

Diplomarbeit

**Genauigkeit konventioneller und digitaler Vollkieferabformungen,
durchgeführt von Zahnmedizinistudierenden**

eingereicht von

Karim Chalhoub

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor(in) der Zahnmedizin

(Dr.(in) med. dent.)

an der

Medizinischen Universität Graz

ausgeführt an der

Universitätsklinik für Zahnmedizin und Mundgesundheit

ausgeführt an der

**Klinischen Abteilung für Zahnerhaltung, Parodontologie und
Zahnersatzkunde**

unter der Anleitung von

Univ.-Prof. Dr. med. dent. Juliana Marotti Großhausen, MSc, PhD

Univ. ZÄ Mag. Ingrida Mischitz

Graz, 22. Mai 2026

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe, andere als die angegebenen Quellen nicht verwendet habe und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Des Weiteren erkläre ich hiermit, dass, sofern bei der Erstellung dieser Arbeit Künstliche Intelligenz (KI) Werkzeuge zur Generierung und/oder Korrektur bestimmter Textpassagen verwendet wurden, dieser Einsatz unter Einhaltung ethischer Grundsätze, akademischer Integrität und den Vorgaben meiner Universität erfolgte, sowie in Folge dies transparent gemacht und in angemessener Weise gekennzeichnet wurde.

Graz, 22. Mai 2026

Karim Chalhoub eh.

Danksagungen

Ich möchte mich herzlich bei allen bedanken, die mich während der Erstellung dieser Diplomarbeit unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt Frau Univ.-Prof. Juliana Marotti Großhausen für ihre hervorragende Betreuung, ihre wertvolle Unterstützung sowie für ihre freundliche Bereitschaft, diese Diplomarbeit zu betreuen.

Ebenso danke ich Frau Mag. Ingrida Mischitz für ihre fachliche Begleitung, ihre sorgfältige Betreuung in jedem einzelnen Schritt sowie für ihre Geduld, ihre große Hilfsbereitschaft und die Zeit, die sie mir gewidmet hat.

Mein Dank gilt außerdem den Zahntechniker*innen Brigitte Resch, Laura Kreutzer, Stefan Huber, Christian Fuik Maurer und Philipp Tepesch für ihre wertvolle Unterstützung beim Ausgießen der Modelle sowie beim Einscannen der Gipsmodelle. Ihre fachliche Kompetenz und ihre sorgfältige Arbeitsweise haben wesentlich zum Gelingen dieser Studie beigetragen.

Darüber hinaus danke ich Frau Dipl.-Ing. Irene Mischak für ihre Unterstützung bei der statistischen Auswertung sowie für ihre stets große Hilfsbereitschaft.

Von Herzen danke ich meinen Eltern und meinen Geschwistern für ihre kontinuierliche Unterstützung, und ihre Motivation, die mich während meines Studiums und bei der Erstellung dieser Diplomarbeit stets begleitet haben.

Zusammenfassung

Ziel: Ziel dieser Studie war es, die Richtigkeit (Trueness) digitaler Vollkieferabformungen mittels Intraoralscanner im Vergleich zu digitalisierten Gipsmodellen aus konventionellen Alginatabformungen zu untersuchen, die von Zahnmedizinierenden im Rahmen ihrer Ausbildung angefertigt wurden.

Material und Methoden: Die Untersuchung erfolgte im Rahmen eines vergleichenden retrospektiven in-vitro Studiendesigns. Studierende der Medizinischen Universität Graz fertigten im Kurs „Funktionsanalyse und -therapie“ im Jahr 2025 und 2026 sowohl konventionelle Alginatabformungen als auch digitale intraorale Scans (TRIOS 5, 3Shape) an. Insgesamt wurden 50 Kiefermodelle (25 Oberkiefer, 25 Unterkiefer) analysiert. Die aus den Alginatabformungen hergestellten Gipsmodelle wurden mit einem Laborscanner (D2000, 3Shape) digitalisiert und als Referenzdatensätze definiert. Die STL-Dateien wurden mittels CloudCompare unter Anwendung einer standardisierten Best-Fit-Registrierung (ICP) überlagert und analysiert. Durchgeführt wurde die quantitative Analyse der Oberflächenabweichung, dargestellt durch mittlere Oberflächenabweichung (systematischer Bias) und Root Mean Square (RMS) als globales Maß der Oberflächenabweichung zur Beurteilung der Richtigkeit.

Die statistische Analyse erfolgte mittels parametrischer und nichtparametrischer Tests bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$.

Ergebnisse: Die mittlere Oberflächenabweichung betrug $-1,4 \mu\text{m}$ und zeigte keinen statistisch signifikanten Unterschied zum Referenzwert von $0 \mu\text{m}$ ($p > 0,05$), sodass kein systematischer Bias nachgewiesen werden konnte.

Die mittleren RMS-Werte lagen bei $110,9 \mu\text{m}$ im Oberkiefer und $109,9 \mu\text{m}$ im Unterkiefer. Es bestand kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen Ober- und Unterkiefer ($p > 0,05$).

Beide Nullhypothesen konnten nicht verworfen werden.

Konklusion: Digitale Vollkieferabformungen, die unter Ausbildungsbedingungen durchgeführt werden, weisen eine vergleichbare Richtigkeit wie konventionelle Abformverfahren auf.

Schlagworte: Abformung, Intraoralscanner (IOS), Richtigkeit, CAD/CAM

Abstract

Aim: The aim of this study was to evaluate the trueness of digital full-arch impressions obtained using an intraoral scanner compared with digitized gypsum models derived from conventional alginate impressions performed by dental students as part of their training.

Materials and Methods: The investigation was conducted within the framework of a comparative retrospective in-vitro study design. Students from the Medical University of Graz performed both conventional alginate impressions and digital intraoral scans (TRIOS 5, 3Shape) during the course “Functional Analysis and Therapy” in the years 2025 and 2026. A total of 50 dental arch models (25 maxillary and 25 mandibular) were analyzed. The gypsum models fabricated from the alginate impressions were digitized using a laboratory scanner (D2000, 3Shape) and defined as reference datasets. The STL files were superimposed and analyzed using CloudCompare software with a standardized best-fit registration (ICP). A quantitative analysis of surface deviation was performed using mean deviation (systematic bias) and root mean square (RMS) as a global measure of surface deviation for the assessment of trueness.

Statistical analysis was performed using both parametric and non-parametric tests at a significance level of $\alpha = 0.05$.

Results: The mean surface deviation was $-1.4 \mu\text{m}$ and showed no statistically significant difference from the reference value of $0 \mu\text{m}$ ($p > 0.05$), indicating that no systematic bias could be detected.

The mean RMS values were $110.9 \mu\text{m}$ for the maxilla and $109.9 \mu\text{m}$ for the mandible. No statistically significant difference was found between the maxilla and mandible ($p > 0.05$).

Both null hypotheses could not be rejected.

Conclusion: Digital full-arch impressions performed under training conditions exhibit trueness comparable to conventional impression techniques.

Keywords: Dental impression, intraoral scanner (IOS), trueness, CAD/CAM.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen	1
Abbildungsverzeichnis	2
Tabellenverzeichnis	3
Einleitung	4
Ziel	6
Nullhypothesen.....	6
Material und Methoden	7
Teilnehmende und Einschlusskriterien.....	7
Ethikaspekte	7
Einschlusskriterien	8
Ausschlusskriterien	8
Klinische Verfahren.....	9
Analyse der Genauigkeit	18
Statistische Auswertung	20
Ergebnisse	22
Inferenzstatistische Analyse:	24
Systematischer Bias (Mean Deviation)	24
Richtigkeit - Vergleich Oberkiefer vs. Unterkiefer.....	24
Hypothesenprüfung	24
Diskussion	26
Interpretation der Hauptergebnisse.....	26
Einordnung in die aktuelle Literatur und methodische Aspekte.....	26
Vergleich zwischen Oberkiefer und Unterkiefer	28
Einfluss von Lernkurve, Methodik und Analyseparametern	28
Klinische Relevanz und Bedeutung für Ausbildung.....	31
Bedeutung für Ausbildung und Akzeptanz digitaler Technologien.....	32
Einschränkungen der Studie.....	32
Empfehlungen für zukünftige Forschung.....	33
Schlussfolgerungen	34
Literaturverzeichnis.....	35
Hilfsmittelverzeichnis	41
Verwendung generativer KI-Anwendungen	42
Anhang	42

Abkürzungen

- CAD/CAM – Computer-Aided Design / Computer-Aided Manufacturing
- DSGVO / GDPR – Datenschutz-Grundverordnung
- ICP – Iterative Closest Point
- ICH-GCP – International Council for Harmonisation of Thechnical Requirements of Pharmaceuticals for Human Use – Good Clinical Practice
- IOS – Intraoral Scanner
- ISO – International Organization for Standardization
- MD – Mean Deviation (mittlere Abweichung)
- PVS – Polyvinylsiloxan
- RMS – Quadratischer Mittelwert der Abweichungen (Root Mean Square)
- RMSE – Root Mean Square Error
- SD – Standard Deviation (Standard Abweichung)
- STL – Standard Tessellation Language

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Alginatabformmaterial	10
Abbildung 2: Laborscanner D2000 (3Shape)	10
Abbildung 3: Intraoralscanner TRIOS 5 (3Shape)	11
Abbildung 4: Segmentiertes 3D-Modell eines Zahnbogens mit Gingivasaum (3–5 mm)	13
Abbildung 5: Referenzpunkte zur initialen Ausrichtung der 3D-Modelle	14
Abbildung 6: Erneut segmentiertes 3D-Modell eines Zahnbogens mit Gingivasaum (0,5–1 mm)	15
Abbildung 7: Farbcodierte Oberflächenabweichung (C2M signed distances) eines repräsentativen Oberkiefer-Modells nach ICP-Registrierung.....	16
Abbildung 8: Farbcodierte Oberflächenabweichung (C2M signed distances) eines repräsentativen Unterkiefer-Modells nach ICP-Registrierung.....	17
Abbildung 9: Histogramm der C2M signed distances eines repräsentativen Einzelfalls.....	18
Abbildung 10: Boxplot der Oberflächenabweichung (μm).....	25
Abbildung 11: Boxplot der RMS-Werte (μm) für Ober- und Unterkiefer.....	26

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Normalverteilungstests.	21
Tabelle 2: Individuelle Werte (MD, SD und RMS).....	22
Tabelle 3: Deskriptive Statistik der MD (μm)	25
Tabelle 4: RMS-Werte (μm) für Ober- und Unterkiefer.	25

Einleitung

Das computergestützte Design- und Fertigungssystem (CAD/CAM) im Bereich der Zahnmedizin hat sich über Jahrzehnte hinweg schrittweise weiterentwickelt (1).

Die Einführung digitaler Workflows und intraoraler Scans hat zu einem tiefgreifenden Wandel in der klinischen Praxis geführt. Dank der Fortschritte in digitalen Systemen konnte die Qualität der Patientenversorgung verbessert und die Nutzung von digitalen Lösungen, insbesondere bei Planung und Fertigung, verstärkt werden (1–3).

Die Ursprünge der dentalen CAD/CAM-Technologie reichen bis in die 1980er Jahre zurück. Ziel dieser Entwicklungen war es unter anderem, prothetische Restaurationen effizienter herzustellen. In diesem Zusammenhang wurden intraorale Scansysteme eingeführt, die eine digitale Erfassung der Mundsituation ohne konventionelle Abformmaterialien ermöglichen (4).

¹Digitale Abformungen und intraorale Scanner (IOS) tragen zur Effizienzsteigerung klinischer Abläufe bei und verbessern gleichzeitig den Komfort der Patient*innen (5–7). Sie wurden als komfortabler im Vergleich zu traditionellen Abformmethoden bewertet, obwohl keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf Angst- oder Stressniveaus festgestellt wurden (8). Die Reduktion der klinischen Behandlungszeit und der Anzahl der Patiententermine trägt zur hohen Akzeptanz digitaler Systeme bei (9), Behandlungsprotokolle vereinfachen (10,11) und Risiken vermeiden, die mit konventionellen Abformungen verbunden sind, wie Erstickungsgefahr, Würgereiz und unangenehmer Geschmack (8,12). Darüber hinaus zeichnen sich digitale Abformungen durch ihre einfache Reproduzierbarkeit und die Möglichkeit zur direkten Übermittlung an zahntechnische Labore aus, was Zeit und Kosten spart und die Genauigkeit der Ergebnisse erhöht (9,13). Dies erleichtert auch spätere Anpassungen. Der Einsatz digitaler Technologien hat die Kommunikation zwischen Zahntechniker*innen verbessert, die Akzeptanz der Patient*innen für Behandlungspläne gesteigert sowie Zeit- und Materialressourcen gespart (5,14–16).

Letztlich führten sie zu vorhersehbareren Ergebnissen und ermöglichen durch die digitale Visualisierung eine verbesserte Darstellung des geplanten Behandlungsergebnisses (17), was sich insgesamt positiv auf die Wahrnehmung und Akzeptanz der Behandlung auswirkte (7,8,18). Trotz der erheblichen Vorteile der CAD/CAM-Technologien sind diese Systeme nicht

¹ Teile der sprachlichen Überarbeitung und stilistischen Optimierung dieser Arbeit wurden mit Unterstützung von ChatGPT (OpenAI, GPT-5) durchgeführt. Sämtliche Inhalte wurden vom Autor eigenständig überprüft und wissenschaftlich verantwortet.

ohne Einschränkungen. Die hohen Anfangsinvestitionen für Geräte wie Intraoralscanner stellen für viele zahnärztliche Praxen eine wirtschaftliche Hürde dar, und der effektive Einsatz digitaler Systeme erfordert eine gewisse Einarbeitungszeit sowie praktische Erfahrung, um die zugehörige Lernkurve zu überwinden (19). Auf klinischer Ebene zeigen sich weitere Herausforderungen, etwa die erschwerte Abformung bei übermäßiger Feuchtigkeit im Mundraum oder die begrenzte Genauigkeit bei der Erfassung tiefliegender intraoraler Strukturen (20). Zudem erfordern physische Gipsmodelle eine räumliche Lagerung, während digitale Datensätze dauerhaft und platzsparend gespeichert werden können (21). Studien zeigen außerdem, dass sich die Genauigkeit traditioneller Abformungen mit der Zeit verringert, bedingt durch Materialdeformationen, Gipsexpansion und Veränderungen während des Transports ins Dentallabor (22).

Die Genauigkeit der digitalen Abformung ist ein entscheidender Faktor für den Erfolg. Digitale Abformungen können entweder direkt mittels intraoraler Scanner oder indirekt durch Laborscanner gewonnen werden (23). Bei der IOS-Technologie sowie bei Laborscannern wird ein Lichtstrahl (Laser oder strukturiertes Licht) auf die Zahnoberfläche projiziert. Das reflektierte Licht wird von Kameras erfasst und mittels Software in Punktwolken und in ein 3D-Modell umgewandelt (24). Sowohl intraorale Scanner als auch Laborscanner erzeugen ein 3D virtuelles Modell, das direkt in CAD/CAM-Systemen verwendet wird (25). Das gemeinsame Ziel besteht darin, ein präzises digitales Abbild der Mundsituation zu erstellen, was eine Bewertung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit dieser Systeme erforderlich macht (26). Die rasante technologische Entwicklung digitaler Systeme verdeutlicht ihr erhebliches Potenzial zur Steigerung von Qualität, Effizienz und klinischer Vorhersagbarkeit insbesondere im Bereich der restaurativen und prothetischen Zahnmedizin (27). Vor diesem Hintergrund wird die Integration digitaler Technologien in die Curricula zahnmedizinischer Fakultäten immer wichtiger (3,28). Eine Studie von Zitzmann et al. (2017) ergab, dass die Mehrheit der Zahnmedizinistierenden intraorale Scanner als einfacher als herkömmliche Methoden empfand, auch Studierende ohne klinische Erfahrung konnten sie effektiv nutzen (28). Ebenso zeigte eine Umfrage von Sabalic und Schoener (2017) eine positive Einstellung gegenüber Virtual-Reality-Technologien in der Zahnmedizin, was die Empfehlung stärkt, solche Technologien sowohl in die universitäre als auch in die kontinuierliche Ausbildung zu integrieren (29). Angesichts der zunehmenden Vertrautheit von Studierenden mit digitalen Technologien ist zu erwarten, dass sie diese Methoden bevorzugen und effektiv einsetzen können (28). Die Genauigkeit ist ein zentrales Qualitätskriterium und wird nach ISO 5725-1 durch Richtigkeit (Trueness) und Präzision (Precision) beschrieben (30). Zahlreiche Studien

haben konventionelle Gipsmodelle aus Alginatabformungen mit digitalen Modellen verglichen, die mithilfe intraoraler Scanner erstellt wurden (31,32). Die Abformung erfolgte entweder mit Alginat unter standardisierten Misch- und Abbindeprotokollen oder digital mit IOS nach Herstellerangaben. Anschließend wurden die entstandenen Gips- und STL-Modelle digitalisiert und mithilfe 3D-Analysesoftware (z. B. CloudCompare, GOM Inspect®) hinsichtlich ihrer Richtigkeit und Präzision untersucht (31,32).

Ziel

Ziel dieser Studie war es, die Richtigkeit von Intraoralscans im Vergleich zu digitalisierten Gipsmodellen des Ober- und Unterkiefers zu untersuchen, die von Zahnmedizinstudierenden der Medizinischen Universität Graz im Rahmen des Kurses „Funktionsanalyse und -therapie“ in Jahren 2025 und 2026 erstellt wurden.

Nullhypothesen

1. Es gibt keinen signifikanten Unterschied in der mittleren Oberflächenabweichung (Richtigkeit) zwischen den Intraoralscans und den digitalisierten Gipsmodellen, die von Studierenden in der Ausbildung erstellt worden sind.
2. Es gibt keinen signifikanten Unterschied in RMS-Werte als Maß der Richtigkeit zwischen Oberkiefer- und Unterkiefermodellen.

Material und Methoden

Die Untersuchung erfolgte im Rahmen eines vergleichenden retrospektiven In-vitro-Studiendesigns, in dem zwei Abformtechniken für die Michigan-Schiene Herstellung gegenübergestellt werden: die digitale Abformung mittels Intraoralscanner Trios 5 (3SHAPE, Kopenhagen, Dänemark) und die konventionelle Abformung mit traditionellen Abformmaterialien (Alginat, CAVEX CREME, Cavex Holland BV)).

Die Studie wurde an der Medizinischen Universität Graz in der Abteilung für Zahnerhaltung, Parodontologie und Zahnersatzkunde durchgeführt im Rahmen des Moduls „Funktionsanalyse und -therapie“. Die Studierenden führten gegenseitig sowohl Alginat-Abformungen als auch intraoral digitale Abformungen durch.

Die Alginatabformungen wurden mit Gips gegossen und die Modelle wurden dann mit einem Laborscanner (D2000, 3Shape, Kopenhagen, Dänemark) zu STL-Dateien verarbeitet. Die STL-Dateien von IOS und Laborscans wurden mittels Open-Source-Software (CloudCompare, Version 2.13.2) analysiert und verglichen, wobei durch die Best-Fit-Alignment-Methode die Abweichungswerte berechnet wurden.

Teilnehmende und Einschlusskriterien

Ethikaspekte

Die Studie wurde gemäß den ethischen Grundsätzen der Deklaration von Helsinki und den Richtlinien der Good Clinical Practice (ICH-GCP) durchgeführt. Das vollständige Studienprotokoll wurde vor Studienbeginn von der Ethikkommission der Medizinischen Universität Graz geprüft und genehmigt (Ethikvotum Nr.: 1356, Ausstellungsdatum: 11.12.2025).

Alle Proband*innen wurden sowohl mündlich als auch schriftlich umfassend über Ziel, Ablauf sowie mögliche Risiken und Vorteile der Studie informiert. Die Teilnahme erfolgte freiwillig; ein Rücktritt war jederzeit ohne Angabe von Gründen und ohne Nachteile möglich.

Vor Beginn der Untersuchung wurde von allen Teilnehmenden eine schriftliche Einverständniserklärung (informed consent) eingeholt.

Der Datenschutz wurde gemäß der Datenschutz-Grundverordnung (DSGVO/GDPR) gewährleistet. Alle erhobenen Daten wurden anonymisiert verarbeitet und ausschließlich im Rahmen dieser Studie verwendet. Es wurden keine Namen dokumentiert, sodass keine Rückführung auf die Identität der Teilnehmenden möglich war. Die Durchführung der Studie beinhaltete kein Risiko für die Teilnehmenden, da die Daten im Rahmen der studentischen Ausbildung erhoben wurden. Nach der Digitalisierung erhielten die Teilnehmenden ihre Modelle zurück; diese wurden nicht weiter gelagert, und die digitalen Dateien blieben vollständig anonymisiert.

Da die Daten im Rahmen der studentischen Ausbildung erhoben wurden, war die Studie mit keiner zusätzlichen Belastung für die Teilnehmenden verbunden und konnte somit als ethisch unbedenklich eingestuft werden.

An dieser Studie nahmen dreißig (n=30) Proband*innen teil. Modelle und IOS-Datensätze wurden gemäß den unten aufgeführten Ein- und Ausschlusskriterien in die Analyse einbezogen oder ausgeschlossen.

Einschlusskriterien

- Vollständig durchgebrochene permanente Dentition mit natürlichen Zähnen in beiden Kiefern (mindestens vom zweiten rechten bis zum zweiten linken Molar).
- Keine laufende kieferorthopädische Behandlung (ausgenommen festsitzende Retainer).
- Gute Modellqualität: keine Beschädigungen: keine Risse, Abplatzungen, Frakturen, Ausbrüche an Kanten oder Höckern.

Ausschlusskriterien

- Das Vorliegen einer Lippen-Kiefer-Gaumenspalte oder anderer dentoalveolärer bzw. kraniofazialer Deformitäten hinsichtlich Form oder Größe.
- Ausgeprägte gingivale Rezessionen, umfangreiche koronale Substanzverluste, mechanische Abrasionen, Erosionen oder chemisch bedingte Defekte an den Zahnkronen.
- Sichtbare Konkrementen auf den Zähnen in IOS oder auf den Gipsmodellen.

Von den ursprünglich 30 Teilnehmenden wurden nach Anwendung der Ein- und Ausschlusskriterien 5 ausgeschlossen, sodass 25 Teilnehmende in die finale Analyse eingeschlossen wurden. Von jeder Person lagen Ober- und Unterkiefer-Scans und Modelle vor (insgesamt 50 Datensätze: 25 Oberkiefer, 25 Unterkiefer)

Klinische Verfahren

Die dentalen Modelle der Teilnehmenden wurden unter Anwendung von zwei unterschiedlichen Verfahren gewonnen:

1. Konventionelle Alginat Abformungen
2. Digitale intraorale Scans

Keine der teilnehmenden Personen verfügte über vorherige Erfahrung mit konventionellen oder digitalen Abformungen.

Jede teilnehmende Person wurde innerhalb einer Woche mit beiden Verfahren untersucht, um zeitabhängige Variablen und potenzielle Einflussfaktoren zu minimieren. Beim ersten Termin wurden die Alginatabformungen durchgeführt, beim zweiten Termin wurden die Intraoralscan (IOS) durchgeführt.

Konventionelle Abformungen

Nach der vorherigen theoretischen und praktischen Schulung wurden die konventionellen Abformungen gegenseitig durchgeführt. Unter Verwendung von Alginat (Cavex Cream, Cavex Holland BV) und Metalllöffeln gemäß den Herstellerangaben wurden 100 g Alginatpulver mit 215–220 ml Wasser bei Raumtemperatur (25 ± 2 °C) in einem Vakuummischgerät für 30 Sekunden angemischt, bevor die Masse auf den Abformlöffel aufgetragen wurde (Abbildung 1). Jede einzelne Abformung wurde von aufsichtführenden Expert*innen überprüft, um deren Genauigkeit und Konsistenz sicherzustellen.



Abbildung 1: Verwendetes Alginateabformmaterial (Cavex Cream, Cavex Holland BV) zur Herstellung der konventionellen Abformungen.

Die Abformungen wurden innerhalb von 30 Minuten nach der Entnahme mit Superhartgips Typ IV (Fujirock EP, GC) ausgegossen. Zur Herstellung der Gipsmischung wurden 300 g Gipspulver mit 60 ml Wasser ebenfalls in einem Vakuummischgerät für 30 Sekunden angemischt. Während des Ausgießens wurde ein Vibrationsgerät verwendet, um die Bildung von Lufteinschlüssen zu vermeiden. Nach 60 Minuten wurden die Gipsmodelle vorsichtig aus den Abformungen entnommen und überschüssige Ränder sorgfältig entfernt. Die Modelle wurden anschließend für 48 Stunden bei Raumtemperatur gelagert, bevor sie digitalisiert wurden. Die Digitalisierung der Modelle erfolgte mithilfe eines Laborscanners (D2000, 3Shape, Kopenhagen, Dänemark) (Abbildung 2). Laut Herstellerangaben und in Übereinstimmung mit der Norm ISO 12836 weist dieser Scanner eine Messgenauigkeit von 5 µm auf.



Abbildung 2: Laborscanner D2000 (3Shape, Kopenhagen, Dänemark) zur Digitalisierung der Gipsmodelle und Erstellung der Referenzdatensätze.

Digitale Abformungen

Im Rahmen des Kurses „Funktionsanalyse und –therapie“ erhielten alle Studierenden eine Schulung zur optimalen Handhabung des Intraoralscanners (IOS). Alle Scans wurden unter standardisierten klinischen Bedingungen sowie unter standardisierter Umgebungsbeleuchtung mit einer Tageslichtquelle durchgeführt. Während des Scanvorgangs wurde kein Wangen- oder Lippenspreizer verwendet. In allen Sitzungen wurde zudem eine einheitliche Beleuchtung gewährleistet, um konstante Aufnahmebedingungen sicherzustellen.

Die vollständigen digitalen Kiefermodelle wurden mithilfe des Intraoralscanners TRIOS 5 erfasst (Abbildung 3). Während sämtlicher Scans wurde eine standardisierte Scanstrategie angewendet, laut Herstellerangabe um eine höchstmögliche Genauigkeit und Reproduzierbarkeit sicherzustellen.



Abbildung 3: Intraoralscanner TRIOS 5 (3Shape, Kopenhagen, Dänemark), verwendet zur digitalen Abformung der Kiefermodelle.

Die Handhabung des IOS wurde von aufsichtführenden Expert*innen durchgehend kontrolliert, somit das vom Hersteller empfohlene Scanprotokoll gemäß den offiziellen Benutzerhandbüchern strikt eingehalten wurde.

Digitale Datenauswertung

Insgesamt wurden 100 STL-Dateien analysiert (n = 50 aus dem Intraoralscanner und n = 50 aus dem Laborscanner).

Alle Verarbeitungs- und Analyseschritte der STL-Dateien wurden von derselben Person (K.C.) durchgeführt, um die operatorabhängige Konsistenz sicherzustellen.

Das mittels eines hochpräzisen Laborscanners digitalisierte Gipsmodell wurde als Referenzmodell (Reference Model) definiert, während das mit einem IOS erfasste Modell als Vergleichsmodell (Testmodel) diente. Dieses Vorgehen galt für sämtliche in diesem Abschnitt beschriebenen Arbeitsschritte. In Anlehnung an das in ISO 12836 formulierte Prinzip zur Definition eines konventionellen wahren Wertes wurde der mittels eines unabhängigen Messverfahrens erzeugte Referenzdatensatz als konventioneller wahrer Wert (true value) zur Beurteilung der Genauigkeit der digitalen Datensätze herangezogen (33).

Segmentierung der 3D-Modelle

In der ersten Analysephase wurden die 3D digitalen Modelle einzeln standardisiert zugeschnitten. Hierzu wurde die Funktion „Segmentation (Polygonal Selection)“ in der Software CloudCompare verwendet. Die Modelle wurden so segmentiert, dass ausschließlich die vollständigen Zahnreihen unter Erhalt eines Gingivasaums von etwa 3–5 mm Höhe um die Zähne bestehen blieben (Abbildung 4). Ziel dieses Schrittes war es, die nachfolgenden Ausrichtungs- (Alignment) und Abweichungsanalysen (Deviation Analysis) auf stabile, harte Strukturen zu beschränken und die Einbeziehung von Weichgewebe oder geometrisch instabilen Bereichen zu vermeiden. Abschließend wurden die bearbeiteten Modelle erneut als separate STL-Dateien gespeichert.

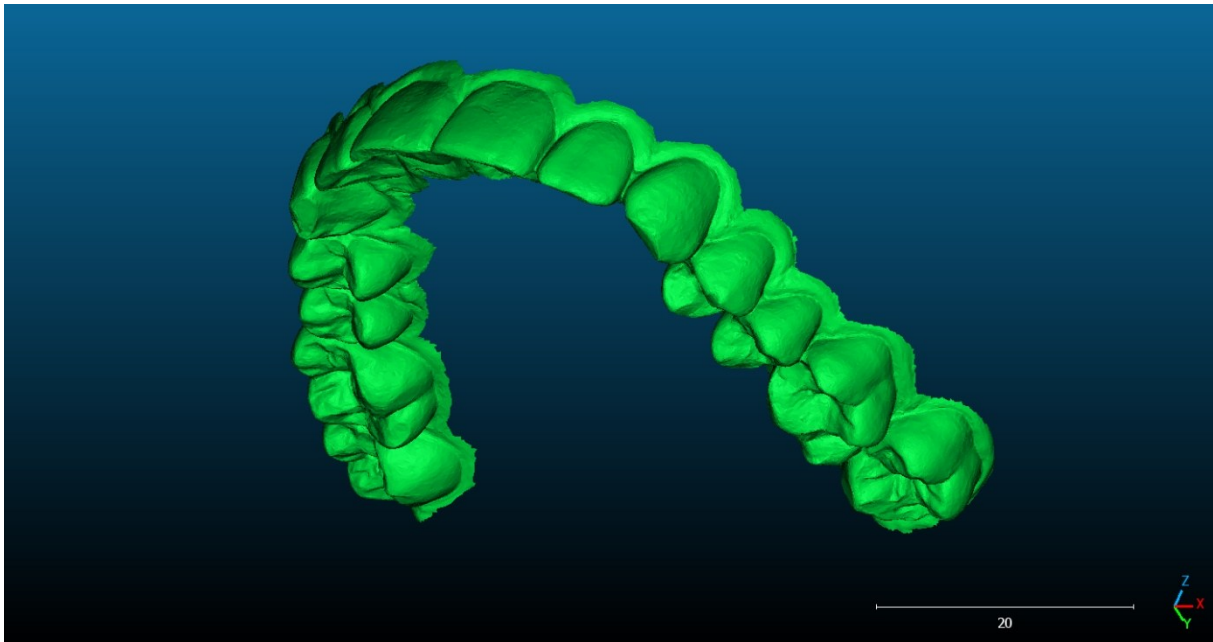


Abbildung 4: Segmentiertes 3D-Modell eines Zahnbogens nach Entfernung nicht relevanter Bereiche, beschränkt auf die Zahnreihe mit einem Gingivasaum von etwa 3–5 mm.

Ausrichtung und Abweichungsanalyse

In der zweiten Analysephase wurden für jeden Kiefer die beiden zuvor segmentierten STL-Dateien, das digitalisierte Modell der konventionellen Abformung sowie das Modell des Intraoralscans importiert. Zur Durchführung der initialen Ausrichtung (Initial Alignment) wurde das Werkzeug „Align (Point Pairs Picking)“ verwendet. Dieses Verfahren basiert auf der Definition korrespondierender Referenzpunkte (Point Pairs) auf beiden Modellen. Als Referenzpunkte wurden festgelegt: die vestibuläre Höckerspitze des ersten oberen Prämolaren rechts, die mesiopalatinalen Höckerspitzen der ersten oberen Molaren beidseits, die palatinale Höckerspitze des zweiten Prämolaren links sowie die mesiale Inzisalkante des oberen rechten zentralen Schneidezahns (Abbildung 5). Diese anatomischen Landmarken ermöglichten eine geometrische Grobausrichtung der Modelle und dienten der räumlichen Approximation der beiden Punktwolken. In der dritten Analysephase erfolgte die präzise Registrierung (Fine Registration) mittels der integrierten Funktion „Fine Registration (ICP)“. Die Iterative-Closest-Point-(ICP)-Methode gilt als eines der präzisesten Verfahren der dreidimensionalen Überlagerungsanalyse. Sie basiert auf einer iterativen Minimierung der Abstände zwischen korrespondierenden Punkten des Referenz- und Vergleichsmodells, bis der minimale mittlere Abweichungswert erreicht ist. Die ICP-Registrierung wurde unter Verwendung der Standardeinstellungen der Software durchgeführt.

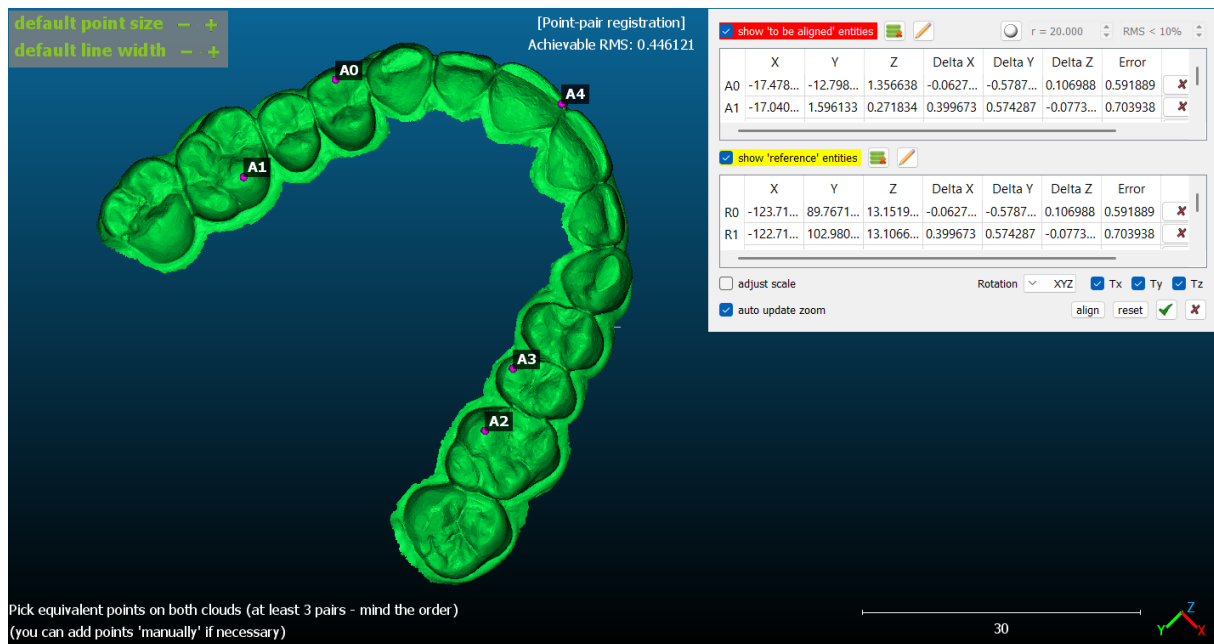


Abbildung 5: Auswahl korrespondierender Referenzpunkte (Point-Pair Picking) zur initialen Ausrichtung (Initial Alignment) der 3D-Modelle in CloudCompare.

Vereinheitlichung der Modellgrenzen

In der vierten Analysephase wurde zur Standardisierung der Modellgrenzen und Analysebereiche eine erneute Segmentierung beider Modelle gleichzeitig durchgeführt, unter Verwendung derselben Methode wie in Schritt 1. Die Modelle wurden so zugeschnitten, dass ausschließlich die vollständigen Zahnreihen mit einem Saum aus befestigter Gingiva von etwa 0,5–1 mm Höhe um die Zähne erhalten blieben (Abbildung 6). Anschließend wurden ausschließlich der beschnittenen Modelle in der Datenstruktur (DB Tree) beibehalten.

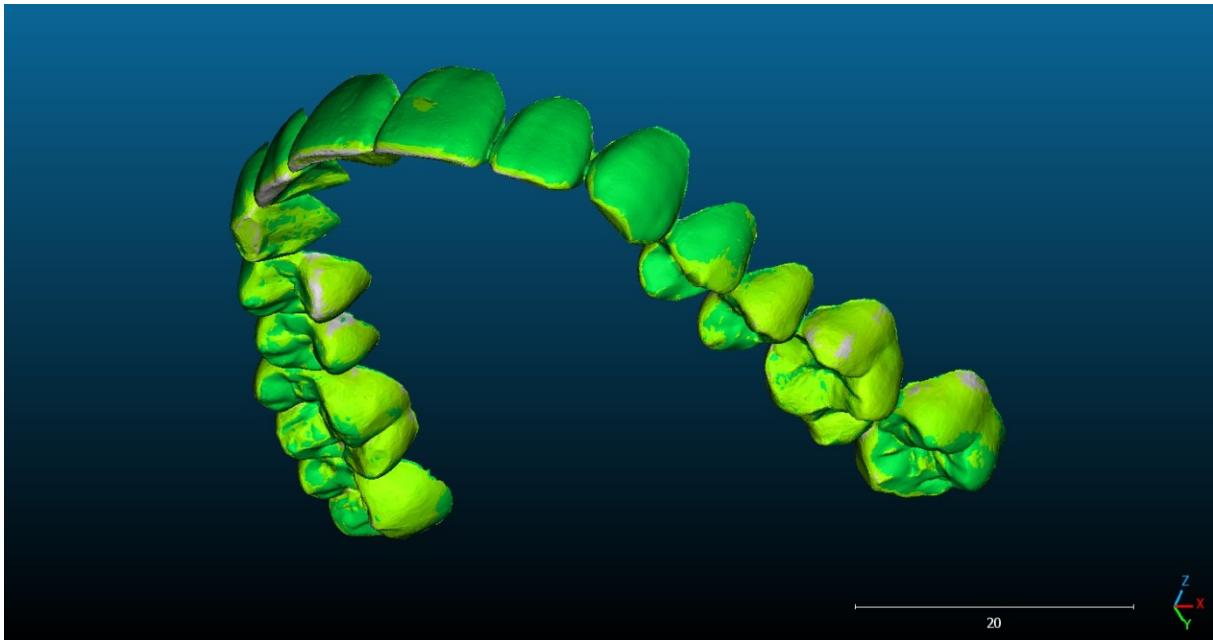


Abbildung 6: Erneut segmentiertes 3D-Modell eines Zahnbogens nach Vereinheitlichung der Modellgrenzen, beschränkt auf die Zahnreihe mit einem reduzierten Gingivasaum von etwa 0,5–1 mm.

Finale Feinausrichtung

In der fünften Analysephase wurde das Werkzeug „Fine Registration (ICP)“ erneut angewendet, diesmal jedoch mit präziseren Einstellungen, um die endgültige Feinausrichtung nach der Vereinheitlichung der Modellgrenzen weiter zu optimieren. Da die Distanzanalyse unmittelbar von der Qualität der Registrierung abhängt, wurde eine erhöhte Konvergenzgenauigkeit gewählt.

Der ICP-Algorithmus wurde mit angepassten Parametern ausgeführt, um eine weiter optimierte finale Registrierung sicherzustellen.

Die spezifischen Einstellungen lauteten wie folgt:

- Iterationszahl (Iterations): 50
- Konvergenzschwelle (Convergence Threshold): 1.0E-06
- Verwendung aller Punkte (Use All Points): aktiviert
- Skalenanpassung (Adjust Scale): deaktiviert (Off), um eine korrekte geometrische Vergleichbarkeit der Modelle ohne Maßstabsveränderung zu gewährleisten.

Diese Parameter ermöglichten eine präzisierte finale Ausrichtung (Alignment) zwischen Referenz- und Vergleichsmodell als Grundlage der anschließenden Abweichungsanalyse.

Analyse der Oberflächenabweichung

Die Oberflächenabweichungsanalyse (Surface Deviation Analysis) wurde unter Verwendung des integrierten Werkzeugs „Compute Cloud/Mesh Distance“ mit den Standardeinstellungen der Software durchgeführt. Nach der Berechnung der Distanzwerte wurden die Scalar Fields in Mikrometer (μm) umgerechnet, um eine einheitliche metrische Darstellung der Abweichungen zu gewährleisten. Zudem wurde eine symmetrische Farbskala (Symmetrical Color Scale) aktiviert, um positive und negative Abweichungen gleichermaßen um den Nullwert darzustellen.

Die Farbskala wurde mit einem festen Toleranzbereich von $\pm 100 \mu\text{m}$ definiert. Dunkelgrün kennzeichnete eine nahezu vollständige Übereinstimmung, hellgrün geringe Abweichungen innerhalb des Toleranzbereichs, hellblau negative Abweichungen und graue Bereiche Abweichungen außerhalb des definierten Bereichs (Abbildung 7 und 8). Die überwiegend grüne Darstellung der Zahnkronen weist auf eine insgesamt hohe Übereinstimmung zwischen Referenz- und Testmodell hin. Der Toleranzbereich von $\pm 100 \mu\text{m}$ wurde gewählt, um eine klare und anschauliche Darstellung der Oberflächenabweichungen zu ermöglichen.

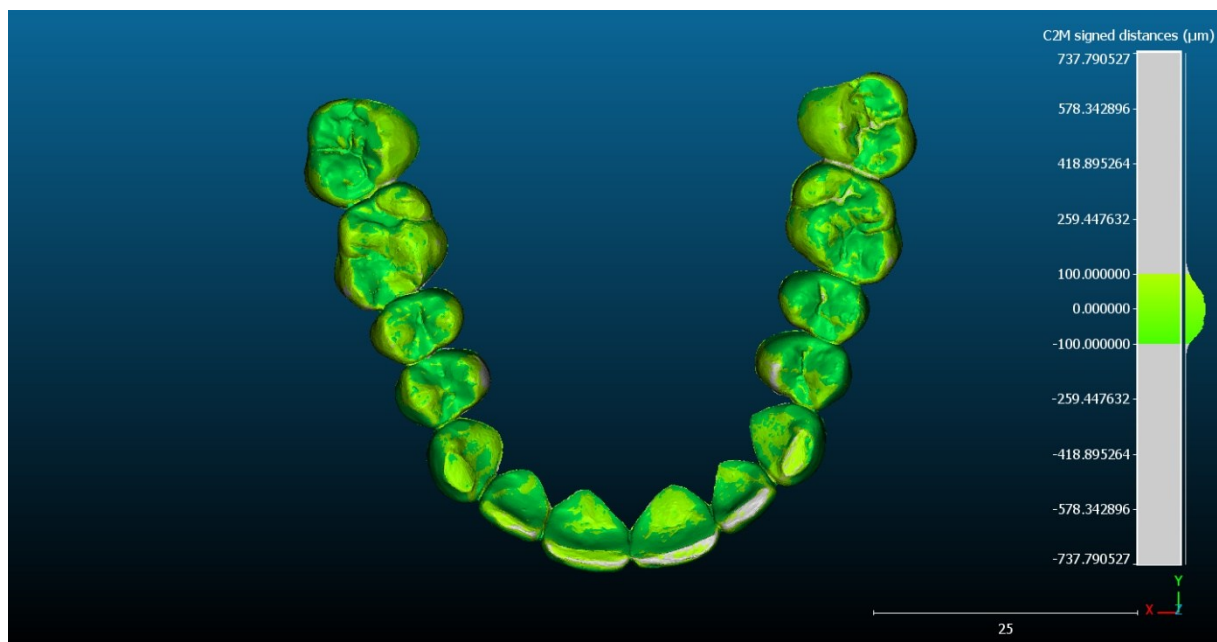


Abbildung 7: Farbcodierte Oberflächenabweichung (C2M signed distances) eines repräsentativen Oberkiefer-Modells nach ICP-Registrierung. Die überwiegend grüne

Darstellung innerhalb des definierten Toleranzbereichs von $\pm 100 \mu\text{m}$ weist auf eine hohe Übereinstimmung zwischen Referenz- und Testmodell hin.

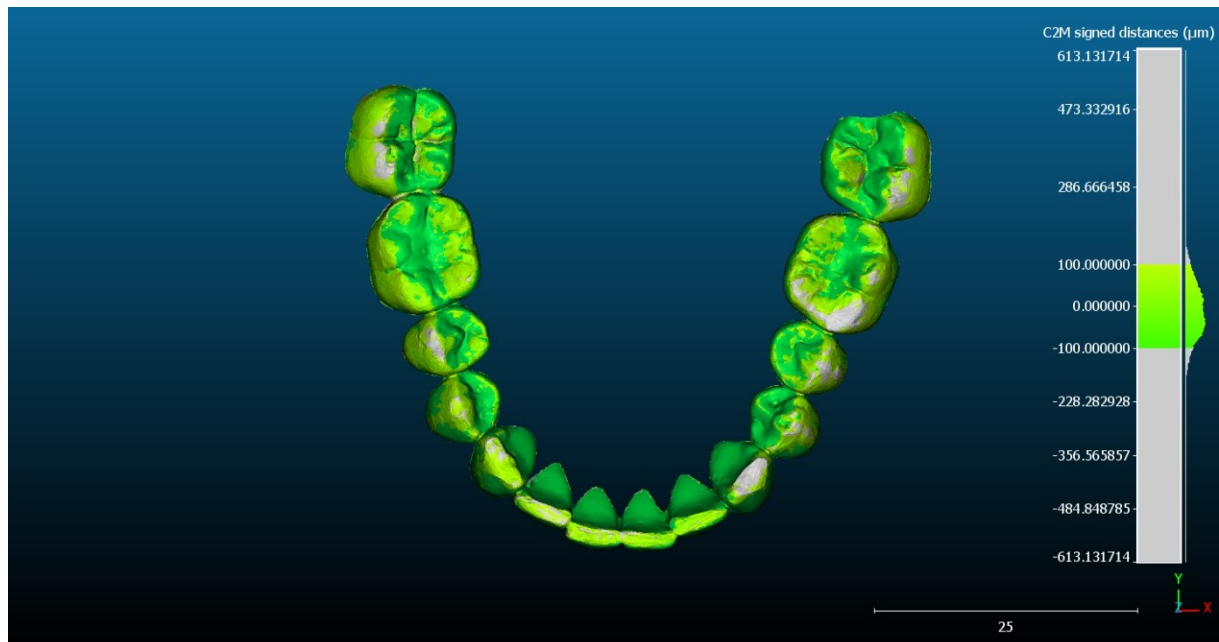


Abbildung 8: Farbcodierte Oberflächenabweichung (C2M signed distances) eines repräsentativen Unterkiefer-Modells nach ICP-Registrierung. Die überwiegend grüne Darstellung innerhalb des definierten Toleranzbereichs von $\pm 100 \mu\text{m}$ weist auf eine hohe Übereinstimmung zwischen Referenz- und Testmodell hin.

Zur ergänzenden Darstellung der Verteilung der Punkt-zu-Oberfläche-Distanzen kann ein Histogramm herangezogen werden. Abbildung 9 zeigt exemplarisch das Histogramm der C2M signed distances eines repräsentativen Einzelfalls mit Gauß-Anpassung und veranschaulicht die Verteilung der Mean Deviation (MD) sowie der Standardabweichung (SD).

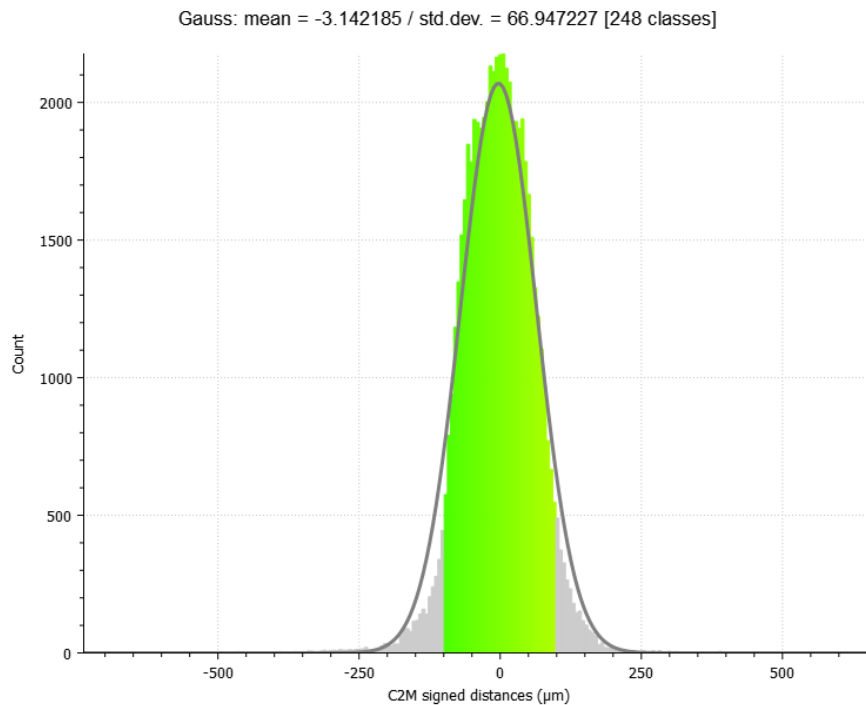


Abbildung 9: Exemplarisches Histogramm der C2M signed distances eines repräsentativen Einzelfalls mit Gauß-Anpassung, das die Verteilung der MD und der SD veranschaulicht.

Analyse der Genauigkeit

Die Genauigkeit dentaler Digitalisierungsgeräte beschreibt sowohl die Übereinstimmung der Messdaten mit dem wahren Wert als auch die Übereinstimmung unabhängiger Messergebnisse untereinander. Sie setzt sich gemäß ISO 5725-1 aus Richtigkeit und Präzision zusammen (30) und wird nach ISO 12836 praktisch durch die Bestimmung der Abweichung zwischen der gescannten Oberfläche und einem hochpräzisen Referenzdatensatz bewertet (33). Dabei bezeichnet die Richtigkeit die Nähe des Mittelwerts vieler Messergebnisse zum Referenzwert, während die Präzision die Übereinstimmung unabhängiger Messergebnisse unter festgelegten Bedingungen beschreibt (30,33). Zur Beurteilung der Genauigkeit digitaler Systeme werden hauptsächlich lineare Messungen und dreidimensionale Überlagerungen eingesetzt. Da intraorale Scanner Tausende von Oberflächenpunkten erfassen, lässt sich die Genauigkeit durch lineare Messungen allein nicht ausreichend beschreiben. Bei der dreidimensionalen Überlagerung wird daher die Abweichung zwischen einem mit einem intraoralen Scanner erzeugten digitalen Modell und einem Referenzdatensatz bestimmt. Diese Oberflächenvergleichsmethode bewertet die Oberflächenabweichungen über die gesamte Zahnreihe und ermöglicht dadurch eine umfassende Darstellung möglicher Verzerrungen über

den gesamten Zahnbogen hinweg (33). In dieser Studie wurden die digitalisierten Gipsmodelle als Referenzdatensatz verwendet. Die Differenzberechnung zwischen Referenz- und Testmodell ergab folgende Kennwerte für die einzelnen Vergleiche: die mittlere Oberflächenabweichung (MD), die standard Abweichung (SD) sowie den quadratischen Mittelwert der Abweichungen (RMS).

Nach der Ausrichtung der Datensätze wurden die Oberflächenabweichungen statistisch ausgewertet. MD entspricht dem systematischen Fehler (Bias), der als quantitatives Maß der Richtigkeit dient und die Annäherung des Mittelwerts an den Referenzwert beschreibt (30).

Diese Kennwerte dienten anschließend als Grundlage für die statistische Analyse, um die Genauigkeit der digitalen Modelle im Vergleich zu den digitalisierten Gipsmodellen zu bewerten.

Da die einzelnen Punktabweichungen sowohl positive als auch negative Werte annehmen können, würden sie sich bei einer direkten Mittelwertbildung teilweise gegenseitig aufheben. Zur Beschreibung der tatsächlichen räumlichen Abweichung wurden daher vorzeichenunabhängige Kenngrößen verwendet. Hierfür dient insbesondere RMS der die gesamte dreidimensionale Diskrepanz aller Messpunkte zusammenfasst (34). Die Verteilung der Punkt-zu-Oberfläche-Distanzen kann zusätzlich durch Standardabweichung oder Quantile charakterisiert werden, während der RMS-Wert hauptsächlich zur Beschreibung der dreidimensionalen Oberflächenabweichung digitaler Abformungen verwendet wird (34). Der RMS-Wert beschreibt die gesamte dreidimensionale Abweichung und enthält sowohl systematische als auch zufällige Fehleranteile. Die Richtigkeit wird im normativen Sinne der ISO 5725-1 durch den Bias definiert, also als systematische Abweichung des Mittelwerts vom Referenzwert. In der dentalen 3D-Oberflächenanalyse wird der RMS-Wert hingegen häufig als Maß der gesamten Oberflächenabweichung verwendet. Dabei ist zu beachten, dass der RMS-Wert sowohl systematische als auch zufällige Fehleranteile umfasst und daher kein ausschließliches Maß der Richtigkeit im statistischen Sinne darstellt (30,33,34). Bei der oberflächenbasierten Genauigkeitsanalyse wird jeder Punkt des Testscans nach der Überlagerung mit der Referenzoberfläche verglichen und eine Punkt-zu-Fläche-Distanz berechnet. Die Verteilung dieser Distanzen beschreibt die Abweichung zwischen den Datensätzen und kann mittels RMSE oder anderer statistischer Kenngrößen charakterisiert werden (34). Da der Referenzdatensatz als konventioneller Referenzwert definiert wird, ist die berechnete Distanz an jedem Punkt proportional zur relativen Messabweichung. Somit ist Mittelwert der Punkt-zu-Fläche-Distanzen (RMS) mathematisch äquivalent zum Root Mean

Square Error (RMSE). In der dreidimensionalen Oberflächenmetrologie wird jedoch üblicherweise der Begriff RMS verwendet, da geometrische Abstände und keine eindimensionalen Messfehler ausgewertet werden. Der RMS-Wert wurde in dieser Studie ergänzend zur Beschreibung der Gesamtabweichung herangezogen (38). Mathematisch ergibt sich für den RMS der Oberflächenabweichungen:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^2}$$

Die Kenngrößen RMS und RMSE sind mathematisch äquivalent, jedoch nicht begrifflich identisch. Während RMSE den statistischen Messfehler beschreibt, repräsentiert RMS in der dreidimensionalen Oberflächenanalyse die geometrische Abweichung.

Statistische Auswertung

Die statistische Analyse erfolgte gemäß dem vorab definierten Studienprotokoll. Die Auswertung basierte auf den MD Parametern (μm) zur Analyse eines systematischen Bias sowie RMS (μm) als globalem Maß der quadratischen Mittelabweichung zur Beurteilung der Richtigkeit. Die deskriptive Statistik wurde getrennt für Oberkiefer und Unterkiefer berechnet. Für jede Variable wurden Stichprobengröße (N), Minimum, Maximum, Mittelwert (MD) und SD angegeben.

Zur Überprüfung der Normalverteilung wurden der Shapiro–Wilk-Test sowie ergänzend der Kolmogorov–Smirnov-Test durchgeführt (Tabelle 1). Da nicht in allen Gruppen eine Normalverteilung vorlag, wurden sowohl parametrische als auch nichtparametrische Testverfahren angewendet.

Tabelle 1: Die Ergebnisse der Normalverteilungstests (Kolmogorov-Smirnov und Shapiro-Wilk) zeigen, dass die Daten teilweise normalverteilt sind.

		Kolmogorov-Smirnov	Shapiro-Wilk Test
MD (μm)	Upper	p = 0,053	p = 0,101
	Lower	p = 0,189	p = 0,008
RMS (μm)	Upper	p = 0,099	p = 0,034
	Lower	p = 0,050	p = 0,052

Zur Untersuchung eines systematischen Unterschieds zwischen Intraoralscan und Referenzmodell wurde MD mittels One-Sample-t-Test gegen den Referenzwert von 0 μm geprüft. Zusätzlich wurde der Wilcoxon-Test für eine Stichprobe angewendet.

Die Richtigkeit wurde anhand der RMS-Werte als globaler Oberflächenabweichungsparameter beurteilt. Da für jede teilnehmende Person sowohl ein Oberkiefer- als auch ein Unterkieferwert vorlag, ergaben sich abhängige Stichproben. Der Vergleich erfolgte daher mittels gepaartem t-Test sowie Wilcoxon-Test für verbundene Stichproben.

Das Signifikanzniveau wurde auf $\alpha = 0,05$ festgelegt.

Die statistische Auswertung wurde in Zusammenarbeit mit Dipl.-Ing. Irene Mischak (Statistikerin) durchgeführt.

Ergebnisse

Insgesamt wurden 50 Kiefermodelle analysiert (25 Oberkiefer, 25 Unterkiefer).

Die individuellen Werte der MD, SD und RMS sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Die individuellen Werte der mittleren Abweichung (MD), Standardabweichung (SD) und RMS sind für Ober- und Unterkiefer dargestellt. Die MD-Werte zeigen sowohl positive als auch negative Werte, während die RMS-Werte vergleichbare Bereiche zwischen Ober- und Unterkiefer aufweisen.

Teilnehmende	Kiefer	MD (µm)	SD (µm)	RMS (µm)
1	Oberkiefer	1,95688	151,93	151,942
1	Unterkiefer	-19,2622	135,502	136,864
2	Oberkiefer	-3,50634	122,823	122,873
2	Unterkiefer	-10,9355	145,812	146,221
3	Oberkiefer	-7,37997	173,767	173,924
3	Unterkiefer	-10,0357	131,748	132,129
4	Oberkiefer	-38,9739	168,368	172,82
4	Unterkiefer	-17,5	153,941	154,932
5	Oberkiefer	-35,7387	122,077	127,2
5	Unterkiefer	-11,6119	106,77	107,4
6	Oberkiefer	-16,5063	125,661	126,74
6	Unterkiefer	11,9687	90,6347	91,4215
7	Oberkiefer	-17,9813	126,851	128,119
7	Unterkiefer	-7,85625	94,2152	94,5422
8	Oberkiefer	-9,06141	105,972	106,359
8	Unterkiefer	-0,70006	79,7867	79,7898
9	Oberkiefer	-13,947	94,522	95,5449
9	Unterkiefer	-0,59146	94,4597	94,4615
10	Oberkiefer	-2,94306	117,297	117,334
10	Unterkiefer	4,3539	149,788	149,852
11	Oberkiefer	1,001	95,7	95,7054
11	Unterkiefer	-1,33389	132,42	132,427

12	Oberkiefer	25,7152	97,758	101,084
12	Unterkiefer	-17,7421	190,186	191,012
13	Oberkiefer	1,09644	98,8479	98,854
13	Unterkiefer	55,4289	112,669	125,565
14	Oberkiefer	-1,29336	68,3619	68,3741
14	Unterkiefer	6,41781	84,7428	84,9854
15	Oberkiefer	3,757	71,7359	71,8342
15	Unterkiefer	26,1877	104,984	108,2
16	Oberkiefer	14,5149	97,0562	98,1356
16	Unterkiefer	9,76276	105,799	106,249
17	Oberkiefer	0.824168	82.6682	82.6723
17	Unterkiefer	9.25675	87.8036	88.2902
18	Oberkiefer	0,109458	103,146	103,146
18	Unterkiefer	7,60932	72,8479	73,2443
19	Oberkiefer	1,55638	85,8811	85,8952
19	Unterkiefer	7,31609	76,3995	76,749
20	Oberkiefer	-14,4888	118,599	119,481
20	Unterkiefer	-2,43457	87,9094	87,9431
21	Oberkiefer	-2,52237	94,1697	94,2035
21	Unterkiefer	14,0371	118,139	118,97
22	Oberkiefer	4,51841	169,379	169,439
22	Unterkiefer	-5,14693	74,6367	74,814
23	Oberkiefer	9,79031	94,3582	94,8647
23	Unterkiefer	3,64356	121,724	121,779
24	Oberkiefer	-13,1436	96,1356	97,03
24	Unterkiefer	12,015	89,5956	90,3976
25	Oberkiefer	-3,14218	66,9472	67,0209
25	Unterkiefer	-15,9557	76,8394	78,4785

Für die Analyse des systematischen Bias wurden 50 Messungen ausgewertet.

Die MD betrug $-1,4 \mu\text{m}$ ($\text{SD} = 15,2 \mu\text{m}$; Minimum = $-39,0 \mu\text{m}$; Maximum = $55,4 \mu\text{m}$) (Tabelle 3 und Abbildung 9).

Für die Richtigkeit-Analyse lagen 25 gepaarte Messungen vor.

Der mittlere RMS-Wert betrug:

- im Oberkiefer 110,9 μm (SD = 30,5 μm ; Minimum = 67,0 μm ; Maximum = 173,9 μm)
- im Unterkiefer 109,9 μm (SD = 30,3 μm ; Minimum = 73,2 μm ; Maximum = 191,0 μm)

(Tabelle 4 und Abbildung 10).

Inferenzstatistische Analyse:

Systematischer Bias (Mean Deviation)

Der One-Sample-t-Test gegen den Referenzwert von 0 μm zeigte keinen statistisch signifikanten Unterschied ($p = 0,522$).

Auch der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test bestätigte dieses Ergebnis ($p = 0,347$).

Somit konnte kein systematischer Bias zwischen Intraoralscan und Referenzmodell nachgewiesen werden.

Richtigkeit - Vergleich Oberkiefer vs. Unterkiefer

Der gepaarte t-Test zeigte keinen statistisch signifikanten Unterschied zwischen Ober- und Unterkiefer ($p = 0,896$).

Auch der Wilcoxon-Test für verbundene Stichproben bestätigte dieses Ergebnis ($p = 0,882$).

Es konnte somit kein signifikanter Unterschied in der Richtigkeit zwischen Oberkiefer- und Unterkiefermodellen festgestellt werden.

Hypothesenprüfung

Beide Nullhypothesen konnten nicht verworfen werden.

Es zeigte sich weder eine systematische Abweichung des Intraoralscans vom Referenzmodell noch ein signifikanter Unterschied der Richtigkeit zwischen Ober- und Unterkiefer.

Tabelle 3: Mittelwert, Standardabweichung sowie Minimum und Maximum der mittleren Abweichung (μm)

	N	Min	Max	Mean (μm)	SD
MD (μm)	50	-39.0	55.4	-1.4	15.2

Tabelle 4: Mittelwerte und Standardabweichungen der RMS-Werte (μm) für Ober- und Unterkiefer

RMS (μm)	N	Min	Max	Mean	SD
Upper	25	67.0	173.9	110.9	30.5
Lower	25	73.2	191.0	109.9	30.3

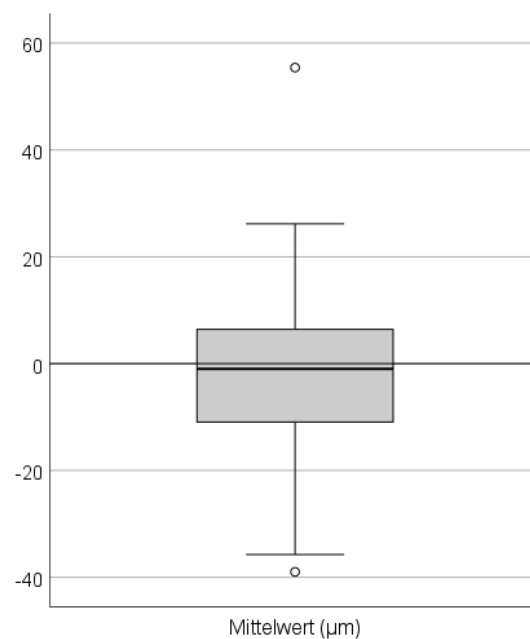


Abbildung 10: Boxplot-Darstellung der mittleren Oberflächenabweichung (μm). Der Mittelwert liegt nahe bei 0 μm , was auf das Fehlen eines systematischen Bias hinweist.

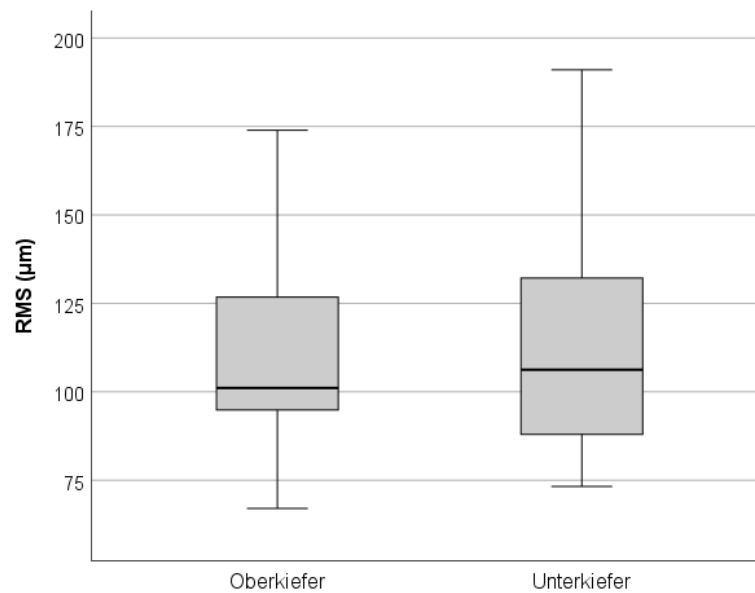


Abbildung 11: Boxplot-Darstellung der RMS-Werte (µm) für Ober- und Unterkiefer. Die Verteilung der Werte sowie die Medianwerte sind in beiden Gruppen vergleichbar und zeigen keinen Hinweis auf einen signifikanten Unterschied zwischen den Kiefern.

Diskussion

Interpretation der Hauptergebnisse

Die Ergebnisse unserer Studie ermöglichen zu bewerten, wie genau Studierende digitale und konventionelle Abformmethoden anwenden. Dies ermöglicht Rückschlüsse auf die didaktische Wirksamkeit des Kurses ‚Funktionsanalyse und -therapie‘ und kann zur Optimierung der Lehre beitragen.

Einordnung in die aktuelle Literatur und methodische Aspekte

Zitzmann et al. (2020) berichten im Rahmen einer systematischen Übersichtsarbeit, dass die Implementierung digitaler Technologien in die zahnmedizinische Ausbildung mit einer initialen Lernphase verbunden ist. Studierende benötigen eine strukturierte Einarbeitungszeit, bevor eine routinierte und effiziente Anwendung digitaler Systeme erreicht werden kann (35).

Amornvit et al. (2021) führten eine in-vitro-Studie zur Bewertung der Genauigkeit konfokaler Intraoralscanner durch (36). Die Untersuchung wurde an einem dentierten, 3D-gedruckten Zahnmodell durchgeführt. Die Autoren berichteten, dass sowohl frühere Generationen der TRIOS®-Scanner als auch iTero auf dem Prinzip der konfokalen Mikroskopie (confocal microscopy) basierten, was eine hohe Genauigkeit bei der Erfassung der Zahnoberflächen ermöglichte. Darüber hinaus zeigten die Ergebnisse, dass die TRIOS-Serie in bestimmten Messungen hinsichtlich Genauigkeit anderen Systemen überlegen war. Für die 60-mm-Messung, die stellvertretend für vollständige Bogenaufnahmen steht, wiesen die TRIOS-Modelle signifikant geringere Abweichungen vom Referenzwert auf, während die iTero-Scanner signifikant höhere Abweichungen vom Referenzmodell aufwiesen. Noch ausgeprägter fiel der Unterschied bei den diagonalen Messungen von 65 mm aus: Hier konnten die TRIOS-Scanner, sowohl im Standard- als auch im High-Resolution-Modus, den Zahnbogen mit signifikant höherer Genauigkeit erfassen als die iTero-Geräte (36). Dies ist für die vorliegende Studie relevant, da mit dem TRIOS 5 ein hochpräziser Intraoralscanner verwendet wurde.

Osnes et al. (2019) zeigten, dass die Wahl der Auswertungsmethode einen entscheidenden Einfluss auf die berichteten Präzisionswerte von Intraoralscannern haben kann (37). Die alleinige Verwendung der globalen mittleren Oberflächenabweichung kann klinisch relevante Fehler unterschätzen, da Best-Fit-Algorithmen primär darauf ausgerichtet sind, die durchschnittliche Distanz zwischen Datensätzen zu minimieren und dadurch lokale Abweichungen statistisch „auszugleichen“ (37). In der vorliegenden Studie wurde daher die Software CloudCompare (Version 2.13.2) verwendet, wobei ein standardisiertes Best-Fit-Verfahren (ICP) angewendet wurde.

Auch die ex-vivo-Studie von Vag et al. (2023) untersuchte die Richtigkeit und Präzision vollständiger Zahnbogen-Scans unter Verwendung eines hochpräzisen industriellen Referenzscanners (38).

Eine aktuelle klinische In-vivo-Studie von Schlenz et al. (2025) untersuchte die Genauigkeit verschiedener drahtloser intraoraler Scanner bei mandibulären Ganzkieferaufnahmen unter Verwendung einer Referenzstruktur mit Kugeln. Die Autoren berichteten systemabhängige Unterschiede in der Richtigkeit sowie eine signifikante Interaktion zwischen dem verwendeten Abformsystem und der gemessenen linearen Distanz (39). Dabei nahmen die Abweichungen mit zunehmender Distanz zwischen den Referenzpunkten zu, insbesondere bei intermolar- sowie bei langen diagonalen Messstrecken über den Zahnbogen hinweg. Diese Befunde sprechen für eine kumulative Fehlerentwicklung bei zunehmender Scanlänge. Auch wenn

aufgrund unterschiedlicher Messmethoden (lineare Distanzmessung versus flächenbasierte RMS-Analyse) keine direkte numerische Vergleichbarkeit mit der vorliegenden Untersuchung gegeben ist, unterstreichen beide Studien die Bedeutung der Scanstrecke für die Gesamtgenauigkeit von Ganzkieferscans (39).

Vergleich zwischen Oberkiefer und Unterkiefer

In der vorliegenden Untersuchung zeigte sich kein signifikanter Unterschied in der Richtigkeit zwischen Ober- und Unterkiefer. Die mittleren RMS-Werte lagen bei 110,9 μm im Oberkiefer und 109,9 μm im Unterkiefer, wobei der gepaarte t-Test sowie der Wilcoxon-Test keinen statistisch signifikanten Unterschied zeigten ($p > 0,05$). Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Genauigkeit digitaler Vollkieferabformungen unter standardisierten Bedingungen unabhängig vom Kiefer vergleichbar ist.

Moon und Lee (2020) sowie Flügge et al. (2013) berichteten über eine tendenziell geringere Genauigkeit intraoraler Scans im Oberkiefer im Vergleich zum Unterkiefer. Insbesondere bei vollständigen Zahnbogen-Scans kann es durch die sukzessive Bildzusammenführung zu einer kumulativen Fehlerakkumulation kommen. Zusätzlich werden klinische Faktoren wie Speichel, eingeschränkte Sichtverhältnisse und posterior gelegene Strukturen als potenzielle Einflussgrößen beschrieben (16,40).

Einfluss von Lernkurve, Methodik und Analyseparametern

Es ist zu berücksichtigen, dass sämtliche intraoralen Scans im Rahmen dieser Untersuchung von Studierenden ohne vorherige praktische Erfahrung durchgeführt wurden. Die ermittelten Werte könnten daher neben gerätespezifischen Faktoren auch operatorabhängige Einflüsse sowie eine noch nicht vollständig überwundene Lernkurve widerspiegeln und unter Umständen leicht erhöhte Abweichungen begünstigen. Die Ergebnisse stellen somit die Messgenauigkeit unter Ausbildungsbedingungen dar.

Trotz des insgesamt moderaten mittleren RMS-Wertes von etwa 110 μm zeigten einzelne Modelle erhöhte Extremwerte. Der maximale RMS-Wert betrug 191,0 μm im Unterkiefer und 173,9 μm im Oberkiefer, zudem erreichte die maximale Mean Deviation 55,4 μm , während der Minimalwert bei -39,0 μm lag. Diese Extremwerte könnten auf operatorabhängige Einflüsse im Rahmen der initialen Lernphase der Studierenden, auf erschwerte Scanbedingungen

insbesondere im posterioren Bereich zurückzuführen sein. Da es sich hierbei um vereinzelte Ausreißer handelt und die Mehrzahl der Modelle deutlich geringere Abweichungen aufwies, erscheint ihre klinische Relevanz insgesamt begrenzt, zugleich verdeutlichen sie jedoch die vorhandene Streuung der Messergebnisse und unterstreichen die Bedeutung standardisierter Scanprotokolle sowie einer strukturierten Schulung im Umgang mit intraoralen Scannern.

Der RMS-Wert beschreibt das Ausmaß der dreidimensionalen Abweichung zwischen zwei Datensätzen. Seine Aussagekraft ist jedoch kontextabhängig: Beim Vergleich eines digitalen Modells mit einem Referenzdatensatz dient der RMS-Wert zur Beurteilung der Richtigkeit, während er beim Vergleich wiederholter Scans desselben Objekts die Präzision widerspiegelt. In der vorliegenden Studie wurde der RMS-Wert zur Bewertung der Richtigkeit herangezogen, da die digitalen Modelle mit einem Referenzmodell verglichen wurden. Entsprechend wurde der RMS-Wert in der Studie von Flügge et al. zur Beurteilung der Präzision verwendet, da dort wiederholte intraorale Scans miteinander verglichen wurden (16).

Zur Bewertung der dreidimensionalen Abweichungen wurde in der vorliegenden Studie der RMS als globaler Oberflächenparameter herangezogen. Dieses Vorgehen entspricht etablierten Auswertungsmethoden in der dentalen 3D-Analyse. Auch Osman und Alharbi (2022) verwendeten im Rahmen einer In-vitro-Untersuchung zur Beurteilung der Richtigkeit intraoraler Scanner eine RMSE-basierte Analyse nach digitaler Überlagerung der Datensätze. Die Anwendung eines RMS-basierten Parameters ermöglicht eine zusammenfassende Quantifizierung der dreidimensionalen Abweichung über die gesamte analysierte Oberfläche und spiegelt die in der Literatur verbreitete methodische Vorgehensweise wider (41).

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung sollten im Kontext der bislang publizierten In-vivo-Daten zur Genauigkeit von Ganzkieferscans interpretiert werden. In einem narrativen Review berichteten Jennes et al. (2022) über Richtigkeit-Werte zwischen 12,9 und 80,01 μm für In-vivo-Ganzkieferscans (42). Eine direkte numerische Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen der vorliegenden Studie ist jedoch nur eingeschränkt möglich, da sich Studiendesign, Referenzkonzept und Auswertungsmethoden teilweise erheblich unterscheiden.

In einer aktuellen In-vitro-Studie von Kanmaz et al. (2025) lagen die RMS-Werte für Ganzkieferscans zwischen 65 und 88 μm (43). Die in der vorliegenden Untersuchung ermittelten Werte liegen geringfügig darüber. Mögliche Ursachen hierfür könnten methodische Unterschiede, variationsbedingte Einflüsse sowie operatorabhängige Faktoren sein. Insbesondere ist zu berücksichtigen, dass die Scans in der genannten Studie von einer einzelnen erfahrenen Person unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt wurden. Es ist jedoch zu

berücksichtigen, dass unter klinischen In-vivo-Bedingungen aufgrund von Faktoren wie Speichel, eingeschränkter Zugänglichkeit und Patientenbewegungen größere Abweichungen zu erwarten sind.

Die Ergebnisse von Grünheid et al. (2014) zeigen, dass digitale Modelle aus intraoralen Scans hinsichtlich der Genauigkeit mit aus Alginatabformungen gewonnenen Modellen vergleichbar sind. Auch in der vorliegenden Untersuchung konnte kein signifikanter Unterschied in der Richtigkeit zwischen digitaler und konventioneller Methode festgestellt werden, wenngleich unterschiedliche Analysemethoden zur Anwendung kamen (44). Diese Ergebnisse stimmen mit den Resultaten der vorliegenden Studie überein.

Yatmaz et al. (2021) konnten hingegen nachweisen, dass die berechneten Richtigkeit -Werte signifikant von der Definition des Referenz- und Testobjekts im Rahmen der dreidimensionalen Oberflächenanalyse abhängen (45). In deren Untersuchung betrug der RMS-Wert 203,1 µm bei Definition des Ground-Truth-Modells als Referenz und 39,6 µm bei umgekehrter Referenzwahl. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass ausgewiesene Genauigkeitsparameter maßgeblich durch das Analyseprotokoll, die gewählte Superimpositionsstrategie sowie die Definition von Referenz- und Testdatensatz beeinflusst werden. Direkte numerische Vergleiche zwischen unterschiedlichen Studiendesigns sind daher nur eingeschränkt möglich.

In der visuellen Gesamtbetrachtung mehrerer farbcodierter Abweichungskarten zeigte sich in mehreren Fällen eine tendenzielle Häufung von Abweichungen außerhalb des definierten Toleranzbereichs (grau markierte Bereiche), insbesondere an den palatinalen Flächen der oberen ersten und zweiten Prämolaren sowie an den palatinalen Flächen der oberen letzten Molaren. Im Unterkiefer betrafen diese Bereiche vor allem die okklusale und bukkale Flächen der letzten Molaren. Diese Beobachtung basiert auf einer qualitativen visuellen Analyse; eine quantitative regionsspezifische Auswertung wurde im Rahmen der vorliegenden Studie nicht durchgeführt.

Die Genauigkeit intraoraler Scans ist nicht ausschließlich vom verwendeten Gerät abhängig, sondern kann auch durch externe Einflussfaktoren moduliert werden.

In-vitro-Untersuchung von Revilla-León et al. (2023) analysierte den Einfluss von Umgebungstemperaturänderungen auf die Richtigkeit eines intraoralen Scanners. Die Autoren konnten zeigen, dass sowohl Temperaturabsenkungen als auch Temperaturerhöhungen zu signifikanten Veränderungen der Richtigkeit führten, wobei insbesondere eine Erhöhung der Umgebungstemperatur die größten Abweichungen verursachte. Diese Ergebnisse

verdeutlichen, dass neben dem verwendeten Scannersystem auch externe Umgebungsfaktoren die Richtigkeit digitaler Ganzkieferaufnahmen beeinflussen können (46).

Koseoglu et al. (2021) zeigten, dass unterschiedliche Umgebungs- und Scanlichtbedingungen einen signifikanten Einfluss auf die Richtigkeit digitaler Vollkieferabformungen haben können (47). Dies verdeutlicht, dass neben technischen Parametern auch standardisierte Rahmenbedingungen entscheidend für reproduzierbare und valide Messergebnisse sind. Vor diesem Hintergrund wurden in der vorliegenden Untersuchung möglichst konstante und kontrollierte Bedingungen eingehalten, um externe Störfaktoren zu minimieren.

In unserer Studie wurde die Präzision der intraoralen Digitalisierung nicht untersucht, da hierfür wiederholte Scans unter identischen Bedingungen erforderlich sind, welche im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nicht durchgeführt wurden. Frühere In-vitro-Studien, wie jene von Imburgia et al. (2017), zeigten jedoch, dass die Genauigkeit insbesondere die Richtigkeit und teilweise auch die Präzision bei vollständig zahnlosen Modellen im Vergleich zu teilweise bezahnten Situationen geringer ausfällt. Dieses Phänomen wird unter anderem auf das Fehlen stabiler Referenzstrukturen und die mögliche Akkumulation von Registrierungsfehlern während des Scanvorgangs zurückgeführt (48).

Klinische Relevanz und Bedeutung für Ausbildung

Ein weiterer klinisch relevanter Anwendungsbereich intraoraler Scanner ist die Herstellung von Michigan-Schienen im Rahmen eines vollständig digitalen Workflows (49). In einer experimentellen Studie von Dedem und Türp (2016) konnte gezeigt werden, dass eine gipsfreie Fertigung von Michigan-Schienen auf Basis intraoraler Scans grundsätzlich realisierbar ist und klinisch akzeptable Ergebnisse liefert (49). Dabei wurden digitale Ober- und Unterkieferabformungen sowie die Kieferrelation vollständig digital erfasst und anschließend in einem CAD/CAM-Prozess zur Herstellung der Schienen verwendet. Die resultierenden Schienen wiesen in allen Fällen eine klinisch ausreichende Passung und überwiegend zufriedenstellende Retention auf, wobei lediglich geringfügige okklusale Anpassungen erforderlich waren, die dem Aufwand konventioneller Verfahren entsprechen. Als wesentliche Vorteile des digitalen Workflows wurden insbesondere eine effizientere Herstellung, eine verbesserte Materialqualität durch industriell gefertigte PMMA-Blöcke sowie die Möglichkeit der reproduzierbaren Herstellung identischer Schienen beschrieben. Gleichzeitig ist zu berücksichtigen, dass die Anforderungen an die Genauigkeit bei der Herstellung von Michigan-

Schienen im Vergleich zu festsitzenden Rekonstruktionen geringer sind, da geringfügige Abweichungen durch die Materialeigenschaften sowie den Retentionsmechanismus kompensiert werden können. Vor diesem Hintergrund erscheinen die in der vorliegenden Studie ermittelten RMS-Werte im Bereich von etwa 110 µm als klinisch ausreichend für die Anwendung digital gefertigter Okklusionsschienen. Insgesamt unterstreichen diese Ergebnisse das Potenzial intraoraler Scanner für funktionstherapeutische Anwendungen und erweitern deren Einsatzbereich über restaurative Indikationen hinaus.

Bedeutung für Ausbildung und Akzeptanz digitaler Technologien

Marti et al. (2017) zeigten, dass Studierende nach entsprechender Schulung eine überwiegend positive Einstellung gegenüber intraoralen Scannern entwickelten und die Mehrheit angab, digitale Technologien künftig bevorzugt einsetzen zu wollen (50). Auch Vuković Kekez et al. (2022) berichteten, dass ein Großteil der Teilnehmenden davon ausgeht, digitale Abformtechniken langfristig anstelle konventioneller Verfahren zu verwenden und deren Integration in die universitäre Ausbildung als notwendig erachtet (3). Diese Ergebnisse deuten auf eine zunehmende Akzeptanz digitaler Technologien hin und unterstreichen die Bedeutung ihrer frühzeitigen curricularen Implementierung.

Die rasante Entwicklung von Technologien, Instrumenten und Software im Bereich der intraoralen Scanner scheint die Publikationsrate wissenschaftlicher Studien teilweise zu überholen. Dadurch entsteht eine zeitliche Diskrepanz zwischen technischer Innovation und evidenzbasierter Bewertung, was die Formulierung klarer klinischer Empfehlungen erschweren kann. Dies unterstreicht die Notwendigkeit kontinuierlicher unabhängiger Forschung zur Sicherstellung einer wissenschaftlich fundierten klinischen Anwendung (24).

Einschränkungen der Studie

Obwohl der Laborscanner gemäß ISO 12836 als hochpräzises Referenzsystem gilt, stellt das digitalisierte Gipsmodell keinen absoluten „Ground Truth“ im metrologischen Sinne dar. Mögliche materialbedingte Veränderungen im konventionellen Workflow (Alginat, Gips, Modellscan) können die Referenzgeometrie geringfügig beeinflussen.

Die vorliegende Studie bestimmt daher keine absolute Richtigkeit gegenüber einem metrologischen Ground Truth, sondern vergleicht zwei klinische Workflows miteinander. Die

Ergebnisse sind folglich primär als Genauigkeitsbewertung zwischen digitalem und konventionellem Verfahren zu interpretieren.

Die vorliegende Studie weist mehrere Einschränkungen auf, darunter insbesondere:

- Beschränkung auf eine bestimmte Alters- oder klinische Gruppe: Die Untersuchung konzentrierte sich auf eine spezifische Altersgruppe sowie auf vollständig bezahnte Kiefer, wodurch die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere klinische Situationen, beispielsweise bei Milchdentition oder teilbezahnten Patient:innen, eingeschränkt ist.
- Klinische Erfahrung der Teilnehmenden: Sämtliche intraoralen Scans wurden von Studierenden ohne vorherige praktische Erfahrung durchgeführt. Somit könnten die Ergebnisse durch operatorabhängige Einflüsse sowie durch eine noch nicht vollständig überwundene Lernkurve beeinflusst worden sein.
- Mögliche Beschädigung der Modelle: Im Verlauf des konventionellen Workflows kann es zu geringfügigen Beschädigungen oder Veränderungen der Gipsmodelle kommen, die die Referenzgeometrie beeinflussen und somit die Vergleichbarkeit der Datensätze einschränken können.
- Vergleich Alginat vs. IOS: Da es sich um zwei unterschiedliche Verfahren mit jeweils eigenen Fehlerquellen handelt, ist eine eindeutige Zuordnung der Abweichungen zu einer einzelnen Methode nur eingeschränkt möglich.

Empfehlungen für zukünftige Forschung

- Künftige Studien könnten komplexere klinische Situationen einbeziehen, wie etwa Fälle mit Zahnengständen oder gekippten Zähnen, tief liegende Präparationsgrenzen sowie die Digitalisierung zahnloser Kiefer.
- Zukünftige Studien sollten den Einfluss der langfristigen klinischen Nutzung intraoraler Scanner auf die Messgenauigkeit systematisch untersuchen. Da bisher nur begrenzte Langzeitdaten vorliegen, bleibt unklar, ob wiederholte Anwendung, Gerätealterung, Kalibrierungsintervalle oder Software-Updates zu einer schrittweisen Drift der Scanqualität führen können. Langzeit- und Follow-up-Untersuchungen über mehrere Jahre wären daher erforderlich, um mögliche Veränderungen der Richtigkeit und Präzision unter klinischen Alltagsbedingungen zu evaluieren.
- Ein Vergleich zwischen erfahrenen und unerfahrenen Anwender*innen könnte in zukünftigen Studien wertvolle Erkenntnisse liefern.

Abschließend unterstreicht diese Studie die Notwendigkeit, digitale Kompetenzen bereits in einer frühen Phase der zahnmedizinischen Ausbildung zu integrieren. Die sichere Beherrschung intraoraler Scanner trägt nicht nur zur Steigerung der klinischen Effizienz bei, sondern stellt auch einen zentralen Bestandteil der Qualitätssicherung in der modernen Zahnmedizin dar.

Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigen, dass digitale Vollkieferabformungen mittels Intraoralscanner unter Ausbildungsbedingungen eine mit konventionellen Alginatabformungen vergleichbare Richtigkeit aufweisen. Es konnte weder ein systematischer Bias zwischen Intraoralscans und Referenzmodellen festgestellt werden noch ein signifikanter Unterschied in der Richtigkeit zwischen Ober- und Unterkiefer. Die digitale Abformtechnik im untersuchten Setting erwies sich als valide und zuverlässig.

Die Ergebnisse zeigen, dass intraorale Scanner bei vollbezahnten Kiefern klinisch zuverlässig einsetzbar sind, auch wenn sie von unerfahrenen Operatorinnen und Operatoren verwendet werden. Darüber hinaus unterstreichen die Befunde die Relevanz ihrer curriculären Integration in die zahnmedizinische Ausbildung.

Literaturverzeichnis

1. Li RWK, Chow TW, Matinlinna JP. Ceramic dental biomaterials and CAD/CAM technology: State of the art. *Journal of Prosthodontic Research*. Oktober 2014;58(4):208–16. doi:10.1016/j.jpor.2014.07.003
2. Monterubbianesi R, Tosco V, Vitiello F, Orilisi G, Fraccastoro F, Putignano A, u. a. Augmented, Virtual and Mixed Reality in Dentistry: A Narrative Review on the Existing Platforms and Future Challenges. *Applied Sciences*. 15. Januar 2022;12(2):877. doi:10.3390/app12020877
3. Kekez IV, Karega GP, Gadža M, Benzon B, Mikić IM, Vukojevic K, u. a. Conventional vs. Digital Dental Impression: Practitioner and Patient Perspectives. *International Journal of Reliable and Quality E-Healthcare*. 16. März 2022;11(1):1–13. doi:10.4018/ijrqeh.298631
4. Miyazaki T, Hotta Y, Kunii J, Kuriyama S, Tamaki Y. A review of dental CAD/CAM: current status and future perspectives from 20 years of experience. *Dent Mater J*. 2009;28(1):44–56. doi:10.4012/dmj.28.44
5. Otto T, Schneider D. Long-term clinical results of chairside Cerec CAD/CAM inlays and onlays: a case series [Internet]. 2008. doi:10.5167/UZH-12825
6. Alfallaj HA, Afrashtehfar KI, Asiri AK, Almasoud FS, Alnaqa GH, Al-Angari NS. The Status of Digital Dental Technology Implementation in the Saudi Dental Schools' Curriculum: A National Cross-Sectional Survey for Healthcare Digitization. *IJERPH*. 25. Dezember 2022;20(1):321. doi:10.3390/ijerph20010321
7. Kannan S, Mathew CA, Paulraj RS. Intraoral scanning systems – a current overview. *Int J Adv Res*. Oktober 2020;8(10):1214–1223. doi:10.21474/IJAR01/11956
8. Mangano A, Beretta M, Luongo G, Mangano C, Mangano F. Conventional Vs Digital Impressions: Acceptability, Treatment Comfort and Stress Among Young Orthodontic Patients. *TODENTJ*. 31. Januar 2018;12(1):118–24. doi:10.2174/1874210601812010118
9. Tanveer W, Ridwan-Pramana A, Molinero-Mourelle P, Forouzanfar T. Systematic Review of Clinical Applications of CAD/CAM Technology for Craniofacial Implants Placement and Manufacturing of Orbital Prostheses. *IJERPH*. 28. Oktober 2021;18(21):11349. doi:10.3390/ijerph182111349

10. Ma J, Rubenstein JE. Complete arch implant impression technique. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. Juni 2012;107(6):405–10. doi:10.1016/S0022-3913(12)60100-0
11. Alhafi ZM, Rajeh N. Evaluation of the effectiveness of modified aligner appliance with nickel-titanium springs in treatment of mild crowding of lower incisors: A randomized controlled clinical trial. *Journal of the World Federation of Orthodontists*. August 2022;11(4):107–13. doi:10.1016/j.ejwf.2022.04.003
12. Camardella LT, Breuning H, De Vasconcellos Vilella O. Accuracy and reproducibility of measurements on plaster models and digital models created using an intraoral scanner. *J Orofac Orthop*. Mai 2017;78(3):211–20. doi:10.1007/s00056-016-0070-0
13. Schwindling FS, Stober T. A comparison of two digital techniques for the fabrication of complete removable dental prostheses: A pilot clinical study. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. November 2016;116(5):756–63. doi:10.1016/j.prosdent.2016.03.022
14. Yuzbasioglu E, Kurt H, Turunc R, Bilir H. Comparison of digital and conventional impression techniques: evaluation of patients' perception, treatment comfort, effectiveness and clinical outcomes. *BMC Oral Health*. Dezember 2014;14(1):10. doi:10.1186/1472-6831-14-10
15. Gallardo YR, Bohner L, Tortamano P, Pigozzo MN, Laganá DC, Sesma N. Patient outcomes and procedure working time for digital versus conventional impressions: A systematic review. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. Februar 2018;119(2):214–9. doi:10.1016/j.prosdent.2017.07.007
16. 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*. September 2013;144(3):471–8. doi:10.1016/j.ajodo.2013.04.017
17. Abdulla M, Ali H, Jamel R. CAD-CAM Technology: A literature review. *RDENTJ*. 1. April 2020;20(1):95–113. doi:10.33899/rden.2020.164542
18. Burhardt L, Livas C, Kerdijk W, Van Der Meer WJ, Ren Y. Treatment comfort, time perception, and preference for conventional and digital impression techniques: A

- comparative study in young patients. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. August 2016;150(2):261–7. doi:10.1016/j.ajodo.2015.12.027
19. Shaikh M, Lakha T, Kheur S, Qamri B, Kheur M. Do digital impressions have a greater accuracy for full-arch implant-supported reconstructions compared to conventional impressions? An in vitro study. *J Indian Prosthodont Soc*. 2022;22(4):398–404. doi:10.4103/jips.jips_52_22 PubMed PMID: 36511075; PubMed Central PMCID: PMC9709861.
 20. Jivănescu A, Bara A, Faur AB, Rotar RN. Is There a Significant Difference in Accuracy of Four Intraoral Scanners for Short-Span Fixed Dental Prosthesis? A Comparative In Vitro Study. *Applied Sciences*. 7. September 2021;11(18):8280. doi:10.3390/app11188280
 21. Choi JW, Ahn JJ, Son K, Huh JB. Three-Dimensional Evaluation on Accuracy of Conventional and Milled Gypsum Models and 3D Printed Photopolymer Models. *Materials*. 25. Oktober 2019;12(21):3499. doi:10.3390/ma12213499
 22. Ahlholm P, Sipilä K, Vallittu P, Jakonen M, Kotiranta U. Digital Versus Conventional Impressions in Fixed Prosthodontics: A Review. *Journal of Prosthodontics*. Januar 2018;27(1):35–41. doi:10.1111/jopr.12527
 23. Ender A, Zimmermann M, Attin T, Mehl A. In vivo precision of conventional and digital methods for obtaining quadrant dental impressions. *Clin Oral Invest*. September 2016;20(7):1495–504. doi:10.1007/s00784-015-1641-y
 24. Marques S, Ribeiro P, Falcão C, Lemos BF, Ríos-Carrasco B, Ríos-Santos JV, u. a. Digital Impressions in Implant Dentistry: A Literature Review. *IJERPH*. 24. Januar 2021;18(3):1020. doi:10.3390/ijerph18031020
 25. Berrendero S, Salido MP, Ferreira A, Valverde A, Pradies G. Comparative study of all-ceramic crowns obtained from conventional and digital impressions: clinical findings. *Clin Oral Invest*. April 2019;23(4):1745–51. doi:10.1007/s00784-018-2606-8
 26. Chochlidakis KM, Papaspyridakos P, Geminiani A, Chen CJ, Feng IJ, Ercoli C. Digital versus conventional impressions for fixed prosthodontics: A systematic review and meta-analysis. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. August 2016;116(2):184-190.e12. doi:10.1016/j.prosdent.2015.12.017

27. Sannino G, Germano F, Arcuri L, Bigelli E, Arcuri C, Barlattani A. CEREC CAD/CAM chairside system. *Oral Implantol.* 2014;7(3):57–70
28. Zitzmann NU, Kovaltschuk I, Lenherr P, Dedem P, Joda T. Dental Students' Perceptions of Digital and Conventional Impression Techniques: A Randomized Controlled Trial. *Journal of Dental Education.* Oktober 2017;81(10):1227–32. doi:10.21815/JDE.017.081
29. Sabalic M, Schoener JD. Virtual Reality-Based Technologies in Dental Medicine: Knowledge, Attitudes and Practice Among Students and Practitioners. *Tech Know Learn.* Juli 2017;22(2):199–207. doi:10.1007/s10758-017-9305-4
30. International Organization for Standardization. ISO 5725-1:1994. Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results—Part 1: General principles and definitions. Geneva: ISO; 1994.
31. Tomita Y, Uechi J, Konno M, Sasamoto S, Iijima M, Mizoguchi I. Accuracy of digital models generated by conventional impression/plaster-model methods and intraoral scanning. *Dental Materials Journal.* 26. Juli 2018;37(4):628–33. doi:10.4012/dmj.2017-208
32. Phudphong P, Amornvit P, Sirintawat N. Comparison of Accuracy of Alginate Impression and Intraoral Scanner in Model with and without Orthodontic Brackets. *Applied Sciences.* 29. Juni 2021;11(13):6037. doi:10.3390/app11136037
33. International Organization for Standardization. ISO 12836:2015. Dentistry—Digitizing devices for CAD/CAM systems for indirect dental restorations—Test methods for assessing accuracy. Geneva: ISO; 2015
34. Mehl A, Reich S, Beuer F, Güth JF. Accuracy, trueness, and precision – a guideline for the evaluation of these basic values in digital dentistry. *Int J Comput Dent.* 2021;24(4):341–352
35. Zitzmann NU, Matthisson L, Ohla H, Joda T. Digital Undergraduate Education in Dentistry: A Systematic Review. *IJERPH.* 7. Mai 2020;17(9):3269. doi:10.3390/ijerph17093269
36. Amornvit P, Rokaya D, Peampring C, Sanohkan S. Confocal 3D Optical Intraoral Scanners and Comparison of Image Capturing Accuracy. *Computers, Materials & Continua.* 2020;66(1):303–14. doi:10.32604/cmc.2020.011943

37. Osnes CA, Wu JH, Venezia P, Ferrari M, Keeling AJ. Full arch precision of six intraoral scanners in vitro. *Journal of Prosthodontic Research*. Januar 2020;64(1):6–11. doi:10.1016/j.jpor.2019.05.005
38. Vag J, Stevens CD, Badahman MH, Ludlow M, Sharp M, Brenes C, u. a. Trueness and precision of complete arch dentate digital models produced by intraoral and desktop scanners: An ex-vivo study. *Journal of Dentistry*. Dezember 2023;139:104764. doi:10.1016/j.jdent.2023.104764
39. Schlenz MA, Chillemi L, Wöstmann B. Clinical study on the accuracy of wireless intraoral scanners for digital full arch impressions of dentate arches. *Journal of Dentistry*. Dezember 2025;163:106132. doi:10.1016/j.jdent.2025.106132
40. Moon YG, Lee KM. Comparison of the accuracy of intraoral scans between complete-arch scan and quadrant scan. *Prog Orthod*. Dezember 2020;21(1):36. doi:10.1186/s40510-020-00337-1
41. 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*. Dezember 2023;32(9):821–8. doi:10.1111/jopr.13633
42. Jennes ME, Soetebeer M, Beuer F. In vivo full-arch accuracy of intraoral scanners: a narrative review. *Int J Comput Dent*. 2022;25(1):9–16
43. Kanmaz MG, Agani Sabah G, Balcı M, Erden MB. Comparison of intraoral scanner accuracy before and after calibration: an in vitro study. *BMC Oral Health*. 17. Juli 2025;25(1):1186. doi:10.1186/s12903-025-06584-0
44. Grünheid T, McCarthy SD, Larson BE. Clinical use of a direct chairside oral scanner: An assessment of accuracy, time, and patient acceptance. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. November 2014;146(5):673–82. doi:10.1016/j.ajodo.2014.07.023
45. Yatmaz BB, Raith S, Reich S. Trueness evaluation of digital impression: The impact of the selection of reference and test object. *Journal of Dentistry*. August 2021;111:103706. doi:10.1016/j.jdent.2021.103706

46. Revilla-León M, Gohil A, Barmak AB, Gómez-Polo M, Pérez-Barquero JA, Att W, u. a. Influence of ambient temperature changes on intraoral scanning accuracy. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. November 2023;130(5):755–60. doi:10.1016/j.prosdent.2022.01.012
47. Koseoglu M, Kahramanoglu E, Akin H. Evaluating the Effect of Ambient and Scanning Lights on the Trueness of the Intraoral Scanner. *Journal of Prosthodontics*. Dezember 2021;30(9):811–6. doi:10.1111/jopr.13341
48. Imburgia M, Logozzo S, Hauschild U, Veronesi G, Mangano C, Mangano FG. Accuracy of four intraoral scanners in oral implantology: a comparative in vitro study. *BMC Oral Health*. Dezember 2017;17(1):92. doi:10.1186/s12903-017-0383-4
49. Dedem P, Türp JC. Digital Michigan splint – from intraoral scanning to plasterless manufacturing. *Int J Comput Dent*. 2016;19(1):63–76.
50. Marti A. Comparison of digital scanning and polyvinyl siloxane impression techniques by DMD students: instructional efficiency and attitudes toward technology. [Internet]. University of Louisville; 2015 [zitiert 8. November 2025]. Verfügbar unter: <http://ir.library.louisville.edu/etd/2338> doi:10.18297/etd/2338

Hilfsmittelverzeichnis

Zur Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit wurden folgende digitale Werkzeuge verwendet:

- Zotero (Version 7.0.16 [64-bit]) – Roy Rosenzweig Center for History and New Media, USA, <https://www.zotero.org> (Nutzung zur Verwaltung, Organisation und Formatierung der Literaturquellen)
- Rayyan (Web App) – Rayyan Systems Inc., <https://www.rayyan.ai> (Unterstützung bei der systematischen Literatursuche und -bewertung)
- CloudCompare (Version 2.13.2 – Kharkiv, 06.07.2024) – CloudCompare Development Team, <https://www.cloudcompare.org> (Verwendung zur Analyse und Visualisierung von 3D-Punktwolken)
- ChatGPT – OpenAI, <https://chat.openai.com> (Verwendung ausschließlich zur sprachlichen Optimierung und grammatikalischen Korrektur des Textes; es erfolgte keine inhaltliche Generierung wissenschaftlicher Ergebnisse)

Verwendung generativer KI-Anwendungen

Im Rahmen der Erstellung dieser Diplomarbeit wurden generative KI-Anwendungen unterstützend verwendet. Dabei kam insbesondere ChatGPT (OpenAI, GPT-5) zur sprachlichen Überarbeitung, Strukturierung einzelner Abschnitte, grammatikalischen Korrekturen sowie zur Verbesserung wissenschaftlicher Formulierungen zum Einsatz.

Die generierten Inhalte wurden vom Autor kritisch überprüft, überarbeitet und eigenständig wissenschaftlich bewertet. Sämtliche Literaturquellen, Zitate und fachlichen Inhalte wurden eigenständig kontrolliert und entsprechend den wissenschaftlichen Standards korrekt angegeben.

Verwendete KI-Anwendung:

OpenAI. *ChatGPT*, GPT-5 version, OpenAI, <https://chat.openai.com/>. Accessed 18 May 2026.

Beispielhafte Prompts:

* „Korrigiere Grammatik und Ausdruck dieses Absatzes.“

* „Überprüfe diesen Satz auf sprachliche Verständlichkeit.“

Zeitraum der Nutzung: Februar bis Mai 2026

Die Verwendung generativer KI-Anwendungen erfolgte ausschließlich unterstützend und ersetzte keine eigenständige wissenschaftliche Leistung.

Anhang

Beispielhafte Verwendung von ChatGPT während der Erstellung der Diplomarbeit:

Prompt:

„Korrigiere Grammatik und wissenschaftlichen Ausdruck dieses Absatzes:

Digitale Abformungen und intraorale Scanner (IOS) tragen zur Effizienzsteigerungen klinische Abläufe bei und verbessern gleichzeitig das Komfort die Patienten.“

Antwort (gekürzt):

„Digitale Abformungen und intraorale Scanner (IOS) tragen zur Effizienzsteigerung klinischer Abläufe bei und verbessern gleichzeitig den Komfort der Patient*innen.“

Prompt:

„Überprüfe diesen Abschnitt auf sprachliche Verständlichkeit und akademischen Stil:

Die Genauigkeit der digitalen Abformung z.B IOS ist ein entscheidende Faktor für den Behandlungserfolg. Digitale Abformungen können entweder direkt mittels intraoraler Scanner oder indirekt durch Laborscanner erstellt werden“

Antwort (gekürzt):

„Der Abschnitt wurde sprachlich überarbeitet, Wiederholungen wurden entfernt und der wissenschaftliche Stil vereinheitlicht.:

Die Genauigkeit der digitalen Abformung ist ein entscheidender Faktor für den Behandlungserfolg. Digitale Abformungen können entweder direkt mittels intraoraler Scanner oder indirekt durch Laborscanner erstellt werden“

Prompt:

„Gibt es in diesem Text Rechtschreibfehler?:

Die Studie wird an der Medizinischen Universität Graz in der Abteilung für Zahnerhaltung, Parodontologie und Zahnersatzkunde durchgeführt im Rahmen des Moduls „Funktionsanalyse und -therapie“. Die Studierenden führten gegenseitig sowohl Alginat-Abformungen als auch intraoral digitale Abformungen durch.“

Antwort (gekürzt):

„Der akademische Text ist inhaltlich gut formuliert und insgesamt verständlich. Allerdings besteht eine Inkonsistenz bei der Zeitform. Daher wäre es in dem ersten Satz stilistisch besser, „wurde“ anstelle von „wird“ zu verwenden, um eine einheitliche Vergangenheitsform im gesamten Text beizubehalten.“