

Aus der
Abteilung für Hand-, Plastische und Ästhetische Chirurgie
Klinik der Universität München
Direktor: Prof. Dr. Riccardo Giunta

**Überprüfung eines mobilen 3D Oberflächenscanners zur Beurteilung
plastisch-chirurgischer Eingriffe der Brust und Etablierung einer
intraoperativen 3D Analyse**

Dissertation
zum Erwerb des Doktorgrades der Medizin
an der Medizinischen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von
Felix Michael Maria Härtnagl

aus
Salzburg

Jahr
2025

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichtersteller: Prof. Dr. Riccardo Giunta
Mitberichtersteller: Prof. Dr. Rachel Würstlein
PD Dr. Thomas Holzbach

Mitbetreuung durch den
promovierten Mitarbeiter:

Dekan: Prof. Dr. med. Thomas Gudermann

Tag der mündlichen Prüfung: 09.10.2025



LUDWIG-
MAXIMILIANS-
UNIVERSITÄT
MÜNCHEN

Promotionsbüro
Medizinische Fakultät



Eidesstattliche Versicherung

Felix Michael Maria Härtnagl

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Dissertation mit dem Titel:

„Überprüfung eines mobilen 3D Oberflächenscanners zur Beurteilung plastisch-chirurgischer Eingriffe der Brust und Etablierung einer intraoperativen 3D Analyse“

selbständig verfasst, mich außer der angegebenen keiner weiteren Hilfsmittel bedient und alle Erkenntnisse, die aus dem Schrifttum ganz oder annähernd übernommen sind, als solche kenntlich gemacht und nach ihrer Herkunft unter Bezeichnung der Fundstelle einzeln nachgewiesen habe.

Ich erkläre des Weiteren, dass die hier vorgelegte Dissertation nicht in gleicher oder in ähnlicher Form bei einer anderen Stelle zur Erlangung eines akademischen Grades eingereicht wurde.

München, 19.10.2025

Ort, Datum

Felix Michael Maria Härtnagl

Die vorliegende Dissertation wurde nach § 4a der Promotionsordnung in der konsolidierten Fassung mit der 11. Änderungssatzung vom 15. September 2016 für die Medizinische Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität München als kumulative Dissertation gestaltet.

Der Arbeitsanteil aller Ko-Autoren wird separat bestätigt und eingereicht zusammen mit der Erklärung zu § 4a der Richtlinien für die kumulative Dissertation an der medizinischen Fakultät der LMU.



LUDWIG-
MAXIMILIANS-
UNIVERSITÄT
MÜNCHEN

Promotionsbüro
Medizinische Fakultät



**Erklärung zur Übereinstimmung der gebundenen Ausgabe der Dissertation
mit der elektronischen Fassung**

Härtnagl, Felix Michael Maria

Name, Vorname

Hiermit erkläre ich, dass die elektronische Version der eingereichten Dissertation mit dem Titel:

**Überprüfung eines mobilen 3D Oberflächenscanners zur Beurteilung plastisch-chirurgischer
Eingriffe der Brust und Etablierung einer intraoperativen 3D Analyse**

in Inhalt und Formatierung mit den gedruckten und gebundenen Exemplaren übereinstimmt.

München, 19.10.2025

Ort, Datum

Felix Michael Maria Härtnagl

Die vorliegende kumulative Dissertation umfasst folgende bereits veröffentlichte Arbeiten in referierten (peer-reviewed) Fachzeitschrift von internationalem Niveau:

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

(*) Beide aufgeführten Personen teilen sich die Autorenschaft gleichmäßig.

Journal Impact Factor 2018 = 2,228

Clarivate JCR Kategorie SURGERY 2018 Rang = 77/203 (Q2)

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

Journal Impact Factor 2022 = 2,7

Clarivate JCR Kategorie SURGERY 2022 Rang = 72/213 (Q2)

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	7
Abkürzungsverzeichnis	8
Publikationsliste	9
Eigenanteil der Arbeiten	10
1. Einleitung	11
1.1. Vorwort	11
1.2. Konventionelle Messtechniken in der Plastischen Chirurgie	12
1.3. Einsatz der 3D-Oberflächenerfassung	13
1.4. Aktuelle wissenschaftliche Forschung	15
2. Material und Methoden	17
2.1. 3D Scanner-Systeme	17
2.1.1. VECTRA® XT 3D Imaging System	17
2.1.2. SENSE™ 3D Scanner	19
2.1.3. Workflow für den intraoperativen 3D Scan mit dem SENSE™	20
2.2. Anthropometrische und volumetrische Auswertung	23
3. Zielsetzung	25
4. Inhalte der Promotionsarbeit	26
4.1. Publikation 1	26
4.2. Publikation 2	31
5. Zusammenfassung	35
6. Summary	38
7. Publikationen	41
7.1. Veröffentlichung Nr. 1	41
7.2. Veröffentlichung Nr. 2	49
Literaturverzeichnis	57
Danksagung	62
Lebenslauf	63

Abkürzungsverzeichnis

2D = Zwei-dimensional

3D = Drei-dimensional

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

CT = Computertomographie

LMU = Ludwig-Maximilians-Universität München

MRT = Magnetresonanztomographie

Mesh = 3D-Oberflächenmodell

RMSE = Root Mean Square

VECTRA = VECTRA® XT 3D Imaging System

SENSE™ = SENSE™ 3D Scanner

Publikationsliste

Veröffentlichungen in begutachteten Fachmagazinen:

- 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
- 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

Wissenschaftliche Vorträge mit Bezug zur Dissertation:

- Koban K, Schenck T, Titze V, **Härtnagl F**, Metz P, Leitsch S, Giunta R. „Auf dem Weg zur objektiven Evaluation von Form, Volumen und Symmetrie in der Plastischen Chirurgie mittels intraoperativer 3D Scans“. 47. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft der Plastischen, Rekonstruktiven und Ästhetischen Chirurgen (DGPRÄC), 21. Jahrestagung der Vereinigung der Deutschen Ästhetisch-Plastischen Chirurgen (VDÄPC) 2016 in Kassel
- Leitsch S, **Härtnagl F**, Metz P, Koban K, Titze V, Giunta R. Volumetric 3D Surface Imaging im intraoperativen Einsatz: Validierung des mobilen Scanners Sense™ (3D Systems Inc.) und Echtzeitdatenanalyse mit direktem Feedback an den Operateur. 46. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft der Plastischen, Rekonstruktiven und Ästhetischen Chirurgen (DGPRÄC), 20. Jahrestagung der Vereinigung der Deutschen Ästhetisch-Plastischen Chirurgen (VDÄPC) 2015 in Berlin

Eigenanteil der Arbeiten

Ich, Felix Michael Maria Härtnagl war im Zuge unserer wissenschaftlichen Arbeit wesentlich verantwortlich für die Erstellung der Publikationen „**Chances and limitations of a low-cost mobile 3D scanner for breast imaging in comparison to an established 3D photogrammetric system**“ (bei geteilter Erst-Autorenschaft) und „**Objective evaluation of volumetric changes during breast augmentation using intraoperative three-dimensional surface imaging**“ (als Ko-Autor).

Mir oblag dabei in beiden Studien sowohl die Literaturrecherche, die Selektion der Probanden und die Erhebung der für die Studien relevanten Patienten-Daten.

Als einer von insgesamt zwei Untersuchern führte ich die photogrammetrische 3D Bilderfassung, die Umwandlung in ein 3D-Modell, sowie den direkten Vergleich der einzelnen Modelle miteinander und die Auswertung der einzelnen Messergebnisse durch.

Des Weiteren erfolgte in Zusammenarbeit mit Herrn Dr. Konstantin Christoph Koban, als geteilter Erstautor der ersten Studie, die kritische Evaluierung und Erstellung des Manuskripts. Aufgrund der von mir eingebrachten Arbeitsleistung zeigte sich hier eine geteilte Erst-Autorenschaft indiziert.

Abschließend war ich im Zuge der Publikationen für einen wesentlichen Anteil der statistischen Auswertung und Interpretation der Ergebnisse im klinischen Kontext verantwortlich.

1. Einleitung

1.1. Vorwort

Die moderne Medizin zeichnet sich durch kontinuierliche Fortschritte in der Technik und zunehmend standardisierte, ökonomisierte Abläufe aus. In Zeiten steigender Kosten im Gesundheitswesen nimmt die evidenzbasierte Medizin auch in der Chirurgie einen bedeutenden Stellenwert ein.

Insbesondere in der Plastischen Chirurgie ist es heutzutage unerlässlich, auf die individuellen Bedürfnisse und Vorstellungen der Patienten einzugehen, um auf einem hohen Niveau praktizieren zu können. Das Bild einer idealen Brust wird nicht nur durch kulturelle und soziale Faktoren, sondern auch durch Alter, Geschlecht und die Selbst- sowie Fremdwahrnehmung maßgeblich beeinflusst. Aus diesem Grund kann es keinen Konsens über die "Perfekte Form" der Brust geben¹.

Die äußere Erscheinungsform wird maßgeblich durch die Anatomie und die Volumenverteilung der Gewebe definiert. Bei brustchirurgischen Eingriffen wie Mammareduktionsplastiken, Brustrekonstruktion mittels Implantat oder autologen Lappenplastiken, Korrektur von Asymmetrien durch Liposuktion oder autologen Fettgewebstransfer sowie der alloplastischen Augmentation kommt es stets zu Volumenveränderungen, die präzise erfasst und umgesetzt werden sollten.

Eine objektive Erfassung der anthropometrischen und volumetrischen Verhältnisse kann hier den Operateur in jedem Schritt der Behandlung unterstützen. Die kontinuierliche Integration von modernen bildgebenden Verfahren wie der dreidimensionalen Oberflächendarstellung ermöglicht es, präzise Vorher-Nachher-Modelle zu erstellen. Diese dienen nicht nur der Patientenaufklärung, sondern unterstützen auch den Chirurgen bei der genauen Planung und Ausführung verschiedener Eingriffe.

Dies fördert eine gute Kommunikation zwischen dem Patienten und dem behandelnden Arzt und ist daher essenziell, um das beste Behandlungsergebnis zu erzielen und die Patientenzufriedenheit zu erhöhen.

1.2. Konventionelle Messtechniken in der Plastischen Chirurgie

In der Plastischen Chirurgie nimmt die Symmetrie eine entscheidende Rolle in der Güte einer Operation ein, da sie nicht nur ästhetische Gesichtspunkte berücksichtigt, sondern auch maßgeblich zur Erreichung eines natürlichen Ergebnisses nach einer Operation beiträgt, was wiederum die Patientenzufriedenheit steigert^{2,3}. Dieser Fokus auf Symmetrie spiegelt sich in der präoperativen Planung sowie der kontinuierlichen intra- und postoperativen Überwachung wieder, wobei häufig auf bewährte anthropometrische Messmethoden zurückgegriffen wird. Die Anwendung von Maßband und die Bestimmung anatomischer Landmarken haben sich als Standardverfahren etabliert und ermöglichen durch ihre einfache und schnelle Umsetzung valide sowie reproduzierbare Messergebnisse⁴. Zusätzlich wurden im Laufe der letzten Jahrzehnte verschiedene innovative Verfahren wie Schablonen oder ähnliche Messmethoden entwickelt, die die präzise Simulation und Überprüfung der angestrebten Symmetrie ermöglichen^{2,5}.

Trotz dieser Fortschritte stoßen die klassischen Verfahren an Grenzen, insbesondere bei der zweidimensionalen Vermessung der Körperoberfläche. Sie bieten lediglich eine Annäherung an die komplexen anatomischen Verhältnisse und erlauben keine exakte Bestimmung von Volumina und Gewebsverteilung. Daher wird die dreidimensionale Erfassung der Körperform als unabdingbar betrachtet, um eine präzise und objektive Beurteilung der Oberflächen, Körperkonturen und etwaiger Volumenveränderungen zu gewährleisten.

Insbesondere im Zusammenhang mit plastisch-chirurgischen Eingriffen an der Brust spielt die Bestimmung von Volumina eine entscheidende Rolle und ist Gegenstand aktueller Forschung⁶⁻¹¹. In der Literatur werden verschiedene Messmethoden wie Mammographie, Ultraschall, CT- und MRT-Bildgebung, Gips- und Thermoplast-Abdrücke, sowie das archimedische Prinzip der Wasserverdrängung beschrieben¹²⁻¹⁶.

Jedoch sind diese Methoden oft durch mangelnde Präzision und Reproduzierbarkeit, hohe Kosten, langen Zeitaufwand oder unnötige Strahlenbelastung im klinischen Alltag nur bedingt praktikabel. Es bedarf daher weiterer Forschung und Entwicklung, um praxisorientierte, präzise Methoden zur dreidimensionalen Erfassung der Körperform in der Plastischen Chirurgie zu etablieren und somit die Behandlungsqualität weiter zu verbessern.

1.3. Einsatz der 3D-Oberflächenerfassung

Mit den stetigen Fortschritten in der Computertechnik und der Entwicklung von 3D-Bilderfassungstechnologien, sowie der zunehmenden Digitalisierung hat die dreidimensionale Oberflächenerfassung (3DSI) ihren Einzug in die Medizin, insbesondere in den Fachbereich der Plastischen Chirurgie, gehalten. Verschiedene Verfahren wie Laserscan, Moiré Topographie und Infrarot-Tiefenkameras wurden anfänglich genutzt, doch seit den frühen 2000er Jahren hat sich die Nahbereichsphotogrammetrie als dominierende Methode etabliert^{10,17-22}. Diese als "3D-Kamera" oder "3D-Scanner" bezeichneten Systeme haben sich durch ihre schnelle und unkomplizierte Handhabung, strahlungsfreie und nicht-invasive Technik, sowie die sinkenden Anschaffungskosten sowohl an Universitätskliniken als auch in plastisch-chirurgischen Praxen erfolgreich durchgesetzt.

Die genaue Methodik zur Erstellung einer dreidimensionalen Oberflächenabbildung mittels Photogrammetrie basiert auf der Berechnung von 3D-Bildpunkten aus mehreren Stereo-Bildpaaren. Diese Technik, bereits vielfach in der Literatur für diverse Anwendungsszenarien in der Medizin, Industrie und Technik beschrieben, ermöglicht die präzise Erfassung von Distanzen, Volumina, Volumenverteilungen und Asymmetrien der Körperkonturen²³⁻³⁰. So können mit Hilfe der 3DSI Distanzen, Volumina, Volumenverteilungen und Asymmetrien der Körperkonturen erfasst werden.

Im Vergleich zur MRT-Bildgebung zeichnet sich die 3DSI durch eine deutlich schnellere Bildakquisition, einfache Handhabung, niedrigere Kosten und ausreichende Genauigkeit sowie gute Reproduzierbarkeit der Messdaten für klinische Zwecke aus³¹.

Sie ermöglicht präzise Messungen, die sowohl den präoperativen Befund als auch das postoperative Ergebnis dokumentieren. Die gewonnenen Daten dienen nicht nur der Planung der operativen Versorgung, sondern auch der Kontrolle des Operationserfolgs. Der Einsatz von 3D-Scannern erlaubt zudem die dynamische Erfassung von Volumenveränderungen mit hoher Auflösung, was sie besonders für den intraoperativen Einsatz interessant macht.

Es ist wichtig zu beachten, dass aufgrund der inhärenten technischen Gegebenheiten der 3D-Photogrammetrie keine Beurteilung von tieferen Strukturen möglich ist, da nur die Körperoberfläche erfasst wird. Bei Verdacht auf knöcherne Ursachen beispielsweise einer Deformität sind daher andere apparative Untersuchungen erforderlich.

Des Weiteren sind die Ergebnisse der 3DSI stark von der Lagerung und Position des Patienten abhängig. Im Kontext der Brustchirurgie erfordert dies standardisierte Abläufe mit konsistenter Positionierung der Patienten, um verwertbare und vergleichbare Messdaten zu erhalten. Die 3DSI eignet sich daher besonders für vergleichende Aufnahmen, wie sie beispielsweise im Untersuchungszimmer am stehenden Patienten oder im OP in Beach-Chair-Lagerung durchgeführt werden können³²⁻³⁴.

Die zunehmend kompakteren Geräteformen und die innovativen Funktionen von Hard- und Software machen den täglichen Einsatz von 3D-Scannern und Oberflächenerfassungstechnologien zur Dokumentation und Planung von Prozeduren äußerst attraktiv. Von großen stationären Kamerasystemen bis hin zu handgeführten 3D-Scannern oder der Oberflächenerfassung mittels Smartphones und Software sind diverse Produkte am Markt verfügbar und Gegenstand wissenschaftlicher Forschung^{33,35-40}

1.4. Aktuelle wissenschaftliche Forschung

In den letzten beiden Dekaden wurden zahlreiche wissenschaftliche Publikationen veröffentlicht, die sich sowohl mit den verschiedenen am Markt verfügbaren 3DSI-Geräten als auch deren Anwendungsbereichen in der plastischen Chirurgie auseinandersetzen. Diese Studien umfassen diverse Bereiche wie das Gesicht^{3,17,38,40-48}, die Brust^{20,29,31,33,34,49-53} sowie den Torso und die Extremitäten^{11,32,54}. Die Analysen konzentrieren sich dabei auf die Anwendbarkeit, Genauigkeit der Systeme und die Reproduzierbarkeit der Daten.

Unter den richtigen Voraussetzungen zeigen Studien schnell, dass 3DSI-Systeme vergleichbare Genauigkeiten wie anthropometrische Maßbandmessungen oder die Bestimmung linearer Distanzen aus CT- oder MRT-Datensätzen erreichen können. Es wurden nur geringe Abweichungen der Messdaten zwischen verschiedenen Untersuchern und anderen Untersuchungsmodalitäten festgestellt^{11,40,48,55,56}.

Sowohl große, professionelle und teurere 3D-Scanner-Systeme^{33,40,55}, als auch kostengünstige Produkte für den Heimgebrauch^{11,17,37,39,57} wurden für differenzierte Anwendungsszenarien validiert.

Besonders im Bereich formverändernder Eingriffe wie Brustaugmentationen, Mamma-Reduktionsplastiken oder Mamma-Rekonstruktionen wurden zahlreiche 3D-volumetrische Studien durchgeführt. Diese zeigten, dass die akquirierten Messdaten eine ausreichende Genauigkeit für den klinischen Alltag bieten. Bei der Berechnung relativer Brustvolumina können jedoch geringe systematische Abweichungen gegenüber den Goldstandards auftreten, da die 3DSI ausschließlich Oberflächen erfasst und keine Daten zur Thoraxwand als hinterer Abgrenzung der Brust enthält^{34,58}.

Für die Planung und Durchführung der operativen Versorgung sind absolute Volumenunterschiede jedoch von größerer Bedeutung, um ein symmetrisches Ergebnis zu erzielen. Prä- und postoperative 3D-Aufnahmen erfassen exakt verschiedene Eingriffe der Brustchirurgie und zeigen erwartete volumetrische Veränderungen mit minimalen Abweichungen.^{6,49,59} Dies ermöglicht eine

kostengünstige und strahlenfreie objektive Verfolgung der Veränderung der Brustmorphologie und -volumetrie über längere Zeitintervalle, was mit anderen Bildgebungstechniken nicht in gleicher Weise möglich ist.

Im Gegensatz zu invasiven Verfahren wie Mammographie, Computertomographie oder Magnetresonanztomographie ermöglicht die nicht-invasive 3DSI als handgeführtes Verfahren eine mobile Anwendung, sogar im Operationssaal.

Die vorliegende Dissertation untersucht auf Basis der zwei Publikationen speziell die Chancen und Limitationen mobiler, kostengünstiger 3D-Scanner Systeme in der Brustchirurgie sowie der intraoperativen Analyse von brustverändernden Eingriffen. Die Echtzeit-Evaluation am sterilen OP-Situs könnte hierbei dem versierten Chirurgen zusätzliche objektive Daten zur Bestimmung von Volumen und Symmetrie ermöglichen.

2. Material und Methoden

Zum Zwecke unserer Studien wurden die zwei unten beschriebenen 3D-Scanner-Systeme verwendet. Alle Arbeitsschritte, von der Akquisition der 3D Bilddatensätze über die angestellten Berechnungen und Analysen, werden im Folgenden beschrieben.

2.1. 3D Scanner-Systeme

2.1.1. VECTRA® XT 3D Imaging System



Abbildung 1: VECTRA® XT, Canfield Sci Inc.

Das VECTRA® XT 3D Imaging System (Canfield Sci. Inc., Parsippany, NJ, USA) ist ein etabliertes professionelles stationäres 3D-Scanner System, welches mit dem medizinischen Fokus auf 3D Erfassung des Gesichts, der Brust und des Rumpfes entwickelt wurde.^{33,40,60} In unserer Abteilung für Hand-, Plastische und Ästhetische Chirurgie wird es für die standardisierte Erfassung, Dokumentation und Simulation vor und nach plastisch-chirurgischen Eingriffen eingesetzt. Das System basiert auf der Nahbereichsphotogrammetrie. Nach der Kalibration und Einnahme einer standardisierten Haltung des Patienten vor dem Gerät erstellt das System mit 6 Kameras und einem proprietären Beleuchtungssystem simultane

digitale Fotoaufnahmen über einen Bereich von ca. 200°. Diese werden zu einem texturierten 3-D-Modell rekonstruiert.

In Bezug auf unsere Studien wurden dabei folgende Softwaremodule verwendet.

- Mirror® Suite VECTRA® XT
- Capture Module
- Breast Sculptor®
- VECTRA® XT 3D Analysis Module (VAM)

Nach der Modellerzeugung wurden Berechnungen und Analysen gemäß den Studienzielen durchgeführt.

Das VECTRA® XT System wird oft als Referenz zur Validierung anderer Scanner-Systeme oder 3DSI-Verfahren in der Literatur herangezogen, da fundierte Daten zur Präzision des Systems in Bezug auf anthropometrische Messungen sowie CT und MRT Daten vorliegen^{17,35,38,46,57}.

Es wurde daher im Rahmen der ersten Publikation „*Chances and limitations of a low-cost mobile 3D scanner for breast imaging in comparison to an established 3D photogrammetric system*“ als Referenzsystem unserer Untersuchungen eingesetzt.

2.1.2. SENSE™ 3D Scanner



Abbildung 2: SENSE™ 3D, 3DSystems Inc.

Die 3-dimensionale Erfassung von Körperoberfläche und Kontur mit Hilfe von photogrammetrischen Scanner-Systemen bietet diverse Einsatzmöglichkeiten bei formverändernden Eingriffen. Viele Systeme sind jedoch durch ihre Größe und mangelnde Mobilität für den intraoperativen Einsatz ungeeignet.

Der SENSE™ 3D Scanner (3D Systems®, South Carolina, USA) ist ein mobiler handgeführter 3D Scanner, der als Consumer-Produkt auf den Markt gebracht wurde. Im Gegensatz zum VECTRA® XT System, ist er nicht explizit für den medizinischen Einsatz konzipiert. Mit einem Einstiegspreis von \$399 (USD) ist dieses Gerät deutlich günstiger und wurde für den breiten Endverbrauchermarkt entwickelt.

Neben dem eigentlichen Scanner wird ein PC oder Laptop und die SENSE™ 3D Scanner Software benötigt.

Der SENSE™ 3D Scanner verwendet ein Stereo-Kamera-System und einen Infrarot-Tiefensensor für die Abtastung der Oberfläche mit bis zu 30 Bildern pro Sekunde. Die digitalen Bilddaten werden zu einem texturierten 3D-

Oberflächenmodell (Mesh) verarbeitet. Dies erlaubt eine bis zu 360° umfängliche Bildakquisition und Mesh-Berechnung, die als .obj- oder .stl-Datei exportiert werden kann. In unseren Arbeiten verwenden wir die Mirror Software des VECTRA® XT Systems für die Bearbeitung und Analyse der Daten.

Der SENSE™ 3D Scanner besitzt kein aktives Beleuchtungssystem, was bei schlechten Lichtverhältnissen oder Schatten im 3D-Mesh zu Löchern oder Artefakten führen kann. In unseren Arbeiten haben wir den intraoperativen Einsatz in der Brustchirurgie untersucht.

Der SENSE™ 3D Scanner wurde schon in mehrere Arbeiten bezüglich der Anwendbarkeit und Genauigkeit im Gesicht^{17,39}, der Brust³⁷ und bei 360° whole-body scans¹¹ untersucht. In unseren Arbeiten untersuchten wir den intraoperativen Einsatz in der Brustchirurgie.

2.1.3. Workflow für den intraoperativen 3D Scan mit dem SENSE™

Zur intraoperativen Evaluation der Symmetrie bei Brustaugmentationen mittels anthropometrischer Distanzen und volumetrischer Veränderungen wurde das 3DSI als zusätzliches objektives Messwerkzeug im Rahmen der zweiten Publikation verwendet. Hierfür wurde ein standardisierter Arbeitsablauf geschaffen, um vergleichbare Daten zu erhalten.

Die Durchführung erfolgte mit steriler OP-Abdeckung des Patienten und unter Zuhilfenahme eines am SENSE™ 3D Scanner befestigten Monopods. Eine Arbeitsdistanz von circa 90cm wurde stets eingehalten, um optimale Bildaufnahmen zu erhalten und die kontinuierliche Sterilität zu gewährleisten. Der Patient befand sich dabei auf dem OP-Tisch in Beach-Chair-Position mit circa 60° aufgerichtetem Oberkörper. Der Situs wurde mit dem Scanner im Kreuzgang abgefahren und das erzeugte 3D-Modell auf dem verwendeten Laptop als .obj-Datei gespeichert. Alle 3D-Aufnahmen mit dem SENSE™, welche zur Auswertung

herangezogen wurden, wurden intraoperativ unmittelbar vor dem Hautschnitt und nach der Hautnaht durchgeführt.

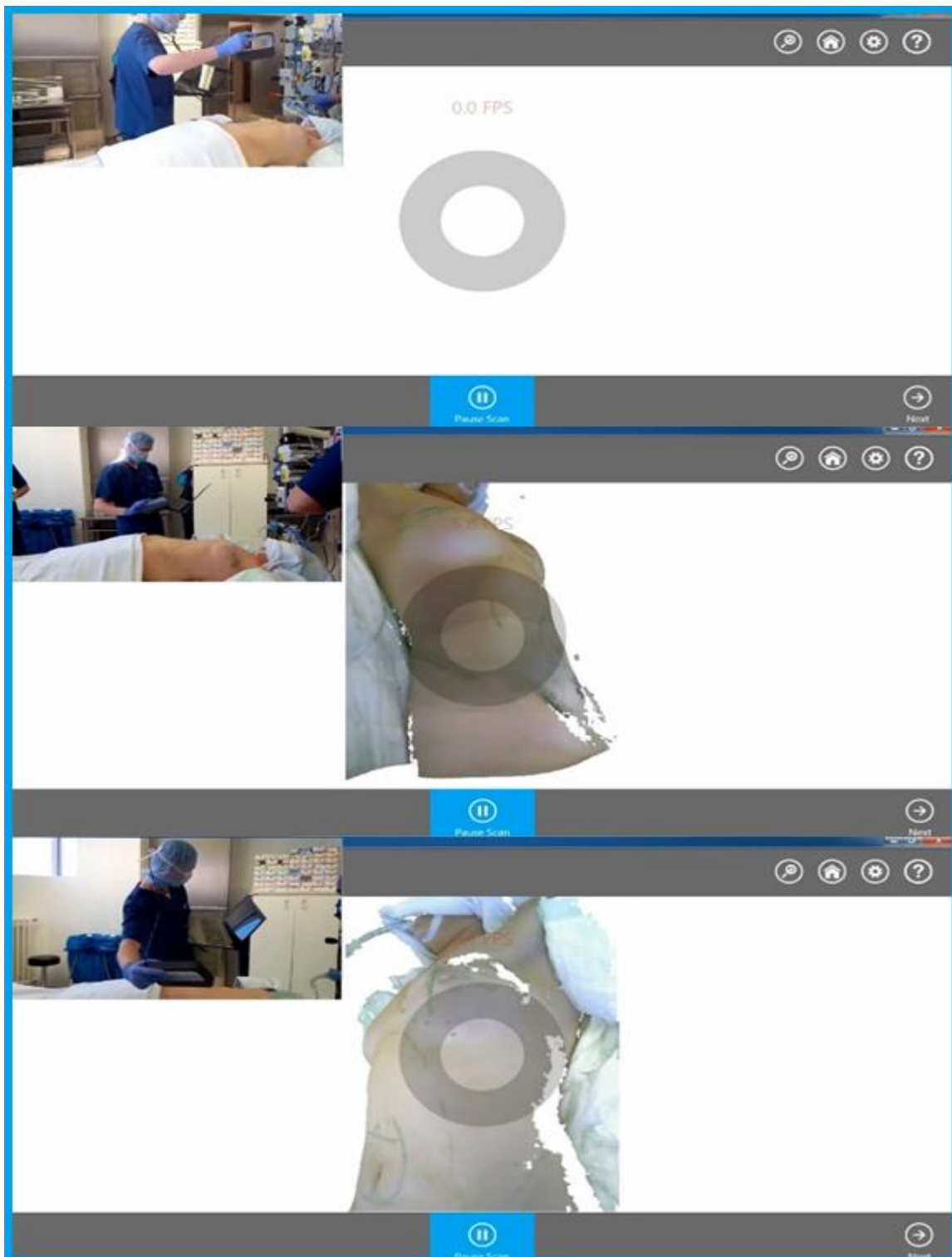


Abbildung 3-5: intraoperative 3D-Bilderfassung: Mit Hilfe des SENSE™ 3D Scanner wird der OP-Situs intra-operativ unter Einhaltung der Sterilität in „no-touch“ Technik digital abgetastet und ein 3D Modell berechnet.

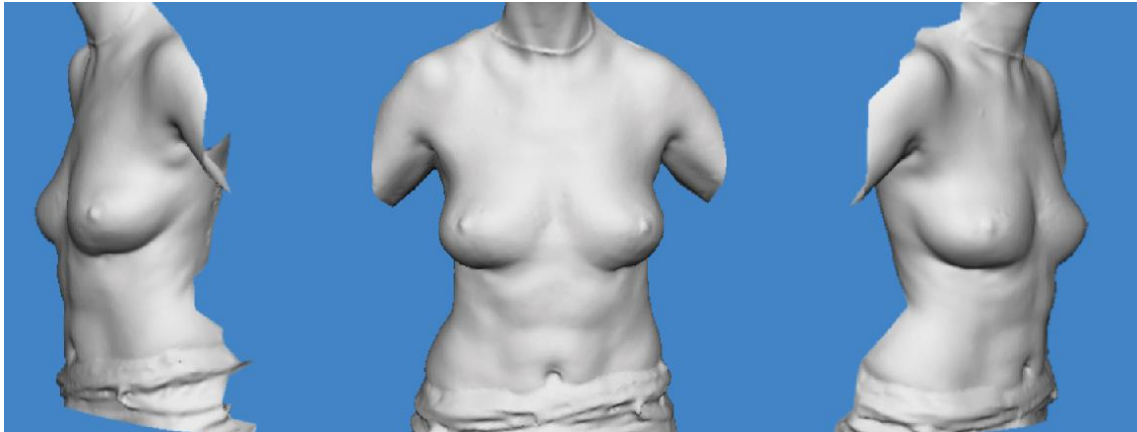


Abbildung 6: Beispielhafte Darstellung eines 3D Modells ohne Texturierung nach erfolgter Erfassung mittels SENSE™ 3D Scanner. Die so ermittelten 3D Modelle wurden in Folge zur weiteren Analyse in die Mirror Suite Software importiert.

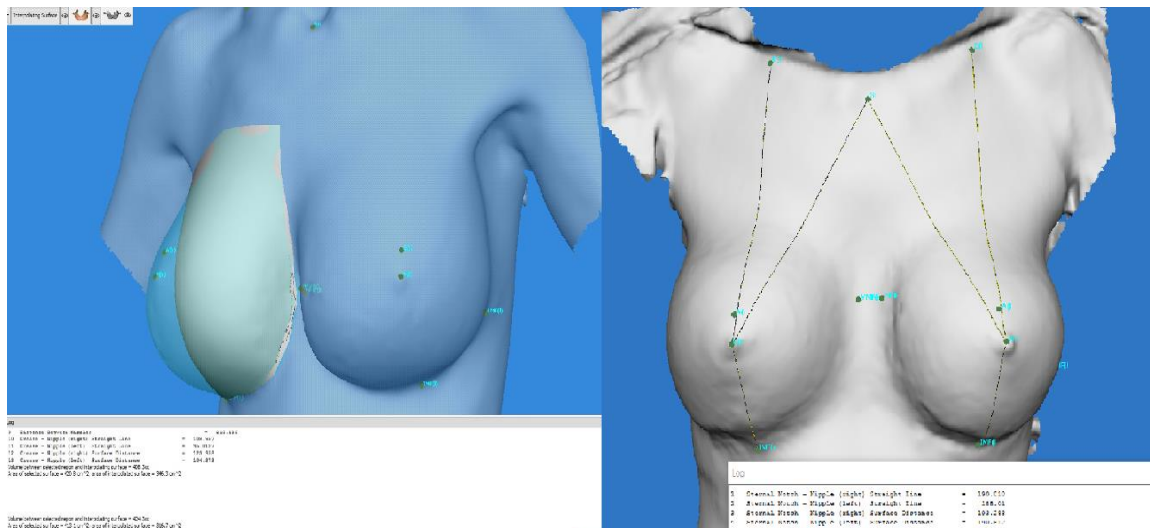


Abbildung 7-8: Beispielhafte Darstellung einer Auswertung anhand der 3D Modelle der Brust. Nach kurzer Bearbeitung können intraoperativ objektive Daten wie z.B. Brustvolumina und klinisch relevante anatomische Distanzen bestimmt werden.

2.2. Anthropometrische und volumetrische Auswertung

Mit Hilfe der Messwerkzeuge in der Mirror Suite können klinisch relevante lineare Distanzen zwischen den anatomischen Landmarken am 3D-Modell eruiert werden. Dazu gehören der Jugulum-Mamillen Abstand, der Mamillen-Mamillen Abstand, die Höhenunterschiede der Mamillen und der Brustwarzen-Inframammär-Abstand, sowie der Brustbreite. Dies sind gebräuchliche Maße in der Brustchirurgie mit hoher klinischer Relevanz.

Relative Brustvolumina wurden im Rahmen unserer Studien durch einen Algorithmus kalkuliert, welcher das eingeschlossene Volumen zwischen der Brustoberfläche und der aus den Randbegrenzungen interpolierten Thoraxwand berechnet. Als Begrenzungen wurden die infra-klavikuläre Region, die Medianlinie am Sternum, die Unterbrustfalte und die vordere Axillarlinie definiert. Die standardisierte Vorgehensweise wurde schon in anderen Arbeiten beschrieben⁶¹. Die berechneten Volumina haben sich in der Literatur dabei als ausreichend genau auch im Vergleich mit MRT-Datensätzen herausgestellt³¹.

Der automatisierte landmarken-basierte Algorithmus des VAM Modul der Mirror Suite Software zur Berechnung von relativen Brustvolumina wurde in unseren Studien nicht verwendet, da die Interpolation der Thoraxwand auf Basis der Landmarkensetzung und die darauf basierende Volumenberechnung keine ausreichend genauen und reproduzierbaren Ergebnisse liefert.

In beiden Publikationen wurden zudem absolute Volumendifferenzen zwischen korrespondierenden Aufnahmen (VECTRA® XT vs. SENSE™ 3D, prä- vs. post-operativ SENSE™ 3D) mittels eines Subtraktionsverfahrens kalkuliert. Identische Oberflächenabschnitte, welche sich außerhalb des direkten OP-Gebiets befinden und daher keinen relevanten Positions- oder Strukturveränderungen unterliegen, wurden auf beiden Meshes markiert. Die zu vergleichenden 3D Modelle wurden danach zunächst orientierend aufeinander ausgerichtet und durch die „Closest Point Surface Registration“ Funktion der Mirror Software überlagert^{46,62,63}. Die zwischen den beiden Oberflächen eingeschlossenen Volumina, also die absoluten Volumendifferenzen, konnten so berechnet werden. Sie wurden in

Milliliter (ml) angegeben. Diese Vorgehensweise hat sich schon in anderen Arbeiten als verlässlich und präzise erwiesen⁶⁴.

3. Zielsetzung

Die vorliegende kumulative Doktorarbeit untersucht die Anwendung des SENSE™ 3D-Scanners zur objektiven Evaluation von Volumen und Symmetrie bei formverändernden Eingriffen in der Brustchirurgie. Unser Fokus lag dabei zunächst auf der Validierung des Geräts als brauchbares und verlässliches Messinstrument im Vergleich zu etablierten Systemen. In weitere Folge untersuchten wir die intraoperative Echtzeit-Vermessung am sterilen OP-Situs. Es wurde hier erstmals gezeigt, dass die 3DSI mit einem vergleichsweise kostengünstigen Scanner System auch intraoperative valide Messwerte liefern kann.

In der Publikation *“Chances and limitations of a low-cost mobile 3D scanner for breast imaging in comparison to an established 3D photogrammetric system”*, welche 2018 im Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery (JPRAS) veröffentlicht wurde, wurde der mobile hand-held Scanner SENSE™ 3D zur Oberflächenerfassung der Brust getestet und die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der 3D-Modelle und den daraus ermittelten Messdaten gegenüber dem etablierten VECTRA® XT System validiert. Hierzu wurden anthropometrische Messdaten, Oberflächenabweichungen und volumetrische Veränderungen der beiden konkurrierenden Systeme deterministisch und statistisch verglichen.

In der Publikation *“Objective evaluation of volumetric changes during breast augmentation using intraoperative three-dimensional surface imaging”*, welche 2022 ebenso in JPARS veröffentlicht wurde, befassten wir uns auf Grundlage des nun validierten SENSE™ 3D Scanner Systems mit der intraoperativen Anwendbarkeit bei Brustaugmentationen mit Silikon-Implantaten. Dazu wurden zu korrespondierenden Zeitpunkten Scans durchgeführt. Es erfolgte ein Vergleich der prä- und postoperativen VECTRA® XT Bildern mit den intraoperativ erstellten SENSE™ 3D-Modellen vor dem Hautschnitt und nach der Hautnaht. Wir untersuchten die volumetrischen Veränderungen am Scan verglichen mit den eingesetzten Implantatgrößen. Abschließend wurden die Zeitdauern für Akquisition und 3D Analyse geprüft.

4. Inhalte der Promotionsarbeit

4.1. Publikation 1

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

Die dreidimensionale Erfassung der Brust hat in der plastisch-ästhetischen Chirurgie einen festen Platz eingenommen. Verschiedene Technologien werden für dieses Verfahren verwendet, um während prä- und postoperativer Konsultationen wertvolle Zusatzinformationen für Patientinnen und Patienten zu liefern. Gängige medizinische 3D-Scanner-Systeme wie das VECTRA® XT System wurden bereits in Bezug auf Genauigkeit evaluiert und validiert. Diese stationären Kameras bieten zwar hochentwickelte Lösungen, sind jedoch auch kostenintensiv und erfordern speziell angepasste Hardware und Software für den plastischen Chirurgen. In dieser Studie haben wir den SENSE™ 3D Scanner als kostengünstige und tragbare Alternative hinsichtlich Genauigkeit und Anwendbarkeit evaluiert.

Hierfür wurden 45 Patientinnen mit Brustchirurgischen Eingriffen zwischen Oktober 2015 und Januar 2017 untersucht. 22 Patientinnen erhielten Brustaugmentationen mittels anatomischer Silikonimplantate über einen inframammären Zugang. 16 Patientinnen erhielten bilaterale Brustreduktionen. 7 Patientinnen bekamen unilaterale Brustrekonstruktionen mittels DIEP- (deep inferior epigastric perforator) Lappenplastiken.

Die 3D-Oberflächen der VECTRA® XT und SENSE™ 3D Systeme wurden präoperativ und 6 Monate postoperativ verglichen. Die Messungen wurden mit 45° Armelevation in voller Expiration am stehenden Patienten durchgeführt. Zusätzlich wurden Vergleichsmessungen mit dem SENSE™ 3D zwischen drei verschiedenen Untersuchern für die Reproduzierbarkeitsanalyse durchgeführt. Alle entstandenen 3D Modelle wurden in die Mirror Suite Software importiert.

Folgenden anatomische Distanzen wurden daraufhin an jeweils beiden Modellen ermittelt (in Millimeter) und verglichen:

- Incisura jugularis - Mamille (SN –N)
- Brustbreite (BW)
- Mamille-Unterbrustfalte (N-IMF)
- Höhendifferenz der Unterbrustfalten (links/rechts) (Δ IMF)
- Höhendifferenz der Brustwarzen (Δ NH)
- Abstand Mamille – Mamille (N –N)

Die Modelle wurden mittels „Closest Point Surface Registration“^{46,62,63}(siehe Abschnitt 2.2) übereinandergelegt und relative Brustvolumina sowie absolute Volumenveränderungen berechnet. Die Angabe erfolgte hier in Milliliter (mL). Die Oberflächenabweichungen zwischen den überlagerten Modellen wurden berechnet und als quadratisches Mittel (Root-Mean-Square RMS) der Abstände in Millimetern angegeben. Untersucht wurden die Abweichungen der gesamten Brust sowie der einzelnen Quadranten.

Zur statistischen Auswertung wurde IBM SPSS Statistics (SPSS Inc., IL, USA) verwendet. Wir benutzten dabei gepaarte T-Tests und bivariate Korrelationskoeffizienten zum Vergleich der VECTRA® XT und SENSE™ 3D Modelle, wobei von einem statistisch signifikanten Unterschied bei $p < 0.05$ ausgegangen wurde. In mehreren Studien wurde bei der Bestimmung von Abweichungen relativer Brustvolumina zwischen verschiedenen Scanner Systemen ein Unterschied von mehr als 10% als klinisch signifikant definiert^{53,65}. Zur Evaluation der Oberflächenabweichungen wurden die mittleren quadratischen Abstände (RMS) zwischen SENSE™ 3D und VECTRA® XT betrachtet und die Abweichungen mit dem SENSE™ 3D Scanner zwischen drei verschiedenen Untersuchern am selben Patienten zur Kalkulation des Intraclass Correlation Coefficient (ICC, two-way mixed-effects model) benutzt.

Wir kamen zu folgenden Ergebnissen:

Die Akquisitionszeit der 3D Oberfläche mit dem SENSE™ 3D betrug stets zwischen 10 und 20 Sekunden.

Bei einem heterogenem Patientenkollektiv von 45 Patientinnen mit einem Durchschnittsalter von $44,6 \pm 11,5$ Jahren (18–64 Jahre) und einem mittleren BMI von $23,9 \pm 4,1$ kg/m² (17,3–32,5 kg/m²) wurden insgesamt 90 3D Modelle der Brust untersucht.

Beim Vergleich der standardisierten Distanzen zwischen anatomischen Landmarken der zu vergleichenden 3D Systeme zeigten sich im Bezug auf SN-N, BW, Δ IMF, N-N und Δ NH keine statistisch signifikante Abweichung und eine hohe Korrelation. Einzig die Distanz N-IMF zeigte eine statistische, jedoch nicht klinisch relevante Abweichung. (Siehe auch Tabelle 1)

Beim Vergleich der relativen Brustvolumina mit durchschnittlich $574,65 \pm 302,15$ mL für das VECTRA® XT System und $579,80 \pm 302,68$ mL für den SENSE™ 3D zeigten sich keine signifikanten Abweichungen ($p=0,134$). Der mittlere Unterschied fiel mit $-5,11 \pm 32,10$ mL (95% KI: $-67,70$ bis $+57,49$ mL) gering aus und zeigte eine zwischen den Systemen eine hohe Korrelation ($r=0,994$). Innerhalb des 95% Konfidenzintervalls betrug die mittlere Volumendifferenz mit $-1,14 \pm 4,66\%$ weniger als die zuvor als klinisch signifikant definierten 10%. Auch die absoluten Volumendifferenzen durch Kalkulation mittels Subtraktionsmethode (s.o.) waren mit $14,86 \pm 14,41$ mL ($0,17 - 65,45$ mL) im Mittel gering.

Beim Vergleich der Oberflächenabweichungen in Bezug auf die gesamte Brust bestimmten wir einen mittleren RMS von $1,50 \pm 0,82$ mm. Es zeigte sich eine zunehmende Abweichung der Oberflächen im unteren lateralen Quadranten mit im Mittel $6,75$ mm RMS. (Siehe auch Tabelle 2)

Abschließend konnte für die wiederholte Messung des Patiententorsos eines Untersuchers (ICC 0,961, $p < 0,001$, mittlere RMS Abweichung $0,489 \pm 0,188$ mm) und im Vergleich zwischen drei verschiedenen Untersuchern mit ICC 0,920, $p < 0,001$, mittlere RMS Abweichung $0,636 \pm 0,279$ mm eine starke Korrelation gezeigt werden.

Im Gegensatz zu VECTRA® XT System bedarf es bei Verwendung des SENSE™ 3D eines versierten Untersuchers, der mit der Hardware und Software vertraut ist, sowie einer höheren Compliance des Patienten geschuldet der längeren Akquisitionszeit. Es bestätigte sich, dass die Messergebnisse für ein Patientenkollektiv mit geringerem BMI und kleineren Brustvolumina präziser ausfallen. Die korrekte Positionierung des Patienten und Ausleuchtung der zu erfassenden Oberfläche ist essenziell, um verwertbare und reproduzierbare Daten zu generieren. In unseren Recherchen konnten stets absolute Volumendifferenzen von < 10% erreicht werden, was die klinische Relevanz der Messdaten bestätigte. Die Fähigkeit der kolorierten Texturerfassung des SENSE™ 3D sahen wir aufgrund der geringen Auflösung des Videosensors jedoch als eher gering an. Dies hatte keine Auswirkung auf die Präzision des errechneten 3D-Modells. Die Ergebnisse zeigten, dass der SENSE™ 3D-Scanner im Vergleich zum etablierten VECTRA® XT System eine ausreichend präzise und reproduzierbare Oberflächenerfassung ermöglicht, um ihn im klinischen Alltag einzusetzen. Das System bietet somit eine kostengünstige und portable Alternative zu den etablierten stationären 3D-Kameras.

Arbeitsanteil der Autoren:

- Im Rahmen meiner geteilten Erstautorenschaft führte ich in Zusammenarbeit mit Dr. med. K.C. Koban die 3-D Akquisition und Auswertung der 3-D Modelle durch. Ich erarbeitete die grundlegenden Datensätze und Text-Inhalte aller Teile der Veröffentlichung. Das Manuskript wurde von mir abschließend evaluiert und überarbeitet.
- Herr Dr. K.C. Koban erarbeitete das Grundlegende Studienkonzept und unterstützte neben der Akquisition der 3D-Modelle die statistische Auswertung und Interpretation der gewonnenen Daten im klinischen Kontext. Er war als geteilter Erstautor in der Erstellung des finalen Manuskriptes richtungsweisend.
- Frau Virginia Titze war unterstützend in der Erfassung der Patienten Stammdaten sowie der 3-D Akquisition und Auswertung beteiligt.

- Herr PD Dr. Schenck war als Hauptoperateur maßgeblich für die Umsetzung der Studie verantwortlich und unterstützte die Arbeit in allen Aspekten von der Idee bis zur finalen Version des Manuskripts.
- Herr Univ.-Prof. Dr. R. Giunta war als Direktor der Abteilung für Handchirurgie, Plastische und Ästhetische Chirurgie am LMU Klinikum und Letztautor der Publikation für das grundlegende Studiendesign, die Ausarbeitung und kritischen Überprüfung aller Teile des Manuskriptes essentiell. Diese Arbeit wäre ohne seine Unterstützung nicht möglich gewesen.

4.2. Publikation 2

In der Studie *„Objective evaluation of volumetric changes during breast augmentation using intraoperative three-dimensional surface imaging“* wurde die Anwendbarkeit des SENSE™ 3D Scanner Systems als objektives Werkzeug zur intraoperativen Vermessung und 3D-Volumetrie bei Brustaugmentationen untersucht.

Hierfür wurden insgesamt 40 Patientinnen untersucht, welche eine bilaterale Brustaugmentation durch subpektoral eingebrachte anatomische Silikonimplantate (Fa. Mentor, Irvine, Ca., USA) über einen inframammären Zugang erhielten. Ausschlusskriterien waren ein Alter unter 18 Jahren, kongenital Deformitäten der Brust oder Thoraxwand sowie eine ausgeprägte Ptosis oder vorangegangene oder geplante formverändernde Eingriffe an der Brust.

Es wurden in der präoperativen Patientenberatung, sowie in der 3-Monate postoperativen Kontrolluntersuchung 3D-Datensätze mit dem etablierten VECTRA® XT 3D Kamerasystem aufgenommen. Die Brustaugmentationen wurden stets von einem erfahrenen Operateur unseres Teams in immer gleicher Technik durchgeführt.

Zum Zwecke der Studie wurden intraoperativ unmittelbar vor dem Hautschnitt und nach der abschließenden Hautnaht 3D-Aufnahmen mit dem SENSE™ 3D Scanner angefertigt. Die Patientin befand sich dabei in 60° aufgerichteter Beach-Chair Position auf dem OP-Tisch. In Vorarbeiten zeigten sich hier keine relevanten Lageveränderungen der Brust oder Volumeneffekte im Vergleich zur aufrechten Positionierung. Die gewonnenen 3D-Daten wurden zur weiteren Analyse in die Mirror Suite Software importiert und zu den korrespondierenden prä- und postoperativen VECTRA® XT Aufnahmen ausgerichtet.

Relative Brustvolumina der zwei Systeme wurden daraufhin mit dem dargelegten Algorithmus (siehe Kapitel 2.2) berechnet und verglichen. Absolute Volumenveränderungen der intraoperativen 3D Aufnahmen mit dem SENSE™ 3D wurden mittels Subtraktionsmethode (siehe Kapitel 2.2) bestimmt und mit den

bekannten Referenzvolumina der Silikon Implantate verglichen. Die Zeiten zur 3DSI Akquisition und Auswertung der Daten wurde dokumentiert.

Zur statistischen Überprüfung verwendeten wir gepaarte T-Test zum Vergleich der zwei Systeme bei den jeweiligen prä- und postoperativen Aufnahmen, sowie für den Vergleich der intraoperativ berechneten 3D Volumenzunahme mit den Implantat Größen. Zudem wurde der Pearson Korrelationskoeffizient für die zusammenhängenden Messwerte ermittelt.

Wir kamen zu folgenden Ergebnissen:

40 Patientinnen wurden in die Studie eingeschlossen. Das mittlere Alter des Patientenkollektivs betrug 32 ± 12 Jahren (20–65 Jahre). Der durchschnittliche Body-Mass-Index war $21,0 \pm 2,3$ kg/m² (18,0–26,0 kg/m²).

Die gemittelte intraoperative Akquisitionszeit der 3D Oberfläche der Patientinnen mit dem SENSE™ 3D Scanner betrug $17,9 \pm 4,8$ Sekunden (11–31 s). Die darauffolgenden Verarbeitungszeit mit Berechnung der absoluten Volumenveränderungen betrug $106,9 \pm 10,1$ Sekunden (84–126 s).

Das durchschnittliche relative Brustvolumen betrug mit dem VECTRA® XT System $185,6 \pm 92,3$ mL präoperativ und $481,9 \pm 131,6$ mL postoperativ. Das durchschnittliche relative Brustvolumen betrug mit dem SENSE™ 3D System $180,5 \pm 89,4$ mL präoperativ und $481,1 \pm 127,9$ mL postoperativ. Die zusammenhängenden Volumenmessungen zeigten jeweils keine statistisch signifikanten Unterschiede (präoperativ $p = 0.162$, postoperativ $p = 0.811$) und eine hohe lineare Korrelation ($r = 0.947$ / $r = 0.976$).

Bei der Untersuchung der absoluten Volumenveränderungen wurden durchschnittlich Implantate mit einem Volumen von $294,8 \pm 76,3$ mL (155–475 mL) verwendet. Der Volumeneffekt im Vergleich der präoperativen und postoperativen 3DSI erbrachte mit $300,6 \pm 81,1$ mL eine hohe Korrelation der Messung ($r = 0.954$) ohne signifikante Abweichung von der eingesetzten Implantatgrößen ($p = 0.124$). Die mittlere absolute und relative Abweichung der Implantatvolumina und der 3D-Modelle war mit $5,8 \pm 24,3$ ml beziehungsweise $2,0 \pm 9.0\%$ gering und innerhalb des 95% Konfidenzintervalls.

Es konnte gezeigt werden, dass das intraoperative 3DSI mit dem SENSE™ 3D Scanner System in unseren Messungen keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Präzision im Vergleich mit unserem Referenzsystem lieferte. Die Akquisitions- und Verarbeitungszeit bis zum Erhalt der Messdaten war mit durchschnittlich 3 Minuten gering. Das System konnte durch seinen mobilen Einsatz, daher als zuverlässiges Werkzeug zur intraoperativen, objektiven linearen Mammometrie, Volumetrie und Symmetriekontrolle validiert werden. Störfaktoren, wie etwa Weichteilödeme, postoperative Hämatome oder Narbenbildung konnten durch die direkte intraoperative 3D Vermessung ausgeschlossen werden. In der Studie konnte infolge ein beinahe 1 zu 1 Volumeneffekt nach Insertion der Silikonimplantate gezeigt werden. Unsere Arbeit zeigte exemplarisch die Anwendbarkeit bei Brustaugmentationen an einem ausgesuchten Patientenkollektiv. Bekannte Limitationen der 3DSI finden sich in der Literatur und auch in unseren Studien bei Patienten mit höherem BMI und großen Brustvolumina aufgrund der nicht klar abgrenzbaren Randbegrenzungen, Lücken im 3D Modell und Artefakten durch Falten und Schattenwurf. In Bezug auf die komplexe Brustchirurgie bei angeborenen Deformitäten, Implantat-Revisionen, der brusterhaltenden Tumorchirurgie oder Brustrekonstruktionen mit autologem Gewebettransfer könnte die intraoperative 3DSI ebenso wertvolle Informationen liefern. Dies ist gemäß unserer Kenntnis noch nicht ausreichend untersucht. Kostengünstige 3D Scanner haben das Potenzial durch objektive Messdaten den Arbeitsablauf des versierten Operateurs weiter zu optimieren. Aufgrund der bisher nicht an die Anforderungen der plastischen Chirurgie angepassten Hardware und Software Lösungen bedarf es jedoch einer großen Expertise um eine zeitnahe Auswertung der Daten durchzuführen um verwertbare Messdaten zu generieren. Hier sind weitere Entwicklungen nötig, um solche Systeme im intraoperativen Setting zu etablieren.

Arbeitsanteil der Autoren:

- Als Ko-Autor führte ich in Zusammenarbeit mit Dr. med. K.C. Koban die intraoperative 3D-Oberflächenerfassung durch und erarbeitete die grundlegenden Abläufe der Datenverarbeitung und Auswertung der Messergebnisse. Das Manuskript wurde von mir in allen Teilen bearbeitet, abschließend evaluiert und überarbeitet.
- Herr Dr. K.C. Koban erstellte das Grundlegende Studienkonzept, supervidierte die korrekte Durchführung der 3D-Scans unter Einhaltung der Sterilität und unterstützte neben die statistische Auswertung und Interpretation der gewonnenen Daten im klinischen Kontext. Er war als Erstautor in der Erstellung des finalen Manuskriptes maßgeblich.
- Herr Z. Li war unterstützend in der Erfassung der Patienten Stammdaten sowie der 3-D Akquisition und Auswertung beteiligt.
- Herr L. Etzel war unterstützend in der Erfassung der Patienten Stammdaten sowie der 3-D Akquisition und Auswertung beteiligt.
- Herr PD Dr. Schenck war als einer der Operateure maßgeblich für die Umsetzung der Studie verantwortlich und unterstützte die Arbeit in allen Aspekten von der Idee bis zur finalen Version des Manuskripts.
- Herr Univ.-Prof. Dr. R. Giunta war als Direktor der Abteilung, Operateur und Letztautor der Publikation für das grundlegende Studiendesign, die Ausarbeitung und kritischen Überprüfung aller Teile des Manuskriptes essentiell. Diese Arbeit wäre ohne seine Unterstützung nicht möglich gewesen.

5. Zusammenfassung

Die 3D-Oberflächenerfassung hat sich in der plastischen Chirurgie als gängige Methode etabliert, die weitverbreitet für die Dokumentation und präoperative Planung für zahlreiche Eingriffe eingesetzt wird.

In dieser kumulativen Dissertation wurde die Anwendbarkeit eines kostengünstigen mobilen 3D Scanner zur 3D Oberflächenerfassung in der prä- und postoperativen Dokumentation brustchirurgischer Eingriffe in der Plastischen Chirurgie gegenüber einer etablierten 3D Kamera untersucht und als innovatives Verfahren zur intraoperativen 3D Analyse evaluiert.

Zur Verwendung kam der kostengünstigen und tragbaren SENSE™ 3D-Scanner, welcher hinsichtlich Handhabung, Anwendungsszenarien, Datenauswertung und Messgenauigkeit untersucht wurde. Die Ergebnisse wurden mit denen des etablierten und in der Literatur mehrfach validierten stationären 3D-Kamerasystems (VECTRA® XT) verglichen. Das übergeordnete Ziel war es, zu überprüfen, ob der SENSE™ 3D-Scanner als objektives Messinstrument für die intraoperative Echtzeitbewertung von Form, Volumen und Symmetrie in der Brustchirurgie effektiv eingesetzt werden kann.

Die erste Studie *“Chances and limitations of a low-cost mobile 3D scanner for breast imaging in comparison to an established 3D photogrammetric system”* führte anhand standardisiert durchgeführter 3D Aufnahme der Brustregion bei insgesamt 45 Patientinnen einen Vergleich der eingesetzten 3D-Scanner durch. Verglichen wurden dabei ein sehr heterogenes Patientenkollektiv und unterschiedliche brustchirurgische Eingriffe. Wie bereits in früheren wissenschaftlichen Arbeiten dargelegt, unterliegen alle 3D Oberflächenbildgebungssysteme mittels Photogrammetrie, Laserscan oder weiteren Verfahren bestimmten Limitationen und Störfaktoren. Insbesondere in Bereichen überlappender Hautareale, die in unserer Studie hauptsächlich im Bereich der Unterbrustfalte betrachtet wurden, durch unterschiedliche Patientenpositionierung oder bei unzureichender Beleuchtung des Untersuchungsbereichs können Bildfehler und Artefakte auftreten, welche die Genauigkeit der 3D Erfassung als auch der Messdaten beeinträchtigen

können^{18,31,66}. Durch die Verwendung eines standardisierten Ablaufs in der Bilderfassung, Berechnung des 3D-Modells und Kalkulation der Messdaten konnten bis auf die Unterbrustfalte weitere Einflussfaktoren reduziert werden⁶¹. Diese Akquisitionszeit war mit 10-20 Sekunden rasch und patientenfreundlich. Die Analyse der insgesamt 90 erfassten 3D-Modelle ergab keine klinisch signifikanten Abweichungen bei der Vermessung gängiger Distanzen zwischen anatomischen Landmarken in der Brustchirurgie oder bei den relativen Brustvolumina. Die durch Anwendung der Subtraktionsmethode ermittelten absoluten Volumendifferenzen lagen stets innerhalb des 95% Konfidenzintervalls und waren klinisch nicht relevant, da sie konstant kleiner als 10% waren. Die Auswertung der Oberflächenabweichungen, ausgedrückt durch den Root-Mean-Square, zeigte eine zunehmende Abweichung der Oberflächen im unteren lateralen Quadranten aufgrund von Bildartefakten und Fehldarstellungen des 3D-Modells bei Schattenwurf. Trotz dieser Beobachtung wurden jedoch auch in diesem Bereich keine klinisch signifikanten Unterschiede festgestellt.

Zusammenfassend konnte eine starke Korrelation bei wiederholten 3D-Aufnahmen des Patiententorsos durch einen einzelnen Untersucher sowie im Vergleich zwischen drei verschiedenen Untersuchern gezeigt werden. Diese Ergebnisse bestätigen die hohe Reproduzierbarkeit der erhobenen Daten.

Der SENSE™ 3D Scanner konnte so für den klinischen Alltag ausreichend genaue Messungen von Distanzen, relativen Brustvolumina, sowie absoluten Volumenveränderungen und Oberflächenveränderungen liefern.

In der zweiten Studie *„Objective evaluation of volumetric changes during breast augmentation using intraoperative three-dimensional surface imaging“* wurden insgesamt 40 Patientinnen präoperativ, intraoperativ und postoperativ dreidimensional erfasst, um die Anwendbarkeit des SENSE™ 3D Scanner Systems als objektives Werkzeug zur intraoperativen Vermessung und 3D-Volumetrie bei Brustaugmentationen mittels Silikonimplantaten zu untersuchen.

Die Untersuchung umfasste sowohl den Vergleich der relativen Brustvolumina zwischen dem SENSE™ 3D und dem VECTRA® XT System jeweils prä- und postoperativ als auch die Betrachtung der absoluten Volumendifferenzen der

überlagerten Brustmodelle zwischen Hautschnitt und Hautnaht in Bezug auf die eingesetzten Implantatgrößen. Das Patientenkollektiv zeichnete sich durch seine Homogenität aus. Die Zeiten der Akquisition und Analyse wurden dokumentiert und betrugen im Durchschnitt 17,9 Sekunden bzw. 106,9 Sekunden.

Beim Vergleich der zwei Systeme mit Bestimmung der relativen Brustvolumina prä- und postoperativ boten sich keine signifikanten Unterschiede in den Messungen.

Der Vergleich der beiden Systeme hinsichtlich der relativen Brustvolumina prä- und postoperativ zeigte keine signifikanten Unterschiede in den Messungen. Auch bei der Evaluierung absoluter Volumendifferenzen nach dem operativen Eingriff konnten keine signifikanten Unterschiede zu den verwendeten Implantatgrößen festgestellt werden. Der mittlere Volumenfehler lag stets unterhalb der klinisch als relevant definierten Schwelle von 10%, innerhalb des 95% Konfidenzintervalls. Daher kann bei subpektoraler Implantatlage von einem nahezu 1 zu 1 Volumeneffekt ausgegangen werden.

Gemäß unseren Ergebnissen betrachten wir den SENSE™ 3D Scanner als präzise und praktikabel genug, um ihn grundsätzlich in einem intraoperativen Setting zu integrieren. Für den versierten Chirurgen können dadurch wertvolle zusätzliche Informationen bereitgestellt werden, die ihn bei der Durchführung des Eingriffs unterstützen können. Die objektive Evaluation von Form, Volumen und Symmetrie kann zu einem verbesserten Operationsergebnis und einer gesteigerten Patientenzufriedenheit beitragen. Trotz dieser Vorteile bedarf es weiterer Forschung und Entwicklung, um die bekannten Limitationen solcher 3D-Scanner zu überwinden und die Handhabung sowie die Messergebnisse weiter zu präzisieren. Zukünftig könnten intraoperative 3D-Oberflächenerfassungen auch für komplexere brustchirurgische Operationen nützlich sein und einen bedeutenden Beitrag zur evidenzbasierten Medizin im Bereich plastisch-chirurgischer Eingriffe leisten.

6. Summary

3D Surface imaging has become a common method in plastic surgery and is widely used for documentation and preoperative planning for numerous procedures.

In this cumulative dissertation, the applicability of a low-cost mobile 3D scanner for 3D surface acquisition in the pre- and postoperative documentation of breast surgery procedures in plastic surgery was investigated in comparison to an established 3D camera and evaluated as an innovative method for intraoperative 3D analysis.

The cost-effective and portable SENSE™ 3D scanner was used, which was examined in terms of handling, application scenarios, data evaluation and measurement accuracy. The results were compared with those of the established stationary 3D camera system (VECTRA® XT), which has been validated in the literature repeatedly. The overall aim was to verify whether the SENSE™ 3D scanner can be used effectively as an objective measuring instrument for the intraoperative real-time assessment of shape, volume and symmetry in breast surgery.

The first study "Chances and limitations of a low-cost mobile 3D scanner for breast imaging in comparison to an established 3D photogrammetric system" compared the 3D scanners used on the basis of standardized 3D imaging of the breast region in a total of 45 patients. A very heterogeneous patient population and different breast surgery procedures were compared. As already explained in previous scientific studies, all 3D surface imaging systems using photogrammetry, laser scanning or other methods are subject to certain limitations and interference factors. Image errors and artefacts can occur, particularly in areas of overlapping skin areas, which in our study were mainly observed in the area of the lower breast crease, due to different patient positioning or insufficient lighting of the examination area, which can impair the accuracy of the 3D acquisition as well as the measurement data^{18,31,66}. By using a standardized procedure in image acquisition, calculation of the 3D model and calculation of the measurement data, further influencing factors could be reduced except for the lower breast crease⁶¹.

The acquisition time of 10-20 seconds was fast and patient-friendly. The analysis of the total of 90 acquired 3D models revealed no clinically significant deviations in the measurement of common distances between anatomical landmarks in breast surgery or in the relative breast volumes. The absolute volume differences determined by applying the subtraction method were always within the 95% confidence interval and were not clinically relevant as they were consistently less than 10%. The evaluation of the surface deviations, expressed by the root-mean-square, showed an increasing deviation of the surfaces in the lower lateral quadrant due to image artifacts and misrepresentations of the 3D model when shadows were cast. Despite this observation, however, no clinically significant differences were found in this area either.

In summary, a strong correlation was shown with repeated 3D images of the patient's torso by a single examiner and in comparison between three different examiners. These results confirm the high reproducibility of the data collected.

The SENSE™ 3D scanner was thus able to provide sufficiently accurate measurements of distances, relative breast volumes, as well as absolute volume changes and surface changes for everyday clinical use.

In the second study "Objective evaluation of volumetric changes during breast augmentation using intraoperative three-dimensional surface imaging", a total of 40 patients were recorded in three dimensions preoperatively, intraoperatively and postoperatively in order to investigate the applicability of the SENSE™ 3D scanner system as an objective tool for intraoperative measurement and 3D volumetry during breast augmentation using silicone implants.

The study included both the comparison of the relative breast volumes between the SENSE™ 3D and the VECTRA® XT system pre- and postoperatively as well as the observation of the absolute volume differences of the superimposed breast models between skin incision and skin suture in relation to the implant sizes used. The patient collective was characterized by its homogeneity. The acquisition and analysis times were documented and averaged 17.9 seconds and 106.9 seconds respectively.

When comparing the two systems with calculation of the relative breast volumes pre- and postoperatively, there were no significant differences in the measurements.

The comparison of the two systems with regard to the relative breast volumes pre- and postoperatively showed no significant differences in the measurements. The

evaluation of absolute volume differences after the surgical procedure also did not reveal any significant differences to the implant sizes used.

The mean volume error was always below the clinically defined relevant threshold of 10%, within the 95% confidence interval. Therefore, an almost 1 to 1 volume effect can be assumed for subpectoral implant placement.

According to our results, we consider the SENSE™ 3D scanner to be precise and practicable enough to be integrated in an intraoperative setting. This can provide the experienced surgeon with valuable additional information that can support him or her during the procedure. The objective evaluation of shape, volume and symmetry can contribute to an improved surgical outcome and increased patient satisfaction. Despite these advantages, further research and development is needed to overcome the known limitations of such 3D scanners and to further refine the handling and measurement results.

In the future, intra-operative 3D surface scans could also be useful for more complex breast surgery operations and make a significant contribution to evidence-based medicine in the field of plastic surgery.

7. Publikationen

7.1. Veröffentlichung Nr. 1

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



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



Konstantin C. Koban, MD^{1,*}, Felix Härtnagl, MD¹,
Virginia Titze, MD, Thilo L. Schenck, MD, PhD,
Riccardo E. Giunta, MD, PhD

Division of Hand, Plastic and Aesthetic Surgery, University Hospital, LMU Munich, Pettenkoferstraße 8a,
80336 Munich, Germany

Received 8 September 2017; accepted 26 May 2018

KEYWORDS

Three-dimensional
scanning;
3D scanner;
Breast surgery;
3D evaluation

Summary *Background:* In search of new possibilities in 3D surface imaging, several nonmedical scanning systems have been assessed for their implementation in plastic surgery. The aim of this study was to compare a new affordable 3D imaging consumer product with an established medical 3D imaging system for objective 3D breast imaging.

Method: We compared a low-cost mobile, handheld scanner against an established medical 3D surface imaging system. Forty-two female patients who underwent different types of breast surgery were captured in a 3D view with both devices. Digital breast measurement, volume measurement, and breast surface-to-surface analysis were done using Mirror software. Repeatability was assessed by repeated 3D scans of the torso and surface-to-surface analysis.

Results: Digital breast measurement showed low differences with good-to-excellent correlation between both devices. Mean breast volume difference was small (-5.11 ± 32.10 mL) within the 95% limits of agreement. Surface-to-surface analysis yielded a higher surface deviation in the lower breast quadrants (1.62 ± 0.80 mm root mean square [RMS] error and 1.81 ± 0.88 mm RMS error) than in the upper breast quadrants. Repeatability was satisfactory with a mean of 0.636 ± 0.279 mm RMS error.

¹Both authors contributed equally to this work.

* Corresponding author.

E-mail address: Konstantin.Koban@med.uni-muenchen.de (K.C. Koban).

<https://doi.org/10.1016/j.bjps.2018.05.017>

1748-6815/© 2018 British Association of Plastic, Reconstructive and Aesthetic Surgeons. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

Conclusion: Affordable mobile surface scanners may offer new perspectives in the future for 3D breast imaging. Although surface acquisition was sufficient for breast measurements in comparison to an established system, the lack of appropriate medical software for patient consultation next to moderate texture quality needs to be improved for wider acceptance in plastic surgery. © 2018 British Association of Plastic, Reconstructive and Aesthetic Surgeons. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

Introduction

Three-dimensional (3D) breast imaging has become increasingly popular and is currently regarded as a common method in plastic surgery.¹⁻⁴ Different types of noninvasive 3D surface imaging technologies such as stereophotogrammetry, digital fringe projection, laser scanning, and infrared sensors offer valuable additional information during consultation and postoperative follow-up in breast surgery.⁵⁻⁸

Medical 3D surface imaging systems based on stereophotogrammetry are well-established tools^{1,9,10} in the current scenario of plastic and aesthetic surgery. Several research groups evaluated its use in combination with 3D simulations in preoperative consultations, as well as its implementation for accurate documentation of various procedures in terms of surface and volume changes.¹¹⁻¹⁷ Although commercial 3D imaging systems commonly offer both well-engineered hardware and software solutions, these heavy-weight stationary systems are not portable and only allow up to 180° to capture images of certain body regions.^{1,2,18} Furthermore, their acquisition costs are generally high.¹

In contrast to established 3D medical systems, the use of nonmedical scanning systems such as the Microsoft Kinect (Microsoft Inc., Washington, USA)^{19,20} or certain smartphone applications¹⁸ has proven acceptable for breast surface imaging.

The aim of this study was to evaluate a new handheld scanner as a cost-effective tool for 3D breast imaging in comparison to an established medical imaging system.

Materials and methods

Patients

For this study, we enrolled a total of 45 female patients who underwent different types of breast surgery between October 2015 and January 2017. Of them, 22 patients underwent augmentation mammaplasty with anatomically shaped, textured, cohesive silicone implants inserted through an inframammary incision. Sixteen patients underwent bilateral superior pedicle inverted T-scar reduction mammaplasty. We also included seven patients who underwent unilateral breast reconstruction surgery using a deep inferior epigastric perforator (DIEP) flap. Before enrollment, all patients gave their written informed consent for this study.

3D imaging and data processing

For this study, we used the portable Sense™ handheld scanner for 3D breast imaging. It is marketed as a consumer

product and aims to provide entry-level 3D scanning technology to a broader audience for less than 350 USD. In addition to its infrared depth sensor, this scanner features a full color video sensor to capture 3D image data and surface texture from various angles with up to 30 frames per second.²¹ The total acquisition time per patient was 10 to 20 s.

As a reference, we used the high-resolution VECTRA® XT (Canfield Scientific, NJ, USA) 3D camera system that captures feature-rich images of the body in milliseconds, and this has been validated for 3D breast imaging in several studies. This stationary device features six cameras and a built-in flash for optimal surface illumination.

Both systems were used in this study for 3D chest imaging within the same consultation session before and 6 months after surgery. Twenty patients were randomly selected and scanned three times by three examiners (a medical student, a resident, and a senior surgeon). To produce comparable results, the 3D acquisition was performed in our outpatient clinic in a standing position with full expiration and 45° arm elevation.^{22,23}

The finalized scans were imported into the Mirror® software suite (Canfield Scientific, NJ, USA) for further analysis. All data processing followed the initial superimposition of both acquisition system 3D models using an automatic closest point surface registration function. Reference points pertaining to anatomical landmarks were recognized and placed automatically by the software on one mesh and projected onto the other to rule out false positioning and subsequent errors in the volumetric and distance calculations.^{24,25}

The following standardized distances between anatomical landmarks were measured in millimeters for each 3D model: sternal notch to nipple distance (SN-N), breast width (BW), nipple to inframammary fold distance (N-IMF), inframammary fold height difference (Δ IMF), nipple to nipple distance (N-N), and nipple height difference (Δ NH).

Relative breast volumes were determined by an automated landmark-based method that measures the enclosed volume between an interpolated surface approximating the thoracic wall and breast surface.^{26,27}

Additionally, we used a surface-based method to determine the volume differences (in milliliters) enclosed between the superimposed 3D models following an established guideline.^{28,29} The differences between breast pairs from the two acquisition systems are given as absolute values.

We also compared surface-to-surface deviations of the whole chest and each quadrant of the breast to show the difference in precision of surface acquisitions³ given as root mean square (RMS, in millimeters) error,³⁰ using the VECTRA® 3D models as a reference.

Table 1 Digital breast measurements.

Distance	Vectra [mm]	Sense [mm]	Mean [mm]	SD [mm]	C.I. [mm]	Significance	Correlation
SN-N	214.59	211.80	2.79	19.92	-1.58 to 7.17	0.207	0.988
BW	168.58	167.35	1.23	8.24	-0.58 to 3.04	0.180	0.946
N-IMF	87.43	88.61	-1.18	3.49	-1.95 to -0.42	0.003*	0.981
ΔIMF	6.62	6.51	-0.11	2.21	-0.63 to 0.85	0.762	0.961
ΔNH	6.57	6.14	0.43	2.39	-0.36 to 1.23	0.278	0.969
N-N	211.43	213.99	-2.56	20.91	-9.53 to 4.40	0.460	0.721

Statistical analysis

Using the results of our distance, surface, and volume calculations, we performed a statistical analysis with IBM SPSS Statistics 2012 (SPSS Inc., IL, USA).

Paired *t*-tests and bivariate correlations between VECTRA® XT and Sense™ scans were performed, and results were considered statistically significant at $p < 0.05$.

The Bland-Altman plot was used to highlight the absolute deviations in relative breast volume measurement with a 95% limit of agreement. To properly reflect the clinical impact of the digital breast volumes, a deviation of more than 10%^{23,31} between the two competing systems was set to be clinically significant.

RMS error was calculated for paired 3D Sense™ and VECTRA® models in the breast surface-to-surface analysis as well as in the repeatability and reliability assessment. Repeated chest RMS error measurements were used for calculations of intraclass correlation coefficient (ICC, two-way mixed-effects model) between the three examiners.

Results

Of the 45 female patients enrolled in our study, we acquired and analyzed a total of 90 breast images captured with the Sense™ and VECTRA® XT systems, respectively.

The patients' age averaged approximately 44.6 ± 11.5 years (range: 18-64 years), and the body mass index (BMI) was $23.9 \pm 4.1 \text{ kg/m}^2$ (range: 17.3-32.5 kg/m^2).

Linear distances

Digital breast measurements with both systems are summarized in Table 1. Automated breast landmark placement and digital measurement showed no significant differences with strong correlations in SN-N, BW, ΔIMF, N-N, and ΔNH. Comparison of N-IMF showed statistically but not clinically relevant deviations.

Volumetric analysis

We calculated relative breast volumes by the landmark-based method for a heterogeneous patient collective. We found no statistically significant difference ($p = 0.134$) with regard to an average relative breast volume of $574.65 \pm 302.15 \text{ mL}$ in VECTRA® model and that of

$579.80 \pm 302.68 \text{ mL}$ in Sense™ model. The mean difference was small [$-5.11 \pm 32.10 \text{ mL}$ (95% CI: -67.70 to 57.49 mL)] as shown in Figure 1, and this difference showed high correlation ($r = 0.994$) between the two competing systems. Within 95% limits of agreement, the difference in volume amounted to less than 10% of the mean relative volume ($-1.14 \pm 4.66\%$).

The enclosed subtraction volumes between the two overlying breast models ranged from 0.17 to 65.45 mL with an average of $14.86 \pm 14.41 \text{ mL}$.

Surface deviation

To measure the accuracy and precision of the scanner systems, we calculated the surface deviation expressed by the RMS error for the whole breast and each quadrant of the breast individually. Data showed an average RMS error of $1.50 \pm 0.82 \text{ mm}$ for the entire breast surface. As illustrated in Table 2, the difference between the corresponding surface points increases toward the lower lateral portion of the breast with a maximum RMS error of 6.75 mm.

Repeatability and reliability

Repeated scans of the patients' torsos by one examiner with the Sense™ scanner showed strong correlation (ICC 0.961, $p < 0.001$, mean RMS error $0.489 \pm 0.188 \text{ mm}$) and among all three examiners (ICC 0.920, $p < 0.001$, mean RMS error $0.636 \pm 0.279 \text{ mm}$).

Discussion

Numerous authors^{1,4,8,15,32} have described how 3D surface imaging enables the attainment of objective and reproducible data of a patient's body in form-shaping procedures and acts as a useful tool in evidence-based plastic surgery^{8,14,15,33} to give the users' objective data in addition to their subjective clinical experience. Nonetheless, most commercially available imaging systems come with high acquisition costs and lack the mobility and flexibility.¹

In search of a cost-effective alternative to these scanner systems, we assessed the capabilities of an affordable 3D scanner in comparison to an established medical 3D imaging system. We chose the 3D models generated by the medical product to be our only reference based on several profound validation studies.

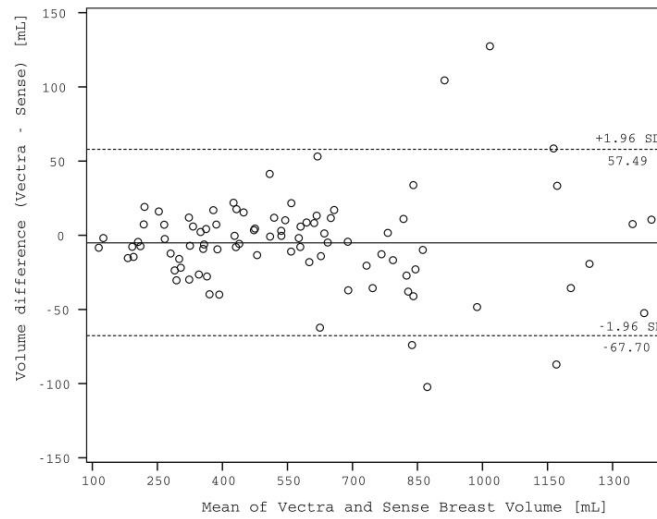


Figure 1 Bland-Altman plot highlighting relative volume difference between the 3D systems to mean 3D breast volume.

Table 2 Breast surface-to-surface analysis.

Breast quadrants	Minimum (mm RMS)	Maximum (mm RMS)	Mean (mm RMS)	SD (mm RMS)
Overall	0.58	5.90	1.50	0.82
Upper medial	0.33	5.34	1.25	0.81
Upper lateral	0.37	4.83	1.32	0.72
Lower medial	0.63	6.69	1.62	0.80
Lower lateral	0.69	6.75	1.81	0.88

We find the overall acquisition time to be short enough to justify integrating 3D surface scanning with the handheld scanner into every patient consultation, and it also proves to be highly user-friendly. While instant 3D capturing of the used medical reference eliminates involuntary movement artifacts, surface capturing with handheld scanners can be challenging in less compliant patients.

We found that the mobile scanner captures 3D images with a low chest surface-to-surface deviation and high repeatability for different levels of examiners. Compared to other researchers' findings with different scanning systems,^{1,5,8,30} we consider the accuracy of the calculated mesh models as sufficient for clinical application. A thorough 3D capture setting with the correct positioning of the patient is essential for comparisons between two different imaging systems as well as for breast change documentation in follow-up sessions.^{22,26,34} Our statistics include different patient groups to show the usability of the handheld scanner for a diverse patient collective. Although the mobile scanner performs well overall, the results may vary when looking at a more homogeneous collective. Examining only thin patients with a small breast before and after breast aug-

mentation may yield even better scans and therefore less deviations with better accuracy.

In terms of digital breast measurements, we found highly correlating distances with small deviations for all measurements in daily practice. Although the nipple to inframammary fold distance showed statistical significance, deviations were still acceptable. As all measuring points were automatically projected from the reference onto the corresponding mesh, errors in the correct positioning should be ruled out. The inframammary crease is a known limitation for every major 3D surface imaging tool capturing the breast region in a standing posture.^{7,8,27,35}

We followed a recognized approach²⁸ to produce the most accurate and applicable breast volume results to reduce artifacts from highly moveable areas. We observed higher breast volume errors with increasing breast size and BMI in our comparison of a medical 3D imaging system against the consumer device, which have been described in 3D surface imaging comparisons to different types of volume assessment such as MRI, water-displacement, and plaster cast.^{27,36-39} Nonetheless, relative breast volumes in the handheld scanner-acquired 3D models showed low

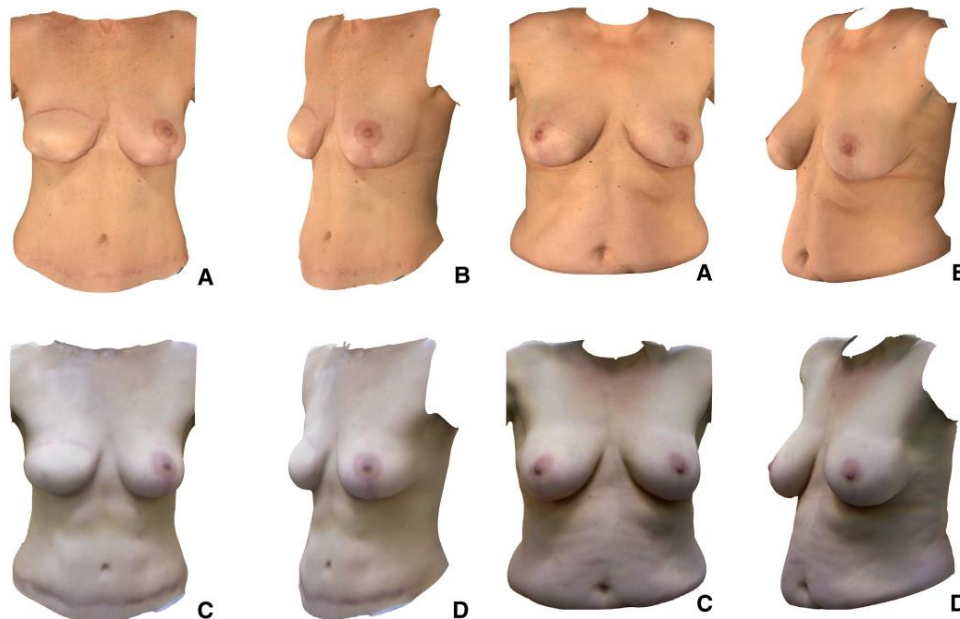


Figure 2 Three-dimensional scans of a 51-year-old female patient (BMI: 18.3 kg/m²) 6 months after breast reconstruction on the right side and left-sided harmonization: Vectra image in frontal (A) and oblique (B) views; corresponding Sense scan in frontal (C) and oblique (D) views.

mean deviations and absolute deviations below 10% within the limits of agreement.

With direct volume difference between both systems of this study, the error range was even smaller, confirming clinical relevance.^{31,40} Thus, we find that Sense™ well suited to aid in objective breast volume measurement within the known 3D surface imaging limitations.

In its construction, our mobile infrared depth scanner is similar to the affordable Microsoft® Kinect™,^{19,40} whereas the Microsoft® Kinect™ needs additional software and expertise to utilize its 3D imaging function.

As all mobile 3D scanners are primarily marketed as consumer products, their software merely allows to capture images and export the reconstructed 3D mesh model. With a relatively small video resolution, however, we regard the color texture on the surface scans only as moderate in quality, as shown in Figures 2 and 3. Because we believe color texture to be less important than surface accuracy for measuring distances and volumes, we find the device to be well suited for such tasks. During patient consultations, on the other hand, a lack of realistic texture quality may lessen the patient's experience and acceptance for this technology, which was not evaluated in this study. 3D surface imaging has shown to provide accurate 3D breast simulations^{24,30} with high patient satisfaction.¹⁴

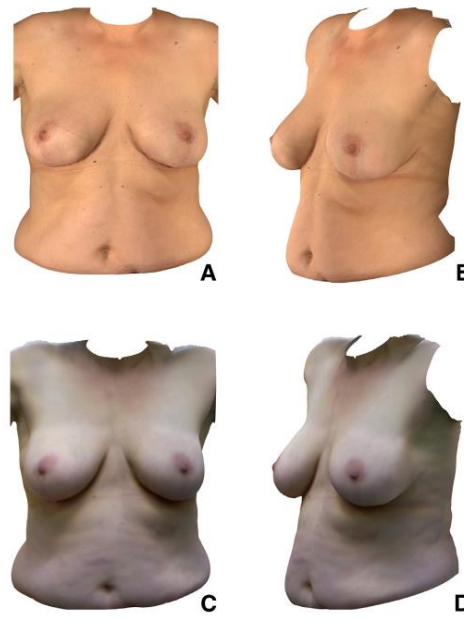


Figure 3 Three-dimensional scans of a 41-year-old female patient (BMI 29.1 kg/m²) 6 months after bilateral T-scar reduction mammoplasty: Vectra image in frontal (A) and oblique (B) views; corresponding Sense scan in frontal (C) and oblique (D) views.

Conclusion

A new handheld 3D scanner may offer sufficient 3D imaging quality to measure breast distances and volumes compared to a medical imaging system. More powerful and compact versions of these types of 3D imaging systems enter the market daily, and these systems include even tablets and smartphones. Further development in this area is needed to make 3D imaging and evaluation an inherent part of every patient's consultation.

Ethical approval

This study was conducted in accordance with the Declaration of Helsinki and with approval from the Ethics Committee of the Ludwig Maximilian University of Munich (reference Number 402-15).

Study registration

This study was registered under the DRKS-ID "DRKS00009014" in the German Clinical Trials Register.

Conflict of interest statement

The authors declared no potential conflicts of interest with respect to the research, authorship, and/or publication of this article. None of the figures or tables have been previously published, and the copyright is held by the authors.

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

References

1. Tzou CH, Artner NM, Pona I, et al. Comparison of three-dimensional surface-imaging systems. *J Plast Reconstr Aesthet Surg* 2014;67:489-97.
2. Xi W, Perdanasari AT, Ong Y, et al. Objective breast volume, shape and surface area assessment: a systematic review of breast measurement methods. *Aesthet. Plast Surg* 2014;38:1116-30.
3. Koban KC, Schenck T, Metz PM, et al. [En route for objective evaluation of form, volume, and symmetry in plastic surgery using 3-D intraoperative scans]. *Handchir Mikrochir Plast Chir* 2016;48:78-84.
4. Chang JB, Small KH, Choi M, Karp NS. Three-dimensional surface imaging in plastic surgery: foundation, practical applications, and beyond. *Plast Reconstr Surg* 2015;135:1295-304.
5. 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;20:509-15.
6. Hoeffelin H, Jacquemin D, Defaweux V, Nizet JL. A methodological evaluation of volumetric measurement techniques including three-dimensional imaging in breast surgery. *BioMed Res Int* 2014;2014:573249.
7. Yip JM, Mouratova N, Jeffery RM, Veitch DE, Woodman RJ, Dean NR. Accurate assessment of breast volume: a study comparing the volumetric gold standard (direct water displacement measurement of mastectomy specimen) with a 3D laser scanning technique. *Ann Plast Surg* 2012;68:135-41.
8. Chae MP, Rozen WM, Spychal RT, Hunter-Smith DJ. Breast volumetric analysis for aesthetic planning in breast reconstruction: a literature review of techniques. *Gland Surg* 2016;5:212-26.
9. Metzler P, Sun Y, Zemmann W, et al. Validity of the 3D VECTRA photogrammetric surface imaging system for cranio-maxillofacial anthropometric measurements. *Oral Maxillofac Surg* 2013.
10. 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;44:234-9.
11. Karp N, Choi M, Kulber DA, et al. SERI surgical scaffold in 2-stage breast reconstruction: 2-year data from a prospective, multicenter trial. *Plast Reconstr Surg Glob Open* 2017;5:e1327.
12. Quan M, Fadl A, Small K, et al. Defining pseudoptosis (bottoming out) 3 years after short-scar medial pedicle breast reduction. *Aesthet Plast Surg* 2011;35:357-64.
13. Boyce M, Radtke C, Vogt PM. The volumetric analysis of fat graft survival in breast reconstruction. *Plast Reconstr Surg* 2013;132:862e-863e.
14. Donfrancesco A, Montemurro P, Heden P. Three-dimensional simulated images in breast augmentation surgery: an investigation of patients' satisfaction and the correlation between prediction and actual outcome. *Plast Reconstr Surg* 2013;132:810-22.
15. Epstein MD, Scheffan M. Three-dimensional imaging and simulation in breast augmentation: what is the current state of the art? *Clin Plast Surg* 2015;42:437-50.
16. Garibyan L, Sipprell WH, Jalian HR, Sakamoto FH, Avram M, Anderson RR. Three-dimensional volumetric quantification of fat loss following cryolipolysis. *Lasers Surg Med* 2014;46:75-80.
17. Gerth DJ, King B, Rabach L, Glasgold RA, Glasgold MJ. Long-term volumetric retention of autologous fat grafting processed with closed-membrane filtration. *Aesthet Surg J* 2014;34:985-94.
18. Koban KC, Leitsch S, Holzbach T, Volkmer E, Metz PM, Giunta RE. [3D-imaging and analysis for plastic surgery by smartphone and tablet: an alternative to professional systems?]. *Handchir Mikrochir Plast Chir* 2014;46:97-104.
19. Henseler H, Bonkat SK, Vogt PM, Rosenhahn B. The kinect recording system for objective three- and four-dimensional breast assessment with image overlays. *J Plast Reconstr Aesthet Surg* 2016;69:e27-34.
20. Pohlmann STL, Harkness E, Taylor CJ, Gandhi A, Astley SM. Pre-operative implant selection for unilateral breast reconstruction using 3D imaging with the Microsoft kinect sensor. *J Plast Reconstr Aesthet Surg* 2017;70:1059-67.
21. Fan Y, Xu X, Wang M. A surface-based spatial registration method based on sense three-dimensional scanner. *J Craniofac Surg* 2017;28:157-60.
22. 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;66:1551-6.
23. Losken A, Seify H, Denson DD, Paredes AA Jr, Carlson GW. Validating three-dimensional imaging of the breast. *Ann Plast Surg* 2005;54:471-6 discussion 477-478.
24. Roostaieian J, Adams WP Jr. Response to "the limitations of three-dimensional simulations in breast augmentation". *Aesthet Surg J* 2015;35:NP65-7.
25. Roostaieian J, Adams WP Jr. Response to "Comments on: three-dimensional imaging for breast augmentation: is this technology providing accurate simulations?". *Aesthet Surg J* 2015;35:NP73-4.
26. Henseler H, Smith J, Bowman A, et al. Investigation into variation and errors of a three-dimensional breast imaging system using multiple stereo cameras. *J Plast Reconstr Aesthet Surg* 2012;65:e332-7.
27. Eder M, Schneider A, Feussner H, et al. [Breast volume assessment based on 3D surface geometry: verification of the method using MR imaging]. *Biomed Tech (Berl)* 2008;53:112-21.
28. Kovacs L, Eder M, Zimmermann A, et al. Three-dimensional evaluation of breast augmentation and the influence of anatomic and round implants on operative breast shape changes. *Aesthet Plast Surg* 2012;36:879-87.
29. Lee HY, Hong K, Kim EA. Measurement protocol of women's nude breasts using a 3D scanning technique. *Appl Ergon* 2004;35:353-9.
30. Roostaieian J, Adams WP Jr. Three-dimensional imaging for breast augmentation: is this technology providing accurate simulations? *Aesthet Surg J* 2014;34:857-75.
31. Sigurdson LJ, Kirkland SA. Breast volume determination in breast hypertrophy: an accurate method using two anthropomorphic measurements. *Plast Reconstr Surg* 2006;118:313-20.
32. Giunta RE, Eder M, Machens HG, Muller DF, Kovacs L. [Structural fat grafting for rejuvenation of the dorsum of the hand]. *Handchir Mikrochir Plast Chir* 2010;42:143-7.
33. Choppin S, Wheat JS, Goyal A. Using the microsoft kinect to measure breast volume: thoughts and experiences. *J Plast Reconstr Aesthet Surg* 2014;67:1007-8.
34. Henseler H, Khambay BS, Bowman A, et al. Investigation into accuracy and reproducibility of a 3D breast imaging system using multiple stereo cameras. *J Plast Reconstr Aesthet Surg* 2011;64:577-82.
35. Rha EY, Choi IK, Yoo G. Accuracy of the method for estimating

- breast volume on three-dimensional simulated magnetic resonance imaging scans in breast reconstruction. *Plast Reconstr Surg* 2014;133:14-20.
36. Bulstrode N, Bellamy E, Shrotria S. Breast volume assessment: comparing five different techniques. *Breast* 2001;10:117-23.
37. 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. *Arch Plast Surg* 2016;43:430-7.
38. 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;66:776-86.
39. Creasman CN, Mordaunt D, Liolios T, Chiu C, Gabriel A, Maxwell GP. Four-dimensional breast imaging, part II: clinical implementation and validation of a computer imaging system for breast augmentation planning. *Aesthet Surg J* 2011;31:925-38.
40. 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;67:483-8.

7.2. Veröffentlichung Nr. 2

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



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

K.C. Koban*, Z. Li, L. Etzel, T.L. Schenck, F. Härtnagl, R.E. Giunta

Division of Hand, Plastic and Aesthetic Surgery, University Hospital, LMU Munich, Ziemssenstraße 5, Munich 80336, Germany

Received 25 August 2021; accepted 5 June 2022
Available online xxx

KEYWORDS

Breast augmentation;
Three-dimensional
surface imaging;
Intraoperative
analysis;
Objective
documentation

Summary Background: Breast volume estimation and implant size are crucial factors to achieve a symmetrical result in esthetic and reconstructive breast surgery. Although three-dimensional surface imaging (3DSI) has allowed for a better understanding of breast shape, size, and asymmetry during patient consultation, its use has been limited regarding intraoperative decision-making.

Objective: To validate the intraoperative use of a portable hand-held 3D surface imaging device as an objective tool to assess volumetric changes during breast augmentation surgery.

Methods: Patients receiving bilateral, submuscular breast augmentation were enrolled for this study. Intraoperative 3DSI was conducted using the Sense 3D scanner, allowing for digitalization of the operating field. Intraoperatively gauged volume changes caused by known implant volumes were compared with digital measurements calculated from 3D surface images of the operating field. Digital intraoperative breast volumes were compared to the pre- and postoperative Vectra XT reference system.

Results: Eighty individual breasts of 40 patients were successfully 3D imaged before incision and after wound closure. There was no significant difference between digital breast volumes by intraoperative and outpatient 3DSI. Intraoperative pre- to postoperative 3D breast volume change showed no significant difference to the known implant volume ($p = 0.124$, mean deviation of 5.8 ± 24.3 mL and $2.0 \pm 9.0\%$).

Conclusions: Our findings showed a high correlation regarding intraoperative digital breast volumetric changes. Intraoperative use of 3DSI yielded objective data during breast augmenta-

* Corresponding author.

E-mail address: konstantin.koban@med.uni-muenchen.de (K.C. Koban).

<https://doi.org/10.1016/j.bjps.2022.06.008>

1748-6815/© 2022 British Association of Plastic, Reconstructive and Aesthetic Surgeons. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

Please cite this article as: K.C. Koban, Z. Li, L. Etzel et al., Objective evaluation of volumetric changes during breast augmentation using intraoperative three-dimensional surface imaging, Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery, <https://doi.org/10.1016/j.bjps.2022.06.008>

tion. This novel technique could beneficially impact future breast implant selection, especially in cases with breast asymmetry and the need for differently sized implants.

© 2022 British Association of Plastic, Reconstructive and Aesthetic Surgeons. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

Introduction

Three-dimensional surface imaging (3DSI) provides a helpful digital acquisition of breast parameters and breast volumes in the preoperative consultation and postoperative follow-up documentation of breast surgical procedures with known advantages and limitations.¹⁻⁷ Several studies demonstrated high interest and positive experience of patients with this method.^{2,8-10}

However, especially for complex revision surgery, congenital breast asymmetry, or symmetry adjustment in different simultaneous approaches for each breast, there are often limited possibilities to objectively quantify breast volume changes or whether symmetrical breast volume is present. Especially in these cases, the use of 3DSI potentially could provide further objective parameters. With the development of portable 3D scanners,¹¹⁻¹³ few studies investigated the intraoperative use of 3DSI in breast surgery.¹⁴⁻¹⁶ However, high costs of the then equipment and elaborate calculations seem to have hindered any further pursuit.

For these reasons, we present a low-cost hand-held 3D scanner for intraoperative 3DSI, which is representative among many currently available products on the market. However, before the use in complex breast surgery scenarios can be investigated, validation must be performed using a verifiable volumetric procedure, such as breast augmentation.

The primary objective of this study was to validate the intraoperative use of a portable hand-held 3D surface imaging device as an objective tool to assess volumetric changes during breast augmentation surgery. For this purpose, intraoperatively gauged volume changes caused by implant volumes were compared with digital measurements calculated from 3D surface images of the operating field.

In addition, digital intraoperative breast volumes were compared with a reference system used in preoperative planning and postoperative documentation.

Patients, materials and methods

Study population

Study participation was offered to patients scheduled for bilateral, submuscular breast augmentation with silicone implants through an inframammary approach. Potential subjects were excluded if below the age of 18, if they had received previous breast surgery, if they presented themselves with congenital breast deformities, significant shape abnormalities or ptosis, scoliosis, or chest wall deformities, or if they were to receive additional breast-shaping procedures, such as mastopexy or fat transfer.

Written informed consent was obtained from each participant.

Surgical consultation and outpatient 3D surface imaging

All surgical procedures were performed by either a chief or senior consultant (R.E.G., T.L.S.) via a bilateral subpectoral inframammary approach. Each study participant underwent routine preoperative patient consultation with additional 3DSI by using the Vectra Volumetric 3D Surface Imaging System® (Canfield Sci., NJ, USA). The final implants were selected based on optimal breast symmetry, shape, and size according to the patient's wishes and the surgeon's objective opinion. Imaging was performed by a skilled examiner during preoperative patient consultation after obtaining written informed consent, and during a follow-up consultation 3 months after surgery. For our study, it served as the reference 3D imaging system based on the widespread use and research conducted with it in the last decade. All patients received Mentor (Irvine, Calif., USA) silicon sizers and implants.

Intraoperative 3D surface imaging

Corresponding with the surgeon's view of the operating field, 3D surface images were obtained using the Sense™ 3D Scanner (3D Systems®, South Carolina, USA) mounted on a hand-held monopod for ease of use. 3DSI was performed at the beginning of surgery before the first incision and at the end of surgery after wound closure with the final implant in place. There was no alteration regarding standardized breast surgical routine.

Each imaging procedure was conducted while the subject's torso was seated upright at an angle of approximately 60° on the same adjustable operating table (Fig. 1). Preliminary examinations showed minimal subject movement when changing between supine and upright position. The operating field was systematically imaged using a zig-zag pattern, with the scanner held at an operating distance of approximately 90 cm. The time for each capture was clocked and logged.

All imaging procedures and 3D analyses were conducted by a single investigator with a high level of experience regarding device handling and software application (K.C.K.).

3D image processing

Following the intraoperative scan, the 3D reconstruction of the gathered point cloud using Sense™ software in high-resolution setting was completed (Fig. 2). The intraoperative 3D images were then imported into Mirror medical imaging software (Canfield Scientific Inc., NJ, USA)^{5,13} for further alignment and registration, along with the pre- and

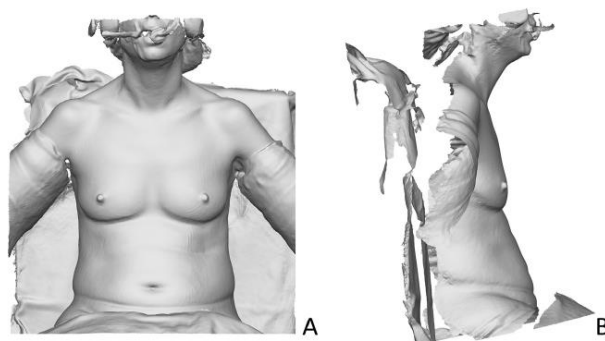


Fig. 1 Exemplary illustration of an intraoperative unedited 3DSI without texture of a patient sitting upright before final positioning and surgical coverage.

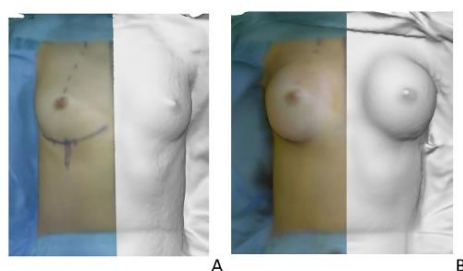


Fig. 2 (A) Preoperative and (B) postoperative 3DSI of a 22-year-old patient receiving bilateral breast augmentation with 260 mL implants. Split-screen textured and non-textured intra-operative views.

postoperative chest images scanned with Vectra. The time for 3D image processing was clocked and logged.

Breast volume measurements

Relative digital breast volume estimations for each time point and both devices were performed using interpolation of the posterior chest wall in the VAM Mirror application. Interpolation was performed using the previously described protocol¹⁷ along the infraclavicular location, sternal midline, below the inframammary fold on the torso, and along the anterior axillary line. We did not use the landmark-based automatic approach suggested by the producer.

Digital breast volume changes during surgery captured by the Sense 3D were determined using direct subtraction method in the VAM module of the Mirror software. After chest surface-based alignment with exclusion of the area of interest, the absolute breast volume change was measured by means of subtraction of the postoperative to preoper-

ative 3D model. The volumes of the implants used during surgery were deemed as reference values.

Statistical analysis

Using a significance level of 0.05 to guide conclusions, all statistical analyses were conducted using IBM SPSS Statistics 25 (IBM, Armonk, NY, USA).

Paired two-tailed t-tests were used to examine the differences from the two 3DSI devices breast volume pre- and postoperatively in paired continuous data and the comparison of intraoperative 3D volume change to the reference implant volumes. Pearson's correlation was assessed for corresponding measurements.

Results

Subject demographics

Forty patients were enrolled for this study. The median age was 32 ± 12 years (range: 20–65 years) and mean BMI was 21.0 ± 2.3 kg/m² (range: 18.0–26.0 kg/m²).

Pre- and postoperative measurements refer to the measurements taken intraoperatively before incision and after wound closure. A total of 80 pre- and postoperative breasts were assessed for digital comparison.

Comparison of intraoperative digital volume change and implant volume

The mean final implant volume was 294.8 ± 76.3 mL (range: 155–475 mL). Three-dimensional volume change measured between pre- and postoperative scan after final implant insertion resulted in a mean volume difference of 300.6 ± 81.1 mL. Both measurements showed a high correlation ($r = 0.954$) and no significant difference between

3D volume changes and implant sizes ($p = 0.124$). Mean absolute and relative deviation between implant volume and 3D-gauged breast volume change was 5.8 ± 24.3 mL (95% limits of agreement: -41.8 to 53.3 mL) and $2.0 \pm 9.0\%$ (95% limits of agreement: -15.5 to 19.6%).

Comparison of intraoperative digital breast volume to reference digital breast volume

The mean Vectra system gauged preoperative 3D breast volume was 185.6 ± 92.3 mL and 481.9 ± 131.6 mL postoperatively. Three-dimensional volume measured intraoperatively with the Sense 3D scanner was 180.5 ± 89.4 mL preoperative and 481.1 ± 127.9 mL postoperative. Both measurements showed a high correlation between their respective time points preoperative ($r = 0.947$) and postoperative ($r = 0.976$) with no significant difference between the preoperative ($p = 0.162$) and postoperative breast volume ($p = 0.811$).

Duration of 3D acquisition, processing, and final absolute breast volume changes

The mean time of intraoperative acquisition with the Sense 3D was 17.9 ± 4.8 s (range: 11–31 s). Mean time from finished 3D acquisition to absolute breast volume change measurement was 106.9 ± 10.1 s (range: 84–126 s).

Discussion

Three-dimensional surface imaging can provide a reliable tool for objective depiction of linear mammometrics, such as sternal notch to nipple and nipple to inframammary fold distances, as well as quantification of projection, volume, and surface symmetry.^{2,4-6,8,10,18-20} It can therefore represent an essential method in the substantiation of the surgeon's subjective assessment of esthetic outcome and the patient-reported outcome measures.

This study was designed to validate 3D breast volume change intraoperatively during breast augmentation compared to known implant volumes and pre- and postoperative standardized 3DSI in 40 patients (Figs. 3 and 4). Our findings indicated no significant differences between intraoperative 3D measurements and known implant size. We could show that the digital intraoperative breast volume measurements before and after surgery were not significantly different when measured using 3DSI with the mobile 3D scanner or reference imaging device.

While 3DSI has developed enormously over the last decades for preoperative documentation, planning and consultation, as well as postoperative follow-up, its usefulness remains controversially debated. The idea of using this technique also for intraoperative use is not new. Dating back more than 10 years ago, the benefit of this technique was investigated.^{14,15} Due to the extremely high acquisition costs of laser scanners at that time and the fact that software and scanner handling are only slowly becoming more user-friendly, the development focus seems to be on patient consultation. Despite lower acquisition prices, the use of this

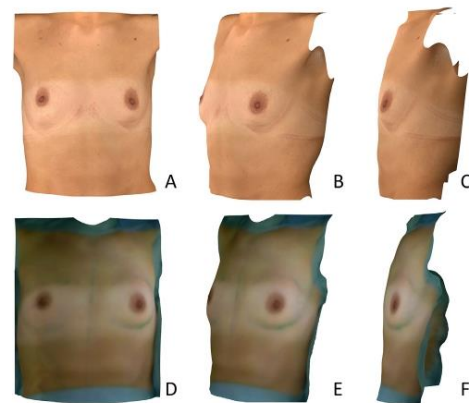


Fig. 3 Three-dimensional surface imaging of a 25-year-old female patient before bilateral breast augmentation: outpatient Vectra 3D image in (A) frontal, (B) oblique, and (C) lateral views; corresponding intraoperative Sense scan (D–F).

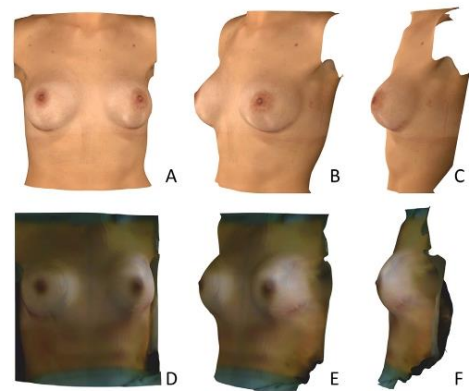


Fig. 4 Three-dimensional surface imaging of a 25-year-old female patient after bilateral breast augmentation with 295 mL implants: outpatient Vectra 3D image in (A) frontal, (B) oblique, and (C) lateral views; corresponding intraoperative Sense scan (D–F).

technology is still not widespread. With our work, we would like to demonstrate the possibility of a practical use of intraoperative 3DSI with affordable hand-held scanners, such as the 400 USD Sense 3D scanner in the future.

Our digitally collected breast volume changes showed a variance around the expected value already reported in literature.^{19,21-23} It can be assumed that the insertion of an implant results in a one-to-one volume effect on the breast surface. In contrast to studies on postoperative 3D breast volume measurement in patients after different

timeframes, our study involves a direct result of the use of implants without the possibility of significant hematoma or scarring, as well as relaxation of soft tissue under standardized conditions. Thus, it can be assumed that the subpectoral position and the creation of displacement layers will result in volumetric effects, which will have a relevant influence on the expected 3D volume change of the breast. For our studied patient group, although a small increase in volume can be assumed due to the elevation of the pectoralis muscle above the implant, at the same time the subpectoral position leads to a compression of the implant and thus a reduction in volume. To the best of our knowledge, no study has investigated the volumetric effect of subglandular, subpectoral, or dual-plane techniques in comparison or over time. The influence on the calculated 3D volume change therefore remains unclear but could explain known variances of the measurement deviations several months after surgery.

Our investigation uses standardized procedures for a reproducible validation, a uniform patient group, a standardized surgical procedure, and intraoperative evaluable 3D measurements within 3 min. While complex breast surgery can be multifaceted in terms of 3D volumetric changes, such as resection of soft tissues, mammary gland, tumors, pedicle formation, implant or expander insertion, and tissue transfer, we were particularly intent on describing a baseline for objective volume assessment under a clearly defined setting. In contrast to published case series in the face²⁴ and breast area,^{14–16} this was described here on a specific and common patient group.

While the perception of an aesthetical pleasing outcome lies within the experience of the surgeon, intraoperative 3DSI could give valuable information addressing complex breast surgical cases, such as implant revisions due to capsular contracture, pre-existing asymmetry, following mastectomy or conservative breast cancer excision, and autologous breast reconstruction.

The use of intraoperative 3DSI may help by giving objectified and precise information about how much volume difference between the breasts is present. Also, different projections of the breast can be detected.

Previous studies showed that 3DSI is an excellent tool for preoperative planning of breast augmentation,^{5,7,28–30} albeit while only investigation the predictive value of 3DSI when aiding in the planning process but not during the actual surgery. Other researchers have shown that the use of 3DSI is an excellent tool to observe postoperative changes of breast augmentations,^{6,14,19,25} however, they objectified the breasts at a stage at which changes could only be performed by reoperation. In contrast, our assessed 3D scanner was used in the operation theater where it could be of use to directly support in the decision of implant size or shape to achieve maximal symmetry in the future. Though objectifying the volume to achieve optimal symmetry is easier using 3DSI, we want to emphasize that this is only additional to the visual control of the surgeon. Furthermore, the preoperatively discussed wish of the patient always remains our highest priority.

No adjustments or compromises to the standard surgery environment were necessary. The noncontact approach was ideal for intraoperative use. Furthermore, scanning could be completed within short time as the scanning itself takes

less than 30 s and the processing with the used software about two minutes. Nevertheless, the texture resolution quality of the low-cost scanner is not satisfactory and reliable in the operating room, which is reflected in washed-out textures as seen in Fig. 4 in comparison with Fig. 3. A study under optimal lighting conditions showed a significantly better texture quality on a standing patient.²⁶ Newer, high-resolution mobile scanners do not seem to show this limitation.²⁷ Although there are some shortcomings in terms of texture, the 3D model is based on the infra-red depth measurement and not in the texture map. The texture has no influence on the accuracy of the volume measurement. The 3D images with surface textures are intended for better presentation and education to patients at initial and follow-up consultations.

This study included several limitations. A rather small group of patients with low BMI and small breast volumes were included in the study. Although this is partly due to surgery and patient clientele, it favors the determination of surface and volume changes. Known limitations of 3DSI are found in patients with higher BMI and large breast volume.^{28–34} The absolute volumes at a time and their changes during the operation are strongly restricted by ambiguous breast borders and artefact formation. The result of the scan regarding volumetric changes might be dependent on the positioning of the patient, which might change intraoperatively due to movement caused by the surgeon. Furthermore, only the breast volumes were compared, while a surgeon can use numerous landmarks and measurements between superficial soft spots. These are difficult to reproduce anthropometrically in 3D without additional markings on the patient.

Conclusions

Intraoperative 3DSI showed no difference in accuracy compared with standardized pre- and postoperative 3DSI with a reference system and implant size volumes. It provides additional detailed information and might assist the surgeon in challenging breast augmentation procedures by providing accurate and valid information about volume differences, allowing the surgeon to optimize breast symmetry. However, it requires a high level of skill and knowledge in the application of 3DSI.

Funding

None

Ethical approval

This study was conducted in accordance with the Declaration of Helsinki and with approval of the ethics committee of the Ludwig-Maximilians-University Munich (reference number 402-15), as well as being registered in the German clinical trials register under the DRKS-ID DRKS00009014.

Declaration of Competing Interest

None declared

References

- Howes BHL, Fosh B, Watson DJ, et al. Autologous fat grafting for whole breast reconstruction. *Plast Reconstr Surg* 2014;2(3). doi:10.1097/GOX.0000000000000075.
- O'Connell RL, Stevens RJG, Harris PA, Rusby JE. Review of three-dimensional (3D) surface imaging for oncoplastic, reconstructive and aesthetic breast surgery. *Breast* 2015;24(4):331-42. doi:10.1016/j.breast.2015.03.011.
- Oranges CM, Madduri S, Brantner P, et al. Three-dimensional assessment of the breast: validation of a novel, simple and inexpensive scanning process. *In Vivo (Brooklyn)* 2019;33(3):839-42. doi:10.21873/invivo.11548.
- 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. *Arch Plast Surg* 2016;43(5):430-7. doi:10.5999/aps.2016.43.5.430.
- Chae MP, Rozen WM, Spychal RT, Hunter-Smith DJ. Breast volumetric analysis for aesthetic planning in breast reconstruction: a literature review of techniques. *Gland Surg*. 2016;5(2):212-26. doi:10.3978/j.issn.2227-684X.2015.10.03.
- Eder M, Waldenfels FV, Swobodnik A, et al. Objective breast symmetry evaluation using 3-D surface imaging. *Breast* 2012;21(2):152-8. doi:10.1016/j.breast.2011.07.016.
- Donfrancesco A, Montemurro P, Hedén P. Three-dimensional simulated images in breast augmentation surgery: an investigation of patients' satisfaction and the correlation between prediction and actual outcome. *Plast Reconstr Surg* 2013;132(4):810-22. doi:10.1097/PRS.0b013e3182a014cb.
- de Runz A, Boccaro D, Bertheuil N, Claudot F, Brix M, Simon E. Three-dimensional imaging, an important factor of decision in breast augmentation. *Ann Chir Plast Esthet* 2018;63(2):134-9. doi:10.1016/j.anplas.2017.07.019.
- 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. *Plast Reconstr Surg* 2018;142(2):133E-144E. doi:10.1097/PRS.0000000000004601.
- Del Vecchio DA. SIEF-simultaneous implant exchange with fat: a new option in revision breast implant surgery. *Plast Reconstr Surg* 2012;130(6):1187-96. doi:10.1097/PRS.0b013e31826d9c3c.
- Camison L, Bykowski M, Lee WW, et al. Validation of the Vectra H1 portable three-dimensional photogrammetry system for facial imaging. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2018;47(3):403-10. doi:10.1016/j.ijom.2017.08.008.
- Koban KC, Cotozana S, Frank K, et al. Precision in 3-dimensional surface imaging of the face: a handheld scanner comparison performed in a cadaveric model. *Aesthetic Surg J* 2019;39(4):NP36-44. doi:10.1093/asj/sjy242.
- Koban KC, Etzel L, Li Z, et al. Three-dimensional surface imaging in breast cancer: a new tool for clinical studies? *Radiat Oncol* 2020;15(1). doi:10.1186/s13014-020-01499-2.
- Esme DL, Bucksch A, Beekman WH. Three-dimensional laser imaging as a valuable tool for specifying changes in breast shape after augmentation mammoplasty. *Aesthetic Plast Surg* 2009;33(2):191-5. doi:10.1007/s00266-008-9259-y.
- Tanabe YN, Honda T, Nakajima Y, Sakurai H, Nozaki M. Intraoperative application of three-dimensional imaging for breast surgery. *Scand J Plast Reconstr Surg Hand Surg* 2005;39(6):349-52. doi:10.1080/02844310500296347.
- Koban KC, Schenck T, Metz PM, et al. Auf dem Weg zur objektiven evaluation von form, volumen und symmetrie in der plastischen chirurgie mittels intraoperativer 3D Scans. *Handchir Mikrochirurgie Plast Chir* 2016;48(2):78-84. doi:10.1055/s-0042-104506.
- Eder M, Waldenfels FV, Swobodnik A, et al. Objective breast symmetry evaluation using 3-D surface imaging. *Breast* 2012;21(2):152-8. doi:10.1016/j.breast.2011.07.016.
- Losken A, Fishman I, Denson DD, Moyer HR, Carlson GW. An objective evaluation of breast symmetry and shape differences using 3-dimensional images. *Ann Plast Surg* 2005;55(6):571-5. doi:10.1097/01.sap.0000185459.49434.5f.
- Creasman CN, Mordaunt D, Liolios T, Chiu C, Gabriel A, Maxwell GP. Four-dimensional breast imaging, part I: introduction of a technology-driven, evidence-based approach to breast augmentation planning. *Aesthetic Surg J* 2011;31(8):914-24. doi:10.1177/1090820X11423916.
- Koban KCC, Schenck T, Metz PM, et al. [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. doi:10.1055/s-0042-104506.
- Kovacs L, Eder M, Hollweck R, et al. New aspects of breast volume measurement using 3-dimensional surface imaging. *Ann Plast Surg* 2006;57(6):602-10. doi:10.1097/01.sap.0000235455.21775.6a.
- Yip JM, Mouratova N, Jeffery RM, Veitch DE, Woodman RJ, Dean NR. Accurate assessment of breast volume: a study comparing the volumetric gold standard (direct water displacement measurement of mastectomy specimen) with a 3D laser scanning technique. *Ann Plast Surg* 2012;68(2):135-41. doi:10.1097/SAP.0b013e31820ebdd0.
- Eder M, Schneider A, Feussner H, et al. Brustvolumenbestimmung anhand der 3-D-oberflächengeometrie: verifizierung der methode mit hilfe der kernspintomographie. *Biomed Tech* 2008;53(3):112-21. doi:10.1515/BMT.2008.017.
- 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. *Plast Reconstr Surg - Glob Open* 2017;5(8):e1432. doi:10.1097/GOX.0000000000001432.
- Kovacs L, Eder M, Zimmermann A, et al. Three-dimensional evaluation of breast augmentation and the influence of anatomic and round implants on operative breast shape changes. *Aesthetic Plast Surg* 2012;36:879-87 Aesthetic Plast Surg. doi:10.1007/s00266-012-9892-3.
- 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. *J Plast Reconstr Aesthetic Surg* 2018;71(10):1417-23. doi:10.1016/j.bjps.2018.05.017.
- Modabber A, Peters F, Kniha K, et al. Evaluation of the accuracy of a mobile and a stationary system for three-dimensional facial scanning. *J Cranio-Maxillofac Surg* 2016;44(10):1719-24. doi:10.1016/j.jcms.2016.08.008.
- Losken A, Seify H, Denson DD, et al. Validating three-dimensional imaging of the breast. *Ann Plast Surg* 2005;54(5):471-6. doi:10.1097/01.sap.0000155278.87790.a1.
- Tzou C-HHJHJ, Artner NM, Pona I, et al. Comparison of three-dimensional surface-imaging systems. *J Plast Reconstr Aesthet Surg* 2014;67(4):489-97. doi:10.1016/j.bjps.2014.01.003.
- Choppin SB, Wheat JS, Gee M, Goyal A. *The Accuracy of Breast Volume Measurement Methods: A Systematic Review*, 28. Churchill Livingstone; 2016. doi:10.1016/j.breast.2016.05.010.
- Chae MP, Rozen WM, Spychal RT, Hunter-Smith DJ. Breast volumetric analysis for aesthetic planning in breast reconstruction: a literature review of techniques. *Gland Surg* 2016;5(2):212-26. doi:10.3978/j.issn.2227-684X.2015.10.03.
- O'Connell RL, Khabra K, Bamber JC, et al. Validation of the Vectra XT three-dimensional imaging system for measuring

- breast volume and symmetry following oncological reconstruction. *Breast Cancer Res Treat* 2018;171(2):391-8. doi:10.1007/s10549-018-4843-6.
33. Wesselius TS, Verhulst AC, Vreeken RD, Xi T, Maal TJJ, Ulrich DJO. Accuracy of three software applications for breast volume calculations from three-dimensional surface images. *Plast Reconstr Surg* 2018;142(4):858-65. doi:10.1097/PRS.0000000000004728.
34. Chen K, Feng CJ, Ma H, et al. Preoperative breast volume evaluation of one-stage immediate breast reconstruction using three-dimensional surface imaging and a printed mold. *J Chin Med Assoc* 2019;82(9):732-9. doi:10.1097/JCMA.000000000000155.

Literaturverzeichnis

1. Atiye B, Chahine F. Metrics of the Aesthetically Perfect Breast. *Aesthetic Plast Surg* 2018;42(5):1187-1194. DOI: 10.1007/s00266-018-1154-6.
2. Raveendran SS, El-Ali K, Shibu M. Precision and symmetry in aesthetic plastic surgery "What Immortal hand or eye could frame thy fearful symmetry" (William Blake). *J Plast Reconstr Aesthet Surg* 2008;61(3):272-4. DOI: 10.1016/j.bjps.2007.10.038.
3. Berssenbrugge P, Berlin NF, Kebeck G, et al. 2D and 3D analysis methods of facial asymmetry in comparison. *J Craniomaxillofac Surg* 2014;42(6):e327-34. DOI: 10.1016/j.jcms.2014.01.028.
4. Quieregatto PR, Hochman B, Ferrara SF, et al. Anthropometry of the breast region: how to measure? *Aesthetic Plast Surg* 2014;38(2):344-9. DOI: 10.1007/s00266-014-0291-9.
5. Kalbermatten DF, Wettstein R, Erba P, Rieger UM, Pierer G, Raffoul W. Body taping for contour surgery. *Aesthetic Plast Surg* 2009;33(3):324-6. DOI: 10.1007/s00266-008-9265-0.
6. 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. DOI: 10.1055/s-0032-1316379.
7. Chang JB, Small KH, Choi M, Karp NS. 3D Surface Imaging in Plastic Surgery: Foundation, Practical Applications, and Beyond. *Plast Reconstr Surg* 2015. DOI: 10.1097/PRS.0000000000001221.
8. Chae MP, Rozen WM, Spychal RT, Hunter-Smith DJ. Breast volumetric analysis for aesthetic planning in breast reconstruction: a literature review of techniques. *Gland Surg* 2016;5(2):212-26. DOI: 10.3978/j.issn.2227-684X.2015.10.03.
9. Liu CJ, Ji K, Sun JJ, et al. [Digital evaluation of breast symmetry with 3D scanning technique]. *Zhonghua Zheng Xing Wai Ke Za Zhi* 2013;29(5):353-6. (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24409777>).
10. Howes BH, Watson DI, Fosh B, Yip JM, Kleinig P, Dean NR. Magnetic Resonance Imaging Versus 3-Dimensional Laser Scanning for Breast Volume Assessment After Breast Reconstruction. *Ann Plast Surg* 2017;78(4):455-459. DOI: 10.1097/SAP.0000000000000890.
11. Etzel L, Koban KC, Li Z, Frank K, Giunta RE, Schenck TL. [Whole-body surface assessment - implementation and experiences with 360 degrees 3D whole-body scans: opportunities to objectively monitor the extremities and the body trunk]. *Handchir Mikrochir Plast Chir* 2019;51(4):240-248. DOI: 10.1055/a-0836-2683.
12. Grossman AJ, Roudner LA. A simple means for accurate breast volume determination. *Plast Reconstr Surg* 1980;66(6):851-2. DOI: 10.1097/00006534-198012000-00009.
13. Edsander-Nord A, Wickman M, Jurell G. Measurement of breast volume with thermoplastic casts. *Scand J Plast Reconstr Surg Hand Surg* 1996;30(2):129-32. DOI: 10.3109/02844319609056394.
14. Kalbhen CL, McGill JJ, Fendley PM, Corrigan KW, Angelats J. Mammographic determination of breast volume: comparing different methods. *AJR Am J Roentgenol* 1999;173(6):1643-9. (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10584814>).
15. Malini S, Smith EO, Goldzieher JW. Measurement of breast volume by ultrasound during normal menstrual cycles and with oral contraceptive use. *Obstet Gynecol* 1985;66(4):538-41. (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/3900840>).
16. Schultz RC, Dolezal RF, Nolan J. Further applications of Archimedes' principle in the correction of asymmetrical breasts. *Ann Plast Surg* 1986;16(2):98-101. (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/3273032>).

17. Koban KC, Perko P, Li Z, et al. 3D Anthropometric Facial Imaging - A comparison of different 3D scanners. *Facial Plast Surg Clin North Am* 2022;30(2):149-158. DOI: 10.1016/j.fsc.2022.01.003.
18. Yip JM, Mouratova N, Jeffery RM, Veitch DE, Woodman RJ, Dean NR. Accurate assessment of breast volume: a study comparing the volumetric gold standard (direct water displacement measurement of mastectomy specimen) with a 3D laser scanning technique. *Ann Plast Surg* 2012;68(2):135-41. (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21587046>).
19. Szychta P, Witmanowski H, Rykala J. Assessment of the usefulness of three-dimensional scanner in aesthetic evaluation of post-traumatic rhinoplasty. *J Plast Surg Hand Surg* 2013;47(2):106-12. DOI: 10.3109/2000656X.2012.751389.
20. Koch MC, Adamietz B, Jud SM, et al. Breast volumetry using a three-dimensional surface assessment technique. *Aesthetic Plast Surg* 2011;35(5):847-55. DOI: 10.1007/s00266-011-9708-x.
21. Kovacs L, Eder M, Hollweck R, et al. Comparison between breast volume measurement using 3D surface imaging and classical techniques. *Breast* 2007;16(2):137-45. (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17029808>
[https://www.thebreastonline.com/article/S0960-9776\(06\)00163-9/fulltext](https://www.thebreastonline.com/article/S0960-9776(06)00163-9/fulltext)).
22. Esme DL, Bucksch A, Beekman WH. Three-dimensional laser imaging as a valuable tool for specifying changes in breast shape after augmentation mammoplasty. *Aesthetic Plast Surg* 2009;33(2):191-5. DOI: 10.1007/s00266-008-9259-y.
23. Sabri H, Tehrani A, Sarkarat F. 3-dimensional analysis of nasal soft tissue alterations following maxillary Lefort I advancement with and without impaction using 3D photogrammetry scanner. *Oral and maxillofacial surgery* 2022;1-13. DOI: 10.1007/s10006-022-01121-7.
24. Tzou CH, Artner NM, Pona I, et al. Comparison of three-dimensional surface-imaging systems. *J Plast Reconstr Aesthet Surg* 2014;67(4):489-97. (In eng). DOI: 10.1016/j.bjps.2014.01.003.
25. Suchan J, Azam S. Controlled photogrammetry system for determination of volume and surface features in soils. *MethodsX* 2021;8:101368. DOI: 10.1016/j.mex.2021.101368.
26. Sadeghian H, Naghavi H, Maleknia R, Soosani J, Pfeifer N. Estimating the attributes of urban trees using terrestrial photogrammetry. *Environ Monit Assess* 2022;194(9):625. DOI: 10.1007/s10661-022-10294-3.
27. Jofre-Briceno C, Munoz-La Rivera F, Atencio E, Herrera RF. Implementation of Facility Management for Port Infrastructure through the Use of UAVs, Photogrammetry and BIM. *Sensors (Basel)* 2021;21(19). DOI: 10.3390/s21196686.
28. Mendikute A, Yague-Fabra JA, Zatarain M, Bertelsen A, Leizea I. Self-Calibrated In-Process Photogrammetry for Large Raw Part Measurement and Alignment before Machining. *Sensors (Basel)* 2017;17(9). DOI: 10.3390/s17092066.
29. Catherwood T, McCaughan E, Greer E, Spence RA, McIntosh SA, Winder RJ. Validation of a passive stereophotogrammetry system for imaging of the breast: a geometric analysis. *Med Eng Phys* 2011;33(8):900-5. DOI: 10.1016/j.medengphy.2011.02.005.
30. Lobato RC, Camargo CP, Buelvas Bustillo AM, Ishida LC, Gemperli R. Volumetric Comparison Between CT Scans and Smartphone-Based Photogrammetry in Patients Undergoing Chin Augmentation Using Autologous Fat Graft. *Aesthet Surg J* 2022. DOI: 10.1093/asj/sjac335.
31. Eder M, Schneider A, Feussner H, et al. [Breast volume assessment based on 3D surface geometry: verification of the method using MR imaging]. *Biomed Tech (Berl)* 2008;53(3):112-21. DOI: 10.1515/BMT.2008.017.

32. Reece GP, Merchant F, Andon J, et al. 3D surface imaging of the human female torso in upright to supine positions. *Med Eng Phys* 2015;37(4):375-83. DOI: 10.1016/j.medengphy.2015.01.011.
33. O'Connell RL, Khabra K, Bamber JC, et al. Validation of the Vectra XT three-dimensional imaging system for measuring breast volume and symmetry following oncological reconstruction. *Breast Cancer Res Treat* 2018;171(2):391-398. DOI: 10.1007/s10549-018-4843-6.
34. Yang J, Zhang R, Shen J, Hu Y, Lv Q. The Three-Dimensional Techniques in the Objective Measurement of Breast Aesthetics. *Aesthetic Plast Surg* 2015;39(6):910-5. DOI: 10.1007/s00266-015-0560-2.
35. Koban KC, Leitsch S, Holzbach T, Volkmer E, Metz PM, Giunta RE. [3D-imaging and analysis for plastic surgery by smartphone and tablet: an alternative to professional systems?]. *Handchir Mikrochir Plast Chir* 2014;46(2):97-104. DOI: 10.1055/s-0034-1371822.
36. Soileau L, Bautista D, Johnson C, et al. Automated anthropometric phenotyping with novel Kinect-based three-dimensional imaging method: comparison with a reference laser imaging system. *Eur J Clin Nutr* 2016;70(4):475-81. DOI: 10.1038/ejcn.2015.132.
37. Koban KC, Schenck T, Metz PM, et al. [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. (In ger). DOI: 10.1055/s-0042-104506.
38. Gibelli D, Pucciarelli V, Cappella A, Dolci C, Sforza C. Are Portable Stereophotogrammetric Devices Reliable in Facial Imaging? A Validation Study of VECTRA H1 Device. *J Oral Maxillofac Surg* 2018;76(8):1772-1784. DOI: 10.1016/j.joms.2018.01.021.
39. 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. *J Plast Reconstr Aesthet Surg* 2020;73(1):141-148. DOI: 10.1016/j.bjps.2019.07.008.
40. Metzler P, Sun Y, Zemmann W, et al. Validity of the 3D VECTRA photogrammetric surface imaging system for cranio-maxillofacial anthropometric measurements. *Oral and maxillofacial surgery* 2014;18(3):297-304. (In eng). DOI: 10.1007/s10006-013-0404-7.
41. Meier JD, Glasgold RA, Glasgold MJ. 3D photography in the objective analysis of volume augmentation including fat augmentation and dermal fillers. *Facial Plast Surg Clin North Am* 2011;19(4):725-35, ix. DOI: 10.1016/j.fsc.2011.07.012.
42. Nord F, Ferjencik R, Seifert B, et al. The 3dMD photogrammetric photo system in cranio-maxillofacial surgery: Validation of interexaminer variations and perceptions. *J Craniomaxillofac Surg* 2015;43(9):1798-803. DOI: 10.1016/j.jcms.2015.08.017.
43. Weinberg SM, Naidoo S, Govier DP, Martin RA, Kane AA, Marazita ML. Anthropometric precision and accuracy of digital three-dimensional photogrammetry: comparing the Genex and 3dMD imaging systems with one another and with direct anthropometry. *J Craniofac Surg* 2006;17(3):477-83. DOI: 10.1097/00001665-200605000-00015.
44. Cotozana S, Koban K, Pavicic T, et al. Clinical Validation of the Surface Volume Coefficient for Minimally Invasive Treatment of the Temple. *J Drugs Dermatol* 2019;18(6):533. (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/31251545>).
45. Knoops PG, Beaumont CA, Borghi A, et al. Comparison of three-dimensional scanner systems for craniomaxillofacial imaging. *J Plast Reconstr Aesthet Surg* 2017;70(4):441-449. DOI: 10.1016/j.bjps.2016.12.015.
46. Verhulst A, Hol M, Vreeken R, Becking A, Ulrich D, Maal T. Three-Dimensional Imaging of the Face: A Comparison Between Three Different Imaging Modalities. *Aesthet Surg J* 2018;38(6):579-585. DOI: 10.1093/asj/sjx227.
47. Markiewicz MR, Bell RB. The use of 3D imaging tools in facial plastic surgery. *Facial Plast Surg Clin North Am* 2011;19(4):655-82, ix. DOI: 10.1016/j.fsc.2011.07.009.

48. Wong JY, Oh AK, Ohta E, et al. Validity and reliability of craniofacial anthropometric measurement of 3D digital photogrammetric images. *Cleft Palate Craniofac J* 2008;45(3):232-9. DOI: 10.1597/06-175.
49. 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. DOI: 10.1016/j.bjps.2013.02.008.
50. Tepper OM, Small KH, Unger JG, et al. 3D analysis of breast augmentation defines operative changes and their relationship to implant dimensions. *Ann Plast Surg* 2009;62(5):570-5. DOI: 10.1097/SAP.0b013e31819faff9.
51. Koban KC, Frank K, Etzel L, Schenck TL, Giunta RE. 3D Mammometric Changes in the Treatment of Idiopathic Gynecomastia. *Aesthetic Plast Surg* 2019;43(3):616-624. DOI: 10.1007/s00266-019-01341-5.
52. 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. DOI: 10.1177/1553350612463443.
53. Losken A, Seify H, Denson DD, Paredes AA, Jr., Carlson GW. Validating three-dimensional imaging of the breast. *Ann Plast Surg* 2005;54(5):471-6; discussion 477-8. DOI: 10.1097/01.sap.0000155278.87790.a1.
54. 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;50(6):393-399. DOI: 10.1055/a-0770-3445.
55. de Menezes M, Rosati R, Ferrario VF, Sforza C. Accuracy and reproducibility of a 3-dimensional stereophotogrammetric imaging system. *J Oral Maxillofac Surg* 2010;68(9):2129-35. DOI: 10.1016/j.joms.2009.09.036.
56. Aldridge K, Boyadjiev SA, Capone GT, DeLeon VB, Richtsmeier JT. Precision and error of three-dimensional phenotypic measures acquired from 3dMD photogrammetric images. *Am J Med Genet A* 2005;138A(3):247-53. DOI: 10.1002/ajmg.a.30959.
57. Koban KC, Hartnagl 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. *J Plast Reconstr Aesthet Surg* 2018;71(10):1417-1423. DOI: 10.1016/j.bjps.2018.05.017.
58. 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. DOI: 10.1016/j.bjps.2013.06.040.
59. Creasman CN, Mordaunt D, Liolios T, Chiu C, Gabriel A, Maxwell GP. Four-dimensional breast imaging, part II: clinical implementation and validation of a computer imaging system for breast augmentation planning. *Aesthet Surg J* 2011;31(8):925-38. DOI: 10.1177/1090820X11424147.
60. Pham M, Alzul R, Elder E, et al. Evaluation of Vectra(R) XT 3D Surface Imaging Technology in Measuring Breast Symmetry and Breast Volume. *Aesthetic Plast Surg* 2022 (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/36149443>).
61. Eder M, Waldenfels FV, Swobodnik A, et al. Objective breast symmetry evaluation using 3-D surface imaging. *Breast* 2012;21(2):152-8. (In eng). DOI: 10.1016/j.breast.2011.07.016.
62. Maal TJ, van Loon B, Plooi JM, et al. Registration of 3-dimensional facial photographs for clinical use. *J Oral Maxillofac Surg* 2010;68(10):2391-401. DOI: 10.1016/j.joms.2009.10.017.
63. Beaumont CAA, Knoop PGM, Borghi A, et al. Three-dimensional surface scanners compared with standard anthropometric measurements for head shape. *J Craniomaxillofac Surg* 2017;45(6):921-927. DOI: 10.1016/j.jcms.2017.03.003.

64. Roostaeian J, Adams WP, Jr. Three-Dimensional Imaging for Breast Augmentation: Is This Technology Providing Accurate Simulations? *Aesthet Surg J* 2014;34(6):857-75. DOI: 10.1177/1090820X14538805.
65. Sigurdson LJ, Kirkland SA. Breast volume determination in breast hypertrophy: an accurate method using two anthropomorphic measurements. *Plast Reconstr Surg* 2006;118(2):313-20. (In eng). DOI: 10.1097/01.prs.0000227627.75771.5c.
66. Rha EY, Choi IK, Yoo G. Accuracy of the method for estimating breast volume on three-dimensional simulated magnetic resonance imaging scans in breast reconstruction. *Plast Reconstr Surg* 2014;133(1):14-20. (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24374666>).

Danksagung

Ganz besonderer Dank gilt Herrn Univ.- Prof. Dr. Riccardo Giunta für die Auswahl dieses spannenden Themas. Er hat mich über die Jahre unterstützend begleitet und stand mir auch bei meiner Doktorarbeit stets zur Seite. Mit dem erstmaligen Einsatz eines kostengünstigen und portablen 3D Scanners als objektives Messwerkzeug zur intraoperativen Echtzeit-Evaluation sammelten wir erste Erfahrungen für viele weitere Forschungsarbeiten. Er stand mir stets als Ratgeber und Mentor zur Seite.

Besonders möchte ich mich auch bei Dr. Konstantin Koban für die beispiellose wissenschaftliche Betreuung bedanken. Aufgrund seiner fachlichen Kompetenz im Bereich der 3DSI, sowie seines wissenschaftlichen Engagements wurde diese Arbeit erst möglich.

Besonderer Dank gilt weiters Herrn Prof. Dr. Thilo Schenck, welcher als einer der Hauptoperateure neben Prof. Giunta diese Arbeit durch seine klinische Tätigkeit und Expertise erst möglich gemacht hat.

Ebenfalls danken möchte ich meinen Kollegen Herr Etzel, Herr Li und Frau Titze für ihr Mitwirken an den Studien.

Ich danke insbesondere meiner lieben Ehefrau, meiner Tochter und meiner Familie und Freunden, welche mich im Studium, der Arbeit und der Forschung unterstützt haben und diese Arbeit zur Dissertation ermöglicht haben.