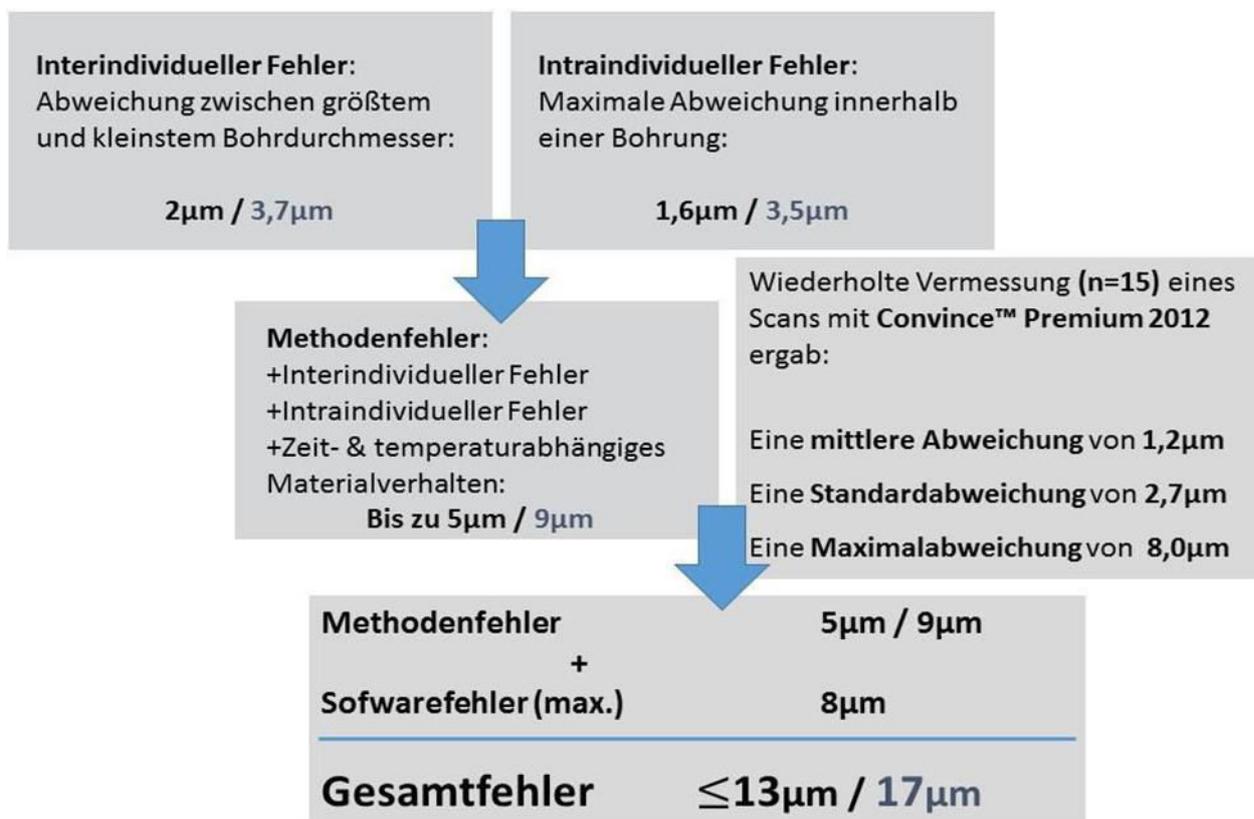


Abbildung 8: Fehleranalyse der beiden Mastermodelle (Mastermodell aus Gips in blau)

Die Temperatur, Feuchtigkeit, Beleuchtung und mögliche Schwierigkeiten der genauen Erfassung der Bohrlöcher können bei den Untersuchungen eine Rolle spielen. Zusätzlich zu beachten ist der unterschiedliche Aufbau und die Technologie der Scanner. Die Strecke AL ist eine mögliche Fehlerquelle, da es eine summierte Größe von vier Distanzen ist und sich negative, positive Abweichungen und Fehler addieren.

Vergleichende Bewertung der Ergebnisse

Gegenwärtig herrscht keine Einigkeit über die Abweichungen für Patientenmodelle zur kieferorthopädischen Diagnostik. Jedoch geben einige Autoren Werte von etwa 100-300 μm als klinisch akzeptabel an.^{19, 21, 22} Die untersuchten Geräte bewegen sich in diesem Bereich.

In der Gruppe der Modellscanner zeichneten sich signifikante Abweichungen ab. Die mittleren Abweichungen zeigten für die Strecke ICW zwischen $7,4 \pm 5,9 \mu\text{m}$ (R700) und $31,1 \pm 24,0 \mu\text{m}$ (OrthoX), für die Strecke IMW zwischen $11,0 \pm 8,9 \mu\text{m}$ (D104i) und $38,0 \pm 4,5 \mu\text{m}$ (Grande) und für die Strecke AL zwischen $10,0 \pm 7,4$ (Aadva Lab Scan) und $55,8 \pm 14,8 \mu\text{m}$ (Colori). Von Interesse sind die beiden hauptsächlich im prothetischen Bereich benutzten Scanner D104i und Aadva Lab Scan, die sehr hohe Genauigkeiten zeigten. Die gewonnenen STL- Dateien können in eine kieferorthopädische Software exportiert und dort archiviert werden. Im Hinblick auf gemeinschaftlich aufgebaute Praxen oder ein Labor kann demnach ein Gerät mit unterschiedlichen Softwares den Bereich der Kieferorthopädie und Prothetik versorgen.

Die Genauigkeit der Modellscanner wurde bis dato kaum evaluiert. Flugge et al. ermittelten für den D250 mittels Oberflächenüberlagerungsmessungen eine mittlere Abweichung von $10 \mu\text{m}$.⁹ Guth et al. zeigen für den D810 eine mittlere Abweichung von $0,019 \pm 0,006\text{mm}$.⁷ In der Untersuchung von Hayashi et al. demonstriert der R700 ($0,050 \pm 0,007\text{mm}$) und der Vivid910 ($0,055 \pm 0,008\text{mm}$) vergleichbare Werte.¹⁹ Die Studie von Sousa et al. beschäftigte sich mit Zahnbogenlängen- und Zahnbogenbreitenmessungen an digitalisierten Modellen vom 3Shape Scanner D250. Die Auswertung zeigte keine signifikanten Differenzen zu den ebenfalls vermessenen Gipsmodellen. Ergo kann geschlussfolgert werden, dass sich die digitalen Modelle zur Archivierung und Behandlungsplanung eignen.²⁰

In der Untersuchung der Intraoralscanner zeichneten sich signifikante Abweichungen ab. Die mittleren Abweichungen zeigten für die Strecke ICW zwischen $27,2 \pm 18,6 \mu\text{m}$ (Trios) und $170,4 \pm 80,8 \mu\text{m}$ (PlanScan), für die Strecke IMW zwischen $50,0 \pm 39,2 \mu\text{m}$ (Trios) und $163,4 \pm 136,7 \mu\text{m}$ (PlanScan) und für die Strecke AL zwischen $37,2 \pm 21,7 \mu\text{m}$ (Trios) und $397,5 \pm 91,9 \mu\text{m}$ (Planscan).

Im Gegensatz zu den Modellscanner sind weitaus mehr Evaluierungen bezüglich der Genauigkeit der Intraoralscanner vorzufinden. Vergleichbare Werte weisen der iTero ($50 \mu\text{m}$ ⁹, $49 \mu\text{m}$ ¹⁶, $70,5 \mu\text{m}$ ²³, $32,4 \mu\text{m}$ ²⁴), Trios ($17,1 \mu\text{m}$ ²⁵) und Lava C.O.S. ($38 \mu\text{m}$ ¹⁶, $44,9 \mu\text{m}$ ²⁴) vor. Camardella et al. haben zahlreiche Strecken, unter anderem Overjet, Overbite, Intercaninenweite und Intermolarenweite, an Gipsmodellen und

digitalen Modellen, die vom TRIOS Color produziert wurden, vermessen. Auf Basis der gewonnenen Ergebnisse, die nur einzelne statistisch signifikante Abweichungen zu den Gipsmodellwerten zeigten, konkludierten die Autoren, dass der Intraoralscanner eine klinisch akzeptable Genauigkeit aufweist.¹⁷

Ender et al. evaluierten die Genauigkeiten konventioneller Abformmaterialien und der Intraoralscanner. Dabei erreichten Omnicam ($48.6 \pm 11.6 \mu\text{m}$), Trios ($47.5 \pm 21.4 \mu\text{m}$) und Trios Color ($42.9 \pm 20.4 \mu\text{m}$) dasselbe Signifikanzlevel wie Polyether ($34.9 \pm 8.8 \mu\text{m}$), Vinylsiloxanether ($17.4 \pm 5.1 \mu\text{m}$), direkt gescannter Vinylsiloxanether ($18.3 \pm 8.8 \mu\text{m}$) und digitalisierter Vinylsiloxanether ($36.7 \pm 3.8 \mu\text{m}$).²⁶ Die DVT- Geräte wiesen ebenfalls signifikante Abweichungen auf. Die mittleren Abweichungen zeigten für die Strecke ICW zwischen $13,3 \pm 15,1 \mu\text{m}$ (WhiteFox) und $96,5 \pm 13,0 \mu\text{m}$ (Promax 3D Mid), für die Strecke IMW zwischen $6,8 \pm 4,1 \mu\text{m}$ (WhiteFox) und $136,8 \pm 18,1 \mu\text{m}$ (Promax 3D Mid) und für die Strecke AL zwischen $26,1 \pm 6,6$ (CS 9300) und $228,6 \pm 13,5 \mu\text{m}$ (Promax 3D Mid). Gegenwärtig liegen keine vergleichbaren Untersuchungen vor. Die ermittelten Werte verdeutlichen die Notwendigkeit weiterer Studien, die diese Form von Digitalisierung validieren.

Vergleichende Bewertung unterschiedlicher Digitalisierungsverfahren

Die in dieser Studie gewonnenen Ergebnisse bestätigen die Einsetzbarkeit unterschiedlicher Modellscanner für den klinischen Alltag. Hierbei sollten immer physische Modelle anstatt von Abformungen genutzt werden, aufgrund der fehlenden Erfassung untersichgehender Stellen, Innenkonturen und tiefer Öffnungen.¹¹ Bei der Bewertung dieses Digitalisierungsverfahren müssen die Fehlerquellen der Abformung und Modellherstellung berücksichtigt werden.

So ist nach Ender et al. die Genauigkeit eines Polyether ($34.9 \pm 8.8 \mu\text{m}$), additionsvernetzender Silikone $13,0 \pm 2,9 \mu\text{m}$ und eines Alginates ($37,7 \pm 34,9 \mu\text{m}$).²⁴

Für Gipsmodelle aus additionsvernetzenden-Silikonabdrücken wurden von Shah et al. statistisch signifikante Abweichungen der dimensional Genauigkeit zum Ursprungsmodell von $97 \mu\text{m}$ gemessen.²⁷ Die Begutachtung des gesamten Workflows zeigt, dass ähnliche Ergebnisse wie bei der direkten Digitalisierung mittels Intraoralscanner zu erzielen sind, solange kein physisches Modell benötigt wird. 3D – Druckverfahren ermöglichen die Umsetzung eines digitalen Modells in ein physisches Modell. Diesbezüglich konnten in einer weiteren Studie mittlere Abweichungen von $27,0 \pm 20 \mu\text{m}$ für die Strecke ICW, $65,0 \pm 39,0 \mu\text{m}$ für die Strecke IMW und $118,0 \pm 61 \mu\text{m}$ für die Strecke AL evaluiert werden.¹³ Dementsprechend

gestaltet sich bei Bedarf eines physischen Modells die indirekte Digitalisierung mittels Intraoralscanner als zeitintensiver, teurer und ungenauer. Weitere ersichtliche Nachteile sind Einflussfaktoren wie Speichel, Blut oder nicht einsehbare Stellen, die die Einsetzbarkeit des direkten Workflows einschränken können.

Für die indirekte Digitalisierung mit dem DVT konnten insgesamt ähnliche Werte erzielt werden. Aus dem DICOM – Datensatz ist es möglich STL – Dateien zu berechnen. Damit kann die DVT zur Modelldigitalisierung genutzt werden, sofern es nicht mit Patienten ausgelastet ist. Das direkte Generieren von digitalen Modellen mittels DVT ist aufgrund der Strahlenbelastung nicht angemessen, solange keine weitere rechtfertigende Indikation besteht. Prospektiv gesehen wird der Modellscanner in der Kieferorthopädie eine häufig genutzte Variante bleiben, da sich kein offensichtlicher Vorteil für den Patienten und Behandler aufzeigt, der zu einer Umstellung auf einen direkten Workflow zwingt. Die Intraoralscanner sind für den klinischen Alltag eine gleichwertige Alternative, solange kein physisches Modell benötigt wird. Andernfalls muss bei den 3D – Druckverfahren der Verlust der Genauigkeit und die Kostenintensität bedacht werden.

1.6 Schlussfolgerung

Modellscanner zeigen für die Erstellung digitaler Modelle eine sehr hohe Genauigkeit. In Anbetracht der potentiellen Fehlerquellen die bei der Abformung und Modellherstellung auftreten können, weisen Intraoralscanner vergleichbare Werte auf. Infolgedessen eignen sich beide Verfahren für den klinischen Alltag, solange der Workflow digital bleibt. Die Genauigkeit der Digitalisierung mittels DVT sollte in weiteren Studien evaluiert werden.

1.7 Literaturverzeichnis

1. Stevens, D.R., C. Flores-Mir, B. Nebbe, D.W. Raboud, G. Heo, and P.W. Major, Validity, reliability, and reproducibility of plaster vs digital study models: comparison of peer assessment rating and Bolton analysis and their constituent measurements. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2006. 129(6): p. 794-803.
2. Mullen, S.R., C.A. Martin, P. Ngan, and M. Gladwin, Accuracy of space analysis with emodels and plaster models. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2007. 132(3): p. 346-52.
3. Boeddinghaus, M., E.S. Breloer, P. Rehmann, and B. Wostmann, Accuracy of single-tooth restorations based on intraoral digital and conventional impressions in patients. *Clin Oral Investig*, 2015. 19(8): p. 2027-34.
4. Beuer, F., J. Schweiger, and D. Edelhoff, Digital dentistry: an overview of recent developments for CAD/CAM generated restorations. *Br Dent J*, 2008. 204(9): p. 505-11.
5. Lippold, C., C. Kirschneck, K. Schreiber, S. Abukiress, A. Tahvildari, T. Moiseenko, and G. Danesh, Methodological accuracy of digital and manual model analysis in orthodontics - A retrospective clinical study. *Comput Biol Med*, 2015. 62: p. 103-9.
6. Rheude, B., P.L. Sadowsky, A. Ferriera, and A. Jacobson, An evaluation of the use of digital study models in orthodontic diagnosis and treatment planning. *Angle Orthod*, 2005. 75(3): p. 300-4.
7. Guth, J.F., C. Runkel, F. Beuer, M. Stimmelmayer, D. Edelhoff, and C. Keul, Accuracy of five intraoral scanners compared to indirect digitalization. *Clin Oral Investig*, 2017. 21(5): p. 1445-1455.
8. Grunheid, T., S.D. McCarthy, and B.E. Larson, Clinical use of a direct chairside oral scanner: an assessment of accuracy, time, and patient acceptance. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2014. 146(5): p. 673-82.
9. Flugge, T.V., S. Schlager, K. Nelson, S. Nahles, and M.C. Metzger, Precision of intraoral digital dental impressions with iTero and extraoral digitization with the iTero and a model scanner. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2013. 144(3): p. 471-8.
10. Seelbach, P., C. Brueckel, and B. Wostmann, Accuracy of digital and conventional impression techniques and workflow. *Clin Oral Investig*, 2013. 17(7): p. 1759-64.
11. Vogel, A.B., F. Kilic, F. Schmidt, S. Rubel, and B.G. Lapatki, Optical 3D scans for orthodontic diagnostics performed on full-arch impressions. Completeness of surface structure representation. *J Orofac Orthop*, 2015. 76(6): p. 493-507.
12. Ferreira, J.B., I.O. Christovam, D.S. Alencar, A.F.J. da Motta, C.T. Mattos, and A. Cury-Saramago, Accuracy and reproducibility of dental measurements on tomographic digital models: a systematic review and meta-analysis. *Dentomaxillofac Radiol*, 2017. 46(7): p. 20160455.
13. Wesemann, C., J. Muallah, J. Mah, and A. Bumann, Accuracy and efficiency of full-arch digitalization and 3D printing: A comparison between desktop model scanners, an intraoral scanner, a CBCT model scan, and stereolithographic 3D printing. *Quintessence Int*, 2017. 48(1): p. 41-50.
14. Ludlow, J.B. and M. Ivanovic, Comparative dosimetry of dental CBCT devices and 64-slice CT for oral and maxillofacial radiology. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 2008. 106(1): p. 106-14.
15. Cuperus, A.M., M.C. Harms, F.A. Rangel, E.M. Bronkhorst, J.G. Schols, and K.H. Breuning, Dental models made with an intraoral scanner: a validation study. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2012. 142(3): p. 308-13.
16. Patzelt, S.B., A. Emmanouilidi, S. Stampf, J.R. Strub, and W. Att, Accuracy of full-arch scans using intraoral scanners. *Clin Oral Investig*, 2014. 18(6): p. 1687-94.
17. Camardella, L.T., H. Breuning, and O. de Vasconcellos Vilella, Accuracy and reproducibility of measurements on plaster models and digital models created using an intraoral scanner. *J Orofac Orthop*, 2017. 78(3): p. 211-220.

8. Bishara, S.E., J.R. Jakobsen, J. Treder, and A. Nowak, Arch width changes from 6 weeks to 45 years of age. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 1997. 111(4): p. 401-9.
19. Hayashi, K., A.U. Sachdeva, S. Saitoh, S.P. Lee, T. Kubota, and I. Mizoguchi, Assessment of the accuracy and reliability of new 3-dimensional scanning devices. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2013. 144(4): p. 619-25.
20. Sousa, M.V., E.C. Vasconcelos, G. Janson, D. Garib, and A. Pinzan, Accuracy and reproducibility of 3-dimensional digital model measurements. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2012. 142(2): p. 269-73.
21. Schirmer, U.R. and W.A. Wiltshire, Manual and computer-aided space analysis: a comparative study. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 1997. 112(6): p. 676-80.
22. Hirogaki, Y., T. Sohmura, H. Satoh, J. Takahashi, and K. Takada, Complete 3-D reconstruction of dental cast shape using perceptual grouping. *IEEE Trans Med Imaging*, 2001. 20(10): p. 1093-101.
23. van der Meer, W.J., F.S. Andriessen, D. Wismeijer, and Y. Ren, Application of intra-oral dental scanners in the digital workflow of implantology. *PLoS One*, 2012. 7(8): p. e43312.
24. Ender, A. and A. Mehl, In-vitro evaluation of the accuracy of conventional and digital methods of obtaining full-arch dental impressions. *Quintessence Int*, 2015. 46(1): p. 9-17.
25. Muller, P., A. Ender, T. Joda, and J. Katsoulis, Impact of digital intraoral scan strategies on the impression accuracy using the TRIOS Pod scanner. *Quintessence Int*, 2016. 47(4): p. 343-9.
26. Ender, A., T. Attin, and A. Mehl, In vivo precision of conventional and digital methods of obtaining complete-arch dental impressions. *J Prosthet Dent*, 2016. 115(3): p. 313-20.
27. Shah, S., G. Sundaram, D. Bartlett, and M. Sherriff, The use of a 3D laser scanner using superimpositional software to assess the accuracy of impression techniques. *J Dent*, 2004. 32(8): p. 653-8.

2. Eidesstattliche Versicherung & ausführliche Anteilserklärung

Eidesstattliche Versicherung

„Ich, Roxana Nowak, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: „Genauigkeit von digitalen Ganzkiefermodellen mit Desktopscannern im Vergleich zu Intraoralscannern und DVT-Scan“ selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung (siehe „Uniform Requirements for Manuscripts (URM)“ des ICMJE -www.icmje.org) kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik und Resultaten entsprechen den URM (s.o) und werden von mir verantwortet.

Meine Anteile an den ausgewählten Publikationen entsprechen denen, die in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit dem Betreuer, angegeben sind. Sämtliche Publikationen, die aus dieser Dissertation hervorgegangen sind und bei denen ich Autor bin, entsprechen den URM (s.o) und werden von mir verantwortet.

Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unwahren eidesstattlichen Versicherung (§156,161 des Strafgesetzbuches) sind mir bekannt und bewusst.“

Datum

Unterschrift

Anteilserklärung an den erfolgten Publikationen

Roxana Nowak hatte folgenden Anteil an den folgenden Publikationen:

Publikation 1:

Nowak R, Wesemann C, Robben J, Muallah J, Bumann A. An in-vitro study comparing the accuracy of full-arch casts digitized with desktop scanners. Quintessence Int. 2017; 48(8): 667-676

Beitrag im Einzelnen:

- Versuchsdurchführung mit den Geräten 3Shape R500, 3Shape R700, 3Shape R1000 und 3Shape R2000 und Dentacore CS Ultra, Maestro 3D, Medianetx grande und Medianetx colori, GC Aadvia Lab Scan und Imetric d104i
- Erhebung der Daten für die Geräte 3Shape R500, 3Shape R700, 3Shape R1000 und 3Shape R2000 und Dentacore CS Ultra, Maestro 3D, Medianetx grande und Medianetx colori, GC Aadvia Lab Scan und Imetric d104i mit der Software Convince Premium 2012
- Trimmen des Mastermodells Gips
- Auswertung aller Daten mit der Software SPSS statistics
- Interpretation aller Daten
- Umfassende Literaturrecherche
- Erstellen der Bilder des Mastermodells (Abbildung 1/Abbildung 3)
- Erstellen der Tabellen und Anpassung der statistischen Grafiken
- Verfassen des Manuskripts

Publikation 2:

Muallah J, Wesemann C, Nowak R, Robben J, Mah J, Pospiech P, Bumann A. Accuracy of full-arch scans using intraoral and extraoral scanners: an in vitro study using a new method of evaluation. Int J Comput Dent. 2017;20(2):151-164 Beitrag im Einzelnen:

- Unterstützung bei der Gestaltung des Mastermodells durch Anfertigung der Bohrungen
- Trimmen des Mastermodells Harz
- Mitwirkung bei der Vermessung des Mastermodells
- Erstellen des Bildes des Mastermodells (Abbildung 2)
- Partielle Durchführung der zugrunde liegenden Experimente
- Kontaktaufnahme zum Hersteller und Mithilfe bei der Auswertung und Interpretation der Daten bezüglich des Modellscanners OrthoX

- Beitragende Literaturrecherche
- Korrektur des Manuskripts

Publikation 3:

Robben J, Muallah J, Wesemann C, Nowak R, Mah J, Pospiech P, Bumann A.
Suitability and accuracy of CBCT model scan: An in vitro study. Int J Comput Dent.
2017;20(4):363-375

Beitrag im Einzelnen:

- Unterstützung bei der Gestaltung des Mastermodells durch Anfertigung der Bohrungen
- Trimmen des Mastermodells Gips
- Mitwirkung bei der Vermessung des Mastermodells
- Erstellen der Bilder des Mastermodells (Abbildung 2/Abbildung 3)
- Beitragende Literaturrecherche
- Korrektur des Manuskripts

Publikation 4:

Wesemann C, Muallah J, Nowak R, Robben J, Bumann Genauigkeit von digitalisierten

Ganzkiefermodellen – Ein Überblick direkter und indirekter Verfahren für die Kieferorthopädie. A. Quintessenz Zahntechnik. 2017; 43(10):2-12.

Beitrag im Einzelnen :

- Versuchsdurchführung, Auswertung und Interpretation der Daten der Modellscanner
- Erstellen der Bilder des Mastermodells (Abbildung 1/Abbildung3/Abb.4)
- Beitragende Literaturrecherche
- Korrektur des Manuskripts

Unterschrift, Datum und Stempel des betreuenden Hochschullehrers

Unterschrift des Doktoranden/der Doktorandin

3. Druckexemplare der ausgewählten Publikationen

Publikation 1

Nowak R, Wesemann C, Robben J, Muallah J, Bumann A. An in-vitro study comparing the accuracy of full-arch casts digitized with desktop scanners. Quintessence Int. 2017; 48(8): 667-676

Publikation 2

Muallah J, Wesemann C, Nowak R, Robben J, Mah J, Pospiech P, Bumann A. Accuracy of full-arch scans using intraoral and extraoral scanners: an in vitro study using a new method of evaluation. Int J Comput Dent. 2017;20(2):151-164

Publikation 3

Robben J, Muallah J, Wesemann C, Nowak R, Mah J, Pospiech P, Bumann A. Suitability and accuracy of CBCT model scan: An in vitro study. Int J Comput Dent. 2017;20(4):363-375

Publikation 4

Wesemann C, Muallah J, Nowak R, Robben J, Bumann Genauigkeit von digitalisierten Ganzkiefermodellen – Ein Überblick direkter und indirekter Verfahren für die Kieferorthopädie. A. Quintessenz Zahntechnik. 2017; 43(10):2-12.

Nowak R, Wesemann C, Robben J, Muallah J, Bumann A. An in vitro study comparing the accuracy of full-arch models digitalized with desktop scanners. Quintessence Int 2017;48(8):667-676.

<http://dx.doi.org/10.3290/j.qi.a38676>

Muallah J, Wesemann C, Nowak R, Robben J, Mah J, Pospiech P, Bumann A. Accuracy of full-arch scans using intraoral and extraoral scanners: an in vitro study using a new method of evaluation. *Int J Comput Dent.* 2017;20(2):151-164

<https://ijcd.quintessenz.de/index.php?doc=abstract&abstractID=38475>

Robben J, Muallah J, Wesemann C, Nowak R, Mah J, Pospiech P, Bumann A.
Suitability and accuracy of CBCT model scan: An in vitro study. *Int J Comput Dent.*
2017;20(4):363-375

<https://ijcd.quintessenz.de/index.php?doc=abstract&abstractID=39640>

Wesemann C, Muallah J, Nowak R, Robben J, Bumann Genauigkeit von digitalisierten

Ganzkiefermodellen – Ein Überblick direkter und indirekter Verfahren für die Kieferorthopädie. A. Quintessenz Zahntechnik. 2017; 43(10):2-12

<https://qz.quintessenz.de/index.php?jid=qz&doc=abstract&abstractID=39080>

4. Lebenslauf

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.

5. Publikationsliste

a. Publikationen

1. Nowak R, Wesemann C, Robben J, Muallah J, Bumann A. An in-vitro study comparing the accuracy of full-arch casts digitized with desktop scanners. Quintessence Int. 2017; 48(8): 667-676
2. Muallah J, Wesemann C, Nowak R, Robben J, Mah J, Pospiech P, Bumann A. Accuracy of full-arch scans using intraoral and extraoral scanners: an in vitro study using a new method of evaluation. Int J Comput Dent. 2017;20(2):151164
3. Robben J, Muallah J, Wesemann C, Nowak R, Mah J, Pospiech P, Bumann A. Suitability and accuracy of CBCT model scan: An in vitro study. Int J Comput Dent. 2017;20(4):363-375
4. Wesemann C, Muallah J, Nowak R, Robben J, Bumann Genauigkeit von digitalisierten Ganzkiefermodellen – Ein Überblick direkter und indirekter Verfahren für die Kieferorthopädie. A. Quintessenz Zahntechnik. 2017; 43(10):2-12.

b. Poster

1. J. Muallah, C. Wesemann, J. Robben, R. Nowak, A. Bumann; 89. Jahrestagung der DGKFO 14.-18.09.2016, Hannover
Titel: „Genauigkeit von digitalen Ganzkiefermodellen – Vergleich zwischen sechs Intraoralscannern“
2. J. Robben, C. Wesemann, J. Muallah, R. Nowak, A. Bumann; 89. Jahrestagung der DGKFO 14.-18.09.2016, Hannover
Titel: „Genauigkeit von digitalen Kiefermodellen für die virtuelle KFOchirurgische Behandlungsplanung“

3. R. Nowak, J. Robben, C. Wesemann, J. Muallah, A. Bumann; 89.
Jahrestagung der DGKFO 14.-18.09.2016, Hannover

Titel: „Genauigkeit von digitalen Kiefermodellen – Vergleich von elf
Modellscannern“

6. Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand von April 2015 bis Juli 2017 in der Arbeitsgruppe von Herrn Prof. Dr. med. dent. Axel Bumann, Leiter des Instituts für 3D DentalRadiologie – Mesantis Berlin in Zusammenarbeit mit dem Zentrum für Zahn-, Mund- & Kieferheilkunde der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin. Bedanken möchte ich mich bei allen, die mir in dieser Zeit geholfen haben und mich bei diversen Fragen unterstützt haben, insbesondere:

Herrn Prof. Dr. med. dent. Axel Bumann Leiter des Instituts für 3D Dental-Radiologie – Mesantis Berlin. Für die Vergabe des Themas sowie die Geduld, die er mir entgegenbrachte und die kontinuierliche wissenschaftliche Betreuung bei der Ausführung dieser Arbeit danke ich ihm herzlich.

Herrn Foedisch, Herrn Daletzki, Herrn Boros, Herrn Spinelli danke ich für die Bereitstellung der Geräte, Einweisung und Unterstützung bei technischen Problemen.

Herrn Christian Wesemann, Herrn Jonas Muallah und Herrn Jan Robben

Die Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe war stets eine willkommene und interessante Abwechslung zum universitären Alltag. Es war mir eine Freude Unterstützung und Motivation zu erfahren, als auch hilfreichen Rat und offene Kritik.