Aus dem Medizinischen Zentrum für

Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde

Geschäftsführender Direktor: Prof. Dr. Roland Frankenberger

des Fachbereichs Medizin der Philipps-Universität Marburg

In-vitro Untersuchungen zum Einfluss der subgingivalen Lage präparierter Zahnflächen auf deren korrekte Erfassung mit Hilfe intraoraler Scanner

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades der Zahnmedizin

dem Fachbereich Medizin der Philipps-Universität Marburg

vorgelegt von

Moritz Gädicke

aus Marburg

Marburg, 2025

Angenommen vom Fachbereich Medizin der Philipps-Universität Marburg am:
27.10.2025

Gedruckt mit Genehmigung des Fachbereichs Medizin

Dekan: Herr Prof. Dr. M. Hertl
Referent: Herr Prof. Dr. U. Lotzmann
1. Korreferent: Herr Prof. Dr. R. Frankenberger

Meiner Familie in ewiger Dankbarkeit gewidmet.

Inhaltsverzeichnis

I. Abbildungsverzeichnis III

II. Tabellenverzeichnis VI

III. Abkürzungsverzeichnis und Glossar VII

1 Einleitung 1

1.1 Zielsetzung der Studie 2

2 Grundlagen 3

2.1 Marginale Präparationsformen 3

2.2 Sulkusmanagement 5

2.3 Die digitale Abformung 7

2.4 Masterscan mit Hilfe indirekter Digitalisierung 8

2.5 Technische Grundlagen der Intraoralscanner (IOS) 9

2.5.1 Der TRIOS 3® 11

2.5.2 Der i700® 13

2.5.3 Der CEREC Primescan® 15

2.6 Digitales Ausgabeformat der IOS 16

2.7 Vermessungssoftware *PolyWorks®* 18

3 Material und Methodik 19

3.1 Teilstudie A 20

3.1.1 Vergleich der 3D-Scans mit Hilfe der *PolyWorks®* Software 23

3.1.2 Der Referenzscan 23

3.1.3 Vermessung der Scans 23

3.1.4 Referenzpunkte 24

3.1.5 Dokumentation und Weiterverarbeitung der Messdaten 25

3.2 Teilstudie B 26

3.2.1 Design und Fertigung des Mastermodels 26

3.2.2 Vergleich der 3D-Scans mit Hilfe der *PolyWorks®* Software 31

4 Ergebnisse ... 34
4.1 Teilstudie A ... 34
4.1.1 Teilstudie A1 – Überprüfung der Best-Fit Funktion der Vergleichssoftware *PolyWorks®* und der Reliabilität des Laborscanners ... 34
4.1.2 Teilstudie A2 – Vergleich der Mittelwerte der Scans aller drei IOS mit dem Referenzscan ausgehend vom Ankerzahn 17 ... 36
4.2 Teilstudie B ... 39
4.2.1 Wahl des Referenzscans ... 39
4.2.2 Vergleich der IOS-Scans des präparierten Zahnstumpfes 16 ... 40
4.2.3 Vergleich der Abweichungen der IOS-Scans des unteren Stumpfflächendrittels ... 43
4.2.4 Vergleich der Abweichungen der IOS-Scans des mittleren Stumpfflächendrittels ... 45
4.2.5 Vergleich der Abweichungen der IOS-Scans des oberen Stumpfflächendrittels ... 47
5 Diskussion ... 49
5.1 Diskussion Material und Methodik ... 49
5.2 Diskussion der Ergebnisse ... 54
5.2.1 Diskussion der Ergebnisse der Teilstudie A ... 54
5.2.2 Diskussion der Ergebnisse der Teilstudie B ... 55
5.3 Schlussfolgerung und Ausblick ... 58
6 Zusammenfassung ... 60
7 Summary ... 64
8 Literaturverzeichnis ... 67
9 Lebenslauf ... 74
10 Verzeichnis der akademischen Lehrer/-innen ... 75
11 Danksagung ... 76
12 Ehrenwörtliche Erklärung ... 77

I. Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: Präparationsformen modifiziert nach Kimmel et al. (1986) 3
Abb. 2.2: Lage der Präparationsgrenze 4
Abb. 2.3: Digitalisiertes Modell 7
Abb. 2.4: Gedrucktes Modell aus Druckharz 7
Abb. 2.5: T710® Laborscanner 9
Abb. 2.6: TRIOS 3® (3shape™) 11
Abb. 2.7: Schematische Darstellung der konfokalen Mikroskopie 11
Abb. 2.8: i700® (Medit) 13
Abb. 2.9: Schematischer Aufbau des Messprinzips der aktiven Triangulation 14
Abb. 2.10: Schematische Darstellung des Streifenlichprojektionsprinzips 14
Abb. 2.11: Primescan® (Dentsply Sirona™) 15
Abb. 2.12: Polygonisierung geometrischer Formen 16
Abb. 2.13: Exemplarische Darstellung von zwei mit Hilfe von PolyWorks|Inspector™ gematchten Scans eines präparierten Zahnes 18
Abb. 3.1: Referenzmodell (grau); zu untersuchender Scan (orange) 21
Abb. 3.2: Situation nach Best-Fit 21
Abb. 3.3: Referenzpunkte des ausgeschnittenen Zahnes 17 22
Abb. 3.4: Teilstudie A – Messpunkte des Masterscans von okklusal 24
Abb. 3.5: Teilstudie A – Messpunkte des Masterscans von oral 24
Abb. 3.6: Teilstudie A – Messpunkte des Masterscans von vestibulär 24
Abb. 3.7: a) Aufstellung der Keramikzähne in Wachs; b) Individuell gefertigtes Metallgerüst und aufgeklebte Keramikzähne; c) Modell ausgearbeitet mit präpariertem Zahnstumpf 16 und stabil fixiert mit dem Mikrometertisch – Okklusalansicht 27
Abb. 3.8: Finales Studienmodell mit Mikrometertisch – Frontalansicht 28
Abb. 3.9: a) Stumpf 16 von vestibulär – 0,0 mm; b) Stumpf 16 von okklusal – 0,0 mm; c) Stumpf 16 von vestibulär – -3,0 mm; d) Stumpf 16 von okklusal – -3,0 mm 29
Abb. 3.10: Links – Scan mit TRIOS 3®; Rechts – Scan mit Laborscanner T710®; Referenzpunkte nach 1. 30
Abb. 3.11: Teil B - Messpunkte des Zahnstumpfes 16 vestibulär 31

Abb. 3.12: Score 1; orange Linie – IOS-Scan; graue Linie – Referenzscan 32
Abb. 3.13: Score 2; orange Linie – IOS-Scan; graue Linie – Referenzscan 32
Abb. 3.14: Score 3; orange Linie – IOS-Scan; graue Linie – Referenzscan 33
Abb. 3.15: Score 4; orange Linie – IOS-Scan; graue Linie –Referenzscan 33
Abb. 4.1: Messpunkte zum Vergleich des „Best-Fit“ der Laborscans; Beispiel Best-Fit von Referenzmodell 3 zu Modell 4 34
Abb. 4.2: Vergleich der Mittelwerte der Scans des Laborscanners auf deren Reliabilität an den Referenzpunkten „distale Randleiste & Inzisalkante“. 35
Abb. 4.3: Vergleich der Mittelwerte der Scans des Laborscanners auf deren Reliabilität an den „zentro-vestibulären Referenzpunkten“. 35
Abb. 4.4: Vergleich der Mittelwerte der drei IOS ausgehend von Ankerzahn 17 im Verlauf des Zahnbogens an den Referenzpunkten „distale Randleiste“. 36
Abb. 4.5: Vergleich der Mittelwerte der drei IOS ausgehend von Ankerzahn 17 im Verlauf des Zahnbogens an den Referenzpunkten „zentro-vestibuläre Referenzpunkte“. 37
Abb. 4.6: Vergleich von zwei Scans mit Hilfe der „Best-Fit-Methode“. 38
Abb. 4.7: Orovestibulärer Schnitt durch überlagerte Scans des TRIOS 3® (graue Linie) und des Laborscanners T710® (farbige Linie). 39
Abb. 4.8: Ausschnitt aus 4.7; 2D-Schnittebene durch den Scan des TRIOS 3® (graue Linie) und den Scan des Laborscanners T710® (farbige Linie) - palatinale Präparationsgrenze 39
Abb. 4.9: Vergleich der Mittelwerte der drei IOS entlang des unteren Stumpfflächendrittels – Stumpf in Ausgangsposition mit äquigingivaler Lage der Präparationsgrenze 0,0 mm 43
Abb. 4.10: Vergleich der Mittelwerte der drei IOS entlang des unteren Stumpfflächendrittels – Stumpf um 3,0 mm subgingival verlagert 44
Abb. 4.11: Vergleich der Mittelwerte der drei IOS entlang des mittleren Stumpfflächendrittels – Stumpf in Ausgangsposition mit äquigingivaler Lage der Präparationsgrenze 0,0 mm 45
Abb. 4.12: Vergleich der Mittelwerte der drei IOS entlang des mittleren Stumpfflächendrittels - Stumpf um 3,0 mm subgingival verlagert 46

Abb. 4.13: Vergleich der Mittelwerte der drei IOS entlang des oberen Stumpfflächendrittels -Stumpf in Ausgangsposition mit äquigingivaler Lage der Präparationsgrenze 0,0 mm 47

Abb. 4.14: Vergleich der Mittelwerte der drei IOS entlang des oberen Stumpfflächendrittels – Stumpf um 3,0 mm subgingival verlagert 48

II. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: In dieser Studie verwendete IOS und Laborscanner 19

Tabelle 2: Stumpfunterteilung nach Art der Präparation 29

Tabelle 3: Subjektiver Evaluationsscore zur Darstellung der gescannten Präparationsgrenze 32

Tabelle 4: Subjektive Sichtbarkeit der Präparation 40

Tabelle 5: Anwendung des Evaluationsscores auf die Mesioapproximalfläche des Zahnes 16 41

Tabelle 6: Anwendung des Evaluationsscores auf die Distoapproximalfläche des Zahnes 16 41

Tabelle 7: Anwendung des Evaluationsscores auf die Vestibularfläche des Zahnes 16 42

Tabelle 8: Anwendung des Evaluationsscores auf die Oralfläche des Zahnes 16 42

III. Abkürzungsverzeichnis und Glossar

ALARA ..... As Low As Reasonably Achievable

CAD/CAM ..... Computer-aided design/Computer-aided manufactoring

CBCT ..... Cone-beam computed tomography

CEREC.. Chairside Economical Restoration of Esthetic Ceramics/CEramic REConstruction

DVT ..... Digitale Volumentomographie

IOS ..... Intraoralscanner

NEM..... Nichtedelmetall-Legierung

STL ..... Standard Tesselation Language

Orientierungspunkt: Ausgewählte Punkte auf zwei zu vergleichenden virtuellen Modellen, um diese übereinander lagern zu können („Best-Fit Methode“)

Referenzpunkte: Punkte, die auf dem Referenzmodell/Mastermodell ausgewählt wurden, um diese mit den Scans der Studie zu vergleichen

Best-Fit: Beruht auf der statistischen „Methode der kleinsten Quadrate“. Mit Hilfe von optionalen Orientierungspunkten, wird die Soll-Oberfläche eines CAD-Modells an die gemessenen Ist-Daten angepasst, sodass die Abweichungen an allen Messpunkten minimiert werden. Dieses Verfahren richtet das Bauteil theoretisch ideal aus.[52]

Mastermodell A: Hier ein Gipsmodell aus Superhartgips Typ 4 eines vollbezahnten Oberkiefers

Mastermodell B: Hier ein speziell angefertigtes Modell, welches aus einem beweglichen und einem fixierten Teil besteht. Das Modell eines Oberkiefers ist starr an dem Mikrometertisch befestigt. Der Zahnstumpf 16 ist mit dem beweglichen Teil des Mikrometertisches fixiert und lässt sich in der Vertikalen verschieben.

Matchen/Matching: Hier das digitale Überlagern von einem oder mehreren Scans der gleichen Situation

1 Einleitung

Um indirekte Restaurationen sowie festsitzenden und herausnehmbaren Zahnersatz herstellen zu können, muss zunächst mit Hilfe einer Abformung die intraorale Situation detailgenau und dimensionsgetreu erfasst werden.[65]

Die Passgenauigkeit prothetischer oder restaurativer Versorgungen hängt dabei nicht nur von der Qualität der Zahnpräparation ab. Für deren formgetreue Erfassung stehen neben den etablierten analogen, zunehmend auch digitale Abformtechniken zur Verfügung. Die analoge, bislang konventionelle Abformmethode kann vor allem durch verarbeitungsbedingte Fehler an Formtreue verlieren. Zudem können sich Fehler im Verlauf der Prozesskette aufaddieren, was letztlich zu einer insuffizienten, nicht einsetzbaren Versorgung führen kann.[33,65]

Durch die Markteinführung von Intraoralscannern (IOS), wurde eine neue Möglichkeit etabliert, Zähne und auch zahnlose Kieferabschnitte direkt im Mund des Patienten dreidimensional zu erfassen.[49,54]

Alle derzeit auf dem Markt erhältlichen IOS sind optische Scanner und können daher - im Gegensatz zur analogen Abformung - nur Hart- und Weichgewebsstrukturen darstellen, die im Mund des Patienten auch tatsächlich vom Behandler einsehbar sind. Dies betrifft insbesondere subgingival liegende Zahnflächen.

Im Vergleich zu den analogen Abformmethoden, können bei der digitalen Abformung mehrere Prozessschritte übersprungen werden, wodurch der Arbeitsaufwand, sowie die Fehlerpotenzierung minimiert werden.

Die digitale Erfassung der Mundsituation bietet zudem in Kombination mit der CAD/CAM-Technologie die Möglichkeit, Zahnersatz computergestützt zu designen und mit subtraktiven oder additiven Verfahren aus hochwertigen, industriell gefertigten Materialien herzustellen.[63]

Welches Abformverfahren zur Anwendung kommen sollte, hängt von der jeweiligen Indikation und der darzustellenden Mundsituation ab.[28]

1.1 Zielsetzung der Studie

Hauptziel der vorliegenden Studie ist es, zu untersuchen, wie sich die subgingivale Lage einer Präparationsgrenze – die mittels eines Mundspiegels noch einsehbar ist – auf die Formtreue der digitalen intraoralen Abformung eines präparierten Zahnstumpfes auswirkt. Hierbei soll insbesondere der Frage nachgegangen werden unter welchen anatomischen Verhältnissen tiefliegende Präparationsgrenzen und Flächen des präparierten Zahnstumpfes zirkulär noch korrekt erfasst werden. Das digitale Überlagern und räumliche Vermessen von Scans im Vergleich zum Referenzscan soll in dieser Studie mit der Software *PolyWorks|Inspector®* und *PolyWorks|Modeler®* (InnovMetric Software Inc., Québec, Canada) erfolgen.

Folgende Nullhypothesen (H_0) sollen geprüft werden:

1. Die drei für das korrekte Überlagern digitaler Scans erforderlichen Orientierungspunkte können in *PolyWorks|Inspector®* willkürlich gesetzt werden.
2. Visuelle Einsehbarkeit der Präparationsgrenze vorausgesetzt, haben subgingivale Lage der Präparationsgrenze, sowie Form und Morphologie des präparierten Zahnstumpfes, keinen Einfluss auf die formkorrekte Erfassung mit Hilfe von intraoralen Scannern.

2 Grundlagen

Die unterschiedlichen prothetischen Versorgungsmöglichkeiten eines Zahnes erfordern, insbesondere unter Berücksichtigung der Parameter des Versorgungsmaterials, unterschiedliche Präparationsformen. Das Ausmaß des Substanzabtrages ist im Wesentlichen vom verwendeten Material abhängig.

Im Folgenden werden die verschiedenen marginalen Präparationsformen erläutert und anschließend die digitale Methode der dentalen Abformung näher betrachtet.

2.1 Marginale Präparationsformen

Kimmel et al. (1986) beschreiben vier verschiedene Arten der marginalen Präparationsform:[63]

1. Tangentialpräparation
2. Hohlkehlpräparation
3. Stufenpräparation
4. Stufenpräparation mit Abschrägung

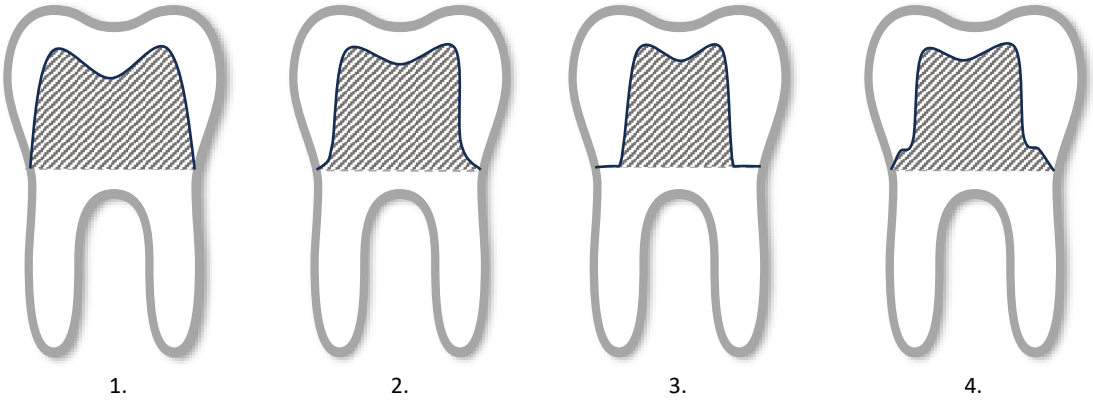

Abb. 2.1: Präparationsformen modifiziert nach Kimmel et al. (1986)
1. Tangentialpräparation; 2. Hohlkehlpräparation; 3. Stufenpräparation; 4. Stufenpräparation mit Abschrägung

- Die **Tangentialpräparation** (Abb. 2.1-1) ist relativ leicht auszuführen und schont im Vergleich zu den anderen drei Formen die Zahnhartsubstanz im marginalen Bereich am meisten. Sie wird vor allem bei sehr weit subgingival in den Wurzelbereich reichenden Präparationen durchgeführt. Nachteilig ist hierbei die oftmals nicht eindeutig definierte und sichtbare Präparationsgrenze.

Aufgrund des geringen Substanzabtrages eignet sich diese Präparationsart für Vollmetallkronen und Verblendkronen mit breitem zervikalen Metallrand, deren zervikaler Rand feinauslaufend gearbeitet werden muss.

- Die **Hohlkehlpräparation** (Abb. 2.1-2) ermöglicht eine klar definierte Präparationsgrenze, benötigt aber mehr Substanzabtrag als die Tangentialpräparation. Diese Präparationsart ist für Metallkeramik- und Vollkeramikrestaurationen indiziert, da diese ausreichend Platz für die Materialmindeststärke der jeweiligen Restaurationen schafft. Beim Anlegen der Hohlkehle ist darauf zu achten, dass kein überkonturierter Grat entsteht.
- Die **Stufenpräparation** (Abb. 2.1-3) ermöglicht eine klar definierte Präparationsgrenze, verlangt aber einen deutlich höheren zervikalen Substanzabtrag. Mit dieser Präparationsform lassen sich ästhetisch optimale Ergebnisse des Zahnersatzes erzielen.
- Bei der **Stufenpräparation mit Abschrägung** (Abb. 2.1-4) wird die zuvor angelegte Stufe im Randverlauf der Präparation mit einer Abschrägung versehen.

Hinsichtlich des Verlaufs der Präparationsgrenze zum umliegenden Weichgewebe werden eine supragingivale, äquigingivale oder subgingivale Lage der Präparationsgrenze unterschieden (Abb. 2.2):

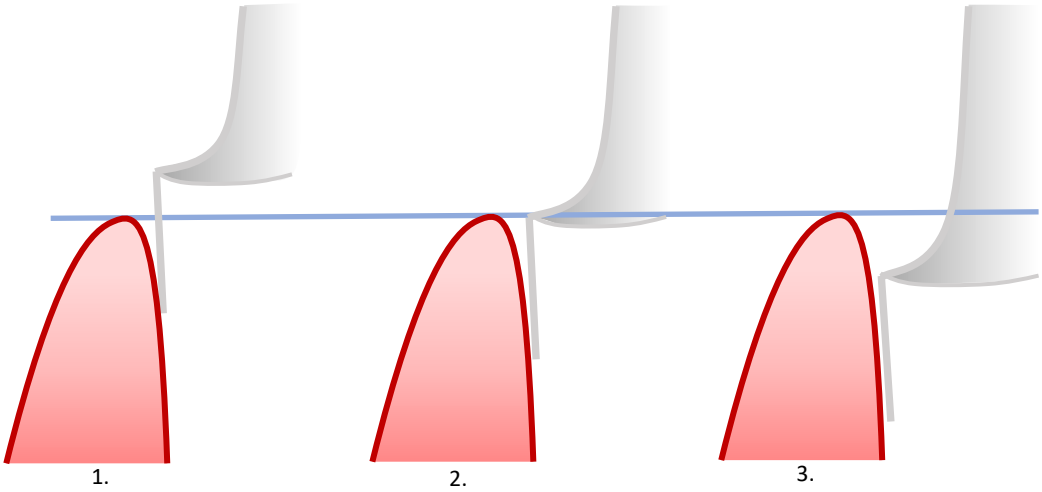

Abb. 2.2: Lage der Präparationsgrenze
1. Supragingival; 2. Äquigingival; 3. Subgingival
rote Linie – Gingiva, graue Linie – Ausschnitt der Präparationsgrenze eines Zahnes, blaue Linie – Referenzlinie des Zahnfleischsaumes

Um eine Präparationsgrenze mit einem Intraoralscanner (IOS) gut erfassen zu können, muss sie klar definiert und direkt einsehbar sein. Dies erfordert bei subgingival liegenden Präparationsgrenzen in Abhängigkeit von der Tiefe der Präparation und dem Zustand des Weichgewebes ein entsprechendes Sulkusmanagement.

2.2 Sulkusmanagement

Das Ziel des Sulkusmanagements ist es, den Sulkus zumindest temporär zu weiten und zum Zeitpunkt der Abformung eine Kontamination der Präparationsgrenze durch Blut und Speichel zu verhindern. Dabei soll die „biologische Breite“ erhalten bleiben. Dieser Begriff beschreibt den dentogingivalen Komplex aus epithelialem (ca. 1 mm) und bindegewebigem (ca. 1 mm) Attachment, sowie dem Zahnfleischsulkus (ca. 0,7 mm) eines Zahnes.[43]

Für das Sulkusmanagement stehen unterschiedliche mechanische, chemische und chirurgische Methoden zur Verfügung, welche einzeln oder in Kombination eingesetzt werden können, um so die bestmögliche Darstellung der Präparationsgrenze zu erreichen.

Folgende Methoden können für die Konditionierung des Sulkus angewendet werden:[57,67,68]

1. Retraktionsfäden
2. Medikamentöse Zusätze
3. Retraktionspasten
4. Elastische Retraktionsmanschetten
5. Chirurgische Methoden

- **Retraktionsfäden** gibt es in unterschiedlichen Stärken und Formen. Sie können mit oder ohne medikamentöse Zusätze verwendet werden. Ein oder zwei Fäden werden mit Hilfe eines dentalen Fadenlegers zwischen Zahn und Gingiva mit leichtem Druck eingebracht. Dabei ist darauf zu achten das Epithel und die Desmodontalfasern zum Erhalt der biologischen Breite nicht zu traumatisieren.

- Als **medikamentöse Zusätze** werden Vasokonstringentien und Adstringentien verwendet. Adrenalin wird als lokaler Vasokonstriktor eingesetzt und führt zu einer ischämiebedingten Reduktion der Durchblutung der gingivalen Gefäße, wodurch es zu einer transienten Schrumpfung des marginalen Weichgewebes sowie zu einer effektiven Hämostase kommt. Adstringentien sind Aluminiumverbindungen, wie beispielsweise Aluminumsulfat, oder Eisensulfat, welche eine Proteinausfällung bewirken und dadurch eine Weichgeweberetraktion auslösen und Blutungen stoppen.
- Es gibt zwei unterschiedliche Systeme der **Retraktionspasten.** Eine rein mechanische Verdrängung und eine Kombination aus chemischer und mechanischer Retraktion. Die Retraktionspasten werden mit einer stumpfen Metallkanüle langsam in den Sulkus appliziert und nach zwei Minuten Einwirkzeit komplett ausgespült. Die Retraktionswirkung hält je nach Produkt bis zu zwei Minuten an, während dieser Zeit muss die Abformung erfolgen.
- Zu den rein mechanischen Hilfsmitteln zählt die **elastische Retraktionsmanschette**. Diese gummielastischen Ringe werden, in der zu der Präparation passenden Größe, über den Stumpf gestülpt und nach der atraumatischen Verdrängung der Gingiva entfernt.
- **Chirurgische Maßnahmen** (Elektrotom, Laser) zielen darauf ab, den Sulkus zu eröffnen und bei Bedarf überschüssiges Weichgewebe zu entfernen.

2.3 Die digitale Abformung

Die Möglichkeit Zahnreihen zu digitalisieren, auf den so resultierenden dreidimensionalen Modellen Zahnersatz zu designen und anschließend zu schleifen oder zu drucken, hat in der Zahnmedizin und Zahntechnik zu neuen Arbeitsprozessen geführt (Abb. 2.3 und 2.4).

Abb. 2.3: Digitalisiertes Modell

Abb. 2.4: Gedrucktes Modell aus Druckharz

Die ersten mit Hilfe der CAD-CAM-Technologie gefertigten Restaurationen erfolgten durch W. H. Mörmann und M. Brandestini, die 1985 das von ihnen entwickelte CEREC - System zur digitalen Fertigung von Restaurationen vorstellten.[37,47]

Zähne und Kieferareale können indirekt oder direkt digital erfasst werden.

Bei der **indirekten** Methode erfolgt zunächst eine konventionelle Abformung und anschließend die Modellherstellung. Dieses Modell wird dann mit einem stationären optischen oder taktilen Laborscanner oder einem handgeführten IOS digitalisiert.

Der **direkte** Weg beschreibt die intraorale Digitalisierung der Mundsituation durch einen Intraoralscanner. Dieses direkte Verfahren zeigt viele Vorteile im praktischen Workflow im Vergleich zur konventionellen Abformung. Vor allem sind die direkte Darstellung der Abformung in Echtzeit mit der Möglichkeit der sofortigen Kontrolle, sowie die einfache und selektive Wiederholbarkeit bei unzureichender Scanqualität, als Vorteile zu nennen. Außerdem kann durch die digitale Speicherung auf eine Lagerung von physischen Modellen verzichtet und somit nachhaltig Material gespart werden. Zusätzlich kommt noch die Reduktion des Infektionsrisikos, wie es bei konventionell genommenen Abformungen besteht.[70]

Sowohl bei der direkten, als auch der indirekten Variante wird die herzustellende Restauration am Computer konstruiert (CAD). Im weiteren Produktionsprozess wird die konstruierte Restauration in verschiedenen Fertigungsverfahren hergestellt (CAM). Hier werden additive von den subtraktiven Fertigungsverfahren unterschieden.
Die additiven Verfahren verarbeiten die digitalen Restaurationen via Lasermelting oder 3D-Druck zu einer physischen Restauration. Das subtraktive Verfahren beschreibt das Schleifen oder Fräsen einer Restauration aus einem vorgefertigten Rohling.[60]

2.4 Masterscan mit Hilfe indirekter Digitalisierung

Besteht keine Möglichkeit eine direkte digitale Abformung durchzuführen, kann auf eine Kombination von analoger und digitaler Erfassung zurückgegriffen werden. Nach der konventionellen Modellherstellung kann dieses mit Hilfe von Laborscannern digitalisiert werden, um anschließend mit dem Datensatz mittels CAD weiterzuarbeiten.
Dieses Verfahren (indirekte Digitalisierung) wurde in der vorliegenden Studie verwendet, um einen Masterscan anzufertigen und anschließend mit den Scans der Intraoralscanner (direkte Digitalisierung) zu vergleichen.
Generell lassen sich taktile von den optischen Erfassungsmethoden der Laborscanner unterscheiden. Die taktile Erfassung erfolgt mittels Tastkugeln verschiedener Größen, wodurch eine hohe Genauigkeit erzielt wird. Der Nachteil dieser Methode ist die Möglichkeit der Beschädigung von Objektoberflächen durch die mechanische Belastung. Einsatzgebiete sind vorallem die Teleskoptechnik zur präzisen Ermittlung der Primärteleskope.
Die optischen Laborscanner erfassen das Objekt mit Licht, wodurch keine Veränderung der gescannten Oberflächen stattfindet.[4]

Im Rahmen dieser Studie wurde der Medit™ *T710®* Modellscanner verwendet. Der *T710®* (Medit™, Seoul, Südkorea) ist ein optischer Streifenlichtscanner mit insgesamt vier 5,0 Megapixel Kameras (5,0 MP resolution camera system), welcher mit einer Genauigkeit von 4 µm scannt. Die Abtastung eines Ganzkiefermodells erfolgt nach Herstellerangaben in durchschnittlich 8 Sekunden. Die Lichtquelle ist eine sogenannte Blue-LED und wird mit der optischen Triangulation zur Erfassung eingesetzt (Abb. 2.5).[35]

Abb. 2.5: T710® Laborscanner
Bildquelle: Fa. Medit™

In Studien von Ebeid et al.[10] und Borbola et al.[6] wurde der Medit™ *T710®* mit unterschiedlichen IOS verglichen und zeigte, gemeinsam mit dem *E4* von 3Shape™, die höchste Genauigkeit in der formgetreuen dreidimensionalen Erfassung von Kiefermodellen.

2.5 Technische Grundlagen der Intraoralscanner (IOS)

Die Funktion des Intraoralscanners (IOS) ist es die intraorale Patientensituation direkt und formgetreu in drei Raumachsen zu erfassen.

Bislang ist es durch die Bauart der IOS und wegen den anatomischen Verhältnissen der Mundhöhle technisch nur möglich kleine Abschnitte mit dem Intraoralscanner zu erfassen, sodass viele kleine Bilder aus verschiedenen Richtungen den vollständigen Datensatz der Mundsituation wiedergeben. Diese Bilder werden durch einen Softwarealgorithmus zusammengefügt („stitching“) und überlagert („matching“).

Im Gegensatz zur beweglichen Gingiva und Mukosa können markante nicht bewegliche Strukturen, wie beispielsweise die Zähne, gut erfasst und zusammengesetzt werden.[53]

Die auf dem Markt erhältlichen IOS-Systeme lassen sich hinsichtlich Oberflächenvorbereitung, Darstellungsweise und Aufnahmetechnologie unterteilen:[71]
Die aktuell auf dem Markt verfügbaren Intraoralscanner sind in der Regel für eine puderfreie Anwendung konzipiert. Bei stark spiegelnden oder metallischen Oberflächen, die durch den IOS schwer zu erfassen sind, kann dennoch auf Oberflächenkonditionierung mittels Titanoxid Spray zurückgegriffen werden.
Ein weiteres Kriterium ist die Darstellung des aufgenommenen Objekts auf dem Bildschirm, die entweder in Schwarz-Weiß oder im Farbmodus erfolgt.
Hinsichtlich der Aufnahmetechnologie unterscheidet man drei prinzipielle Aufnahmemethoden:
Die *aktive Triangulation*, die *konfokale Mikroskopie* und das *Active - Wavefront - Sampling*.[53] Des Weiteren steht seit 2019 eine zusätzliche Technologie zur Verfügung, welche die konfokale Mikroskopie und die aktive Triangulation in Form von Streifenlichtprojektion miteinander kombiniert.[9] Diese sogenannte „Hochfrequenz Kontrastanalyse“ ist von der Firma *Dentsply Sirona™* patentiert.
Im Folgenden werden die in dieser Studie verwendeten Scanner und deren Messtechnologien näher beschrieben.

2.5.1 Der *TRIOS 3®*

Das Messprinzip des *TRIOS 3®* (*3shape™*, Abb. 2.6) beruht auf der konfokalen Mikroskopie.[53]

Abb. 2.6: TRIOS 3® (3shape™)

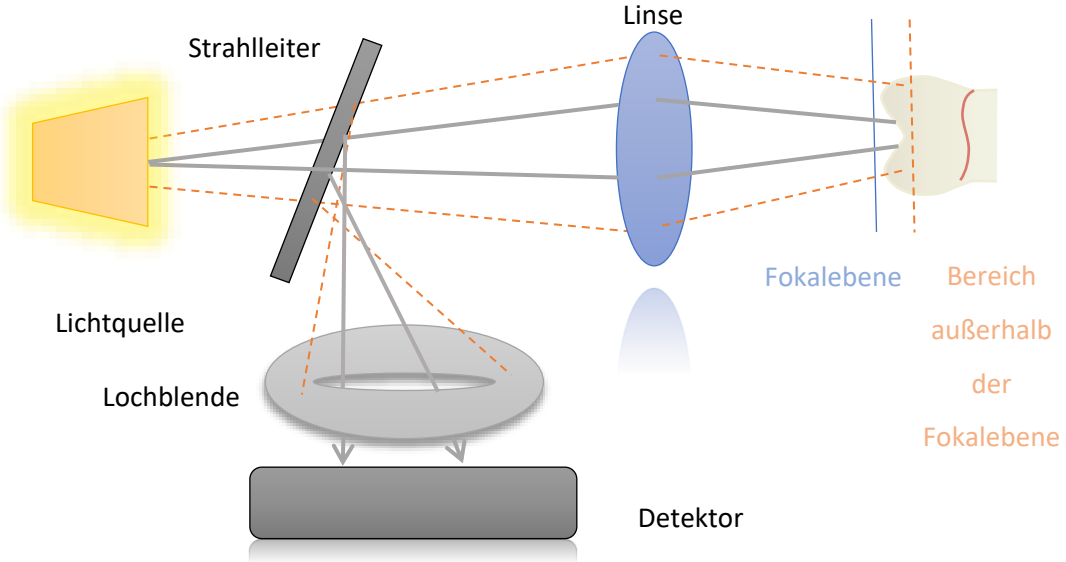

Abb. 2.7: Schematische Darstellung der konfokalen Mikroskopie

Hierbei wird ein Lichtstrahl über eine Linse auf das zu erfassende Objekt gelenkt. Die Strahlen werden von dem Objekt reflektiert und treffen anschließend auf einen Strahlenleiter. Sowohl die ausgesandten, als auch die reflektierten Strahlen verlaufen bis hier in einer Ebene – demnach konfokal. Der Strahlenleiter lenkt die reflektierten Strahlen um, welche auf eine Lochblende treffen. Die Lochblende hat die Aufgabe, diffuse Lichtstrahlen, die außerhalb der Fokusebene reflektiert werden, zu beseitigen. Dadurch wird ausschließlich der Bereich der Fokalebene dargestellt, wodurch ein scharfes Bild entsteht (Abb. 2.7).

Durch mehrere Aufnahmen in unterschiedlichen Ebenen werden viele Schnittbilder erfasst, welche anschließend zu einem dreidimensionalen Modell zusammengeführt werden. Die z-Koordinate gibt die Höhe des Objekts an, die x- und y-Koordinaten resultieren durch die Lage der Bildpunkte auf dem Detektor der Kamera.[31,53]

Durch den Scanvorgang und die damit zusammenhängenden Bewegungen des Scankopfes können Bewegungsartefakte entstehen. Um diese Artefakte zu minimieren werden zahlreiche Bilder mit einer hohen Frequenz aufgenommen, sodass große Mengen Bilderstapel entstehen. Um eine derart große Datenmenge verarbeiten zu können, muss im Scannerkopf ein Bildprozessor integriert sein. Daraus resultiert ein relativ großer Scankopf. Mit diesem können beim Scanvorgang schwer einsehbare Areale im distobukkalen Molarenbereich oder bei geringer Mundöffnung zuweilen gar nicht erfasst werden.[14,24]

Zum Erfassen des Objekts ist eine Puderapplikation nicht notwendig. Die Funktionsweise des Scanvorganges wird als *Ultrafast Optical Sectioning Technology* beschrieben, bei der neben der konfokalen Mikroskopie, ein Echtzeit Video mit 3D Bildüberlagerung stattfindet.[72] Der Aufnahmemodus des *TRIOS 3®* wird mit 25 Bildern pro Sekunde beschrieben.[69] Das System stellt über einen STL-Export eine offene Schnittstelle zu Digitalsystemen anderer Anbieter dar.[72]

Im Rahmen dieser Studie wurde zur Masterscan Erfassung die *TRIOS 3® Cart*-Version verwendet. Diese Cart-Version verfügt über einen Pistolengriff, welcher mit einem Gyrosensor versehen ist, wodurch eine berührungslose Bewegung des erfassten Scans auf dem Bildschirm möglich ist.

Für die in-vitro-Studie in Teilabschnitt B zur Erfassung der subgingivalen Präparationsgrenze wurde die *TRIOS 3® wireless* Version benutzt.

Die Aufnahmegeschwindigkeit des *TRIOS 3®* liegt für erfahrene Anwender bei nur 15 Sekunden pro Kiefer.[72] In einer Studie von Kim et al. (2016) wurden der *TRIOS 3®* und *iTero Element®* miteinander verglichen, wobei eine bessere Lernkurve beim Einsatz des *TRIOS 3®* festgestellt wurde.[29]

2.5.2 Der i700®

Der *i700®* der Firma *Medit™* (Abb. 2.8) verwendet zur Oberflächenerfassung das Prinzip der aktiven Triangulation.

Abb. 2.8: i700® (Medit)
Bildquelle: Fa. Medit™

Diese Methode benötigt einen Projektor und einen Detektor, welche in einem konstanten und definierten Abstand zueinander montiert sind. Ausgehend vom Projektor wird ein Lichtstrahl auf das zu erfassende Objekt gesendet und anschließend die Reflektion im Detektor erkannt. Dabei wird ein definiertes Dreieck gebildet, welches aus dem Projektor, dem Objekt und dem Detektor besteht. Durch den bekannten Ausfallwinkel des Lichtstrahles des Projektors kann nun der Einfallwinkel des reflektierten Lichtes auf den Detektor durch die Software errechnet werden.
Somit kann die Größe des Abstandes zum Objekt durch Triangulation definiert werden.[19,31,53] Bei dieser Methode werden nur Punkte detektiert, wodurch eine Erfassung eines komplexen Objekts sehr lange Zeit in Anspruch nehmen würde (Abb. 2.9). Um dem entgegenzuwirken wird ein Streifenlicht auf das Objekt projiziert, wodurch das Licht die Oberflächen eines unebenen Objekts unterschiedlich bricht. Es entstehen verzerrte Linien. Diese Verzerrungen führen zu einer unterschiedlichen Höhenverteilung der Punkte und Linien, wodurch der Abstand errechnet werden kann und ein Profil resultiert (Abb. 2.10).[47] Eine möglichst gleichmäßige Lichtabsorption ist Voraussetzung für eine optimale Darstellung der Oberfläche. Daraus folgt, dass spiegelnde Bereiche, wie metallische Kronen oder mit Speichel belegte Oberflächen, schwierig zu erfassen sind. Um dieses Problem zu umgehen, wurde der Spektralbereich des Streifenlichtes mit Hilfe von unterschiedlichen Farben erhöht, wodurch eine Mattierung der Oberflächen durch Puder nicht mehr nötig ist.[53]

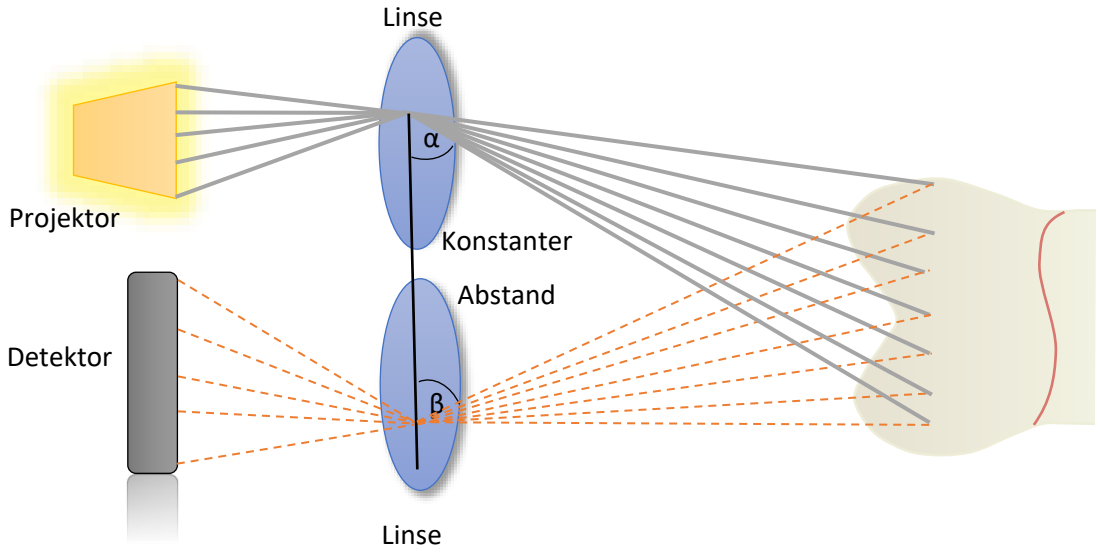

Abb. 2.9: Schematischer Aufbau des Messprinzips der aktiven Triangulation

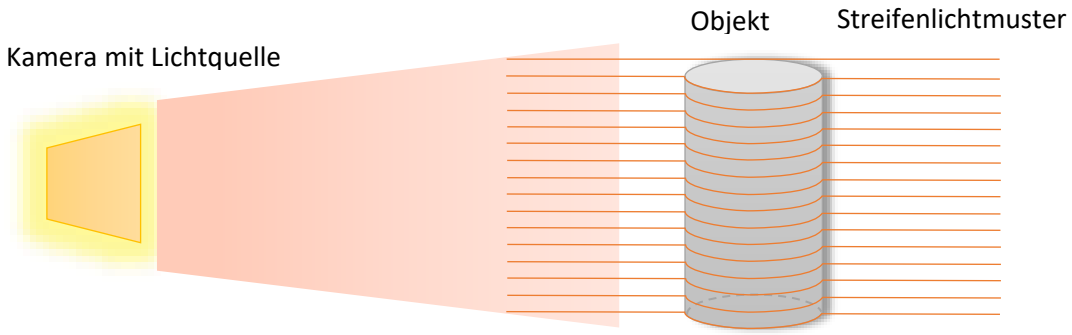

Abb. 2.10: Schematische Darstellung des Streifenlichprojektionsprinzips

Der Aufnahmemodus wird als „3D in motion video technology/ 3D full-color streaming capture“ bezeichnet und kann bis zu 70 Bilder pro Sekunde aufnehmen.[39] Der Scanner ist in einer kabelgebundenen und einer wireless Version verfügbar.

2.5.3 Der CEREC Primescan®

Der *Primescan®* wurde 2019 von der Firma *Dentsply Sirona™* vorgestellt (Abb. 2.11).

Abb. 2.11: Primescan® (Dentsply Sirona™)

Dieser Intraoralscanner arbeitet nach Firmenangabe nach einer patentierten, neuartigen Technologie zur Oberflächenerfassung, der sogenannten *„optischen Hochfrequenz Kontrastanalyse“.*

Über die Technologie dieses patentierten Verfahrens gibt es in der Literatur nur wenige Informationen. Der Patentschrift WO 2020/011483 A1 zufolge, wird die konfokale Mikroskopie und Streifenlichtprojektion kombiniert.[30]

Der Intraoralscanner *Primescan AC ®* ist als Cart Version, aber auch als Laptop-Variante (Primescan Connect) verfügbar. Die Cart Version besitzt einen integrierten Akku, ein Touchpad, sowie einen Touchscreen, worüber der digitale Scan in Farbe dargestellt wird.

Der Hersteller *Dentsply Sirona™* gibt an, dass ihr dynamisches Objektiv in der Lage ist, Objekte mit über 20 Bewegungen pro Sekunde mittels des sogennanten „Dynamic Depth Scan“ präzise zu erfassen.

Eine Tiefenschärfe von 20 mm kann durch die Erfassung von einer Million 3D-Punkten pro Sekunde sowie mehr als 50.000 Bildern je Kieferscan erzielt werden.[9]

Durch einen Algorithmus werden während des Scans alle nicht benötigten Bereiche, zum Beispiel die Zunge oder ein zahnärztlicher Spiegel, automatisch entfernt.[59]

2.6 Digitales Ausgabeformat der IOS

Das digitale Standardausgabeformat, der von einem IOS erfassten und verarbeiteten Daten, wird als *Standard Tesselation Language* (STL) bezeichnet.

Die STL-Datei beschreibt eine fest definierte geometrische Form eines Festkörpermodells. Hierbei werden viele einzelne Punkte der Oberfläche des Festkörpers aufgenommen, wodurch eine Punktewolke entsteht. Jeder Punkt ist durch eine x-, y-, z-Koordinate definiert. Eine Punktewolke ist je nach Qualität und Form der Aufnahme dichter oder weniger dicht. Die Punktewolke, welche während der Triangulation entsteht, wird durch die Polygonisierung zu vielen unterschiedlich kleinen Dreiecken geschlossen. Hierzu werden drei nebeneinander liegende Punkte zu einem Dreieck verbunden.[53] Diese Dreiecke bilden anschließend die darzustellende Fläche des Objekts.

Abbildung 2.12-a zeigt einen Würfel, der nach erfolgter Polygonisierung als 3 - dimensionales Objekt beschrieben werden kann. Hierzu muss jede Fläche in mindestens zwei Dreiecke aufgeteilt werden. Somit sind zwölf Dreiecke die Mindestanzahl, um den Würfel dreidimensional darstellen zu können. Intraoralscanner erfassen wesentlich komplexere Strukturen, wodurch eine erhöhte Dichte an Dreiecken erforderlich ist, um eine Annäherung an die geometrische Form zu erzielen (Abb. 2.12 c - d).

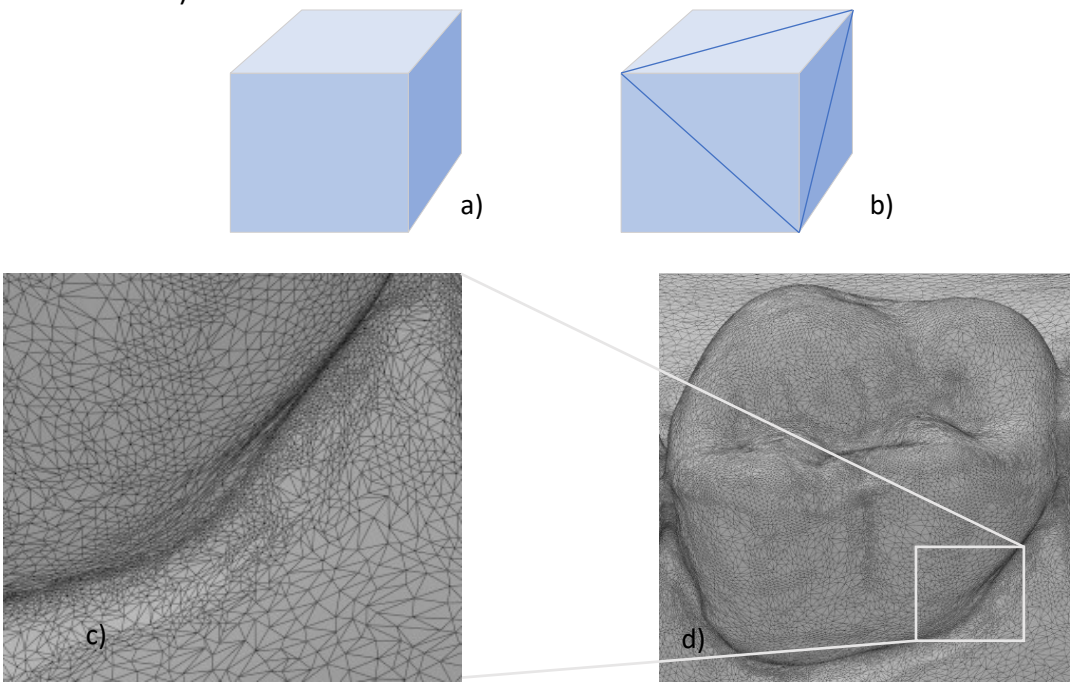

Abb. 2.12: Polygonisierung geometrischer Formen
a) Würfel; b) Polygonisierung anhand eines Würfels; c) – d) Zoom eines gescannten Modells

Die Software der Intraoralscanner kann mit Hilfe eines Algorithmus unterschiedliche Qualitäten der Mesh-Dichte ausgeben, um die Datenmenge – wenn möglich – zu reduzieren. Dadurch entstehen an flachen Oberflächen, zum Beispiel an vestibulären Flächen, geringere Mesh-Dichten. An Kanten und Rundungen, wie Inzisalkanten oder Höckerspitzen, werden wiederum höhere Dichten ausgegeben.

In der Studie von Richert et al. (2017) wurden verschiedene Softwarealgorithmen auf deren Genauigkeit untersucht. Hieraus geht hervor, dass unterschiedliche Algorithmen zu unterschiedlichen Glättungen der Oberfläche und daraus folgend zu unterschiedlichen Genauigkeiten führen.[51]

2.7 Vermessungssoftware *PolyWorks®*

Die digitale Bearbeitung und Vergleich der im Rahmen dieser Studie durchgeführten Scans erfolgten mit den Modulen *PolyWorks|Inspector™* und *PolyWorks|Modeler™* der Software *PolyWorks® Meteorology Suite 2021* (InnovMetric Software Inc., Québec, Canada; Vertrieb: Duwe-3d AG, Peter-Dornier-Straße 9, 88131 Lindau, Deutschland).

Dabei handelt es sich um eine Hochleistungssoftware, die insbesondere in der Industrie zur präzisen dreidimensionalen Maßanalyse und Qualitätskontrolle von Werkzeug- oder Bauteilen eingesetzt wird und mit der sich Fertigungs-, sowie Montageprobleme erkennen und vermeiden lassen. Prinzipiell können alle STL-Datensätze, wie sie auch von Dentalscannern generiert werden, mit Hilfe von *PolyWorks|Inspector™* auf Passung und Abweichung hin verglichen werden. Unterschiede werden als Falschfarbendarstellung illustriert oder als nummerische Messwerte für die statistische Analyse ausgegeben (Abb.: 2.13).[26]

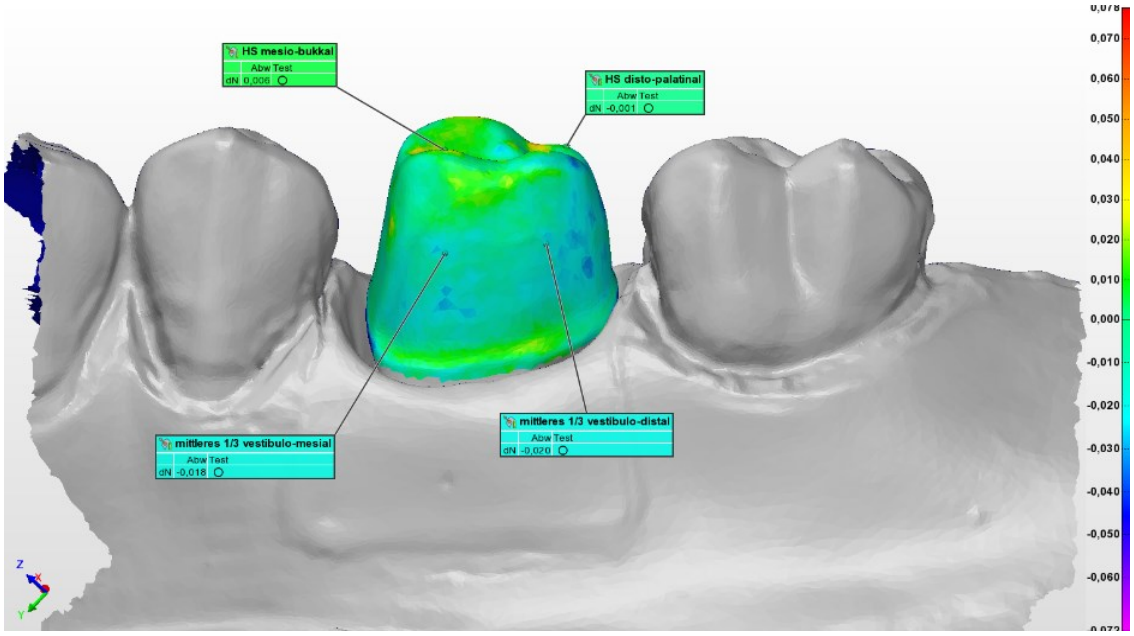

Abb. 2.13: Exemplarische Darstellung von zwei mit Hilfe von PolyWorks|Inspector™ gematchten Scans eines präparierten Zahnes
Ansicht von bukkal. Differenzen der Scans werden als Zahlenwerte und/oder farblich codiert dargestellt.

3 Material und Methodik

Die Gesamtstudie teilt sich auf in eine Teilstudie A und Teilstudie B. In beiden Studien wurden folgende handelsübliche Intraoralscanner (IOS) eingesetzt:

1. *TRIOS 3®*
2. *i700®*
3. *CEREC Primescan®*

Zusätzlich erfolgte die Erfassung des Masterscans mit dem Laborscanner *T710®* der Firma *Medit™* (Tabelle 1).

Tabelle 1: In dieser Studie verwendete IOS und Laborscanner

Scanner	*Technologie*	*Hersteller*
TRIOS 3®	Ultrafast Optical Sectioning Technology (Konfokale Mikroskopie)	3shape™ (Kopenhagen, Dänemark)
Medit i700®	3D-in-Motion Video Technologie (Aktive Triangulation)	Medit™ (Seoul, Südkorea)
CEREC Primescan®	Hochfrequenzkontrastanalyse (aktive Triangulation + konfokale Mikroskopie)	Dentsply Sirona™ (Bensheim, Deutschland)
T 710®	Optischer Streifenlichtscanner (Blue-LED, optische Triangulation)	Medit™ (Seoul, Südkorea)

3.1 Teilstudie A

In Teilstudie A wurde die Reproduzierbarkeit der „Best-Fit“-Matchingfunktion der Vermessungssoftware *PolyWorks®*, sowie mögliche räumliche Abweichungen wiederholter Scans eines identischen Objekts, anhand eines standardisierten Gipsmodells eines vollbezahnten Oberkiefers, überprüft.

Für die Herstellung dieses Gipsmodells wurde der Spezial-Superhartgips Typ IV (nach ISO 6873:2013, *sockel-plaster® GT 160*) der Firma *dentona®* verwendet. Die Verarbeitung des Gipses erfolgte nach Herstellerangaben. *Dentona®* gibt für diesen Spezial-Superhartgips eine durch die Abbindereaktion bedingte Expansion von < 0,06% nach DIN an.[8] Trocken und bei Raumtemperatur gelagert, erfahren mit Typ IV-Gips gefertigte Modelle keine Formänderung mehr.[32] Zwischen den Versuchsdurchführungen wurde das Modell trocken gelagert und nicht beschädigt.

Die Teilstudie A unterteilt sich in Teilstudie A1 und A2.

Zuerst wurde das aus Superhartgips bestehende Mastermodell A mit dem Laborscanner (*T710®, Medit*) sieben Mal gescannt und digitalisiert. Die ersten beiden Scans dienten als Probeläufe. Die Scans 3-7 gingen in die Auswertung der Teilstudie A1 ein (n = 5).

Anschließend erfolgte in der Teilstudie A2 die Erfassung des Gipsmodells gemäß den von den Herstellern angegebenen Scanpfaden mit jedem IOS fünfmal (n = 5).

Sowohl die vom Hersteller empfohlenen Scanpfade, als auch die Scanzeit für die vollständige Erfassung des Modells, wurden für die drei IOS der Studie weitestgehend eingehalten. Alle Scans erfolgten unter gleichen Rahmenbedingungen.

Die Scans wurden anschließend mit der digitalen Vermessungssoftware *PolyWorks®* erfasst und mit Hilfe der „Best-Fit“ Funktion verglichen.

In Teilstudie A1 wurden zur Überprüfung der Reliabilität der Vermessungssoftware drei unterschiedliche Best-Fit Varianten untersucht. Als Referenzscan (Goldstandard) für den Vergleich aller Scans der Teilstudie A diente das mit dem Laborscanner digitalisierte Modell (Scan #3). Dieser Referenzscan wurde mit 132 definierten Messpunkten versehen. Die räumliche Lage der drei zum Matchen erforderlichen Orientierungspunkte wurde hierbei gezielt variiert.

Anschließend wurde das Referenzmodell mit dem Modellscan #4 mit drei Varianten der Best-Fit Methode verglichen. Dabei waren die Orientierungspunkte folgendermaßen definiert:

Variante 1: 17 mesiobukkale Höckerspitze, 13 Höckerspitze, 26 mesiobukkale Höckerspitze

Variante 2: 13 Höckerspitze, Interinzisal 11/21. 23 Höckerspitze

Variante 3: 17 zervikodistal, 21 inzisal, 25 Zentralfissur

In diesen Messungen wurde die Fläche des gesamten Modells über die definierten Messpunkte verglichen. Exemplarisch zeigt Abbildung 3.1 die Auswahl der Orientierungspunkte wie in 1. beschrieben.

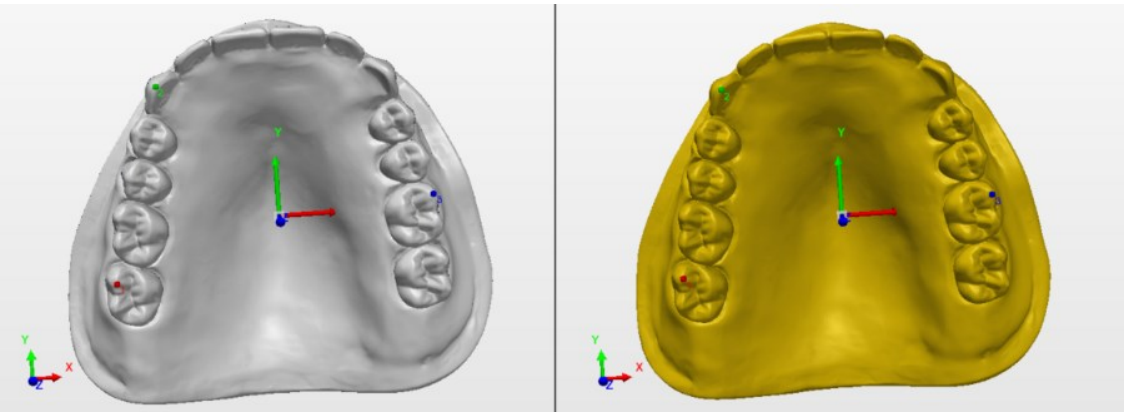

Abb. 3.1: Referenzmodell (grau); zu untersuchender Scan (orange)
Referenzpunkte 17 mesiobukkale Höckerspitze, 13 Höckerspitze, 26 mesiobukkale Höckerspitze aus 1.

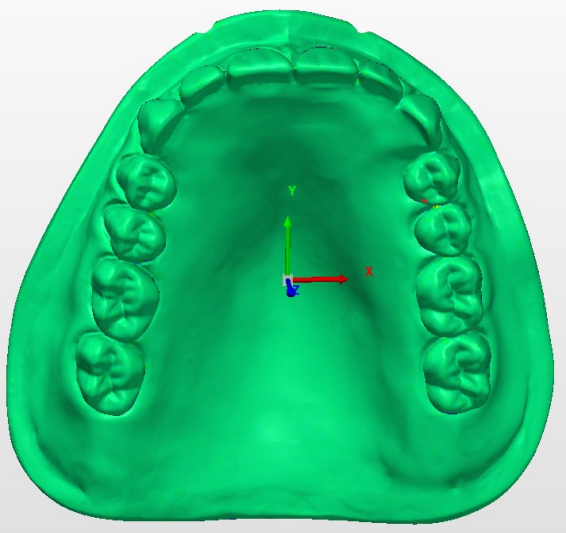

Abb. 3.2: Situation nach Best-Fit

Anschließend wurde der Referenzscan mit den drei restlichen Modellscans (# 5-7) im Best-Fit Modus verglichen, um die Qualität des Laborscanners zu überprüfen.

In Teilstudie A2 wurde das Gipsmodell mit den drei Intraoralscannern fünfmal hintereinander erfasst und die resultierenden Scans mittels der Vermessungssoftware verglichen.

Um einen möglichen räumlichen Verzug eines Zahnbogenscans zu erfassen, wurden die Orientierungspunkte auf den ausgeschnittenen, endständigen Molaren 17 gelegt. Dieser Zahn wurde als Ankerzahn definiert.

Die Orientierungspunkte für das „Best-Fit“ wurden wie folgt gewählt:

1. 17 distobukkale Höckerspitze, mesiobukkale Höckerspitze, mesiopalatinale Höckerspitze (Abb. 3.3)

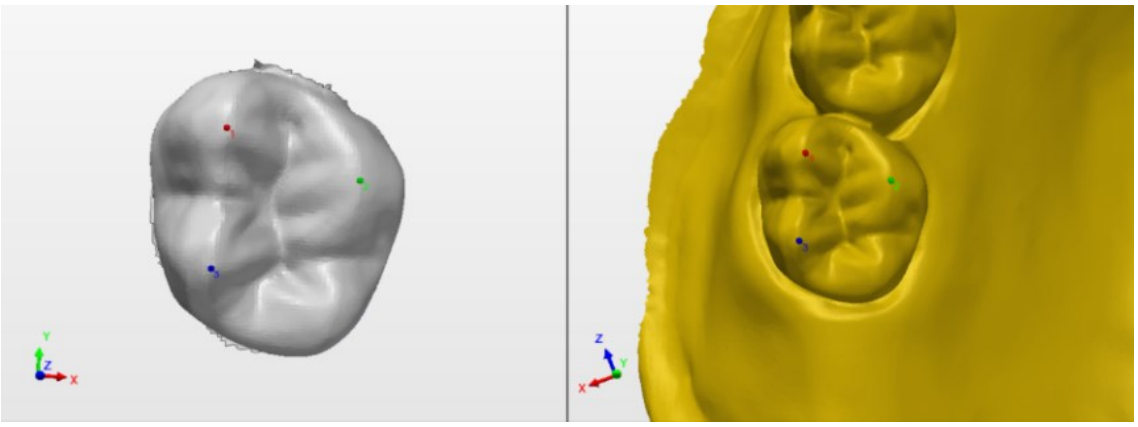

Abb. 3.3: Referenzpunkte des ausgeschnittenen Zahnes 17

Unmittelbar vor Gebrauch der Intraoralscanner wurde eine Kalibrierung mit dem jeweils dazugehörigen Kalibrierkörper durchgeführt. Danach wurden zwei Testscans durchgeführt, um die Scanpfade zu verinnerlichen. Die durch den Hersteller vorgegebenen Scanstrategien wurden in einem Zug, ohne abzusetzen, durchgeführt. Dabei wurde darauf geachtet, dass alle Bereiche erfasst und dargestellt werden. Soweit technisch möglich wurde zu jedem Scan die Bilderanzahl und die Aufnahmedauer dokumentiert. Diese Datensätze wurden anschließend als STL-Dateien exportiert.

3.1.1 Vergleich der 3D-Scans mit Hilfe der *PolyWorks®* Software

Gemäß dem in Kapitel 3.1 beschriebenen Matching durch „Best-Fit“ über die Orientierungspunkte ist es möglich, die definierten Referenzpunkte des Referenzscans mit den Scans des Laborscanners und der IOS zu vergleichen. *PolyWorks®* kann dabei die Abweichung der Datensätze bis auf 1 µm genau erfassen.[41]

Zunächst wurde der Referenzscan in *PolyWorks®* importiert, die Referenzpunkte darauf definiert und anschließend der zu untersuchende Scan eingefügt, gematcht und verglichen.

Die Best-Fit-Ausrichtung berechnet laut *duwe-3d* AG „…die Einpassung mit der kleinsten Gesamtabweichung“.[26]

3.1.2 Der Referenzscan

Das Mastermodell für die Teilstudie A wurde mittels eines handelsüblichen Dentalscanners (*T710®, Medit™*; Seoul, Südkorea) digitalisiert. Nach Herstellerangaben besitzt dieser Scanner eine Messgenauigkeit nach ISO 12836 von 4 µm.[35]

3.1.3 Vermessung der Scans

In Teilstudie A wurden insgesamt 8 STL-Datensätze in Teil A1 (5 STL-Datensätze „Best-Fit über das gesamte Modell“ + 3 STL-Datensätze „Best-Fit über definierte Orientierungspunkte“), 15 STL-Datensätze in Teil A2 (pro IOS 5 x ganzes Modell gescannt) und anschließend mit dem Referenzscan in der Software *PolyWorks®* verglichen.

3.1.4 Referenzpunkte

Für die Teilstudie A wurden im Verlauf der gesamten Zahnreihe an markanten Zahnstrukturen insgesamt 132 Referenzpunkte definiert. So wurden an den vier Molaren jeweils 14 Referenzpunkte, an den Prämolaren jeweils 10 Referenzpunkte und den Frontzähnen jeweils 6 Referenzpunkte festgelegt (Abb.: 3.4 – 3.6).

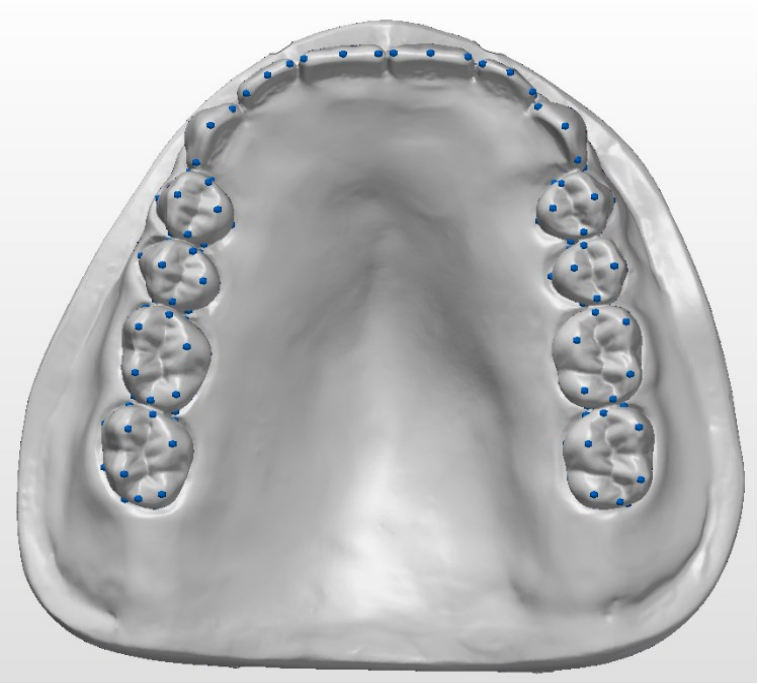

Abb. 3.4: Teilstudie A – Messpunkte des Masterscans von okklusal

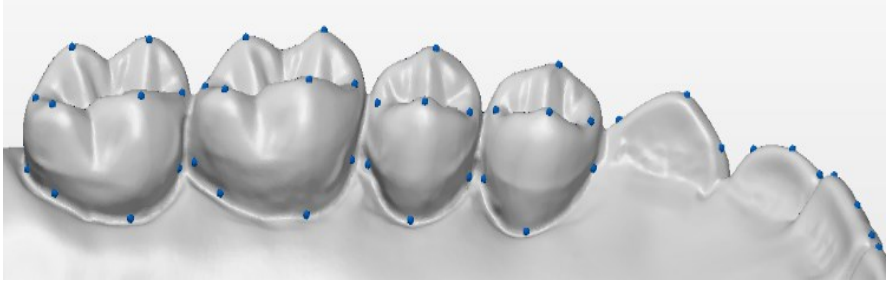

Abb. 3.5: Teilstudie A – Messpunkte des Masterscans von oral

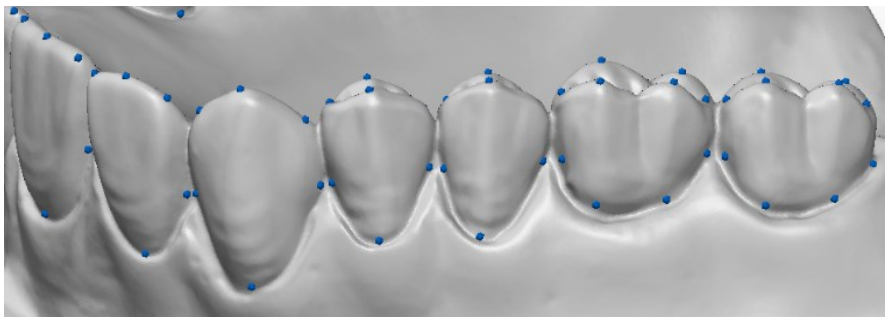

Abb. 3.6: Teilstudie A – Messpunkte des Masterscans von vestibulär

3.1.5 Dokumentation und Weiterverarbeitung der Messdaten

Die Auswertung der Datensätze wurde mit Hilfe der Vermessungssoftware *PolyWorks® Meteorology Suite 2021 (InnovMetric Software Inc., Québec, Canada; Vertrieb: Duwe-3d AG, Peter-Dornier-Straße 9, 88131 Lindau, Deutschland)* in Tabellenform extrahiert und anschließend in das Tabellenkalkulationsprogramm *Microsoft® Excel® 2019 (Microsoft Corporation, Redmond, USA)* exportiert.

In Vorversuchen wurde geprüft, inwieweit die aus den 132 Referenzpunkten resultierende Datenmenge sinnvoll, das heißt ohne Qualitätsverlust hinsichtlich der Aussagekraft für die gematchten Scans, reduziert werden kann. Hierbei zeigte sich, dass von 132 Referenzpunkten 28 strategisch gewählte Punkte für die weitere Datenanalyse von Teilstudie A ausreichend sind.

Die einzelnen Scans wurden an den 28 Referenzpunkten miteinander verglichen und auftretende Differenzen als kürzeste Strecke in Millimeter berechnet. Die Zahlenwerte der pro Scanner durchgeführten fünf Modellscans wurden als Mittelwerte tabellarisch erfasst.

3.2 Teilstudie B

Die Teilstudie B untersucht den Einfluss eines nach subgingival verlagerten Präparationsrandes auf die Scanqualität des Zahnstumpfes.

Dabei soll überprüft werden, bis zu welcher subgingivalen Verlagerung des präparierten Zahnstumpfes die korrekte digitale Erfassung mit einem IOS möglich ist. Die Verlagerung erfolgte dabei in 0,5 mm Schritten ausgehend von 0,0 mm (äquigingival) bis 4,0 mm (subgingival).

3.2.1 Design und Fertigung des Mastermodels

Für die Teilstudie B wurde ein spezielles Oberkiefermodell konstruiert und gefertigt.

Um eine möglichst naturgetreue Lichtbrechung eines natürlichen Zahnes nachzuahmen, wurden Keramikzähne der Firma *VITA®* (LUMIN VACUUM 854 und 44C) für das Mastermodell ausgewählt.

Zunächst wurden die Keramikzähne auf ein zahnloses Oberkiefer Gipsmodell aufgestellt (Abb. 3.7 a) und der Gesamtkiefer mittels Silikon doubliert. Anschließend wurde Zahn 16 mit zahnfarbenem Kunststoff nach apikal verlängert und in die Silikonform zurückgesetzt. Die aufgestellten Zähne wurden ebenso in die Silikonform reponiert. Anschließend wurde mit vollständig ausbrennbarem Modellierkunstoff (Pattern Resin) ein Gerüst modelliert, welches die Keramikzähne starr miteinander verbindet. Nach der Modellation wurde das Gerüst eingebettet (*Feguramed GmbH* C 130-MO Einbettmasse), gegossen (Modellgusslegierung) und ausgearbeitet. Die Keramikzähne wurden daraufhin mittels Metal Primer Z (*GC und AGC Cem von C. Hafner GmbH*) mit dem Gerüst verklebt, um jedwede Verformung des Modells zu vermeiden (Abb. 3.7 b). Im nächsten Schritt wurde der Zahn 16 in die Silikonform reponiert und mittels Implant Mask (*Detax GmbH*) eine Zahnfleischmaske um den Zahn hergestellt, welche in-vitro das Zahnfleisch imitieren soll. Danach wurde 16 und der Zahn-Gerüstverbund in die Silikonform zurückgesetzt und mit Prothesenkunstoff (*Palapress® der Firma Kulzer*) aufgefüllt. Hiernach wurde mit Hilfe einer Silikonabformung des Zahnstumpfes 16 ein weiterer Zahnstumpf aus zahnfarbenem Kunststoff (*Biodent® der Firma DENTSPLY Trubyte*) ausgegossen.

Nach der Ausarbeitung und Präparation des Zahnes 16 wurde der Stumpf mit einer Schraube, die apikal mit Pattern Resin fixiert ist, an den Kreuztisch befestigt.

Zusätzlich wurde das restliche Modell mit dem Metallgerüst und den Keramikzähnen mit dem Kreuztisch starr verschraubt (Abb. 3.7 c). Damit waren die Voraussetzungen geschaffen, den präparierten Stumpf 16 über eine Mikrometerschraube mit einer Genauigkeit von +/- 1/100 mm in der Vertikalen zu positionieren.

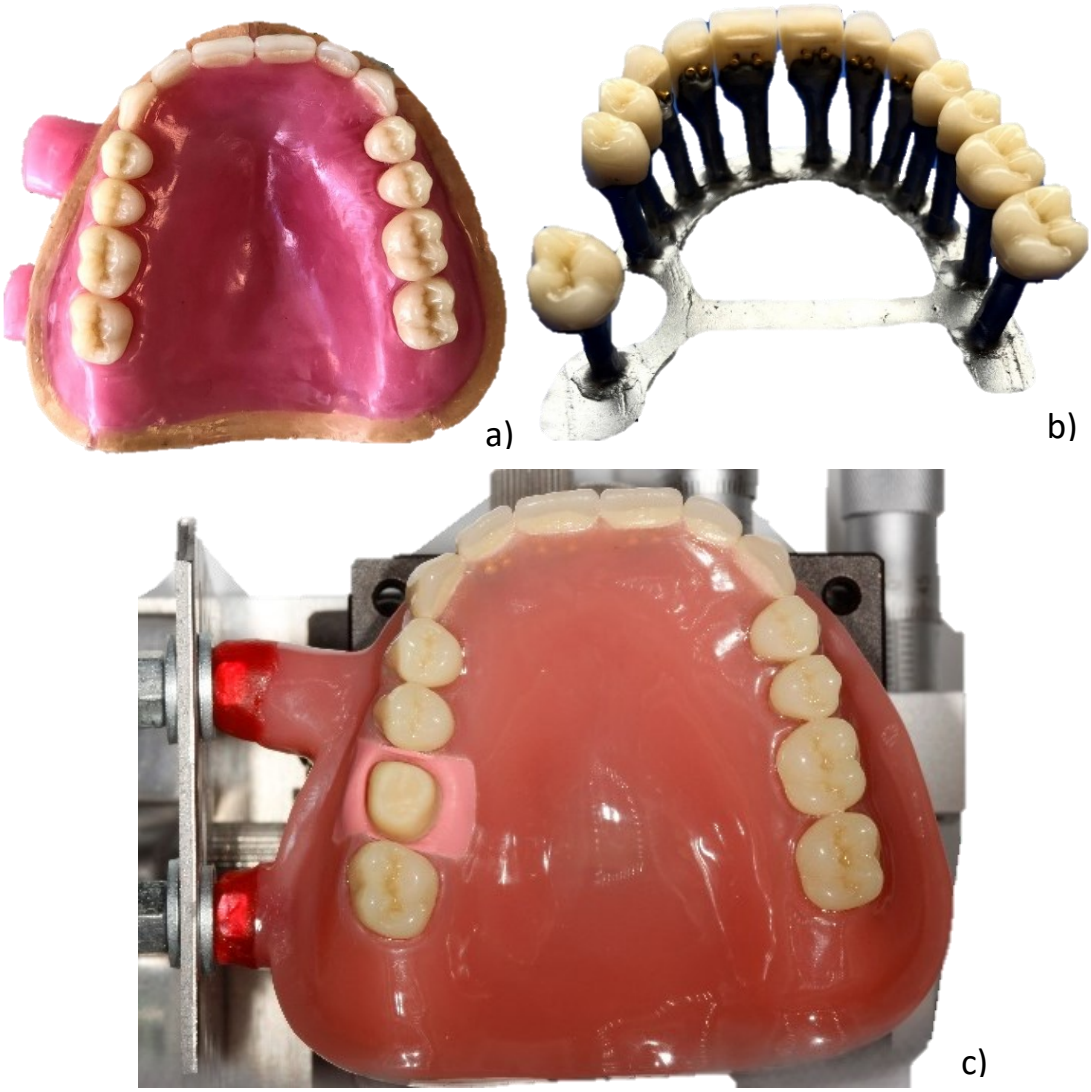

Abb. 3.7: a) Aufstellung der Keramikzähne in Wachs; b) Individuell gefertigtes Metallgerüst und aufgeklebte Keramikzähne; c) Modell ausgearbeitet mit präpariertem Zahnstumpf 16 und stabil fixiert mit dem Mikrometertisch – Okklusalansicht

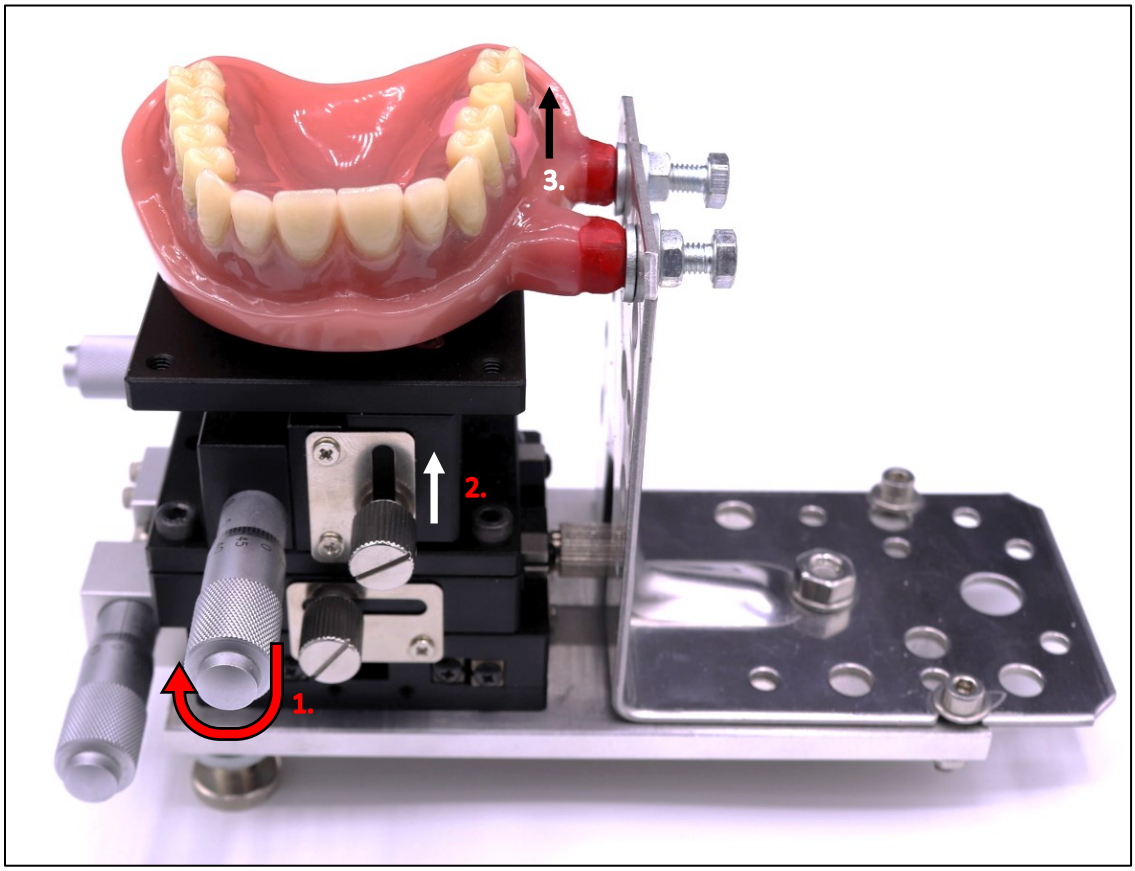

Abb. 3.8: Finales Studienmodell mit Mikrometertisch – Frontalansicht
1. Mikrometerschraube zum vertikalen Versatz des Stumpfes; 2. Feststellschraube; 3. Stumpf 16

3.2.1.1 Präparationsformen/Morphologie und vertikale Positionierung des Zahnstumpfes 16

Die mesioapproximalen, distoapproximalen, vestibulären und oralen Flächen weisen unterschiedliche Präparationsformen auf:

Distal und mesial weist eine leicht bis stark zulaufende Tangentialpräparation auf. Vestibulär und oral zeigen dagegen eine dezent bis ausgeprägte Hohlkehle (Tabelle 2).

Tabelle 2: Stumpfunterteilung nach Art der Präparation

Flächen	*Präparationsform*
Mesialfläche	Deutlich konisch zulaufende Tangentialpräparation
Oralfläche	Ausgeprägte Hohlkehle
Distalfläche	Leicht konisch zulaufende Tangentialpräparation
Vestibularfläche	Leicht angedeutete Hohlkehlpräparation

Die folgenden Bilder dokumentieren die Morphologie des präparierten Zahnstumpfes und exemplarisch zwei unterschiedliche vertikale Positionierungen des Stumpfes 16 (Abb. 3.9 a-c).

Abb. 3.9: a) Stumpf 16 von vestibulär – 0,0 mm; b) Stumpf 16 von okklusal – 0,0 mm; c) Stumpf 16 von vestibulär – -3,0 mm; d) Stumpf 16 von okklusal – -3,0 mm

3.2.1.2 Scanprozedere

Vor den eigentlichen Scans wurde mit jedem IOS eine Kalibrierung sowie Probescans gemäß den vom Hersteller empfohlenen Scanpfaden durchgeführt.

Zunächst wurde mit dem Modellscanner und dem *TRIOS 3®* IOS der aus dem Mastermodell entnommene Zahnstumpf unter optimalen Scanbedingungen erfasst.

Für die weiteren Teilmessungen wurde der Zahnstumpf in das Mastermodell B reponiert und mit Hilfe der Mikrometerschraube in definierten Schritten nach apikal verschoben. Die Verlagerung des Stumpfes erfolgte in 0,5 mm Schritten bis zu einer subgingivalen Lage von 4,0 mm.

Die Nullstellung entspricht der äquigingivalen Lage der Präparationsgrenze.

Stumpf und Nachbarzähne wurden für jeden vertikalen Teilschritt jeweils dreimal pro IOS gescannt (n = 27 Scans pro IOS).

Als vorbereitende Maßnahme wurde der digitalisierte Stumpf im *PolyWorks|Modeler™* unterhalb der Präparationsgrenze beschnitten und anschließend mit 39 definierten Referenzpunkten versehen.

Die drei erforderlichen Orientierungspunkte für die „Best-Fit“ Funktion wurden wie folgt definiert:

1. 16 mesiobukkaler Höckerabhang, mesiopalatinale Höckerspitze, distopalatinale Höckerspitze (Abb. 3.10)

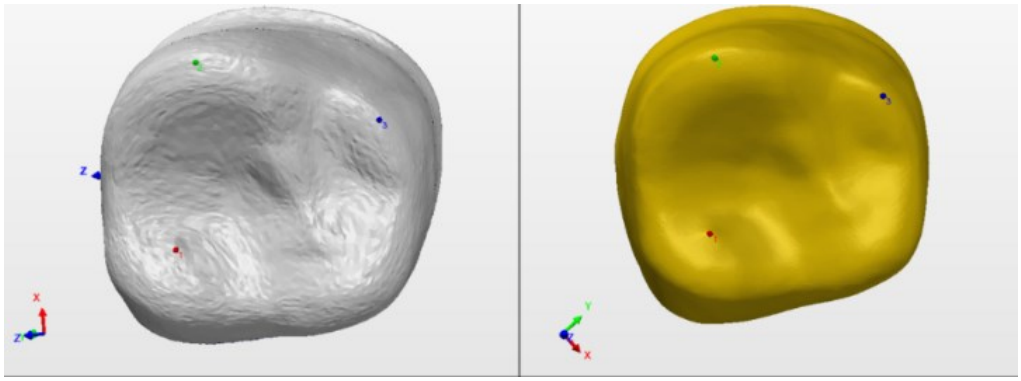

Abb. 3.10: Links – Scan mit TRIOS 3®; Rechts – Scan mit Laborscanner T710®; Referenzpunkte nach 1.

3.2.2 Vergleich der 3D-Scans mit Hilfe der *PolyWorks®* Software

3.2.2.1 Der Masterscan

Der vertikal verstellbare Zahnstumpf 16 wurde mit dem Laborscanner *T710®* und dem IOS *TRIOS 3®* Cart-Version digitalisiert und in *PolyWorks®* verglichen. Aufgrund der besseren Scanqualität wurde im weiteren Verlauf der *TRIOS 3®* Scan als Masterscan für die Teilstudie B gewählt.

3.2.2.2 Vermessung der Scans

Insgesamt wurden in Teilstudie B 81 STL-Datensätze *(pro IOS 27 + 1 Vergleich TRIOS 3® mit T710® Laborscanner)* mit dem Masterscan in der Software *PolyWorks®* verglichen.

3.2.2.3 Referenzpunkte

Der Referenzscan wurde mit 39 Referenzpunkten versehen. Dabei wurde der Stumpf in fünf Flächen unterteilt (Okklusal-, Vestibulär-, Oral-, Mesial- und Distalfläche).

Die zu untersuchenden Stumpfflächen wurden mit jeweils sechs Punkten, sowie die Präparationsgrenze zirkulär mit insgesamt acht weiteren Punkten definiert (Abb. 3.11).

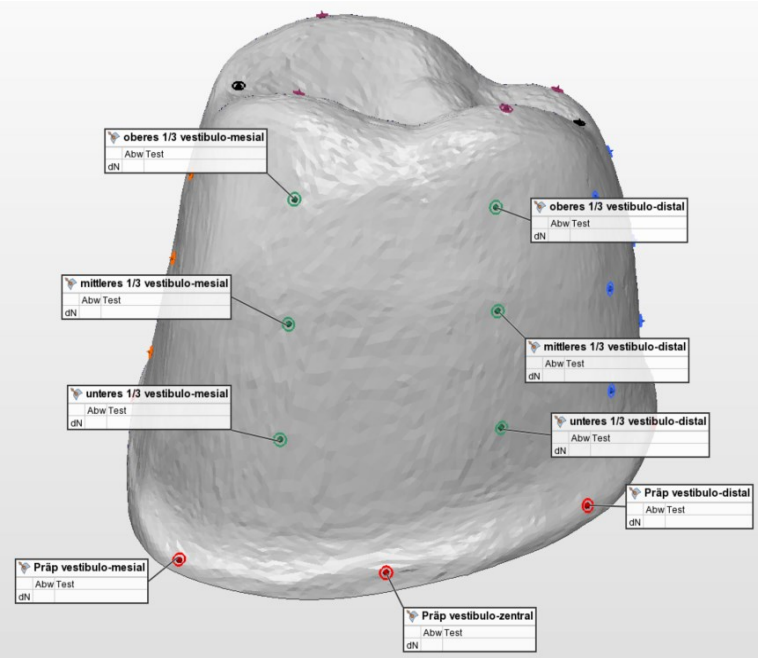

Abb. 3.11: Teil B - Messpunkte des Zahnstumpfes 16 vestibulär

3.2.2.4 Subjektiver Evaluationsscore zur Qualitätserfassung der gescannten Präparationsgrenzen

Alle Scans des Zahnstumpfes wurden in *PolyWorks®* mittels „Best-Fit“ – Funktion mit dem Referenzscan verglichen. Dabei wurde für jeden Scan subjektiv entschieden, ob die am Modell einsehbare Präparationsgrenze digital zirkulär erfasst wurde oder nicht. Diese Bewertung erfolgte durch einen in der Methodik erfahrenen Zahntechniker (Tabelle 3; Abb. 3.12 – 3.15):

Tabelle 3: Subjektiver Evaluationsscore zur Darstellung der gescannten Präparationsgrenze

① - Präparationsgrenze eindeutig und vollständig erkennbar
② - Präparationsgrenze zirkulär erschwert, aber noch eindeutig erkennbar
③ - Präparationsgrenze teilweise nicht eindeutig vom Sulkus abgrenzbar
④ - Präparationsgrenze nach okklusal verkürzt dargestellt

① - Präparationsgrenze eindeutig und vollständig erkennbar

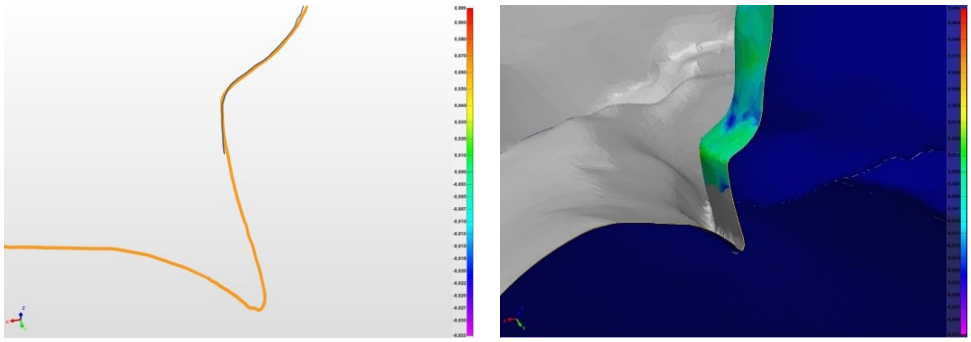

Abb. 3.12: Score 1; orange Linie – IOS-Scan; graue Linie – Referenzscan

② - Präparationsgrenze zirkulär erschwert, aber noch eindeutig erkennbar

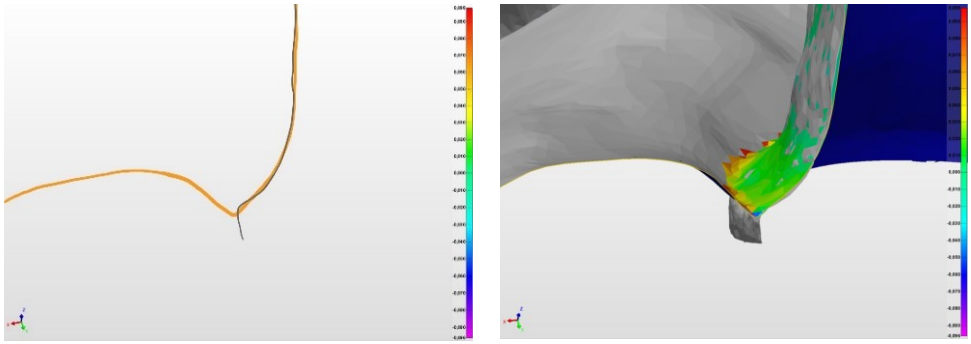

Abb. 3.13: Score 2; orange Linie – IOS-Scan; graue Linie – Referenzscan

③ - Präparationsgrenze teilweise nicht eindeutig vom Sulkus abgrenzbar

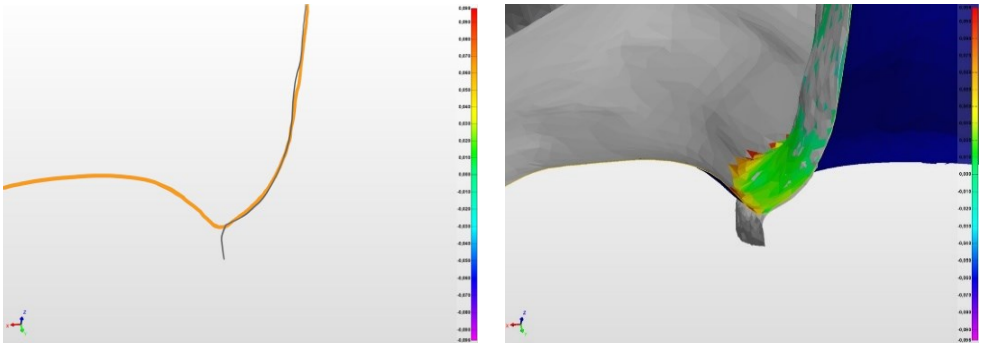

Abb. 3.14: Score 3; orange Linie – IOS-Scan; graue Linie – Referenzscan

④ - Präparationsgrenze nach okklusal verkürzt dargestellt

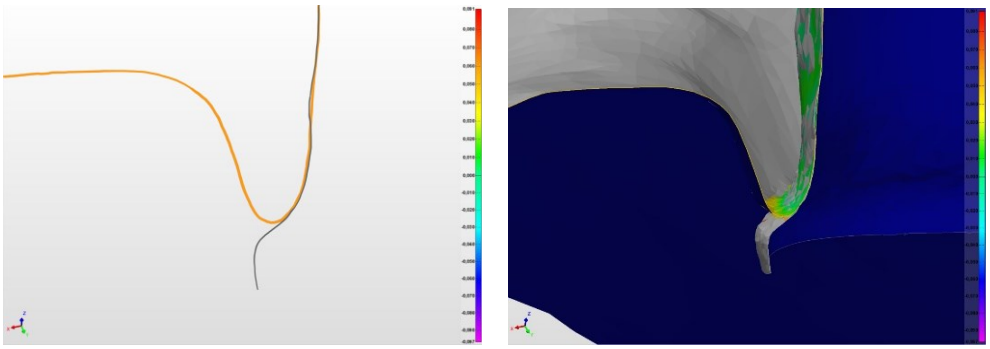

Abb. 3.15: Score 4; orange Linie – IOS-Scan; graue Linie –Referenzscan

3.2.2.5 Dokumentation und Weiterverarbeitung der Messdaten

Die einzelnen Scans wurden an 32 Referenzpunkten miteinander verglichen und auftretende Differenzen als kürzeste Strecke in Millimeter berechnet. Die Zahlenwerte der pro Scanner durchgeführten drei Modellscans wurden als Mittelwerte tabellarisch erfasst. Zusätzlich wurde die Scanqualität der Präparationsgrenze anhand des in Tabelle 3 dargestellten Evaluationsscores bewertet.

4 Ergebnisse

4.1 Teilstudie A

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Teilstudie A1 und A2 dargestellt.

4.1.1 Teilstudie A1 – Überprüfung der Best-Fit Funktion der Vergleichssoftware *PolyWorks®* und der Reliabilität des Laborscanners

Die Teilstudie A1 diente der Überprüfung der Best-Fit Funktion der *PolyWorks®* Software sowie der Wiedergabegenauigkeit des Laborscanners.

Trotz räumlich unterschiedlicher Wahl der für die Best-Fit Funktion erforderlichen Orientierungspunkte, zeigen die überlagerten Scans keine klinisch relevante Abweichung. Abbildung 4.1 zeigt exemplarisch die Überlagerung von zwei mit dem Modellscanner durchgeführten Scans im Farbmodus. Abweichungen von mehr als 0,025 mm würden als deutliche Farbverschiebung imponieren.

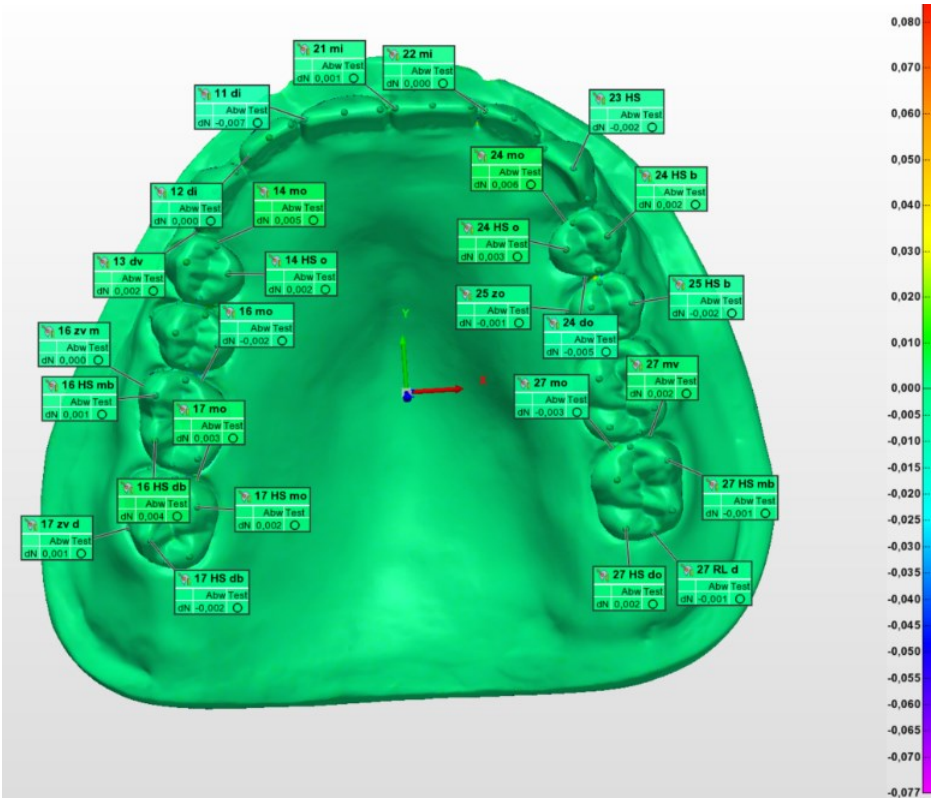

Abb. 4.1: Messpunkte zum Vergleich des „Best-Fit“ der Laborscans; Beispiel Best-Fit von Referenzmodell 3 zu Modell 4

Anschließend wurden nach Vortests zur sinnvollen Reduktion der Datenmenge aus den 132 Referenzpunkten insgesamt 28 strategisch gesetzte Referenzpunkte ausgewählt.

Abbildung 4.2 und 4.3 illustrieren die gemessenen Abweichungen der Scans 4, 5, 6 und 7 in Millimeter im Bereich der gewählten Referenzpunkte. Die maximale Abweichung zwischen allen Scans liegt an den gewählten Referenzpunkten zwischen ± 0,007 mm.

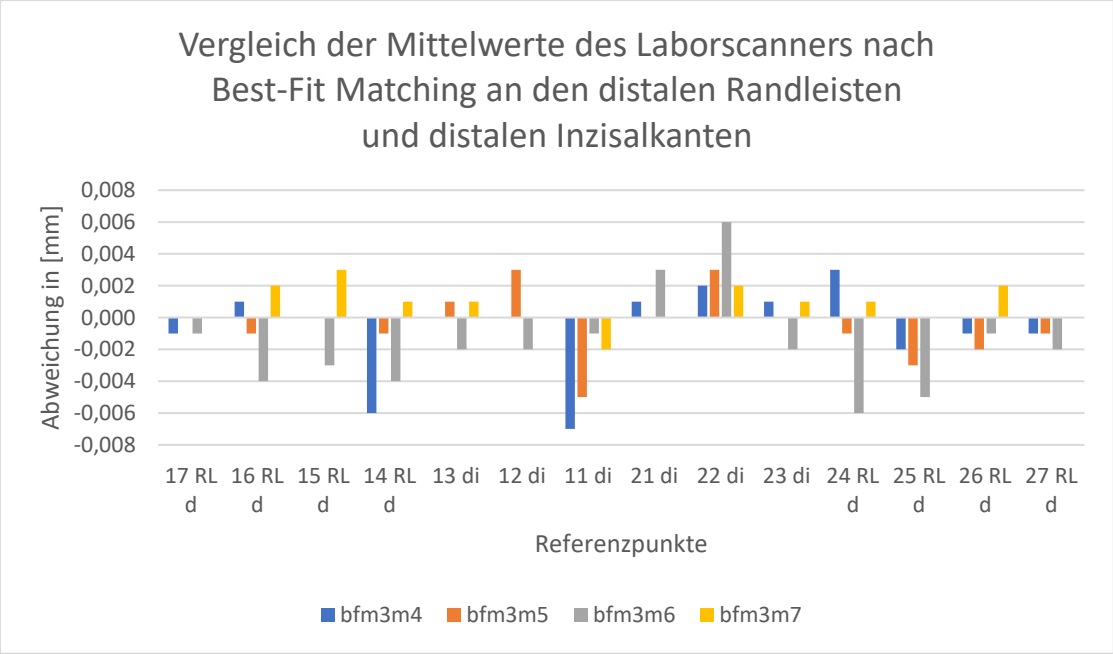

Abb. 4.2: Vergleich der Mittelwerte der Scans des Laborscanners auf deren Reliabilität an den Referenzpunkten „distale Randleiste & Inzisalkante“.
RL = Randleiste, d = distal, di = distoinzisal, bfm3m4 = Best-Fit Referenzmodell 3 mit 4

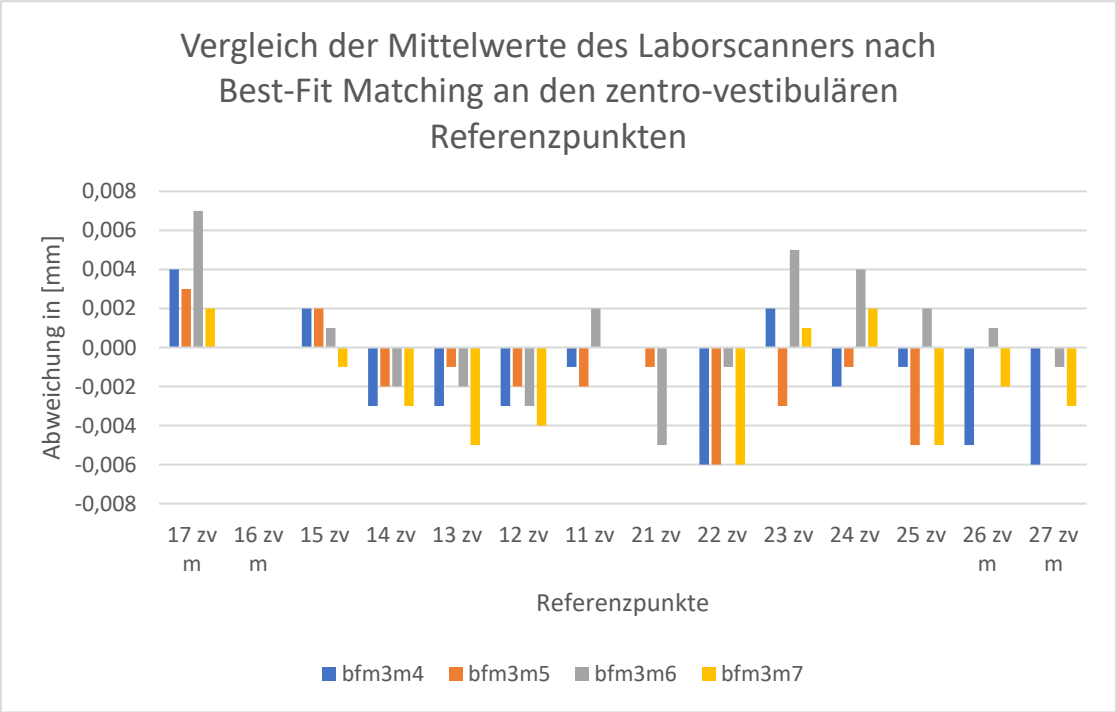

Abb. 4.3: Vergleich der Mittelwerte der Scans des Laborscanners auf deren Reliabilität an den „zentro-vestibulären Referenzpunkten“.
zv = zentro-vestibulär, m = mesial, bfm3m4 = Best-Fit Referenzmodell 3 mit 4

4.1.2 Teilstudie A2 – Vergleich der Mittelwerte der Scans aller drei IOS mit dem Referenzscan ausgehend vom Ankerzahn 17

In Teilstudie A2 wurde das aus Spezialgips gefertigte Referenzmodell mit den drei IOS gescannt. Hierbei wurde in der *PolyWorks®* Software der Zahn 17 virtuell ausgeschnitten und mit Hilfe der Best-Fit Funktion Scans des Zahnkranzes verglichen, um mögliche scanbedingte Abweichungen im Verlauf des Zahnbogens zu detektieren (Kapitel 3.1). Zunächst wurde für jeden der drei IOS aus den fünf Scans die Mittelwerte für die Abweichungen an den 28 gewählten Referenzpunkten gebildet. Die Mittelwerte der an den distalen Randleisten und Inzisalkanten ausgewählten Referenzpunkte aus Abbildung 4.4 verdeutlichen eine Abweichung ausgehend des Ankerzahnes 17 über den Zahnbogen zur gegenüberliegenden Seite. Die stärksten Abweichungen wies im Frontzahnbereich von maximal 0,2214 mm der *Primescan®* auf (RP – 11 di; Mittelwert der Scans der *Primescan®*). Die geringsten Abweichungen zeigten die mit dem *i700®* (*Medit®)* durchgeführten Scans (RP – 24 RL d; 0,0548 mm maximaler Mittelwert der Scans des *i700®)*. Der *TRIOS 3®* lag mit einer maximalen Abweichung von 0,1922 mm dicht hinter dem *Primescan®* (RP – 21 di; Mittelwert der Scans des *TRIOS 3®).*

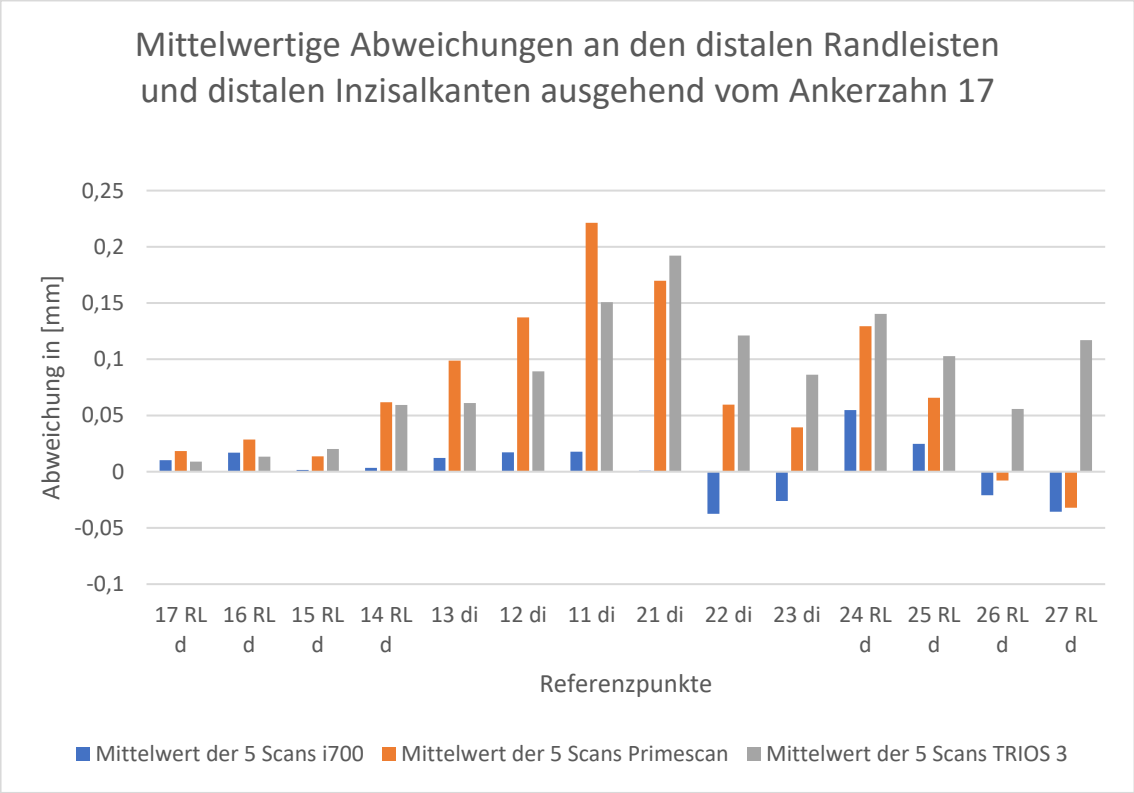

Abb. 4.4: Vergleich der Mittelwerte der drei IOS ausgehend von Ankerzahn 17 im Verlauf des Zahnbogens an den Referenzpunkten „distale Randleiste“.
RL = Randleiste, d = distal

Analog zu den Referenzpunkten der distalen Randleisten lässt sich an den 14 ausgewählten Referenzpunkten (zentro-vestibulär liegend) eine Tendenz der zunehmenden Abweichung über den Zahnkranz ausgehend vom Ankerzahn 17 bis zur Front feststellen. Hierbei wies der *Primescan®* mittelwertig Abweichungen bis zu 0,135 mm (RP – 23 zv) auf (Abb. 4.5).

Insgesamt zeigte der *Primescan®* die größten Abweichungen, gefolgt vom *TRIOS 3®* (RP – 24 zv; 0,1264 mm). Die geringsten Differenzen wies der *i700®* von *Medit™* auf (RP – 25 zv; -0,0462 mm).

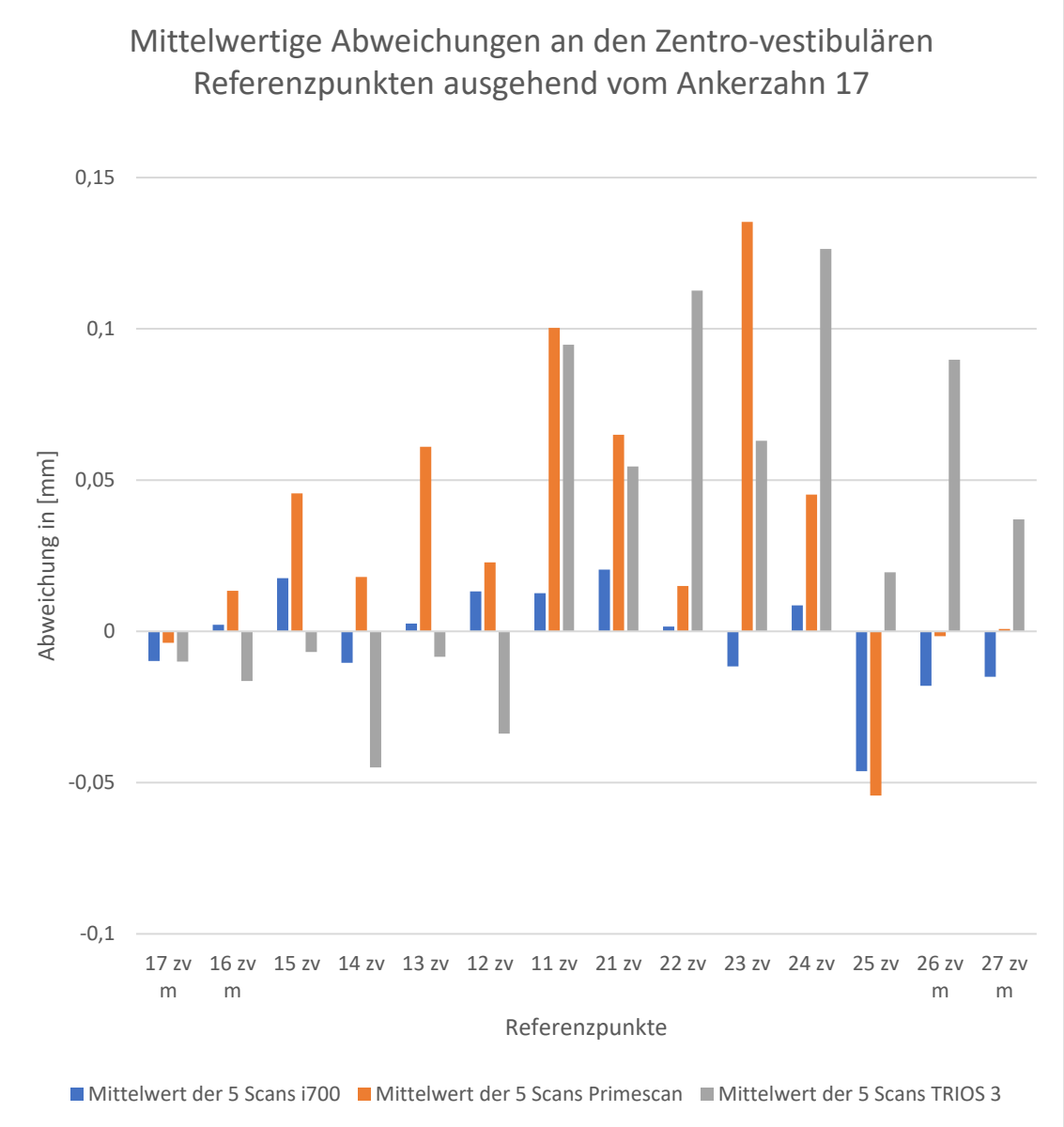

Abb. 4.5: Vergleich der Mittelwerte der drei IOS ausgehend von Ankerzahn 17 im Verlauf des Zahnbogens an den Referenzpunkten „zentro-vestibuläre Referenzpunkte“. zv =zentro-vestibulär, m = mesial

In der gegenüberliegenden Region der Zähne 26 und 27 wiesen die Scans der IOS im Vergleich zum Referenzscan mittlere Abweichungen in der z-Achse zwischen 0,657 mm und -0,134 mm auf.

Abbildung 4.6 zeigt exemplarisch im Farbmodus einen Scanvergleich vom Referenzscan und dem *Primescan®*.

Die Farbskala illustriert Abweichungen von +0,1 mm (rot) bis zu -0,1 mm (violett). Dabei sind hier Abweichungen im Frontzahnbereich in der y- und z-Achse zu beobachten. Die positiven Abweichungswerte zeigen an, dass ein IOS Scan gegenüber dem Referenzscan einen nach außen geweiteten Bogen beschreibt. An den Zähnen 26 und 27 liegen hier negative Differenzen in der z-Achse vor. Der IOS Scan ist im Vergleich zum Referenzscan nach apikal deformiert. Ausgehend vom optimal überlagerten Zahn 17 ist eine Torsion des gesamten gescannten Zahnbogens zu erkennen.

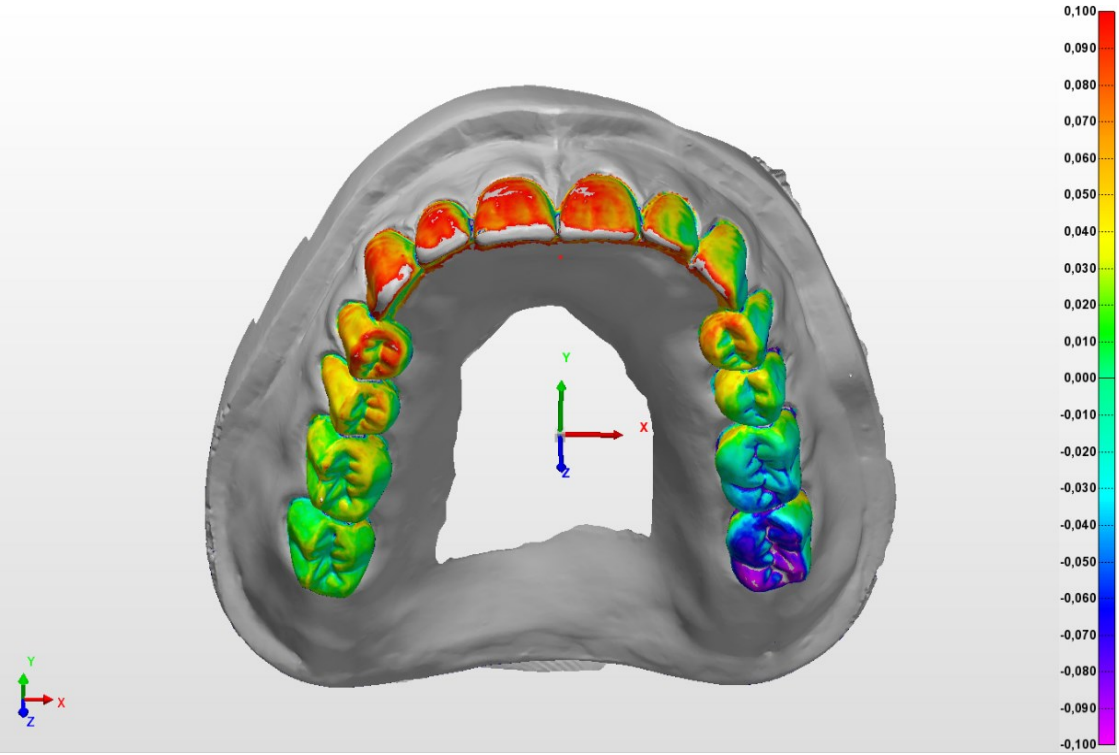

Abb. 4.6: Vergleich von zwei Scans mit Hilfe der „Best-Fit-Methode“. Hierbei wurde der Zahn 17 als Anker genutzt.

4.2 Teilstudie B

In der Teilstudie B wurde der mögliche Einfluss der apikalen Lage des Zahnstumpfes zum Gingivalsaum auf die Formtreue des Zahnstumpfes mit drei unterschiedlichen, handelsüblichen IOS-Typen erfasst. Der Vergleich der Scans erfolgte mit Hilfe der zuvor in der Teilstudie A evaluierten Messsoftware *PolyWorks®*.

4.2.1 Wahl des Referenzscans

Nach dem „Best Fit“ Vergleich der Scans des Einzelstumpfes 16 zeigte sich für den Laborscanner *T710®* im Vergleich zum *TRIOS 3®* eine deutlich verrundete Präparationsgrenze (Abb. 4.7 und 4.8). Für die Teilstudie B wurde daher der *TRIOS 3®* Scan als Referenzscan herangezogen.

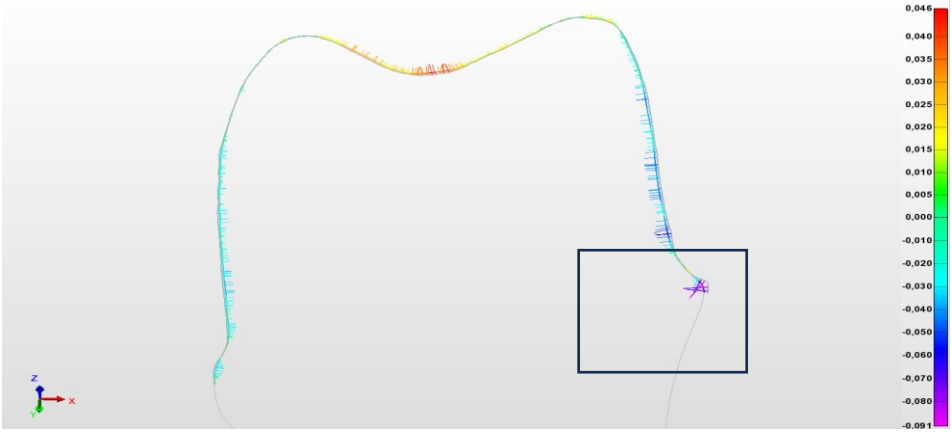

Abb. 4.7: Orovestibulärer Schnitt durch überlagerte Scans des TRIOS 3® (graue Linie) und des Laborscanners T710® (farbige Linie).
Gesamter Stumpf orovestibulär; Der eingerahmte Ausschnitt ist in Abbildung 4.8 vergrößert dargestellt.

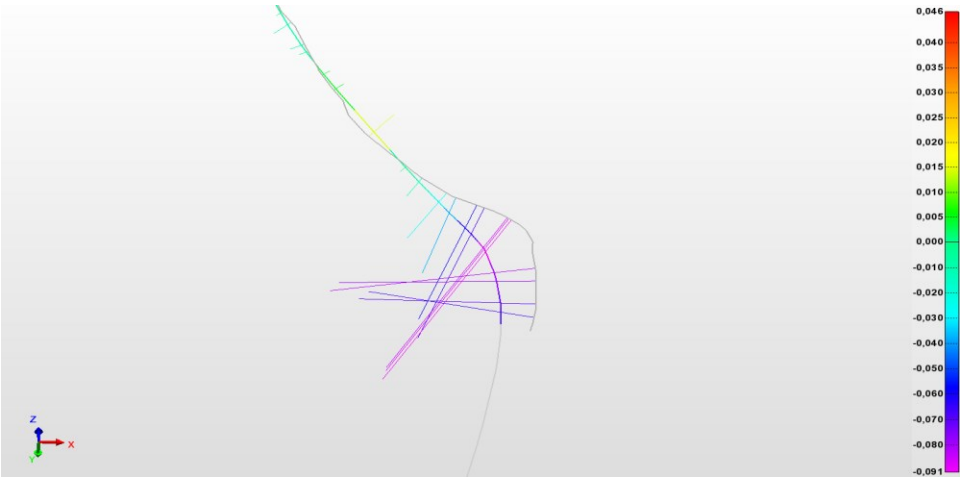

Abb. 4.8: Ausschnitt aus 4.7; 2D-Schnittebene durch den Scan des TRIOS 3® (graue Linie) und den Scan des Laborscanners T710® (farbige Linie) - palatinale Präparationsgrenze

4.2.2 Vergleich der IOS-Scans des präparierten Zahnstumpfes 16

Zur Bewertung der einzelnen Scans wurde ein subjektiver Evaluationsscore entwickelt (siehe auch Kap. 3.2.2.4), mit dem die Wiedergabe der Präparationsgrenze in Abhängigkeit ihrer subgingivalen Lage qualitativ beurteilt wurde. Die nachfolgende Tabelle 4 dokumentiert für alle Scans , ob die Präparationsgrenze zirkulär erfasst werden konnte oder nicht. Hierbei zeigte sich, dass ab einer subgingivalen Lage von 1,5 mm die Wiedergabe der Präparationsgrenze an einer Stelle zunehmend erschwert ist. Bei einer subgingivalen Lage von 3,0 mm war keiner der getesteten IOS in der Lage die Präparationsgrenze eindeutig darzustellen.

Daher wird in der weiteren Darstellung der Ergebnisse auf die Wiedergabe der Messwerte unterhalb einer subgingivalen Lage von 3,0 mm verzichtet.

Hierzu wurden die drei Scans der jeweiligen Scanner visuell in der Software *PolyWorks®* ausgewertet.

Tabelle 4: Subjektive Sichtbarkeit der Präparation
orange hinterlegt – Übergang zu Präparation an einer Stelle nicht mehr erkennbar

Tiefe (mm)	*TRIOS 3® – 3 Shape™*			*Primescan® – Dentsply Sirona™*			*i700® - Medit™*		
	1.	2.	3.	1.	2.	3.	1.	2.	3.
0,0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
-0,5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
-1,0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
-1,5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
-2,0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
-2,5	×	×	×	✓	✓	×	×	×	×
-3,0	×	×	×	×	×	×	×	×	×
-3,5	×	×	×	×	×	×	×	×	×
-4,0	×	×	×	×	×	×	×	×	×

Zur weiteren Differenzierung wurde die Präparationsgrenze separat für die mesioapproximale, distoapproximale, vestibuläre und orale Fläche beurteilt. (Tabelle 5 - 8).

Tabelle 5 zeigt die mesiale Stumpffläche mit einer weiten Sulkusöffnung und einer konisch zulaufenden Tangentialpräparation. Dabei wird die Präparationsgrenze von allen IOS bis zu einer subgingivalen Absenkung von 2,5 mm gut dargestellt.

Tabelle 5: Anwendung des Evaluationsscores auf die Mesioapproximalfläche des Zahnes 16

Tiefe	*TRIOS 3®*			*Primescan®*			*i700®*		
	1.	2.	3.	1.	2.	3.	1.	2.	3.
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
-0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1
-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
-1,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1
-2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
							2	2	2
-2,5	1 2	1 2	1 2	1	1	1	1	1	1
	3	3	3	2	2	2	2	2	2
-3	3 4	3 4	3 4	3	3	3	3	3	3
				4	4	4	4	4	4
-3,5	4	4	4	4	4	4	4	4	4

Tabelle 6 beschreibt die distale Fläche des Stumpfes, welche eine leicht konisch zulaufende Tangentialpräparation mit schmaler Sulkusöffnung aufweist. Anhand des Scores ist erkennbar, dass hier eine erschwerte Erfassung durch den *TRIOS 3®* und den *i700®* bei einer subgingivalen Lage der Präparationsgrenze von 0,5 mm auftritt. Die eindeutige Erfassung des Präparationsrandes ist bei den getesteten IOS ab einer subgingivalen Lage des Präparationsrandes von 1,5 mm nicht mehr möglich.

Tabelle 6: Anwendung des Evaluationsscores auf die Distoapproximalfläche des Zahnes 16

Tiefe	*TRIOS 3®*			*Primescan®*			*i700®*		
	1.	2.	3.	1.	2.	3.	1.	2.	3.
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
-0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	2	2						
-1	1	1	1	1 2	1 2	1 2	1 2	1 2	1 2
-1,5	2	2	2	1 2	1 2	1 2 3	1 2	1 2	1 2
	3	3		3	3	4	3	3	3
-2	3	3	3	3 4	2 3	2 3 4	2 3	2 3	2 3
	4	4	4		4		4	4	4
-2,5	3	3	4	3 4	3 4	4	4	4	4
	4	4							
-3	4	4	4	4	4	4	4	4	4
-3,5	4	4	4	4	4	4	4	4	4

Die Wiedergabe der vestibulären Präparationsgrenze wird in Tabelle 7 beschrieben. Hier zeigen die Scans des *TRIOS 3®* und des *i700®* bereits nach 1 mm subgingivaler Lage eine Verrundung der Präparationsgrenze. Ab 1,5 mm subgingivaler Lage ist eine klare Darstellung auch durch den *Primescan®* nicht mehr gewährleistet und ab 2 mm wird die Präparationsgrenze von allen IOS nicht mehr erkannt.

Tabelle 7: Anwendung des Evaluationsscores auf die Vestibularfläche des Zahnes 16

Tiefe	*TRIOS 3®*			*Primescan®*			*i700®*		
	1.	2.	3.	1.	2.	3.	1.	2.	3.
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
-0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1
-1	1	1 2	1	1	1	1	1 2 3	1 2 3	1 2
-1,5	2 3	2 3	2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	2 3 4	2 3 4	2 3 4
-2	3 4	3 4	3 4	2 3 4	2 3 4	2 3 4	3 4	3 4	3 4
-2,5	4	4	4	3 4	3 4	3 4	4	4	4
-3	4	4	4	4	4	4	4	4	4
-3,5	4	4	4	4	4	4	4	4	4

Auf der Oralseite des Stumpfes mit ausgeprägter Hohlkehle wird der Präparationsrand bis zu einer subgingivalen Lage von 1 mm von allen IOS einwandfrei dargestellt (Tabelle 8). Ab einer subgingivalen Lage von 3 mm wird die Präparationsgrenze von keinem IOS mehr korrekt wiedergegeben.

Tabelle 8: Anwendung des Evaluationsscores auf die Oralfläche des Zahnes 16

Tiefe	*TRIOS 3®*			*Primescan®*			*i700®*		
	1.	2.	3.	1.	2.	3.	1.	2.	3.
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
-0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1
-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
-1,5	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2	1 2 3	1 2 3
-2	2 3	3 4	2 3 4	2 3	2 3	2 3	2 3	2 3	2 3
-2,5	3 4	3 4	3 4	3	3	3	4	4	4
-3	3 4	3 4	4	3 4	3 4	3 4	4	4	4
-3,5	4	4	4	3 4	3 4	3 4	4	4	4
-4	4	4	4	3 4	3 4	3 4	4	4	4

4.2.3 Vergleich der Abweichungen der IOS-Scans des unteren Stumpfflächendrittels

Mittelwertig zeigen die Messpunkte entlang des unteren Stumpfflächendrittels über alle Scans der drei IOS nur eine sehr geringe Abweichung von – 0,0286 mm bis + 0,0126 mm. Tatsächliche Maximalwerte der einzelnen Messungen liegen beim *i700®* zwischen – 0,034 mm und + 0,009 mm, dem *Primescan®* zwischen – 0,027 mm und – 0,001 mm und dem *TRIOS 3®* zwischen – 0,031 mm und + 0,017 mm.

Den Auswertungen zufolge stellt sich der *i700®* in dieser Testreihe mit den größten Abweichungen im unteren Drittel dar, gefolgt von dem *Primescan®* und dem *TRIOS 3®*.

Im Folgenden werden aus Gründen der Übersichtlichkeit die drei Stumpfflächendrittel für die Stumpfposition in äquigingivaler Lage und einer Stumpfverlagerung von 3,0 mm subgingivaler Lage aufgeführt (Abb. 4.9 und 4.10).

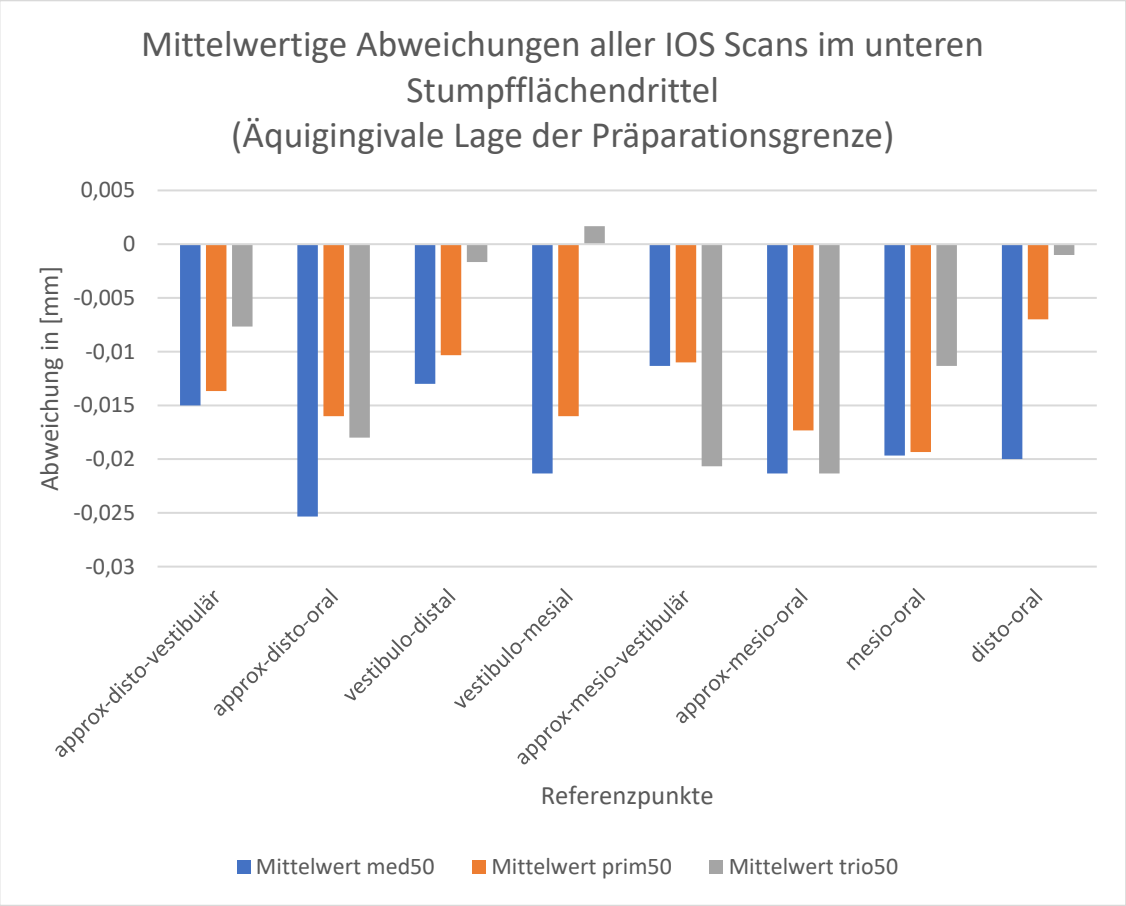

Abb. 4.9: Vergleich der Mittelwerte der drei IOS entlang des unteren Stumpfflächendrittels – Stumpf in Ausgangsposition mit äquigingivaler Lage der Präparationsgrenze 0,0 mm med50 = i700®; prim50 = Primescan®; trio50 = TRIOS 3®

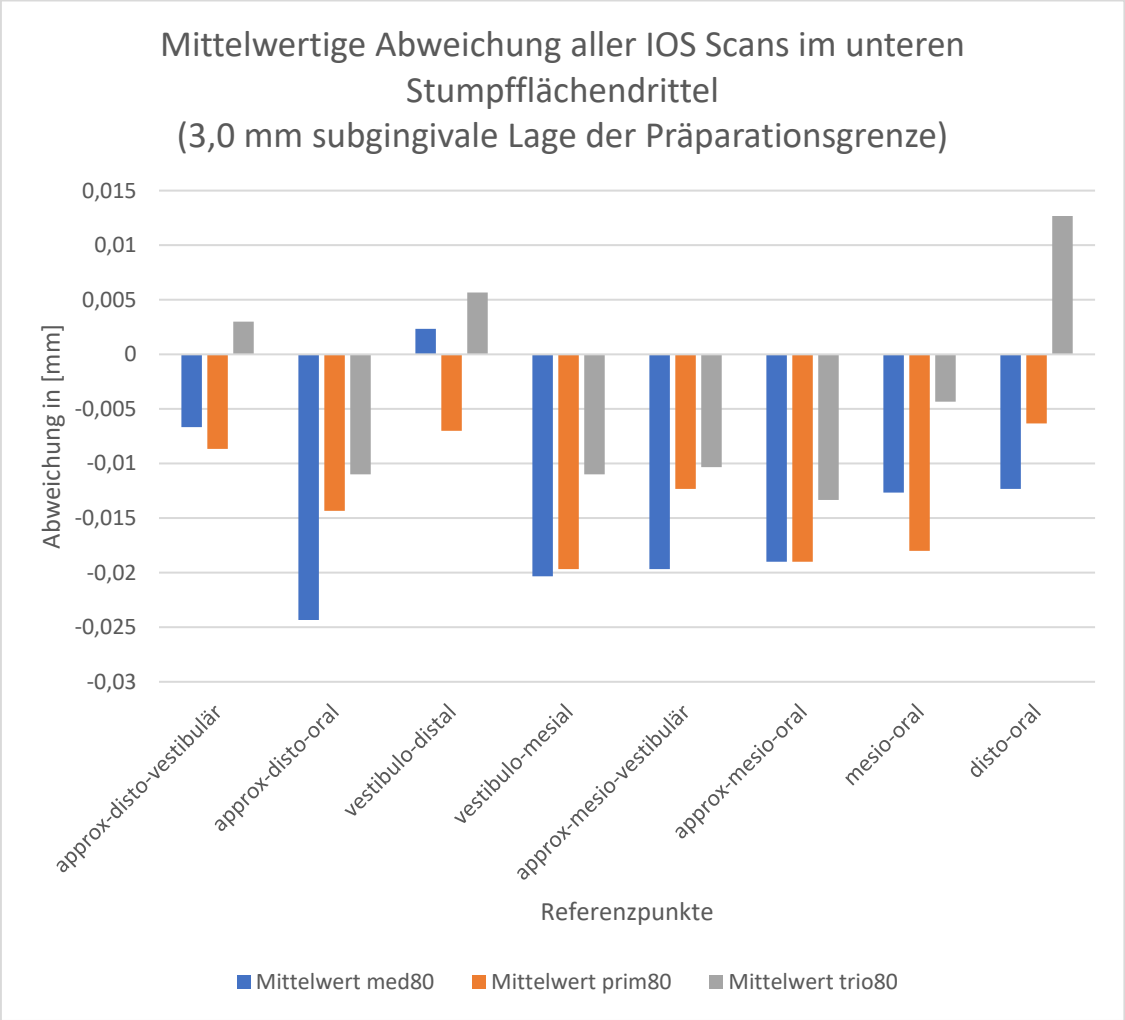

Abb. 4.10: Vergleich der Mittelwerte der drei IOS entlang des unteren Stumpfflächendrittels – Stumpf um 3,0 mm subgingival verlagert
med80 = i700®; prim80 = Primescan®; trio80 = TRIOS 3®

4.2.4 Vergleich der Abweichungen der IOS-Scans des mittleren Stumpfflächendrittels

Im mittleren Stumpfflächendrittel wurde im distoapproximalen Bereich eine mittelwertige maximale Abweichung durch den *TRIOS 3®* erfasst (+0,042 mm). Die restlichen Messpunkte weisen mittelwertig bei allen IOS eine dichte Verteilung zwischen – 0,02 mm und + 0,02 mm auf.

Tatsächliche Maximalwerte der einzelnen Messungen liegen beim *i700®* zwischen – 0,027 mm und + 0,007 mm, dem *Primescan®* zwischen – 0,01 mm und + 0,024 mm und dem *TRIOS 3®* zwischen – 0,008 mm und + 0,048 mm.

Zur besseren Übersichtlichkeit wurden für jedes Drittel der Stumpffläche jeweils zwei Diagramme ausgewählt (0,0 mm; -3,0 mm – Abb. 4.11 und 4.12).

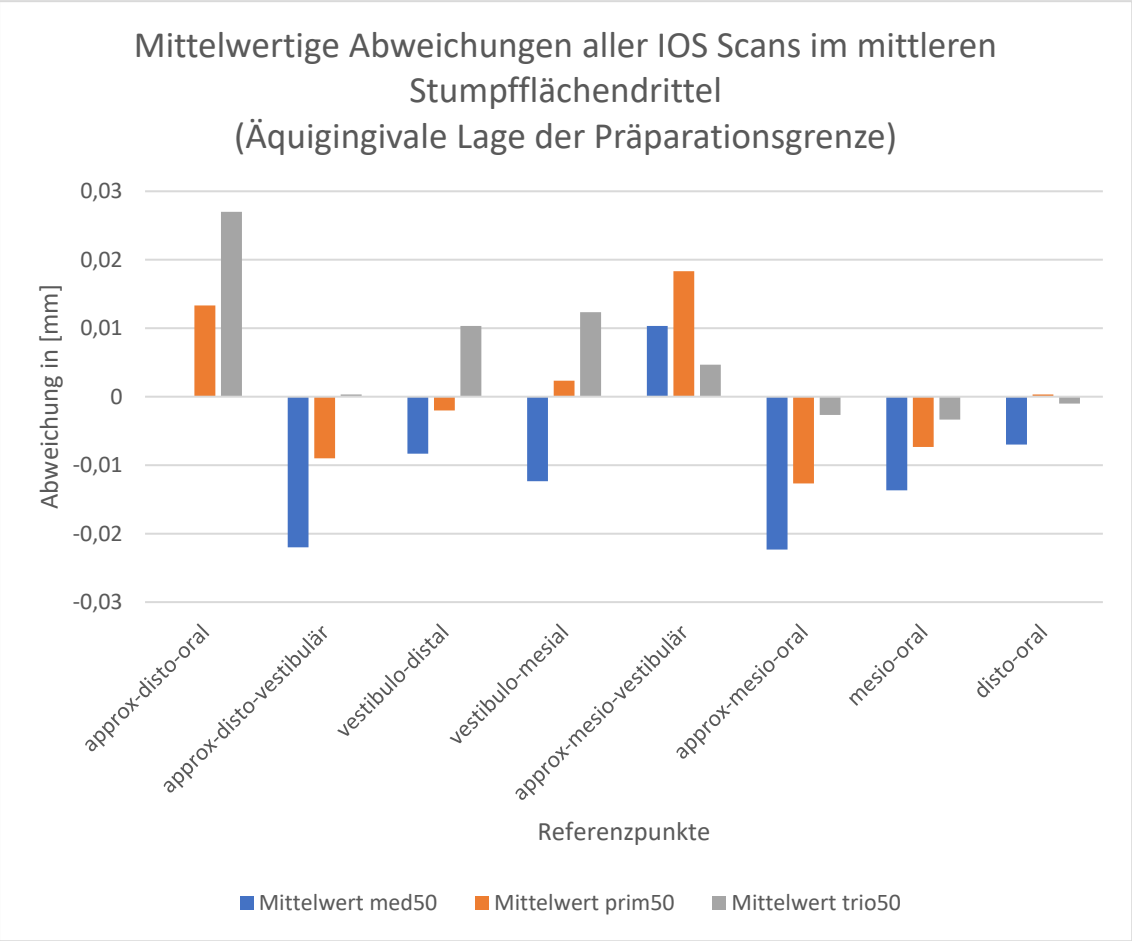

Abb. 4.11: Vergleich der Mittelwerte der drei IOS entlang des mittleren Stumpfflächendrittels – Stumpf in Ausgangsposition mit äquigingivaler Lage der Präparationsgrenze 0,0 mm med50 = i700®; prim50 = Primescan®; trio50 = TRIOS 3®

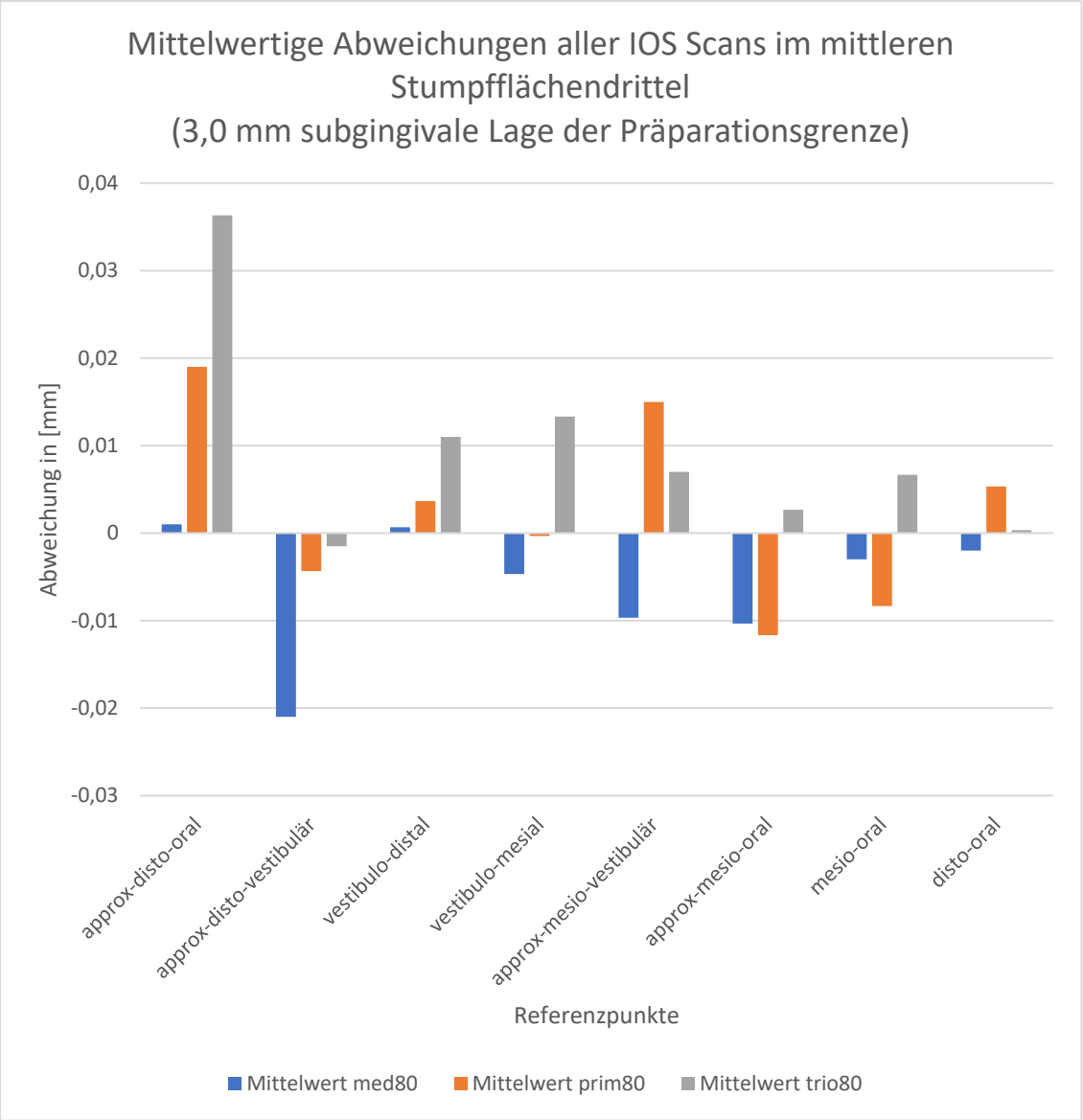

Abb. 4.12: Vergleich der Mittelwerte der drei IOS entlang des mittleren Stumpfflächendrittels - Stumpf um 3,0 mm subgingival verlagert
med80 = i700®; prim80 = Primescan®; trio80 = TRIOS 3®

4.2.5 Vergleich der Abweichungen der IOS-Scans des oberen Stumpfflächendrittels

Die Auswertung der Mittelwerte des oberen Stumpfflächendrittels ergeben, dass der *i700®* mit einer maximalen Abweichung von – 0,0223 mm im mesioapproximalen Bereich das ungenaueste Ergebnis der drei IOS aufweist, gefolgt von dem *Primescan®* und dem *TRIOS 3®*.

Tatsächliche Maximalwerte der einzelnen Messungen liegen beim *i700®* zwischen – 0,025 mm und + 0,0011 mm, dem *Primescan®* zwischen – 0,019 mm und + 0,015 mm und dem *TRIOS 3®* zwischen – 0,017 mm und + 0,025 mm.

Auch hier wurden zur besseren Übersichtlichkeit für jedes Stumpfflächendrittel, jeweils zwei Tabellen ausgewählt (0,0 mm; -3,0 mm – Abb. 4.13 & 4.14).

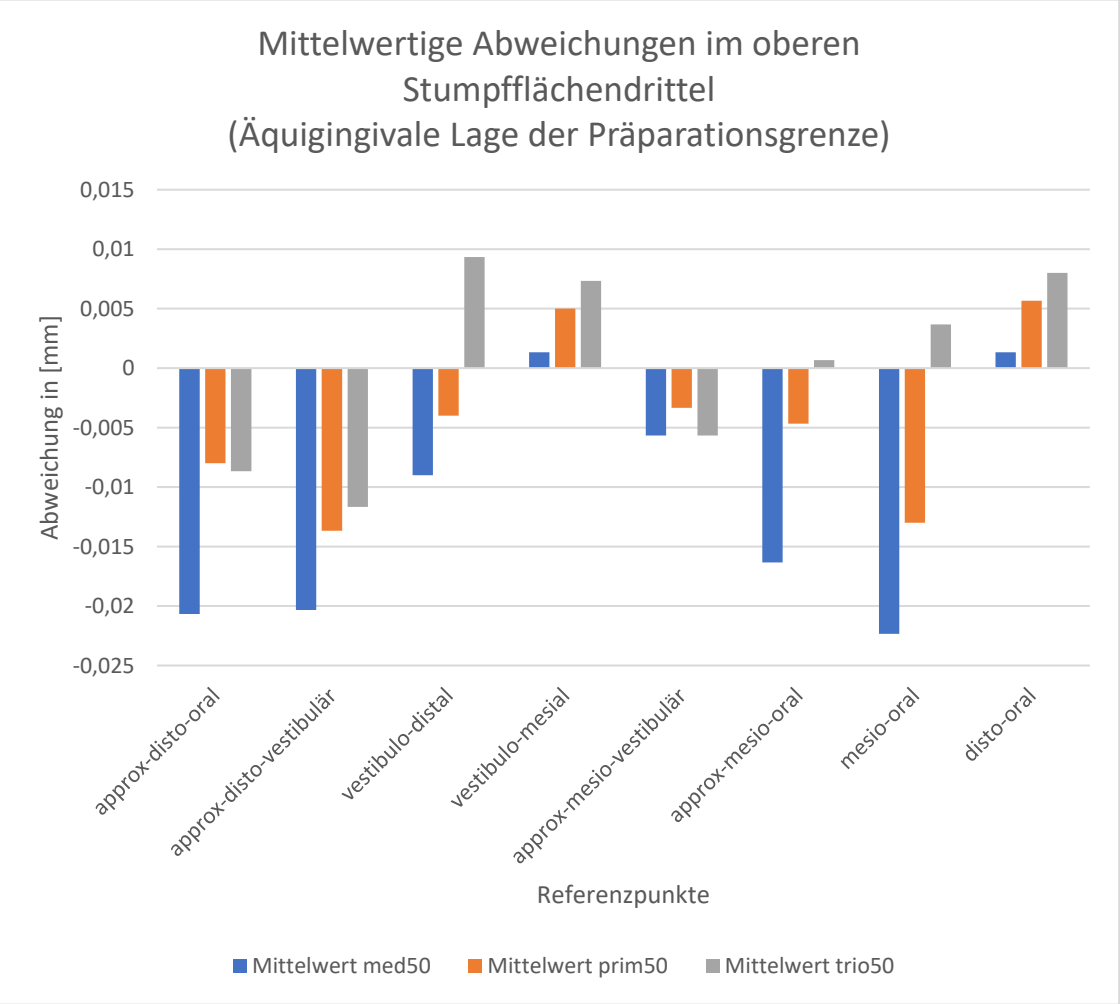

Abb. 4.13: Vergleich der Mittelwerte der drei IOS entlang des oberen Stumpfflächendrittels - Stumpf in Ausgangsposition mit äquigingivaler Lage der Präparationsgrenze 0,0 mm med50 = i700®; prim50 = Primescan®; trio50 = TRIOS 3®

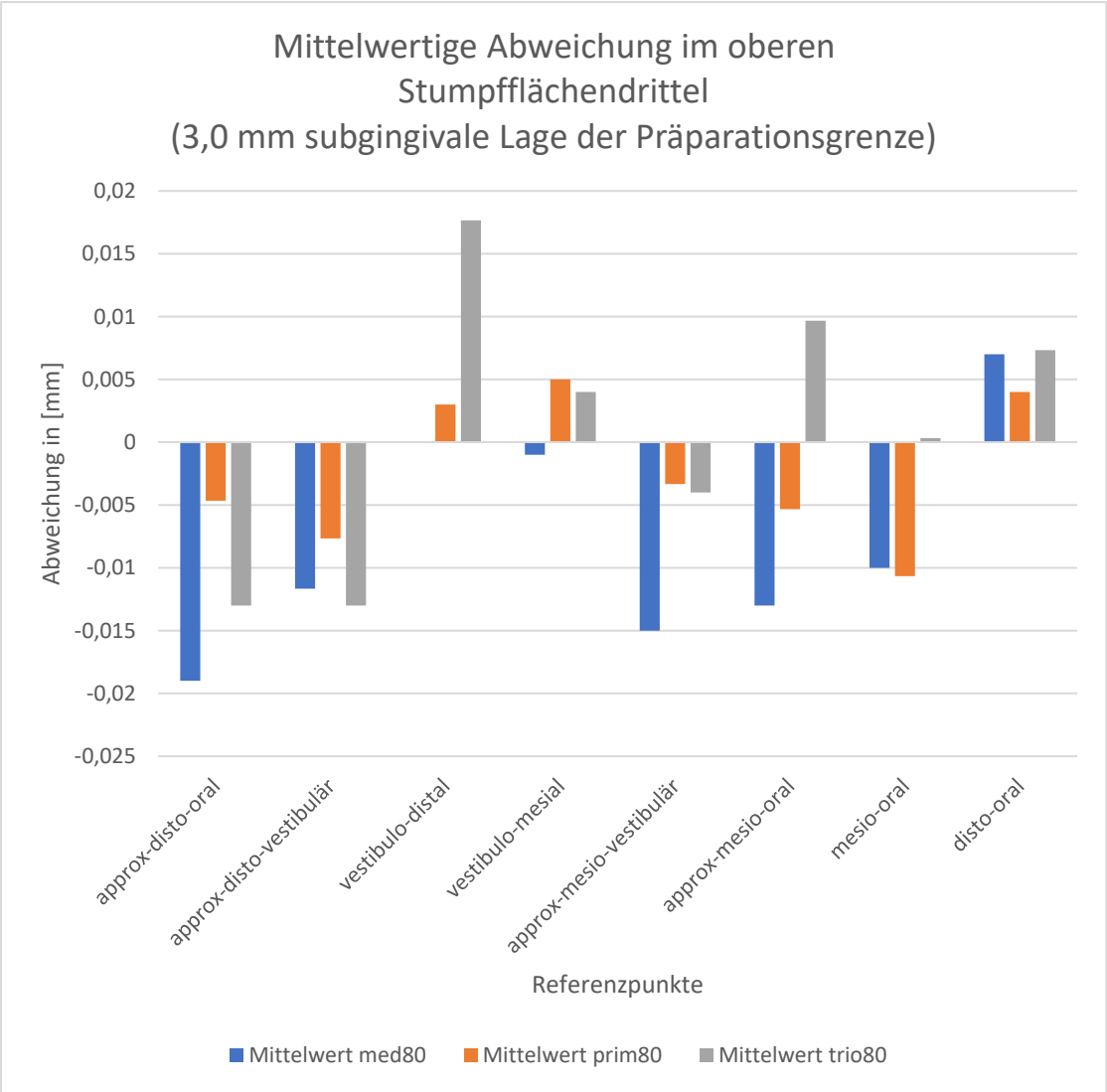

Abb. 4.14: Vergleich der Mittelwerte der drei IOS entlang des oberen Stumpfflächendrittels – Stumpf um 3,0 mm subgingival verlagert
med80 = i700®; prim80 = Primescan®; trio80 = TRIOS 3®

5 Diskussion

Im Kapitel 5.1 werden die verwendeten Materialien und die Methodik der Versuchsdurchführungen diskutiert.

Anschließend folgt in den Kapiteln 5.2 und 5.3 die Diskussion der Ergebnisse und deren klinische Relevanz.

5.1 Diskussion Material und Methodik

Um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, sind dimensionsstabile Materialien zur Modellherstellung zu verwenden. In unterschiedlichen Studien zur Untersuchung der Genauigkeit mit Hilfe digitaler Abformung wurden Gips-, Kunststoffmodelle und Zähne aus Feldspatkeramik als Referenzmodelle untersucht und verwendet, da diese Materialien als ausreichend dimensionsstabil gelten.[2,3,7,13,17,23]

In Teilstudie A wurde ein herkömmliches Superhartgipsmodell Typ IV verwendet, welches nach Herstellerangaben gefertigt und trocken bei Raumtemperatur gelagert wurde. Nach vollständiger Trocknung, Lagerung bei Raumtemperatur und trockenem Raumklima wies Luthardt et al. (2003) die Formstabilität von Dentalgipsmodellen nach.[32] In dieser Studie wurde das Dimensionsverhalten von Typ IV Superhartgipsmodellen (*esthetic-rock®, dentona DENTAL GmbH, Wipperfürth*) über einen Zeitraum von 56 Tagen untersucht. Die Ergebnisse zeigten, dass unter den genannten Bedingungen keine signifikanten dreidimensionalen Veränderungen des Superhartgipsmodells innerhalb des Beobachtungszeitraumes auftraten.

Auch Hazeveld et al. (2014) untersuchten die Dimensionsstabilität von drei digital hergestellten Kunststoffmodellen (drei verschiedene Schnelldruckverfahren – digital light processing, jetted photopolymer and 3D printing) und verglichen diese mit konventionellen Gipsmodellen kieferorthopädischer Situationen (Typ IV). Sie konnten nachweisen, dass Kunststoffmodelle innerhalb eines Zeitraums von zwei Wochen eine vergleichbare Genauigkeit und Reproduzierbarkeit wie Gipsmodelle aufweisen.[23]

Somit ist davon auszugehen, dass das für die Teilstudie A verwendete, aus Typ IV-Gips gefertigte und trocken gelagerte Mastermodell dimensionsstabil war und gemessene Differenzen verschiedener Scans nicht auf Dimensionsveränderungen des Mastermodells zurückzuführen sind.

Für Teilstudie B wurde ebenso ein dimensionsstabiles Modell hergestellt. Die Dimenssionsstabilität ist durch das NEM-Metallgerüst im Kern des Modells, mit dem die Keramikzähne verklebt sind, gewährleistet.

Ähnlich der Studie nach Ender et al. (2019) wurden feldspatkeramische Zähne für das Studienmodell verwendet, um den optischen Eigenschaften natürlicher Zähne nahezukommen.[13] Die an den präparierten Zahnstumpf angrenzende Zahnfleischmaske bestand aus Silikon. Die Basis des Modells wurde aus herkömmlichem Prothesenkunstoff erstellt.

Die Präparationsformen wurden so gewählt, dass alle Flächen eine andere Situation darstellen (siehe Kapitel 3.2.1.1). Die Sulkusdarstellung wurde in der Studie nicht mittels Sulkusmanagement manipuliert, sondern über die Präparation der Flächen dargestellt. Ein Sulkusmanagement durch Retraktionsfaden oder Retraktionspaste ist in-vitro schwer reproduzierbar.[66]

Die in dieser Studie aufgeführten IOS-Systeme verwenden jeweils unterschiedliche Technologien zur digitalen Erfassung, wie im Kapitel 2.5 „Technische Grundlagen der Intraoralscanner (IOS)“ beschrieben. Alle drei IOS werden in verschiedenen Konstellationen/Versionen in Studien auf deren Genauigkeit und Richtigkeit hin untersucht.[56,64] Die IOS wurden in den Studien mit konventionellen Abdrücken verglichen und konnten vergleichbare oder sogar bessere Ergebnisse erzielen.

Im Vergleich zu den analogen Abformungen konnten Schwächen der digitalen Abformung, insbesondere im Bereich des Weichgewebes [Vag et al. (2023)] und bei größeren Scandistanzen [Schmidt et al. (2020)], nachgewiesen werden.

Trotz unterschiedlicher Scan-Technologien haben sich die hier verwendeten Scanner durch hohe Präzision und Reliabilität bewiesen.

Ähnlich der Studie von Stefanelli et al. (2021) wurde ein Masterscan des Gipsmodells mit einem Laborscanner (*i710®*, Medit) aufgenommen und für den Studienteil A verwendet.[61]

Der Masterscan des Stumpfes für Studienteil B wurde mit Hilfe des IOS *TRIOS 3®* erstellt, da im direkten Vergleich der Laborscanner i*710®* die Präparationsgrenze verrundet und nicht präzise genug dargestellt hat.

Um eine möglichst genaue Scansituation zu erreichen, wurden die vom Hersteller vorgegebenen und spezifisch auf die jeweiligen Technologien der eigenen IOS

entwickelten Scanstrategien in das Studiendesign übernommen. In Zukunft ist zu erwarten, dass immer mehr IOS auch ohne Einhaltung der empfohlenen Scanstrategien eine hohe Genauigkeit erreichen können. Bereits die Serie des *TRIOS 5®* kann laut *3shape™* auf eine Scanstrategie verzichten. Dies ist durch die neue Technologie „ScanAssist“ möglich.[45]

Die Studie nach Rehmann et al. (2017) analysierte die Abweichungen von zwei IOS, welche das Kalibrierungsintervall überschritten hatten, vor und nach der Kalibrierung. Dabei stellte sich heraus, dass die Messungen präzisere Ergebnisse nach der Durchführung einer Kalibrierung lieferten als davor.[46]

Um eine solche gerätetechnische Ungenauigkeit und Abweichung zu vermeiden, wurden alle IOS vor der Versuchsdurchführung nach Herstellerangaben kalibriert.

In der Studie um Resende et al. (2020) wurden behandlerabhängige Scanergebnisse verglichen.

Dabei zeigte sich, dass sowohl die Erfahrung des Behandlers, die Wahl des IOS als auch die Größe des Scanbereichs maßgeblich zur korrekten Erfassung beitragen.[48] Daher wurden die Scans immer durch denselben Behandler durchgeführt und somit eine vergleichbare Situation geschaffen. Die Scangröße wurde in den jeweiligen Abschnitten auf das Minimum reduziert, wodurch Ungenauigkeiten minimiert wurden.[56]

Um eine exakt reproduzierbare Bewegung der IOS zu untersuchen, wurde in der Studie von Straus et al. (2021) die Erfassung mit einem Roboterarm durchgeführt.[62] Dabei wurde festgestellt, dass sowohl der Abstand zur Modelloberfläche, als auch der Scanpfad eine wichtige Rolle zur Genauigkeit beitragen. Es wurde nachgewiesen, dass der Roboterarm eine genauere Erfassung reproduzieren kann, als ein menschlicher Behandler. Demnach wurde während der vorliegenden Studie darauf geachtet den Abstand zum Modell während des Scans mit allen IOS gleich zu halten und den Scanpfad einzuhalten. Im Vergleich zu mechanischen, streng reproduzierbaren Bewegungen eines Roboters, entspricht das hier gewählte manuelle Vorgehen eher einer klinischen Scan-Situation.

Der Einfluss von Bedienerfaktoren auf die Scangenauigkeit wird auch von Revilla - León et al. (2023) beschrieben. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass das Wissen um die Bedienerfaktoren von grundlegender Bedeutung für die optimale Anwendung eines IOS ist.[50]

In den Studien zur Scangenauigkeit werden unterschiedliche Matching-Programme genutzt, wobei allerdings unbekannt ist, ob die zum digitalen Vergleich erforderlichen Orientierungs- und Referenzpunkte der jeweiligen Software entsprechend korrekt platziert wurden.[15,18,27,58]

Für die in dieser Studie genutzte *PolyWorks®*-Software wurde daher im Studienteil A überprüft, ob das Platzieren der erforderlichen Orientierungspunkte einen Einfluss auf die Matchingqualität hat. Die Ergebnisse belegen die hohe Präzision von *PolyWorks®* und bestätigen die Untersuchungen von Kamimura et al. (2017) und Shely et al. (2023).[27,58]

Die Qualität der *PolyWorks®*-Software wird auch durch einen Prüfbericht der Physikalisch - Technischen Bundesanstalt bestätigt.[41]

Die Vergleichbarkeit von IOS stellt in Studien eine große Herausforderung dar.

Nach Mehl et. al (2021) sind einzelne Distanzmessungen mit Hilfe festgelegter ISO - Normen durchführbar. Hierzu sind definierte Objekte mit definierten Abmessungen bekannt und werden von Dentalscannern erfasst und analysiert. Oberflächen mit mehrdimensionalen Messungen sind schwierig zu vergleichen. Dafür sollte eine Annäherung an ISO-Standards in Betracht gezogen werden.[36]

In der vorliegenden Studie wurden definierte Punkte digital über das Referenzmodell verteilt, ausgewählt und miteinander verglichen. Dabei wurde die Abweichung zwischen einem definierten Punkt an dem Referenzmodell und dem Intraoralscan gemessen und analysiert. Die Abstände zwischen den definierten Punkten der zu vergleichenden Scans wurden durch die Vermessungssoftware ermittelt. Entlang der apikalen Grenze wurde subjektiv die gesamte Präparation auf deren Erfassung untersucht, da das Analyseprogramm in schwer einsehbaren Bereichen die Messung mit einem weiter entfernten Punkt verglichen hat, wodurch die Auswertung nicht tabellarisch möglich war.

Der Review-Beitrag von Albanchez-González et al. (2022) fasst mehrere in-vitro Studien zur Genauigkeit von digitalen Abformungen mit IOS im Vergleich zu konventionellen Abformtechniken bei dentalen Implantaten zusammen. Es wurden sowohl unbezahnte, teilweise bezahnte und Modelle mit Einzelimplantaten untersucht. Die meisten Studien kommen zu dem Schluss, dass konventionelle Abformmethoden zwar eine höhere Genauigkeit aufweisen als digital erfasste virtuelle Abformungen, die Differenzen aber

klinisch nicht relevant sind. Die Ergebnisse der Studien mit unbezahnten Modellen waren uneinheitlich, wobei sechs Studien eine höhere Genauigkeit bei digitaler Erfassung beschreiben, fünf Studien eine bessere Genauigkeit der konventionellen Methode zuschreiben und vier weitere Studien keine signifikanten Unterschiede fanden.[1] Im Vergleich dazu betonen Muallah et al. (2017),[38] sowie Güth et al. (2016),[22] dass die direkte und indirekte Digitalisierung zu vergleichbaren Ergebnissen führen. Andere Studien belegen eine höhere Genauigkeit für die direkte digitale Erfassung der Mundsituation.[20,21,33]

Die unterschiedlichen Studien zeigen, dass eine eindeutige Erfassung aller Strukturen im Mund des Patienten mit Hilfe von IOS schwierig sein kann und IOS teilweise an ihre Grenzen stoßen.

Die Studie um Elter et al. (2022) untersuchte die Genauigkeit eines IOS bei der Erfassung von Wurzelkanaltiefen bis zu 20 mm. Es wurde ein menschlicher Eckzahn verwendet und dessen Wurzelkanal in verschiedenen Längen zwischen 10 – 20 mm präpariert und jeweils 8-mal mit dem *Primescan®* gescannt. Daraus resultierte, dass ab einer Tiefe von über 14 mm und einem Durchmesser von unter 2,2 mm eine Erfassung der Kanalstruktur nur unzureichend ist.[12]

Ähnlich den Ergebnissen von Elter et al. ist das Resultat dieser Studie eine ungenügende Scanbarkeit des IOS erkennbar, je tiefer und schwerer zugänglich das Objekt ist.

Ebenso zeigte die Studie um Cagidiaco et al. (2021), dass eine tiefe Präparation von 1,5 – 2,0 mm für eine suffiziente Erfassung mit IOS und anschließender Kronenversorgung nicht zu empfehlen ist.[16]

In einer weiteren Studie von Park et al. (2023) wurden unterschiedliche Inlaypräparationsformen an einem künstlichen Zahn vorbereitet, digitalisiert und die Erfassung verglichen. Das Ergebnis zeigt, dass eine weite und tiefe Präparation die höchste Abweichung im Vergleich zur flachen und schmalen Präparation aufweist.[40] Auch die vorliegende Studie zeigte eine erhöhte Abweichung der Erfassung mit IOS auf, je tiefer die Areale lagen.

5.2 Diskussion der Ergebnisse

Ein digitaler Vergleich, der mit Hilfe der drei verwendeten handelsüblichen Intraoralscannern durchgeführt wurde, zeigte keine klinisch signifikanten Abweichungen.

Die Ergebnisse dieser Arbeit verdeutlichen, dass eine präzise Vorbereitung des zu erfassenden Bereiches dringend erforderlich ist.

5.2.1 Diskussion der Ergebnisse der Teilstudie A

Teilstudie A diente primär der Überprüfung der Reliabilität und der digitalen Überlagerung mittels der verwendeten Software *PolyWorks® Meteorology Suite 2021* (InnovMetric Software Inc., Québec, Canada) und sollte im Detail klären, ob die Software in der Lage ist zuverlässige Ergebnisse zu liefern.

Die Teilstudie A1 zeigte, dass die Software *PolyWorks®* mit Hilfe drei unterschiedlich gesetzter Orientierungspunkte für die Best-Fit Zuordnung keine Abweichungen des Referenzmodells (#3) zu #4 aufwies. Die Funktionalität der „Best-Fit“ Funktion der Vergleichssoftware konnte hierbei bestätigt werden. Dadurch sind Verteilung und Auswahl der mindestens drei erforderlichen Orientierungspunkte über das gesamte Modell willkürlich zu bestimmen. Damit ist die Nullhypothese, dass für das „Matchen“ digitaler Scans die erforderlichen Orientierungspunkte in der *PolyWorks®*-Software willkürlich gesetzt werden können, bestätigt.

Anschließend wurden die mit dem Laborscanner durchgeführten Scans auf deren Reliabilität untersucht. Diese zeigten eine maximale Differenz von 0,007 mm auf, wobei die überwiegenden Abweichungen unterhalb 0,004 mm lagen. Dadurch konnte die Reproduzierbarkeit des Laborscanners in den vorliegenden Modellscans ebenfalls nachgewiesen und das Mastermodell A als „Goldstandard“ definiert werden.

Die Abweichung des Zahnkranzes der IOS Scans wurde in der Teilstudie A2 untersucht. Hierzu wurden drei Orientierungspunkte am ausgeschnittenen Zahn 17 gewählt. Somit fungierte der Zahn 17 als sogenannter „Ankerzahn“ und nur dieser wurde zum Matching verwendet, um im Verlauf des Zahnbogens Divergenzen erkennen zu können.

Nach dem Matching über den Ankerzahn 17 zeigten alle IOS Scans Abweichungen zum Frontzahnbereich des Referenzmodells in y- und z-Achse auf. Weitere Divergenzen sind im Verlauf des Zahnbogens an Zahn 26 und 27 in z-Achse zu erkennen, wobei der

IOS Scan in basaler Richtung abweicht und eine Torsion des gesamten Zahnbogens ausgehend von Zahn 17 sichtbar wird. Die Abweichungen liegen zwischen maximal 0,2214 mm und -0,05425 mm.

Hier ist anzunehmen, dass die Abweichungen außerhalb des überlagerten Bereiches zunehmen, je kleiner die zu matchende Fläche ist. Daraus ist abzuleiten, dass die Referenzfläche und das gescannte Modell idealerweise dasselbe Ausmaß haben sollen, um anschließend genug Oberfläche zur Überlagerung zu haben. Hieraus ergibt sich die Erkenntnis, dass eine weitspannige prothetische Versorgung zur suffizienten Durchführung so viele Orientierungspunkte und erfasste Oberflächen wie möglich benötigt.

5.2.2 Diskussion der Ergebnisse der Teilstudie B

Die Ergebnisse des Evaluationsscores belegen, dass eine gute Einsehbarkeit der Präparationsgrenze für deren Erfassung essentiell ist. Je konischer die Stumpfpräparation und je weiter der Sulkus geöffnet ist, umso genauer können die Flächen erfasst werden.

So konnten gemäß des Evaluationsscores die Präparationsgrenze durch alle IOS auf der Mesialfläche bis zur subgingivalen Lage von 2,5 mm digitalisiert werden.
Die Distal- (bis 1,5 mm subgingivaler Lage) und die Vestibularfläche (bis 1,5 mm subgingival) wurden besser durch den *Primescan®* erfasst, gefolgt vom *TRIOS 3®* und dem *i700®.* Die Präparationsgrenze der Oralfläche wurde durch alle IOS gleichermaßen, geringfügig präziser abgebildet (bis 1,5 mm; 2,0 mm subgingival).

Der Vergleich der präparierten Zahnflächen zeigte für die drei IOS nur geringe Abweichungen. Im Bereich des zervikalen Drittels der Präparation lag die maximale mittelwertige Abweichung bei -0,0286 mm (*Medit®* 1,0 mm subgingival; approx-disto-oral RP). Die maximalen Einzelmesswerte im zervikalen Drittel aller drei IOS lagen zwischen -0,034 mm und +0,017 mm.

Das mittlere Drittel wurde mit einer maximalen mittleren Abweichung von +0,042 mm (*Trios3®* 2,0 mm; aprox-disto-oral RP) ausgewertet.

Hier lagen die einzelnen Maximalwerte der drei IOS zwischen -0,027 mm und +0,048 mm.

Im oberen Drittel wurden maximale mittlere Abweichungen von -0,0223 mm (*Medit®* 0,0 mm; mesio-oral RP) erfasst. Die einzelnen Maximalwerte des oberen Drittels lagen zwischen -0,025 mm und +0,025 mm.

Diese Resultate des Studienteils B lassen erkennen, dass die getesteten IOS marginale Abweichungen ohne klinische Relevanz aufwiesen. Das Mastermodell B ist dimensionsstabil hergestellt worden, wodurch jegliche Abweichung durch materialspezifische Veränderung auszuschließen sind. Die verschiedenen Flächen konnten durch alle IOS gut erfasst werden, dennoch ist zu erkennen, dass eine konische Präparation für die Erfassung von Vorteil ist. Schwierigkeiten können im approximalen Bereich auftreten, da ein Schwenken und Kippen der IOS durch die benachbarten Zähne nur erschwert möglich ist.[34]

Der Abstand der Stumpfoberfläche zu IOS Scankopf ist hierbei größer als an der oralen oder vestibulären Oberfläche. Eine umfassende Übersicht von Eggmann et al. (2024) zu den jüngsten Fortschritten der IOS bestätigt die anhaltenden Schwierigkeiten bei Benutzung der digitalen Abformung im klinischen Bereich. Faktoren wie Speichelfluss, Blut, Weichgewebe und den eingeschränkten Zugang zu posterioren Zähnen beeinflussen die Umsetzung der digitalen Abformung.[11] Vor allem sind untersichgehende Bereiche, sowie enge und lang auslaufende approximal als auch intrasulkulär gelegene Präparationen herausfordernd. Bei dem hier verwendeten Zahnstumpf wurden klinisch typische Präparationsarten und Flächenwinkel nachgeahmt, um so eine weitestgehend patientenrealistische Situation zu schaffen. Abweichend von der klinischen Realität war allerdings in-vitro kein Sulkusmanagement möglich. Auch wurde der mögliche Einfluss von Blut, Speichel und Sulkusflüssigkeit nicht simuliert. Es ist aber anzunehmen, dass ein erfolgreiches Management zum Weiten des Sulkus auch die IOS-Erfassung einer weiter subgingival liegenden Präparationsgrenze ermöglicht. Demgegenüber würden die Präparationsgrenze bedeckende Flüssigkeiten wie Speichel und Blut die Scanqualität deutlich verschlechtern.

Die Nullhypothese, dass bei visueller Einsehbarkeit der Präparationsgrenze die subgingivale Lage dieser, sowie die Form und Morphologie des präparierten Zahnstumpfes keinen Einfluss auf die formkorrekte Erfassung mit Hilfe von intraoralen Scannern hat, ist abzulehnen.

Alle drei Intraoralscanner zeigen vergleichbare Ergebnisse bei der Erfassung der Präparationsgrenze, sowie Form und Morphologie des präparierten Zahnstumpfes. Die Differenzen der Abweichungen der Oberflächen bis zu einer apikalen Verlagerung des Stumpfes von 3,0 mm sind mit einer mittleren maximalen Abweichung von 42 µm (= 0,042 mm) klinisch tolerabel.[25,55] Einige Autoren beschreiben Abweichungen von maximal 120 µm (= 0,12 mm) als klinisch akzeptabel.[5,42]

Ab einem apikalen Versatz des Stumpfes von über 3,5 mm nahmen die Abweichungen der Erfassung der distalen und vestibulären Stumpfflächen zu und konnten teilweise nicht mehr ausgewertet werden. Die mesiale und orale Stumpffläche konnten hingegen bis zu einem maximalen subgingivalen Versatz von 5,0 mm mit klinisch nicht relevanten Abweichungen registriert werden.

Die Erfassung der Präparationsgrenze des vorliegenden Modells wurde durch die drei IOS ähnlich gut bis zu einer subgingivalen Absenkung von 2,0 - 2,5 mm dargestellt. Als klinischer Faktor muss die sogenannte „biologische Breite“ beachtet werden, welche den Abstand zwischen dem krestalen Alveolarknochen und dem koronalen Ende des Saumepithels der Gingiva beschreibt, welcher insgesamt bei circa 2,7 mm liegt. Diese Bereiche gliedern sich in bindegewebiges und epitheliales Attatchment mit jeweils circa 1 mm, sowie einem Zahnfleischsulkus von circa 0,7 mm.[43] Demnach würde es ausreichen, wenn die mit einem IOS zu erfassende Sulkustiefe nicht mehr als 0,7 mm beträgt. Parodontalgeschädigte oder hyperplastische Gewebe sollten vor der analogen und digitalen Abformung zum Einhalten der biologischen Breite behandelt werden.[57] In der vorliegenden Studie wurde die Präparationsgrenze bis zu einer subgingivalen Lage von 2,0 - 2,5 mm gut erfasst. Die mesiale und orale Stumpffläche konnte sogar bis 5,0 mm subgingivalen Versatz erfasst werden. Somit konnten selbst tieferliegende Bereiche als die angestrebten 0,7 mm im klinisch gesunden Sulkus suffizient mit allen drei IOS digitalisiert werden. Ähnliche Ergebnisse zeigt die Studie von Ferrari Cagidiaco et al. (2021) auf. Diese Studie untersuchte auch die Reproduzierbarkeit subgingivaler Präparationsgrenzen von Abutments, welche in drei Gruppen eingeteilt wurden. Diese unterschieden eine (A) supragingival gelegene, (B) 0,5 – 1,0 mm und (C) 1,5 – 2,0 mm subgingival liegende Präparationsgrenze. Es zeigte sich, dass eine tieferliegende Präparationsgrenze als in Gruppe (C) nicht empfohlen werden kann.[16]

Daher resultiert, dass trotz subgingival liegenden Zahnflächen, welche korrekt mit Hilfe des IOS erfasst wurden, die Präparationsgrenze schon bei geringen subgingvalen Lagen verrundet digitalisiert werden. Somit ist die Nullhypothese abzulehnen.

5.3 Schlussfolgerung und Ausblick

Die subgingivale Lage, die zirkuläre Ausformung der Präparationsgrenze, sowie die Einsehbarkeit des Sulkus haben einen Einfluss auf die digitale Erfassung mit modernen IOS.[16] So belegen ebenfalls die Ergebnisse dieser Studie, dass Zahnareale nur dann korrekt digital erfasst werden können, wenn sie auch visuell gut erkennbar sind.

Kann der Verlauf der Präparationsgrenze nicht eindeutig und vollständig visuell erfasst werden, ist ein Sulkusmanagement, bevorzugt mit Hilfe von adstringierenden Retraktionspasten und oder der Fadentechnik erforderlich.[67,68] Ob die Präparationsgrenze formgetreu erfasst und nicht verrundet dargestellt wurde, ist nur durch eine genaue Inspektion des vergrößerten Scans erkennbar. Im Idealfall sollte die Inspektion zeitnah durch den Behandler, welcher die Präparation durchgeführt hat, erfolgen.[70]

Die vorliegende Studie zeigt, dass ausgenommen der Gefahr einer fehlerhaften Darstellung einer subgingivalen Präparationsgrenze auch steiler abfallende und deutlich unterhalb des Gingivalsaums liegende Zahnflächen klinisch ausreichend präzise durch IOS dargestellt werden können.

Ein möglicher Lösungsansatz für die korrekte Erfassung tief subgingivaler, nicht mehr einsehbarer Zahnareale könnte in einer Kombination von optischen und Ultraschallscannern liegen. So stellten Marotti et al. (2019) fest, dass die subgingivale Präparation zwar prinzipiell mit Ultraschallscannern erfasst werden kann, die Formtreue und räumliche Auflösung dieser Scans jedoch noch deutlich den optischen Scans unterlegen sind.[34] Die taktile konventionelle oder aktive Scantechnologie, wie sie von einigen Laborscannern genutzt werden, sind noch nicht in der für das intraorale Scannen erforderlichen reduzierten Bauhöhe verfügbar. Außerdem ist eine taktile Abformung mit einer starren Verbindung zwischen dem Scanner und dem zu erfassenden Objekt notwendig, was sich am Patienten als schwierig erweist.

Andere bildgebende Verfahren wie CT und DVT weisen nicht die erforderliche Auflösung auf.

Zudem können Metallfüllungen oder Metallkronen zu Überstrahlungseffekten führen und den Scan unbrauchbar machen. Zudem wäre der Einsatz ionisierender Strahlen zur Darstellung von Strukturen, die auch mit konventionellen Abformtechniken erfasst werden könnten, ethisch nicht vertretbar.

Trotz der Fortschritte in der digitalen Zahnmedizin, gibt es nach wie vor klinische Situationen, in denen analoge Abformungen den digitalen Verfahren deutlich überlegen sind. Dies gilt insbesondere für sehr tief subgingival liegende Präparationsgrenzen, weitspannige, über den Zahnbogen laufende festsitzende Konstruktionen und zahnlose Kieferabschnitte.[44] Es ist in aller Regel empfehlenswert in-vitro Studien als Vorstudien zu betrachten und basierend auf deren Ergebnissen durch weiterführende in-vivo Studien zu ergänzen.

Abschließend ist noch einmal zu betonen, dass die Ergebnisse dieser Studie hinsichtlich Präzision und Reliabilität strenggenommen nur für die drei verglichenen IOS-Typen gelten. Zudem wurden bei dieser in-vitro Studie klinische Faktoren wie Speichel und Blut nicht simuliert. Weiterführende in-vivo Studien sollten die in-vitro gewonnenen Erkenntnisse ergänzen.

6 Zusammenfassung

In-vitro Untersuchungen zum Einfluss der subgingivalen Lage präparierter Zahnflächen auf deren korrekte Erfassung mit Hilfe intraoraler Scanner

Die digitale Abformung der Zahnreihen ist mittlerweile ein fester Bestandteil der modernen Zahnmedizin. Im Gegensatz zu Laborscannern erlauben Intraoralscanner die Patientensituation direkt optisch zu erfassen und mit Hilfe spezieller Software virtuell dreidimensionale Modelle der Mundsituation zu generieren.
Die Anfertigung von passgenauem Zahnersatz setzt die formgetreue Digitalisierung aller relevanten Zahn- und Kieferareale voraus.

Zielsetzung:
In der vorliegenden in-vitro Studie sollte für drei handelsübliche intraorale Scanner geprüft werden inwieweit die subgingivale Lage der Präparationsgrenze und die angrenzenden präparierten Zahnflächen einen Einfluss auf die Zeichnungsschärfe und Formtreue der digitalisierten Zahnareale hat. Zudem sollte in einer Vorstudie für die digitale Überlagerungssoftware *PolyWorks®* geklärt werden, ob die für das korrekte digitale Überlagern erforderlichen, nicht in einer Fläche liegenden Orientierungspunkte, willkürlich gesetzt werden können.

Material und Methode:
Die Studie unterteilt sich in zwei Teilstudien.
Teilstudie A diente der Prüfung der Überlagerungssoftware *PolyWorks®*. Dazu wurde ein formstabiles Typ IV-Gipsmodell eines vollbezahnten Oberkiefers mit einem handelsüblichen Laborscanner (*T710®* der Firma *Medit™)* und drei handelsüblichen Intraoralscannern (*TRIOS 3® - 3shape™; i700® - Medit™; CEREC Primescan ® - Dentsply Sirona™)* unter Wahl verschiederener Orientierungspunkte mehrfach gescannt. Die Scans wurden anschließend anhand definierter Referenzpunkte miteinander verglichen.
Für die Teilstudie B wurde ein spezielles dimensionsstabiles Oberkiefermodell konstruiert und gefertigt, welches über Mikrometerschrauben die präzise Verschiebung

eines präparierten Zahnes 16 in den drei Raumachsen gegenüber den restlichen Zähnen ermöglicht. Um Formveränderungen des Modells zu vermeiden, besteht das Kunstoffmodell im Kern aus einem stabilen Nichtedelmetall-Gerüst, welches mit den Keramikersatzzähnen festverklebt wurde.

Der Zahnstumpf 16 weist mesial, distal, palatinal und vestibulär unterschiedliche Präparationsformen auf und ist von einer Gingivamaske aus Silikon umfasst.

Ausgehend von einer äquigingivalen Lage der Präparationsgrenze wurde der Stumpf und damit die Präparationsgrenze in 0,5 mm Schritten nach apikal verlagert und dabei mit den drei Intraoralscannern jeweils dreimal gescannt. Die Scans wurden anschließend unter Verwendung der *PolyWorks®* Software miteinander digital verglichen.

Ergebnisse:

Die Ergebnisse der Teilstudie A belegen, dass die Funktion „Best-Fit“ der Vergleichssoftware *PolyWorks®* zu keinen artifiziellen Abweichungen der Scans führt. Daher ist die Nullhypothese, dass die für das korrekte Überlagern digitaler Scans erforderlichen Orientierungspunkte in der *PolyWorks®* Software ohne Qualitätsverlust willkürlich gesetzt werden können, anzunehmen.

Zusätzlich wurde für den Laborscanner anhand mehrfacher Scans mit einer maximalen Abweichung von 0,007 mm eine gute Reliabilität nachgewiesen.

Des Weiteren wurden die Scans mittels der Intraoralscanner an 28 ausgewählten Referenzpunkten hinsichtlich möglicher Abweichungen zum Masterscan untersucht.

Der *Primescan®* zeigte mit 0,22 mm die größten Divergenzen im Bereich des Frontzahnes 11, gefolgt vom *TRIOS 3®* mit einer mittleren Abweichung von 0,19 mm am Zahn 21. Die geringsten Divergenzen zeigte mit einer maximalen mittelwertigen Abweichung von 0,0548 mm am Zahn 24 der *i700®*. In der dem Ankerzahn gegenüberliegenden Region 26 und 27 zeigten die Scans der Intraoralscanner im Vergleich zum Referenzscan mittelwertige Abweichungen zwischen 0,657 mm und -0,134 mm in der z-Achse. Die Scans der Intraoralscanner waren demnach gegenüber dem Referenzscan im Frontzahnbereich geweitet und im Molarenbereich in der z-Achse deformiert dargestellt.

Die Ergebnisse der Teilstudie B belegen, dass eine weite Sulkusöffnung, sowie die gute Einsehbarkeit der zu erfassenden Bereiche Voraussetzung für eine korrekte Darstellung sind. Die mesial, deutlich konisch zulaufende Präparationsgrenze wurde bis zu einer subgingivalen Absenkung von 2,5 mm durch alle Intraoralscanner eindeutig erkennbar erfasst. Die vestibuläre, distale und orale Präparationsgrenze konnte hingegen ab 1,5 mm subgingivaler Lage mit Hilfe der Intraoralscanner nicht mehr eindeutig korrekt dargestellt werden.

Hinsichtlich der präzisen Erfassung der Präparationsgrenze zeigten die drei getesteten Intraoralscanner keine relevanten Unterschiede.

Ab einer apikalen Verlagerung von 3,5 mm konnte die distale und die vestibuläre Stumpffläche im unteren Drittel nicht mehr erfasst werden. Die mesiale und die orale Stumpffläche konnte hingegen bis zu einer maximalen Verlagerung von 5,0 mm ohne klinisch relevante Abweichungen durch alle drei Intraoralscanner digitalisiert werden.

Die Hypothese, dass die subgingivale Lage der Präparationsgrenze sowie Form und Morphologie des präparierten Zahnstumpfes keinen Einfluss auf die formkorrekte Erfassung mit Hilfe von intraoralen Scannern hat, ist daher abzulehnen.

Auch wenn subgingival tieferliegende, aber einsehbare Zahnflächen korrekt digitalisiert werden, kann die Präparationsgrenze bereits bei einer geringen subgingivalen Lage verrundet wiedergegeben werden.

Diskussion und Schlussfolgerung:

Die subgingivale Lage, die zirkuläre Ausformung der Präparationsgrenze, sowie die Einsehbarkeit des Sulkus haben einen Einfluss auf die digitale Erfassung mit intraoralen Scannern. So belegen auch die Ergebnisse dieser Studie, dass Zahnareale nur dann systembedingt korrekt digital erfasst werden können, wenn sie auch eindeutig visuell einsehbar sind. Die Einsehbarkeit einer subgingival liegenden Präparationsgrenze ist aber kein Garant für deren präzise Registrierung. Ob die Präparationsgrenze formgetreu erfasst und nicht verrundet dargestellt wurde, ist nur durch eine genaue Inspektion des am Bildschirm vergrößerten Scans erkennbar. Im Idealfall sollte diese Inspektion zeitnah durch den Behandler, welcher die Präparation durchgeführt hat, erfolgen. Ist die Präparationsgrenze zirkulär nicht eindeutig und vollständig visuell erkennbar oder deutlich subgingival gelegen, ist ein Sulkusmanagement erforderlich.

Die Ergebnisse belegen aber auch, dass ausgenommen der Gefahr einer fehlerhaften Darstellung der subgingivalen Präparationsgrenze steiler abfallende und deutlich unterhalb des Gingivalsaumes liegende Zahnflächen klinisch ausreichend präzise durch Intraoralscanner dargestellt werden, sofern diese einsehbar sind.

Trotz der Fortschritte in der Scantechnologie gibt es klinische Situationen, in denen analoge Abformungen den digitalen Verfahren deutlich überlegen sind. Dies gilt insbesondere für sehr tief subgingival liegende Präparationsgrenzen, weitspannige, über den Zahnbogen laufende festsitzende Konstruktionen und zahnlose Kieferabschnitte.

Abschließend ist zu betonen, dass die Ergebnisse dieser Studie hinsichtlich Präzision und Reliabilität strenggenommen nur für die drei verglichenen Intraoralscanner-Typen gelten. Zudem wurden in dieser in-vitro Studie klinische Faktoren wie Speichel und Blut nicht simuliert. Weiterführende in-vivo Studien sollten die in-vitro gewonnenen Erkenntnisse ergänzen.

7 Summary

In-vitro studies on the influence of the subgingival location of prepared tooth surfaces on their accurate capture using intraoral scanners.

Digital impression-taking of dental arches has become an integral part of modern dentistry. In contrast to laboratory scanners, intraoral scanners allow direct optical capture of the patient's situation and, with the help of specialized software, generate virtual three-dimensional models of the oral situation. The fabrication of precisely fitting dental restorations requires the accurate digitalization of all relevant dental and jaw areas.

Objective:

The aim of this in-vitro study was to evaluate, for three commercially available intraoral scanners, to what extent the subgingival position of the preparation margin and the adjacent prepared tooth surfaces influence the sharpness and accuracy of the digitized dental areas. Additionally, a preliminary study was conducted to determine whether the orientation points required for correct digital matching in the *PolyWorks®* overlay software, which do not lie in a single plane, can be placed arbitrarily.

Materials and Methods:

The study is divided into two substudies.

Substudy A focused on evaluating the *PolyWorks®* overlay software. For this, a dimensionally stable type IV gypsum model of a fully dentate maxilla was scanned multiple times using a standard laboratory scanner (*T710®, Medit™*) and three commercially available intraoral scanners (*TRIOS 3® – 3shape™, i700® – Medit™, CEREC Primescan® – Dentsply Sirona™*), each time selecting different orientation points. The resulting scans were then compared using defined reference points.

For Substudy B, a specially constructed, dimensionally stable maxillary model was fabricated, which allows precise movement of a prepared tooth 16 along three spatial axes relative to the remaining teeth using micrometer screws. To avoid deformation of the model, the core of the plastic model consists of a stable non-precious metal

framework, which is firmly bonded to the ceramic teeth. The tooth stump 16 displays different preparation forms mesially, distally, palatally, and vestibularly and is surrounded by a silicone gingival mask. Starting from an equigingival position of the preparation margin, the stump—and thus the preparation margin—was shifted apically in 0.5 mm increments, and scanned three times with each of the three intraoral scanners at each position. The scans were then digitally compared using the *PolyWorks®* software.

Results:

The results of sub-study A demonstrate that the "Best-Fit" function of the *PolyWorks®* comparison software does not introduce artificial deviations in the scans. Therefore, the null hypothesis - that the orientation points required for correctly superimposing digital scans can be arbitrarily set in the *PolyWorks®* software without quality loss - should be accepted. Additionally, the laboratory scanner demonstrated good reliability through repeated scans with a maximum deviation of 0.007 mm.

Furthermore, the scans were examined at 28 selected reference points using the intraoral scanners for possible deviations from the master scan.

The *Primescan®* showed the largest divergences of 0.22 mm in the area of anterior tooth 11, followed by the *TRIOS 3®* with a mean deviation of 0.19 mm at tooth 21. The *i700®* displayed the smallest deviations, with a maximum mean divergence of 0.0548 mm at tooth 24. In the opposing region of teeth 26 and 27, intraoral scanner scans showed mean deviations between 0.657 mm and -0.134 mm along the z-axis compared to the reference scan, indicating expansion in the anterior region and z-axis deformation in the molar area.

Sub-study B findings reveal that wide sulcus opening and clear visibility of target areas are prerequisites for accurate representation. The mesial, distinctly tapering preparation margin was reliably captured by all intraoral scanners up to a subgingival depth of 2.5 mm. However, the vestibular, distal, and oral preparation margins could no longer be accurately represented by intraoral scanners beyond 1.5 mm subgingivally.

No significant differences were observed among the three tested intraoral scanner devices regarding precision in capturing preparation margins. Beyond an apical displacement of 3.5 mm, the distal and vestibular stump surfaces in the lower third could

not be captured, while the mesial and oral surfaces were digitized without clinically relevant deviations up to 5.0 mm displacement.

The hypothesis that subgingival margin location, stump form, and morphology do not affect accurate intraoral scanner capture must be rejected. Even when deeper but visible subgingival surfaces are correctly digitized, preparation margins may appear rounded at shallower subgingival depths.

Discussion and Conclusion:

The subgingival position, the circumferential shaping of the preparation margin, and the visibility of the sulcus all influence digital acquisition with intraoral scanners. The results of this study confirm that dental areas can only be accurately captured by the system if they are also clearly visible. However, being able to see a subgingival preparation margin does not guarantee its precise registration. Whether the preparation margin is captured true to form and not displayed as rounded can only be determined by carefully inspecting the enlarged scan on the screen. Ideally, this inspection should be performed promptly by the clinician who carried out the preparation. If the preparation margin is not clearly and fully visible around the entire circumference or is located significantly subgingivally, sulcus management is necessary.

The results also show that, aside from the risk of inaccurate representation of the subgingival preparation margin, tooth surfaces that are steeply sloped and located well below the gingival margin can still be depicted with clinically sufficient precision by intraoral scanners, provided they are visible.

Despite advances in scanning technology, there are clinical situations in which conventional impressions are clearly superior to digital methods. This is especially true for very deep subgingival preparation margins, long-span fixed restorations crossing the dental arch, and edentulous jaw sections.

Finally, it should be emphasized that the results of this study regarding precision and reliability strictly apply only to the three intraoral scanner types compared. Additionally, clinical factors such as saliva and blood were not simulated in this in vitro study. Further in vivo studies should be conducted to supplement the findings obtained in vitro.

8 Literaturverzeichnis

1. Albanchez-González MI, Brinkmann JC-B, Peláez-Rico J, López-Suárez C, Rodríguez-Alonso V, Suárez-García MJ. Accuracy of Digital Dental Implants Impression Taking with Intraoral Scanners Compared with Conventional Impression Techniques: A Systematic Review of In Vitro Studies. *International journal of environmental research and public health*. 2022;19(4). Published February 11, 2022.
2. Al-Ibrahim IK, Keeling AJ, Osnes CA. The effect of operator scanning speed on the trueness and precision of full.arch digital impressions captured in vitro using an intraoral scanner. *Journal of Osseointegration*. 2021:265-270. https://www.journalofosseointegration.eu/jo/article/view/486. Accessed September 24, 2023.
3. Amornvit P, Rokaya D, Sanohkan S. Comparison of Accuracy of Current Ten Intraoral Scanners. *BioMed research international*. 2021. Published September 13, 2021.
4. Balkenhol M. CAD/CAM: ein aktueller Kurzüberblick über Workflows, Technologien und Komponenten – Teil 1: vom Scan bis zur Planung. *ZWR*. 2020;129(03):88-91.
5. Boitelle P, Tapie L, Mawussi B, Fromentin O. Evaluation of the marginal fit of CAD-CAM zirconia copings: Comparison of 2D and 3D measurement methods. *The Journal of prosthetic dentistry*. 2018;119(1):75-81. Published April 29, 2017.
6. Borbola D, Berkei G, Simon B, et al. In vitro comparison of five desktop scanners and an industrial scanner in the evaluation of an intraoral scanner accuracy. *Journal of dentistry*. 2023;129:104391. Published December 20, 2022.
7. Chiu A, Chen Y-W, Hayashi J, Sadr A. Accuracy of CAD/CAM Digital Impressions with Different Intraoral Scanner Parameters. *Sensors (Basel, Switzerland)*. 2020;20(4). Published February 20, 2020.
8. dentona AG. *Online Materialinformation*. https://dentona.de/dentona/gipse/sockelgipse/sockel-plaster-gt-160?number=10335. Accessed October 4, 2023.
9. Dentsply Sirona. Primescan: Enjoy the scan. https://www.dentsplysirona.com/content/dam/flagship/en/explore/cerec/brochures/CER-brochure-Primescan-Enjoy-the-scan-M43-C191-EN.pdf. Accessed October 1, 2023.
10. Ebeid K, Nouh I, Ashraf Y, Cesar PF. Accuracy of different laboratory scanners for scanning of implant-supported full arch fixed prosthesis. *Journal of esthetic and restorative dentistry : official publication of the American Academy of Esthetic Dentistry … [et al.]*. 2022;34(5):843-848. Published April 20, 2022.

11. Eggmann F, Blatz MB. Recent Advances in Intraoral Scanners. *Journal of dental research*. 2024;103(13):1349-1357. Published October 9, 2024.
12. Elter B, Diker B, Tak Ö. The trueness of an intraoral scanner in scanning different post space depths. *Journal of dentistry*. 2022;127:104352. Published November 5, 2022.
13. Ender A, Zimmermann M, Mehl A. Accuracy of complete- and partial-arch impressions of actual intraoral scanning systems in vitro. *International journal of computerized dentistry*. 2019;22(1):11-19.
14. Engelhardt J, Knebel W. Konfokale Laserscanning-Mikroskopie. *Phys. Unserer Zeit*. 1993;24(2):70-78.
15. Ferrari M, Keeling A, Mandelli F, Lo Giudice G, Garcia-Godoy F, Joda T. The ability of marginal detection using different intraoral scanning systems: A pilot randomized controlled trial. *American journal of dentistry*. 2018;31(5):272-276.
16. Ferrari Cagidiaco E, Zarone F, Discepoli N, Joda T, Ferrari M. Analysis of The Reproducibility of Subgingival Vertical Margins Using Intraoral Optical Scanning (IOS): A Randomized Controlled Pilot Trial. *Journal of clinical medicine*. 2021;10(5). Published March 1, 2021.
17. Flügge TV, Schlager S, Nelson K, Nahles S, Metzger MC. Precision of intraoral digital dental impressions with iTero and extraoral digitization with the iTero and a model scanner. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics : official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics*. 2013;144(3):471-478.
18. Garbacea A, Alqahtani AF, Goodacre B, Alhelal A, Lozada J, Kattadiyil MT. Scanning accuracy with splinted and unsplinted implant scan bodies for the edentulous arch at implant level: an in vitro study. *The Journal of oral implantology*. 2022. Published July 11, 2022.
19. Giménez B, Özcan M, Martínez-Rus F, Pradíes G. Accuracy of a Digital Impression System Based on Active Triangulation Technology With Blue Light for Implants: Effect of Clinically Relevant Parameters. *Implant dentistry*. 2015;24(5):498-504.
20. Güth J-F, Edelhoff D, Schweiger J, Keul C. A new method for the evaluation of the accuracy of full-arch digital impressions in vitro. *Clinical oral investigations*. 2016;20(7):1487-1494. Published October 10, 2015.
21. Güth J-F, Keul C, Stimmelmayr M, Beuer F, Edelhoff D. Accuracy of digital models obtained by direct and indirect data capturing. *Clinical oral investigations*. 2013;17(4):1201-1208. Published July 31, 2012.

22. Güth J-F, Runkel C, Beuer F, Stimmelmayr M, Edelhoff D, Keul C. Accuracy of five intraoral scanners compared to indirect digitalization. *Clinical oral investigations*. 2017;21(5):1445-1455. Published July 12, 2016.
23. Hazeveld A, Huddleston Slater JJR, Ren Y. Accuracy and reproducibility of dental replica models reconstructed by different rapid prototyping techniques. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics : official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics*. 2014;145(1):108-115.
24. Hellmuth T. Neuere Methoden in der konfokalen Mikroskopie. *Phys. Bl.* 1993;49(6):489-491.
25. Hmaidouch R, Neumann P, Mueller W-D. Influence of preparation form, luting space setting and cement type on the marginal and internal fit of CAD/CAM crown copings. *International journal of computerized dentistry*. 2011;14(3):219-226.
26. InnovMetric Software Inc. *PolyWorks Broschüre*. https://www.duwe-3d.de/de/loesungen-produkte/produkte/polyworksinspector/downloads/. Accessed May 11, 2025.
27. Kamimura E, Tanaka S, Takaba M, Tachi K, Baba K. In vivo evaluation of inter-operator reproducibility of digital dental and conventional impression techniques. *PloS one*. 2017;12(6). Published June 21, 2017.
28. Kern M. Digitalisierung erweitert das Spektrum: Vollkeramik und CAD/CAM-Einsatz klinisch bewährt. *ZWR Das deutsche Zahnärzteblatt*. 2012;121(4):127-194.
29. Kim J, Park J-M, Kim M, Heo S-J, Im Shin H, Kim M. Comparison of experience curves between two 3-dimensional intraoral scanners. *The Journal of prosthetic dentistry*. 2016;116(2):221-230. Published April 7, 2016.
30. Klein Kondrad, Fritz P, Anderson, Anders (Erfinder). *Patent NR WO 2020/011483 A1, Optical Measuring method and optical measuring apparatus*. 2020. Updated January 16, 2020.
31. Logozzo S, Zanetti EM, Franceschini G, Kilpelä A, Mäkynen A. Recent advances in dental optics – Part I: 3D intraoral scanners for restorative dentistry. *Optics and Lasers in Engineering*. 2014;54:203-221.
32. Luthardt RG, Kühmstedt P, Walter MH. A new method for the computer-aided evaluation of three-dimensional changes in gypsum materials. *Dental materials : official publication of the Academy of Dental Materials*. 2003;19(1):19-24.
33. Luthardt RG, Loos R, Quaas S. Accuracy of intraoral data acquisition in comparison to the conventional impression. *International journal of computerized dentistry*. 2005;8(4):283-294.

34. Marotti J, Broeckmann J, Chuembou Pekam F, Praça L, Radermacher K, Wolfart S. Impression of Subgingival Dental Preparation Can Be Taken with Ultrasound. *Ultrasound in medicine & biology*. 2019;45(2):558-567. Published November 16, 2018.
35. Medit. *T710 Datenblatt: New T-Series_16P_ENG_20.09.04*. https://info.medit.com/en/download-t-series-brochure-2020. Accessed October 7, 2023.
36. Mehl A, Reich S, Beuer F, Güth J-F. Accuracy, trueness, and precision - a guideline for the evaluation of these basic values in digital dentistry. *International journal of computerized dentistry*. 2021;24(4):341-352.
37. Mörmann WH. The evolution of the CEREC system. *Journal of the American Dental Association (1939)*. 2006;137 Suppl:7S-13S.
38. Muallah J, Wesemann C, Nowak R, et al. Accuracy of full-arch scans using intraoral and extraoral scanners: an in vitro study using a new method of evaluation. *International journal of computerized dentistry*. 2017;20(2):151-164.
39. Osman RB, Alharbi NM. Influence of scan technology on the accuracy and speed of intraoral scanning systems for the edentulous maxilla: An in vitro study. *Journal of prosthodontics : official journal of the American College of Prosthodontists*. 2022. Published December 26, 2022.
40. Park Y, Kim J-H, Park J-K, Son S-A. Scanning accuracy of an intraoral scanner according to different inlay preparation designs. *BMC oral health*. 2023;23(1):515. Published July 24, 2023.
41. Physikalisches-Technische Bundesanstalt Braunschweig und Berlin. *Prüfbericht; Auswertesoftware nach Gauß für Koordinatenmessgeräte*. 2021. Updated August 7, 2021.
42. Pimenta MA, Frasca LC, Lopes R, Rivaldo E. Evaluation of marginal and internal fit of ceramic and metallic crown copings using x-ray microtomography (micro-CT) technology. *The Journal of prosthetic dentistry*. 2015;114(2):223-228. Published April 14, 2015.
43. Podhorsky A, Wöstmann B. Präparation zur Aufnahme von Vollkronen. *Zahnmedizin up2date*. 2016;10(02):155-169.
44. Quintessence Publishing. Digitale und analoge Abformung für eine starke Implantatprothetik. https://www.quintessence-publishing.com/deu/de/news/zahnmedizin/-/digitale-und-analoge-abformungen-fuer-eine-starke-implantatprothetik. Accessed February 5, 2025.
45. Rajan N. TRIOS 5 Intraoral Scanner an Excellent Choice for Clinicians of Any Level. *Compendium of Continuing Education in Dentistry*. 2023;44(7):418.
46. Rehmann P, Sichwardt V, Wöstmann B. Intraoral Scanning Systems: Need for Maintenance. *The International journal of prosthodontics*. 2017;30(1):27-29.

47. Reich S, Vollborn T, Wolfart S. Die optische intraorale Abformung - vier Systeme im Überblick. *Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift*. 2012:177-189.
48. Resende CCD, Barbosa TAQ, Moura GF, et al. Influence of operator experience, scanner type, and scan size on 3D scans. *The Journal of prosthetic dentistry*. 2021;125(2):294-299. Published February 27, 2020.
49. Revilla-León M. Intraoral scanners: A necessity not a luxury. *Journal of prosthodontics : official journal of the American College of Prosthodontists*. 2023;32(S2):113. Published August 29, 2023.
50. Revilla-León M, Kois DE, Kois JC. A guide for maximizing the accuracy of intraoral digital scans. Part 1: Operator factors. *Journal of esthetic and restorative dentistry : official publication of the American Academy of Esthetic Dentistry … [et al.]*. 2023;35(1):230-240. Published December 7, 2022.
51. Richert R, Goujat A, Venet L, et al. Intraoral Scanner Technologies: A Review to Make a Successful Impression. *Journal of healthcare engineering*. 2017. Published September 5, 2017. Accessed September 26, 2023.
52. Röding M. Best-Fit in der Oberflächenmesstechnik. https://www.ingenieur.de/fachmedien/vdi-z/qualitaetssicherung/best-fit-in-der-oberflaechenmesstechnik/#:~:text=Der%20Begriff%20Best%20Fit%20geht,die%20kleinstm%C3%B6gliche%20Abweichung%20zu%20erreichen. Accessed August 4, 2024.
53. Rosentritt M, Ilie N, Lohbauer U. *Werkstoffkunde in der Zahnmedizin*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2018.
54. Schlenz MA, Michel K, Wegner K, Schmidt A, Rehmann P, Wöstmann B. Undergraduate dental students' perspective on the implementation of digital dentistry in the preclinical curriculum: a questionnaire survey. *BMC oral health*. 2020;20(1):78. Published March 18, 2020.
55. Schlenz MA, Vogler JAH, Schmidt A, Rehmann P, Wöstmann B. Chairside measurement of the marginal and internal fit of crowns: a new intraoral scan-based approach. *Clinical oral investigations*. 2020;24(7):2459-2468. Published October 31, 2019.
56. Schmidt A, Klussmann L, Wöstmann B, Schlenz MA. Accuracy of Digital and Conventional Full-Arch Impressions in Patients: An Update. *Journal of clinical medicine*. 2020;9(3). Published March 4, 2020.
57. Schmidt-Park H, Brauer HU. Gingivaretraktion mit der Doppelfadentechnik – Schritt für Schritt. *Zahnmedizin up2date*. 2024;18(03):205-208.
58. Shely A, Lugassy D, Rosner O, et al. The Influence of Laboratory Scanner versus Intra-Oral Scanner on Determining Axes and Distances between Three Implants in a Straight Line by

Using Two Different Intraoral Scan Bodies: A Pilot In Vitro Study. *Journal of clinical medicine*. 2023;12(20). Published October 20, 2023.

59. Skramstad MJ. Welcome to Cerec Primescan AC. *International journal of computerized dentistry*. 2019;22(1):69-78.
60. Spintzyk S. Additive Fertigungsverfahren. https://www.ztm-aktuell.de/technik/werkstoffe/story/additive-fertigungsverfahren__6346.html. Accessed September 24, 2023.
61. Stefanelli LV, Franchina A, Pranno A, et al. Use of Intraoral Scanners for Full Dental Arches: Could Different Strategies or Overlapping Software Affect Accuracy? *International journal of environmental research and public health*. 2021;(19). Published September 22, 2021.
62. Strauß P, Mosch R, Sandmaier, M, von See, C. Intraoral scanner accuracy: The influence of manual movement? *Journal of Osseointegration*. 2021:285-288. Accessed March 24, 2024.
63. Strub JR, Kern M, Türp JC, et al. *Curriculum Prothetik: Band II.* 4th ed.: Quintessenz Verlag; 2011.
64. Vag J, Stevens CD, Badahman MH, et al. Trueness and precision of complete arch dentate digital models produced by intraoral and desktop scanners: An ex-vivo study. *Journal of dentistry*. 2023. Published October 26, 2023.
65. Wöstmann B. Die Abformung als Grundlage für eine langfristige prothetische Versorgung. *Zahnärztliche Mitteilung*. 2005.
66. Wöstmann B. Abformung im Wandel der Zeit. *ZWR*. 2016;125(07/08):366-371.
67. Wöstmann B, Rehmann P, Wald A. Weichgewebsmanagement bei der Abformung präparierter Zähne - Teil 1. https://www.zmk-aktuell.de/fachgebiete/zahnerhaltung/story/weichgewebsmanagement-bei-der-abformung-praeparierter-zaehne---teil-1__477.html. Accessed January 21, 2024.
68. Wöstmann B, Rehmann P, Wald A. Weichgewebsmanagement bei der Abformung präparierter Zähne – Teil 2. https://www.zmk-aktuell.de/fachgebiete/implantologie/story/weichgewebsmanagement-bei-der-abformung-praeparierter-zaehne--teil-2__3987.html. Accessed January 21, 2024.
69. Zaruba M, Mehl A. Chairside systems: a current review. *International journal of computerized dentistry*. 2017;20(2):123-149.
70. Zimmermann M. Digitale Abformung mit dem Intraoralscanner. https://www.zmk-aktuell.de/fachgebiete/digitale-praxis/story/die-digitale-abformung-mit-dem-intraoralscanner-mehr-als-nur-eine-abformung__3826.html. Accessed September 24, 2023.

71. Zimmermann M. Auftakt zum digitalen Workflow in Praxis und Labor. https://digital-dental-magazin.de/2017-ddm5/40/#zoom=z. Accessed September 26, 2023.
72. Zimmermann M. Autakt zum digitalen Workflow in Praxis und Labor. *digital-dental-magazin*. 2017:40-48.

9 Lebenslauf

10 Verzeichnis der akademischen Lehrer/-innen

Meine akademischen Lehrenden an der Philipps-Universität Marburg waren folgende Damen/Herren (in alphabetischer Reihenfolge ohne akademischen Grad): Althaus, Arweiler, Auschill, Bette, Born, Cetin, Dudek, Feuser, Fischer, Frankenberger, Gente, Gloerfeld, Huster, Jablonski-Momeni, Kinscherf, Koch, Korbmacher-Steiner, Lill, Lotzmann, Mengel, Milani, Moll, Neff, Neumüller, Nonnenmacher, Pieper, Roggendorf, Schramm, Schütz, Weber, Weihe, Westermann, Winter, Wrocklage, Ziebart

11 Danksagung

Mein besonderer Dank gilt *Prof. Dr. Ulrich Lotzmann* für die Überlassung des Promotionsthemas und seine Unterstützung bei der Durchführung der Studie.

Danken möchte ich auch der Firma *Duwe-3d AG* und *InnovMetric Software Inc.*. Nur durch die großzügige Bereitstellung der Software *PolyWorks® Meteorology Suite 2021* war es mir möglich, diese in-vitro Studie durchzuführen.

Meinen Eltern *Brigitte* und *Kurt* und meinem Bruder *Marc* danke ich ganz herzlich für ihre fortwährende Unterstützung. Sie haben mir stets den Rücken gestärkt, mich in allen Phasen des Studiums motiviert und mir geholfen, an mich selbst zu glauben. Ich bin unendlich dankbar für all die Opfer, die sie gebracht haben, um mir diese Laufbahn zu ermöglichen und für die Werte, die sie mir mit auf den Weg gegeben haben.

Ein besonderer Dank gilt auch meiner Partnerin *Pamela*. Deine Liebe, dein Verständnis und deine Geduld haben mir den nötigen Rückhalt gegeben, auch in den schwierigen Momenten weiterzumachen.

12 Ehrenwörtliche Erklärung

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die dem Fachbereich Medizin Marburg zur Promotionsprüfung eingereichte Arbeit mit dem Titel „In-vitro Untersuchungen zum Einfluss der subgingivalen Lage präparierter Zahnflächen auf deren korrekte Erfassung mit Hilfe intraoraler Scanner“ in der Poliklinik für Orofaziale Prothetik und Funktionslehre unter Leitung von Prof. Dr. Ulrich Lotzmann ohne sonstige Hilfe selbst durchgeführt und bei der Abfassung der Arbeit keine anderen als die in der Dissertation aufgeführten Hilfsmittel benutzt habe. Ich habe bisher an keinem in- oder ausländischen Medizinischen Fachbereich ein Gesuch um Zulassung zur Promotion eingereicht, noch die vorliegende oder eine andere Arbeit als Dissertation vorgelegt.

Ich versichere, dass ich sämtliche wörtlichen oder sinngemäßen Übernahmen und Zitate kenntlich gemacht habe.

Mit dem Einsatz von Software zur Erkennung von Plagiaten bin ich einverstanden.

Vorliegende Arbeit wurde (oder wird) in folgenden Publikationsorganen ... veröffentlicht. ***1**

Ort, Datum, Unterschrift Doktorand

„Die Hinweise zur Erkennung von Plagiaten habe ich zur Kenntnis genommen.“***2**

Ort, Datum, Unterschrift Referent

***1** Hier sind Publikationen/Abstracts aufzuführen, die aus der Dissertation entstanden sind bzw. eingereicht oder angenommen wurden. Für jedes DIN A4 Exemplar ist eine Kopie beizufügen.

***2** Die „Hinweise zur Erkennung von Plagiaten“ sind auf unserer Homepage hinterlegt.