

Aus der Abteilung für Handchirurgie, Plastische Chirurgie und Ästhetische Chirurgie
des Klinikums der Universität München (LMU)

Direktor: Univ.-Prof. Dr. med. Riccardo E. Giunta

3D Oberflächenbildgebung:

Innovationen und Stellenwert in der Plastischen Chirurgie



Kumulative Habilitationsschrift zur Erlangung der Venia Legendi
für das Fach Plastische und Ästhetische Chirurgie

vorgelegt von

Dr. med. Konstantin Christoph Koban

aus Berlin

2025

Inhalt

1.	Einleitung.....	3
2.	Ziele der kumulativen Habilitationsarbeit.....	6
3.	Verzeichnis der dieser kumulativen Habilitationsschrift zugrundeliegenden Originalarbeiten	7
4.	Ergebnisse und Diskussion der eigenen Publikationen	8
	4.1. Validierung mobiler 3D Scanner und intraoperative Anwendungsmöglichkeiten	8
	4.2. Interdisziplinäre Anwendung mobiler 3D Scanner	23
	4.3. Neue Möglichkeiten der Extremitäten- und Ganzkörperaufnahmen.....	30
5.	Ausblick	38
6.	Literaturverzeichnis.....	40
7.	Abkürzungsverzeichnis.....	46
8.	Abbildungsverzeichnis.....	47
9.	Vollständiges Schriftenverzeichnis.....	48
10.	Danksagung	55

1. Einleitung

Die Plastische und Ästhetische Chirurgie hat in den vergangenen Jahrzehnten zahlreiche technologische Entwicklungen erfahren, die die diagnostischen und therapeutischen Möglichkeiten des Fachgebiets erweitert haben. Insbesondere Fortschritte in der bildgebenden Diagnostik haben dazu beigetragen, chirurgische Eingriffe präziser zu planen, intraoperative Abläufe zu optimieren und postoperative Ergebnisse objektiv zu beurteilen (24,67,84,89,90). Eine detaillierte Analyse anatomischer Strukturen anhand der Körperoberfläche ist für chirurgische Eingriffe essenziell. Sie ermöglicht sowohl eine präzise Beurteilung der Ausgangssituation als auch eine standardisierte Dokumentation der Behandlungsergebnisse (18,29,83,89,90).

Traditionell wurden zur prä- und postoperativen Analyse plastisch-chirurgischer Eingriffe zweidimensionale Methoden wie die Fotodokumentation oder manuelle Messverfahren verwendet. Diese sind jedoch mit verschiedenen Einschränkungen verbunden, insbesondere hinsichtlich der Reproduzierbarkeit und der Erfassung volumetrischer Veränderungen (29,40,85). Die fehlende Möglichkeit, dreidimensionale Geometrien präzise zu erfassen, kann die Beurteilung von Formveränderungen erschweren und die Vergleichbarkeit von Messungen beeinflussen (8,19,50,66,67). Die Einführung der dreidimensionalen Oberflächenbildgebung (three-dimensional surface imaging, 3DSI) stellt eine technologische Weiterentwicklung dar, die es ermöglicht, die Körperoberfläche mit hoher Präzision und Objektivität zu erfassen (53,58,72,90,94). Durch die dreidimensionale Dokumentation von Form- und Volumenveränderungen können chirurgische Planungen exakter durchgeführt und postoperative Ergebnisse standardisiert bewertet werden (22,23,26,55,67,71,77).

Die dreidimensionale Oberflächenbildgebung basiert auf verschiedenen physikalischen Prinzipien, die je nach System spezifische Vor- und Nachteile aufweisen. Eine etablierte Methode ist die Stereophotogrammetrie, bei der mehrere synchronisierte Kameras aus verschiedenen Winkeln Bilder aufnehmen, um eine dreidimensionale Rekonstruktion der Oberfläche zu erzeugen. Diese Technik ermöglicht eine detaillierte Wiedergabe anatomischer Strukturen, setzt jedoch eine präzise Positionierung der Kameras und des Untersuchungsbereichs voraus (8,16,19,63,66,90,94). Alternativ können Laserscanning-Verfahren genutzt werden, bei denen Laserstrahlen zur direkten Vermessung der Oberflächengeometrie eingesetzt werden. Diese Technik liefert besonders präzise Tiefeninformationen, ist jedoch meist auf stationäre Systeme beschränkt (27,52,54,56,73,92). Eine weitere Methode ist die strukturierte Lichtprojektion, bei dem definierten Muster auf die Körperoberfläche projiziert und die daraus resultierenden Verzerrungen analysiert werden, um Tiefendaten zu berechnen (10,39,45,46,48,65,70,81). Zusätzlich existiert die Moiré-Interferometrie,

bei der durch die Überlagerung periodischer Lichtmuster Körperkonturen visualisiert werden (2,75,95).

Die Anwendung der dreidimensionalen Oberflächenbildgebung hat sich in verschiedenen Bereichen der Plastischen Chirurgie etabliert (9). Sie wird unter anderem zur detaillierten Analyse anatomischer Strukturen, zur Beurteilung von Weichteilveränderungen und zur quantitativen Dokumentation postoperativer Ergebnisse in zahlreichen Körperregionen wie dem Gesicht und der Brust genutzt. Die Technologie bietet eine verbesserte Möglichkeit zur Beurteilung von Gewebevolumina, Symmetrieverhältnissen und formverändernden Eingriffen. Sie kann zudem zur Verlaufskontrolle von Heilungsprozessen eingesetzt werden, um postoperative Veränderungen standardisiert zu erfassen (1,9,26,27,42,51,66,67,78).

Trotz der Vorteile, die diese Technologie bietet, bestehen derzeit noch verschiedene Herausforderungen, die ihre breite klinische Anwendung begrenzen. Stationäre dreidimensionale Bildgebungssysteme erfordern eine feste Installation und sind in der Regel an spezialisierte Untersuchungsräume gebunden (46,65,90,91). Dies führt dazu, dass ihr Einsatz häufig auf präoperative Analysen und Beratungen, sowie wissenschaftliche Untersuchungen beschränkt bleibt. Zudem sind viele etablierte Systeme mit hohen Anschaffungskosten verbunden, was ihre Verfügbarkeit in klinischen Einrichtungen einschränkt (42,89). Eine mögliche Lösung zur Überwindung dieser Limitationen liegt in der Entwicklung mobiler dreidimensionaler Bildgebungssysteme, die eine flexiblere und potenziell kosteneffizientere Alternative.

Die Einführung mobiler Systeme bringt jedoch neue Herausforderungen mit sich, insbesondere bezüglich der Messgenauigkeit, der Reproduzierbarkeit und der praktischen klinischen Nutzbarkeit. Während stationäre Systeme unter kontrollierten Bedingungen arbeiten, können mobile Systeme durch äußere Faktoren wie Bewegungsartefakte oder variierende Lichtverhältnisse beeinflusst werden (46,48,65,81). Darüber hinaus fehlen bislang standardisierte Protokolle für die Erfassung und Auswertung mobiler dreidimensionaler Scans, was die Vergleichbarkeit der Messwerte erschwert. Eine umfassende wissenschaftliche Validierung ist daher erforderlich, um die Potenziale, aber auch die Limitationen dieser Technologie systematisch zu untersuchen und daraus praxisrelevante Anwendungsmöglichkeiten abzuleiten.

Die vorliegende Habilitationsschrift verfolgt das Ziel, die Anwendungsmöglichkeiten und methodische Validierung mobiler dreidimensionaler Oberflächenbildgebung in der plastischen Chirurgie zu untersuchen. Dabei werden verschiedene mobile Systeme hinsichtlich ihrer Messgenauigkeit, Reproduzierbarkeit und klinischen Anwendbarkeit evaluiert. Ein besonderer Fokus liegt auf der Untersuchung unterschiedlicher Einsatzbereiche, um die Eignung dieser Technologie für

die präoperative Analyse, die Verlaufskontrolle und die standardisierte Dokumentation chirurgischer Ergebnisse zu bewerten. Dabei soll geprüft werden, inwieweit mobile dreidimensionale Scanner eine sinnvolle Ergänzung oder potenziell eine Alternative zu stationären Systemen darstellen können.

Neben der technischen Validierung wird in dieser Arbeit die klinische Integration verschiedener dreidimensionaler Oberflächenbildgebungstechnologien bewertet. Dabei wird untersucht, welche Herausforderungen sich bei der Implementierung in den klinischen Alltag ergeben und welche Anpassungen erforderlich sind, um die Technologie für verschiedene Einsatzgebiete zu optimieren. Zudem wird analysiert, ob und in welchem Umfang dreidimensionale Bildgebung außerhalb der Plastischen Chirurgie Anwendung finden kann.

Die Habilitationsschrift umfasst sieben wissenschaftliche Publikationen, die sich mit unterschiedlichen Aspekten der mobilen dreidimensionalen Bildgebung befassen. Dabei werden sowohl methodische als auch klinische Fragestellungen adressiert, um ein umfassendes Bild der Potenziale und Limitationen dieser Technologie zu erhalten. In einem abschließenden Ausblick werden zukünftige Forschungsfragen und mögliche Weiterentwicklungen diskutiert, um den Weg für eine breitere klinische Anwendung zu ebnen. Damit trägt die Habilitationsschrift dazu bei, die Plastische Chirurgie durch innovative Bildgebungstechnologien weiterzuentwickeln und neue Maßstäbe für die Patientenversorgung zu setzen.

2. Ziele der kumulativen Habilitationsarbeit

Diese Habilitationsschrift untersucht die methodische Validierung, klinische Integration und Erweiterung der Anwendungsfelder mobiler dreidimensionaler Oberflächenscanner (3D Scanner) in der Plastischen Chirurgie. Stationäre Systeme bieten zwar eine hohe Präzision, sind jedoch in ihrer Anwendung limitiert. Mobile Scanner könnten hingegen eine flexiblere und breiter einsetzbare Alternative darstellen.

Es fehlen jedoch umfassende wissenschaftliche Untersuchungen zur Messgenauigkeit, Reproduzierbarkeit und praktischen Anwendbarkeit dieser Technologie unter realen klinischen Bedingungen.

Vor diesem Hintergrund verfolgt diese Arbeit folgende Ziele:

- Methodische Validierung: Untersuchung der Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit mobiler 3D Scanner im Vergleich zu stationären Referenzsystemen und konventionellen volumetrischen Messmethoden.
- Klinische Integration: Analyse des Potenzials mobiler Scanner für präoperative Planungen, intraoperative Verlaufskontrollen und die standardisierte postoperative Dokumentation chirurgischer Ergebnisse.
- Erweiterung der Anwendungsfelder: Evaluierung potenzieller Einsatzmöglichkeiten über die Plastische Chirurgie hinaus, insbesondere in der Onkologie, Strahlentherapie und der volumetrischen Analyse von Ganzkörper- oder Extremitätenveränderungen.

Durch die systematische Untersuchung dieser Aspekte soll diese Habilitationsschrift zur wissenschaftlichen Fundierung und Weiterentwicklung der 3D Oberflächenbildgebung beitragen und neue Standards für deren klinische Anwendung definieren.

3. Verzeichnis der dieser kumulativen Habilitationsschrift zugrundeliegenden Originalarbeiten

1. Koban KC, Li Z, Etzel L, Schenck TL, Härtnagl F, Giunta RE.
Objective evaluation of volumetric changes during breast augmentation using intraoperative three-dimensional surface imaging. *J Plast Reconstr Aesthet Surg*. 2022 Sep;75(9):3094-3100. doi: 10.1016/j.bjps.2022.06.008.
2. Koban KC, Etzel L, Li Z, Pazos M, Schönecker S, Belka C, Giunta RE, Schenck TL, Corradini S.
Three-dimensional surface imaging in breast cancer: a new tool for clinical studies? *Radiat Oncol*. 2020 Feb 28;15(1):52. doi: 10.1186/s13014-020-01499-2.
3. Koban KC*, Perko P* (geteilte Erstautorenschaft), Etzel L, Li Z, Schenck TL, Giunta RE.
Validation of two handheld devices against a non-portable three-dimensional surface scanner and assessment of potential use for intraoperative facial imaging. *J Plast Reconstr Aesthet Surg*. 2020 Jan;73(1):141-148. doi: 10.1016/j.bjps.2019.07.008
4. Etzel L*, Koban KC* (geteilte Erstautorenschaft), Li Z, Frank K, Giunta RE, Schenck TL.
Whole-body surface assessment - implementation and experiences with 360° 3D whole-body scans: opportunities to objectively monitor the extremities and the body trunk. *Handchir Mikrochir Plast Chir*. 2019 Aug;51(4):240-248. doi: 10.1055/a-0836-2683.
5. Koban KC, Cotofana S, Frank K, Green JB, Etzel L, Li Z, Giunta RE, Schenck TL.
Precision in 3-Dimensional Surface Imaging of the Face: A Handheld Scanner Comparison Performed in a Cadaveric Model. *Aesthet Surg J*. 2019 Mar 14;39(4):NP36-NP44. doi: 10.1093/asj/sjy242.
6. Koban KC, Titze V, Etzel L, Frank K, Schenck T, Giunta R.
Quantitative volumetric analysis of the lower extremity: validation against established tape measurement and water displacement. *Handchir Mikrochir Plast Chir*. 2018 Dec;50(6):393-399. doi: 10.1055/a-0770-3445.
7. Koban KC*, Härtnagl F* (geteilte Erstautorenschaft), Titze V, Schenck TL, Giunta RE.
Chances and limitations of a low-cost mobile 3D scanner for breast imaging in comparison to an established 3D photogrammetric system. *J Plast Reconstr Aesthet Surg*. 2018 Oct;71(10):1417-1423. doi: 10.1016/j.bjps.2018.05.017.

Die im Folgenden dargestellten Abbildungen und Tabellen entstammen zu Teilen o.g. Originalarbeiten. Die Quellen sind in der jeweiligen Annotation vermerkt. Sollten Modifikationen vorgenommen worden sein, sind diese in der Annotation erkenntlich.

4. Ergebnisse und Diskussion der eigenen Publikationen

4.1. Validierung mobiler 3D Scanner und intraoperative Anwendungsmöglichkeiten

Publikation 1

Koban KC*, Härtnagl F* (geteilte Erstautorenschaft), Titze V, Schenck TL, Giunta RE.

Chances and limitations of a low-cost mobile 3D scanner for breast imaging in comparison to an established 3D photogrammetric system.

J Plast Reconstr Aesthet Surg. 2018 Oct;71(10):1417-1423. doi: 10.1016/j.bjps.2018.05.017.

Hintergrund

Verschiedene Verfahren haben sich als hilfreich zur Quantifizierung anthropometrischer und volumetrischer Zustände und Veränderungen in der Brustchirurgie erwiesen (5,6,13,33,53). Während im klinischen Alltag die Bewertung und Planung operativer Eingriffe an der Brust typischerweise mittels Maßbandmessungen der klassischen Brustdimensionen durchgeführt werden, können diese nur eingeschränkt die Volumina beider Brüste als auch volumetrische Veränderungen wiedergeben (5,6,13,53). Alternative Verfahren wie die Computertomographie und Magnetresonanztomographie ermöglichen grundsätzlich die Berechnung des Brustvolumens. Allerdings sind ihre Anwendungsmöglichkeiten in der klinischen Praxis durch mehrere Faktoren eingeschränkt. Neben den hohen Kosten beider Verfahren stellt insbesondere die Strahlenexposition bei der Computertomographie ein relevantes Kriterium dar (57). Zudem erfolgt die Bildgebung in der Regel in liegender Position, wodurch die Beurteilung anatomischer Verhältnisse in der für die chirurgische Planung relevanten aufrechten Haltung limitiert ist. Daher werden diese Methoden vorrangig in komplexen Fällen mit ausgeprägten Asymmetrien oder in rekonstruktiven Szenarien eingesetzt (10,12,24).

Hierbei hat sich die dreidimensionale Oberflächenbildgebung als wertvolles Instrument in der präoperativen Planung und postoperativen Verlaufskontrolle von Brustoperationen in der Plastischen Chirurgie etabliert. Es ermöglicht eine objektive Beurteilung von Brustparametern wie Brustdimensionen, Volumina, Projektion und Symmetrie, wodurch eine evidenzbasierte Entscheidungsfindung im plastisch-chirurgischen Kontext erleichtert werden kann (10,22,25,53,55,67,88).

Mit Beachtung der Entwicklungen der letzten 20 Jahre wurden verschiedene nicht-invasive Technologien zur 3D Erfassung in der Brustchirurgie eingesetzt und validiert, darunter Stereophotogrammetrie(26,69), Laserscanning (22,25,53,55) und Infrarotsensoren (35).

Ein maßgeblicher Kritikpunkt vieler der damals eingesetzten medizinischen Aufnahmesysteme zur 3D Oberflächenbildgebung waren jedoch ein festverbauter Aufstellungsort, limitierte Aufnahmewinkel ausgewählter Körperregionen sowie hohe Anschaffungskosten von häufig bis zu 40.000,- Euro (89). In unserer Abteilung wurde hierbei das Vectra XT® System (Canfield Scientific, Parsippany, NJ, USA) im klinischen Alltag in der Brustchirurgie eingesetzt (84).

Im Rahmen unserer Forschungsprojekte wurde erstmalig ein kostengünstiger, handgeführter 3D Oberflächenscanner (Sense™, 3D Systems, USA) für den Haushalt veröffentlicht. Erste Untersuchungen deuten darauf hin, dass der 3D Scanner prinzipiell eine nutzerfreundliche Erfassung klassischer anatomischer Regionen wie Gesicht und Brust im Rahmen prä- und postoperativer Planungen ermöglichen könnte. Darüber hinaus eröffnet die Mobilität des ortsungebundenen Systems neue Anwendungsfelder, wie dem intraoperativen Einsatz als auch die 3D Erfassung weiterer Körperregionen. Die tatsächliche klinische Nutzbarkeit und Validität dieser Ansätze bedürfen jedoch weiterer systematischer Untersuchungen.

Ziel dieser Studie war es, die Leistungsfähigkeit eines neuen mobilen 3D Handscanners als kostengünstiges Werkzeug für die dreidimensionale Oberflächenbildgebung der Brust zu bewerten und ihn mit einem etablierten medizinischen System zu vergleichen. Die Untersuchung konzentriert sich auf die Validierung der Messgenauigkeit, Reproduzierbarkeit und potenzielle klinische Anwendungen des mobilen 3D Scanner in der Brustchirurgie.

Methoden

In dieser prospektiven Studie wurden 3D Oberflächenaufnahmen von 45 Patientinnen vor und nach unterschiedlichen plastisch-chirurgischen Eingriffen an der Brust mittels des handgeführten, mobilen und mit 500,- Euro kostengünstigen 3D Scanner Sense™ durchgeführt. Als 3D Referenzkamera diente die in unserer Abteilung etablierte Vectra XT®. Hierbei wurden 22 Mammaaugmentationen mit anatomischen Silikonimplantaten, 16 Mammareduktionsplastiken und sieben einseitige Brustrekonstruktionen mittels DIEP-Lappenplastiken untersucht. Beide Systeme wurden zur 3D Bildgebung vor und sechs Monate nach der Operation eingesetzt und miteinander verglichen. Die Untersuchung beinhaltete die 3D Erfassung und Auswertung von klassischen linearen Brustdimensionen, Volumenmessungen und eine 3D Oberflächenanalyse. Zur Validierung der Reproduzierbarkeit wurden 20 Patientinnen dreimal von drei verschiedenen Untersuchern gescannt.

Die Daten wurden mit der Mirror® Software analysiert, wobei eine automatische Überlagerung der 3D Modelle erfolgte, um Fehler bei der Volumen- und Distanzberechnung zu minimieren.

Ergebnisse

Die digitalen Brustmessungen mit beiden Systemen zeigten eine starke Korrelation mit minimalen Abweichungen. Allein für den Mamillen-Unterbrust-Abstand (N-IMF) zeigte sich in den Sense™ Modellen eine statistisch signifikante, aber klinisch nicht relevante Abweichung ($p = 0,003$) gegenüber den Referenzaufnahmen. Die mittlere Abweichung betrug hier $-1,18 \text{ mm}$ (95 % Konfidenzintervall: $-1,95$ bis $-0,42 \text{ mm}$), was als akzeptabel für klinische Anwendungen gilt.

Die digitalen Volumenmessungen zeigten keine signifikanten Abweichungen der mittels Sense erfassten 3D Brustvolumina bei hoher Korrelation und einer mittleren Differenz von $-5,11 \pm 32,10 \text{ mL}$ (95 % Konfidenzintervall: $-67,70$ bis $57,49 \text{ mL}$; $p = 0,134$). Innerhalb der 95 % Konfidenzgrenzen betrug die prozentuale Differenz weniger als 10 % des mittleren digitalen Volumens ($-1,14 \pm 4,66 \%$). Die überlagerte Subtraktionsvolumenanalyse zeigte eine mittlere Abweichung von $14,86 \pm 14,41 \text{ mL}$.

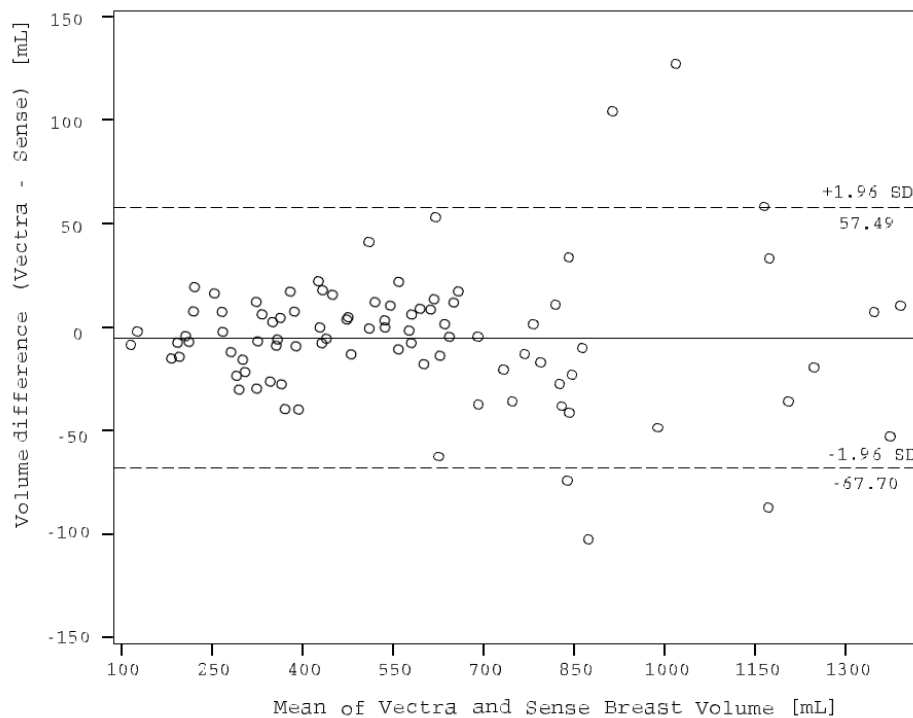


Abbildung 1: Bland-Altman Darstellung der relativen Volumendifferenzen zwischen den 3D Aufnahmegaräten. Modifiziert aus (46).

Zur Bestimmung der Messgenauigkeit wurde der Root Mean Square Fehler (RMSE) für die gesamte Brust sowie für einzelne Quadranten berechnet. Die durchschnittliche Oberflächende deviation betrug

1,50 ± 0,82 mm RMSE, wobei die größten Abweichungen im unteren lateralen Quadranten der Brust beobachtet wurden, mit einem maximalen RMSE von 6,75 mm.

Wiederholte 3D Scans mit dem Sense™ Scanner derselben Patientinnen ergaben eine hohe Korrelation sowohl durch einen einzelnen Untersucher (ICC 0,961, $p < 0,001$, mittlerer RMSE 0,489 ± 0,188 mm) als auch zwischen den drei verschiedenen Untersuchern (ICC 0,920, $p < 0,001$, mittlerer RMSE 0,636 ± 0,279 mm).

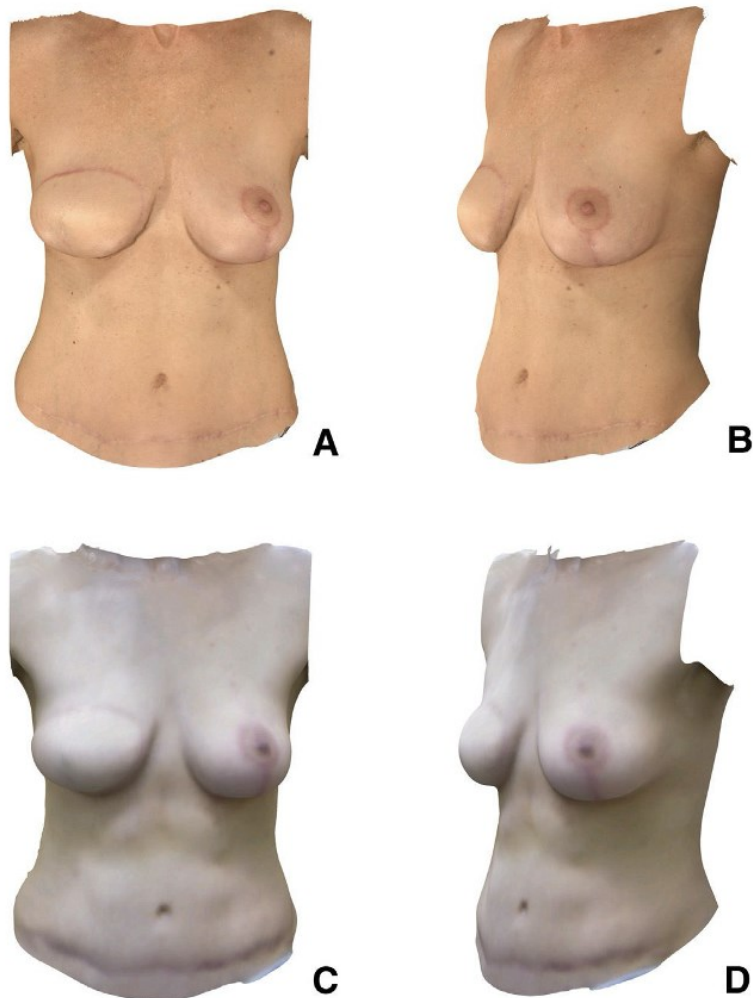
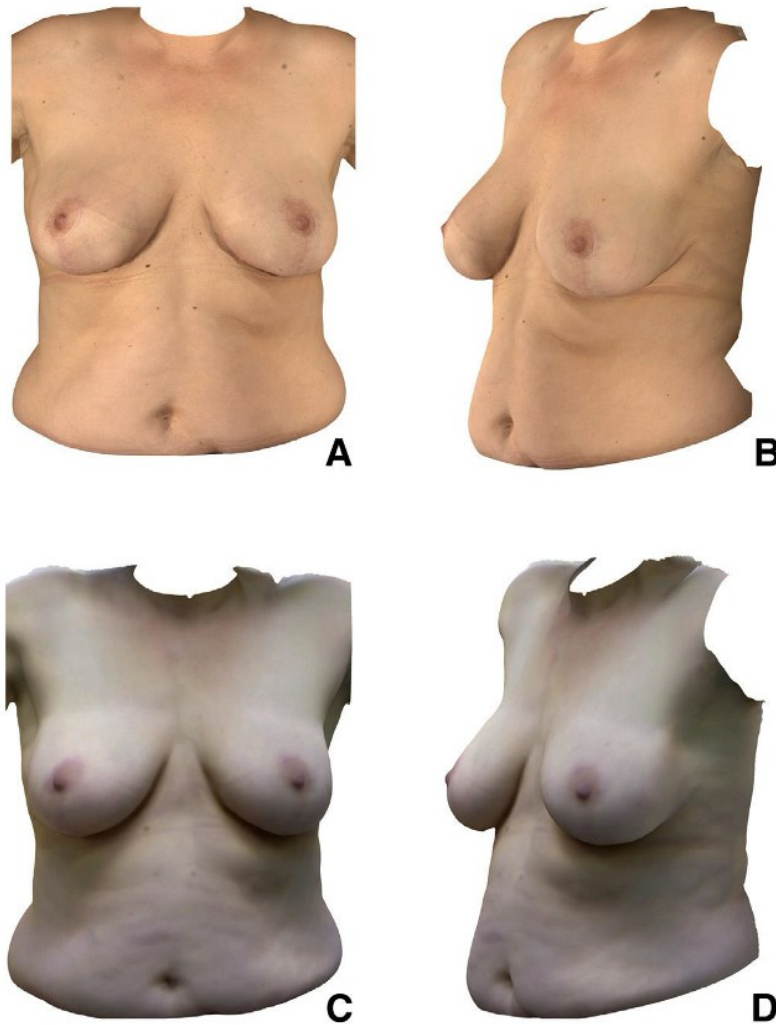


Abbildung 2: Obere Reihe – Vectra XT Aufnahme (A, B). Untere Reihe – Sense 3D Aufnahme (C, D). 3D Oberflächenaufnahmen einer Patientin nach Brustrekonstruktion der rechten Seite und Bruststraffung der linken Seite zur Harmonisierung im Vergleich der Aufnahmeverfahren. Modifiziert aus (46).



*Abbildung 3: Obere Reihe – Vectra XT Aufnahme (A, B). Untere Reihe – Sense 3D Aufnahme (C, D).
3D Oberflächenaufnahmen einer Patientin nach Brustreduktion beidseitig im Vergleich der
Aufnahmeverfahren. Modifiziert aus (46).*

Diskussion und Eingliederung in das übergeordnete Thema

Viele der verfügbaren medizinischen Systeme zur 3D Oberflächenbildgebung in der Plastischen Chirurgie sind durch hohe Anschaffungskosten und eine fehlende Mobilität infolge ihres festen Installationsortes eingeschränkt. Beide Faktoren schränken die weitere Verbreitung dieser Technologie als auch die Anwendbarkeit außerhalb eines Untersuchungszimmers deutlich ein. In dieser Studie konnten wir erstmalig den Einsatz eines kommerziell erhältlichen, handgeführten und mobilen 3D Scanner von unter 500,- Euro zur 3D Oberflächenbildgebung in der Brustchirurgie untersuchen. Hierunter sahen wir eine Chance zu einer weiteren Verbreitung dieser Technologie bei niedrigeren Kosten jedoch äquivalenter 3D Aufnahmequalität.

Die Ergebnisse dieser Validierungsstudie zeigen, dass der Sense™ Scanner eine ausreichende und reproduzierbare Genauigkeit für die Messung von linearen Brustdimensionen, als auch Brustvolumina gegenüber einem etablierten 3D Referenzsystem bietet. Ein für alle 3D Aufnahmesysteme gleiches Problem besteht bei ptotischen Befunden, in welchen durch die nicht einsehbare Unterbrustfalte mit Obstruktion fehlerhafte 3D Rekonstruktionen und Werte entstehen können(34,36). Die geringere Texturauflösung, sowie mögliche Artefakte durch Bewegungen im Rahmen der 3D Aufnahmen stellen Limitierungen da, welche die klinische Anwendung in bestimmten Szenarien einschränken könnten. Dennoch stimmen die Ergebnisse mit früheren Arbeiten überein, die zeigen, dass mobile 3D Scanner eine praktikable Alternative zu teureren stationären Systemen darstellen können(74). Besonders bei der Verlaufsdokumentation postoperativer Brustveränderungen könnte diese Technologie eine wertvolle Ergänzung darstellen.

Mobile Handscanner wie der Sense™ Scanner bieten eine kosteneffiziente Möglichkeit zur 3D Brustbildgebung. Sie ermöglichen präzise Messungen von Volumen- und Oberflächenveränderungen mit hoher Reproduzierbarkeit und Benutzerfreundlichkeit. Zwar sind weitere Entwicklungen erforderlich, um die Bildqualität und Messgenauigkeit weiter zu optimieren, doch zeigt diese Studie das Potenzial solcher handgeführten und kostengünstigen 3D Scanner für den klinischen Alltag.

Diese Arbeit unterstreicht die Bedeutung mobiler 3D Scanner in der plastischen Chirurgie als Innovation mit hohem Stellenwert. Sie zeigt, dass kostengünstige Systeme eine valide Alternative zu etablierten stationären Systemen darstellen können. Die gewonnenen Erkenntnisse tragen zur Weiterentwicklung der plastisch-chirurgischen Diagnostik und Therapieüberwachung bei und legen den Grundstein für zukünftige klinische Studien zur Optimierung dieser Technologie.

Publikation 2

Koban KC, Li Z, Etzel L, Schenck TL, Härtnagl F, Giunta RE.

Objective evaluation of volumetric changes during breast augmentation using intraoperative three-dimensional surface imaging.

J Plast Reconstr Aesthet Surg. 2022 Sep;75(9):3094-3100. doi: 10.1016/j.bjps.2022.06.008.

Hintergrund

Eine maßgebliche Innovation mobiler, handgeführter 3D Scanner gegenüber früheren Systemen sind die erweiterten Anwendungsmöglichkeiten durch den flexiblen Einsatz auch außerhalb der gewohnten Aufstellungsorte wie in Untersuchungsräumen (46,74). Während zuvor der Nutzen der 3D Oberflächenbildgebung vor allem auf der präoperativen Beratung und Planung (26,71,77,84), sowie postoperative Verlaufskontrollen in der Brustchirurgie limitiert war(23,55), so könnten die neuen handgeführten 3D Scanner auch den Nutzen der 3D Brustbildgebung im Operationssaal ermöglichen. Zwar gab es mit großen 3D Laserscannern (86) schon damalige Ansätze die 3D Oberflächenerfassung für intraoperative Zwecke einzusetzen, jedoch blieb aus den zuvor genannten Gründen keine benutzerfreundliche Anwendung seitdem beschrieben. Von klinischer Relevanz könnten insbesondere komplexe Brustoperationen, wie der Korrektur angeborener Brustasymmetrien oder der intraoperativen Symmetrieanpassung bei schweren Asymmetrien wie der tubulären Brust, darstellen. Hierbei lassen sich durch klassische präoperative Anzeichnungen nur bedingt eine Volumensymmetrie ableiten.

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus unserer Arbeit in der Publikation 1 mit dem Sense™ 3D Scanner für die 3D Brustbildgebung sollte dessen Einsatz zur intraoperativen 3D Brustbildgebung und 3D volumetrischen Auswertung untersucht werden. Hierbei wurde ein möglichst standardisiertes Patientenkollektiv ausgewählt. Ziel dieser Arbeit ist es, intraoperativ erfasste Brustvolumina mit bekannten Implantatvolumina und einem etablierten Referenzsystem (Vectra XT®) zu vergleichen.

Methoden

In dieser prospektiven Studie wurden 40 Patientinnen eingeschlossen, die sich einer bilateralen submuskulären Brustaugmentation mit Silikonimplantaten unterzogen. Ausschlusskriterien waren vorangegangene Brustoperationen, angeborene Brustdeformitäten, signifikante Brustptose oder zusätzliche ästhetische Eingriffe wie Mastopexien oder Fetttransfer. Die Brustaugmentation erfolgte hierbei über einen inframammären Zugang. Es erfolgte im Rahmen der Beratung und

Verlaufsdokumentation präoperative und postoperative 3D Aufnahmen mit der Vectra XT® 3D Referenzkamera. Zum Vergleich erfolgten intraoperativ jeweils zum Beginn der Operation vor Schnitt als auch am Ende nach Implantateinlage und Hautnaht die intraoperative 3D Brustbildgebung mittels des tragbaren Sense™ 3D Scanner in circa 60° aufgesetzter Patientenposition. Die 3D Brustvolumetrie erfolgte sowohl für die Referenzaufnahmen als auch für die intraoperativen Aufnahmen. Als Referenz zur intraoperativen 3D Brustvolumenveränderung dienten die bekannten Implantatvolumina.

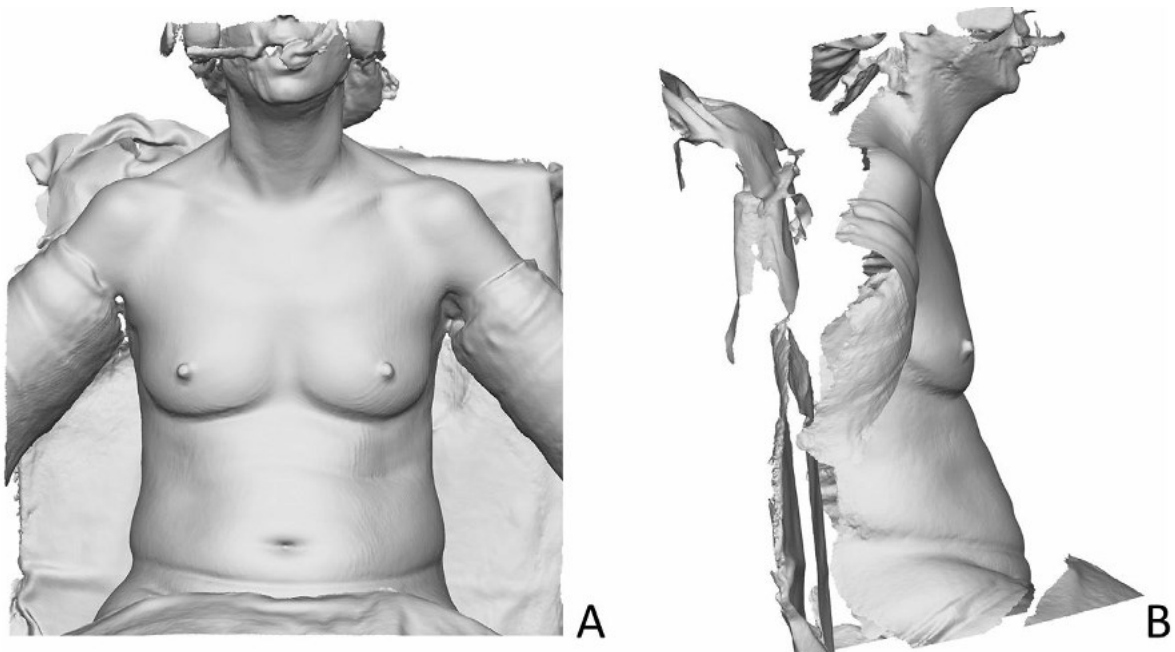


Abbildung 4: Exemplarische Darstellung eines intraoperativen 3D Oberflächenscans in sitzender Positionierung. Modifiziert aus (47).

Ergebnisse

Die intraoperativ gemessenen 3D Brustvolumenveränderung mit den Sense 3D Modellen zeigten gegenüber den bekannten Implantatvolumina eine hohe Korrelation ($r = 0,954$) und keine signifikanten Abweichungen ($p = 0,124$). Die mittlere absolute Abweichung betrug $5,8 \pm 24,3$ mL (95 % Konfidenzintervall: $-41,8$ bis $53,3$ mL), was einer relativen Abweichung von $2,0 \pm 9,0$ % entspricht.

Im Vergleich der intraoperativ erhobenen 3D Brustvolumina mittels des mobilen Sense 3D Scanners gegenüber den präoperativ und postoperativ erhobenen 3D Brustvolumina des Vectra XT® Referenzsystems zeigten sich sowohl präoperativ als auch postoperativ hohe Korrelationen ($r = 0,947$ präoperativ, $r = 0,976$ postoperativ) und keine signifikanten Unterschiede ($p = 0,162$ präoperativ; $p = 0,811$ postoperativ).

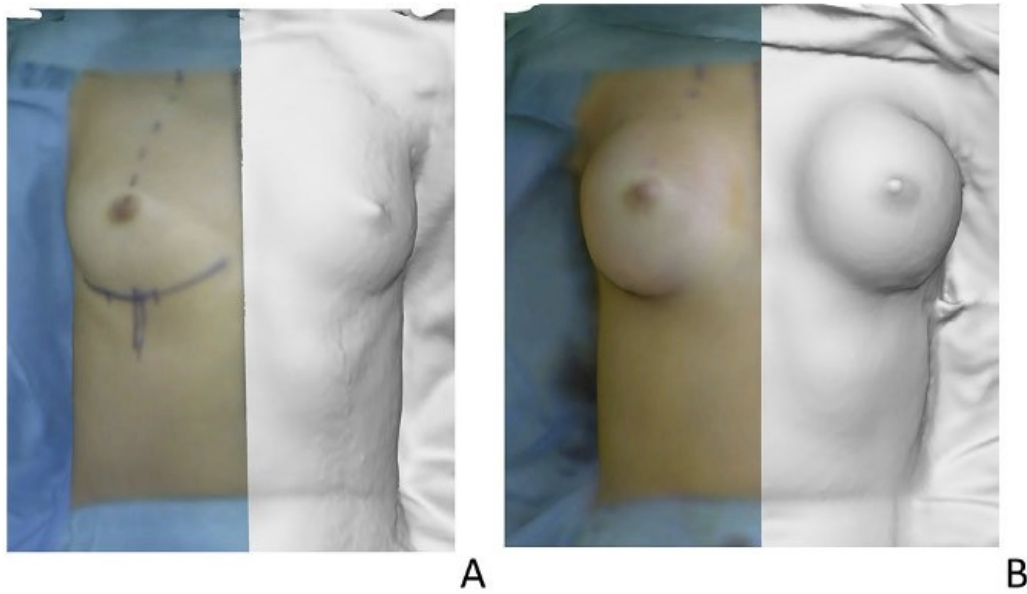


Abbildung 5: Präoperativer (A) und postoperativer (B) 3D Scan einer Patientin nach bilateraler Brustaugmentation mit 260 mL Implantaten. Darstellung als getrennte texturierte und roh Version. Modifiziert aus (47).

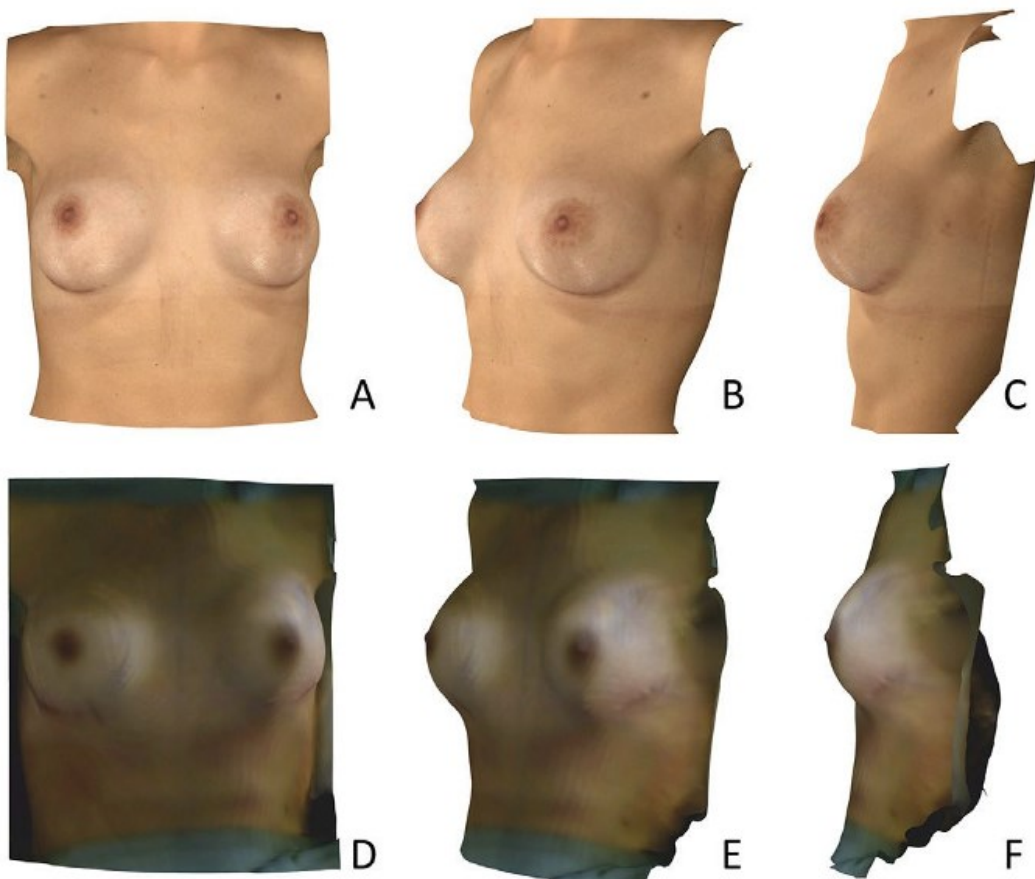


Abbildung 6: 3D Oberflächenaufnahme mittels Vectra (A – C) und Sense (D – F) im postoperativen und intraoperativen Vergleich nach bilateraler Brustaugmentation. Modifiziert aus (47).

Die durchschnittliche Zeit für die intraoperative 3D Erfassung betrug $17,9 \pm 4,8$ Sekunden (Bereich: 11–31 s). Die Zeit von der Bildaufnahme bis zur Berechnung der absoluten Volumenänderung betrug $106,9 \pm 10,1$ Sekunden (Bereich: 84–126 s).

Diskussion und Eingliederung in das übergeordnete Thema

3D Oberflächenaufnahmen wurden traditionell zur präoperativen Beratung, Planung und zur postoperativen Verlaufskontrolle in der Brustchirurgie eingesetzt (58). Diese Studie beschreibt erstmals, dass kostengünstige, tragbare Scanner auch intraoperativ eine zuverlässige Quantifizierung der Brustvolumenveränderungen ermöglichen. Die Ergebnisse dieser Studie bestätigen, dass der Sense™ Scanner eine präzise und effiziente Methode zur intraoperativen Quantifizierung volumetrischer Veränderungen während der Brustaugmentation darstellt. Die hohe Übereinstimmung mit den Implantatvolumina und den Referenzmessungen unterstreicht das Potenzial dieser Technologie, insbesondere bei der Symmetrieanpassung und der Auswahl optimaler Implantatgrößen.

Während voraussichtlich in einer Vielzahl der brustformverändernden Eingriffe in der Plastischen Chirurgie neben der präoperativen Anzeichnung und intraoperativen Messung mittels Lineals keine 3D Brustbildgebung benötigt werden, so hat diese Technologie eine hohe klinische Relevanz für komplexe volumetrische Brustasymmetrien in denen operationskritische Schritte alleinig anhand von subjektivem Empfinden und eingeschränkt objektiven Messparametern entschieden werden (86).

Ein häufig vermuteter Kritikpunkt der Verlängerung der Operationsdauer durch lange 3D Aufnahmezeiten und Auswertungszeiten konnten wir mit den erhobenen Werten widerlegen (86). Die Unterbrechung durch die kontaktlose 3D Erfassung betrug maximal 31 Sekunden. Die Zeit von der 3D Aufnahmen bis zur fertigen 3D Volumetrie betrug im Durchschnitt unter 2 Minuten.

Im Rahmen komplexer Brustoperationen mit Hinblick auf 3D Volumenveränderungen, wie beispielhaft der Resektion von Haut und Unterhaut, Brustdrüse, Tumoren, der Stielbildung, dem Einsetzen von Implantaten oder Expandern und gestielten oder freien Gewebetransferen, können sich diese vielfältig auf die Oberflächenkontur und Brustvolumina auswirken. Aus diesem Grund haben wir mittels der Brustaugmentation durch Implantate eine standardisierte Patientengruppe zur objektiven 3D Volumetrie untersucht. Weiterführende Studien für komplexere volumetrische Veränderungen und Symmetriebestimmungen sind hierbei zukünftig notwendig.

Die bereits in Publikation 1 beschriebenen bekannten Limitationen mobiler 3D Scanner könnten insbesondere für große ptotische Brüste präoperativ eine Einschränkung darstellen. Hierbei ist

jedoch meist mit einer Aufhebung dieses Faktors im Rahmen der Operation zu rechnen, so dass gerade am Ende der Operation zur Überprüfung auf Oberflächen- und Volumensymmetrie der Einsatz der intraoperativen 3D Brustbildgebung objektive Parameter und damit eine wertvolle Ergänzung für die intraoperative Entscheidungsfindung in der Brustchirurgie darstellen könnte.

Somit ermöglicht der intraoperative Einsatz des 3D Scanners eine objektive und reproduzierbare Quantifizierung von Brustvolumenveränderungen während der Operation. Die hohe Genauigkeit und Benutzerfreundlichkeit des Sense™ Scanners unterstreichen das Potenzial dieser Technologie zur Optimierung der Brustsymmetrie und der individuellen Implantatauswahl.

Diese Arbeit erweitert die Erkenntnisse aus der Publikation 1, indem sie die klinische Anwendbarkeit des mobilen 3D Scanner von der 3D Brustbildgebung auf den intraoperativen Einsatz überträgt. Zusammen unterstreichen beide Studien die Innovation und den hohen Stellenwert mobiler 3D Oberflächenaufnahmesysteme, die Entscheidungsfindung in der Plastischen Chirurgie in Zukunft potenziell unterstützen zu können.

Publikation 3

Koban KC*, Perko P* (geteilte Erstautorenschaft), Etzel L, Li Z, Schenck TL, Giunta RE.
Validation of two handheld devices against a non-portable three-dimensional surface scanner and assessment of potential use for intraoperative facial imaging.
J Plast Reconstr Aesthet Surg. 2020 Jan;73(1):141-148. doi: 10.1016/j.bjps.2019.07.008

Hintergrund

Parallel zu den Forschungsprojekten der 3D Oberflächenaufnahme und Volumetrie in der Brustchirurgie aus Publikation 1 und Publikation 2 wurde der innovative Faktor mobiler 3D Scanner auch für die Gesichtschirurgie untersucht.

Da die Dokumentation chirurgischer Eingriffe in der modernen Medizin insbesondere in der plastischen und rekonstruktiven Gesichtschirurgie eine zentrale Bedeutung hat, war die uns bekannte niedrige Texturqualität des Sense™ 3D Scanners eine klare Einschränkung gegenüber dem etablierten Vectra XT® System in der 3D Oberflächenerfassung des Gesichtes (46,49). Zudem zeigt das Gesicht deutlich komplexere geometrische Formen wie der Augen-, Nasen- und Mundregion gegenüber der Brustregion, weshalb eine Evaluation der 3D Oberflächenqualität notwendig war. Mit

dem mobilen, handgeführten Artec Eva® (Artec 3D, Luxemburg) 3D Scanner wurde eine industrielle Lösung mit Strukturlicht Technologie aus der Automobil- und Film Branche mit hochauflösender 3D Erfassung und Texturqualität erstmalig eingeführt, dessen Anschaffungskosten mit circa 15.000.- Euro zwar unterhalb häufig eingesetzter medizinischer 3D Aufnahmesysteme lag, jedoch deutlich teurer gegenüber dem kostengünstigen Sense™ 3D Scanner war.

Ziel dieser Studie war es, die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit dieser beiden tragbaren 3D Scanner im Vergleich zum etablierten Vectra XT® System zu validieren und ihr Potenzial für die intraoperative Anwendung, insbesondere während der Rhinoplastik, zu untersuchen.

Methoden

Die Validierung der mobilen 3D Scanner Sense und Artec Eva® erfolgte in drei verschiedenen Untersuchungsgruppen: einem standardisierten Puppenkopf, 30 gesunden Probanden unter standardisierten Bedingungen und zehn Patientinnen und Patienten, die sich einer Rhinoplastik unterzogen. Das Vectra XT® System diente als Referenz für alle 3D Aufnahmen.

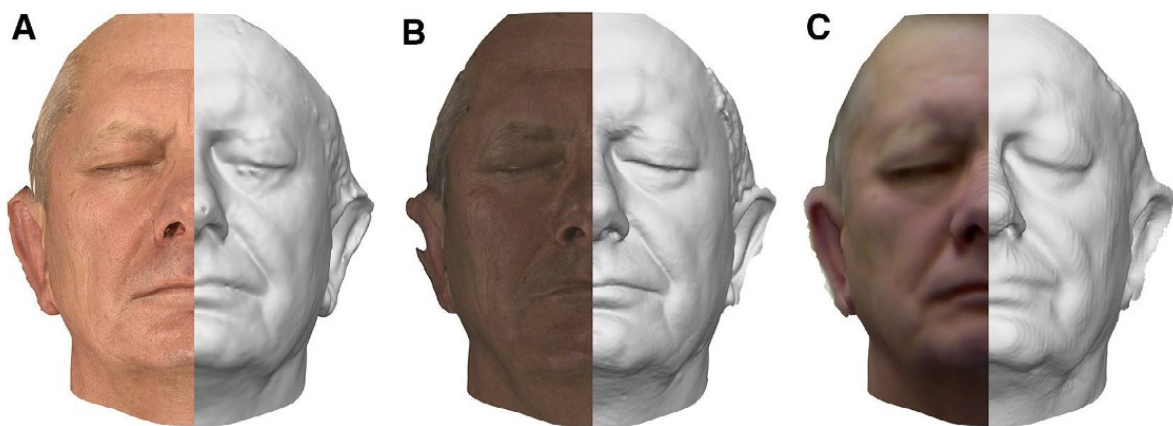


Abbildung 7: 3D Oberflächenaufnahme mittels Vectra (A), Artec Eva (B) und Sense (C) in texturierter und roh Version aufgeteilt. Modifiziert aus (48).

Zur Bewertung der Genauigkeit und Reproduzierbarkeit wurden mehrere 3D Aufnahmen von zwei unabhängigen Untersuchern am selben sowie unterschiedlichen Tagen durchgeführt. Die Gesichtsanalyse wurde nach ästhetischen Untereinheiten vorgenommen (32), um regionale Unterschiede in der 3D Oberflächengenauigkeit zu identifizieren. Die Daten wurden mit der Mirror® Software analysiert, wobei eine automatische Überlagerung der 3D Modelle erfolgte. Die 3D Oberflächenabweichung zwischen den mobilen 3D Scannern gegenüber der Referenz 3D Kamera wurde mittels Root-Mean-Square-Error (RMSE) berechnet. Ein RMSE kleiner als 1 mm wurde in der Literatur als hohes Qualitätsmerkmal beschrieben (16).

Ergebnisse

Die Untersuchungen am Puppenkopf zeigten, dass der Artec Eva mit einer durchschnittlichen RMSE von $0,131 \pm 0,013$ mm eine vergleichbare Genauigkeit wie das Referenzsystem Vectra XT® erreichte. Der Sense™ 3D Scanner wies mit einer RMSE von $0,341 \pm 0,045$ mm eine höhere Abweichung auf.

In der Analyse der gesunden Probanden lag die durchschnittliche RMSE für die vollständige Gesichtserfassung bei beiden tragbaren Scannern unterhalb 1,0 mm RMSE, wobei der Artec Eva in fast allen ästhetischen Untereinheiten unter 0,5 mm RMSE blieb. Die Ausnahme bildete die Augenregion mit einer durchschnittlichen RMSE von $0,673 \pm 0,219$ mm. Der Sense™ 3D erzielte vergleichbar niedrige Werte lediglich in der zentralen Stirn sowie im medialen Wangenbereich, bei deutlichen höheren Abweichungen in der Nasenregion mit $0,613 \pm 0,153$ mm RMSE sowie lateralen Wangenregion mit $0,544 \pm 0,248$ mm RMSE.

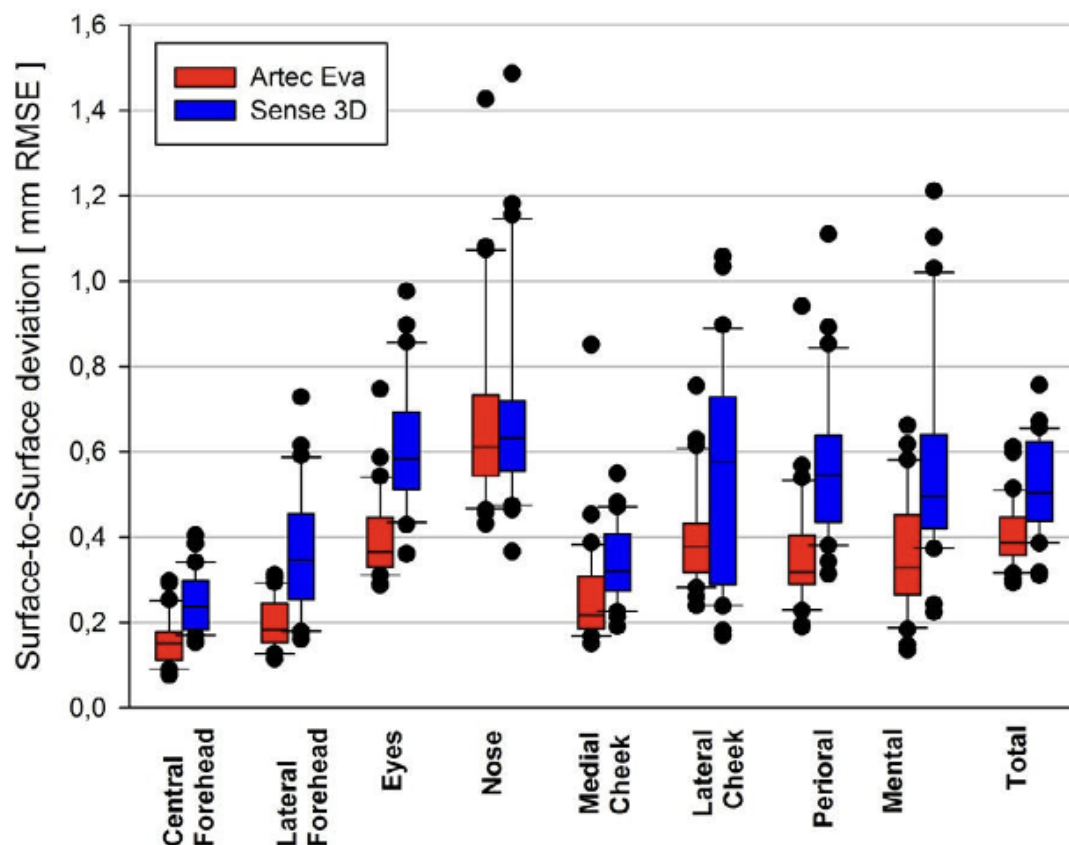


Abbildung 8: RMSE Analyse der zwei mobilen 3D Scanner gegen das Referenzgerät. Modifiziert aus (48).

Die Reproduzierbarkeit der 3D Oberflächenqualität zeigte sowohl für das Referenzsystem Vectra XT® als auch für den Artec Eva® Scanner eine hohe Korrelation, wohingegen der Sense™ 3D Scanner nur moderate bis schwache Korrelationen in der Wiederholung am gleichen Tag sowie nach sieben Tagen zeigte.



Abbildung 9: Intraoperative Aufnahme während Rhinoplastik. Modifiziert aus (48).

Die intraoperative Anwendung der Scanner während der Rhinoplastik ergab für den Artec Eva eine durchschnittliche Oberflächenabweichung von $0,438 \pm 0,096$ mm RMSE in der Nasenregion, während der Sense™ 3D mit $0,972 \pm 0,265$ mm RMSE eine signifikant höhere Abweichung aufwies gegenüber den präoperativen Referenzaufnahmen. Die durchschnittliche Scandauer lag bei $25,3 \pm 5$ Sekunden.

Diskussion und Eingliederung in das übergeordnete Thema

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass der Artec Eva® eine hohe Genauigkeit aufweist und als tragbare Alternative zum etablierten Vectra® XT in der intraoperativen Gesichtschirurgie eingesetzt werden kann. Insbesondere für die Rhinoplastik könnte diese Technologie eine wertvolle Ergänzung für die präzise Dokumentation und intraoperative Entscheidungsfindung darstellen. Die hohe Oberflächenpräzision in nahezu allen ästhetischen Untereinheiten unterstreicht die Qualität des Artec Eva® Scanners für klinische Anwendungen.

Die Limitationen des Sense™ 3D wurden insbesondere bei der Erfassung komplexer Geometrien wie der Nasenregion deutlich. Die Abweichungen waren signifikant höher, sodass dieser Scanner für die intraoperative Nutzung in der Gesichtschirurgie weniger geeignet erscheint. Gegenüber der Brustchirurgie können Abweichungen in Millimetern wie in der Rhinoplastik signifikante

Veränderungen darstellen, weshalb nur geringe Abweichungen für den klinischen Einsatz toleriert werden sollten (16).

Diese Studie betont erneut die Notwendigkeit standardisierter Evaluationsmethoden für mobile 3D Scanner (16,41,68). Die Diskrepanz zwischen Puppenkopf- und Probandenmessungen zeigt, dass Laborbedingungen oft bessere Ergebnisse liefern als klinische Szenarien, in denen Bewegungsartefakte und wechselnde Lichtbedingungen die Scanqualität beeinflussen können (63). Aus diesem Grund ist die Überprüfung alleinig an einem Puppenkopfmodell nicht aussagekräftig. Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung legen nahe, dass insbesondere für komplexe chirurgische Verfahren wie die Rhinoplastik weiterführende Studien erforderlich sind, um den Einfluss intraoperativer Bedingungen auf die Messgenauigkeit zu quantifizieren.

Ein wichtiger Aspekt dieser Arbeit war die Analyse der intraoperativen Nutzung. Während präoperative 3D Modelle für die Operationsplanung zunehmend etabliert sind (1,42,90), wurde der intraoperative Einsatz bislang nur begrenzt erforscht (64,87). Unsere Ergebnisse zeigen, dass insbesondere der Artec Eva® eine intraoperative Dokumentation mit klinisch akzeptabler Genauigkeit ermöglicht. Dies könnte zukünftig dazu beitragen, chirurgische Entscheidungen während der Operation objektiver zu gestalten und eine verbesserte Symmetrieanalyse zu ermöglichen. Gleichzeitig bleibt zu berücksichtigen, dass der intraoperative Einsatz von 3D Scannern eine standardisierte Handhabung erfordert, um verlässliche Ergebnisse zu erzielen.

Somit hat sich der mobile Artec Eva® 3D Scanner als eine tragbare und präzise Alternative zum stationären Vectra® XT für die 3D Oberflächenerfassung in der Gesichtschirurgie erwiesen. Der Sense™ 3D hingegen zeigte deutliche Einschränkungen in der Erfassung komplexer Gesichtskonturen und erwies sich daher als weniger geeignet für den klinischen Einsatz in diesem Bereich.

Diese Studie baut auf den Ergebnissen der ersten beiden Manuskripte auf, die die Anwendbarkeit mobiler 3D Scanner in der Brustchirurgie untersucht haben. Während Manuskript 1 die Validierung eines mobilen Scanners zur präoperativen 3D Brustbildgebung behandelte und Manuskript 2 die intraoperative Anwendung zur 3D Brustvolumetrie evaluierte, erweitert die vorliegende Untersuchung den Einsatzbereich des zuvor beschriebenen Sense™ 3D Scanners als auch des neuen Artec Eva® Scanners auf die Gesichtschirurgie. Die Ergebnisse zeigen, dass tragbare 3D Scanner ein vielseitiges Instrument für die prä- und intraoperative Bildgebung in verschiedenen plastisch-chirurgischen Fragestellungen darstellen könnten. Langfristig könnte dies dazu beitragen, objektive Messverfahren in die chirurgische Entscheidungsfindung zu integrieren und die Standardisierung der prä- und intraoperativen Dokumentation weiter voranzutreiben.

4.2. Interdisziplinäre Anwendung mobiler 3D Scanner

Publikation 4

Koban KC, Etzel L, Li Z, Pazos M, Schönecker S, Belka C, Giunta RE, Schenck TL, Corradini S.
Three-dimensional surface imaging in breast cancer: a new tool for clinical studies?
Radiat Oncol. 2020 Feb 28;15(1):52. doi: 10.1186/s13014-020-01499-2.

Hintergrund

Die adjuvante Strahlentherapie stellt einen essenziellen Bestandteil der brusterhaltenden Therapie beim frühen Brustkrebs dar, da sie lokale Rezidive reduziert und die Überlebensraten verbessert. In den vergangenen Jahren hat sich insbesondere die hypofraktionierte Bestrahlung (HF-RT) als Alternative zur konventionellen Fraktionierung (CF-RT) etabliert (11). Unabhängig von unserem Forschungsfeld werden in der Radioonkologie bereits spezielle 3D Oberflächenscanner zur Überprüfung der korrekten Inspirationstiefe und Ausrichtung des Bestrahlungsfeldes im klinischen Alltag eingesetzt (59). Trotz dieser Fortschritte bleibt die objektive Erfassung und Dokumentation therapiebedingter Nebenwirkungen wie Erythem, Ödem und Fibrose eine Herausforderung, da herkömmliche Methoden, darunter klinische Beurteilungen, standardisierte Fotografien und Fragebögen, häufig durch subjektive Einschätzungen und mangelnde Reproduzierbarkeit limitiert sind.

Die 3D Oberflächenerfassung ermöglicht eine reproduzierbare Erfassung von Form-, Volumen- und Symmetrieveränderungen der Brust und könnte auch in der Radioonkologie als innovatives Instrument zur Bewertung strahleninduzierter Veränderungen der Brust Anwendung finden.

Ziel der vorliegenden Studie war es daher, die erstmalige Anwendung der 3D Brustbildgebung mit strukturiertem Licht zur Dokumentation brustformverändernder Auswirkungen und früher Nebenwirkungen der Brustbestrahlung zu untersuchen und die Potenziale dieser innovativen Technologie für zukünftige klinische Studien zu evaluieren.

Methoden

In dieser prospektiven Untersuchung wurden 38 Patientinnen eingeschlossen, die nach brusterhaltender Operation eine adjuvante Strahlentherapie erhalten haben. Die Bestrahlung erfolgte entweder mit konventioneller Fraktionierung (25 Fraktionen, Gesamtdosis 50 Gy) oder als hypofraktionierte Radiotherapie (15 Fraktionen, Gesamtdosis 40,05 Gy). Zusätzlich erhielten 44,7 % der Patientinnen eine Boost-Bestrahlung des Tumorbettes.

Zur Erhebung der Daten wurde die mobile Artec Eva® Kamera verwendet, wobei standardisierte Scans in aufrechter Position wöchentlich während der Therapie sowie in der klinischen Nachsorge durchgeführt wurden.

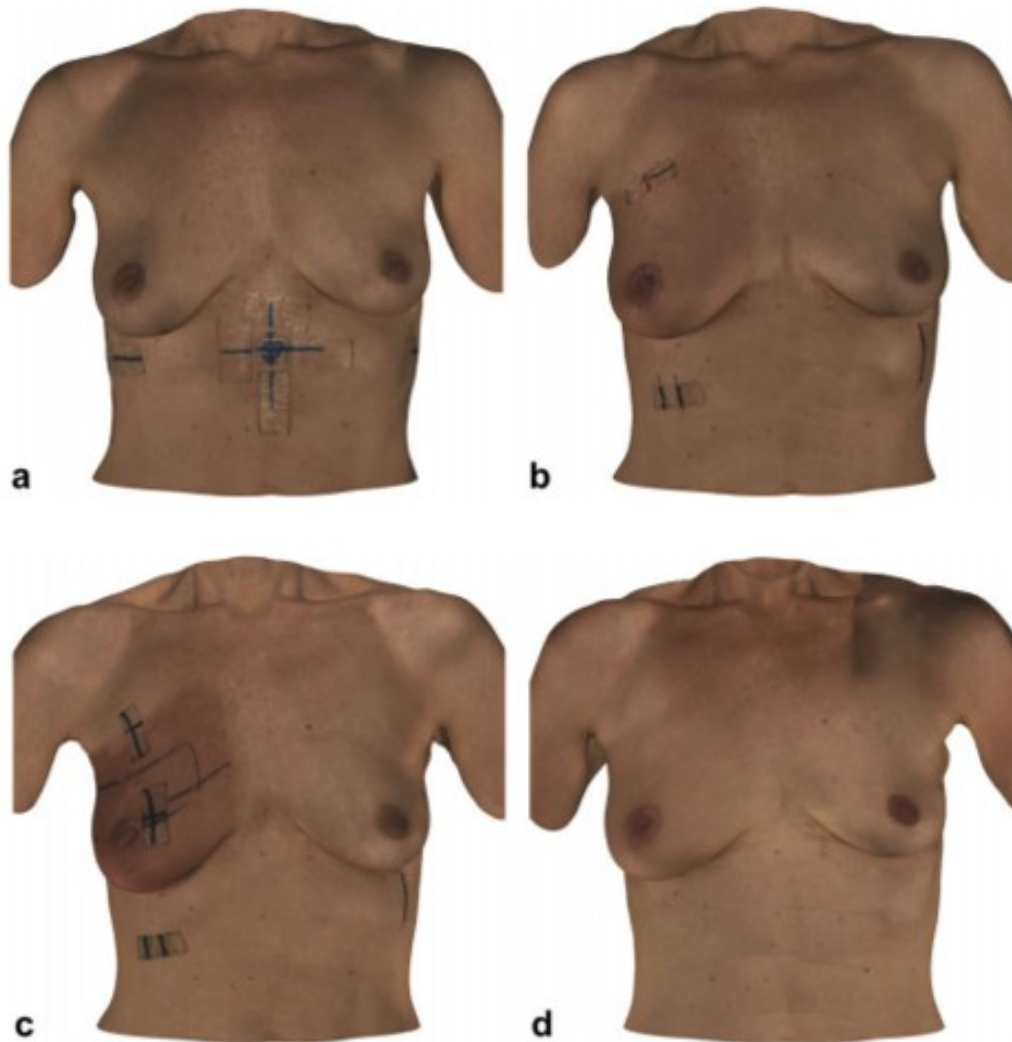


Abbildung 10: Dreidimensionale Darstellung einer Patientin mit Mammakarzinom vor Bestrahlung (a) der rechten Brust mit 50 Gy, sowie drei (b), fünf (c) und zwölf Wochen (d) nach der Bestrahlung. Modifiziert aus (45).

Ergebnisse

Die Analyse der 3D Brustoberfläche ergab, dass 57,9 % der Patientinnen während der Bestrahlung Anzeichen eines lokalisierten Erythems entwickelten. Dabei zeigte sich, dass CF-RT-Patientinnen mit einer Häufigkeit von 93,3 % signifikant häufiger betroffen waren als HF-RT-Patientinnen (34,8 %, $p = 0,003$). Die mediane Dauer des Erythems betrug zwei Wochen, mit einem Höhepunkt zwischen der dritten und fünften Woche der Therapie. In der Nachsorge zeigte lediglich eine Patientin ein persistierendes Erythem.

Die durchschnittlichen 3D Brustvolumina der behandelten Seite stiegen von 379 ± 196 mL zu Behandlungsbeginn auf 391 ± 198 mL nach 3 Wochen, sowie auf 437 ± 224 mL nach 3 Monaten in der Nachsorge ($p < 0,001$) signifikant an. Dieser Anstieg war sowohl in der CF-RT- als auch in der HF-RT-Gruppe signifikant, wobei CF-RT-Patientinnen eine stärkere relative Volumenzunahme aufwiesen. Die unbehandelte gesunde Brust zeigte hingegen keine signifikanten Volumenänderungen ($p = 0,708$), was die Reproduzierbarkeit der Methode bestätigte.

Diskussion und Eingliederung in das übergeordnete Thema

Wie bereits in der Publikation 1 und Publikation 2 beschrieben ermöglichen mobile, handgeführte 3D Aufnahmesysteme eine Erweiterung des Einsatzspektrums. Somit können auch problemlos 3D Oberflächenaufnahmen auch interdisziplinär geplant und eingesetzt werden, wie zum Beispiel am Ort der Bestrahlung und bei Nachuntersuchungen in unserer Klinik und Poliklinik für Strahlentherapie und Radioonkologie. Dies kann grundlegend den Patientenkomfort und die Compliance erhöhen, da bereits vor Ort der Therapie und Nachsorge die 3D Erfassung stattfinden kann.

Die vorliegende Untersuchung belegt, dass die 3D Brustbildgebung mittels mobiler, strahlenfreier 3D Scanner ein präzises und nicht-invasives Verfahren zur Dokumentation von Veränderungen der Brust während und nach der Strahlentherapie darstellen kann. Die Methode ermöglicht eine objektive Unterscheidung zwischen unterschiedlichen Bestrahlungsschemata und könnte zukünftig als standardisierte Bildgebungsmethode in klinischen Studien eingesetzt werden. Der interdisziplinäre Einsatz mobiler 3D Scanner eröffnet neue Perspektiven für die Verbindung plastisch-chirurgischer und radioonkologischer Ansätze.

Im Vergleich zu herkömmlichen Beurteilungsverfahren wie der klinischen Untersuchung und der Fotodokumentation bietet die 3D Oberflächenerfassung eine zuverlässigere Quantifizierung von Nebenwirkungen und könnte die Analyse früher und später brustformverändernder Auswirkungen unterstützen (38). Während Hautveränderungen wie Erythem und Fibrose durch visuelle Inspektion erfasst werden können, erlauben dreidimensionale Modelle darüber hinaus eine genauere Differenzierung von Volumenveränderungen, insbesondere hinsichtlich des Einflusses verschiedener Fraktionierungsschemata. Die hier erhobenen Daten decken sich mit früheren Untersuchungen, die eine reduzierte Hauttoxizität bei hypofraktionierten Bestrahlungsprotokollen nachweisen konnten (82). Weiterführende Studien sind erforderlich, um die Langzeitstabilität der volumetrischen Messungen und deren Korrelation mit funktionellen sowie formverändernden Endpunkten zu validieren. Allerdings bleibt die automatisierte Erfassung farblicher Veränderungen eine Einschränkung, da derzeit keine Softwarelösung für eine objektive Analyse von Hautrötungen innerhalb der 3D Auswertung zur Verfügung steht.

Die vorliegende Arbeit unterstreicht die Relevanz der interdisziplinären Nutzung mobiler 3D Scanner für die Objektivierung und Dokumentation auch nicht operativer Veränderungen an der Brust. Die Technologie ermöglicht nicht nur eine genauere Unterscheidung zwischen unterschiedlichen Fraktionierungsschemata, sondern bietet auch eine interdisziplinäre Brücke zwischen Plastischer Chirurgie und Radioonkologie in einem Brustzentrum.

Publikation 5

Koban KC, Cotofana S, Frank K, Green JB, Etzel L, Li Z, Giunta RE, Schenck TL.
Precision in 3-Dimensional Surface Imaging of the Face: A Handheld Scanner Comparison Performed in a Cadaveric Model.
Aesthet Surg J. 2019 Mar 14;39(4):NP36-NP44. doi: 10.1093/asj/sjy242.

Hintergrund

Mit zunehmendem Interesse an altersbedingten Veränderungen des Gesichts gewinnt auch die objektive Quantifizierung von injizierten Füllmaterialien an Bedeutung (7,15,79,80). Die Anwendung von 3D Oberflächenaufnahmesystem wurde in verschiedenen klinischen Studien zur Beurteilung der Auswirkungen auf Weichteileffekte bei Kryolipolyse (30), zur Dokumentation von Volumenveränderungen nach autologer Fetttransplantation im Gesicht(61), sowie Injektionen mit Füllsubstanzen untersucht (20,37,60,61). Darüber hinaus wurde zuvor beschrieben, dass tragbare 3D Scanner eine zuverlässige Methode zur Quantifizierung lokaler volumetrischer Veränderungen im Gesicht darstellen (21).

Obwohl die injizierten Volumina meist gering sind, können ihre Auswirkungen auf die Gesichtsstruktur erheblich sein (20,37,60,61). Bislang fehlen jedoch systematische Untersuchungen zur Messgenauigkeit tragbarer 3D Scanner bei der Erfassung solcher kleinster Volumenveränderungen.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde anhand eines anatomischen Kadavarmodells in der Anatomie der Paracelsus Medizinischen Privatuniversität Salzburg an Frischpräparaten gezielt die standardisierte Volumeninjektion in definierte Fettkompartimente des Gesichtes durchgeführt, um die Genauigkeit der 3D Volumetrie unterschiedlicher 3D Scanner für zukünftige klinische Studien zu untersuchen. Hierbei wurden neben den bereits aus den vorherigen Publikationen bekannten mobilen, handgeführten 3D Scannern zusätzlich der iSense™ als Aufsatz an einem Tablet (iPad®,

Apple, USA) eingesetzt. Letzterer bietet die Möglichkeit auch ohne Computer 3D Oberflächenaufnahmen an einem Tablet durchzuführen, welches potenziell die Akzeptanz und Anwendung von 3D Oberflächenaufnahmesystemen auch außerhalb der Plastischen Chirurgie für nicht operative Fächer als auch für anatomische Studien fördern könnte.

Ziel dieser Studie war daher der systematische Vergleich dreier gängiger tragbarer 3D Scanner hinsichtlich ihrer Messpräzision bei der Erfassung volumetrischer Veränderungen im Gesicht an anatomischen Frischpräparaten.

Methoden

Für die Untersuchung wurden drei tragbare 3D Scanner evaluiert: Artec Eva[®], Sense[™] (3D Systems, USA) und iSense[™] (3D Systems, USA). Die Datenerhebung erfolgte an vier unfixierten humanen Kadaverpräparaten, um realistische Weichteilbedingungen zu simulieren. Es wurden insgesamt vier vordefinierte subkutane und supraperiostale Gesichtsregionen untersucht: das oberflächliche laterale Stirnkompartiment (subkutan), das tiefe laterale Stirnkompartiment (supraperiostal), das Wangen Fettkompartiment (subkutan) sowie das tiefe temporale Fettkompartiment (supraperiostal).

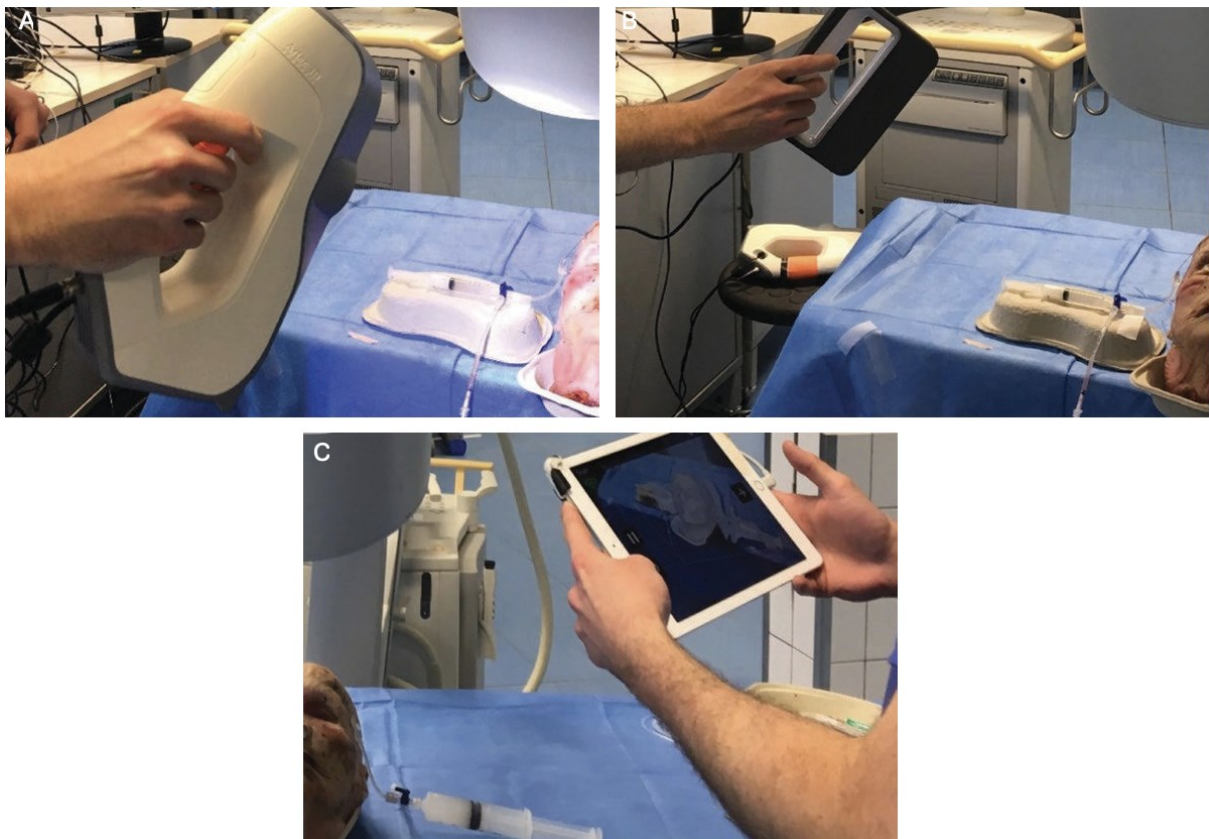


Abbildung 11: Exemplarische Darstellung der drei 3D Scanner Artec Eva (A), Sense (B) und iSense (C) zur Erfassung des anatomischen Frischpräparates. Modifiziert aus (44).

Zur Quantifizierung der Volumenveränderungen wurden schrittweise standardisiert 0,5 mL Injektionsmengen eines hoch viskösen Kontrastmittels über eine Injektionsapparatur injiziert, wobei in den Stirnregionen maximal 5,0 mL und in den Wangen- sowie Temporalregionen maximal 3,0 mL appliziert wurden. Die Positionierung der Injektionen wurde mittels fluoroskopischer Bildgebung überprüft. Insgesamt wurden 336 Messungen durchgeführt.

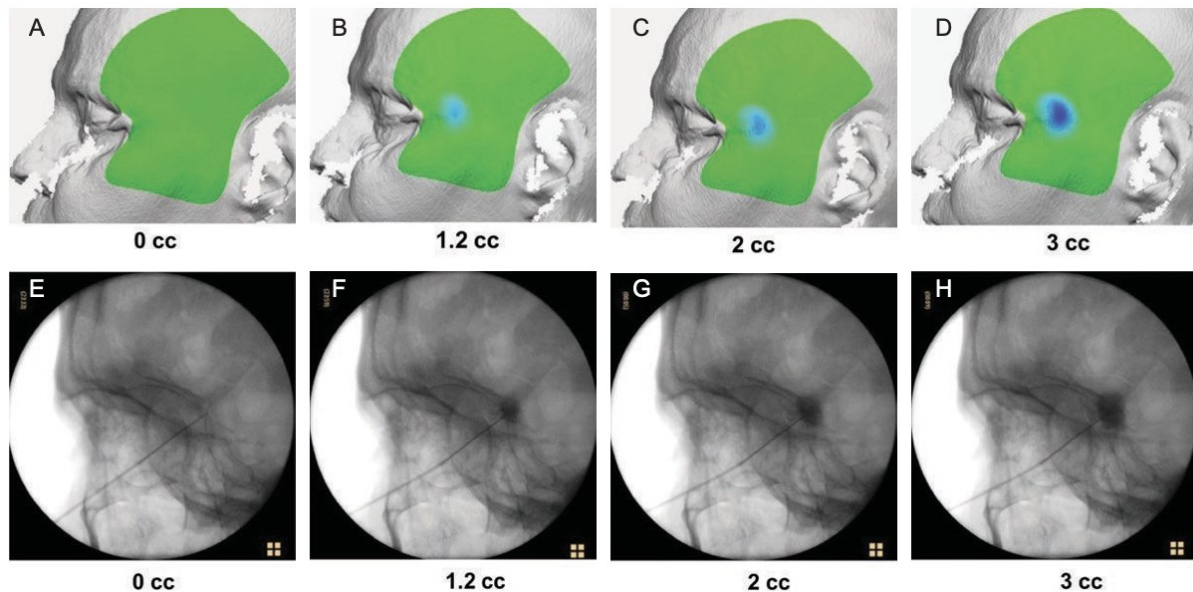


Abbildung 12: Exemplarische Darstellung der 3D Volumenexpansion unter definierter Applikation der Füllsubstanz und Bildwandlerkontrolle (cc = mL). Modifiziert aus (44).

Die digitalisierten 3D Oberflächenmodelle wurden mittels 3D Oberflächen Root Mean Square (RMS) Analyse mit der Mirror® Software zueinander ausgerichtet bei niedriger Fehlertoleranz von kleiner 0,1 mm RMSE vor der 3D Volumenauswertung. Zusätzlich wurde die Korrelation zwischen injiziertem und gemessenem Volumen für jeden Scanner berechnet, und die Reproduzierbarkeit der Messungen analysiert.

Ergebnisse

Die Messergebnisse zeigten signifikante Unterschiede in der Präzision der untersuchten Scanner. Der Artec Eva® Scanner wies mit einem Korrelationskoeffizienten von $r = 0,935$ für subkutane und $r = 0,966$ für supraperiostale Injektionen die höchste Korrelation auf. Der Sense™ Scanner erreichte mit $r = 0,760$ (subkutan) und $r = 0,364$ (supraperiostal) eine geringere Korrelation, während der iSense™ 3D Scanner mit $r = 0,694$ (subkutan) und $r = 0,382$ (supraperiostal) die niedrigste Korrelation zwischen injizierter Füllsubstanz und gemessener 3D Volumenexpansion zeigte. Sowohl Sense als auch iSense zeigten eine hohe Variabilität in den erfassten 3D Volumenmessungen.

Diskussion und Eingliederung in das übergeordnete Thema

Die Ergebnisse dieser Studie verdeutlichen die Unterschiede in der Leistungsfähigkeit tragbarer 3D Scanner zur volumetrischen Analyse kleinster Volumenveränderungen im Gesicht. In

Zusammenarbeit mit der Anatomie der Paracelsus Medizinischen Privatuniversität Salzburg konnten so auch nicht operative Fragestellungen wie der Injektion mit Füllsubstanzen untersucht werden.

Während der Artec Eva® 3D Scanner eine hohe Korrelation zwischen injiziertem und gemessener 3D Volumenexpansion zeigte, wiesen der Sense™ 3D Scanner und insbesondere der iSense™ 3D Scanner eine höhere Messabweichung auf. Dies legt nahe, dass der Eva-Scanner eine zuverlässige Alternative zu stationären 3D Systemen darstellen könnte, insbesondere für klinische Anwendungen, bei denen intraoperative Volumenmessungen erforderlich sind.

Ein weiterer wichtiger Befund ist die signifikante Differenz zwischen subkutanen und supraperiostalen Messungen. Während oberflächennahe subkutane Volumenveränderungen präziser erfasst wurden, zeigte sich für tiefere supraperiostale Injektionen eine größere Messvariabilität. Diese Diskrepanz könnte durch die anatomische komplexere Gewebemorphologie wie überlagernde Muskeln und Faszien bedingt sein (15,80), die eine exakte Erfassung der Volumenänderung erschwert. Hierbei lässt sich das Verhalten insofern erklären, dass die oberflächlichen subkutanen Fettkompartimente nur zur Tiefe von der Muskulatur begrenzt werden, wodurch der zu erwartende Volumeneffekt in den Fettkompartimenten durch die Injektionen an die Oberfläche direkt übertragen und gemessen werden kann.

Während der Artec Eva® Scanner eine hohe Präzision mit einer kurzen Akquisitionszeit kombinierte, zeigte sich beim Sense™ und iSense™ Scanner eine größere Variabilität in der Messgenauigkeit, die weiterführende klinische Studien in der ästhetischen Medizin als auch in anderen Disziplinen einschränkt.

Diese Studie erweitert die bisherige Forschung zur Anwendung mobiler, handgeführten 3D Scanner in der Plastischen Chirurgie, Anatomie und verwandten Disziplinen. Während frühere Studien sich auf die prä- und postoperative Bildgebung konzentrierten und als Referenz Bildgebende Verfahren wie die Magnetresonanztomographie einsetzten (3), bietet diese Untersuchung eine detaillierte Analyse von kleinsten volumetrischen Veränderungen im Gesicht durch tragbare 3D Scanner.

Die Ergebnisse unterstreichen das Potenzial tragbarer 3D Scanner für die objektive Dokumentation volumetrischer Veränderungen in der plastischen Chirurgie, könnten aber auch für andere medizinische Fachrichtungen wie die ästhetische Medizin oder die Radioonkologie von Bedeutung sein.

4.3. Neue Möglichkeiten der Extremitäten- und Ganzkörperaufnahmen

Publikation 6

Koban KC, Titze V, Etzel L, Frank K, Schenck T, Giunta R.

Quantitative volumetric analysis of the lower extremity: validation against established tape measurement and water displacement.

Handchir Mikrochir Plast Chir. 2018 Dec;50(6):393-399. doi: 10.1055/a-0770-3445.

Hintergrund

Volumetrische Analysen der unteren Extremität basieren vorwiegend auf manuellen Umfangsmessungen mit Maßbändern, aus denen über mathematische Modelle das Gesamtvolumen annäherungsweise berechnet wird (4,14,17,40,85). Im Sinne einer Aufwand-Nutzen-Abwägung hängt die Validität dieser Näherungsverfahren maßgeblich von der Anzahl durchgeführter Umfangsmessungen pro Extremität ab, was im klinischen Alltag häufig durch mangelnde Zeit an wenigen standardisierte Lokalisationen durchgeführt wird (4,14,17,40,85). Die Maßbandmessung wird trotz nachgewiesener Messungenauigkeiten aufgrund von untersucherabhängigen Variationen und Reproduzierbarkeitsproblemen in den aktuellen Leitlinien für Lipödem (76) und Lymphödeme (93) als Standardverfahren empfohlen. Ergänzend wurden in der wissenschaftlichen Literatur die Wasserverdrängungsmethode sowie die optische Perometrie als alternative Verfahren beschrieben (4,14,17,40,85). Während die Wasserverdrängungsmethode als Goldstandard der Volumetrie gilt, ist ihre Anwendung in der klinischen Praxis durch zeitlichen Aufwand und hygienische Herausforderungen limitiert (17,31,40).

Bislang konnte jedoch durch die etablierten stationären 3D Oberflächenaufnahmesysteme mit limitierten Aufnahmebereichen keine zufriedenstellende und verlässliche 3D Oberflächenerfassung der Extremitäten erreicht werden (62,66).

Da mit den verfügbaren mobilen 3D Scannern jedoch auch eine nahezu 360° Umfahrung und damit Aufnahme einer Zielregion möglich ist, sahen wir in unserer Forschungsgruppe ein hohes Potenzial zur Erweiterung des Anwendungsspektrums mittels 3D Volumetrie der Extremitäten. In Voruntersuchungen zeigte sich jedoch eine Umfahrung des Beines mittels Sense™ 3D Scanners häufigen Fehlern ausgesetzt, so dass keine valide Untersuchung durchgeführt werden konnte und der Versuchsaufbau alleinig mit dem Artec Eva® durchgeführt wurde.

Ziel dieser Studie war die Validierung eines mobilen 3D Scanners zur volumetrischen Erfassung der unteren Extremität im Vergleich zur Wasserverdrängungsmethode sowie zur Konus- und Scheibenmethode, die auf Umfangsmessungen basieren.

Methodik

Für die Studie wurden 20 gesunde Probanden rekrutiert. Die Wasserverdrängungsmethode wurde als Goldstandard verwendet. Hierbei wurde das Beinvolumen durch vollständiges Eintauchen in ein Wasserbecken bestimmt. Ergänzend erfolgten Umfangsmessungen mittels Maßbands in 5 cm Intervallen, aus denen das Beinvolumen mittels Konus- und Scheibenmethode berechnet wurde.

Die 3D Oberflächenaufnahmen wurden mit dem tragbaren Artec Eva® Scanner durchgeführt, der eine vollständige Erfassung der unteren Extremität ermöglichte. Die digitale Volumenanalyse wurde mit der Mirror® Software durchgeführt, wobei das Bein bis zur Infraglutealfalte rekonstruiert wurde. Zur internen Validierung wurden alle Messungen von zwei unabhängigen Untersuchern durchgeführt und wiederholt.

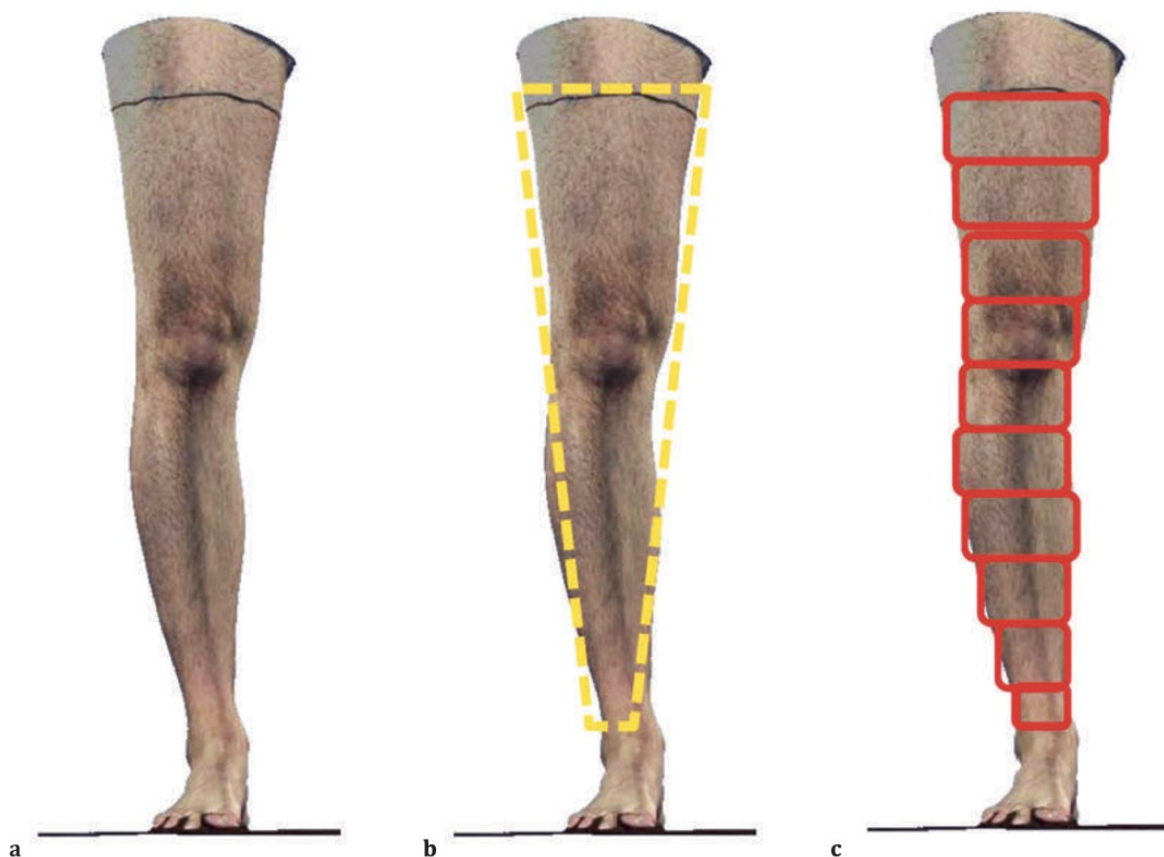


Abbildung 13: Schematische Darstellung anhand des 3D Scans der Konusmethode (b) und Scheibenmethode (c). Modifiziert aus (50).

Ergebnisse

Es zeigte sich, dass zwischen der 3D Volumetrie und der Wasserverdrängungsmethode keine signifikanten Unterschiede bestanden (mittlere Abweichung: $-8,7 \pm 165,6$ mL, $p = 0,966$). Die Scheibenmethode zeigte zwar keine statistisch signifikanten, jedoch klinisch relevante Abweichungen mit hoher Varianz (mittlere Abweichung: $-133,2 \pm 800,3$ mL, $p = 0,489$). Die Konusmethode hingegen überschätzte das Volumen systematisch und zeigte signifikante Unterschiede zur 3D Volumetrie (mittlere Abweichung: $1596,2 \pm 987,4$ mL, $p < 0,001$).

Im Vergleich zur 3D Volumetrie zeigte die Bland-Altman Analyse, dass die Abweichungen innerhalb der 95% Konfidenzintervalle bei der Wasserverdrängung zwischen $-333,4$ mL und $315,9$ mL, bei der Scheibenmethode zwischen $-1701,8$ mL und $1435,4$ mL, sowie in der Konusmethode zwischen $-338,6$ mL und $3532,3$ mL betrugen.

Hinsichtlich des Zeitaufwands erwies sich die Wasserverdrängung mit durchschnittlich 23 Minuten als die zeitintensivste Methode und die Konusmethode mit durchschnittlich 2 Minuten als die schnellste Methode. Die Scheibenmethode benötigte ähnlich wie die 3D Volumetrie inklusive 3D Aufnahme, Datenprozessierung und Volumenberechnung durchschnittlich sechs Minuten. Hierbei betrug die reine 3D Aufnahmezeit durchschnittlich jedoch lediglich 30 Sekunden.

Diskussion und Eingliederung in das übergeordnete Thema

Die Ergebnisse dieser Studie verdeutlichen die potenzielle klinische Relevanz der 3D Volumetrie zur Analyse der unteren Extremität mittels mobiler 3D Scanner.

Während die Wasserverdrängungsmethode als Goldstandard etabliert ist, sind ihre zeitlichen und hygienischen Einschränkungen problematisch (4,14,17,40,85). Die Maßbandmessung weist, insbesondere in Form der Konusmethode, deutliche systematische Überschätzungen auf und zeigt eine hohe Varianz in der Volumenbestimmung (40). Die Maßbandmessung zeigt in der Literatur untersucherabhängige Varianzen mit deutlichen Umfangsabweichungen, welches jegliches annähernde Volumenberechnungsverfahren fehleranfällig macht und nur von geübten Untersuchern standardisiert durchgeführt werden sollte (40).

Digitale Verfahren wie die der Computertomographie als auch Magnetresonanztomographie als verlässliche volumetrische Verfahren werden wegen der bereits in den Publikationen 1 bis 5 zuvor genannten zahlreichen Faktoren nicht routinemäßig für Verlaufskontrollen eingesetzt(14).

Die 3D Volumetrie durch den mobilen Artec Eva® 3D Scanner ermöglicht hierbei eine hohe Genauigkeit bei nur kurzer Aufnahmedauer, welches den Patientenkomfort erhöht und bietet darüber hinaus den Vorteil einer kontaktlosen und reproduzierbaren Volumenbestimmung. Dies ist insbesondere für Patientengruppen mit Wunden oder Bewegungseinschränkungen von klinischer Relevanz. Die kontaktlose Erfassung minimiert zudem untersucherabhängige Variationen und ermöglicht eine objektive Verlaufskontrolle über einen längeren Zeitraum insbesondere bei Krankheitsbildern mit häufiger Wiedervorstellung wie dem Lipödem oder Lymphödem.

Dennoch können auch wie im Bereich der 3D Brustbildgebung ptotische Hautlappen an den Beinen wie bei ausgeprägten Lymphödembefunden als auch Bewegungsartefakte der Untersuchten Volumenartefakte mit fehlerhaften Messungen beinhalten, welches berücksichtigt werden muss.

Die gewonnenen Erkenntnisse legen nahe, dass tragbare 3D Scanner als valides Instrument zur volumetrischen Verlaufskontrolle in der plastischen Chirurgie, Lymphologie und Phlebologie eingesetzt werden könnten. Die hohe Messgenauigkeit und die effiziente Datenerhebung prädestinieren diese Technologie für den klinischen Einsatz zur objektiven Beurteilung konservativer und operativer Behandlungsansätze, insbesondere zur Nachverfolgung nach Liposuktionen oder zur Überwachung von Ödemerkrankungen.

Publikation 7

Etzel L*, Koban KC* (geteilte Erstautorenschaft), Li Z, Frank K, Giunta RE, Schenck TL.
Whole-body surface assessment - implementation and experiences with 360° 3D whole-body scans: opportunities to objectively monitor the extremities and the body trunk.
Handchir Mikrochir Plast Chir. 2019 Aug;51(4):240-248. doi: 10.1055/a-0836-2683.

Hintergrund

Viele Krankheitsbilder in der Plastischen Chirurgie betreffen mehr als einen Körperabschnitt. Beispielhaft zeigen Patientinnen und Patienten nach massivem Gewichtsverlust durch konservative oder adipoitaschirurgische Maßnahmen, sowie bei einem Lymphödem oder Lipödem Veränderungen des gesamten Körpers auf. Die Quantifizierung konservativer und operativer Maßnahmen sowie deren Therapieerfolg in diesen Krankheitsbildern sowie zahlreichen weiteren ist von hohem klinischem Interesse und bedarf einer präzisen Verlaufskontrolle. Manuelle Verfahren als auch radiologische Verfahren zur objektiven Erfassung von Oberflächen- und

Volumenveränderungen wie in Publikation 6 beschrieben haben zahlreiche Einschränkungen (4,14,17,40,85).

Auf Grundlage unserer Erkenntnisse aus Publikation 6 war es unser Ziel, die Möglichkeiten der 3D Oberflächenaufnahmen mittels mobiler 3D Scanner auf eine nahezu 360° 3D Ganzkörperaufnahme zu erweitern. In vorläufigen Untersuchungen ergaben sich jedoch mehrere Limitationen unseres geplanten Vorgehens. So waren insbesondere der eingeschränkten Aufnahmebereiche der in Publikationen 1 bis 6 eingesetzten 3D Scanner und damit langer Aufnahmedauer, räumliche Einschränkungen durch ein notwendiges weites Umfahren des Körpers, häufige Zielerfassungsverluste, sowie Bewegungsartefakte durch eine lange Aufnahmedauer äußerst fehleranfällig.

Mit der Einführung des Thor® 3D Strukturlicht Scanners (Thor3D, Russland) war neben einem im Vergleich zu den vorherigen 3D Scannern größeren Aufnahmeveld, dem im Scanner integrierten Monitor ohne zusätzlichen mobilen Computer, auch ein automatischer Drehteller für Patientenaufnahmen vorhanden. Letzterer ermöglichte auch für den Sense™ und Artec Eva® eine fehlerfreie 3D Erfassung des Körpers bei standardisierter Positionierung und schneller Aufnahmedauer durch die konstante Rotation des Körpers um seine Achse.

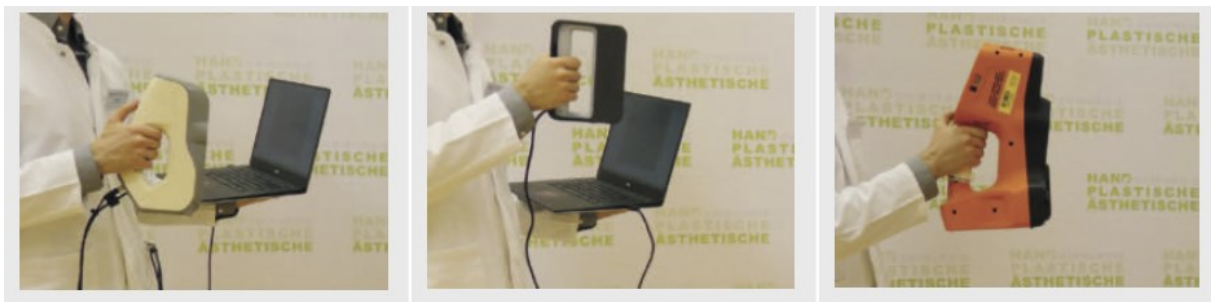


Abbildung 14: Die drei 3D Scanner Artec Eva (A), Sense (B) und Thor (C). Modifiziert aus (28).

Die damit neu entwickelte 360° Ganzkörpererfassung mittels mobiler 3D Scanner bietet hier eine vielversprechende Alternative, die eine objektive, kontaktlose und reproduzierbare Volumenanalyse ermöglicht. Ziel der vorliegenden Studie war es, die Implementierung eines solchen standardisierten 360°-Scans zu evaluieren und die Messpräzision verschiedener 3D Scanner mit etablierten volumetrischen Methoden zu vergleichen.

Methoden

Acht gesunde Probanden (fünf Frauen, drei Männer) wurden für die Analyse eingeschlossen. Die wiederholten Aufnahmen erfolgte in zwei standardisierten Körperhaltungen auf einem

automatisierten Drehteller, um eine nahezu vollständige 360°-Erfassung der Körperoberfläche zu ermöglichen.



Abbildung 15: Schematische Darstellung der Umfangs- und Volumenberechnungen am Körperstamm und den Beinen. Modifiziert aus (28).

Zur Validierung der volumetrischen und Umfangsmessung wurden die 3D Scanner Artec Eva® und Sense™, sowie erstmalig der Thor® 3D Strukturlicht Scanner eingesetzt. Als Referenz diente der validierte Artec Eva® Scanner. Die generierten 3D Modelle wurden mittels Mirror Software weiterverarbeitet und hinsichtlich axialer Umfangsmessungen und Volumina der Abschnitte am Körperstamm und Bein analysiert. Zusätzlich wurden exemplarisch in drei verschiedene Patienten die Veränderungen in Beinumfangen und -volumina nach chirurgischer oder konservativer Therapie dargestellt.

Ergebnisse

Ein standardisiertes 360° 3D Scanverfahren konnte für alle drei 3D Scanner erfolgreich etabliert werden. Die intraindividuelle Reproduzierbarkeit aller getesteten Scanner war sowohl für Umfangs- und Volumendifferenzen zufriedenstellend ($p > 0,05$).

Der Vergleich der Scanner ergab, dass der Thor® 3D Scanner eine vergleichbare Messgenauigkeit zum Artec Eva® Scanner in Umfangs- und Volumenmessungen aufwies, während der Sense-Scanner insbesondere an den unteren Extremitäten signifikante Abweichungen beider Messverfahren zeigte ($p < 0,05$). Die durchschnittlichen prozentuale Abweichungen gegenüber den Artec Eva® Referenzaufnahmen der Beinvolumina lagen für den Thor® 3D Scanner bei $0,0 \pm 1,37 \%$ und Sense 3D Scanner bei $10,64 \pm 13,48 \%$. Die durchschnittlichen prozentualen Abweichungen am Körperstammvolumen betrugen für Thor $0,58 \pm 1,96 \%$ und für den Sense 3D Scanner $-0,58 \pm 6,43 \%$. Die durchschnittlichen prozentualen Umfangsabweichungen an den Beinen betrugen für den Thor® 3D Scanner $0,09 \pm 0,91 \%$ und Sense 3D Scanner $7,79 \pm 9,50 \%$.

Diskussion und Eingliederung in das übergeordnete Thema

Die vorliegende Studie belegt, dass 360° 3D Oberflächenaufnahmen ein innovatives und wertvolles Werkzeug zur strahlenfreien und kontaktlosen objektiven Bewertung plastisch-chirurgischer Eingriffe und konservativer Therapiemaßnahmen an der gesamten Körperoberfläche darstellen. Während in der plastischen Chirurgie bislang hauptsächlich die Gesichts- und Brustregion mittels 3D Oberflächenaufnahmen erfasst wurden, ermöglicht die hier vorgestellte Methodik erstmals eine umfassende Analyse des gesamten Körpers. Ein wesentlicher Vorteil der 3D Oberflächenaufnahmen für Ganzkörperaufnahmen sind standardisierbare und reproduzierbare Aufnahmen und Messungen, sodass subjektive Fehler, wie sie bei manuellen Umfangsmessungen oder zweidimensionalen Fotografien auftreten können, vermieden werden. Insbesondere die 3D Volumetrie spielt eine entscheidende Rolle bei der Beurteilung von Therapieerfolgen in der plastischen Chirurgie, da sie genauere Aussagen über Veränderungen der Körperform und -volumina zulässt, wie in den vorausgegangenen Arbeiten dargestellt wurde. Zusätzlich zeigt sie als kontaktloses Verfahren eine hohe Patienten- und Nutzerfreundlichkeit, sowie insbesondere die Möglichkeit zur digitalen Speicherung der Daten sowie der Option, Verläufe retrospektiv zu analysieren.

Die Wahl eines geeigneten Scanners ist jedoch entscheidend. Während Eva und Thor zuverlässige Messergebnisse lieferten, wies der Sense-Scanner signifikante Ungenauigkeiten auf, insbesondere an den Beinen. Dies liegt vermutlich an seiner geringeren Präzision und begrenzten Erfassungsfähigkeit für komplexe Körperformen. Dies zeigt, dass günstige Alternativen zwar eine gewisse Funktionalität bieten, jedoch nicht immer für klinische Anwendungen geeignet sind. Besonders der hier erstmalig eingesetzte Thor® Scanner zeigte eine hohe Messgenauigkeit und großes Aufnahmefeld für 360° Ganzkörperaufnahmen und könnte somit eine praktikable Alternative zum etablierten Eva® Scanner darstellen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die einfache Handhabung des Scanverfahrens. Durch die Nutzung des hier erstmalig vorgestellten automatisierten Drehtellers konnte eine standardisierte und praktikable 3D Erfassung erreicht werden.

Die Analyse klinischer Fallbeispiele demonstrierte das Potenzial der 3D Scans zur quantitativen Erfassung von unterschiedlichen Therapieerfolgen. Beispielsweise konnte nach bariatrischer Chirurgie ein deutlicher Volumenrückgang dokumentiert werden. Diese Methode bietet somit eine objektive Ergänzung zur Beurteilung von Gewichtsverlust und Körperkonturierung.

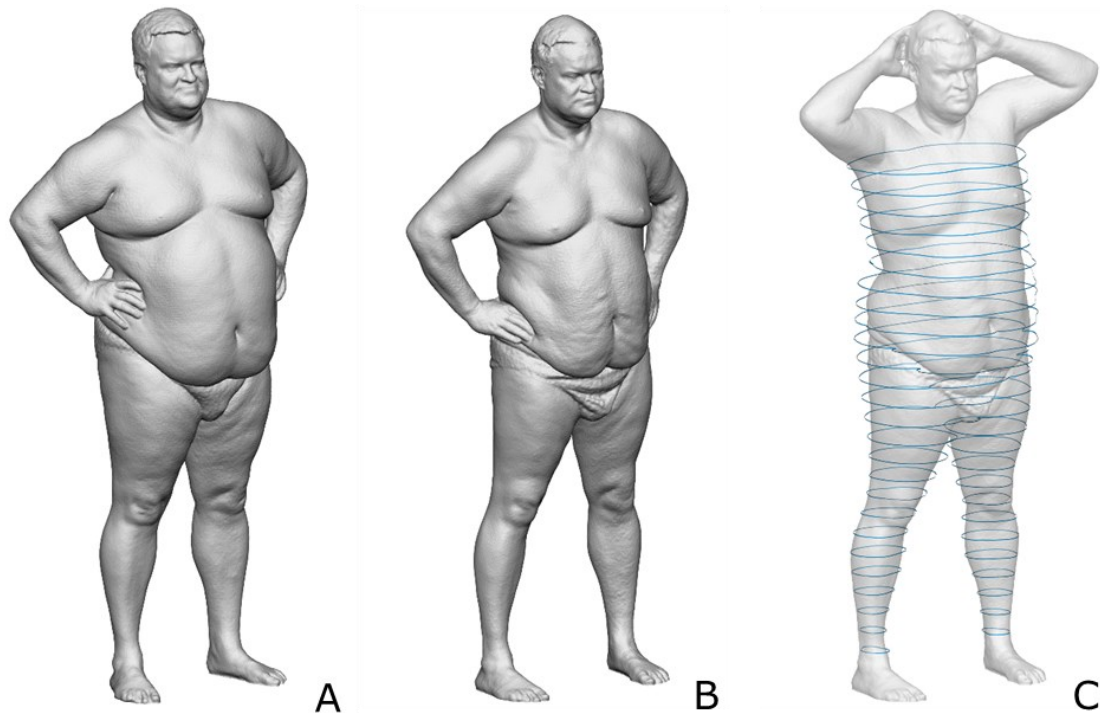


Abbildung 16: Darstellung eines Patienten vor (A) und nach Adipositaschirurgie (B) mittels Sleeve-Gastrektomie und massivem Gewichtsverlust von 42 kg innerhalb von 6 Monaten. Darstellung präoperativer axialer Umfänge im Abstand von 5 cm (C) um den postoperativen Befund.

Diese Studie erweitert das bisherige Wissen über die Anwendung mobiler 3D Scanner in der plastischen Chirurgie und baut auf den Erkenntnissen der vorangegangenen Studien auf. Insbesondere knüpft sie an die in Publikation 6 dargestellte Validierung der 3D Volumetrie für die untere Extremität an und überträgt dieses Konzept auf eine ganzheitliche Körperanalyse.

Während in den vorherigen Arbeiten der Fokus auf regionale volumetrische Erfassungen lag, zeigt diese Untersuchung, dass auch die Ganzkörpererfassung mittels 3D Scans hohe Präzision und Reproduzierbarkeit bieten kann. Dies eröffnet neue Perspektiven für die postoperative Verlaufsdokumentation, die objektive Evaluation konservativer und operativer Therapieergebnisse, sowie die Optimierung plastisch-chirurgischer Planungen.

5. Ausblick

Die vorliegende Habilitationsschrift mit dem Titel „*3D Oberflächenbildgebung: Innovationen und Stellenwert in der Plastischen Chirurgie*“ hat die Validierung und Anwendung dreidimensionaler Oberflächenbildgebung in verschiedenen klinischen Kontexten der plastischen Chirurgie untersucht.

Die intraoperative Nutzung von 3D Oberflächenscannern stellt eine innovative Methode zur präzisen Dokumentation volumetrischer Veränderungen dar. Vor allem in der Brust- und Gesichtschirurgie zeigt sich das Potenzial dieser Technologie, um intraoperativ objektive Messwerte zu erfassen, die eine standardisierte Entscheidungsfindung unterstützen können. Die Integration dieser Methode könnte langfristig zu einer verbesserten Qualitätssicherung im Sinne der evidenzbasierten Medizin und einem präziseren operativen Vorgehen führen.

Neben der intraoperativen Anwendung wurden die Möglichkeiten der 3D Volumetrie am Bein und der Ganzkörpererfassung mittels mobiler 3D Scannern untersucht. Während die bisherigen stationären Systeme eine hohe Präzision aufweisen, sind sie aufgrund ihrer Größe, Kosten und begrenzten Mobilität nicht für den breiten klinischen Einsatz geeignet. Mobile 3D Scanner hingegen ermöglichen eine flexible und zeiteffiziente Dokumentation von Körperstrukturen, jedoch mit potenziellen Einschränkungen in der Messgenauigkeit in Abhängigkeit des eingesetzten Gerätes. Die Entwicklung dieser mobiler 3D Scanner hat in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte gemacht. Neue Geräte auch als spezialisierte Medizingeräte sind auf den Markt erhältlich bei fortlaufend geringeren Anschaffungskosten. Dies hat national und international die Anwendung dieser mobilen handlichen Technologie sowohl in der Forschung als auch im klinischen Alltag deutlich gesteigert.

Auch konnten mehrere interdisziplinäre Projekte alleinig durch die Einführung mobiler, handgeführter 3D Scanner erfolgreich durchgeführt werden. Im Rahmen dessen wurde auch der hohe Stellenwert eines objektiven strahlenfreien Messverfahrens zur Beurteilung von Form- und Volumenveränderungen wie in der Strahlentherapie und Gynäkologie erkannt, welches zu weiterführenden aktuellen Projekten in unserer Klinik geführt hat.

Im Rahmen meiner ersten veröffentlichten wissenschaftlichen Arbeit beschäftigten wir uns schon damals mit einer Möglichkeit 3D Oberflächenaufnahmen mittels Smartphones durchzuführen (43). Während der Prozess noch aufwändig und fehleranfällig war und somit nicht für die klinische Anwendung umsetzbar war, zeigt sich heutzutage das vielversprechende Potenzial vieler Smartphones als mobile 3D Scanner. Bereits heute verfügen viele moderne Mobilgeräte über eine integrierte 3D Sensorik, die theoretisch eine Anwendung in der klinischen Diagnostik ermöglichen könnte. Dies könnte die Erfassung und Verlaufskontrolle von Oberflächen- und volumetrischen

Veränderungen noch zugänglicher machen und eine kosteneffiziente Alternative zu konventionellen 3D Scannern bieten. Allerdings sind neben datenschutzrelevanten Fragestellungen bei nicht lokaler Verarbeitung auf dem Smartphone weiterführende Validierungsstudien erforderlich, um die Genauigkeit, Reproduzierbarkeit und klinische Anwendbarkeit dieser Technologie zu überprüfen.

Zusammenfassend unterstreichen die in dieser Habilitationsschrift gewonnenen Erkenntnisse den hohen Stellenwert der 3D Oberflächenbildgebung als innovatives Verfahren in der Plastischen Chirurgie. Die kontinuierliche Weiterentwicklung dieser Technologien sowie ihre mögliche Integration in bestehende klinische Standards und Leitlinien haben das Potenzial, die Diagnostik, Therapieplanung und postoperative Verlaufskontrolle in unserem Fachgebiet grundlegend zu verändern. Zukünftige Forschungen sollten sich darauf konzentrieren, die Automatisierung und Standardisierung der 3D Datenverarbeitung weiter zu optimieren und die Implementierung dieser Technologie in den klinischen Alltag voranzutreiben.

6. Literaturverzeichnis

1. Al-Khatib A. Facial three dimensional surface imaging: An overview. *Arch Orofac Sci.* 2010;1(1):1–8.
2. Artopoulos A, Buytaert JAN, Dirckx JJJ, Coward TJ. Comparison of the accuracy of digital stereophotogrammetry and projection moire profilometry for three-dimensional imaging of the face. *Int J Oral Maxillofac Surg.* Mai 2013;43(5):654–62.
3. Becker M, Balagué N, Montet X, Calmy A, Salomon D, Toutous-Trellu L, u. a. Hyaluronic Acid Filler in HIV-Associated Facial Lipoatrophy: Evaluation of Tissue Distribution and Morphology with MRI. *Dermatology.* 2015;230(4):367–74.
4. Brijker, Heijdra, Van Den Elshout, Bosch, Folgering. Volumetric measurements of peripheral oedema in clinical conditions. *Clinical Physiology.* Januar 2000;20(1):56–61.
5. Bulstrode N, Bellamy E, Shrotria S. Breast volume assessment: comparing five different techniques. *Breast.* April 2001;10(2):117–23.
6. Campaigne BN, Katch VL, Freedson P, Sady S, Katch FI. Measurement of breast volume in females: Description of a reliable method. *Annals of Human Biology.* 1979;6(4):363–7.
7. Casabona G, Frank K, Koban KC, Freytag DL, Schenck TL, Lachman N, u. a. Lifting vs volumizing—The difference in facial minimally invasive procedures when respecting the line of ligaments. *Journal of Cosmetic Dermatology.* 1. Oktober 2019;18(5):1237–43.
8. Catherwood T, McCaughan E, Greer E, Spence RAJAJ, McIntosh SAA, Winder RJJ. Validation of a passive stereophotogrammetry system for imaging of the breast: A geometric analysis. *Oktober 2011;33(8):900–5.*
9. Chang JB, Small KH, Choi M, Karp NS. Three-dimensional surface imaging in plastic surgery: foundation, practical applications, and beyond. *Plast Reconstr Surg.* 25. Mai 2015;135(5):1295–304.
10. Chen K, Feng CJ, Ma H, Hsiao FY, Tseng LM, Tsai YF, u. a. Preoperative breast volume evaluation of one-stage immediate breast reconstruction using three-dimensional surface imaging and a printed mold. *J Chin Med Assoc.* September 2019;82(9):732–9.
11. Chitapanarux I, Klunklin P, Pinitpatcharalert A, Sripan P, Tharavichitkul E, Nobnop W, u. a. Conventional versus hypofractionated postmastectomy radiotherapy: a report on long-term outcomes and late toxicity. *Radiat Oncol.* 14. Oktober 2019;14(1):175.
12. Choppin SB, Wheat JS, Gee M, Goyal A. The accuracy of breast volume measurement methods: A systematic review. *The Breast.* 1. August 2016;28:121–9.
13. Choppin SB, Wheat JS, Gee M, Goyal A. The accuracy of breast volume measurement methods: A systematic review [Internet]. Churchill Livingstone; Aug 1, 2016. Verfügbar unter: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960977616300698>
14. Chromy A, Zalud L, Dobsak P, Suskevic I, Mrkvicova V. Limb volume measurements: comparison of accuracy and decisive parameters of the most used present methods. *Springerplus.* 19. November 2015;4:707.
15. Cotofana S, Gotkin RH, Frank K, Koban KC, Targosinski S, Sykes JM, u. a. The functional anatomy of the deep facial fat compartments: A detailed imaging-based investigation. *Plastic and Reconstructive Surgery.* 1. Januar 2019;143(1):53–63.
16. De Menezes M, Rosati R, Ferrario VF, Sforza C. Accuracy and reproducibility of a 3-dimensional stereophotogrammetric imaging system. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery.* September 2010;68(9):2129–35.

17. Deltombe T, Jamart J, Recloux S, Legrand X, Vanderbroeck N, Theys S, u. a. Reliability and limits of agreement of circumferential, water displacement, and optoelectronic volumetry in the measurement of upper limb lymphedema. *Lymphology*. 20. August 2007;40(1):26–34.
18. Deutsch CK, Shell AR, Francis RW, Bird BD. The Farkas system of craniofacial anthropometry: Methodology and normative databases. In: *Handbook of Anthropometry: Physical Measures of Human Form in Health and Disease*. 2012.
19. Dindaroğlu F, Kutlu P, Duran GS, Görgülü S, Aslan E. Accuracy and reliability of 3D stereophotogrammetry: A comparison to direct anthropometry and 2D photogrammetry. *Angle Orthodontist*. 1. Mai 2016;86(3):487–94.
20. Donath AS, Glasgold RA, Meier J, Glasgold MJ, Lambros VS, Donath AS, u. a. Quantitative evaluation of volume augmentation in the tear trough with a hyaluronic Acid-based filler: a three-dimensional analysis. *Plast Reconstr Surg*. Mai 2010;125(5):1523–4.
21. Dornelles R de FV, Alonso N. New virtual tool for accurate evaluation of facial volume1. *Acta Cirurgica Brasileira*. 1. Dezember 2017;32(12):1075–86.
22. Eder M, Grabhorn A, Waldenfels F, Schuster T, Papadopoulos NA, Machens HG, u. a. Prediction of breast resection weight in reduction mammoplasty based on 3-dimensional surface imaging. *Surg Innov*. 2013;20(4):356–64.
23. Eder M, Kloppel M, Muller D, Papadopoulos NA, Machens HG, Kovacs L. 3-D analysis of breast morphology changes after inverted T-scar and vertical-scar reduction mammoplasty over 12 months. *J Plast Reconstr Aesthet Surg*. 2013;66(6):776–86.
24. Eder M, Raith S, Jalali J, Muller D, Harder Y, Dobritz M, u. a. Three-dimensional prediction of free-flap volume in autologous breast reconstruction by CT angiography imaging. *Int J Comput Assist Radiol Surg*. 2014;9(4):541–9.
25. Eder M, Waldenfels FV, Swobodnik A, Kloppel M, Pape AK, Schuster T, u. a. Objective breast symmetry evaluation using 3-D surface imaging. *Breast*. 2012;21(2):152–8.
26. Epstein MD, Schefflan M. Three-dimensional Imaging and Simulation in Breast Augmentation: What Is the Current State of the Art? *Clin Plast Surg*. 2015;42(4):437–50.
27. Esme DL, Bucksch A, Beekman WH. Three-dimensional laser imaging as a valuable tool for specifying changes in breast shape after augmentation mammoplasty. *Aesthetic Plastic Surgery*. 4. März 2009;33(2):191–5.
28. Etzel L, Koban KC, Li Z, Frank K, Giunta RE, Schenck TL. Whole-body surface assessment - Implementation and experiences with 360° 3D whole-body scans: Opportunities to objectively monitor the extremities and the body trunk. *Handchirurgie Mikrochirurgie Plastische Chirurgie*. August 2019;51(4):240–8.
29. Galdino GM, Nahabedian M, Chiaramonte M, Geng JZ, Klatsky S, Manson P. Clinical applications of three-dimensional photography in breast surgery. *Plast Reconstr Surg*. 2002;110(1):58–70.
30. Garibyan L, Sipprell 3rd WH, Jalian HR, Sakamoto FH, Avram M, Anderson RR. Three-dimensional volumetric quantification of fat loss following cryolipolysis. *Lasers Surg Med*. 2014;46(2):75–80.
31. Gjørup C, Zerahn B, Hendel HW. Assessment of volume measurement of breast cancer-related lymphedema by three methods: Circumference measurement, water displacement, and dual energy X-Ray absorptiometry. *Lymphatic Research and Biology*. 2010;8(2):111–9.
32. González-Ulloa M. Regional aesthetic units of the face. *Plastic and Reconstructive Surgery*. März 1987;79(3):489–90.
33. Grossman AJ, Roudner LA. A simple means for accurate breast volume determination. *Plast Reconstr Surg*. Dezember 1980;66(6):851–2.

34. Henseler H, Ju X, Ayoub A, Ray AK. The importance of the pose in three-dimensional imaging of the ptotic breast. *J Plast Reconstr Aesthet Surg.* 2013;66(11):1551–6.
35. Henseler H, Kuznetsova A, Vogt P, Rosenhahn B. Validation of the Kinect device as a new portable imaging system for three-dimensional breast assessment. *J Plast Reconstr Aesthet Surg.* 2014;67(4):483–8.
36. Henseler H, Smith J, Bowman A, Khambay BS, Ju X, Ayoub A, u. a. Investigation into variation and errors of a three-dimensional breast imaging system using multiple stereo cameras. *J Plast Reconstr Aesthet Surg.* 2012;65(12):e332–7.
37. Hong JK, Park SJ, Seo SJ, Park KY, Youn CS. Quantitative Evaluation of Volume Augmentation and Durational Changes in the Anteromedial Cheek with Hyaluronic Acid Fillers Using Three-Dimensional Measurement: 2-Year Results from a Comparative Split-Face Study. *Plastic and Reconstructive Surgery.* Juli 2022;150(1):87e.
38. Hopwood P, Haviland JS, Sumo G, Mills J, Bliss JM, Yarnold JR. Comparison of patient-reported breast, arm, and shoulder symptoms and body image after radiotherapy for early breast cancer: 5-year follow-up in the randomised Standardisation of Breast Radiotherapy (START) trials. *The Lancet Oncology.* 1. März 2010;11(3):231–40.
39. House RM. BREAST RECONSTRUCTION PLANNING AND ASSESSMENT USING THREE-DIMENSIONAL SURFACE SCANS. 2019.
40. Kaulesar Sukul DMKS, den Hoed PT, Johannes EJ, van Dolder R, Benda E. Direct and indirect methods for the quantification of leg volume: comparison between water displacement volumetry, the disk model method and the frustum sign model method, using the correlation coefficient and the limits of agreement. *Journal of Biomedical Engineering.* November 1993;15(6):477–80.
41. Khambay B, Nairn N, Bell A, Miller J, Bowman A, Ayoub AF. Validation and reproducibility of a high-resolution three-dimensional facial imaging system. *British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery.* Januar 2008;46(1):27–32.
42. Knoops PGM, Beaumont CAA, Borghi A, Rodriguez-Florez N, Breakey RWF, Rodgers W, u. a. Comparison of three-dimensional scanner systems for craniomaxillofacial imaging. *Journal of plastic, reconstructive & aesthetic surgery : JPRAS.* April 2017;70(4):441–9.
43. Koban K, Leitsch S, Holzbach T, Volkmer E, Metz P, Giunta R. 3D Bilderfassung und Analyse in der Plastischen Chirurgie mit Smartphone und Tablet: eine Alternative zu professionellen Systemen? *Handchirurgie · Mikrochirurgie · Plastische Chirurgie.* 28. April 2014;46(02):97–104.
44. Koban KC, Cotofana S, Frank K, Green JB, Etzel L, Li Z, u. a. Precision in 3-Dimensional Surface Imaging of the Face: A Handheld Scanner Comparison Performed in a Cadaveric Model. *Aesthetic Surgery Journal.* 15. März 2018;39(4):NP36–44.
45. Koban KC, Etzel L, Li Z, Pazos M, Schönecker S, Belka C, u. a. Three-dimensional surface imaging in breast cancer: a new tool for clinical studies? *Radiation Oncology.* 28. Dezember 2020;15(1):52.
46. Koban KC, Härtnagl F, Titze V, Schenck TL, Giunta RE. Chances and limitations of a low-cost mobile 3D scanner for breast imaging in comparison to an established 3D photogrammetric system. *Journal of Plastic, Reconstructive and Aesthetic Surgery.* 1. Oktober 2018;71(10):1417–23.
47. Koban KC, Li Z, Etzel L, Schenck TL, Härtnagl F, Giunta RE. Objective evaluation of volumetric changes during breast augmentation using intraoperative three-dimensional surface imaging. *J Plast Reconstr Aesthet Surg.* September 2022;75(9):3094–100.

48. Koban KC, Perko P, Etzel L, Li Z, Schenck TL, Giunta RE. Validation of two handheld devices against a non-portable three-dimensional surface scanner and assessment of potential use for intraoperative facial imaging. *Journal of Plastic, Reconstructive and Aesthetic Surgery*. 1. Januar 2020;73(1):141–8.
49. Koban KC, Schenck T, Metz PM, Volkmer E, Haertnagl F, Titze V, u. a. [En Route for Objective Evaluation of Form, Volume, and Symmetry in Plastic Surgery using 3-D Intraoperative Scans]. *Handchir Mikrochir Plast Chir*. 2016;48(2):78–84.
50. Koban KC, Titze V, Etzel L, Frank K, Schenck T, Giunta R. Quantitative volumetric analysis of the lower extremity: Validation against established tape measurement and water displacement. *Handchirurgie Mikrochirurgie Plastische Chirurgie*. Dezember 2018;50(6):393–9.
51. Koch MC, Adamietz B, Jud SM, Fasching PA, Haeberle L, Karbacher S, u. a. Breast volumetry using a three-dimensional surface assessment technique. *Aesthetic Plast Surg*. Oktober 2011;35(5):847–55.
52. Kovacs L, Eder M, Hollweck R, Zimmermann A, Settles M, Schneider A, u. a. New aspects of breast volume measurement using 3-dimensional surface imaging. *Ann Plast Surg*. Dezember 2006;57(6):602–10.
53. Kovacs L, Eder M, Hollweck R, Zimmermann A, Settles M, Schneider A, u. a. Comparison between breast volume measurement using 3D surface imaging and classical techniques. *Breast*. 2007;16(2):137–45.
54. Kovacs L, Eder M, Papadopoulos NA, Biemer E. Validating 3-dimensional imaging of the breast. *Ann Plast Surg*. 2005;55(6):695–6.
55. Kovacs L, Eder M, Zimmermann A, Müller D, Schuster T, Papadopoulos NA, u. a. Three-dimensional evaluation of breast augmentation and the influence of anatomic and round implants on operative breast shape changes. *Aesthetic Plast Surg*. August 2012;36(4):879–87.
56. Kovacs L, Zimmermann A, Brockmann G, Baurecht H, Schwenzer-Zimmerer K, Papadopoulos NA, u. a. Accuracy and precision of the three-dimensional assessment of the facial surface using a 3-D laser scanner. *IEEE Trans Med Imaging*. 2006;25(6):742–54.
57. Lee WY, Kim MJ, Lew DH, Song SY, Lee DW. Three-dimensional surface imaging is an effective tool for measuring breast volume: A validation study. *Archives of Plastic Surgery*. 1. September 2016;43(5):430–7.
58. Leusink A, O’Connell R, McKean A, Rusby J. 3D surface imaging of the breast - An updated systematic review. *European Journal of Surgical Oncology*. 1. Mai 2023;49(5):e242–3.
59. Liu M, Wei X, Ding Y, Cheng C, Yin W, Chen J, u. a. Application of Optical Laser 3D Surface imaging system (Sentinel) in breast cancer radiotherapy. *Sci Rep*. 5. Mai 2020;10(1):7550.
60. Lowe P, Lowe NJ. 3D Photography and lip filler: A novel assay. *Journal of Cosmetic and Laser Therapy*. Januar 2007;9(4):237–40.
61. Meier JD, Glasgold RA, Glasgold MJ. 3D Photography in the Objective Analysis of Volume Augmentation Including Fat Augmentation and Dermal Fillers. *Facial Plastic Surgery Clinics of North America*. November 2011;19(4):725–35.
62. Mestre S, Veye F, Perez-Martin A, Behar T, Triboulet J, Berron N, u. a. Validation of lower limb segmental volumetry with hand-held, self-positioning three-dimensional laser scanner against water displacement. *Journal of Vascular Surgery: Venous and Lymphatic Disorders*. Januar 2014;2(1):39–45.
63. Metzler P, Sun Y, Zemmann W, Bartella A, Lehner M, Obwegeser JA nton, u. a. Validity of the 3D VECTRA photogrammetric surface imaging system for cranio-maxillofacial anthropometric measurements. *Oral and maxillofacial surgery*. 2013;18(3):297–304.

64. Mitsuno D, Ueda K, Itamiya T, Nuri T, Otsuki Y. Intraoperative Evaluation of Body Surface Improvement by an Augmented Reality System That a Clinician Can Modify. *Plastic and Reconstructive Surgery - Global Open*. August 2017;5(8):e1432.
65. Modabber A, Peters F, Kniha K, Goloborodko E, Ghassemi A, Lethaus B, u. a. Evaluation of the accuracy of a mobile and a stationary system for three-dimensional facial scanning. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*. Oktober 2016;44(10):1719–24.
66. Munk EF, Tieleman HJ, Ulrich DJ, Hummelink S. Evaluating the accuracy of three-dimensional surface-imaging for circumference analysis of the thigh. *Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery*. 1. September 2022;75(9):3199–207.
67. Nahabedian MY, Galdino G. Symmetrical breast reconstruction: is there a role for three-dimensional digital photography? *Plast Reconstr Surg*. 2003;112(6):1582–90.
68. Nord F, Ferjencik R, Seifert B, Lanzer M, Gander T, Matthews F, u. a. The 3dMD photogrammetric photo system in cranio-maxillofacial surgery: Validation of interexaminer variations and perceptions. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*. 1. November 2015;43(9):1798–803.
69. O’Connell RL, Khabra K, Bamber JC, deSouza N, Meybodi F, Barry PA, u. a. Validation of the Vectra XT three-dimensional imaging system for measuring breast volume and symmetry following oncological reconstruction. *Breast Cancer Research and Treatment*. 1. September 2018;171(2):391–8.
70. Oranges CM, Madduri S, Brantner P, Msallem B, Giordano S, Benitez B, u. a. Three-dimensional Assessment of the Breast: Validation of a novel, simple and inexpensive scanning process. *In Vivo*. 1. Mai 2019;33(3):839–42.
71. Overschmidt B, Qureshi AA, Parikh RP, Yan Y, Tenenbaum MM, Myckatyn TM. A Prospective Evaluation of Three-Dimensional Image Simulation: Patient-Reported Outcomes and Mammometrics in Primary Breast Augmentation. *Plastic and reconstructive surgery*. August 2018;142(2):133e–44e.
72. Pallanch J. Introduction to 3D Imaging Technologies for the Facial Plastic Surgeon. *Facial Plastic Surgery Clinics of North America*. 2011;19(4).
73. Park HK, Chung JW, Kho HS. Use of hand-held laser scanning in the assessment of craniometry. *Forensic Science International*. 13. Juli 2006;160(2–3):200–6.
74. Patete P, Eder M, Raith S, Volf A, Kovacs L, Baroni G. Comparative assessment of 3D surface scanning systems in breast plastic and reconstructive surgery. *Surg Innov*. 2013;20(5):509–15.
75. Pazos V, Cheriet F, Song L, Labelle H, Dansereau J. Accuracy assessment of human trunk surface 3D reconstructions from an optical digitising system. *Med Biol Eng Comput*. 1. Februar 2005;43(1):11–5.
76. Registernummer A. S1-Leitlinie Lipödem AWMF Registernummer 037-012. 2015;1–27.
77. Roostaeian J, Adams WP, Adams Jr. WP. Three-Dimensional Imaging for Breast Augmentation: Is This Technology Providing Accurate Simulations? *Aesthet Surg J*. 1. August 2014;34(6):857–75.
78. de Runz A, Boccara D, Bertheuil N, Claudot F, Brix M, Simon E. Three-dimensional imaging, an important factor of decision in breast augmentation. *Annales de Chirurgie Plastique Esthétique*. 2018;63(2):134–9.
79. Schenck TL, Koban KC, Schlattau A, Frank K, Sclafani AP, Giunta RE, u. a. Updated anatomy of the buccal space and its implications for plastic, reconstructive and aesthetic procedures. *Journal of Plastic, Reconstructive and Aesthetic Surgery*. 2018;71(2):162–70.

80. Schenck TL, Koban KC, Schlattau A, Frank K, Sykes JM, Targosinski S, u. a. The functional anatomy of the superficial fat compartments of the face: A detailed imaging study. *Plastic and Reconstructive Surgery*. 1. Juni 2018;141(6):1351–9.
81. Seminati E, Canepa Talamas D, Young M, Twiste M, Dhokia V, Bilzon JJJ. Validity and reliability of a novel 3D scanner for assessment of the shape and volume of amputees' residual limb models. *Gard SA, Herausgeber*. 8. September 2017;12(9):e0184498.
82. Shaitelman SF, Lei X, Thompson A, Schlembach P, Bloom ES, Arzu IY, u. a. Three-Year Outcomes With Hypofractionated Versus Conventionally Fractionated Whole-Breast Irradiation: Results of a Randomized, Noninferiority Clinical Trial. *JCO*. 10. Dezember 2018;36(35):3495–503.
83. Smith DJ, Palin WE, Katch VL, Bennett JE. Breast volume and anthropomorphic measurements: normal values. *Plast Reconstr Surg*. September 1986;78(3):331–5.
84. Spanholtz TA, Leitsch S, Holzbach T, Volkmer E, Engelhardt T, Giunta RE. [3-dimensional imaging systems: first experience in planning and documentation of plastic surgery procedures]. *Handchir Mikrochir Plast Chir*. 2012;44(4):234–9.
85. Tan CW, Coutts F, Bulley C. Measurement of lower limb volume: Agreement between the vertically oriented perometer and a tape measure method. *Physiotherapy*. September 2013;99(3):247–51.
86. Tanabe YN, Honda T, Nakajima Y, Sakurai H, Nozaki M. Intraoperative application of three-dimensional imaging for breast surgery. *Scandinavian Journal of Plastic and Reconstructive Surgery and Hand Surgery*. 8. Januar 2005;39(6):349–52.
87. Tepper OM, Rudy HL, Lefkowitz A, Weimer KA, Marks SM, Stern CS, u. a. Mixed reality with hololens: Where virtual reality meets augmented reality in the operating room. *Plastic and Reconstructive Surgery*. November 2017;140(5):1066–70.
88. Tsay C, Zhu V, Sturrock T, Shah A, Kwei S. A 3D Mammometric Comparison of Implant-Based Breast Reconstruction With and Without Acellular Dermal Matrix (ADM). *Aesthetic Plastic Surgery* [Internet]. [zitiert 26. November 2017];42(1). Verfügbar unter: <http://link.springer.com/10.1007/s00266-017-0967-z>
89. Tzou CHHJHJ, Artner NM, Pona I, Hold A, Placheta E, Kropatsch WG, u. a. Comparison of three-dimensional surface-imaging systems. *J Plast Reconstr Aesthet Surg*. April 2014;67(4):489–97.
90. Tzou CHHJHJ, Frey M. Evolution of 3D Surface Imaging Systems in Facial Plastic Surgery. *Facial Plastic Surgery Clinics of North America*. November 2011;19(4):591–602.
91. Weissler JM, Stern CS, Schreiber JE, Amirlak B, Tepper OM. The Evolution of Photography and Three-Dimensional Imaging in Plastic Surgery. *Plastic and Reconstructive Surgery*. 1. März 2017;139(3):761–9.
92. Wettstein R, Largo RD, Raffoul W, Schumacher R, Schaefer DJ, Kalbermatten DF. Laser scanning evaluation of atrophy after autologous free muscle transfer. *Annals of plastic surgery*. 2014;72(6):680–4.
93. Wilting J, Bartkowski R, Baumeister R, Földi E, Stöhr S, Strubel G, u. a. S2k Leitlinie Diagnostik und Therapie der Lymphödeme AWMF Reg.-Nr. 058-001. 2017;
94. Winder RJ, Darvann TA, McKnight W, Magee JDM, Ramsay-Baggs P. Technical validation of the Di3D stereophotogrammetry surface imaging system. *Br J Oral Maxillofac Surg*. Januar 2008;46(1):33–7.
95. Xenofos SS, Jones CH. Theoretical aspects and practical applications of Moire topography. *Phys Med Biol*. März 1979;24(2):250.

7. Abkürzungsverzeichnis

2D = Zweidimensional

3D = Dreidimensional

3DSI = Three-dimensional Surface Imaging (Dreidimensionale Oberflächenerfassung)

cc = cubic centimetre (entspricht mL, Mililiter)

cm = Zentimeter

CT = Computertomographie

kg = Kilogramm

LMU = Ludwig-Maximilians-Universität München

mm = Millimeter

mL = Milliliter

MRT = Magnetresonanztomographie

RMSE = Root Mean Square Error

Scanner = 3D Oberflächenaufnahmegerät

8. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bland-Altman-Darstellung der relativen Volumendifferenzen zwischen den 3D Aufnahmegegeräten (S. 10).

Abbildung 2: 3D Oberflächenaufnahmen einer Patientin nach Brustrekonstruktion der rechten Seite und Bruststraffung der linken Seite zur Harmonisierung im Vergleich der Aufnahmeverfahren (S. 11).

Abbildung 3: 3D Oberflächenaufnahmen einer Patientin nach Brustreduktion beidseitig im Vergleich der Aufnahmeverfahren (S. 12).

Abbildung 4: Exemplarische Darstellung eines intraoperativen 3D Oberflächenscans in sitzender Positionierung (S. 15).

Abbildung 5: Präoperativer und postoperativer 3D Scan einer Patientin nach bilateraler Brustaugmentation mit 260 mL Implantaten (S. 16).

Abbildung 6: 3D Oberflächenaufnahme mittels Vectra und Sense im postoperativen und intraoperativen Vergleich nach bilateraler Brustaugmentation (S. 16).

Abbildung 7: 3D Oberflächenaufnahme mittels Vectra, Artec Eva und Sense in texturierter und roh Version aufgeteilt (S. 19).

Abbildung 8: RMSE Analyse der zwei mobilen 3D Scanner gegen das Referenzgerät (S. 20).

Abbildung 9: Intraoperative Aufnahme während Rhinoplastik (S. 21).

Abbildung 10: Dreidimensionale Darstellung einer Patientin mit Mammakarzinom vor Bestrahlung der rechten Brust mit 50 Gy, sowie drei, fünf und zwölf Wochen nach der Bestrahlung (S. 24).

Abbildung 11: Exemplarische Darstellung der drei 3D Scanner Artec Eva, Sense und iSense zur Erfassung des anatomischen Frischpräparates (S. 27).

Abbildung 12: Exemplarische Darstellung der 3D Volumenexpansion unter definierter Applikation der Füllsubstanz und Bildwandlerkontrolle (S. 28).

Abbildung 13: Schematische Darstellung anhand des 3D Scans der Konusmethode und Scheibenmethode (S. 31).

Abbildung 14: Die drei 3D Scanner Artec Eva, Sense und Thor (S. 34).

Abbildung 15: Schematische Darstellung der Umfangs- und Volumenberechnungen am Körperstamm und den Beinen (S. 35).

Abbildung 16: Darstellung eines Patienten nach Adipositaschirurgie (Sleeve-Gastrektomie) und massivem Gewichtsverlust innerhalb von 6 Monaten (S. 37).

9. Vollständiges Schriftenverzeichnis

Originalarbeiten als Erst- oder Letztautor/in

	Titel, Autoren, Journal	Impact Factor und Quartile
1	To Shrink or Not to Shrink? An Objective Assessment of Free Gracilis Muscle Volume Change in Lower-Extremity Defect Reconstruction. Koban KC* , Kuhlmann C*, Wachtel N, Hirschmann M, Hellweg M, Karcz KW, Giunta RE, Ehrl D. J Clin Med. 2024 Aug 15;13(16):4811. doi: 10.3390/jcm13164811. PMID: 39200956	IF 3,900 Q2 (Medicine, General & Internal)
2	Nonsubjective Assessment of Shape, Volume and Symmetry during Breast Augmentation with Handheld 3D Device. Li Z, Schenck TL, Giunta RE, Etzel L, Koban KC . J Clin Med. 2022 Jul 11;11(14):4002. doi: 10.3390/jcm11144002. PMID: 35887767	IF 3,900 Q2 (Medicine, General & Internal)
3	Objective evaluation of volumetric changes during breast augmentation using intraoperative three-dimensional surface imaging. Koban KC , Li Z, Etzel L, Schenck TL, Härtnagl F, Giunta RE. J Plast Reconstr Aesthet Surg. 2022 Sep;75(9):3094-3100. doi: 10.1016/j.bjps.2022.06.008. Epub 2022 Jun 17. PMID: 35851498	IF 2,700 Q2 (Surgery)
4	Anatomic Differences Between the Asian and Caucasian Nose and Their Implications for Liquid Rhinoplasties. Li Z, Frank K, Kohler LH, Moellhoff N, Giunta RE, Cotofana S, Alfertshofer MG, Woodward J, Voropai D, Koban KC . Facial Plast Surg Clin North Am. 2022 May;30(2):167-173. doi: 10.1016/j.fsc.2022.01.008. PMID: 35501054	IF 1,300 Q4 (Surgery)
5	Accuracy Assessment of Three-Dimensional Surface Imaging-Based Distance Measurements of the Face: Comparison of a Handheld Facial Scanner and a Stationary Whole-Body Surface Imaging Device. Koban KC , Xu Y, Moellhoff N, Ehrl D, Alfertshofer MG, Cotofana S, Giunta RE, Woodward J, Voropai D, Frank K. Facial Plast Surg Clin North Am. 2022 May;30(2):159-166. doi: 10.1016/j.fsc.2022.01.009. PMID: 35501053	IF 1,300 Q4 (Surgery)
6	3D Anthropometric Facial Imaging - A comparison of different 3D scanners. Koban KC , Perko P, Li Z, Xu Y, Giunta RE, Alfertshofer MG, Kohler LH, Freytag DL, Cotofana S, Frank K. Facial Plast Surg Clin North Am. 2022 May;30(2):149-158. doi: 10.1016/j.fsc.2022.01.003. PMID: 35501052	IF 1,300 Q4 (Surgery)
7	Investigating the Reliability of Novel Nasal Anthropometry Using Advanced Three-Dimensional Digital Stereophotogrammetry. Li Z, Liang Y, Schenck TL, Frank K, Giunta RE, Koban KC . J Pers Med. 2022 Jan 6;12(1):60. doi: 10.3390/jpm12010060. PMID: 35055375	IF 3,400 Q2 (Health Care Sciences & Services)

8	Reliability of 3-dimensional surface imaging of the face using a whole-body surface scanner. Xu Y, Frank K, Kohler L, Ehrl D, Alfertshofer M, Giunta RE, Moellhoff N, Cotofana S, Koban KC . J Cosmet Dermatol. 2022 Apr;21(4):1464-1470. doi: 10.1111/jocd.14555. Epub 2021 Nov 3. PMID: 34731521	IF 2,300 Q3 (Dermatology)
9	Reproducibility of Novel Soft-Tissue Landmarks on Three-Dimensional Human Facial Scan Images in Caucasian and Asian. Li Z, Giunta RE, Frank K, Schenck TL, Koban KC . Aesthetic Plast Surg. 2022 Apr;46(2):719-731. doi: 10.1007/s00266-021-02642-4. Epub 2021 Oct 26. PMID: 34704125	IF 2,400 Q2 (Surgery)
10	Digital Leg Volume Quantification: Precision Assessment of a Novel Workflow Based on Single Capture Three-dimensional Whole-Body Surface Imaging. Etzel L, Schenck TL, Giunta RE, Li Z, Xu Y, Koban KC . J Digit Imaging. 2021 Oct;34(5):1171-1182. doi: 10.1007/s10278-021-00493-8. Epub 2021 Sep 28. PMID: 34581929	IF 4,400 Q1 (Radiology, Nuclear Medicine & Medical Imaging)
11	Three-dimensional surface imaging in breast cancer: a new tool for clinical studies? Koban KC , Etzel L, Li Z, Pazos M, Schönecker S, Belka C, Giunta RE, Schenck TL, Corradini S. Radiat Oncol. 2020 Feb 28;15(1):52. doi: 10.1186/s13014-020-01499-2. PMID: 32111228	IF 3,481 Q3 (Oncology)
12	Validation of two handheld devices against a non-portable three-dimensional surface scanner and assessment of potential use for intraoperative facial imaging. Koban KC* , Perko P*, Etzel L, Li Z, Schenck TL, Giunta RE. J Plast Reconstr Aesthet Surg. 2020 Jan;73(1):141-148. doi: 10.1016/j.bjps.2019.07.008. Epub 2019 Aug 7. PMID: 31519501	IF 2,740 Q2 (Surgery)
13	Whole-body surface assessment - implementation and experiences with 360° 3D whole-body scans: opportunities to objectively monitor the extremities and the body trunk. Etzel L*, Koban KC* , Li Z, Frank K, Giunta RE, Schenck TL. Handchir Mikrochir Plast Chir. 2019 Aug;51(4):240-248. doi: 10.1055/a-0836-2683. Epub 2019 Aug 14. PMID: 31412387	IF 0,840 Q4 (Surgery)
14	3D Mammometric Changes in the Treatment of Idiopathic Gynecomastia. Koban KC , Frank K, Etzel L, Schenck TL, Giunta RE. Aesthetic Plast Surg. 2019 Jun;43(3):616-624. doi: 10.1007/s00266-019-01341-5. Epub 2019 Feb 27. PMID: 30815735 Publikation zur kumulativen Disseration des Antragsteller. Nicht für die Wertung nach § 5 Abs. 4 Satz 4 i. V. m. § 3 Abs. 1 Satz 1 Ziffer 2 Habilitationsordnung vom 5.12.2016 .	IF 1,798 Q3 (Surgery)

15	Quantitative volumetric analysis of the lower extremity: validation against established tape measurement and water displacement. Koban KC , Titze V, Etzel L, Frank K, Schenck T, Giunta R. Handchir Mikrochir Plast Chir. 2018 Dec;50(6):393-399. doi: 10.1055/a-0770-3445. Epub 2019 Jan 8. PMID: 30620977	IF 0,809 Q4 (Surgery)
16	Precision in 3-Dimensional Surface Imaging of the Face: A Handheld Scanner Comparison Performed in a Cadaveric Model. Koban KC , Cotofana S, Frank K, Green JB, Etzel L, Li Z, Giunta RE, Schenck TL. Aesthet Surg J. 2019 Mar 14;39(4):NP36-NP44. doi: 10.1093/asj/sjy242. PMID: 30239592	IF 3,799 Q1 (Surgery)
17	Chances and limitations of a low-cost mobile 3D scanner for breast imaging in comparison to an established 3D photogrammetric system. Koban KC* , Härtnagl F*, Titze V, Schenck TL, Giunta RE. J Plast Reconstr Aesthet Surg. 2018 Oct;71(10):1417-1423. doi: 10.1016/j.bjps.2018.05.017. Epub 2018 Jun 8. PMID: 29970344	IF 2,228 Q2 (Surgery)
18	En Route for Objective Evaluation of Form, Volume, and Symmetry in Plastic Surgery using 3-D Intraoperative Scans. Koban KC , Schenck T, Metz PM, Volkmer E, Haertnagl F, Titze V, Giunta RE. Handchir Mikrochir Plast Chir. 2016 Apr;48(2):78-84. doi: 10.1055/s-0042-104506. Epub 2016 Apr 21. PMID: 27100943	IF 0,700 Q4 (Surgery)
19	3D-imaging and analysis for plastic surgery by smartphone and tablet: an alternative to professional systems? Koban KC* , Leitsch S*, Holzbach T, Volkmer E, Metz PM, Giunta RE. Handchir Mikrochir Plast Chir. 2014 Apr;46(2):97-104. doi: 10.1055/s-0034-1371822. Epub 2014 Apr 28. PMID: 24777459	IF 0,651 Q4 (Surgery)

Originalarbeiten als Koautor/in

	Titel, Autoren, Journal	Impact Factor und Quartile
1	Quality of Life in Lymphedema Patients Treated by Microsurgical Lymphatic Vessel Transplantation-A Long-Term Follow-Up. Hock LA, Nürnberger T, Koban KC , Wiggerhauser PS, Giunta R, Demmer W. Life (Basel). 2024 Jul 30;14(8):957. doi: 10.3390/life14080957. PMID: 39202699; PMCID: PMC11355233	IF 3,200 (2023) Q1 (Biology)
2	How Reliable Is Breast Volume Assessment When the Patient Is Lying Flat?-Volumetric Assessment of Breast Volume Using a Vectra H2 Handheld Device in Different Positions. Macek A, Leitsch S, Koban KC , Mayer JM, Loucas R, Holzbach T. J Clin Med. 2024 Jan 25;13(3):709. doi: 10.3390/jcm13030709. PMID: 38337404; PMCID: PMC10856139.	IF 3,000 (2023) Q1 (Medicine, General & Internal)
3	Evaluation of Intraoperative Volumetric Assessment of Breast Volume Using 3D Handheld Stereo Photogrammetric Device. Loucas R, Loucas M, Leitsch S, Danuser K, Reichard G, Haroon O, Mayer JM, Koban K , Holzbach T. J Pers Med. 2023 Aug 15;13(8):1262. doi: 10.3390/jpm13081262. PMID: 37623512	IF 3,400 (2022) Q2 (Health Care Sciences & Services)
4	How Useful Is the SSN-Nipple Distance? An Analytical Questionnaire Survey on Anthropometric Measurements for the Aesthetically Ideal Positioning of the Nipple-Areolar Complex. Loucas R, Loucas M, Leitsch S, Mayer JM, Alberti A, Haroon O, Petrus M, Koban KC , Holzbach T. J Clin Med. 2023 Mar 25;12(7):2494. doi: 10.3390/jcm12072494. PMID: 37048578	IF 3,9 (2022) Q2 (Medicine, General & Internal)
5	The Impact of Breast Symmetry on Eye Movement and Gaze Pattern: An Eye-Tracking Investigation. Moellhoff N, Kandelhardt C, Ehrl D, Kohler L, Koban K , Giunta RE, Guertler A, Mardini S, Cotofana S, Frank K. Aesthet Surg J. 2021 Oct 15;41(11):NP1512-NP1518. doi: 10.1093/asj/sjab285. PMID: 34272851	IF 4,487 Q1 (Surgery)
6	Scalp Reconstruction after Malignant Tumor Resection: An Analysis and Algorithm. Ehrl D, Brueggemann A, Broer PN, Koban K , Giunta R, Thon N. J Neurol Surg B Skull Base. 2020 Apr;81(2):149-157. doi: 10.1055/s-0039-1683371. Epub 2019 Mar 1. PMID: 32206533	IF 1,826 Q4 (Clinical Neurology)
7	Lifting vs volumizing-The difference in facial minimally invasive procedures when respecting the line of ligaments. Casabona G, Frank K, Koban KC , Freytag DL, Schenck TL, Lachman N, Green JB, Toni S, Rudolph C, Cotofana S. J Cosmet Dermatol. 2019 Oct;18(5):1237-1243. doi: 10.1111/jocd.13089. Epub 2019 Aug 12. PMID: 31402563	IF 1,621 Q3 (Dermatology)

8	<p>Influences of Age, Gender, and Body Mass Index on the Depth of the Superficial Fascia of the Arm and Thigh. Casabona G, Frank K, Koban KC, Gotkin RH, Webb KL, Freytag DL, Green JB, Nicolau PJ, Schenck TL, Cotofana S. Dermatol Surg. 2019 Jul 8. doi: 10.1097/DSS.0000000000001986. Online ahead of print. PMID: 31318826</p>	<p>IF 2,567 Q2 (Dermatology)</p>
9	<p>Clinical Validation of the Surface Volume Coefficient for Minimally Invasive Treatment of the Temple. Cotofana S, Koban K, Pavicic T, Yankonva M, Frank K, Green JB, Gotkin RH, Etzel L, Giunta RE, Schenck TL. J Drugs Dermatol. 2019 Jun 1;18(6):533. PMID: 31251545</p>	<p>IF 1,464 Q3 (Dermatology)</p>
10	<p>Influences of Age, Gender, and Body Mass Index on the Thickness of the Abdominal Fatty Layers and its Relevance for Abdominal Liposuction and Abdominoplasty. Frank K, Hamade H, Casabona G, Gotkin RH, Kaye KO, Tiryaki T, Freytag DL, Bialowas C, Koban KC, Cotofana S. Aesthet Surg J. 2019 Sep 13;39(10):1085-1093. doi: 10.1093/asj/sjz131. PMID: 31056694</p>	<p>IF 3,799 Q1 (Surgery)</p>
11	<p>The Surface-Volume Coefficient of the Superficial and Deep Facial Fat Compartments: A Cadaveric Three-Dimensional Volumetric Analysis. Cotofana S, Koban KC, Konstantin F, Green JB, Etzel L, Giunta RE, Schenck TL. Plast Reconstr Surg. 2019 Jun;143(6):1605-1613. doi: 10.1097/PRS.0000000000005524. PMID: 30907804 Publikation zur kumulativen Disseration des Antragsteller. Nicht für die Wertung nach § 5 Abs. 4 Satz 4 i. V. m. § 3 Abs. 1 Satz 1 Ziffer 2 der Habilitationsordnung.</p>	<p>IF 4,235 Q1 (Surgery)</p>
12	<p>Influence of Age, Sex, and Body Mass Index on the Depth of the Superficial Fascia in the Face and Neck. Casabona G, Frank K, Koban KC, Schenck TL, Lopez VP, Webb KL, Hamade H, Freytag DL, Green JB, Cotofana S. Dermatol Surg. 2019 Nov;45(11):1365-1373. doi: 10.1097/DSS.0000000000001909. PMID: 30882511</p>	<p>IF 2,567 Q2 (Dermatology)</p>
13	<p>Nerve transfer of the anterior interosseous nerve to the thenar branch of the median nerve - an anatomical and histological analysis. Frank K*, Englbrecht M*, Koban KC, Cotofana SC, Stewart JK, Giunta RE, Schenck TL. J Plast Reconstr Aesthet Surg. 2019 May;72(5):751-758. doi: 10.1016/j.bjps.2018.12.017. Epub 2018 Dec 15. PMID: 30600157</p>	<p>IF 2,390 Q2 (Surgery)</p>

14	The Functional Anatomy of the Deep Facial Fat Compartments: A Detailed Imaging-Based Investigation. Cotofana S, Gotkin RH, Frank K, Koban KC , Targosinski S, Sykes JM, Schlager M, Schlattau A, Schenck TL. Plast Reconstr Surg. 2019 Jan;143(1):53-63. doi: 10.1097/PRS.0000000000005080. PMID: 30589776	IF 4,235 Q1 (Surgery)
15	Age and Gender Differences of the Frontal Bone: A Computed Tomographic (CT)-Based Study. Frank K, Gotkin RH, Pavicic T, Morozov SP, Gomboleviskiy VA, Petraikin AV, Movsisyan TV, Koban KC , Hladik C, Cotofana S. Aesthet Surg J. 2019 Jun 21;39(7):699-710. doi: 10.1093/asj/sjy270. PMID: 30325412	IF 3,799 Q1 (Surgery)
16	The Functional Anatomy of the Superficial Fat Compartments of the Face: A Detailed Imaging Study. Schenck TL, Koban KC , Schlattau A, Frank K, Sykes JM, Targosinski S, Erlbacher K, Cotofana S. Plast Reconstr Surg. 2018 Jun;141(6):1351-1359. doi: 10.1097/PRS.0000000000004364. PMID: 29750762	IF 3,946 Q1 (Surgery)
17	The Anatomy behind Adverse Events in Hand Volumizing Procedures: Retrospective Evaluations of 11 Years of Experience. Frank K, Koban K, Targosinski S, Erlbacher K, Schenck TL, Casabona G, Braz AV, Pavicic T, Cotofana S. Plast Reconstr Surg. 2018 May;141(5):650e-662e. doi: 10.1097/PRS.0000000000004211. PMID: 29697606	IF 3,946 Q1 (Surgery)
18	Calvarial Volume Loss and Facial Aging: A Computed Tomographic (CT)-Based Study. Cotofana S, Gotkin RH, Ascher B, Morozov SP, Gomboleviskiy VA, Laipan AS, Pyatintsky IA, Movsisyan TV, Koban KC , Hladik C, Frank K. Aesthet Surg J. 2018 Sep 14;38(10):1043-1051. doi: 10.1093/asj/sjy096. PMID: 29635393	IF 3,480 Q2 (Surgery)
19	Updated anatomy of the buccal space and its implications for plastic, reconstructive and aesthetic procedures. Schenck TL, Koban KC , Schlattau A, Frank K, Sclafani AP, Giunta RE, Roth MZ, Gaggl A, Gotkin RH, Cotofana S. J Plast Reconstr Aesthet Surg. 2018 Feb;71(2):162-170. doi: 10.1016/j.bjps.2017.11.005. Epub 2017 Dec 8. PMID: 29233508	IF 2,228 Q2 (Surgery)
20	Sensory reanimation of the hand by transfer of the superficial branch of the radial nerve to the median and ulnar nerve. Schenck TL, Lin S, Stewart JK, Koban KC , Aichler M, Rezaeian F, Giunta RE. Brain Behav. 2016 Oct 9;6(12):e00578. doi: 10.1002/brb3.578. eCollection 2016 Dec. PMID: 28032001	IF 2,157 Q3 (Behavioral Sciences)

Kasuistiken / Case Reports

	Titel, Autoren, Journal	Impact Factor und Quartile
1	Relevance of Early Structured Diagnosis to Successful Nerve Reconstruction: A Case Report of an Alpine Professional Skier with an Axillary Nerve Injury. Haas-Lützenberger EM, Hladik MM, Koban KC , Giunta R. Handchir Mikrochir Plast Chir. 2023 Sep;55(5):376-381. doi: 10.1055/a-2055-1642. Epub 2023 Jun 26. PMID: 37364605	IF 0,600 Q4 (Surgery)
2	Prevention of Postoperative Peritendinous Adhesions with Bioresorbable Suprathel Barrier Membrane. Wiggenhauser PS, Wachtel N, Koban KC , Giunta RE, Frick A, Ehrl D. Plast Reconstr Surg Glob Open. 2022 Jun 8;10(6):e4370. doi: 10.1097/GOX.0000000000004370. eCollection 2022 Jun. PMID: 35692669	IF 1,500 Q3 (Surgery)
3	Case report of frontobasal reconstruction and volume augmentation using a free gracilis muscle flap and autologous fat grafting: utilising the free flap as a scaffold for fat transplantation. Möllhoff N, Koban KC , Engelhardt TO, Tonn JC, Giunta RE. Handchir Mikrochir Plast Chir. 2020 Aug;52(4):330-334. doi: 10.1055/a-1150-7601. Epub 2020 Aug 21. PMID: 32823367 German.	IF 1,018 Q4 (Surgery)
4	Multimodal Therapy of Ulcers on the Dorsum of the Hand With Exposed Tendons Caused by Pyoderma Gangrenosum. Leitsch S, Koban KC , Pototschnig A, Titze V, Giunta RE. Wounds. 2016 Mar;28(3):E10-3. PMID: 26992198	IF 0,970 Q4 (Dermatology)

Übersichtsartikel / Reviews

	Titel, Autoren, Journal	Impact Factor und Quartile
1	Artificial Intelligence in Dermatology Image Analysis: Current Developments and Future Trends. Li Z*, Koban KC* , Schenck TL, Giunta RE, Li Q, Sun Y. J Clin Med. 2022 Nov 18;11(22):6826. doi: 10.3390/jcm11226826. PMID: 36431301	IF 3,900 Q2 (Medicine, General & Internal)
2	The COVID-19 Pandemia and its consequences for plastic surgery and hand surgery. Giunta RE, Frank K, Moellhoff N, Braig D, Haas EM, Ahmad N, Hagen CS, Wiggenhauser PS, Frick A, Koban K , Wachtel N, Taha S, Ehrl D, Schenck TL. Handchir Mikrochir Plast Chir. 2020 Jun;52(3):233-241. doi: 10.1055/a-1163-9009. Epub 2020 Apr 28. PMID: 32344444	IF 1,018 Q4 (Surgery)
3	The Facial Adipose Tissue: A Revision. Kruglikov I, Trujillo O, Kristen Q, Isac K, Zorko J, Fam M, Okonkwo K, Mian A, Thanh H, Koban K , Sclafani AP, Steinke H, Cotofana S. Facial Plast Surg. 2016 Dec;32(6):671-682. doi: 10.1055/s-0036-1596046. Epub 2016 Dec 29. PMID: 28033645	IF 0,761 Q4 (Surgery)

10. Danksagung

Viele Menschen haben mich auf dem Weg zur Habilitation begleitet. Ihnen allen möchte ich herzlich danken.

Mein großer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr. Riccardo Giunta, der als Klinikdirektor der Abteilung für Handchirurgie, Plastische und Ästhetische Chirurgie die Geschäftsführung des Fachmentorats übernommen und mich in der Fertigstellung der Habilitation stets unterstützt hat, sowie für die fortwährende Unterstützung und Förderung während meiner Tätigkeit als Arzt und Wissenschaftler.

Besonders bedanken möchte ich mich bei PD Dr. Severin Wiggerhauser und PD Dr. Petra Zimmermann meines Fachmentorats für die Begleitung während des Habilitationsprozesses und für den konstruktiven wissenschaftlichen Austausch.

Ein großes Dankeschön gilt auch dem gesamten Pflege- und Ärzteteam der Abteilung für Handchirurgie, Plastische Chirurgie und Ästhetische Chirurgie für die immerzu kollegiale und freundschaftliche Zusammenarbeit. Ohne die Unterstützung zahlreicher Kolleginnen und Kollegen, unter anderem aus der Plastischen Chirurgie, Strahlentherapie, und Anatomie, national wie international, wäre meine akademische Weiterentwicklung nicht möglich gewesen. Hierfür möchte ich mich bei allen Beteiligten herzlich bedanken.

Vielen Dank an die Doktoranden Sandra Boyaci, Lucas Etzel, Felix Härtnagl, Zhouxiao Li, Philipp Perko, Niels Sanktjohanser und Ya Xu, die ich während zahlreicher Forschungsarbeiten mitbetreuen durfte.

Allen Patientinnen und Patienten, die als Studienteilnehmer*innen maßgeblich zum Erfolg der Untersuchungen führten, möchte ich herzlich danken.

Ein besonderer Dank gilt meiner Freundin Kerstin sowie meiner Familie, auf deren beständige Unterstützung, Geduld und Rückhalt ich in allen Phasen dieser Arbeit vertrauen konnte.