

Lea Sophia Prött, Ralf Joachim Kohal, Kirstin Vach, Gary David Hack, Sebastian Berthold Maximilian Patzelt

Genauigkeit computergestützter optischer Abformungen

Einfluss unterschiedlicher Scanpfade

Indizes: computergestützte optische Abformung, digitale Abformung, optische Abformung, Scanpfad, Scanmuster

Einführung: Ziel dieser In-vitro-Studie war es, den Einfluss verschiedener Scanpfade auf die Genauigkeit digitaler Ganzkiefer-Abformungen für drei Intraoralscanner zu untersuchen. **Material und Methode:** Ein 14 präparierte Zähne enthaltendes Oberkiefermodell wurde mit einem Referenzscanner (ATOS III Triple Scan) und drei Testscannern (CS 3500, CEREC Omnicam, True Definition) jeweils unter Anwendung von sieben verschiedenen Scanpfaden digitalisiert. Als Testpfade 1 und 2 wurden die vom jeweiligen Hersteller vorgeschlagenen Scanpfade untersucht. Die Testpfade 3, 4 und 5 waren verschiedene kürzere Scanpfade. Ein willkürlich gewählter Scanpfad diente als Testpfad 6 zu Vergleichszwecken. Mit dem 7. Testpfad, der eine Wiederholung von Pfad 1 darstellte, sollte ein möglicher Lerneffekt untersucht werden. Anschließend wurden die Scans digital überlagert (Geomagic Control), die Werte für die Richtigkeit und Präzision berechnet und es wurde eine statistische Analyse durchgeführt. **Ergebnisse:** Die Scanpfade 4 (Richtigkeit: $32,7 \pm 10,3 \mu\text{m}$, Präzision: $23,8 \pm 9,5 \mu\text{m}$) und 5 (Richtigkeit: $35,1 \pm 10,7 \mu\text{m}$, Präzision: $24,2 \pm 10 \mu\text{m}$) lieferten die höchste Genauigkeit. Bezüglich der Richtigkeit fanden sich für die Omnicam keine statistisch signifikanten Differenzen zwischen den einzelnen Scanpfaden. Pfad 7 zeigte insgesamt eine höhere Genauigkeit als Pfad 1, allerdings waren die Unterschiede statistisch nicht signifikant. **Schlussfolgerung:** Idealerweise sollte der gewählte Scanpfad so kurz wie möglich sein, während Scans über lange Strecken zu vermeiden sind. Die Genauigkeit aller drei Scansysteme war klinisch akzeptabel, aber das Scannen eines voll präparierten Kiefers mit einem Point-and-Click-System (CS 3500) kann nicht empfohlen werden.

Warum Sie diesen Beitrag lesen sollten

Dieser Beitrag berichtet über die Relevanz von Scanpfaden, Limitationen einzelner Scansysteme sowie über deren Ursachen. Er zeigt, wie rasant sich die Scantechnologie weiterentwickelt, und hilft, die verschiedenen Scansysteme und auftretenden Probleme besser zu verstehen.

1. EINLEITUNG

Eine entscheidende Voraussetzung für die Herstellung qualitativ hochwertiger Restaurationen sind möglichst genaue und detailreiche Abformungen der präparierten Zähne. Für optische intraorale Abformungen lässt sich die Genauigkeit anhand der beiden Aspekte Richtigkeit und Präzision (ISO 5725-1) bewerten¹⁴. Die Richtigkeit ist dabei das Maß für die Abweichung zwischen Test- und Referenzmessungen, während die Präzision das Maß für die Übereinstimmung innerhalb der Testmessungen bei wiederholten Intraoralscans ist³⁵. Um die Genauigkeit einer digitalen Abformung zu beschreiben, ist es zwingend erforderlich, Richtigkeit und Präzision zusammen zu betrachten⁷. Die Qualität einer im digitalen Workflow erstellten Restauration verhält sich umgekehrt proportional zur Summe der Fehler aller Arbeitsschritte dieses Workflows²⁵. Bei der Abformung auftretende Fehler lassen sich während der nachfolgenden Schritte nicht mehr kompensieren⁴³. Verglichen mit der konventionellen Abformung sind die wichtigsten Vorteile der

Manuskript

Eingang: 04.07.2022

Annahme: 27.10.2022

Deutsche Version des englischen Beitrags: Prött LS, Kohal RJ, Vach K, Hack GD, Patzelt SBM: Accuracy of computerized optical impression making: the influence of different scan paths. Dtsch Zahnärztl Z Int 2022; 4: 185–195.

computergestützten optischen Abformung ein erhöhter Patientenkomfort, ein geringerer Zeitaufwand sowie die Eliminierung der durch das Abformmaterial und die Modellherstellung bedingten Fehler^{33,43,51}. In vorherigen Studien erreichten digitale Ganzkieferabformungen eine vergleichbare oder höhere Genauigkeit als solche mit konventionellen Abformmaterialien^{6,32,46}. Dennoch nutzte im Jahr 2021 lediglich die Hälfte aller amerikanischen Zahnärzte in ihrer Praxis einen Intraoralscanner³⁸. 66 % der Nichtnutzer gaben als Hauptgrund die hohen Anschaffungskosten an. In der Zahntechnik sind digitale Geräte wie Scanner und Fräsmaschinen dagegen bereits voll etabliert¹. Auch in anderen zahnmedizinischen Bereichen wie der Kieferorthopädie und Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie ist die digitale Technik bereits integraler Teil der Behandlung und wird bei der Konstruktion von Operationschablonen und Schienen sowie der Verlaufskontrolle und Simulation von Behandlungsplänen eingesetzt^{10,22}.

Die Genauigkeit digitaler Abformungen wird durch die Größe des zu scannenden Bereichs beeinflusst^{9,46,53}. Während der optischen Datenakquise wird durch Überlagerung der Randbereiche von Punktwolken mehrerer sich aneinanderreihender Einzelbilder ein 3D-Bild generiert²⁵. Infolgedessen summieren sich einzelne Ungenauigkeiten zu größeren Fehlern im finalen 3D-Datensatz auf. Frühere Studien zu Ganzkieferscans haben gezeigt, dass die meisten Scansysteme zwar in der Lage sind, ganze Kiefer mit ausreichender Genauigkeit zu erfassen, dass sich die Genauigkeit jedoch noch verbessern muss, um das Niveau konventioneller Abformungen zu erreichen^{7-9,15}. Zudem fehlt es an Studien, die die Genauigkeit digitaler Ganzkieferabformungen am Patienten untersuchen^{6,17,20,23,42}.

Um den Gesamtfehler bei größeren Scanarealen zu minimieren, scheint ein Vorgehen sinnvoll, bei dem die Einzelbilder nicht linear entlang des Zahnbogens aneinandergereiht, sondern so zusammengefügt werden, dass die während des Matchens auftretenden Fehler so gering wie möglich gehalten werden. Erreichen ließe sich dies bspw. durch zusätzliche laterale Einzelbilder oder durch eine Überkreuzung der Okklusalfächen⁵⁴. Dass der Scanpfad Einfluss auf die Genauigkeit von Ganzkieferabformungen hat, wurde bereits in mehreren Studien gezeigt^{5,8,24,28,30,45}. Allerdings wurden in diesen Studien bezahnte Modelle verwendet, die gar keine bis höchstens zwei präparierte Zähne enthielten. Um eine komplexere Situation zu untersuchen, wurde die vorliegende Studie deshalb an einem Modell mit 14 präparierten Zähnen durchgeführt. Konsens darüber, welcher Scanpfad für den Einsatz verschiedener Scansysteme am besten geeignet ist, besteht in der Fachliteratur bislang nicht. Da Evidenz insbesondere zu der Frage fehlt, ob die von den Herstellern vorgeschlagenen Scanpfade anderen Pfaden tatsächlich überlegen sind, wurden in der vorliegenden Studie verschiedene kürzere Scanpfade mit den komplexeren Pfaden der Hersteller verglichen.

Frühere Studien haben gezeigt, dass unerfahrene Behandler die größte Lernkurve durchlaufen müssen^{19,37,49}, aber auch erfahrene

Nutzer benötigen eine gewisse Einarbeitung, wenn sie einen anderen als den bislang genutzten Intraoralscanner verwenden wollen⁵². Zugleich wird berichtet, dass neuere Scansysteme in ihrer Genauigkeit weniger stark von der Erfahrung des Anwenders abhängig sind²². Das zweite Ziel dieser Studie bestand deshalb darin zu untersuchen, ob sich durch die relativ große Zahl der durchgeführten Scans ein Lerneffekt ergibt. Die getesteten Nullhypothesen lauteten, dass (I) die sieben getesteten Scanpfade und (II) die Erfahrung des Anwenders keinen Einfluss auf die Genauigkeit digitaler Abformungen mit drei verschiedenen Intraoralscannern haben.

2. MATERIAL UND METHODE

Für die vorliegende Studie wurde ein Oberkiefer-Dentalmodell (Prosthetic Restauration Jaw Model (PRO2001-UL-SP-FEM-32), Nissin Dental Products INC., Kyoto, Japan) mit verschraubten Typodontzähnen (Simple Root Tooth Model (A5A-200), Nissin Dental Products INC.) verwendet. Das Modell wurde mit einem Acrylkunststoff (Self Curing Denture, Lang Dental, Wheeling, IL, USA) dupliert. In das Duplikatmodell wurden Typodontzähne 17 bis 27 eingebettet und mit Hohlkehlschablonen für vollkeramische Kronen versehen. Das Referenzmodell wurde dann zunächst mit einem hochpräzisen Industriescanner (ATOS III Triple Scan, GOM GmbH, Braunschweig, Deutschland) digitalisiert, um einen Referenzdatensatz zu gewinnen, und anschließend mit den folgenden drei Intraoralscannern gescannt: CS 3500 (Carestream Health, Rochester, NY, USA), CEREC AC Omnicam (Dentsply Sirona GmbH, Bensheim, Deutschland) und True Definition (3M ESPE, Seefeld, Deutschland). Dabei wurden folgende Softwareversionen verwendet: CS 3500 – Dental Imaging Software, Version 1.2.6.50, Omnicam – Version SW 4.4.0.122433, True Definition – Version 5.0.2-production-eu.

Insgesamt wurden sieben Scanpfade mit je fünf Scans pro Testgruppe getestet^{31,32,34}. Dentsply Sirona⁴ und 3M ESPE gaben spezielle Empfehlungen für den Scanpfad bei Ganzkieferscans. Carestream Health machte dagegen keine Angaben zum Scannen ganzer Kiefer mit dem CS 3500. Deshalb wurde für letzteren Scanner der Herstellerpfad der Omnicam verwendet. Für den True Definition waren der vom Hersteller empfohlene Pfad sowie Videoanleitungen zum Pudern und zur Kamerahaltung verfügbar. Als Pfade 3, 4 und 5 wurden kürzere Scanpfade untersucht, die bereits in einer früheren Studie von Ender und Mehl getestet worden waren⁸. Pfad 6 war ein willkürlich gewählter Scanpfad und diente zum Vergleich, während als Pfad 7 der bereits als Pfad 1 genutzte Herstellerpfad wiederholt wurde, um zu untersuchen, ob aufgrund der großen Zahl durchgeführter Scans ein Lerneffekt eingetreten war. Abbildung 1 stellt alle untersuchten Scanpfade grafisch dar. Für die vorliegende Studie war die Vollständigkeit der Datensätze eine notwendige Bedingung. Deshalb wurde nach Durchlaufen des jeweiligen Scanpfads der Scan so lange fortgesetzt, bis alle

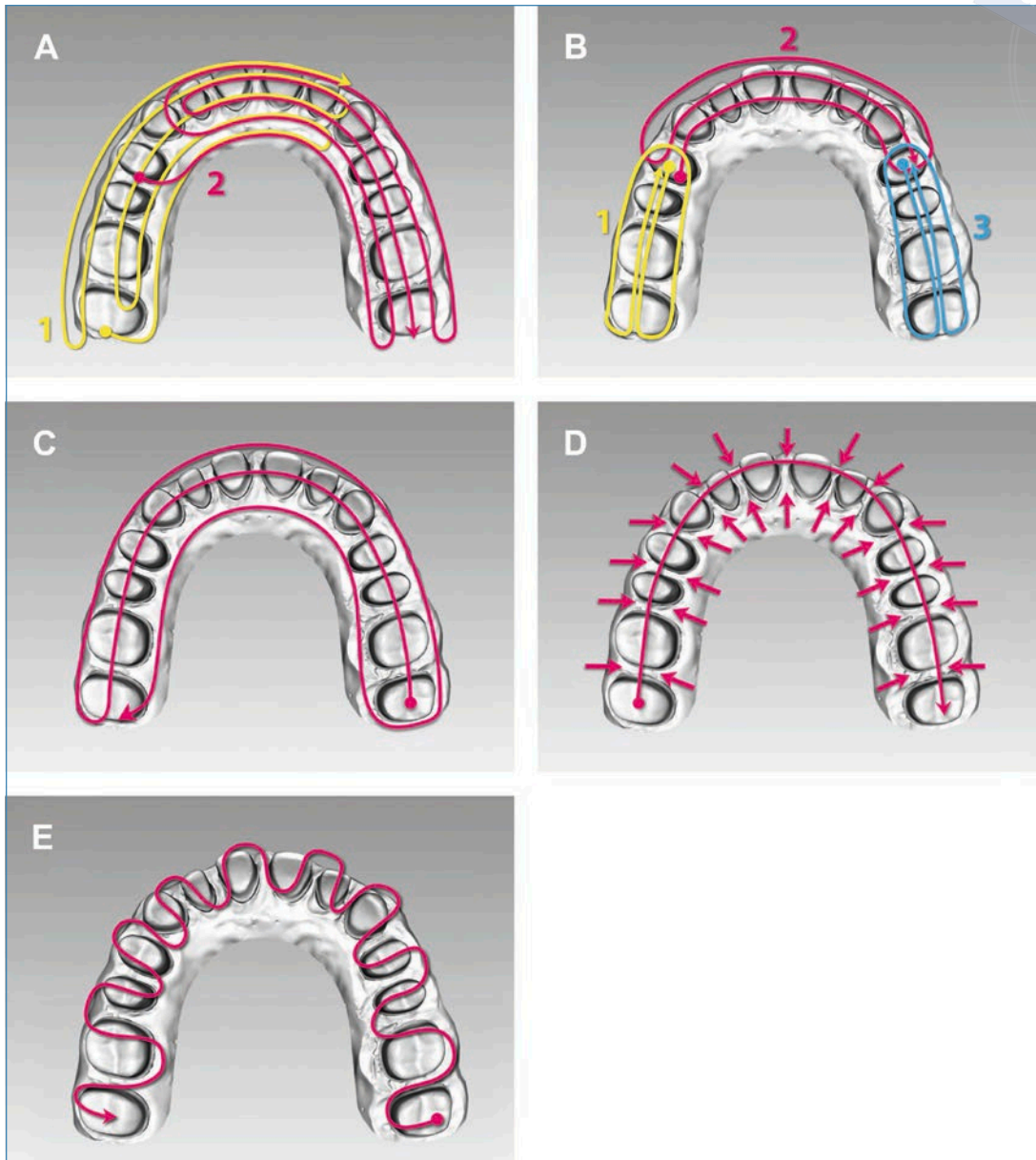


Abb. 1 (A) Herstellerscanpfad Omnicam: Erste Kieferhälfte: Begonnen wurde okklusal am Zahn 17 (1, gelb). Die Kamera wurde im Winkel von 45° nach palatinal geneigt und dann nach mesial bis über die Mittellinie hinaus zum Zahn 22 geführt, wo sie um weitere 45°, das heißt auf insgesamt 90°, gekippt zum Zahn 17 zurückgeführt wurde. Dort wurde sie wieder über die Okklusalfläche gebracht und erneut nach mesial bis zum Zahn 22 geführt, wo die Kamera nun um 45° auf die vestibuläre Seite gekippt wurde. Erneut wurde die Kamera zum Zahn 17 geführt, um weitere 45° nach vestibulär gekippt und unter einem Winkel von insgesamt 90° nach mesial geführt. Zweite Kieferhälfte: Aus einer okklusalen Position über dem Zahn 14 (2, rot) wurde die Kamera um einen Winkel von 90° nach palatinal rotiert und entlang der Zahnreihe bis zum Zahn 27 geführt. Dort wurde sie um 45° zurückgekippt und bis zum Zahn 12 gelenkt, wo sie im Winkel von 45° auf die vestibuläre Seite geschwenkt und wieder zum Zahn 27 bewegt wurde. Dann wurde sie bis auf einen Winkel von 90° nach vestibulär gekippt und zum Zahn 12 zurückgeführt. Schließlich wurde die Kamera wieder auf die Okklusalfläche gelenkt und zum Endpunkt am Zahn 27 bewegt. (B) Herstellerscanpfad True Definition: Beginnend am Zahn 14 wurde die Kamera okklusal bis zur Distalfläche des Zahns 17 bewegt und von dort palatinal nach 14 zurückgeführt. Dort wurde sie nach bukkal geschwenkt und zum Zahn 17 zurückgelenkt, von wo sie schließlich wieder okklusal nach 14 zurückgeführt wurde (1, gelb). Anschließend wurde in vertikaler Kamerahaltung palatinal von 14 nach 24 gescannt. Dort wurde die Kamera auf die labiale Seite gebracht und in vertikaler Stellung nach 14 zurückbewegt. Am Zahn 14 schwenkte die Kamera nach okklusal und wurde nach 14 zurückbewegt. Im dritten Schritt wurden beginnend auf dem Zahn 24 die Okklusalflächen bis distal 27 gescannt. Abschließend wurde die Kamera von dort auf der palatinalen Seite zurück zum Zahn 24 und dann bukkal bis zum Zahn 27 bewegt. Der Scanpfad endete okklusal (3, blau). (C) Scanpfad 3 (gerade): Beginnend okklusal über dem Zahn 27 wurde die Kamera über den ganzen Zahnbogen bis zum Zahn 17 geführt. Von dort wurden die vestibulären Flächen bis 27 und dann die Oralflächen wieder zurück nach 17 gescannt (D) Scanpfad 4 (Schwenken): Der Scan begann okklusal über dem Zahn 17, von wo die Kamera über den gesamten Zahnbogen bis zum Zahn 27 geführt wurde. Anschließend wurde sie im Winkel von 30° nach oral und wieder im selben Winkel nach vestibulär gebracht. (E) Scanpfad 5 (Kreuzen): Der Scan begann okklusal auf dem Zahn 27. Von dort wurde die Kamera in langsamen Zickzack-Bewegungen von oral nach vestibulär nach oral usw. bis zum Zahn 17 gebracht. (Alle Zahnnummern gemäß FDI-Schema.)

relevanten Bereiche oberhalb der Präparationsgrenze ausreichend erfasst waren. Für jeden Scan wurde die Gesamtdauer der Durchführung aufgezeichnet.

Beim CS 3500 konnten die Daten direkt als offene STL-Datensätze exportiert werden. Dagegen mussten die mit der Omnicam erstellten Datensätze im verschlüsselten DXD-Format exportiert werden, da der CEREC-Workflow zum Zeitpunkt dieser Studie noch ein geschlossenes System war. Die Konvertierung in STL-Daten erfolgte mithilfe von Sirona Connect (Version SW 4.4.1.132174) und inLab (Version SW 15.1.0.135929). Beim True-Definition-Scanner wurden die Datensätze zur Umwandlung auf eine proprietäre Cloud-Plattform (3M Connection Center) geladen, die dann offene STL-Daten zum Download bereitstellte. Zudem wurde das Modell vor dem Scannen mit dem True Definition mit einem Scanpuder (3M High Resolution Scanning Spray, 3M ESPE, Saint Paul, MN, USA) vorbehandelt, während der CS 3500 und die Omnicam puderfrei arbeiteten.

Alle Scans wurden von einer Zahnmedizinstudentin (L. S. P.) an mehreren aufeinanderfolgenden Tagen durchgeführt. Während dieser Arbeitssitzungen lag die Luftfeuchtigkeit bei $21 \pm 12\%$ und die Raumtemperatur bei $24 \pm 3^\circ\text{C}$. Die Untersucherin hatte sich zuvor eine Woche lang in die Anwendung der drei Scansysteme eingearbeitet und dazu mit jedem System 30 Übungsscans durchgeführt.

Zur Auswertung wurden der mit dem Referenzscanner gewonnene Datensatz und die Datensätze der Testscanner im STL-Format in eine 3D-Analysesoftware (Geomagic Control 2014, 3DSystems, Rock Hill, SC, USA) importiert. Mithilfe der Ausrichtungsfunktion und des Best-Fit-Algorithmus der Software wurden die Datensätze so überlagert, und es wurde jeweils der minimale Abstand zwischen zwei zueinander am nächsten liegenden Oberflächenpunkten des Test- und des Referenzdatensatzes berechnet. Anschließend erfolgten 3D-Vergleiche sowie die Berechnung der Mittelwerte und mittleren positiven und negativen Abweichungen. Bestimmt wurden die Abweichungen zwischen dem jeweiligen Test- und dem Referenzdatensatz (Richtigkeit) sowie die Abweichungen zwischen den Datensätzen einer Testgruppe (Präzision). Für die Richtigkeit wurden somit insgesamt 35 Vergleiche (fünf Vergleiche je Testgruppe, sieben Testgruppen), für die Präzision 70 Vergleiche (zehn Vergleiche je Testgruppe, sieben Testgruppen) durchgeführt. Außerdem wurde eine visuelle Auswertung anhand farbcodierter Grafiken durchgeführt.

Für die deskriptive statistische Auswertung wurden Mittelwerte, Mediane und Standardabweichungen (SD) berechnet. Der Einfluss des Scanners auf die abhängigen Variablen wurde mit linearen gemischten Modellen analysiert, die mit Random Intercepts für die jeweilige Scanstrategie angepasst wurden. Zur Korrektur der Alphafehler-Kumulierung aufgrund multipler Paarvergleiche kam die Scheffé-Methode zur Anwendung. Alle statistischen Berechnungen wurden mit einer Statistiksoftware (STATA 14.2, StataCorp LP, College Station, TX, USA) durchgeführt. Als Signifikanzniveau galt $p \leq 0,05$.

Tab. 1 Mittelwerte der Abweichungen und Standardabweichungen (SD) für die Richtigkeit aller Testgruppen in μm

Scanner	CS 3500		Omnicam		True Definition	
	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD
1	71.6	7.7	28.2	8.5	45.2	13.0
2	52.6	8.9	31.0	8.7	45.8	8.1
3	45.0	5.7	23.7	6,0	50.0	11.1
4	44.1	4.6	22.3	2.1	31.6	7.3
5	43.2	9.8	27.2	7.4	34.8	8.6
6	52.0	11.8	28.0	9.8	43.8	11.0
7	64,0	9,2	26.1	4.3	39.7	6.6

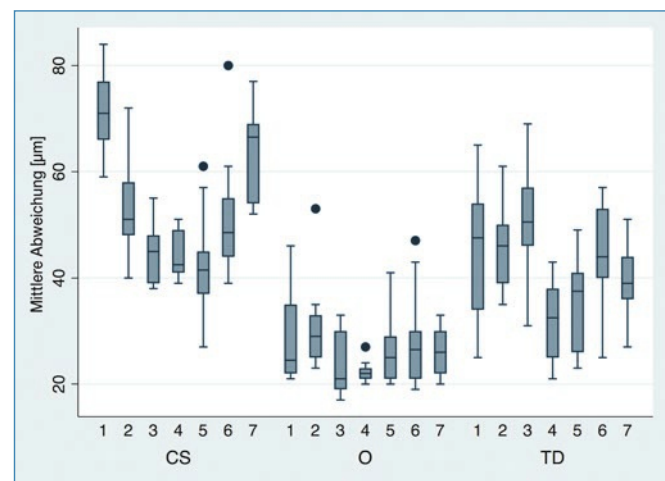


Abb. 2 Mittlere Abweichungen der Richtigkeit aller Testgruppen (CS = CS 3500, O = Omnicam, TD = True Definition)

3. ERGEBNISSE

Die Ergebnisse für die Richtigkeit sind in Tabelle 1 für alle Testgruppen zusammengefasst und in Abbildung 2 grafisch aufbereitet. Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse der Vergleiche zwischen den einzelnen Scanpfaden. Beim CS 3500 wichen die mit den Testpfaden 4 ($44,1 \pm 4,6 \mu\text{m}$) und 5 ($43,2 \pm 9,8 \mu\text{m}$) gewonnenen Datensätze am wenigsten vom Referenzscan ab. Statistisch signifikante Differenzen ergaben sich zwischen den Pfaden 1 und 2 ($19 \pm 3,6 \mu\text{m}$, $p = 0,000$), 1 und 3 ($26,6 \pm 3,6 \mu\text{m}$, $p = 0,000$), 1 und 4 ($27,5 \pm 3,6 \mu\text{m}$, $p = 0,000$), 1 und 5 ($28,4 \pm 3,6 \mu\text{m}$, $p = 0,000$), 1 und 6 ($19,6 \pm 3,6 \mu\text{m}$, $p = 0,000$), 3 und 7 ($19 \pm 3,6 \mu\text{m}$, $p = 0,000$), 4 und 7 ($19,9 \pm 3,6 \mu\text{m}$, $p = 0,000$) sowie 5 und 7 ($20,8 \pm 3,6 \mu\text{m}$, $p = 0,000$). Die visuelle Auswertung zeigte große Abweichungen von mehr als $100 \mu\text{m}$ insbesondere in den Molarenregionen

Tab. 2 Mittlere Abweichungen mit Standardfehlern der Mittelwerte (SEM) und *p*-Werten für die Vergleiche der einzelnen Scanpfade bezogen auf die Richtigkeit (μm). Signifikante Differenzen ($p \leq 0,05$) sind hervorgehoben.

Scanner	CS 3500			Omnica™			True Definition		
Pfad	Mittel	SEM	<i>p</i> -Wert	Mittel	SEM	<i>p</i> -Wert	Mittel	SEM	<i>p</i> -Wert
1 vs. 2	19,0	3,6	0,000	2,8	3,0	0,990	0,6	3,9	1,000
1 vs. 3	26,6	3,6	0,000	4,5	3,0	0,899	4,8	3,9	0,958
1 vs. 4	27,5	3,6	0,000	5,9	3,0	0,704	13,6	3,9	0,058
1 vs. 5	28,4	3,6	0,000	1,0	3,0	1,000	10,4	3,9	0,308
1 vs. 6	19,6	3,6	0,000	0,2	3,0	1,000	1,4	3,9	1,000
1 vs. 7	7,6	3,6	0,609	2,1	3,0	0,998	5,5	3,9	0,920
2 vs. 3	7,6	3,6	0,609	7,3	3,0	0,444	4,2	3,9	0,979
2 vs. 4	8,5	3,6	0,466	8,7	3,0	0,220	14,2	3,9	0,038
2 vs. 5	9,4	3,6	0,332	3,8	3,0	0,954	11,0	3,9	0,239
2 vs. 6	0,6	3,6	1,000	3,0	3,0	0,986	2,0	3,9	1,000
2 vs. 7	11,4	3,6	0,119	4,9	3,0	0,855	6,1	3,9	0,873
3 vs. 4	0,9	3,6	1,000	1,4	3,0	1,000	18,4	3,9	0,001
3 vs. 5	1,8	3,6	1,000	3,5	3,0	0,970	15,2	3,9	0,018
3 vs. 6	7,0	3,6	0,701	4,3	3,0	0,918	6,2	3,9	0,864
3 vs. 7	19,0	3,6	0,000	2,4	3,0	0,996	10,3	3,9	0,321
4 vs. 5	0,9	3,6	1,000	4,9	3,0	0,855	3,2	3,9	0,995
4 vs. 6	7,9	3,6	0,562	5,7	3,0	0,738	12,2	3,9	0,132
4 vs. 7	19,9	3,6	0,000	3,8	3,0	0,954	8,1	3,9	0,632
5 vs. 6	8,8	3,6	0,419	0,8	3,0	1,000	9,0	3,9	0,500
5 vs. 7	20,8	3,6	0,000	1,1	3,0	1,000	4,9	3,9	0,954
6 vs. 7	12,0	3,6	0,082	1,9	3,0	0,999	4,1	3,9	0,981

(Abbildung 3). Für die Omnicam war die Richtigkeit mit den Pfaden 3 ($23,7 \pm 6 \mu\text{m}$) und 4 ($22,3 \pm 2,1 \mu\text{m}$) am größten. Dabei zeigten sich zwischen den einzelnen Scanpfaden keine signifikanten Unterschiede. Die Datensätze der Herstellerscanpfade zeigten größere Abweichungen, die sich häufig als positive Abweichungen okklusale und bukkale sowie in

Form von negativen Abweichungen im Bereich der oralen Flächen darstellten (Abb 4). Beim True-Definition-Scanner wichen die Datensätze der Pfade 4 ($31,6 \pm 7,3 \mu\text{m}$) und 5 ($34,8 \pm 8,6 \mu\text{m}$) am wenigsten vom Referenzscan ab. Statistisch signifikante Differenzen fanden sich bei diesem System zwischen den Pfaden 2 und 4 ($14,2 \pm 3,9 \mu\text{m}$, $p = 0,038$), 3 und 4 ($18,4 \pm 3,9 \mu\text{m}$, $p = 0,001$) sowie 3 und 5 ($15,2 \pm 3,9 \mu\text{m}$, $p = 0,018$). Alle Scanpfade des True Definition lieferten wellenförmige okklusale Abweichungsmuster. Oral zeigten sich negative Abweichungen, während vestibulär, insbesondere in den Seitenzahnbereichen, häufiger größere positive Abweichungen auftraten (Abbildung 5).

Tab. 3 Mittlere Abweichungen und Standardabweichungen (SD) für die Präzision aller Testgruppen in μm

Scanner	CS 3500		Omnica™		True Definition	
Pfad	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD
1	25,5	5,7	24,3	10,9	31,2	10,6
2	41,8	13,3	15,9	2,6	19,9	5,6
3	33,2	8,3	17,4	5,8	38,7	12,7
4	31,3	8,5	15,4	3,8	24,8	7,6
5	30,2	9,0	18,9	6,9	23,6	10,8
6	40,2	12,1	22,6	9,3	44,8	15,5
7	35,0	9,7	15,1	4,3	35,6	13,3

Die Ergebnisse für die Präzision finden sich in Tabelle 3 zusammengefasst. Abbildung 6 zeigt Grafen für die mittleren Abweichungen, und Tabelle 4 fasst die Vergleiche zwischen den einzelnen Scanpfaden zusammen. Der CS 3500 erreichte die höchste Präzision mit dem Testpfad 1 ($25,5 \pm 5,7 \mu\text{m}$). Statistisch signifikante Differenzen ergaben sich zwischen den Pfaden 1 und 2 ($16,3 \pm 3 \mu\text{m}$, $p = 0,000$), 1 und 6 ($14,7 \pm 3 \mu\text{m}$, $p = 0,001$) sowie 2 und 5 ($11,7 \pm 3 \mu\text{m}$, $p = 0,021$). Von den Omnicam-Datensätzen wichen die mit dem Scanpfad 7 ($15,1 \pm 4,3 \mu\text{m}$) generierten am wenigsten untereinander ab. Es gab statistisch

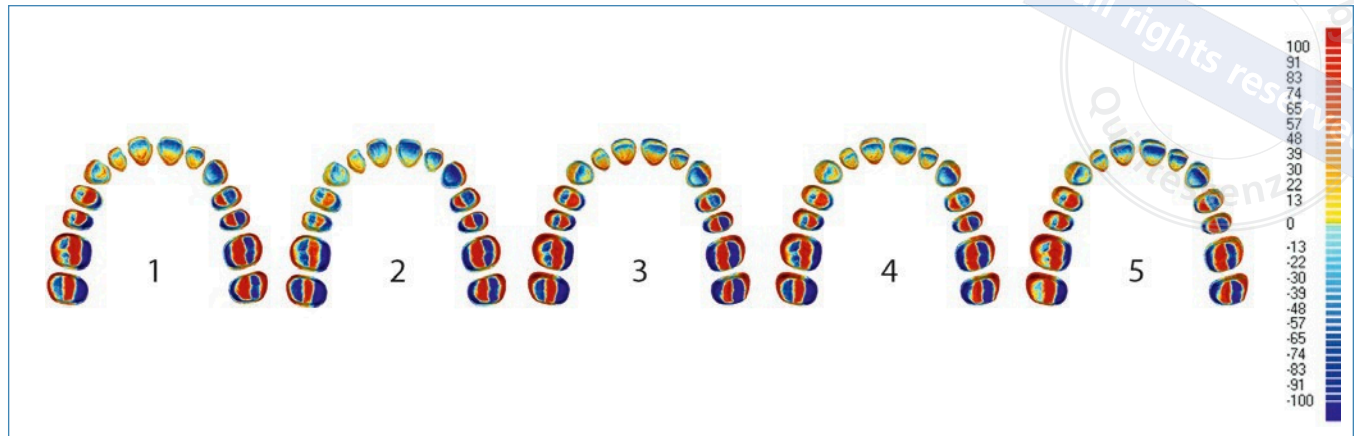


Abb. 3 Überlagerungen der Datensätze des CS 3500 mit dem Referenzscan (dunkelblau $\leq -100 \mu\text{m}$, dunkelrot $\geq +100 \mu\text{m}$ Abweichung)

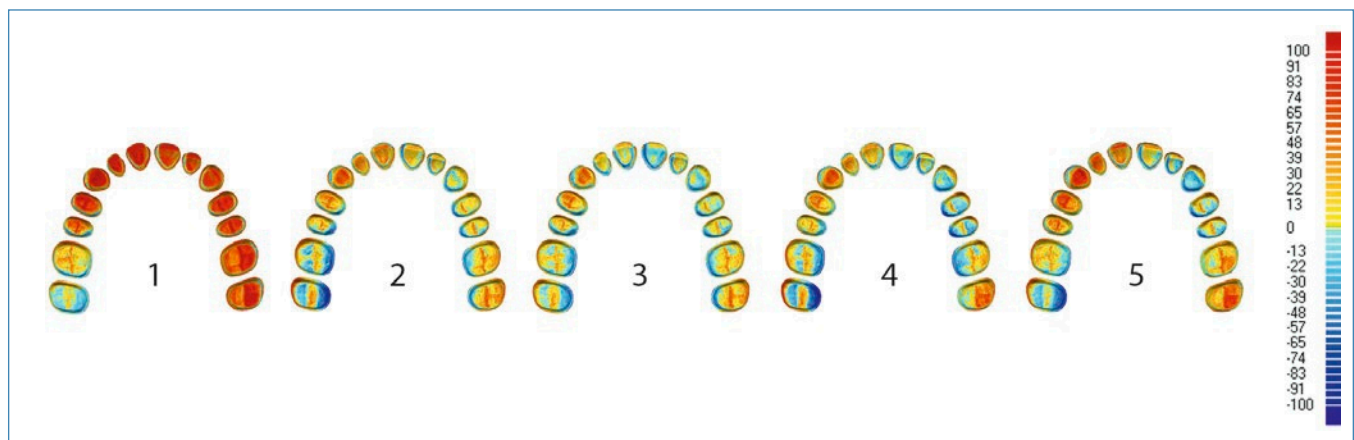


Abb. 4 Überlagerungen der Datensätze der Omnicam mit dem Referenzscan (dunkelblau $\leq -100 \mu\text{m}$, dunkelrot $\geq +100 \mu\text{m}$ Abweichung)

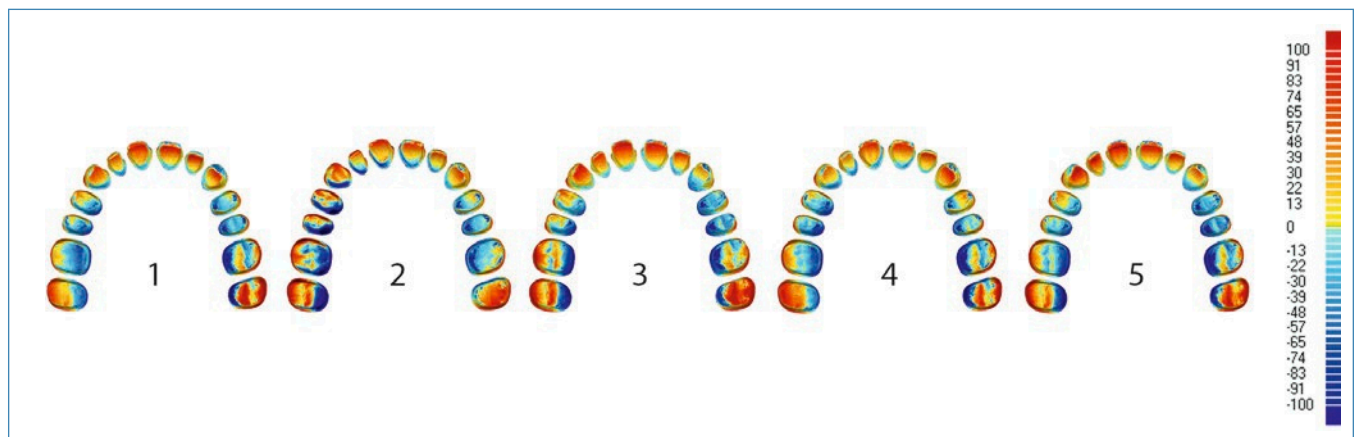


Abb. 5 Überlagerungen der Datensätze des True Definition mit dem Referenzscan (dunkelblau $\leq -100 \mu\text{m}$, dunkelrot $\geq +100 \mu\text{m}$ Abweichung)

signifikante Differenzen zwischen den Pfaden 1 und 2 ($8,4 \pm 2,1 \mu\text{m}$, $p = 0,014$), 1 und 4 ($8,9 \pm 2,1 \mu\text{m}$, $p = 0,006$), 1 und 7 ($9,2 \pm 2,1 \mu\text{m}$, $p = 0,004$) sowie 6 und 7 ($7,6 \pm 2,1 \mu\text{m}$, $p = 0,042$). Der True Definition lieferte die geringsten Abweichungen mit dem Scanpfad 2 ($19,9 \pm 5,6 \mu\text{m}$).

Außerdem waren zwischen den Pfaden 1 und 6 ($13,6 \pm 3,3 \mu\text{m}$, $p = 0,012$), 2 und 3 ($18,8 \pm 3,3 \mu\text{m}$, $p = 0,000$), 2 und 6 ($24,9 \pm 3,3 \mu\text{m}$, $p = 0,000$), 2 und 7 ($15,7 \pm 3,3 \mu\text{m}$, $p = 0,001$), 3 und 4 ($13,9 \pm 3,3 \mu\text{m}$, $p = 0,009$), 3 und 5 ($15,1 \pm 3,3 \mu\text{m}$, $p = 0,003$), 4 und 6 ($20 \pm 3,3 \mu\text{m}$, $p = 0,000$), 5 und 6

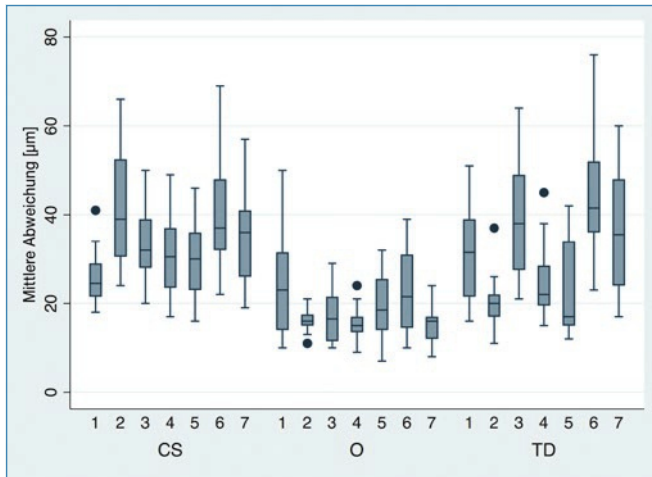


Abb. 6 Mittlere Abweichungen der Präzision aller Testgruppen (CS = CS 3500, O = Omnicam, TD = True Definition)

($21,2 \pm 3,3 \mu\text{m}$, $p = 0,000$) sowie 5 und 7 ($12 \pm 3,3 \mu\text{m}$, $p = 0,047$) statistisch signifikante Unterschiede zu beobachten. Bezüglich der Präzision aller drei Scansysteme fanden sich die größten Abweichungen jeweils vor allem in den Molarenregionen.

Die Scandauer wurde als Summe aus der Durchführung des Scanpfades, dem Nachscannen sowie der Verarbeitung des Datensatzes berechnet. Die durchschnittliche Scandauer (\pm SD) betrug mit dem CS 3500 $34 \pm 3,4$ Minuten, mit der Omnicam $17 \pm 5,7$ Minuten. Der True-Definition-Scanner gab eine maximale Scandauer von sieben Minuten vor. Nach durchgeführten Übungsscans war es zuverlässig möglich, den gesamten Kiefer in sieben Minuten zu erfassen. Allerdings wurden diese sieben Minuten bei allen Scans auch benötigt.

Bezüglich des Lerneffekts war eine höhere Genauigkeit für den Pfad 7 im Vergleich zum Pfad 1 zu beobachten. Signifikant war der Unterschied jedoch nur für die Präzision der Omnicam. Die Lernkurve ist dementsprechend als flach anzusehen.

Tab. 4 Mittlere Abweichungen mit Standardfehlern (SEM) und p -Werten für die Vergleiche der einzelnen Scanpfade bezogen auf die Präzision (μm). Signifikante Differenzen ($p \leq 0,05$) sind hervorgehoben.

Scanner	CS 3500			Omnicam			True Definition		
	Mittel	SEM	p -Wert	Mittel	SEM	p -Wert	Mittel	SEM	p -Wert
1 vs. 2	16,3	3,0	0,000	8,4	2,1	0,014	11,4	3,3	0,074
1 vs. 3	7,7	3,0	0,370	6,9	2,1	0,091	7,5	3,3	0,549
1 vs. 4	5,8	3,0	0,728	8,9	2,1	0,006	6,4	3,3	0,723
1 vs. 5	4,7	3,0	0,883	5,4	2,1	0,364	7,6	3,3	0,523
1 vs. 6	14,7	3,0	0,001	1,7	2,1	0,996	13,6	3,3	0,012
1 vs. 7	9,5	3,0	0,129	9,2	2,1	0,004	4,4	3,3	0,946
2 vs. 3	8,6	3,0	0,231	1,5	2,1	0,998	18,8	3,3	0,000
2 vs. 4	10,6	3,0	0,058	0,6	2,1	1,000	5,0	3,3	0,901
2 vs. 5	11,7	3,0	0,021	3,0	2,1	0,914	3,8	3,3	0,974
2 vs. 6	1,6	3,0	1,000	6,7	2,1	0,113	24,9	3,3	0,000
2 vs. 7	6,8	3,0	0,535	0,9	2,1	1,000	15,7	3,3	0,001
3 vs. 4	2,0	3,0	0,999	2,0	2,1	0,989	13,9	3,3	0,009
3 vs. 5	3,1	3,0	0,985	1,6	2,1	0,997	15,1	3,3	0,003
3 vs. 6	7,0	3,0	0,498	5,3	2,1	0,389	6,1	3,3	0,767
3 vs. 7	1,8	3,0	0,999	2,3	2,1	0,976	3,1	3,3	0,990
4 vs. 5	1,1	3,0	1,000	3,6	2,1	0,823	1,2	3,3	1,000
4 vs. 6	9,0	3,0	0,187	7,3	2,1	0,061	20,0	3,3	0,000
4 vs. 7	3,8	3,0	0,957	0,3	2,1	1,000	10,8	3,3	0,112
5 vs. 6	10,1	3,0	0,086	3,7	2,1	0,791	21,2	3,3	0,000
5 vs. 7	4,9	3,0	0,860	3,9	2,1	0,758	12,0	3,3	0,047
6 vs. 7	5,2	3,0	0,814	7,6	2,1	0,042	9,2	3,3	0,272

4. DISKUSSION

Ziel dieser In-vitro-Studie war es, den Einfluss von sieben unterschiedlichen Scanpfaden auf die Genauigkeit dreier kommerziell verfügbarer Intraoralscanner zu untersuchen. Damit eine digitale Abformung als genau angesehen werden kann, müssen sowohl ihre Richtigkeit als auch ihre Präzision innerhalb eines akzeptablen Toleranzbereichs liegen. Akzeptiert werden Abweichungen von weniger als 100 µm über den gesamten Zahnbogen, da 100 µm Diskrepanz und mehr die Passung der fertiggestellten Restauration beeinträchtigen können⁷. Aufgrund der Ergebnisse wurde die Nullhypothese (I) widerlegt, denn die angewendeten Scanpfade hatten Einfluss auf die Genauigkeit der digitalen Abformung. Für die Richtigkeit der Omnicam wurden allerdings keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Scanpfaden festgestellt. Bereits Passos et al.³⁰ hatten berichtet, dass für die Omnicam keine der angewandten Scanstrategien bezüglich Richtigkeit und Präzision überlegen war.

Insgesamt lieferten die Scanpfade 4 (Schwenken) und 5 (Kreuzen) die höchste Genauigkeit. Beim Pfad 4 wurde die Kamera zunächst okklusal über die Zahnreihe geführt und anschließend jeweils 30° nach oral und nach vestibulär geschwenkt. Für Pfad 5 erfolgte der Scan in langsamen Zickzack-Bewegungen. Auch eine Studie von Ender und Meh⁸ hatte für den geschwenkten Scanpfad die geringsten Abweichungen beobachtet, während ein Überkreuzen der Okklusalfäche signifikant schlechter abschnitt. Im Gegensatz dazu fanden Van der Meer et al.⁴⁸ mit dem Zickzack-Pfad die geringsten Messfehler. Ender und Meh⁸ nannten als Grund für diese konträren Ergebnisse die unterschiedlichen Analysemethoden beider Studien, da sie selbst die Scans in einer 3D-Analysesoftware überlagerten, während Van der Meer et al.⁴⁸ die Neigungen und Abstände dreier Zylinder maßen. Darüber hinaus wurde in der Untersuchung von Van der Meer et al.⁴⁸ nur der Lava-C.O.S.-Scanner mit einem spezifischen Scanprotokoll verwendet. Die getesteten Scanner arbeiteten mit unterschiedlichen Erfassungsprinzipien und unterschieden sich in der Nutzung/Nichtnutzung von Scanpuder. Auch Medina-Sotomayor et al.²⁶ erreichten die besten Ergebnisse mit einem Zickzack-Pfad. Keul und Güth¹⁶ fanden einen Pfad mit Zickzack-Scan beider Quadranten und einer zusätzlichen Überlappung in der Frontzahnregion am besten geeignet. In ähnlicher Weise kamen auch andere Autoren zu dem Ergebnis, dass die Genauigkeit sich durch zusätzliche Bilder in verschiedenen Aufnahmewinkeln und durch Überkreuzen der Okklusalfäche verbessern lässt^{11, 21, 27}. Der Vorteil könnte darin liegen, dass während solcher Scanpfade mehr Informationen aus den schwer zugänglichen Interdentalräumen gewonnen werden. Zudem könnten zusätzliche überlappende Bilder mit anderem Aufnahmewinkel zu einer größeren Informationsdichte insbesondere in den stärker geeigneten, weniger markant strukturierten Frontzahnbereichen führen²⁷. Eine andere Studie beobachtete signifikante Differenzen für Messungen

innerhalb eines Quadranten verglichen mit Messungen der intermolaren oder intercaninen Abstände²³, was auf größere Fehler in der Schneidezahnregion zurückgeführt werden konnte. Folglich scheint die Wahl eines geeigneten Scanpfads, der Matching-Fehler im Frontzahnbereich reduziert, besonders wichtig zu sein, da sich so die häufig im Molarenbereich zu beobachtenden großen Abweichungen minimieren lassen.

In dieser Studie erreichten alle drei getesteten Scanner mit den kürzeren Scanpfaden eine höhere Genauigkeit als mit den vom Hersteller empfohlenen komplexeren Scanpfaden. Hinsichtlich der Richtigkeit wurden für den CS 3500 statistisch signifikante Unterschiede zwischen den kürzeren Pfaden 3, 4 und 5 und den Herstellerpfaden 1 und 7 beobachtet. Für die Omnicam fanden sich dagegen keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen einzelnen Scanpfaden. Die größte Richtigkeit mit diesem Scanner wurde für den Pfad 4 (Schwenken) beobachtet, während mit den Herstellerpfaden 1 und 2 die größten Abweichungen auftraten. Eine mögliche Erklärung dafür, dass die komplexeren Herstellerscanpfade fehleranfälliger sind, könnte sein, dass ein Matching einer größeren Zahl von Einzelbildern erfolgen muss. Insgesamt erreichte die Omnicam höhere Richtigkeits- und Präzisionswerte als der CS 3500. Ursächlich für die größeren Abweichungen des CS 3500 könnten technische Unterschiede (Point-and-Click-System) sowie Unterschiede bei den Überlagerungsalgorithmen, den Filtern und der Auflösung oder Interpolationsfehler sein^{43, 44, 50}. Die Omnicam und der CS 3500 nutzen dieselbe Scantechnik (aktive Triangulation), unterscheiden sich hingegen in ihrem Matching-Algorithmus. Während es sich bei der Omnicam um ein videobasiertes System handelt, ist der CS 3500 ein Point-and-Click-System. Frühere Studien stellten fest, dass videobasierte Systeme den Einzelbildsystemen im Hinblick auf die Genauigkeit der Datenerfassung überlegen zu sein scheinen.^{12, 26} Ferner zeigt die Literatur, dass die verwendete Softwareversion einen signifikanten Einfluss auf die Genauigkeit von Intraoralscannern hat^{9, 13} und dass fortlaufende Weiterentwicklungen bei der Soft- und Hardware mit kontinuierlichen Verbesserungen der Scantechnik einhergehen⁴².

Der True-Definition-Scanner erreichte die höchste Richtigkeit mit den Scanpfaden 4 (Schwenken) und 5 (Kreuzen), wobei die Unterschiede gegenüber dem Pfad 3 (gerade) statistisch signifikant waren. Die mit der Omnicam und dem CS 3500 erreichten Ergebnisse für den Pfad 3 waren nicht signifikant schlechter, allerdings wurden mit dem CS 3500 Probleme beim Matching beobachtet, wenn längere Strecken entlang der Bukkal- und Labialflächen (im Scanpfad 3) gescannt wurden. Schon während der Ausführung des Scanpfads traten sichtbare Matching-Fehler auf. Der Scanpfad 3 war für die Scanner CS 3500 und True Definition offenbar ungeeignet. Es scheint, dass sextantenweises Scannen (Herstellerscanpfad True Definition) keinen Vorteil bietet. Allerdings könnte auch das vertikale Scannen der Frontzahnregion zu den großen Abweichungen geführt haben. Die Autoren einer anderen Studie empfehlen, Rotationen des Intraoralscanners zu vermeiden, und führten die

reduzierte Genauigkeit auf eine Unterbrechung des Matching-Prozesses infolge der Richtungsänderung zurück²⁹.

Für die Präzision fanden sich insgesamt sehr große Abweichungen mit dem Scanpfad 6 (willkürlich gewählter Pfad), was zeigt, dass die Präzision zunimmt, wenn ein geeigneter Scanpfad verwendet wird. Die Präzision der Omnicam war am höchsten, wenn der vom Hersteller vorgeschlagene Scanpfad verwendet wurde. In diesem Punkt besteht ein Unterschied zur Richtigkeit, die bei Verwendung der Herstellerpfade oft statistisch signifikant schlechter war als mit den kürzeren Scanpfaden. Das Scannen mit Überlappung der weniger strukturierten Frontzahnregion kann sich positiv auf die Präzision ausgewirkt haben.

Die Scanzeiten waren in der vorliegenden Studie länger als in anderen Studien^{36,47,51}. Dies könnte daran gelegen haben, dass eine Modellsituation mit präparierten Zähnen verwendet wurde. In anderen In-vitro-Studien wurden unpräparierte Modelle oder solche mit maximal zwei präparierten Zähnen verwendet, sodass es genügte, den Scanner ein einziges Mal über die Interdentalräume zu bewegen. Unpräparierte Zähne erfordern ein weniger dichtes Meshing als präparierte Zähne, deren Präparationsränder durch eine große Zahl von Dreiecken exakt dargestellt werden müssen³⁹. Nach dem Abfahren des Scanpfads wiesen die Datensätze des komplett präparierten Kiefermodells in fast allen Interdentalräumen Datenlücken auf, die erst im Nachgang durch zusätzliche Bilder mit anderem Aufnahmewinkel geschlossen wurden. Da die Ergebnisse dieser Studie besser sind als die von Treesh et al.⁴⁷ (Richtigkeit Omnicam: 48,8 µm, Richtigkeit CS 3500: 84,6 µm) sowie Renne et al.³⁶ (Richtigkeit Omnicam: 95,4 ± 10,7 µm, Richtigkeit CS 3500: 77 ± 6,5 µm), ist davon auszugehen, dass das Nachscannen zumindest keinen negativen Effekt auf die Genauigkeit der Scans hatte. Aufgrund der unterschiedlichen Designs lassen sich diese Studien jedoch nicht direkt vergleichen. Unabhängig davon scheint der CS 3500 mit einer Scandauer von 34 ± 3,4 Minuten (einschließlich Nachscannen und Verarbeitung) für die Erfassung präparierter Kiefer im Praxisalltag ungeeignet zu sein.

In einigen früheren Studien wurde die Scandauer genutzt, um den Lerneffekt bei der Benutzung von Intraoralscannern zu bewerten^{40,49,52}. Auch die Abweichungen oder die Zahl der Bilder wurden zur Bestimmung der Lernkurve herangezogen^{35,37}. Wie erwartet war die Lernkurve unerfahrener Anwender am steilsten^{19,37,49}. Resende et al.³⁷ beobachteten, dass unerfahrene Anwender längere Scanzeiten und eine größere Zahl an Bildern benötigten als erfahrene Nutzer. Radeke et al.³⁵ berichteten, dass die Genauigkeit nicht vom Ausbildungsstand des Anwenders, sondern von dessen Erfahrung beeinflusst wird. In der vorliegenden Studie dagegen diente ein Vergleich der mit demselben Herstellerpfad in Gruppe 1 und Gruppe 7 erreichten Genauigkeit zur Beurteilung des Lerneffekts. Insgesamt lieferte der Pfad 7 bessere Ergebnisse als der Pfad 1, aber die Unterschiede waren statistisch nicht signifikant. Die Lernkurve wurde daher als flach beurteilt. Unter Berücksichtigung früherer Evidenz

vermuten die Autoren, dass der Lerneffekt während der Übungsscans groß, mit Beginn der eigentlichen Studie dagegen nur noch gering war. Somit wurde die Nullhypothese (H₀), dass die Erfahrung des Anwenders die Scangenauigkeit nicht beeinflusst, nur teilweise widerlegt.

Wie in anderen In-vitro-Studien auch, blieben klinische Störfaktoren wie Blut und Speichel, begrenztes Platzangebot, Bewegungen des Patienten und die unterschiedlich reflektierenden Oberflächen von Zähnen und Restaurationen unberücksichtigt^{3,41}. Eine weitere Einschränkung ergibt sich daraus, dass die Scans an mehreren aufeinander folgenden Tagen durchgeführt wurden. Ideal wäre die Durchführung der gesamten Studie an einem Tag gewesen, um gleichbleibende Bedingungen sicherzustellen. Schwankungen von Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Beleuchtung könnten die Ergebnisse beeinflusst haben^{2,18}. Zudem arbeiteten die getesteten Intraoralscanner mit unterschiedlichen Scantechnologien (aktive Triangulation bzw. Active Wavefront Sampling) sowie verschiedenen Erfassungsprinzipien (Videosequenzierung bzw. Einzelbilderfassung) und Oberflächenvorbehandlungen (Scanpuder bzw. kein Scanpuder). Ein Einfluss dieser systemspezifischen Faktoren ist nicht bekannt. Er kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, da jedes Scansystem spezielle Eigenschaften hat. Zudem wurde ein Best-fit-Algorithmus für die Überlagerung der Datensätze verwendet. Bei großen Datensätzen ganzer Kiefer summieren sich die Fehler infolge der Punkt-zu-Punkt-Zuordnung während der Überlagerung. Es ist unklar, ob und wie sehr die Ergebnisse durch diese Überlagerungsfehler beeinflusst wurden. Dennoch gilt die Überlagerung digitaler Modelle als Standardverfahren für 3D-Oberflächenvergleiche⁹. Weitere In-vivo-Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Scanpfade auf die Genauigkeit von Ganzkieferscans sowie In-vitro-Studien mit präparierten Ganzkiefermodellen wären sinnvoll.

5. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Innerhalb des methodischen Rahmens dieser Studie ist zu schlussfolgern, dass beim Scannen komplett präparierter Kiefer der Scanpfad Einfluss auf die Genauigkeit hat. Dabei sind manche Scansysteme weniger sensitiv für unterschiedliche Scanpfade als andere. Allgemein sollten mit allen drei getesteten Scansystemen möglichst kurze Scanpfade verwendet und Scans über lange Distanzen vermieden werden. Der auftretende Lerneffekt ist als gering anzusehen. Das Scannen ganzer präparierter Zahnreihen mit einem Point-and-Click-System kann nicht empfohlen werden.

INTERESSENKONFLIKTE

Die Autoren erklären, dass ihrerseits keine Interessenkonflikte im Zusammenhang mit dem Gegenstand der vorliegenden Untersuchung bestehen.

LITERATUR

1. Amornvit P, Rokaya D, Sanohkan S: Comparison of accuracy of current ten intraoral scanners. *Biomed Res Int.* 2021; 2021: 2673040
2. Arakida T, Kanazawa M, Iwaki M, Suzuki T, Minakuchi S: Evaluating the influence of ambient light on scanning trueness, precision, and time of intraoral scanner. *J Prosthodont Res.* 2018; 62(3): 324–9
3. Bocklet C, Renne W, Mennito A, Bacro T, Latham J, Evans Z et al.: Effect of scan substrates on accuracy of 7 intraoral digital impression systems using human maxilla model. *Orthod Craniofac Res.* 2019; 22 Suppl 1: 168–74
4. Dentsply Sirona. Gebrauchsanweisung für die Aufnahmeeinheit CEREC AC mit CEREC Omnicam. 2021. Available from <https://manuals.sirona.com/de/digitale-zahnheilkunde/cerec-chairsideloesungen/cerec-omnicam-ac.html>. Accessed April 16, 2022
5. Diker B, Tak O: Comparing the accuracy of six intraoral scanners on prepared teeth and effect of scanning sequence. *J Adv Prosthodont.* 2020; 12(5): 299–306
6. Ender A, Attin T, Mehl A: In vivo precision of conventional and digital methods of obtaining complete-arch dental impressions. *J Prosthet Dent.* 2016; 115(3): 313–20
7. Ender A, Mehl A: In-vitro evaluation of the accuracy of conventional and digital methods of obtaining full-arch dental impressions. *Quintessence Int.* 2015; 46(1): 9–17
8. Ender A, Mehl A: Influence of scanning strategies on the accuracy of digital intraoral scanning systems. *Int J Comput Dent.* 2013; 16(1): 11–21
9. Ender A, Zimmermann M, Mehl A: Accuracy of complete- and partial-arch impressions of actual intraoral scanning systems in vitro. *Int J Comput Dent.* 2019; 22(1): 11–9
10. Fleming PS, Marinho V, Johal A: Orthodontic measurements on digital study models compared with plaster models: a systematic review. *Orthod Craniofac Res.* 2011; 14(1): 1–16
11. 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. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2013; 144(3): 471–8
12. Hack GD, Patzelt SB: Evaluation of the accuracy of six intraoral scanning devices: an in-vitro investigation. *J Am Dent Assoc.* 2015; 10(4)
13. Haddadi Y, Bahrami C, Isidor F: Effect of software version on the accuracy of an intraoral scanning device. *Int J Prosthodont.* 2018; 31(4): 375–6
14. International Organization for Standardization. Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results – Part 1: General principles and definitions. 03.120.30 (ISO 5725-1:1994) 2012 [Available from: <https://www.iso.org/standard/11833.html>]. Accessed March 20, 2022
15. Jeong ID, Lee JJ, Jeon JH, Kim JH, Kim HY, Kim WC: Accuracy of complete-arch model using an intraoral video scanner: an in vitro study. *J Prosthodont Res.* 2016; 115(6): 755–9
16. Keul C, Güth J-F: Einfluss der Scanstrategie auf die Genauigkeit digitaler Ganzkieferabformungen. *ZWR-Das deutsche Zahnärzteblatt.* 2018(127): 14–23
17. Keul C, Güth JF: Accuracy of full-arch digital impressions: an in vitro and in vivo comparison. *Clin Oral Investig.* 2020; 24(2): 735–45
18. Kihara H, Hatakeyama W, Komine F, Takafuji K, Takahashi T, Yokota J et al.: Accuracy and practicality of intraoral scanner in dentistry: a literature review. *J Prosthodont Res.* 2020; 64(2): 109–13
19. Kim J, Park JM, Kim M, Heo S, Shin IH, Kim M: Comparison of experience curves between two 3-dimensional intraoral scanners. *J Prosthet Dent.* 2016; 116(2): 221–30
20. Kuhr F, Schmidt A, Rehmann P, Wostmann B: A new method for assessing the accuracy of full arch impressions in patients. *J Dent.* 2016; 55: 68–74
21. Kurz M, Attin T, Mehl A: Influence of material surface on the scanning error of a powder-free 3D measuring system. *Clin Oral Investig.* 2015; 19(8): 2035–43
22. Kustrzycka D, Marschang T, Mikulewicz M, Grzebieluch W: Comparison of the accuracy of 3d images obtained from different types of scanners: a systematic review. *J Healthc Eng.* 2020; 2020: 8854204
23. Kwon M, Cho Y, Kim DW, Kim M, Kim YJ, Chang M: Full-arch accuracy of five intraoral scanners: in vivo analysis of trueness and precision. *Korean J Orthod.* 2021; 51(2): 95–104
24. Latham J, Ludlow M, Mennito A, Kelly A, Evans Z, Renne W: Effect of scan pattern on complete-arch scans with 4 digital scanners. *J Prosthet Dent.* 2020; 123(1): 85–95
25. Luthardt RG, Quaas S, Rudolph H: Maschinelle Herstellung von Zahnersatz. In: Tinschert J NG, editor. *Oxidkeramiken und CAD/CAM-Technologien: Deutscher Zahnärzte Verlag;* 2007. p. 67–83
26. Medina-Sotomayor P, Pascual-Moscardo A, Camps I: Accuracy of four digital scanners according to scanning strategy in complete-arch impressions. *PLoS One.* 2018; 13(9): e0202916
27. Mehl A, Ender A, Mormann W, Attin T: Accuracy testing of a new intraoral 3D camera. *Int J Comput Dent.* 2009; 12(1): 11–28
28. Müller P, Ender A, Joda T, Katsoulis J: Impact of digital intraoral scan strategies on the impression accuracy using the TRIOS Pod scanner. *Quintessence Int.* 2016; 47(4): 343–9
29. Oh KC, Park JM, Moon HS: Effects of scanning strategy and scanner type on the accuracy of intraoral scans: a new approach for assessing the accuracy of scanned data. *J Prosthodont.* 2020; 29(6): 518–23
30. Passos L, Meiga S, Brigagao V, Street A: Impact of different scanning strategies on the accuracy of two current intraoral scanning systems in complete-arch impressions: an in vitro study. *Int J Comput Dent.* 2019; 22(4): 307–19
31. Patzelt SB, Bishti S, Stampf S, Att W: Accuracy of computer-aided design/computer-aided manufacturing-generated dental casts based on intraoral scanner data. *J Am Dent Assoc.* 2014; 145(11): 1133–40
32. Patzelt SB, Emmanouilidi A, Stampf S, Strub JR, Att W: Accuracy of full-arch scans using intraoral scanners. *Clin Oral Investig.* 2014; 18(6): 1687–94
33. Patzelt SB, Lamprinos C, Stampf S, Att W: The time efficiency of intraoral scanners: an in vitro comparative study. *J Am Dent Assoc.* 2014; 145(6): 542–51
34. Patzelt SB, Vonau S, Stampf S, Att W: Assessing the feasibility and accuracy of digitizing edentulous jaws. *J Am Dent Assoc.* 2013; 144(8): 914–20
35. Radeke J, Vogel AB, Schmidt F, Kilic F, Reply S, Beyersmann J et al.: Trueness of full-arch IO scans estimated based on 3D translational and rotational deviations of single teeth-an in vitro study. *Clin Oral Investig.* 2022; 26(3): 3273–86
36. Renne W, Ludlow M, Fryml J, Schurch Z, Mennito A, Kessler R et al.: Evaluation of the accuracy of 7 digital scanners: an in vitro analysis based on 3-dimensional comparisons. *J Prosthet Dent.* 2017; 118(1): 36–42
37. Resende CCD, Barbosa TAQ, Moura GF, Tavares LDN, Rizzante FAP, George FM et al.: Influence of operator experience, scanner type, and scan size on 3D scans. *J Prosthet Dent.* 2021; 125(2): 294–9
38. Revilla-Leon M, Frazier K, da Costa JB, Kumar P, Duong ML, Khajotia S et al.: Intraoral scanners: an American Dental Association Clinical Evaluators Panel survey. *J Am Dent Assoc.* 2021; 152(8): 669–70 e2
39. Richert R, Goujat A, Venet L, Viguie G, Viennot S, Robinson P et al.: Intraoral scanner technologies: a review to make a successful impression. *J Healthc Eng.* 2017; 2017: 8427595
40. Roth I, Czigola A, Joos-Kovacs GL, Dalos M, Hermann P, Borbely J: Learning curve of digital intraoral scanning – an in vivo study. *BMC Oral Health.* 2020; 20(1): 287
41. Sacher M, Schulz C, Deyhle H, Jäger K, Müller B: Accuracy of commercial intraoral scanners. *J Med Imaging (Bellingham).* 2021; 8(3): 035501
42. Schmidt A, Klusmann L, Wostmann B, Schlenz MA: Accuracy of digital and conventional full-arch impressions in patients: an update. *J Clin Med.* 2020; 9(3)
43. Schubinski P: Die digitale Abformung – Computer Aided Impressioning (CAI). *Kurzreferat 2011 – 40. Jahrestagung der Arbeitsgemeinschaft Dentale Technologie eV;* 2011
44. Seelbach P, Brueckel C, Wostmann B: Accuracy of digital and conventional impression techniques and workflow. *Clin Oral Investig.* 2013; 17(7): 1759–64
45. Stefanelli LV, Franchina A, Pranno A, Pellegrino G, Ferri A, Pranno N et al.: Use of intraoral scanners for full dental arches: could different strategies or overlapping software affect accuracy? *Int J Environ Res Public Health.* 2021; 18(19)
46. Su TS, Sun J: Comparison of the repeatability between intraoral digital scanner and extraoral digital scanner: an in-vitro study. *J Prosthodont Res.* 2015; 59(4): 236–42
47. Treesh JC, Liacouras PC, Taft RM, Brooks DI, Raiciulescu S, Ellert DO et al.: Complete-arch accuracy of intraoral scanners. *J Prosthet Dent.* 2018; 120(3): 382–8
48. Van der Meer WJ, Andriessen FS, Wismeijer D, Ren Y: Application of intra-oral dental scanners in the digital workflow of implantology. *PLoS One.* 2012; 7(8): e43312

49. Waldecker M, Trebing C, Rues S, Behnisch R, Rammelsberg P, Bomicke W: Effects of training on the execution of complete-arch scans. Part 1: Scanning Time. *Int J Prosthodont.* 2021; 34(1): 21–6
50. Wiora G: Optische 3D-Messtechnik: Präzise Gestaltvermessung mit einem erweiterten Streifenprojektionsverfahren. Heidelberg 2001
51. 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.* 2014; 14: 10
52. Zarauz C, Sailer I, Pitta J, Robles-Medina M, Hussein AA, Pradies G: Influence of age and scanning system on the learning curve of experienced and novel intraoral scanner operators: a multi-centric clinical trial. *J Dent.* 2021; 115: 103860
53. Zhang T, Wei T, Zhao Y, Jiang M, Yin X, Sun H: Evaluating the accuracy of three intraoral scanners using models containing different numbers of crown-prepared abutments. *J Dent Sci.* 2022; 17(1): 204–10
54. Zimmermann M, Mehl A, Mormann WH, Reich S: Intraoral scanning systems – a current overview. *Int J Comput Dent.* 2015; 18(2): 101–29

Accuracy of computerized optical impression making: the influence of different scan paths

Keywords: computerized optical impression making, digital impression, optical impression, scan path, scan pattern

Introduction: The aim of this in vitro study was to investigate the influence of different scan paths on the accuracy of digital full arch impressions obtained by 3 scanning systems. **Materials and methods:** A maxillary model with 14 prepared teeth was digitized with a reference scanner (ATOS III Triple Scan) and 3 test scanners (CS 3500, CEREC Omnicam and True Definition) using 7 different scan paths. In test path 1 and 2, the manufacturers' suggested scan paths were investigated. In test path 3, 4, and 5 shorter scan paths were utilized. For comparison, a randomly selected scan path was performed in test path 6. Test path 7 was a repetition of scan path 1 to investigate whether there was a learning effect. The scans were digitally superimposed (Geomagic Control), values for trueness and precision were evaluated and statistical analyses performed. **Results:** Path 4 (trueness: $32.7 \pm 10.3 \mu\text{m}$, precision: $23.8 \pm 9.5 \mu\text{m}$) and path 5 (trueness: $35.1 \pm 10.7 \mu\text{m}$, precision: $24.2 \pm 10 \mu\text{m}$) revealed the highest accuracy. For trueness measurements of Omnicam, no statistically significant differences were found between individual scan paths. Overall, path 7 showed a higher accuracy than path 1, however, the differences were not statistically significant. **Conclusion:** Ideally, the selected scan path should be as short as possible, and long-distance scans should be avoided. The accuracy of Omnicam appeared not to be dependent on a specific scan path. For all three scanners, the accuracy was clinically acceptable, however, the scan of a prepared full arch with a point-and-click system (CS 3500) cannot be recommended.



Lea Sophia Protz

Dr. med. dent. Lea Sophia Protz, Wissenschaftliche Mitarbeiterin (Korrespondenzautorin) Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik, Universitätsklinikum Düsseldorf, Heinrich-Heine Universität Düsseldorf, Düsseldorf, Deutschland

Prof. Dr. med. dent. Ralf Joachim Kohal, Leitender Oberarzt; PD Dr. med. dent. Sebastian Berthold Maximilian Patzelt Klinik für Zahnärztliche Prothetik, Department für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde, Universitätsklinikum Freiburg, Universität Freiburg, Freiburg, Deutschland

PD Dr. med. dent. Sebastian Berthold Maximilian Patzelt, Eigentümer Private Zahnarztpraxis, Zimmern o. R., Deutschland

Dr. sc. hum. Kirstin Vach, Wissenschaftliche Mitarbeiterin Institut für Medizinische Biometrie und Statistik und Klinik für Zahnerhaltungskunde und Parodontologie, Department für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde, Universitätsklinikum Freiburg, Universität Freiburg, Freiburg, Deutschland

Gary David Hack, DDS, Dozent Department of Advanced Oral Sciences and Therapeutics, University of Maryland School of Dentistry, Baltimore, MD, USA

Kontakt: Dr. Lea Sophia Protz, Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik, Universitätsklinikum der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, leasophia.prott@med.uni-duesseldorf.de

Abb. 1, 3, 4, 5 und Portätfoto: L. S. Protz; Abb. 2 und 6: K. Vach