

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

**Anthropometrische 3D-Oberflächenbildgebung in der Ästhetischen
und Rekonstruktiven Gesichtschirurgie - Validierung und
Einsatzbewertung mobiler 3D-Scanner im Vergleich zu einem
etablierten statischen System**

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

vorgelegt von
Philipp Ferdinand Perko

aus
Klagenfurt

Jahr
2025

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatter: Prof. Dr. Riccardo Giunta

Mitberichterstatter: Prof. Dr. Dr. Eberhard Fischer-Brandies

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

Philipp Ferdinand Perko

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

Anthropometrische 3D-Oberflächenbildgebung in der Ästhetischen und Rekonstruktiven Gesichtschirurgie - Validierung und Einsatzbewertung mobiler 3D-Scanner im Vergleich zu einem etablierten statischen System

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, 18.05.2025

Philipp Ferdinand Perko



LUDWIG-
MAXIMILIANS-
UNIVERSITÄT
MÜNCHEN

Promotionsbüro
Medizinische Fakultät



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

Philipp Ferdinand Perko

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

Anthropometrische 3D-Oberflächenbildgebung in der Ästhetischen und Rekonstruktiven Gesichtschirurgie - Validierung und Einsatzbewertung mobiler 3D-Scanner im Vergleich zu einem etablierten statischen System

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

München, 18.05.2025

Philipp Ferdinand Perko

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.

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

Konstantin Christoph Koban *, **Philipp Perko** *, Lucas Etzel, Zhouxiao Li, Thilo Ludwig Schenk, Riccardo Enzo Giunta.

Validation of two handheld devices against a non-portable three-dimensional surface scanner and assessment of potential use for intraoperative facial imaging.

Journal: Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery (2020 Jan;73(1):141-148)

JCR 2020: Kategorie: SURGERY, Ranking: 90/211 (Q2); IF (2020) = 2,740

DOI: 10.1016/j.bjps.2019.07.008. PubMed PMID: 31519501.

* = Geteilte Erstautorenschaft

Konstantin Christoph Koban, **Philipp Perko**, Zhouxiao Li, Ya Xu, Riccardo Enzo Giunta, Michael Alfertshofer, Lukas Kohler, David L. Freytag, Sebastian Cotofana, Konstantin Frank.

3D Anthropometric Facial Imaging - A comparison of different 3D scanners.

Journal: Facial Plastic Surgery Clinics of North America (2022 May;30(2):149-158)

JCR 2021: Kategorie: SURGERY, Ranking: 148/213 (Q3); IF (2021) = 1,875

DOI: 10.1016/j.fsc.2022.01.003. PubMed PMID: 35501052.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	7
Abkürzungsverzeichnis	8
Publikationsliste	9
Eigenanteil der Arbeiten	10
1. Einleitung	11
1.1. Stellenwert objektiver Verfahren zur Gesichtsvermessung	11
1.2. Aktuelle Studienlage	13
1.3. Zielsetzung der kumulativen Dissertation	14
1.4. Studienaufbau	15
2. Inhalte der Promotionsarbeit	21
2.1. Studie I	21
2.2. Studie II	26
3. Zusammenfassung	29
4. Summary	33
5. Publikationen	37
5.1. Veröffentlichung Nr. 1	37
5.2. Veröffentlichung Nr. 2	46
Literaturverzeichnis	57
Danksagung	62

Abkürzungsverzeichnis

2D = Zwei-dimensional

3D = Drei-dimensional

3DSI = Three-dimensional Surface Imaging

CT = Computertomographie

FPS = Frames per second

LMU = Ludwig-Maximilians-Universität München

MRT = Magnetresonanztomographie oder Kernspintomographie

RMSE = Root Mean Square Error

Publikationsliste

Veröffentlichungen in begutachteten Fachmagazinen:

- Konstantin Christoph Koban *, **Philipp Perko** *, Lucas Etzel, Zhouxiao Li, Thilo Ludwig Schenk, Riccardo Enzo Giunta. Validation of two handheld devices against a non-portable three-dimensional surface scanner and assessment of potential use for intraoperative facial imaging. Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery (2020 Jan;73(1):141-148). doi: 10.1016/j.bjps.2019.07.008. PubMed PMID: 31519501.
- Konstantin Christoph Koban, **Philipp Perko**, Zhouxiao Li, Ya Xu, Riccardo Enzo Giunta, Michael Alfertshofer, Lukas Kohler, David L. Freytag, Sebastian Cotozana, Konstantin Frank. 3D Anthropometric Facial Imaging - A comparison of different 3D scanners. Facial Plastic Surgery Clinics of North America (2022 May;30(2):149-158). doi: 10.1016/j.fsc.2022.01.003. PubMed PMID: PMID: 35501052.

Eigenanteil der Arbeiten

Der Doktorand Philipp Ferdinand Perko leistete für die wissenschaftliche Arbeit „Validation of two handheld devices against a non-portable three dimensional surface scanner and assessment of potential use for intraoperative facial imaging“ als geteilter Erstautor sowie in der Studie „3D Anthropometric Facial Imaging - A comparison of different 3D scanners“ als Ko-Autor einen wesentlichen Bestandteil zum Erlangen der Publikationen. Zu seinen Aufgaben zählte in beiden Studien zunächst die Literaturrecherche sowie die Akquisition und die Vorbereitung der Probanden. Als einer von insgesamt zwei Untersuchern, führte er die Aufnahmen mit den 3D-Bildgebungssystemen *Vectra XT*, *Sense* und *Artec Eva* durch und nahm die computerunterstützte Umwandlung in 3D-Modelle vor. Des Weiteren wertete er die Messergebnisse der einzelnen Scanner aus und stellte die Resultate in einen direkten Vergleich zueinander. In Zusammenarbeit mit Herrn Dr. Koban, als geteilter Erstautor der ersten Studie, erfolgte die kritische Evaluierung und die Erstellung des Manuskripts. Aufgrund der zu gleichen Anteilen eingebrachten Arbeitsleistung, zeigte sich in der ersten Publikation eine geteilte Erstautorenschaft indiziert. Die Anmerkungen der weiteren Ko-Autoren wurden in die Erstellung der Manuskripte eingearbeitet.

1. Einleitung

1.1. Stellenwert objektiver Verfahren zur Gesichtsvermessung

In der sozialen Wahrnehmung nimmt das Gesicht eine herausragende Position ein. Individuelle Merkmale wie der Augenabstand, die Stirnhöhe sowie die Form der Nase, des Kinns und des Mundes tragen maßgeblich dazu bei, ob ein Gesicht als harmonisch oder disharmonisch wahrgenommen wird. Selbst minimale Korrekturen an zahlreichen Variablen, wie beispielsweise dem Abstand der Augen zur Nase, können das optische Erscheinungsbild signifikant verändern.¹ Im Gegensatz zur Brustchirurgie, wo geringfügige Abweichungen von wenigen Millimetern klinisch akzeptabel sein können, können in der plastischen Gesichtschirurgie sowie in der minimalinvasiven Gesichtsbehandlung wenige Millimeter entscheidend sein, ob ein Gesicht als symmetrisch und damit als attraktiv wahrgenommen wird.¹

Neben der akkuraten Durchführung chirurgischer Eingriffe in diesem Bereich ist eine präzise Planung im Vorfeld unabdingbar. Hierbei kommt der dreidimensionalen (3D) Erfassung und Vermessung des Gesichts eine entscheidende Rolle zu. Mithilfe digitaler 3D-Oberflächenaufnahmen lassen sich objektive Informationen zur Beurteilung von Oberflächen- und Volumenveränderungen gewinnen.²⁻⁴ Dies hat sich insbesondere in prä- und postoperativen Untersuchungen als unerlässlich erwiesen.⁵⁻⁸ Die digitale Erfassung und Speicherung von Abständen, Krümmungen, Volumen, Winkeln und Oberflächenbereichen sind hierbei möglich. Somit können auch in Abwesenheit des Patienten präzise digitale Berechnungen durch die wiederholt aufrufbaren 3D Modelle durchgeführt werden. Die Zuverlässigkeit dieser Methode bei der Beurteilung wichtiger Parameter in der Brust- und Gesichtschirurgie, wie Form, Kontur und Symmetrie, wird in der Fachliteratur wiederholt beschrieben.^{3,9,10} Die technologische Innovation liegt zusätzlich darin, dass durch den Einsatz bildgebender 3D-Scansysteme komplexe medizinische Zusammenhänge dem Patienten visuell verständlich gemacht werden können. Dies ermöglicht zudem die Veranschaulichung der optischen Veränderungen, die durch einen chirurgischen Eingriff hervorgerufen werden. Die dreidimensionale Darstellung der

Gesichtsoberfläche erlaubt dem Patienten, jede gewünschte Ansicht seines Gesichts zu betrachten. In der Gesichtschirurgie und bei minimalinvasiven Behandlungen bieten die 3D-Oberflächenaufnahmen jedoch nicht nur die Möglichkeit, das zu erwartende Behandlungsergebnis vorab zu simulieren und visualisieren, sondern eröffnet auch dem behandelnden Arzt die Option, gemeinsam mit dem Patienten das angestrebte Ergebnis im Einklang mit den Patienten zu planen. Die 3D-Oberflächenbildgebung fungiert somit als wertvolles Instrument in der Plastischen und Rekonstruktiven Chirurgie sowohl bei der Umsetzung der angestrebten Ergebnisse als auch zur detaillierten Verlaufsdokumentation.¹¹

Seit den 1980er-Jahren finden 3D-Oberflächenaufnahmen Anwendung in der Plastischen Chirurgie.⁹ Ihr Einsatz spielt eine entscheidende Rolle in der prä- und postoperativen Beurteilung von volumen- und formveränderten chirurgischen sowie minimalinvasiven Maßnahmen.^{1-2,5} Die Verwendung von 3D-Oberflächenmessgeräten ist dabei von zentraler Bedeutung, da sie eine kontaktlose, nicht invasive und strahlungsfreie dreidimensionale Erfassung der Gesichts- und Brustmorphologie ermöglichen. Im Vergleich zu herkömmlichen Messtechniken wie CT, MRT und Ultraschall hat die 3DSI-Technologie in den letzten Jahrzehnten zunehmend an Bedeutung gewonnen.^{9,13} Die Aufnahmen mittels 3D-Scanner können im Stehen oder Sitzen erfolgen, in natürlicher Körperhaltung und ohne oberflächen- oder volumenverändernden Druck, wie er beispielsweise bei der Verwendung von Sonografie Sonden auftritt.¹⁴⁻¹⁶ In der Plastischen und Rekonstruktiven Chirurgie kommt die 3D-Oberflächenbildgebung hauptsächlich bei der Planung komplexer Eingriffe und der postoperativen Verlaufskontrolle zum Einsatz.^{13,17} Diverse Studien haben bereits die Zuverlässigkeit dieses Verfahrens für die Beurteilung von Volumen- und Formveränderungen untersucht.^{3,9,10,18,19} Besonders im Vergleich von Aufnahmen und der damit verbundenen objektiven Dokumentation von Veränderungen von Volumina und Form stellt diese Methode eine innovative und zunehmend vielseitige Technik dar.^{3,20,21}

In jüngster Zeit zeichnet sich ein Trend hin zu leichten, tragbaren und mobilen Geräten ab, die standortungebunden eingesetzt werden können.^{9,11,12,22,23}

Diese Entwicklung ermöglicht den Einsatz solcher Geräte sowohl im prä-, intra- als auch postoperativen Bereich.¹¹

1.2. Aktuelle Studienlage

Die Anwendung der 3D-Oberflächenaufnahmen ermöglicht die umfassende Erfassung und Digitalisierung der menschlichen Morphologie in ihrer anatomischen Komplexität. Dies eröffnet neue Perspektiven, insbesondere in der Gesichtschirurgie.

Durch die 3D-Oberflächenmessung können digitale Abstände, Winkel und Proportionen im Gesichtsbereich zuverlässig vermessen werden.^{24–26} Diese Methode hat sich als unerlässlich bei prä- und postoperativen Untersuchungen erwiesen^{5–8} und stellt insbesondere bei der Planung und Bewertung komplexer operativer Eingriffe, die mit einer Veränderung der Körperform einhergehen (zum Beispiel Tumorentfernung mit Defektdeckung oder Nasenkorrekturen), eine innovative Untersuchungsmethode dar. Die gewonnenen Daten ermöglichen nicht nur die Bestimmung der erforderlichen Dimensionen und Volumina zur Erreichung eines symmetrischen Ergebnisses, sondern erlauben auch die Simulation des Ergebnisses selbst. Die 3D-Oberflächenvermessung findet auch Anwendung in der Bewertung von Hauterkrankungen. Durch den Vergleich des digitalen Bildmaterials aus Verlaufskontrollen können messbare Veränderungen, wie beispielsweise Form und Farbe, von dermatologischen Auffälligkeiten umfassend dokumentiert werden.

Die meisten der für den Medizinbereich entwickelten 3D-Oberflächscanner sind statische und fest verbaute Kameras oder Scanner. Die erbrachten Messleistungen rechtfertigen die hohen Anschaffungskosten und benötigte Expertise im Umgang mit den Geräten häufig nicht.²⁷ Der Nachteil an diesen Geräten ist aber vor allem, dass sie nicht flexibel verwendet werden können und deshalb für den Einsatz im Operationssaal bzw. an wechselnden Örtlichkeiten ungeeignet sind. Demgegenüber stehen handgeführte 3D Scanner, die nicht nur

preisgünstiger in der Anschaffung, sondern aufgrund ihrer manuellen Führung auch praktischer in der Anwendung sind.^{9,14,28}

Untersuchungen haben darauf hingedeutet, dass mobile Geräte das Potenzial haben, die Rolle der etablierten fest verbauten 3D-Kameras zu übernehmen.²⁹ In diesem Kontext stellt sich die Frage, in welchen Anwendungsbereichen manuelle Scanner die statischen Systeme ablösen können und in welchen Bereichen ein simultaner Einsatz beider Bildgebungssysteme den klinischen Alltag bereichern könnte. Eine kürzlich publizierte Studie³⁰, die sich mit der erweiterten Bildgebung des Gesichts beschäftigt, lieferte darüber hinaus Anreize, die Einsatzmöglichkeiten von 3D-Scannern während laufender Operationen zu erforschen.

1.3. Zielsetzung der kumulativen Dissertation

Die vorliegende kumulative Dissertation befasst sich mit dem Einsatz- und den Anwendungsmöglichkeiten von 3D-Oberflächenmessgeräten im Gesichtsbereich.

Zur Bewertung wurden drei 3D-Aufnahmesysteme aus verschiedenen Preissegmenten ausgewählt und miteinander verglichen. Durch diesen Vergleich sollte untersucht werden, ob die kostengünstigeren, mobilen 3D-Scanner Sense 3D (Preis: ca. € 400) und Artec Eva (Preis: ca. € 14.000) die Messgenauigkeit und Bildqualität des Referenzgeräts, des etablierten, statischen Medizinprodukts Vectra XT (Preis: ca. € 37.000), erreichen können. Dadurch sollte ermittelt werden, ob sie als potenzielle Alternative oder Ergänzung in der präoperativen Planung und Beratung dienen können. Darüber hinaus wurde die Anwendung der beiden mobilen Geräte im intraoperativen Bereich anhand eines Beispiels einer Rhinoplastik getestet.

In der Publikation *“Validation of two handheld devices against a non-portable three-dimensional surface scanner and assessment of potential use for intraoperative facial imaging”*, veröffentlicht im *„Journal of Plastic, Reconstructive and Aesthetic Surgery“* (2020), wurde der Einsatz von zwei tragbaren, mobilen 3D-Oberflächenscannern im Vergleich zu einem etablierten, nichttragbaren

medizinischen 3D-Bildgebungssystem untersucht. Ziel war es, die drei Geräte in Hinblick auf die Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit im Bereich der Oberflächenmessung im Gesicht sowie ihrer Benutzerfreundlichkeit zu bewerten. Darüber hinaus galt es zu untersuchen, inwieweit die mobilen Geräte im intraoperativen Einsatz in der Gesichtschirurgie eingesetzt werden können.¹¹

Die Arbeit „*3D Anthropometric Facial Imaging - A comparison of different 3D scanners*“, veröffentlicht im Journal „*Facial Plastic Surgery Clinics of North America* (2022)“, analysierte die Genauigkeit und Zuverlässigkeit standardmäßiger anthropometrischer 3D-Messungen im Gesicht. Anhand eines kostengünstigen, handgeführten 3D-Scanners und eines mobilen 3D-Scanners, wie er in der Industrie eingesetzt wird, wurden Abstände und festgelegte Strecken im Gesicht hinsichtlich Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit mit einem stationären 3D-Scanner aus dem Medizinbereich verglichen.¹

1.4. Studienaufbau

Für die Studien wurden die 3D-Aufnahmesysteme Vectra XT, Sense und Artec Eva herangezogen.

Vectra XT 3D Imaging System

Das Vectra XT 3D Imaging System (Canfield Scientific Inc., Parsippany, NJ, USA) ist ein speziell für den medizinischen Bereich entwickeltes 3D-Oberflächenabbildungssystem. Dieses System ermöglicht 3D-Aufnahmen von Gesicht, Brust und Körper.³¹ Die 3D-Oberflächenbildmessung des Vectra XT basiert auf der Stereophotogrammetrie, einem Verfahren, bei dem mehrere digitale Fotoaufnahmen aus verschiedenen Winkeln zu einem präzisen 3D-Oberflächenmodell kombiniert werden.^{8,32,33} Dieses Modell erlaubt die genaue Messung und visuelle Darstellung von Volumenunterschieden und Unregelmäßigkeiten. Der Aufbau des Systems umfasst einen fest installierten Bodenständer mit drei höhenverstellbaren Einheiten, auf denen sich jeweils zwei

hochauflösende Digitalkameras befinden. Diese Kameras können innerhalb von 3,5 ms Fotos erstellen. Die aufgenommenen Bilder können in einer dedizierten Patientendatenbank gespeichert werden. Zusätzlich sind ein speziell auf das System abgestimmter Computer sowie die 3D-Software "Mirror" des Herstellers im Lieferumfang enthalten.³¹ Die Anschaffungskosten belaufen sich auf etwa € 37.000. Das Vectra XT 3D-Bildgebungssystem war in den letzten Jahren Gegenstand verschiedener klinischer Studien zur Bewertung von 3D-Oberflächenaufnahmegeräten^{16,22,29,34} und diente in den vorliegenden Studien als Referenzgerät.^{35–38}

Sense und Artec Eva 3D-Scanner

Im Vergleich zum statischen Medizinprodukt Vectra XT wurden die mobilen, handelsüblichen 3D-Oberflächenscanner Sense und Artec Eva hinsichtlich ihrer Genauigkeit, Reproduzierbarkeit, Benutzerfreundlichkeit und ihrer Eignung für den intraoperativen Einsatz in der Gesichtschirurgie bewertet.

Der Sense 3D-Scanner von 3D Systems (Rock Hill, SC, USA) ist ein tragbares, handgeführtes Oberflächenaufnahmegerät mit einem Infrarottiefensensor und einem Videoaufnahmesystem.¹² Das Gerät ist kompakt, leicht zu transportieren und erfordert eine manuelle Führung um das zu scannende Objekt. Die erfassten Daten werden über USB an einen Laptop übertragen und die Sense-Software berechnet die verschiedenen Tiefen des Objekts, um ein strukturiertes 3D-Oberflächenbild zu erstellen. Der Sense-Oberflächenscanner kostet circa € 400 und wurde in Verbindung mit einem ähnlich teuren Laptop verwendet.

Der 3D-Scanner Artec Eva von Artec 3D (Luxemburg) ist ebenfalls ein handgeführtes Gerät, das die Oberfläche des Objekts mithilfe der Strukturlicht-Technologie mit einer Geschwindigkeit von 16 FPS erfasst.³⁹ Die Fotos werden über ein USB-Kabel an ein Laptop gesendet, wo mit Hilfe der Artec Studio-Software aus den einzelnen Aufnahmen ein 3D-Modell rekonstruiert wird. Der 3D-Scanner, der in den letzten zehn Jahren vor allem in der Industrie eingesetzt wurde, konnte sich auch in der plastischen und rekonstruktiven Gesichtschirurgie

gut etablieren.^{28,40,41} Der Anschaffungswert des Scanners inklusive Software liegt bei rund € 15.000.

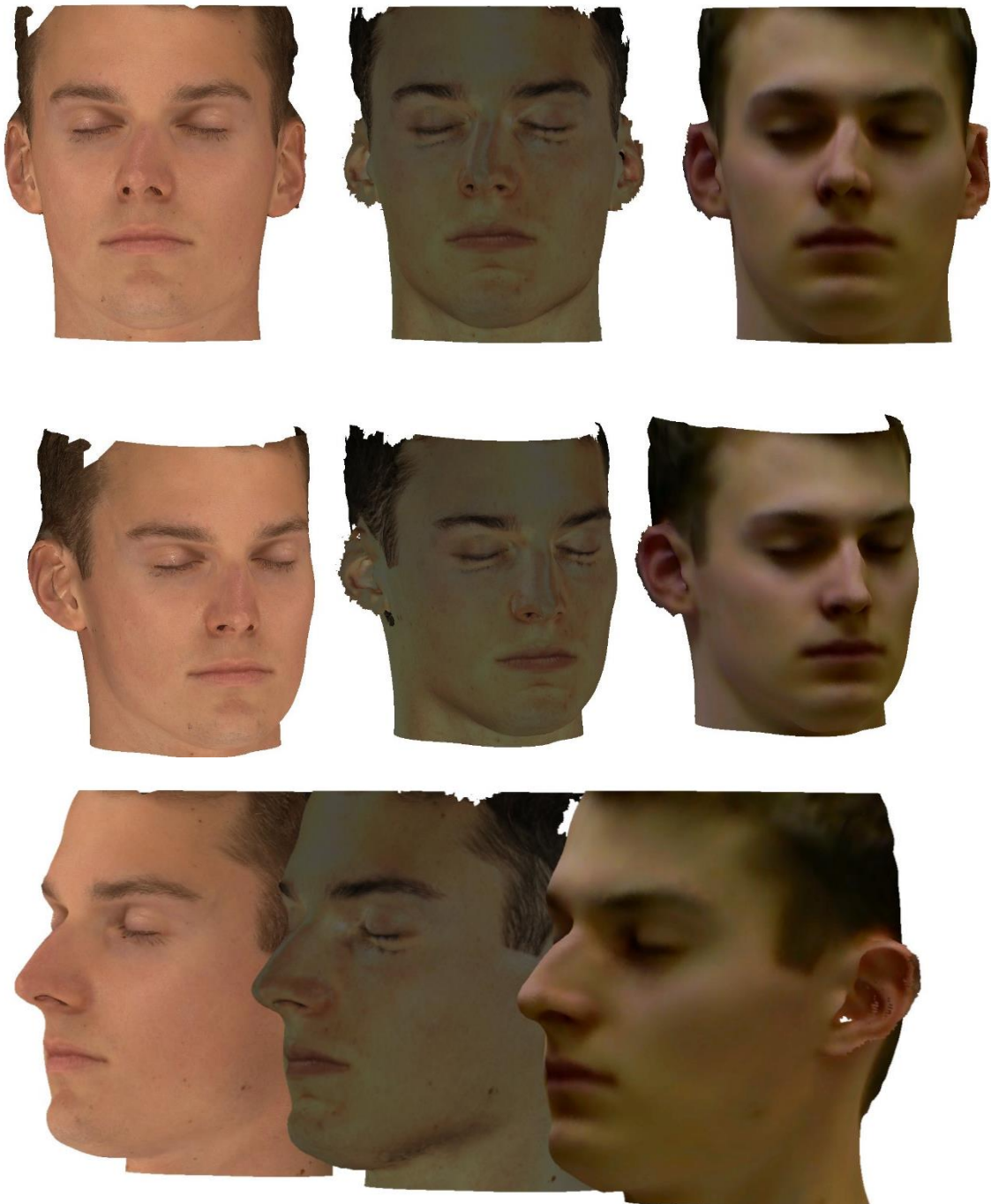


Abbildung 1: Texturierte 3D-Oberflächendarstellung eines exemplarischen Gesichtes von links nach rechts mittels Vectra XT, Artec Eva und Sense 3D.

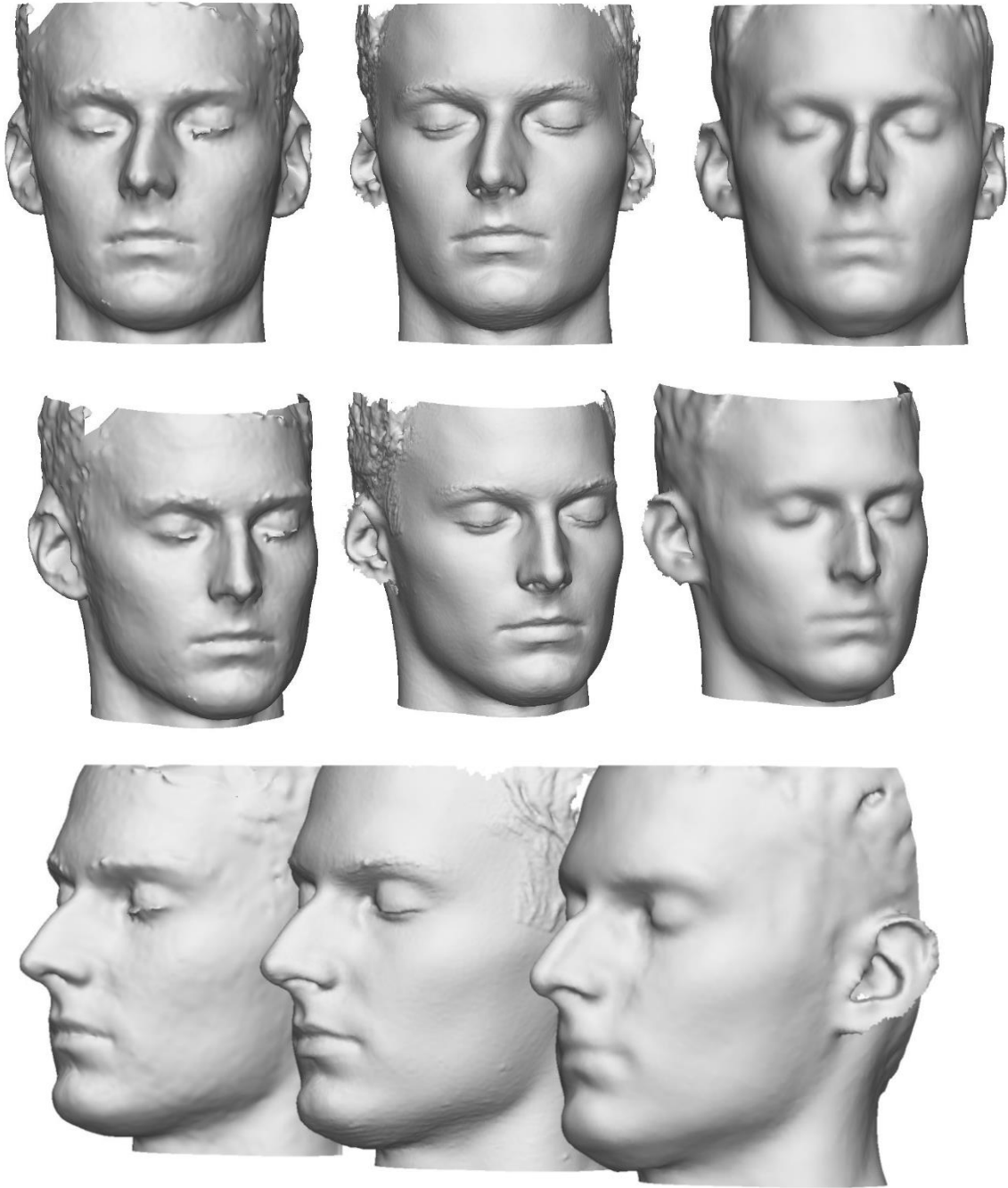


Abbildung 2: Isolierte, nicht-texturierte 3D-Oberflächendarstellung eines exemplarischen Gesichtes von links nach rechts mittels Vectra XT, Artec Eva und Sense 3D.

Studiendurchführung

Für die klinische Studie wurden 30 gesunde Probanden (15 Männer, 15 Frauen) im Durchschnittsalter von 32 ± 9 Jahren mit einem Body-Mass-Index von $26,1 \pm 5$ kg/m² untersucht. Zusätzlich wurde für Studie I an 10 weiteren Patienten (8 weiblich, 2 männlich), bei denen eine Rhinoplastik geplant war, die intraoperative Messung in Rückenlage durchgeführt. Das durchschnittliche Alter betrug hier 41 ± 11 Jahre, der Body-Mass-Index lag bei $21,8 \pm 2$ kg/m².

Ausgeschlossen waren in beiden Studien Probanden, die bereits Operationen im Gesicht hatten oder an einer Fehlbildung im Bereich des Gesichts litten. Nicht teilnehmen durften auch Personen, bei denen eine Epilepsie diagnostiziert bzw. eine Krankheit festgestellt worden war, wo die Untersuchung einen Krampfanfall hätte auslösen können.

In den Studien wurden die Messungen mit dem Artec Eva, Sense und Vectra XT nacheinander durchgeführt. Pro Probanden fanden mit jedem Gerät je drei Messungen hintereinander statt. Nach sieben Tagen wurden die Messungen wiederholt. Die Vorgehensweise wurde von einem zweiten Untersucher unabhängig angewendet.

Um Messfehler auszuschließen, wurden die Probanden angewiesen, jeglichen Schmuck abzulegen und die Haare aus dem Gesicht zu entfernen. Männliche Versuchsteilnehmer wurden gebeten, sich zu rasieren.

Die Messungen wurden in einer aufrechten Sitzposition und bei gleichbleibenden Lichtverhältnissen durchgeführt. Die Probanden wurden angeleitet, die Augen und den Mund geschlossen zu halten, wobei darauf geachtet wurde, dass die Zähne nicht zusammengebissen wurden und der Gesichtsausdruck insgesamt neutral und entspannt blieb. Um die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der einzelnen Scanner unter standardisierten Bedingungen zu bewerten und mögliche Messfehler durch unwillkürliche Gesichtsbewegungen oder physiologische Unterschiede auszuschließen, wurde der Kopf einer Schaufensterpuppe als Referenzmodell für die Messungen verwendet.

Für die Untersuchungen im intraoperativen Bereich wurden die Patienten im Vorfeld mit dem statischen und im Anschluss – im intubierten Zustand – jeweils mit beiden mobilen Bildgebungsgeräten aufgenommen. Dabei wurde ein Abstand von etwa 80 cm zum Gesicht gewählt und die intubierten Patienten befanden sich in Rückenlage. Der Kopf war in einer Kopfschale gelagert und der Messvorgang wurde von einem geschulten Chirurgen durchgeführt, ohne den operativen Eingriff zu beeinträchtigen.

2. Inhalte der Promotionsarbeit

2.1. Studie I

In der Studie "*Validation of two handheld devices against a non-portable three-dimensional surface scanner and assessment of potential use for intraoperative facial imaging*" wurden zwei handelsübliche mobile 3D-Scannergeräte und ein fest installiertes 3D-Bildgebungssystem aus dem Medizinbereich miteinander verglichen.

Die untersuchten Geräte waren die handgeführten Oberflächenscanner Artec Eva und Sense 3D sowie das statische Modell Vectra XT. Der Fokus der Untersuchung lag auf dem Vergleich der drei Geräte hinsichtlich Genauigkeit, Reproduzierbarkeit und Benutzerfreundlichkeit im Bereich der Oberflächenmessung im Gesicht. Zusätzlich sollten die Einsatzmöglichkeiten der mobilen Geräte im intraoperativen Bereich der Gesichtschirurgie bewertet werden.

Die Probandengruppe umfasste 40 Personen, darunter 10 intraoperative Patienten mit geplanter Rhinoplastik, sowie den Kopf einer Schaufensterpuppe als Referenzmodell. Für jedes Bildgebungsgerät wurden jeweils drei Scans pro Probanden durchgeführt. Die Messungen wurden von zwei unabhängigen Untersuchern durchgeführt und nach sieben Tagen wiederholt, außer bei den intraoperativen Messungen, wo nur ein Scan pro mobilem Gerät erfolgte.

Für die Untersuchung wurde das Gesicht in die ästhetischen Regionen nach Gonzales-Ulloa⁴² (Stirnregion - zentrale und laterale Untereinheit, Periorbitalregion, Nasenregion, Wangenregion - mediale und laterale Untereinheit, Perioralregion) eingeteilt. Dabei wurde die Varianz der Messungen für jede Region einzeln berechnet und mit Hilfe des Root-Mean-Square Errors (RMSE) angegeben. Dieser wurde mit der Mirror Software (Canfield Scientific Inc., Parsippany, NJ, USA) ermittelt. Ein RMSE unter 1,0 mm wurde dabei als akzeptabel bzw. ein Wert unter 0,5 mm als vorteilhaft angesehen.

Vectra XT diente als Referenzmodell für die beiden kostengünstigeren mobilen Geräte Artec Eva und Sense 3D. Um die 3D-Modelle der Scanner vergleichen zu

können, wurden die aufgenommenen Bilder in der Software automatisiert übereinander gelagert und die Oberflächenabweichung berechnet und farblich visualisiert.

Die Daten wurden mit SPSS 21 (IBM, Armonk, NY, USA) analysiert. Der Messwertvergleich zwischen den mobilen Scannern Artec Eva und Sense 3D mit dem Referenzmodell Vectra XT erfolgte über einen gepaarten t-Test und Mann-Whitney-U-Test. Die Ergebnisse wurden mittels Intraklassen-Korrelationskoeffizient bezüglich Genauigkeit und Wiederholbarkeit überprüft. In der Bewertung wurde eine Wahrscheinlichkeit von $\leq 0,05$ als statistisch signifikant eingestuft.

Der Vergleich der einzelnen Scans für die gesamte Gesichtsregion der Schaufensterpuppe zeigte keine signifikanten Unterschiede zwischen Vectra XT und Artec Eva. Allerdings wiesen die Scans von Sense 3D deutlich abweichende Werte auf, wobei die Abweichungen bei beiden Handscannern immer noch unter 1 mm RMSE für die gesamte Gesichtsoberfläche und jede einzelne Region lagen. Die Messergebnisse der aufeinanderfolgenden Scans und der Wiederholung nach einer Woche stimmten beim Puppenkopf bei allen Scannern überein.

Bei den Probanden zeigte die Auswertung erhebliche Unterschiede zwischen Vectra XT und den mobilen Handscannern Artec Eva und Sense 3D. Dennoch blieben diese unter der Abweichung von 1 mm RMSE für jede ästhetische Region und das gesamte Gesicht. Artec Eva erreichte mittlere Abweichungen unter 0,5 mm RMSE für das gesamte Gesicht, mit Ausnahme der Augenregion. Ähnliche Ergebnisse erzielte Sense 3D nur im Bereich der zentralen und seitlichen Stirn sowie der medialen Wangenregion. Insbesondere die Nasenregion und der seitliche Wangenbereich wiesen erhebliche Abweichungen vom Vectra XT System auf.

Im Vergleich der Ergebnisse des Puppenkopfs mit denen der Probanden wurden die größten Messunterschiede im Bereich der Augen, gefolgt von der seitlichen Stirn, den seitlichen Wangen sowie der Mundregion, deutlich. Diese Unterschiede lassen sich auf die komplexere Geometrie des menschlichen Gesichts oder unwillkürliche Bewegungen der Probanden zurückführen.

Die Bewertung der Messergebnisse durch zwei Untersucher ergab eine starke Korrelation zwischen den Scannern Vectra XT und Artec Eva sowie eine mäßige Korrelation für Sense 3D. In Bezug auf die Wiederholbarkeit zeigten alle drei Scanner erhebliche Abweichungen, wobei Artec Eva die geringsten aufwies ($0,244 \pm 0,081$ mm RMSE).

Ein Vergleich der Messwerte der Probanden mit jenen des Schaufensterpuppenkopfs hat gezeigt, dass die Messwerte innerhalb der Probandengruppe erheblich höhere Abweichungen und eine geringere Reproduzierbarkeit aufwiesen als jene, die mit dem Schaufensterpuppenkopf gewonnen werden konnten. Daraus ergibt sich der Rückschluss, dass die Genauigkeit der Geräte überschätzt wird, wenn sie nur unter standardisierten Laborbedingungen getestet werden.

Die Studie im intraoperativen Bereich bezog sich nur auf Patienten, die eine Rhinoplastik vornehmen ließen. Durch die Eingrenzung der Untersuchung auf die Nasenregion sollten mögliche lagebedingte Messfehler ausgeschlossen werden, die durch die Schwerkraft im Liegen zu Verzerrungen in der Bildgebung hätten führen können.

Die intraoperativen Bildgebungen der Handscanner in Rückenlage wiesen im Vergleich mit präoperativen Aufnahmen im Stand von Vectra XT eine Abweichung von $0,438 \pm 0,096$ mm RMSE für Artec Eva und $0,972 \pm 0,265$ mm RMSE für Sense 3D auf. Deutlich zu erkennen war, dass sich die Messergebnisse des Sense 3D signifikant von den präoperativen Ergebnissen des Vectra XT unterschieden, was einen intraoperativen Einsatz ausschließt. Artec Eva hingegen erzielte zufriedenstellende Ergebnisse und kann somit zukünftig im operativen Bereich Verwendung finden. Dazu sind jedoch weitere Studien notwendig, die das 3D-Scanverfahren auch mit bereits etablierten Verfahren der Nasenkorrektur vergleichen.

In der subjektiven Gerätebeurteilung zeigt sich der 3D-Aufnahmeprozess bei Vectra XT schnell, selbsterklärend und benutzerfreundlich. Die Bildspeicherung erfolgt in zufriedenstellender Qualität in einer integrierten Patientendatenbank. Vergleichbare Ergebnisse waren mit Artec Eva zu erzielen. Nachteilig wurde

jedoch bewertet, dass die Artec-Studio-Software keine integrierte Patientendatenbank und keine Beurteilungs- und Bewertungswerkzeuge, wie sie in der Canfield-Mirror-Software vom Vectra XT vorhanden sind, aufweist.

Die sequenzielle Blinkfunktion der Lichtquelle bei Artec Eva könnte als irritierend empfunden werden, aber sie dient dem Zweck, eine externe Lichtquelle zu ersetzen und einen Einsatz auch in schlecht beleuchteten Umgebungen zu ermöglichen. Dies ist besonders wichtig für den Einsatz in der Gesichtschirurgie, wo optimale Beleuchtung nicht immer gewährleistet ist.

In Bezug auf die Handhabung und den Bedienungskomfort wurde der Sense 3D-Scanner mit dem Artec Eva-Scanner verglichen. Der Sense 3D-Scanner ist leichter und die Software wird als anwenderfreundlich bewertet. Durch die Verwendung von Infrarotlicht benötigt er keine zusätzliche Lichtquelle und ermöglicht die Anwendung auch in schlecht beleuchteten Räumen. Allerdings wurde die Farbqualität der Bilder als unbefriedigend bezeichnet.

Unsere Ergebnisse haben gezeigt, dass die Verwendung von Artec Eva im prä-, intra- und postoperativen Bereich geeignet ist. Mit Sense 3D können zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden, die Aufnahmen weisen jedoch bei der Darstellung komplexerer Oberflächen sowie von Randbereichen des Gesichts bzw. der Nase erhebliche Schwächen auf. Die mangelnde Farbqualität schließt die Verwendung in der Patientenberatung ebenfalls aus.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Artec Eva hinsichtlich Oberflächengenauigkeit und Zuverlässigkeit der Messungen sehr gute Ergebnisse liefert und das Gerät eigenständig und standortunabhängig, sowohl im prä-, intra- als auch postoperativen Bereich bzw. im prä- und postoperativen Bereich in Verbindung mit dem statischen Vectra XT, eingesetzt werden kann. Die Studie hat gezeigt, dass der intraoperative Einsatz beider mobiler Scanner praktikabel ist. Ein Vergleich von prä- und postoperativen Bildern ist aufgrund von Schwerkraft bedingter Lageänderungen nur eingeschränkt aussagekräftig. Valide Messungen lassen sich nur im Bereich der Nase erzielen, da in diesem Bereich Schwerkraft bedingte Verzerrungen am ehesten ausgeschlossen werden können.

Im Bereich der Bildqualität, Farbgebung und Benutzerfreundlichkeit überzeugte Vectra XT mit den besten Resultaten. Die Erfassung der Aufnahmen in einer eigenen Patientendatenbank stellt einen klaren Vorteil dar. Allerdings wird als Nachteil bewertet, dass das statische Gerät nicht im Operationssaal eingesetzt werden kann und die Anschaffungskosten sehr hoch sind.

Im direkten Vergleich zwischen Artec Eva und Vectra XT wird die Leistung als gleichwertig angesehen. Neben der Zweckdienlichkeit des handgeführten Geräts sowohl im prä- und post- als auch intraoperativen Bereich stellen die Anschaffungskosten, die sich im mittleren Preissegment bewegen, einen weiteren Vorteil dar. Ein Nachteil könnte darin bestehen, dass die bei den Aufnahmen ausgesandten Lichtimpulse vom Patienten als störend empfunden werden können.

Die Ergebnisse des preisgünstigsten Geräts, Sense 3D, werden insgesamt als zufriedenstellend bewertet. Bei der vergleichenden Auswertung der Messresultate mit Vectra XT wurden jedoch in einzelnen Gesichtsregionen große Messabweichungen festgestellt. Ein Mangel besteht auch in der schlechten Farbqualität der Aufnahmen.

Es ist wichtig zu beachten, dass die Wahl des geeigneten Geräts stark von den Anforderungen und dem Anwendungsbereich abhängt. Vectra XT, obwohl teurer, bietet exzellente Bildqualität und Datenbankfunktionalität, während Artec Eva als handgeführtes Gerät eine gute Leistung zu einem mittleren Preisniveau bietet. Sense 3D, obwohl das preisgünstigste, weist einige Einschränkungen in der Genauigkeit und Farbqualität auf. Daher könnte die Auswahl des geeigneten Scanners von den spezifischen Anforderungen und Budgetbeschränkungen in der Gesichtschirurgie abhängen.

2.2. Studie II

In der Studie „*3D Anthropometric Facial Imaging - A comparison of different 3D scanners*“ bedienten wir uns der in Studie I bereits beschriebenen 3D-Oberflächenbildgebungssysteme: Vectra XT, Artec Eva und Sense 3D. Ziel der Untersuchung war es, die beiden mobilen Geräte Artec Eva und Sense 3D anhand von standardmäßigen anthropometrischen 3D-Messungen des Gesichts in Bezug auf ihre Messgenauigkeit und Zuverlässigkeit von Strecken und Abständen zu bewerten.

Die Probandengruppe setzte sich aus 30 Personen (15 Männer, 15 Frauen) zusammen. Alle Probanden wurde auf Ausschlusskriterien (Operationen, Traumata oder Krankheiten), die die Anatomie des Gesichts verändern können, untersucht. Mit Hilfe der Anwendungssoftware Mirror (Canfield Scientific Inc., Parsippany, NJ, USA), wie sie auch in Studie I verwendet worden war, wurden insgesamt 17 anatomische Landmarken im Gesicht bestimmt. Aus den digitalen Landmarken erfolgten insgesamt 19 Streckenmessungen sowie 37 weitere Messvariablen, welche automatisiert abgeleitet wurden. Hierunter wurden klassische anthropometrische Verhältnisse wie das Höhenverhältnis zwischen Obergesicht bzw. Untergesicht und Gesicht sowie das Verhältnis von Unterkiefer und Obergesicht bestimmt. Die Messpaare wurden allgemein als Gesichtsparemetern sowie in weitere nasale und periorale Regionen untergliedert. Die Messungen wurden von zwei Untersuchern in zwei getrennten Sitzungen vorgenommen.

Analysiert wurden die Daten mit SPSS 27 (IBM, Armonk, NY, USA). Die Verteilung wurde über den Levene-Test ausgewertet, der Datenvergleich zwischen den mobilen Scannern Artec Eva und Sense 3D mit dem Referenzmodell Vectra XT erfolgte über einen gepaarten t-Test. In der Bewertung wurde eine Wahrscheinlichkeit von $\leq 0,05$ als statistisch signifikant eingestuft.

Die Abstandsmessungen zwischen den gesetzten Landmarken ergaben eine mittlere Abweichung von $0,13 \pm 2,71$ mm (Bereich: -10,26 bis 13,9 mm) für Artec Eva und $-0,19 \pm 3,8$ mm (Bereich: -14,09 bis 18,9 mm) für Sense 3D im Vergleich zum Referenzmodell Vectra XT. Basierend auf den absoluten Messdifferenzen

zwischen dem Referenzsystem und den mobilen 3D Scannern zeigten sich im Bereich der allgemeinen Gesichtsregion sowie der nasalen und perioralen Indizes für wenige Messwerte statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Aufnahmesystemen.

Weinberg et al. verglichen in einer ähnlichen Studie 3D-Abstandsmessungen an Schaufensterpuppen.⁴³ Dabei konnten sie feststellen, dass die mittleren Abweichungen der linearen Abstände zu einem Großteil kleiner als 1,0 mm betrugen. Unsere an Probanden durchgeführte Studie konnte diese Feststellung nicht bestätigen. Einige Messungen wiesen größere Unterschiede als 1 mm auf. Das lässt sich auf eine komplexere Geometrie des menschlichen Gesichts oder unwillkürliche Bewegungen der Probanden zurückführen. Auch de Menezes et al. konnten bei wiederholten Messungen des Gesichtsbereichs mit dem stationären Scanner Vectra XT abweichende Messergebnisse zwischen 0,13 mm und 1,19 mm feststellen.³⁶ Die praxisbezogene Anwendung zeigt, dass präzise Messungen in der plastischen, ästhetischen und rekonstruktiven Gesichtschirurgie essentiell sind, um Symmetrieveränderungen objektiv zu beurteilen und Disproportionen entsprechend korrigieren zu können. Eine Abweichung von ein bis zwei Millimetern kann für die Erreichung des gewünschten Operationsziels dabei von großer Relevanz sein.¹⁶

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die beide Handscanner Artec Eva und Sense 3D zuverlässig messen und die klassischen Proportionen und Dimensionen des Gesichts korrekt darstellen. Allerdings zeigte Sense 3D, vor allem bei der bildlichen Darstellung komplexerer Oberflächen, deutliche Schwächen im Vergleich zu Artec Eva und Vectra XT, die qualitativ vergleichbare Bilder reproduzierten. Deutlichere Abweichungen der Messergebnisse der mobilen Scanner ergaben sich im Nasen- und Mundbereich sowie bei den Proportionen Unterkiefer – Gesichtshöhe, Unterkiefer – Obergesichtshöhe bzw. Unterkiefer – Untergesichtshöhe.

Kritisch zu bewerten ist die junge Probandengruppe ($32 \pm 9,0$ Jahre), da signifikante Falten, die von den 3D-Bildgebungssystemen möglicherweise schwer darzustellen sind, meist nicht vorhanden waren. Zudem wurde die Vermessung der anatomischen Orientierungspunkte mit der Canfield Sculpture-Software

automatisiert, wobei beim Sense 3D Scanner aufgrund seiner schwachen Textur manuell nachgebessert werden musste. Die Variabilität wurde nicht untersucht, da sie mit Hilfe der Software mehrfach validiert wurde.

Unsere Studie konnte zeigen, dass alle Scanner die klassischen Proportionen und Dimensionen korrekt darstellten, sich jedoch die Qualität der Aufnahmen deutlich unterschied. Während die Bilder des Sense 3D unscharf und damit nicht repräsentativ für die ästhetische Beratung des Patienten waren, lieferten Vectra XT und Artec Eva qualitativ hervorragende Ergebnisse. Aufgrund der mobilen Eigenschaft der beiden tragbaren Geräte eröffnet sich ein breites Einsatzspektrum (u.a. Operationssaal, wechselnde Sprechstundenzimmer, standortübergreifende Aufnahmen) gegenüber dem stationären System.

3. Zusammenfassung

Ziel dieser kumulativen Dissertation ist ein Vergleich der zwei handelsüblichen, mobilen 3D-Scannergeräte Artec Eva und Sense 3D mit dem fest installierten 3D-Bildgebungssystem Vectra XT aus dem Medizinbereich. Dabei wurden Gesichtsscans hinsichtlich Messgenauigkeit von Strecken und Proportionen, Reproduzierbarkeit von Gesichtsoberflächen sowie Benutzerfreundlichkeit bewertet. Zusätzlich wurde der Einsatz der mobilen Geräte im intraoperativen Bereich der Gesichtschirurgie anhand anthropometrischer 3D-Messungen untersucht.

3D-Oberflächenmessung stellt in der plastischen Gesichtschirurgie eine innovative Möglichkeit dar, um Winkel, Abstände und Proportionen zuverlässig zu erfassen sowie Oberflächen- und Volumenveränderungen digital zu dokumentieren. Die dreidimensionale Darstellung des Gesichts hat sich in der prä-, intra- und postoperativen Patientenuntersuchung als ein objektives Beratungstool und hilfreiches Werkzeug in der OP-Planung und Ausführung in Hinblick auf das gewünschte Ergebnis erwiesen.^{7,11,12,24–26,44–51} Da der Großteil der aktuell auf dem Markt erhältlichen Medizintechnologie statische Geräte sind, die nicht für den mobilen und ortsunabhängigen Einsatz geeignet sind, wird in verschiedenen Studien der Einsatz von 3D-Scannergeräten auf den prä- und postoperativen Bereich begrenzt.^{1–2,5} Unsere Forschung legte deshalb den Fokus auf die Fragestellung, ob die preiswerteren und flexibel einsetzbaren Handscanner eine relevante Ergänzung oder Alternative zu einem statischen und etablierten Medizinprodukt darstellen und inwiefern sie für den Einsatz im intraoperativen Bereich geeignet sind.

Die Probandengruppe setzte sich aus 40 Personen zusammen; zehn davon waren im Rahmen einer Rhinoplastik intubiert. Als Referenzmodell diente dabei ein Schaufensterpuppenkopf.

Um die 3D-Modelle der einzelnen Scanner vergleichen zu können, wurden die Bilder in der Software übereinander gelagert und die Varianzen farblich visualisiert. Die Abweichungen zum statischen Referenzmodell lagen im gesamten Gesicht unter 1mm RMSE, was in der Gesichtschirurgie als akzeptabel angesehen werden

kann. Unterschiedliche Messwerte wurden vor allem an geometrisch komplexen Stellen der Probanden, wie beispielsweise Augen- und Nasenregion, deutlich. Beim Vergleich der Messergebnisse des Schaufensterpuppenkopfes mit denen der Probanden konnten die größten Messunterschiede im Bereich der Augen, gefolgt von der seitlichen Stirn, den seitlichen Wangen sowie der Mundregion festgestellt werden. Zurückzuführen ist dies auf die komplexere Geometrie des menschlichen Gesichts bzw. auf unwillkürliche Bewegungen der Probanden während der Messung. Dies lässt den Rückschluss zu, dass die Messgenauigkeit der Geräte unter standardisierten Laborbedingungen überschätzt wird.

Im direkten Vergleich der Messergebnisse zweier Untersucher konnte für die Scanner Vectra XT und Artec Eva eine große Übereinstimmung festgestellt werden, für Sense 3D lediglich eine mäßige. Erhebliche Abweichungen fielen bei allen drei Scannern bei der Wiederholbarkeit nach einer Woche auf, wobei Artec Eva die geringste Divergenz aufwies.

Im intraoperativen Einsatz zeigte Sense 3D große Abweichungen von den präoperativen Messwerten des statischen Vectra XT-Systems, sodass Sense 3D für einen Einsatz während einer Operation nicht empfohlen werden kann. Im Gegensatz dazu lieferte Artec Eva zufriedenstellende Ergebnisse und qualifiziert sich somit für einen operativen Einsatz. Kritisch zu bewerten ist, dass die Messungen der intubierten Patienten auf die Nasenregion beschränkt waren. Durch die Eingrenzung der Untersuchung auf ein bestimmtes Messareal sollten mögliche lagebedingte Messfehler, die durch die Schwerkraft im Liegen zu Verzerrungen in der Bildgebung hätten führen können, vermieden werden. Dieser Fakt könnte Basis für weiterführende Forschung bieten.

In der Handhabung und im Bedienungskomfort sind die mobilen, handgeführten Scannergeräte Artec Eva und Sense 3D kongruent. Durch die Verwendung von Infrarotlicht (Sense 3D) bzw. Strukturlicht (Artec Eva) können beide Geräte auch bei suboptimalen Lichtverhältnissen eingesetzt werden. Die Farbqualität der Bilder bei Sense 3D ist allerdings auch bei guten Lichtverhältnissen unbefriedigend, was den Einsatz in der Patientenberatung limitiert. Der Aufnahmeprozess erfolgt in beiden Fällen schnell. Es konnte festgestellt werden, dass die standortunabhängigen 3D-Oberflächenscanner Artec Eva und Sense 3D sowohl

im prä-, intra- und postoperativen Bereich eigenständig bzw. in Kombination mit dem statischen Gerät Vectra XT als ergänzendes Tool während der Operation grundsätzlich eingesetzt werden können. Deutlich war jedoch zu erkennen, dass sich die Messwerte des Sense 3D signifikant von den präoperativen Messwerten des Vectra XT unterschieden, was eine Empfehlung für den intraoperativen Bereich ausschließt. Hingegen stellten die mit Artec Eva erzielten Messwerte ein zufriedenstellendes Ergebnis dar, was den intraoperativen Einsatz des Geräts rechtfertigt.

In Bezug auf die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Messergebnisse und Farbqualität der Aufnahmen können Artec Eva und Vectra XT als gleichwertig angesehen werden. Das Fehlen einer integrierten Patientendatenbank sowie über die Software steuerbare Beurteilungs- und Bewertungswerkzeuge, wie sie die Canfield-Mirror-Software von Vectra XT zur Verfügung stellt, kann bei den mobilen Scannern als Manko bezeichnet werden.

Die zweite Studie zeichnete ein ähnliches Bild. Ziel der Untersuchung war es, die bereits in Studie I verwendeten mobilen, handgeführten 3D-Scanner Artec Eva und Sense 3D in Hinblick auf ihre Messgenauigkeit von standardmäßigen anthropometrischen 3D-Messungen des Gesichts zu bewerten.

Die Messung fand an 30 Probanden statt. Allerdings wurde in der Studie auf intraoperative Messungen sowie Messungen an einem Schaufensterpuppenkopf als Referenzmodell verzichtet. Insgesamt wurden 17 anatomische Orientierungspunkte im Gesicht festgelegt und zwischen diesen 37 Messungen durchgeführt. Darüber hinaus wurden mit Hilfe der Mirror-Anwendungssoftware die Höhenindizes zwischen Obergesicht – Gesicht, zwischen Untergesicht – Gesicht und zwischen Unterkiefer – Obergesicht berechnet. Die Messungen wurden von zwei unabhängigen Untersuchern in zwei Sitzungen durchgeführt.

Die Ergebnisse zeigten, dass sowohl Artec Eva als auch Sense 3D für valide Messungen im Gesicht geeignet sind. Die Proportionen und Dimensionen des Gesichts wurden von beiden 3D-Scannern korrekt abgebildet. Im direkten Vergleich zum statischen Referenzgerät Vectra XT war bei den Landmarkmessungen mit den mobilen Handscannern eine deutliche Abweichung

der Messwerte im Nasen- und Mundbereich sowie bei den Proportionen Unterkiefer – Gesicht, Unterkiefer – Obergesicht bzw. Unterkiefer – Untergesicht feststellbar. Dennoch lagen die Abweichungen mit $0,13 \pm 2,71$ mm (Bereich: -10,26 bis 13,9 mm) für Artec Eva und $-0,19 \pm 3,8$ mm (Bereich: -14,09 bis 18,9 mm) für Sense 3D im Vergleich zu früheren Studien¹¹ im Toleranzbereich. Mangelhaft wurde bewertet, dass die Bildaufnahmen des Sense 3D insbesondere bei komplexeren Oberflächen unscharf waren und deshalb nicht als repräsentativ für die Patientenberatung gewertet werden konnten, wohingegen Artec Eva – ebenso wie Vectra XT – eine hervorragende Bildqualität hervorbrachte. Vergleicht man die Messungen der einzelnen Scanner an unterschiedlichen Tagen, zeigen Vectra XT und Artec Eva eine große Verlässlichkeit, wohingegen sich der Sense 3D Scanner als unzuverlässiger erweist.

Kritisch zu hinterfragen ist die Untersuchung in Hinblick auf das relativ junge Probandenkollektiv. Gesichtsmerkmale wie beispielsweise starke Falten, die von 3D-Bildgebungssystemen grundsätzlich schwer abgebildet werden können, waren bei der Mehrheit der Studienteilnehmer nicht vorhanden. Dieser Umstand könnte eine Basis für weitere Forschung darstellen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass durch den Einsatz von nicht invasiver, kontaktloser sowie strahlungsfreier 3DSI-Technologie in der plastischen Gesichtschirurgie eine Reihe von objektiven Messdaten gewonnen werden können, die in der Patientenberatung und der Dokumentation von prä- und postoperativen Veränderungen eine hilfreiche Ergänzung für den Behandler darstellen. Durch die Verwendung von mobiler und handgeführter 3D-Oberflächenmesstechnik ist es möglich standortunabhängig und auch während eines operativen Eingriffs klinisch relevante Messungen durchzuführen. Mobile Handscanner stellen demnach eine innovative Erweiterung der prä- und postoperativ eingesetzten Bildgebungs- und Messtechnologie dar.

4. Summary

The aim of this cumulative dissertation is to compare two commercially available, mobile 3D scanning devices, Artec Eva and Sense 3D, with the stationary installed 3D imaging system Vectra XT from the medical sector. Face scans were evaluated in terms of measurement accuracy, of distances and proportions, reproducibility of facial surfaces as well as user-friendliness. Additionally, the use of mobile devices in the intraoperative area of facial surgery was examined using anthropometric 3D measurements.

3D surface measurement represents an innovative way in facial plastic surgery to reliably capture angles, distances and proportions, and to digitally document surface and volume changes. The three-dimensional representation of the face has proven to be an objective consultation tool in pre-, intra-, and postoperative patient examinations and a helpful tool in surgical planning and execution with regard to the desired result.^{7,11,12,24–26,44–51} Since the majority of medical technology currently available on the market are static devices that are not suitable for mobile and location-independent use, various studies limit the use of 3D scanning devices to the pre- and postoperative areas.^{1-2,5} Therefore, our research focused on whether the cheaper and flexible handheld scanners could be a relevant addition or alternative to a static and established medical product and to what extent they are suitable for intraoperative use.

The test group consisted of 40 participants, including ten who were intubated as part of a rhinoplasty procedure. A mannequin head served as a reference model.

To compare the 3D models of each scanner, images were superimposed in the software and variances were visualized in colour. The deviation from the static reference model was less than 1mm RMSE across the entire face, which is acceptable in facial surgery. Variations were notable especially in geometrically complex areas such as the eyes and nose region. Comparing measurements of the mannequin head with those of the participants revealed significant differences in the eye area, followed by the lateral forehead, lateral cheeks and the region of the mouth. This was attributed to the more complex geometry of the human face

and involuntary movements during scanning, indicating that device accuracy may be overestimated under standardized laboratory conditions.

In a direct comparison of the measurement results of two examiners, Vectra XT and Artec Eva showed a significant correlation and only moderate correlation for Sense 3D. There were significant differences in repeatability after one week for all three scanners, with Artec Eva showing the lowest divergence.

In intraoperative use, Sense 3D showed large deviations from the preoperative measurements of the static Vectra XT system, so it cannot be recommended for use during surgery. In contrast, Artec Eva provided satisfying results, qualifying for operative use. It is critical to note that the measurements of intubated patients were limited to the nasal region to avoid potential position-related measurement errors caused by distortions in imaging due to gravity in a lying position. This limitation could serve as a basis for further research.

In terms of handling and user comfort, the mobile handheld scanners Artec Eva and Sense 3D were congruent. By using infrared light (Sense 3D) and structured light (Artec Eva), both devices can also be used in suboptimal lighting conditions. However, the colour quality of the images with Sense 3D is unsatisfactory even in good lighting conditions, which limits its use in patient consultation. The capture process was fast in both cases. It was observed that the location-independent 3D surface scanners Artec Eva and Sense 3D could be used independently or in combination with the static Vectra XT device as an additional tool during pre-, intra- and postoperative procedures. Nevertheless, it was evident that the measurements of Sense 3D significantly differed from the preoperative measurements of Vectra XT, excluding a recommendation for intraoperative use. On the other hand, the measured values achieved with Artec Eva represented a satisfactory result, which justifies its intraoperative use.

In terms of the accuracy and reliability of measurement results and colour quality of images, Artec Eva and Vectra XT could be considered equivalent. However, the lack of an integrated patient database and software-controllable assessment and evaluation tools, as provided by Vectra XT's Canfield Mirror software, could be considered a drawback for these mobile scanners.

The second study presented a similar picture. The goal was to evaluate the mobile handheld 3D scanners Artec Eva and Sense 3D, which were already used in Study I, concerning their accuracy in standard anthropometric 3D facial measurements. The study involved 30 participants, excluding intraoperative measurements and measurements on a mannequin head as a reference model. 17 anatomical landmarks were defined in the face and 37 measurements were conducted between them. Additionally, height indices between upper face – face, lower face – face, and lower jaw – upper face were calculated using the Mirror application software. Measurements were performed by two independent examiners in two sessions.

The results showed that both Artec Eva and Sense 3D were suitable for valid facial measurements, accurately representing the proportions and dimensions of the face. Compared to the static reference device Vectra XT, there was a clear deviation in the nasal-mouth area and the proportions of lower jaw – face, lower jaw – upper face, and lower jaw – lower face with the mobile handheld scanners during landmark measurements. Nevertheless, the deviations were within the tolerance range with 0.13 ± 2.71 mm (range: -10.26 to 13.9 mm) for Artec Eva and -0.19 ± 3.8 mm (range: -14.09 to 18.9 mm) for Sense 3D compared to earlier studies,¹¹ indicating satisfactory results. Sense 3D's image captures, especially on more complex surfaces, were deemed unsatisfactory and not representative for patient consultation, whereas Artec Eva – like Vectra XT – produced excellent image quality. Comparing measurements of individual scanners on different days, Vectra XT and Artec Eva demonstrated high reliability, while the Sense 3D scanner proved to be less reliable.

The study needs to be critically questioned concerning the relatively young participant collective. Facial features such as strong wrinkles, which can be difficult for 3D imaging systems to capture, were absent in the majority of study participants. This fact could provide a basis for further research.

In conclusion, the use of non-invasive, contactless, and radiation-free 3D surface imaging technology in facial plastic surgery can provide a range of objective measurement data, serving as a helpful addition for physicians in patient counseling and documenting pre- and postoperative changes. By using mobile and

handheld 3D surface measurement technology, clinically relevant measurements can be performed both independently of location and during surgical procedures. Mobile handheld scanners therefore represent an innovative expansion of imaging and measurement technology used in pre- and postoperative settings.

5. Publikationen

5.1. Veröffentlichung Nr. 1

Konstantin Christoph Koban *, **Philipp Perko** *, Lucas Etzel, Zhouxiao Li, Thilo Ludwig Schenk, Riccardo Enzo Giunta.

Validation of two handheld devices against a non-portable three-dimensional surface scanner and assessment of potential use for intraoperative facial imaging.

Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery (2020 Jan;73(1):141-148).

doi: 10.1016/j.bjps.2019.07.008. PubMed PMID: 31519501.



Validation of two handheld devices against a non-portable three-dimensional surface scanner and assessment of potential use for intraoperative facial imaging



Konstantin Christoph Koban^{1,*}, Philipp Perko¹, Lucas Etzel, Zhouxiao Li, Thilo Ludwig Schenck, Riccardo Enzo Giunta

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

Received 3 November 2018; accepted 27 July 2019

KEYWORDS

Three-dimensional surface imaging;
Device validation;
Intraoperative 3D scanning;
Facial plastic surgery;
Imaging phantom

Summary *Background:* The aim of this study was to compare accuracy and timing of two handheld, mobile three-dimensional surface imaging (3DSI) devices against an established non-portable medical imaging system, and to evaluate future intraoperative use for facial surgery. *Methods:* Surface-to-Surface root mean square analysis was used to evaluate both a consumer device (Sense 3D) and a professional surface scanner (Artec Eva) against a reference imaging system (Vectra XT). Two assessors repeatedly 3D-imaged the facial region of an imaging phantom and 30 volunteers in two separate sessions. Using both mobile devices, intraoperative 3DSI of 10 rhinoplasty patients was compared with preoperative reference imaging. Intraclass Correlation Coefficient was calculated for repeated measurements.

Results: Artec Eva yielded mean deviations below 0.5 mm for the whole face and all subunits excluding the eye region. Sense 3D showed similar deviations for the whole face, but otherwise only in the central and lateral forehead unit and the medial cheek. Variability was low for both the non-portable Vectra XT and Artec Eva, whereas full-face assessment using Sense 3D resulted in high variability. When compared to the preoperative reference images, intraoperative rhinoplasty 3DSI revealed low deviations for Artec Eva and high deviations for Sense 3D.

Conclusions: The 3D surfaces captured by Artec Eva showed a similarly desirable accuracy for facial imaging as Vectra XT reference images. This handheld device presents a suitable option for the objective documentation during rhinoplasty surgery. Sense 3D was unable to accurately

¹These authors contributed equally to this work.

* Corresponding author.

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



capture complex facial surfaces and is therefore limited in its usefulness for intraoperative 3DSI.

© 2019 British Association of Plastic, Reconstructive and Aesthetic Surgeons. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

Introduction

The demand and need for documentation in modern medicine is undisputed. Technological advances in the field of digital photography have yielded increasingly important tools for the documentation of facial surgery.¹⁻⁵ Pre- and postoperative use of three-dimensional surface imaging (3DSI) has proven beneficial for plastic surgeons in providing additional and objective information regarding head and neck procedures.^{1,6-8} As summarized by Tzou and Frey,⁹ the 3D imaging technology found in modern devices is increasingly suited for the capture of facial surface morphology.

With the emergence of professionally built portable surface scanners in recent years, the field of 3DSI has shifted to devices that are handheld, mobile, and more user-friendly¹⁰⁻¹². Previous research on the validation and accuracy of different 3DSI systems conclude that established non-portable devices may be replaced in favor of these mobile 3D scanners.¹³ Nevertheless, the imaging technologies in question are associated with varying strengths and limitations. Rather than replacing one another, the combined use of different devices may add even more benefits when applied in a clinical setting. A recent publication on 3D Augmented Reality facial imaging¹⁴ provided incentive for further research regarding the intraoperative use of 3DSI for documentation and decision-making.

The aim of this study is to compare accuracy, reproducibility and ease of use of two handheld, mobile 3DSI devices with an established non-portable medical imaging system, and to evaluate intraoperative 3D documentation during rhinoplasty.

Material and methods

Models

In order to accurately evaluate the scanners under standardized conditions, involuntary movements or object invariances were eliminated by using a commercially available mannequin head as a benchmark model for an in-lab setting.

To evaluate the devices in a clinical test environment, 30 healthy human volunteers (15 male, 15 female) were enrolled for this study. Mean age was 32 ± 9 years with a mean Body-Mass-Index of $26.1 \pm 5 \text{ kg/m}^2$.

Further 10 patients (8 female, 2 male) scheduled for rhinoplasty were enrolled for intraoperative 3DSI. Mean age was 41 ± 11 years with a mean Body Mass Index of $21.8 \pm 2 \text{ kg/m}^2$. Written informed consent was given by each participant before enrolment. Exclusion criteria were facial malformations, previous facial surgery, and volunteers diagnosed with epilepsy or other seizure disorders.

Scanning devices

Table 1 summarizes the specification for all used 3DSI devices. Figure 1 showcases images from all three surface scanners.

Non-portable medical surface scanner

The Vectra XT 3D Surface Imaging System (Canfield Scientific Inc., Parsippany, NJ, USA) is a 3D scanning device specially created for the health care sector. It uses passive stereo-photogrammetry - the reconstruction of 3D models from digital photographs. Having been widely used for research and clinical documentation during the last decade, it served as the reference 3D imaging system for this study.¹⁵⁻¹⁸ The cost of acquiring this device along with the necessary capture computer and processing software amounts to approximately 37,000 Euros.

Mobile surface scanners

The Sense 3D Scanner (3D Systems, Rock Hill, SC, USA) is a handheld, mobile 3DSI consumer device for various applications, including 3D human imaging.¹⁹ It consists of an infrared depth-sensor and a video-capture system. Acquired data are recorded by a USB wired laptop, where the Sense software calculates the depth of the object and creates a textured three-dimensional surface image. After performing minor edits such as cropping the model without changing the raw data, the 3D model can be exported as an .obj file. The surface scanner cost approximately 400 Euros and was used in conjunction with a similarly priced consumer-grade laptop.

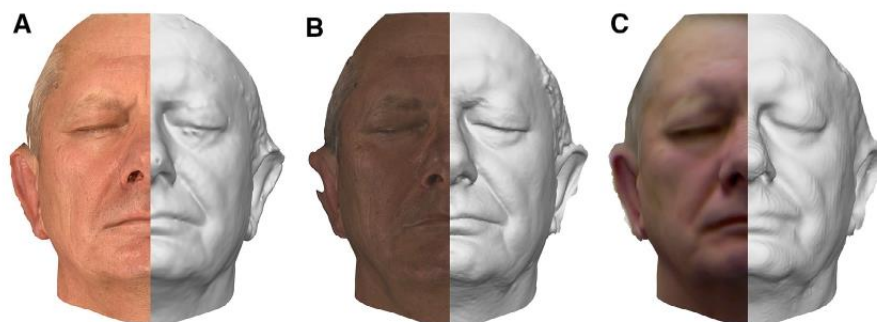
Artec Eva (Artec 3D, Luxembourg) is a handheld 3D scanner that uses structured-light technology. This device has found wide-spread industrial application in the last decade. Furthermore, Artec Eva has become a valuable tool in medical 3DSI.²⁰⁻²² To reconstruct the captured frames into a solid 3D mesh with high-resolution textures, the scanner uses its associated Artec Studio 12 software installed on a USB wired laptop. The finished 3D image can then be exported in the .obj format. The imaging device and software used in conjunction with the laptop cost approximately 15,000 Euros.

Image acquisition

In this study, 3DSI was performed by two assessors during each session, while consecutively using all three scanners. Subjects previously removed any jewellery and hair from the face. Male volunteers were asked to shave, as excessive

Table 1 Comparison of 3DSI devices.

<i>Companies/products</i>	Canfield Sci. Vectra XT (2011)	Artec Eva (2015) Artec 3D	3DSystems Sense 3D, 1. Generation (2014)
<i>Hardware</i>	3 pods with 6 integrated cameras, intelligent flash units, tethered by USB and power cord	Handheld scanner with flash bulb; tethered by USB and power cord	Handheld scanner without light source; tethered by USB cord
<i>Peripheral equipment</i>	PC workstation with monitor	Notebook needed; optional battery pack	Notebook needed
<i>Dimensions (height × width × diameter)</i>	230 × 152 × 42 cm	26.2 × 15.8 × 6.3 cm	17.8 × 12.9 × 3.3 cm
<i>3DSI technology</i>	Passive photogrammetry	Structured light projection; 16 frames per second	Infrared class 1 laser projector; 30 frames per second
<i>Field-of-view</i>	190-degree capture (ear to ear)	Full 360-degree capture possible	Full 360-degree capture possible
<i>Weight</i>	Stationary device 63 kg	0.58 kg	0.458 kg
<i>Face acquisition time</i>	3.5 ms	15.6 ± 3 s	12.1 ± 6 s
<i>Processing speed for final 3D model</i>	2 min; hardware dependent	3 min; hardware dependent	1 min; hardware dependent
<i>3D point accuracy</i>	> 0.1 mm	> 0.1 mm	0.9 mm
<i>Texture resolution</i>	36 megapixels	1.3 megapixels	0.76 megapixels
<i>Portability</i>	Not feasible	Portable device	Portable device
<i>Calibration</i>	Yes (before each session)	Not needed	Not needed
<i>Price on acquisition date **</i>	37,000 Euros, including workstation	13,700 Euros; additional notebook needed; optional battery pack (600 Euros)	400 Euros; additional notebook needed

**Figure 1** Exemplary facial 3D models in frontal view. Images are split into textured and un-textured halves, and represent surface data as captured by Vectra XT (A), Artec Eva (B) and Sense 3D (C).

hair can provide a major limitation in 3D imaging. All volunteers were asked to close their mouth without clenching the teeth and to remain in a relaxed, neutral facial expression on the same chair with a fixed backrest.²³⁻²⁵ They had to take an upright, non-excessive sitting position, and close their eyes. Lighting was kept under the same controlled conditions as during our daily routine.

The accuracy and reproducibility of the three scanners were then tested using a mannequin head and for each volunteer. A session consisted of three 3D scans with each scanner on day one and one week later, on day 7.

Intraoperative 3D imaging was performed with both mobile scanners at a distance of approximately 80 cm (Figure 2). The intubated patients were previously washed and draped under standard operating procedure and positioned in a head cup in supine position. The imaging laptop was placed on a rollable metal side-table adjacent

to the operating table, ensuring an unobstructed view of the display depicting the area currently being captured by the scanner. Scanning was conducted as swiftly as possible by our trained operator, and without presenting a holdup to the procedure, as it was performed while the surgeon was simultaneously inspecting the operation field for quality control.

Data evaluation

For this study, the face was divided into aesthetic units described by Gonzales-Ulloa²⁶ to highlight capturing and processing problems of each unit (forehead unit - central and lateral subunit, periorbital unit, nasal unit, cheek unit - medial and lateral subunit, perioral and mental unit). The variation was computed for each region.



Figure 2 Intraoperative setup for three-dimensional surface imaging during rhinoplasty surgery.

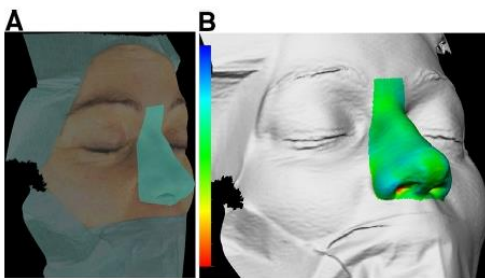


Figure 3 Intraoperative three-dimensional surface imaging of a 42-year-old female patient and the respective Artec Eva scans before undergoing rhinoplasty (A) and during surgery as a color-mapped overlay displayed onto the preoperative Vectra XT scan (B).

We used the standard Mirror software (Canfield Scientific Inc., Parsippany, NJ, USA) for Surface-to-Surface analysis and Root-Mean-Square Error (RMSE) calculation. The models acquired by the Vectra System were used as reference scans for all 3D surface evaluations. To compare 3D models from each scanner and time-point, images were automatically superimposed in the software by previously described iterative closest point algorithms.^{13,27,28} Surface deviation between 3D models was color visualized for the entire face and each facial region, as illustrated in Figure 3.

Statistical evaluation

Due to the repetitive nature of the conducted measurements, all Root-Mean-Square results were expressed as their mean with the standard deviation of the mean (± 1 SD). Root-Mean-Square threshold below 1.0 mm RMSE was deemed acceptable and below 0.5 mm RMSE preferable.

All tests were two tailed and a probability value (p -value) less than 0.05 was considered significant. The paired t -test and Mann-Whitney U test were used to compare the differences from the reference values in paired continuous data.

To assess precision and repeatability for each device, we calculated the Intraclass Correlation Coefficient (ICC) with a scale from 0 to 1, with 1 as a sign of perfect agreement between the compared measurements.

Analyses were performed using SPSS Statistics 21 (IBM, Armonk, NY, USA).

Results

Imaging phantom

Repeated and self-comparative 3DSI of the whole mannequin facial region showed no significant differences ($p = 0.282$; C.I. -0.019 to 0.057 mm RMSE) between the photogrammetric Vectra system and the Structured-Light Artec Eva scanner. Repeated depth-sensor Sense 3D showed significantly higher ($p < 0.0001$; C.I. 0.123 - 0.210 mm RMSE) whole facial deviations in comparison to the photogrammetric system.

Surface-to-Surface comparison of the two handheld scanners to the stationary photogrammetric system showed mean deviations lower than 1.0 mm RMSE for every aesthetic unit and total face surface in the mannequin model, as can be seen in Table 2. Sense deviations were found to be generally higher than the deviations between Artec Eva models.

Volunteers

Repeated and self-comparative 3DSI of the volunteers' facial region on day 1 showed significant differences between the photogrammetric Vectra system and both mobile scanners. While the Structured-Light Artec Eva scanner showed smaller repetition errors ($p < 0.001$; C.I. -0.081 to -0.033 mm RMSE) in total, the depth-sensor Sense 3D yielded significantly higher ($p < 0.001$; C.I. 0.031 - 0.077 mm RMSE) whole facial deviations.

Both handheld scanners passed the 1.0 mm RMSE threshold in Surface-to-Surface to the stationary photogrammetric camera system for each aesthetic subunit and the whole face. Table 3 and Figure 4 showcase that Artec Eva reached mean deviations below 0.5 mm RMSE for the whole face and all subunits but the eye region (0.673 ± 0.219 mm RMSE), whereas the Sense 3D Scanner produced similar mean deviations only in both central and lateral forehead unit and the medial cheek. Particularly the nasal (0.613 ± 0.153 mm RMSE) and lateral cheek unit (0.544 ± 0.248 mm RMSE) showed higher deviations in comparison to the stationary medical device. Mean whole face deviation was below the 1.0 RSME threshold for Sense models (0.516 ± 0.109 mm RMSE).

Scan-to-scan variability, day-to-day-reliability

Scan-to-scan variability results for full-face assessment showed a very high correlation for both the stationary Vectra system (ICC 0.921; C.I. 0.901 - 0.956) and Artec Eva (0.969 ; C.I. 0.934 - 0.985), whereas Sense yielded a moderate correlation (ICC 0.619; C.I. 0.419 - 0.728).

Table 2 Surface deviations for every aesthetic unit of both mobile scanners to the stationary system in the mannequin model.

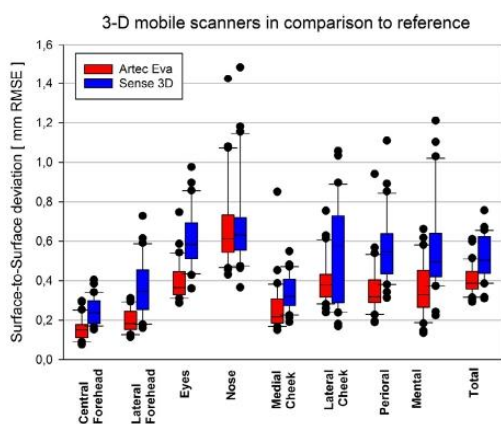
	Artec Eva		Sense 3D Scanner	
	Mean (SD)	Range	Mean (SD)	Range
Central forehead	0.070 (0.005)	0.065-0.074	0.157 (0.028)	0.537-0.179
Lateral forehead	0.119 (0.023)	0.099-0.144	0.305 (0.124)	0.201-0.443
Nasal	0.194 (0.026)	0.164-0.214	0.382 (0.068)	0.315-0.452
Eyes	0.122 (0.011)	0.112-0.134	0.297 (0.061)	0.260-0.366
Medial cheek	0.086 (0.023)	0.061-0.104	0.258 (0.035)	0.227-0.296
Lateral cheek	0.158 (0.079)	0.077-0.235	0.614 (0.109)	0.505-0.724
Perioral	0.200 (0.008)	0.191-0.212	0.504 (0.014)	0.489-0.516
Mental	0.105 (0.034)	0.083-0.144	0.311 (0.087)	0.246-0.410
Total face surface	0.131 (0.013)	0.120-0.145	0.341 (0.045)	0.312-0.393

All surface deviations of Artec Eva and Sense 3D to the stationary photogrammetric Vectra system expressed as the Root-Mean-Square Error in millimeters (mm RMSE).

Table 3 Surface deviations for every aesthetic unit of both mobile scanners to the stationary system in volunteers.

	Artec Eva		Sense 3D Scanner	
	Mean (SD)	Range	Mean (SD)	Range
Central forehead	0.154 (0.056)	0.0761-0.297	0.247 (0.069)	0.153-0.404
Lateral forehead	0.200 (0.058)	0.115-0.312	0.362 (0.143)	0.160-0.728
Nasal	0.399 (0.101)	0.286-0.747	0.613 (0.153)	0.359-0.976
Eyes	0.673 (0.219)	0.431-1.426	0.691 (0.239)	0.366-1.486
Medial cheek	0.258 (0.134)	0.150-0.851	0.339 (0.091)	0.190-0.549
Lateral cheek	0.396 (0.116)	0.239-0.754	0.544 (0.248)	0.169-1.058
Perioral	0.363 (0.143)	0.190-0.941	0.565 (0.174)	0.313-1.109
Mental	0.363 (0.141)	0.135-0.662	0.566 (0.239)	0.224-1.211
Total face surface	0.401 (0.075)	0.292-0.611	0.516 (0.109)	0.310-0.756

All surface deviations of Artec Eva and Sense 3D to the stationary photogrammetric Vectra system expressed as the Root-Mean-Square Error in millimeters (mm RMSE).

**Figure 4** Surface-to-Surface deviation of the two mobile scanners Artec Eva and Sense 3D when compared to the non-portable Vectra XT device, divided into the respective facial aesthetic units.

Day-to-day reliability for full-face assessment showed a high correlation for the Vectra system (ICC 0.877; C.I. 0.751-0.922) and Artec Eva (ICC 0.839; C.I. 0.763-0.890), but a low correlation for Sense (ICC 0.286; C.I. -0.500 to 0.660).

Surface-to-Surface analysis for each capturing device showed significant differences for all respective imaging systems when comparing the sessions at day one and day seven. The smallest deviations were found for Artec Eva (0.244 ± 0.081 mm RMSE), higher deviations for Vectra XT (0.326 ± 0.092 mm RMSE) and the largest deviations for Sense (0.455 ± 0.193 mm RMSE).

Preoperative versus intraoperative imaging of rhinoplasty patients

When comparing the preoperative Vectra XT images acquired in a standing position with the intraoperative images acquired in a supine position with both mobile scanners, the assessment of the nose region revealed a mean Surface-to-Surface deviation of 0.438 ± 0.096 mm RMSE for Artec Eva and 0.972 ± 0.265 mm RMSE for Sense. Mean 3D surface imaging duration was 25.3 ± 5 s (Range 18-35 s).

Discussion

Study summary

In our study about 3DSI for Facial Plastic Surgery, we compared two mobile 3D scanners with a non-portable medical

photogrammetry device. A mannequin head and 30 healthy human subjects (15 males and 15 females) aged 20–57 years were examined to validate the devices. A further 10 patients who underwent rhinoplasty were examined to assess the deviation between preoperative 3D images with the medical photogrammetry device and the intraoperative 3D images of both portable scanners.

Device validation

It is common practice to initially assess devices by using an imaging phantom to benchmark surface or point-to-point accuracy, thus providing a static reference object that can be rapidly and easily examined without limitations found in live subjects – such as involuntary movements. The specifications of the scanners used in this study are listed in [Table 1](#).

Study results and literature discussion

When examining the imaging phantom under standardized conditions and exclusion of human subject influence, the Surface-to-Surface deviation was found acceptable for both mobile scanners Sense (0.341 ± 0.045 mm RMSE) and Artec Eva (0.131 ± 0.013 mm RMSE), with no difference in the three consecutive scans or in the repeated scans after one week. Other studies have assessed the accuracy of these devices mainly in repeated mannequin head scans and compared digital landmark-to-landmark measurements to manual tape measurements.^{8,9,29,30}

However, recent studies^{27,28,31} used a standardized setting with volunteers and compared Root-Mean-Square Surface deviation as the optimal 3DSI device analysis versus landmark-based evaluation by Maal et al.²⁵ investigated the variation in the resting face at different times. The results of that study showed that the variation of the face at rest was small, indicating that 3D photographs of the face at rest can be reproduced accurately. The greatest variation was found in the mouth and eye regions, while the lowest variation was found in the nose and forehead regions. Our study confirmed these conclusions for Artec Eva. The Sense scanner showed similarly satisfactory results for the same regions. Mean deviations for accuracy were measured at below 1 mm RMSE and thus deemed acceptable.

In contrast to the static mannequin head, the highest deviation was found in the eye area with greater variance in the results for the lateral forehead, lateral cheek and perioral units. This may be caused by either an involuntary movement of the subjects or more complex geometry in comparison to the mannequin head.

Root-Mean-Square deviation can be seen as an abstract indicator for surface congruency, and acceptable error margins can vary depending on what kind of 3D surfaces are examined. Even when landmark-based 3D analysis of the face shows acceptable and symmetrical results, results regarding RMS deviation may yield more information regarding volume and symmetrical accuracy, thus allowing for a more in-depth interpretation of the captured facial surface's properties.

Surface accuracy of the scanners was seen to be overestimated when benchmarking the devices scanners solely

in an in-lab setting. Further examination with live subjects showed higher deviations and lower reproducibility, thus providing further crucial information when wanting to apply the devices in an intraoperative setting.

Subjective device assessment

When reviewing the Vectra XT acquisition and 3D images subjectively, the 3D imaging process is quick, self-explanatory and user-friendly. Operation is comparable with the use of an automatic digital camera. Images are directly saved to subject-specific folders in the built-in patient database, thus allowing easy access when reviewing and analyzing the 3D models. The color quality seems appropriate and sufficient for plastic surgical documentation.

Operating Artec Eva showed similarly satisfactory results, allowing implementation for facial 3DSI. This mobile scanner works uses structured light imaging technology and enables fast capturing, requiring approximately 30 s for image acquisition when handled by an experienced physician. Finalizing the image takes several minutes but is faster with a more powerful laptop, and thus quite manageable and acceptable in a clinical setting. A drawback of the Artec software is however the lack of an accompanying user-friendly medical patient database, and comprehensive assessment and evaluation tools as found in the Canfield Mirror software. Operators familiar with 3D analysis could certainly make good use of the Artec Studio software without the need for the Canfield Software.

During the scanning process itself, the distance from the object to be scanned is shown on the computer screen. In addition, due to the high frequency of the sequential flashing light, which provides enough of a light source from the device itself, no extra light adjustments in the background are necessary. However, the sequential flashing lights could be unpleasant during patient consultation and its use has to be excluded in patients suffering from epilepsy.

The mobile Sense 3D Scanner is most noticeable for its low price of approximately 400 Euros at the time of purchase, thereby being by far the most affordable of our tested scanning devices. It is a first-generation device, and while it does not yield image textures as satisfactorily as the second-generation installment, the depth-sensor of the scanner used in this study provides noticeably better surface results.

While handling and ease-of-use are comparable to Artec Eva, the device weighs even less and delivers faster imaging performance. The accompanying software is self-explanatory and does not require a very powerful laptop, thereby allowing new operators to easily capture adequate results within minutes. Because it uses an infrared light source, no flashlight or special light conditions are needed, allowing its use in badly illuminated rooms to measure surfaces. However, the resulting color quality is unsatisfactory, as can be seen in [Figure 1](#). In conclusion, the Sense 3D Scanner presents itself as a very affordable device that can certainly be applied in various medical scenarios. As our results have shown, use for intraoperative and pre- to postoperative documentation may however be limited, and therefore have to be evaluated critically.

Future clinical application

A potential future clinical relevance of scanners could be demonstrated by their novel intraoperative use. Preoperative planning with 3D imaging of aesthetic procedures, including rhinoplasty or facial augmentation, has become widespread and allows the surgeon to better understand a patient's desires and expectations while striving for a satisfactory outcome during surgery. As depicted in Figure 3, the sterile dressing covered the mouth area and the hair-bearing head areas. Preliminary results on a more generous coverage showed markedly greater deviations from the preoperative 3D images due to the sterile coverage and the displacement of the soft tissue in supine position under relaxation, therefore this study focused only on the comparison of the position-independent nasal region. This region should therefore represent the focus of future clinical documentation using intraoperative 3DSI, while other facial regions should be evaluated critically.

Our use of Artec Eva for intraoperative 3DSI is still in its infancy when compared to the promising results regarding a recent study on the use of augmented reality for intraoperative facial 3D imaging.¹⁴ This method can offer a reliable preoperative overlay or 3D simulation on the surgical field as a further step towards objective documentation or assisted decision-making. In contrast, intraoperative Sense Scans showed significantly higher deviations compared to the preoperative Vectra scan, thereby limiting the device for future intraoperative use.

Study and device limitations

Further studies are required to evaluate the accuracy and reproducibility of the device and the intraoperative qualities regarding objectiveness of 3DSI when compared against subjective surgeon's reported assessments. Future intraoperative application also has to be critically compared to securely established methods aiding in rhinoplasty procedures, such as the use of intraoperative guides.

Devices built specifically for medical professionals are still quite rare and therefore expensive. The Vectra XT systems used in this study costs approximately 37,000 Euros, which limits the number of professionals using 3DSI technology.

As Artec Eva is not designed specifically for medical use, it greatly benefits from additional software such as the Mirror Medical imaging suite used for Vectra XT imaging. It is therefore especially useful for experts already using 3DSI in their daily routine, but requires technical know-how if acquired as a standalone device. Another factor to consider is the necessity of a USB wired laptop for the mobile scanners.

Conclusion

Our results showed comparable 3D imaging capabilities of the Artec Eva in surface accuracy and reliability when compared to the established Vectra XT Scanner for facial 3DSI. Therefore, 3D models and data generated by Artec Eva and Vectra XT may be used together or in exchange between patient consultations in different settings and places and

for multicenter study purposes. Artec Eva could also be used in future to allow for intraoperative 3D surface imaging, thus delivering additional objective information during rhinoplasty.

The consumer device Sense showed promising results, but could not accurately capture more complex surfaces, including the nasal and facial margins. This may limit the use in complex plastic surgery cases and intraoperative 3DSI. In addition, the final Sense images may not be representative enough of a patient's face due to the lack of color quality and therefore not sufficient for use in plastic surgery consultations.

Ethical approval

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

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

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship, and/or publication of this article. None of the other authors listed have any commercial associations or financial disclosures that might pose or create a conflict of interest with the methods applied or the results presented in this article.

Declaration of Competing Interest

All authors will disclose any financial and personal relationships with other people or organizations that inappropriately influence (bias) their work. None of the authors are shareholders of one of the named companies whose medical devices, hardware and software were used in the study, and no author has any other financial interests with the named companies.

References

1. Mailey B, Baker JL, Hosseini A, et al. Evaluation of facial volume changes after rejuvenation surgery using a 3-dimensional camera. *Aesthetic Surg J* 2016;36(4):379-87.
2. Ong SC, Khambay BS, McDonald JP, Cross DL, Brocklebank LM, Ju X. The novel use of three-dimensional surface models to quantify and visualise the immediate changes of the mid-facial skeleton following rapid maxillary expansion. *Surgeon* 2015;13(3):132-8.
3. Patel A, Islam SMS, Murray K, Goonewardene MS. Facial asymmetry assessment in adults using three-dimensional surface imaging. *Prog Orthod* 2015;16(1):36.
4. Berssenbrügge P, Berlin NF, Kebeck G, et al. 2D and 3D analysis methods of facial asymmetry in comparison. *J Cranio-Maxillo-fac Surg* 2014;42(6):e327-34.
5. Lee S. Three-dimensional photography and its application to facial plastic surgery. *Arch Facial Plast Surg* 2004;6(6):410.

6. Rho NK, Park JY, Youn CS, Lee S-K, Kim HS. Early changes in facial profile following structured filler rhinoplasty. *Dermatol Surg* 2017;**43**(2):255-63.
7. Lekakis G, Claes P, Hamilton G, Hellings P. Three-Dimensional surface imaging and the continuous evolution of preoperative and postoperative assessment in rhinoplasty. *Facial Plast Surg* 2016;**32**(01):088-94.
8. Spanholtz T, Leitsch S, Holzbach T, Volkmer E, Engelhardt T, Giunta R. 3-dimensionale bilderfassung: erste erfahrungen in der planung und dokumentation plastisch-chirurgischer operationen. *Handchir Mikrochir Plast Chir* 2012;**44**(04):234-9.
9. Tzou C-HJ, Frey M. Evolution of 3D surface imaging systems in facial plastic surgery. *Facial Plast Surg Clin N Am* 2011;**19**(4):591-602.
10. Koban K, Schenck T, Metz P, et al. Auf dem Weg zur objektiven evaluation von form, volumen und symmetrie in der plastischen chirurgie mittels intraoperativer 3D scans. *Handchir Mikrochir Plast Chir* 2016;**48**(02):78-84.
11. 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.
12. Knoops PGM, Beaumont CAA, Borghi A, et al. Comparison of three-dimensional scanner systems for craniomaxillofacial imaging. *J Plast Reconstr Aesthetic Surg* 2017;**70**(4):441-9.
13. 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):1772-84.
14. 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.
15. Sasaki GH. The safety and efficacy of cell-assisted fat grafting to traditional fat grafting in the anterior mid-face: an indirect assessment by 3D imaging. *Aesthetic Plast Surg* 2015;**39**(6):833-46.
16. 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.
17. Schreiber JE, Terner J, Stern CS, et al. The "Boomerang lift". *Plast Reconstr Surg* 2018;**141**(4):910-13.
18. Koudelová J, Brůžek J, Cagánová V, Kraljiček V, Veleminská J. Development of facial sexual dimorphism in children aged between 12 and 15 years: a three-dimensional longitudinal study. *Orthod Craniofac Res* 2015;**18**(3):175-84.
19. Koban KC, Cotofana 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.
20. 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.
21. Yamamoto S, Miyachi H, Fujii H, Ochiai S, Watanabe S, Shimozato K. Intuitive facial imaging method for evaluation of postoperative swelling: a combination of 3-dimensional computed tomography and laser surface scanning in orthognathic surgery. *J Oral Maxillofac Surg* 2016;**74**(12):2506.e1-2506.e10.
22. Modabber A, Peters F, Brokmeier A, et al. Influence of connecting two standalone mobile three-dimensional scanners on accuracy comparing with a standard device in facial scanning. *J Oral Maxillofac Res* 2016;**7**(4):e4.
23. Al-Khatib AR. Facial three dimensional surface imaging: an overview. *Arch Orofac Sci* 2010;**5**(1):1-8.
24. Cassi D, De Biase C, Tonni I, Gandolfini M, Di Blasio A, Piancino MG. Natural position of the head: review of two-dimensional and three-dimensional methods of recording. *Br J Oral Maxillofac Surg* 2016;**54**(3).
25. Maal TJJ, Verhamme LM, Van Loon B, et al. Variation of the face in rest using 3D stereophotogrammetry. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2011;**40**(11):1252-7.
26. González-Ulloa M. Regional aesthetic units of the face. *Plast Reconstr Surg* 1987;**79**(3):489-90.
27. Zhao Y, Xiong Y, Wang Y. Three-dimensional accuracy of facial scan for facial deformities in clinics: a new evaluation method for facial scanner accuracy. Benchari S, Ed. *PLoS One* 2017;**12**(1):e0169402.
28. Knoops PGM, Beaumont CAA, Borghi A, et al. Comparison of three-dimensional scanner systems for craniomaxillofacial imaging. *J Plast Reconstr Aesthetic Surg* 2017;**70**(4):441-9.
29. 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.
30. Heike CL, Cunningham ML, Hing AV, Stuhau E, Starr JR. Picture perfect? Reliability of craniofacial anthropometry using three-dimensional digital stereophotogrammetry. *Plast Reconstr Surg* 2009;**124**(4):1261-72.
31. 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.

5.2. Veröffentlichung Nr. 2

Konstantin Christoph Koban, **Philipp Perko**, Zhouxiao Li, Ya Xu, Riccardo Enzo Giunta, Michael Alfertshofer, Lukas Kohler, David L. Freytag, Sebastian Cotozana, Konstantin Frank.

3D Anthropometric Facial Imaging - A comparison of different 3D scanners.

Facial Plastic Surgery Clinics of North America (2022 May;30(2):149-158). doi: 10.1016/j.fsc.2022.01.003. PubMed PMID: PMID: 35501052.

3D Anthropometric Facial Imaging - A comparison of different 3D scanners



Konstantin Christoph Koban, MD^{a,*}, Philipp Perko, MD^a, Zhouxiao Li, MD^a, Ya Xu, MD^a, Riccardo E. Giunta, MD, PhD^a, Michael G. Alfertshofer^a, Lukas H. Kohler, MD^a, David L. Freytag, MD^b, Sebastian Cotozana, MD, PhD^c, Konstantin Frank, MD^a

KEYWORDS

• 3D scan • Three-dimensional surface imaging • Anthropometry • Facial imaging

INTRODUCTION

Three-dimensional (3D) imaging has been proved to be a valuable tool in the preoperative, intraoperative, and postoperative setting for facial plastic surgeons and dermatologists.^{1–12} Accurate depiction of the face has become a helpful adjunct in the preoperative setting during patient consultation and operative planning.^{7,10,13,14} 3D imaging has, furthermore, shown to be of great use in the intraoperative setting to assess for changes of symmetry and provide objective feedback to the surgeon on the way to the desired surgical outcome.^{12,15} Moreover, 3D is on its way to be the gold standard for postoperative assessment of volume- and shape-altering surgeries and minimally invasive interventions, not only in the hospital and private practice setting but also in the field of research. A plethora of studies have shown that 3D imaging allows to assess postinterventional changes in a meticulous manner and enables the transition from subjective outcome assessment to objective outcome assessment, strengthening the efforts to move minimally invasive treatments from an evidence- to an evidence-based endeavor.^{2,3,7,13,16–19} 3D imaging devices have evolved from complex stationary systems to portable systems, which can be used in a

multitude of situations and locations.^{5,10,12} However, especially in facial plastic surgery measurement deviations can be misleading the surgeon and become rather a hazard than a supporting tool. A measurement deviation of 3 mm might be considered as acceptable in breast surgery; however, a difference of 3 mm can cause a nose to look harmonious or unharmonious.

It is thus essential to investigate the measurement deviations when scanning with different 3D imaging systems. Thus, the objective of this investigation was to evaluate the accuracy and reliability of standard 3D anthropometric measurements of the face made with one low-cost handheld 3D scanner and one industrial-type mobile 3D scanner.

MATERIALS AND METHODS

Subjects

A total of 30 healthy volunteers (15 males and 15 females) were enrolled into this study. Mean age of the participants was 32.0 ± 9.0 years with a mean body mass index of 26.1 ± 5.0 kg/m². All volunteers were screened for exclusionary criteria, including a history of either unilateral or bilateral facial procedures/surgery, trauma, or diseases that could alter facial anatomy. This study was

Funding: This study received no funding.

^a Division of Hand, Plastic and Aesthetic Surgery, University Hospital, LMU Munich, Munich, Germany;

^b Department of Plastic Surgery, Community Hospital Havelhöhe, Berlin; ^c Department of Clinical Anatomy, Mayo Clinic College of Medicine and Science, Rochester, MN, USA

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

E-mail address: Konstantin.koban@med.uni-muenchen.de

Facial Plast Surg Clin N Am 30 (2022) 149–158

<https://doi.org/10.1016/j.fsc.2022.01.003>

1064-7406/22/© 2022 Elsevier Inc. All rights reserved.

Downloaded for Anonymous User (n/a) at Shanghai Jiao Tong University School of Medicine from ClinicalKey.com by Elsevier on November 20, 2022. For personal use only. No other uses without permission. Copyright ©2022. Elsevier Inc. All rights reserved.

Table 1
Table showing the 17 landmarks used to reconstruct the consecutively performed distance measurements

Abbreviation/Full Name	Definition
Trichinion	Trichion, widow's peak
G (glabella)	Bulge between the 2 eyebrows and the most prominent point on the median sagittal plane
N (nasion)	Intersection point of the frontal bone and 2 nasal bones of the human skull
Pronasale	Nasal apex
C'c (columella center)	Midpoint of the columella crest at the level of the nostril top points
Sn (subnasale center)	Columellar base
Ls	Midpoint of the upper vermilion line
Sto (stomion)	Midpoint of closed lip
Li	Midpoint of the lower vermilion line
Sl (sublabiale)	Most posterior midpoint on the labiomental soft tissue contour
Gn (gnathion)	Lowest point of the mandible in the median sagittal plane
Endocanthion	Endocanthion bilateral
Exocanthion	Exocanthion bilateral
Al (alar lateral)	Most lateral point on alar contour bilateral
C' (columella)	Columella bilateral
Septum nasale	Point at each margin of the midportion of the columella crest
Ch (cheilion)	Oral commissure bilateral

Landmark positions were defined according to Farkas and colleagues²⁶ and Swennen and colleagues.²⁷

performed in adherence with the Declaration of Helsinki (1996)²⁰ and was previously approved by the Ethics Committee of the Ludwig-Maximilian University, Munich, Germany, under the number (Reference Number 266-13). Written informed consent was obtained from all participants for the use of their facial images and personal data for research purposes and publication before inclusion in the study.

3D Imaging

Subjects removed any jewelry and hair from the face, forehead, and ears to give full exposure of the area to be scanned. Male volunteers were asked to shave. All volunteers were asked to close their mouth without clenching the teeth and had to remain in a relaxed, neutral facial expression on the same chair with a fixed backrest. Volunteers had to take an upright, nonexcessive sitting position and close their eyes. Light conditions and background were not specifically changed in our consultation room to achieve conditions similar to real-life application. 3D Scan imaging was performed for each session with the mobile Sense 3D Scanner (3D Systems, South Carolina, USA), mobile Artec Eva (Artec 3D, Luxembourg) scanner, and the Vectra XT 3D Surface Imaging System (Canfield Inc, NJ, USA).

Conducted Measurements

A total of 17 anatomic landmarks were defined using the Mirror application (Canfield Scientific; NJ, USA). A total of 37 measurements were performed between those landmarks. The specified anatomic landmarks and the respective distance measurements are given in **Tables 1** and **2**. In addition, the upper face to face height index, lower face to face index, and mandibula to upper face height index were calculated using the Mirror application software.

Statistical Analysis

Analyses were performed using SPSS Statistics 27 (IBM, Armonk, NY, USA). The data are shown as the means \pm standard deviations, numbers, or percentages. Levene test was used to evaluate the distribution of quantitative data, and paired *t* test was used for data comparisons between the reference system (Vectra XT) and both mobile scanners (Sense and Artec). Differences were considered statistically significant at a probability level of 0.05 or less to guide conclusions.

RESULTS

Distance Measurements

Comparing all direct landmark measurements derived from the reference system, a mean

Table 2
Table displaying the respective investigated distances

Abbreviation/Full Name	Definition
Upper face-face height index	Nasion-stomion/ nasion-gnathion
Lower face-face height index	Subnasale-gnathion/ nasion-gnathion
Mandibula-face height index	Stomion-gnathion/ nasion-gnathion
Mandibula-upper face height index	Stomion-gnathion/ nasion-stomion
Mandibula-lower face height index	Stomion-gnathion/ subnasale-gnathion
Nasal index	Alare(r)-alare(l)/ nasion-subnasale
Upper lip height-mouth width index	Subnasale-stomion/ chelion(r)-chelion(l)
Cutaneous-total upper lip height index	Subnasale-labiale superius/ subnasale-stomion
Vermilion-total upper lip height index	Labiale superius-stomion/ Subnasale-stomion
Vermilion-cutaneous upper lip height index	Labiale superius-stomion/ subnasale-labiale superius
Vermilion height index	Labiale superius-stomion/stomion-labiale inferius
Interanthal-nasal width index	Endocanthion(r)-endocanthion(l)/ alare(r)-alare(l)
Nose-face height index	Nasion-subnasale/ nasion-gnathion
Nose-mouth width index	Alare(r)-alare(l)/ chelion(r)-chelion(l)
Upper lip-upper face height index	Subnasale-stomion/ nasion-stomion
Upper lip-mandible height index	Subnasale-stomion/ stomion-gnathion
Lower lip-face height index	Stomion-sublabiale/ subnasale-gnathion
Lower lip-mandible height index	Stomion-sublabiale/ stomion-gnathion
Nose-face height index	Nasion-subnasale/ nasion-gnathion

(continued on next page)

Table 2
(continued)

Abbreviation/Full Name	Definition
Nose-mouth width index	Alare(r)-alare(l)/ chelion(r)-chelion(l)
Upper lip-upper face height index	Subnasale-stomion/ nasion-stomion
Upper lip-mandible height index	Subnasale-stomion/ stomion-gnathion
Lower lip-face height index	Stomion-sublabiale/ subnasale-gnathion
Lower lip-mandible height index	Stomion-sublabiale/ stomion-gnathion
Nasal tip protrusion width index	Subnasale-pronasale/ alare(r)-alare(l)
Nasal tip protrusion-nose height index	Subnasale-pronasale/ nasion-subnasale
Lower-upper lip height index	Stomion-sublabiale/ subnasale-stomion
Cutaneous lower-upper lip height index	Labiale inferius-sublabiale/ subnasale-labiale superius
Vermilion-total lower lip height index	Stomion-labiale inferius/stomion-sublabiale
Vermilion-cutaneous lower lip height index	Stomion-labiale inferius/labiale inferius-sublabiale
Cutaneous-total lower lip height index	Labiale inferius-sublabiale/ stomion-sublabiale
Interanthal-mouth width index	Endocanthion(r)-endocanthion(l)/ chelion(r)-chelion(l)
Nose-upper face height index	Nasion-subnasale/ nasion-stomion
Nasal bridge index	Nasion-pronasale/ nasion-subnasale
Interalar width	Distance between Al(r) to Al(l)
Columella length	Distance between Sn to c'(c)
Nasofrontal angle	Angle from G to N to Ntp

l: left; r:right; Al: Ala; G:Glabella; N:Nasion; Ntp: Nasal tip; Sn: Subnasale; c'(c): columella center

deviation of 0.13 ± 2.71 mm (range: -10.26 to 13.9 mm) was found with the Artec scanner and -0.19 ± 3.8 mm (range: -14.09 to 18.9 mm) with the Sense scanner.

Table 3
Table displaying the respective measured distances for the facial measurements with the Vectra 3D imaging system (reference) and the Artec and the Sense 3D mobile scanners (± 1 standard deviation) and the respective *P* values

Abbreviation/Full Name	Vectra	Artec	<i>P</i> Value	Sense	<i>P</i> Value
Widow's peak-nasion	65.77 (9.2)	66.31 (8.5)	.454	67.23 (7.8)	.251
Exocanthion(r)-exocanthion(l)	94.23 (4.5)	95.62 (4.2)	.017 ^a	100.99 (6.8)	< .001 ^b
Endocanthion(r)-endocanthion(l)	27.87 (2.0)	28.42 (2.6)	.168	29.25 (2.6)	.009 ^a
Nasion-subnasale	56.66 (3.9)	56.54 (3.6)	.837	57.04 (2.5)	.595
Subnasale-pronasale	19.48 (1.4)	19.82 (1.9)	.330	19.41 (2.0)	.872
Subnasale-stomion	22.41 (2.9)	21.55 (2.5)	.016 ^a	20.57 (2.6)	< .001 ^b
Stomion-sublabiale	17.86 (2.3)	17.54 (2.0)	.341	17.84 (1.8)	.967
Nasion-stomion	77.75 (3.7)	77.04 (3.3)	.222	76.04 (3.4)	.006 ^a
Nasion-gnathion	120.84 (6.5)	120.33 (5.2)	.527	118.93 (5.1)	.043 ^a
Alare(r)-alare(l)	30.23 (3.0)	31.08 (3.5)	.004 ^a	28.49 (3.8)	< .001 ^b
Columella apex(c)-subnasale	9.76 (2.1)	10.98 (2.4)	< .001 ^a	10.18 (2.2)	.388
Subnasale-gnathion	66.15 (5.0)	66.59 (4.8)	.438	64.53 (4.8)	.035 ^a
Stomion-gnathion	43.79 (4.0)	44.92 (3.0)	.058	44.71 (3.4)	.135
Chelion(r)-chelion(l)	53.56 (3.9)	50.94 (3.9)	< .001 ^b	51.14 (4.8)	< .001 ^b
Subnasale-labiale superius	14.57 (2.8)	13.67 (2.3)	.038 ^a	13.69 (2.3)	.075
Labiale superius-stomion	8.49 (1.6)	8.76 (1.8)	.365	7.32 (1.1)	< .001 ^b
Labiale inferius-stomion	7.69 (2.0)	7.63 (2.1)	.802	8.20 (1.7)	.117
Labiale inferius-sublabiale	11.37 (1.3)	11.51 (1.6)	.627	10.44 (2.1)	.004 ^a
Sublabiale-gnathion	26.81 (2.4)	27.57 (2.5)	.122	26.98 (2.7)	.730

^a *P* < .05

^b *P* < .001

Measurements for the distances obtained with the investigated scanners are shown in **Table 3** with their respective averaged values and standard deviation, as well as *P* values when testing for statistically significant differences.

Facial Measurements

Facial indices for the observed scanners are shown in **Table 4** with their respective averaged values and 1 standard deviation, as well as statistical difference to the reference measurement (Vectra) as *P* value. The Artec and Sense mobile scanners measured statistically significant different values for the mandibula-face height index with *P* = .0012 and *P* = .004, respectively; for the mandibula-upper face height index with *P* = .022 and *P* < .001, respectively; and for the mandibula-lower face height index with *P* = .021 and *P* < .001, respectively (see **Table 4**).

NASAL MEASUREMENTS

Nasal measurements for the observed scanners are shown in **Tables 5** and **6** with their respective

averaged values and 1 standard deviation, as well as statistical difference to the reference measurement (Vectra) as *P* value. The Artec measured the nasal index, nose-mouth width index, interalar width, and the columella length statistically different with *P* = .017, *P* < .001, *P* = .038, and *P* < .001, respectively, when compared with the Vectra. The Sense measured the nasal index, intercanthal-nasal width index, the nose-upper face height index, nasal bridge index, interalar width, nasofrontal angle, and nasal tip protrusion width index statistically different with *P* = .002, *P* < .001, *P* = .013, *P* = .013, *P* < .001, and *P* = .008, respectively, when compared with the Vectra.

PERIORAL MEASUREMENTS

Perioral measurements for the observed scanners are shown in **Table 5** with their respective averaged values and 1 standard deviation, as well as statistical difference to the reference measurement (Vectra) as *P* value. The Artec measured the upper lip-mandible height index and the intercanthal-mouth width index statistically

Table 4
Table showing the mean measured indices (± 1 standard deviation) for the measured facial indices for Vectra, Artec, and Sense with the respective *P* values when compared with Vectra

Abbreviation/Full Name	Vectra	Artec	<i>P</i> Value	Sense	<i>P</i> Value
Upper face-face height index	0.658 (0.02)	0.664 (0.01)	.367	0.675 (0.02)	.328
Lower face-face height index	0.547 (0.03)	0.552 (0.03)	.180	0.542 (0.02)	.542
Mandibula-face height index	0.361 (0.02)	0.373 (0.02)	.012	0.376 (0.02)	.004
Mandibula-upper face height index	0.562 (0.04)	0.584 (0.04)	.022	0.588 (0.04)	< .001
Mandibula-lower face height index	0.661 (0.04)	0.676 (0.02)	.021	0.693 (0.03)	< .001

significantly different with $P = .014$ and $P < .001$, respectively, when compared with the Vectra. The Sense measured the upper lip-upper face height index, the upper lip-mandible height index, vermillion-total lower lip height index, vermillion-cutaneous lower lip height index, cutaneous-total lower lip height index, and intercanthal-mouth width index statistically significantly different with $P = .011$, $P = .011$, $P = .026$, $P = .016$, $P = .002$, $P = .003$, and $P < .001$, respectively.

Intrascanner Comparison

Intrascanner comparison for all assessments showed a high correlation for the Vectra system (Inter-class correlation coefficient (ICC), 0.861; confidence interval [CI], 0.771–0.952) and Artec Eva (ICC, 0.889; CI, 0.783–0.910), but a moderate correlation for Sense (ICC, 0.486; CI, 0.230–0.660).

DISCUSSION

This study investigated predefined measurements in the face and indices, created by the predefined measurements in 3 different 3D scanner systems (Vectra, Artec, and Sense). The results revealed that even inexpensive 3D scanners such as the consumer device Sense 3D and the industrial Artec Eva scanner can be used for valid measurements in the facial area. The results of the analysis show that the 3D facial images taken by the Artec Eva camera are largely comparable with those of the Vectra system, whereas 3D images using the Sense yielded significant deviations, especially for more complex surfaces.

Comparing all direct landmark measurements derived from the reference system, a mean deviation of 0.13 ± 2.71 mm (range: -10.26 to 13.93 mm) was found for the Artec scanner and -0.19 ± 3.81 mm (range: -14.09 to 18.92 mm).

Table 5
Table showing the mean measured distances and indices (± 1 standard deviation) for the nasal measurements for Vectra, Artec, and Sense with the respective *P* values when compared with Vectra

Abbreviation/Full Name	Vectra	Artec	<i>P</i> Value	Sense	<i>P</i> Value
Nasal index	0.540 (0.07)	0.558 (0.07)	.017	0.503 (0.07)	.002
Intercanthal-nasal width index	0.931 (0.11)	0.917 (0.09)	.315	1.042 (0.15)	< .001
Nose-face height index	0.469 (0.02)	0.468 (0.03)	.811	0.477 (0.02)	.142
Nose-mouth width index	0.562 (0.04)	0.614 (0.06)	< .001	0.558 (0.06)	.783
Nose-upper face height index	0.729 (0.03)	0.733 (0.03)	.360	0.746 (0.03)	.013
Nasal bridge index	1.374 (0.06)	1.368 (0.06)	.471	1.343 (0.05)	.013
Interalar width	30.563 (2.88)	31.202 (3.42)	.038	28.507 (3.79)	< .001
Columella length	9.829 (2.17)	11.296 (2.46)	< .001	9.898 (2.53)	.842
Nasofrontal angle	141.798 (6.68)	141.479 (6.57)	.469	144.199 (5.87)	.008
Nasal tip protrusion width index	0.648 (0.07)	0.642 (0.09)	.710	0.691 (0.10)	.029
Nasal tip protrusion-nose height index	0.345 (0.02)	0.353 (0.03)	.173	0.343 (0.03)	.940

Table 6
Table showing the mean measured distances and indices (± 1 standard deviation) for the perioral measurements for Vectra, Artec, and Sense with the respective *P* values when compared with Vectra

Abbreviation/Full Name	Vectra	Artec	<i>P</i> Value	Sense	<i>P</i> Value
Cutaneous-total upper lip height index	0.646 (0.07)	0.630 (0.08)	.393	0.664 (0.06)	0.189
Vermilion-total upper lip height index	0.380 (0.06)	0.412 (0.08)	.061	0.357 (0.04)	0.073
Vermilion height index	0.605 (0.15)	0.674 (0.19)	.083	0.546 (0.11)	0.077
Upper lip-upper face height index	0.289 (0.04)	0.279 (0.03)	.070	0.270 (0.03)	0.011
Lower lip-face height index	0.270 (0.03)	0.264 (0.03)	.236	0.277 (0.02)	0.252
Lower lip-mandible height index	0.398 (0.08)	0.394 (0.04)	.758	0.404 (0.04)	0.660
Upper lip height-mouth width index	0.417 (0.06)	0.423 (0.06)	.482	0.406 (0.07)	0.113
Vermilion-cutaneous upper lip height index	0.605 (0.15)	0.674 (0.19)	.084	0.546 (0.11)	0.077
Upper lip-mandible height index	0.516 (0.09)	0.478 (0.05)	.014	0.467 (0.08)	0.011
Lower-upper lip height index	0.805 (0.12)	0.824 (0.13)	.510	0.877 (0.11)	0.026
Cutaneous lower-upper lip height index	0.806 (0.16)	0.856 (0.13)	.115	0.778 (0.18)	0.335
Vermilion-total lower lip height index	0.426 (0.07)	0.432 (0.09)	.640	0.461 (0.09)	0.016
Vermilion-cutaneous lower lip height index	0.682 (0.17)	0.676 (0.21)	.855	0.829 (0.26)	0.002
Cutaneous-total lower lip height index	0.640 (0.06)	0.660 (0.07)	.131	0.583 (0.09)	0.003
Interanthal-mouth width index	0.521 (0.05)	0.561 (0.06)	< .001	0.576 (0.06)	< 0.001

for the Sense scanner. In a similarly designed study, Weinberg and colleagues²¹ compared 3D anthropometric measurements performed on mannequin heads, but without real-life test subjects. The results of Weinberg and colleagues²¹ revealed that the differences in the linear distances consistently stayed less than 1 mm. Some differences in our study were greater than 1 mm for the Artec and the Sense 3D scanner; however, the examination of test subjects, when compared with lifeless mannequin heads, could increase the variability and error due to subtle changes in facial expression and more complex surface properties.²² Moreover, de Menezes and colleagues²³ found that among repeated measurements of the facial area the results from the stationary Vectra system ranged from 0.13 to 1.19 mm.

In previous studies, an error of less than 2 mm was generally considered accurate and precise enough for the validation of 3D photogrammetry. However, a deviation of 1 to 2 mm may become relevant¹² in the clinical setting, for example,

when high-precision measurements are required; this is the case in maxillofacial surgery, in reconstructive and esthetic nose surgery, as well as in general facial surgery and especially in the assessment of postinterventional outcomes of soft tissue fillers.

Achieving harmony from cosmetic surgery often requires correcting disproportions. The proportions of the face and the absolute length of the facial structure are of immense value when it comes to assessing the facial profile of a patient in consultation, as well as in surgical planning and evaluation.²⁴ For this reason, we have included information on absolute face length and facial proportions. We could not show any statistical differences between the 3 scanners in the comparison of our 3D scanners. The variability was small. When compared with other studies, even the inexpensive scanner was able to display correct proportions.

The nose plays an integral role in the perception of facial attractiveness. Achieving angulations

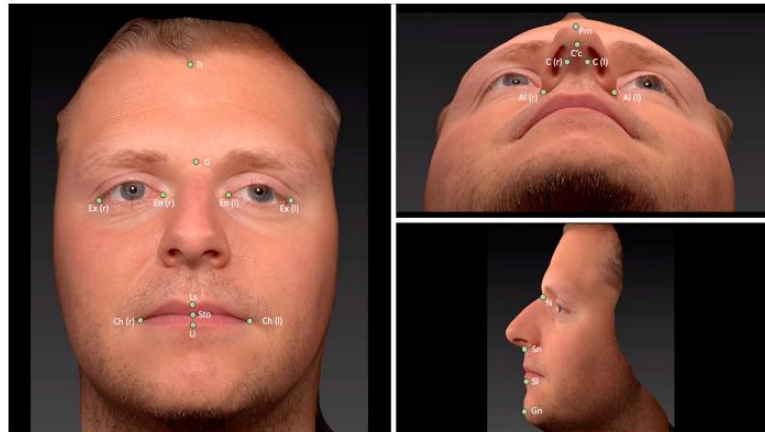


Fig. 1. Panel showing the respective landmarks used for the assessment of the respective distances and indices. Ex: Lateral canthus; En: Medial canthus; G: Glabella; Tr: Trichinion; Sto: Stoma; Ch: Cheilion; Li: Superior lip; Li: Inferior Lip; Al: Ala; C: Columella; C': Columella center; N: Nasale; Sn: Subnasale; Gn: Gonium.

within norms for a given patient will help achieve an esthetically pleasing nose. Abnormalities in angulations and facial proportions appear much worse than minor asymmetries or shape irregularities. We were able to show that the measurements acquired with the 3 different 3D systems did not differ statistically significantly in most instances. The dimensions of the nose are also an important factor in the assessment of the nose.

The dimensions and proportions of the mouth and lips are an essential part of the symmetry and aesthetics of the face and a frequent target of noninvasive interventions such as soft tissue-based lip enhancement.²⁵ With all 3 scanners we were able to capture the classic proportions of the lip and dimensions of the mouth.

As practical guidance, it should be noted that for the best scanning results, the patient needs to

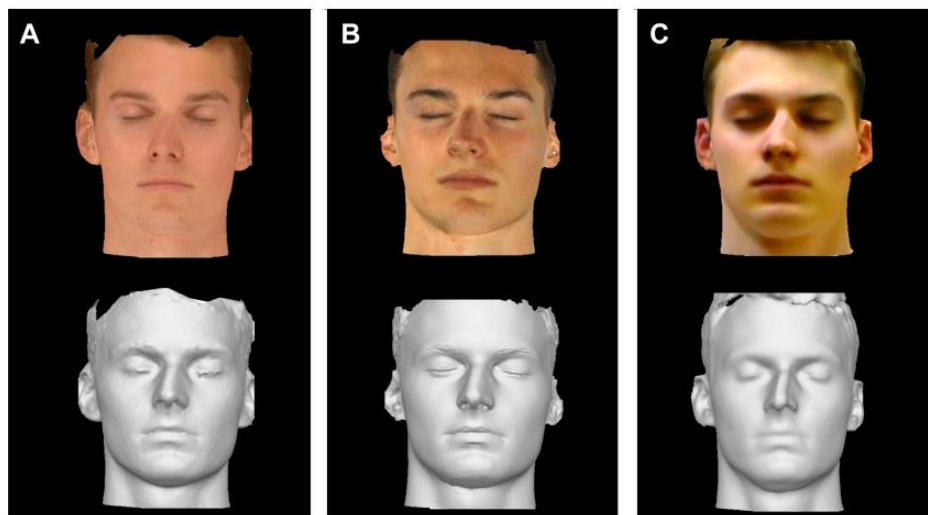


Fig. 2. Panel showing the frontal images acquired with the Vectra XT 3D Surface Imaging System (A), mobile Artec Eva scanner (B), and the mobile Sense 3D Scanner (C).

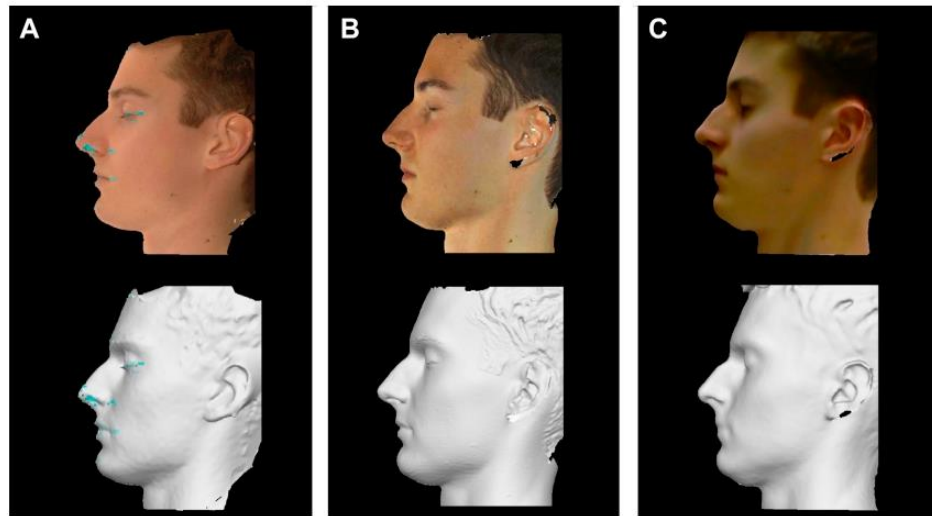


Fig. 3. Panel showing the lateral images acquired with the Vectra XT 3D Surface Imaging System (A), mobile Artec Eva scanner (B), and the mobile Sense 3D Scanner (C).

maintain a consistent position and facial expression throughout the recording process. Otherwise, motion artifacts could affect the final 3D model. The texture quality for Vectra and Artec Eva was excellent, whereas the textures of the Sense scanner were washed out and not representative of patient recordings; this can be seen in **Figs. 1–3**. Especially in esthetic consultations, this could have a negative impact on 3D patient counseling and, despite modest deviations, limits the usage of the 3D scanner for this application. An advantage for both portable devices is the mobile use of the camera in a variety of environments that is not limited to a particular stationary location. Potential locations for the use of the portable 3D scanners are the operating room, changing patient examination rooms in the clinic, and cross-location recordings.

Limitations of our study were the young volunteer collective investigated. Owing to limited age of the investigated volunteers, facial features such as severe rhytids or folds, which might be hard to depict accurately by the 3D imaging systems, were not present in most volunteers. Moreover, the landmark measurement was automated using the Canfield Sculptor software. However, owing to the coarse surface and weak texture of the Sense Scanner, the landmark placement was occasionally incorrect and was corrected manually. In contrast to other studies, we did not investigate the variability in the study, because this has already been validated several times with the

Canfield software. Despite automatic software-based landmark placement and verification by the examiner, examiner-dependent errors cannot be completely excluded.

Summary

This study investigated differences in facial acquisition and measurement between 3 different scans based on a relatively young and slim subject clientele. Especially for purely 2D distances as well as simple proportion and angle measurements, reliable measurements could be performed accurately by all investigated 3D systems. The results revealed that even with an affordable 3D scanner capturing the face and evaluating it using established classic measurements is, within mentioned limitations, possible.

CLINICS CARE POINTS

- Even inexpensive 3D scanners such as the consumer device Sense 3D and the industrial Artec Eva scanner can be used for valid measurements in the facial area. In guidance, it should be noted that for the best scanning results, the patient needs to maintain a consistent position and facial expression throughout the recording process.

AUTHOR DISCLOSURE

None of the other authors listed have any commercial associations or financial disclosures that might pose or create a conflict of interest with the methods applied or the results presented in this article.

REFERENCES

1. Koban K, Leitsch S, Holzbach T, et al. 3D bilderschulung und analyse in der plastischen chirurgie mit smartphone und tablet: eine alternative zu professionellen systemen? *Handchir · Mikrochir · Plast Chir*. 2014;46(02):97–104.
2. Koban KC, Titze V, Etzel L, et al. Quantitative volumetric analysis of the lower extremity: Validation against established tape measurement and water displacement. *Handchir Mikrochir Plast Chir* 2018;50(6):393–9.
3. Freytag DL, Alfertshofer MG, Frank K, et al. The difference in facial movement between the medial and the lateral midface: a 3D skin surface vector analysis. *Aesthet Surg J* 2021. <https://doi.org/10.1093/asj/sjab152>.
4. Corey CL, Popelka GR, Barrera JE, et al. An analysis of malar fat volume in two age groups: implications for craniofacial surgery. *Craniofacial Trauma Reconstr* 2012;5(4):231–4.
5. Koban KC, Härtnagl F, Titze V, et al. 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):1417–23.
6. Etzel L, Koban KC, Li Z, et al. [Whole-body surface assessment - implementation and experiences with 360° 3D whole-body scans: opportunities to objectively monitor the extremities and the body trunk]. *Handchir Mikrochir Plast Chir* 2019;51(4):240–8.
7. Cotozana S, Koban KC, Frank K, et al. The surface-volume-coefficient of the superficial and deep facial fat compartments – a cadaveric 3d volumetric analysis. *Plast Reconstr Surg* 2019;143(6):1605–13.
8. Koban KC, Titze V, Etzel L, et al. Quantitative volumetrische Analyse der unteren Extremität: Validierung gegenüber etablierter Maßbandmessung und Wasserverdrängung. *Handchir · Mikrochir · Plast Chir*. 2018;50(06):393–9.
9. Koban KC, Frank K, Etzel L, et al. 3D mammometric changes in the treatment of idiopathic gynecomastia. *Aesthetic Plast Surg* 2019;43(3):616–24.
10. 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. *Aesthet Surg J* 2019;39(4):NP36–44.
11. Koban KC, Leitsch S, Holzbach T, et al. [3D-imaging and analysis for plastic surgery by smartphone and tablet: an alternative to professional systems? *Handchirurgie, Mikrochirurgie, Plast Chir* 2014;46(2): 97–104.
12. Koban KC, Perko P, Etzel L, et al. 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):141–8.
13. 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. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/31251545>.
14. Lekakis G, Claes P, Hamilton GS 3rd, et al. Three-dimensional surface imaging and the continuous evolution of preoperative and postoperative assessment in rhinoplasty. *Facial Plast Surg* 2016;32(1): 88–94.
15. Koban K, Schenck T, Giunta R. Using Mobile 3D Scanning Systems for Objective Evaluation of Form, Volume, and Symmetry in Plastic Surgery: Intraoperative Scanning and Lymphedema Assessment. *Deutsche Gesellschaft für Plastische und Rekonstruktive Chirurgie Jahreskongress* 2016.
16. Haidar R, Freytag DL, Frank K, et al. Quantitative analysis of the lifting effect of facial soft-tissue filler injections. *Plast Reconstr Surg* 2021;147: 765e–76e.
17. Alfertshofer M, Frank K, Melnikov DV, et al. Performing Distance measurements in curved facial regions: a comparison between three-dimensional surface scanning and ultrasound imaging. *Facial Plast Surg* 2021. <https://doi.org/10.1055/s-0041-1725166>.
18. Hernandez CA, Freytag DL, Gold MH, et al. Clinical validation of the temporal lifting technique using soft tissue fillers. *J Cosmet Dermatol* 2020. <https://doi.org/10.1111/jocd.13621>.
19. Frank K, Freytag DL, Schenck TL, et al. Relationship between forehead motion and the shape of forehead lines-A 3D skin displacement vector analysis. *J Cosmet Dermatol* 2019. <https://doi.org/10.1111/jocd.13065>.
20. WMA Declaration of Helsinki – Ethical Principles for Medical Research Involving Human Subjects – WMA – The World Medical Association. Available at: <https://www.wma.net/policies-post/wma-declaration-of-helsinki-ethical-principles-for-medical-research-involving-human-subjects/>. Accessed August 5, 2018.
21. Weinberg SM, Naidoo S, Govier DP, et al. 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.

22. TJJ Maal, Verhamme LM, van Loon B, et al. Variation of the face in rest using 3D stereophotogrammetry. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2011;40(11):1252–7.
23. de Menezes M, Rosati R, Ferrario VF, et al. Accuracy and Reproducibility of a 3-Dimensional Stereophotogrammetric Imaging System. *J Oral Maxillofac Surg* 2010;68(9):2129–35.
24. Milutinovic J, Zelic K, Nedeljkovic N. Evaluation of facial beauty using anthropometric proportions. *ScientificWorldJournal* 2014;2014:428250.
25. Kar M, Muluk NB, Bafaqeeh SA, et al. Is it possible to define the ideal lips? *Acta Otorhinolaryngol Ital* 2018. <https://doi.org/10.14639/0392-100X-1511>.
26. Farkas LG, Tompson B, Phillips JH, et al. Comparison of anthropometric and cephalometric measurements of the adult face. *J Craniofac Surg* 1999; 10(1):18–25 [discussion: 26].
27. Swennen GRJ, Schutyser F, Hausamen JE, et al. Three-dimensional cephalometry: a color atlas and manual 2006. <https://doi.org/10.1007/3-540-29011-7>.

Literaturverzeichnis

1. Koban KC, Perko P, Li Z, Xu Y, Giunta RE, Alfertshofer MG, et al. 3D Anthropometric Facial Imaging - A comparison of different 3D scanners. *Facial Plast Surg Clin North Am* [Internet]. 2022 May 1;30(2):149–58. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1064740622000037>
2. Weissler JM, Stern CS, Schreiber JE, Amirlak B TO. The Evolution of Photography and Three-Dimensional Imaging in Plastic Surgery. No Title. *Plast Reconstr Surg* 2017 Mar;139(3):761-769 doi 10.1097/PRS.00000000000003146.
3. Eder M, Waldenfels F v., Sichtermann M, Schuster T, Papadopoulos NA, Machens HG, et al. Three-dimensional evaluation of breast contour and volume changes following subpectoral augmentation mammoplasty over 6 months. *J Plast Reconstr Aesthetic Surg* [Internet]. 2011 Sep;64(9):1152–60. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1748681511001537>
4. Jacobs RA. Three-Dimensional Photography. *Plast Reconstr Surg* [Internet]. 2001 Jan;107(1):276–7. Available from: <http://journals.lww.com/00006534-200101000-00049>
5. Mailey B, Baker JL, Hosseini A, Collins J, Suliman A, Wallace AM, et al. Evaluation of Facial Volume Changes after Rejuvenation Surgery Using a 3-Dimensional Camera. *Aesthetic Surg J* [Internet]. 2016 Apr;36(4):379–87. Available from: <https://academic.oup.com/asj/article-lookup/doi/10.1093/asj/sjv226>
6. Rho NK, Park JY, Youn CS, Lee SK, Kim HS. Early Changes in Facial Profile Following Structured Filler Rhinoplasty: An Anthropometric Analysis Using a 3-Dimensional Imaging System. *Dermatologic Surg* [Internet]. 2017 Feb;43(2):255–63. Available from: <https://journals.lww.com/00042728-201702000-00012>
7. Lekakis G, Claes P, Hamilton G, Hellings P. Three-Dimensional Surface Imaging and the Continuous Evolution of Preoperative and Postoperative Assessment in Rhinoplasty. *Facial Plast Surg* [Internet]. 2016 Feb 10;32(01):088–94. Available from: <http://www.thieme-connect.de/DOI/DOI?10.1055/s-0035-1570122>
8. Spanholtz T, Leitsch S, Holzbach T, Volkmer E, Engelhardt T, Giunta R. 3-dimensionale Bilderfassung: Erste Erfahrungen in der Planung und Dokumentation plastisch-chirurgischer Operationen. *Handchirurgie · Mikrochirurgie · Plast Chir* [Internet]. 2012 Aug 29;44(04):234–9. Available from: <http://www.thieme-connect.de/DOI/DOI?10.1055/s-0032-1316379>
9. Koban KC, Schenck T, Metz PM, Volkmer E, Haertnagl F, Titze V, et al. Auf dem Weg zur objektiven Evaluation von Form, Volumen und Symmetrie in der Plastischen Chirurgie mittels intraoperativer 3D Scans. *Handchirurgie Mikrochirurgie Plast Chir*. 2016 Apr 21;48(2):78–84.
10. Berssenbrügge P, Berlin NF, Kebeck G, Runte C, Jung S, Kleinheinz J, et al. 2D and 3D analysis methods of facial asymmetry in comparison. *J Cranio-*

- Maxillofacial Surg [Internet]. 2014 Sep;42(6):e327–34. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1010518214000304>
11. 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* [Internet]. 2020 Jan;73(1):141–8. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/31519501>
 12. Koban KC, Cotofana S, Frank K, Green JB, Etzel L, Li Z, et al. Precision in 3-Dimensional Surface Imaging of the Face: A Handheld Scanner Comparison Performed in a Cadaveric Model. *Aesthetic Surg J* [Internet]. 2019 Mar 14;39(4):NP36–44. Available from: <https://academic.oup.com/asj/article/39/4/NP36/5098271>
 13. Koban KC. Bedeutung der 3-D Evaluation volumetrischer Veränderungen in der Volumenaugmentation der fazialen Fettkompartimente am anatomischen Frischpräparat und in der plastisch-chirurgischen Behandlung der idiopathischen Gynäkomastie [Internet]. 2021. Available from: <https://edoc.ub.uni-muenchen.de/28010/>
 14. Knoops PGM, Beaumont CAA, Borghi A, Rodriguez-Florez N, Breakey RWF, Rodgers W, et al. Comparison of three-dimensional scanner systems for craniomaxillofacial imaging. *J Plast Reconstr Aesthetic Surg* [Internet]. 2017 Apr;70(4):441–9. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1748681517300141>
 15. Verhulst A, Hol M, Vreeken R, Becking A, Ulrich D MT. Three-Dimensional Imaging of the Face: A Comparison Between Three Different Imaging Modalities. *Aesthet Surg J* 2018 May 15;38(6):579-585 doi 10.1093/asj/sjx227 PMID 29360971.
 16. O'Connell RL, Khabra K, Bamber JC, deSouza N, Meybodi F, Barry PA, 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).
 17. Coltman CE, McGhee DE, Steele JR. Three-dimensional scanning in women with large, ptotic breasts: implications for bra cup sizing and design. *Ergonomics*. 2017;60(3).
 18. Taylor HO, Morrison CS, Linden O, Phillips B, Chang J, Byrne ME, et al. Quantitative Facial Asymmetry. *J Craniofac Surg* [Internet]. 2014 Jan;25(1):124–8. Available from: <http://journals.lww.com/00001665-201401000-00028>
 19. Li Y, Yang X, Li D. The Application of Three-Dimensional Surface Imaging System in Plastic and Reconstructive Surgery. *Ann Plast Surg* [Internet]. 2016 Aug;77(Supplement 1):S76–83. Available from: <https://journals.lww.com/00000637-201608001-00018>
 20. Jacono AA, Malone MH, Talei B. Three-dimensional analysis of long-term midface volume change after vertical vector deep-plane rhytidectomy. *Aesthetic Surg J*. 2015;35(5).
 21. Quan M, Fadl A, Small K, Tepper O, Kumar N, Choi M, et al. Defining

- pseudoptosis (bottoming out) 3 years after short-scar medial pedicle breast reduction. *Aesthetic Plast Surg*. 2011;35(3).
22. 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).
 23. KOBAN KC, GIUNTA RE. Using Mobile 3D Scanning Systems for Objective Evaluation of Form, Volume, and Symmetry in Plastic Surgery: Intraoperative Scanning and Lymphedema Assessment. In 2016.
 24. Etzel L, Koban KC, Li Z, Frank K, Giunta RE, Schenck TL. Whole Body Surface Assessment – Implementierung und Erfahrungen von 360° 3D Ganzkörperscans: Möglichkeiten zur Objektivierung und Verlaufskontrolle an den Extremitäten und am Körperstamm. *Handchirurgie · Mikrochirurgie · Plast Chir* [Internet]. 2019 Aug 14;51(04):240–8. Available from: <http://www.thieme-connect.de/DOI/DOI?10.1055/a-0836-2683>
 25. Cotofana S, Koban KC, Konstantin F, Green JB, Etzel L, Giunta RE, et al. The Surface-Volume Coefficient of the Superficial and Deep Facial Fat Compartments. *Plast Reconstr Surg* [Internet]. 2019 Jun;143(6):1605–13. Available from: <http://journals.lww.com/00006534-201906000-00014>
 26. Koban KC, Titze V, Etzel L, Frank K, Schenck T, Giunta R. Quantitative volumetrische Analyse der unteren Extremität: Validierung gegenüber etablierter Maßbandmessung und Wasserverdrängung. *Handchirurgie · Mikrochirurgie · Plast Chir* [Internet]. 2018 Dec 8;50(06):393–9. Available from: <http://www.thieme-connect.de/DOI/DOI?10.1055/a-0770-3445>
 27. Freytag DL, Alfertshofer MG, Frank K, Melnikov D V, Moellhoff N, Swift A, et al. The Difference in Facial Movement Between the Medial and the Lateral Midface: A 3-Dimensional Skin Surface Vector Analysis. *Aesthetic Surg J* [Internet]. 2022 Jan 1;42(1):1–9. Available from: <https://academic.oup.com/asj/article/42/1/1/6204413>
 28. Modabber A, Peters F, Kniha K, Goloborodko E, Ghassemi A, Lethaus B, et al. Evaluation of the accuracy of a mobile and a stationary system for three-dimensional facial scanning. *J Cranio-Maxillofacial Surg* [Internet]. 2016 Oct;44(10):1719–24. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1010518216301767>
 29. 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* [Internet]. 2018 Aug;76(8):1772–84. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0278239118300879>
 30. Camison L, Bykowski M, Lee WW, Carlson JC, Roosenboom J, Goldstein JA, et al. Validation of the Vectra H1 portable three-dimensional photogrammetry system for facial imaging. *Int J Oral Maxillofac Surg*. 2018 Mar 1;47(3):403–10.
 31. Top-Med. Vectra XT [Internet]. Available from: <https://www.canfieldsci.com/imaging-systems/vectra-xt-3d-imaging-system/>

32. Tzou CHJ, Artnr NM, Pona I, Hold A, Placheta E, Kropatsch WG, et al. Comparison of three-dimensional surface-imaging systems. *J Plast Reconstr Aesthetic Surg* [Internet]. 2014 Apr;67(4):489–97. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1748681514000047>
33. Tzou CHJ, Frey M. Evolution of 3D Surface Imaging Systems in Facial Plastic Surgery. *Facial Plast Surg Clin North Am* [Internet]. 2011 Nov;19(4):591–602. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1064740611000848>
34. Koban K, Leitsch S, Holzbach T, Volkmer E, Metz P, Giunta R. 3D Bilderfassung und Analyse in der Plastischen Chirurgie mit Smartphone und Tablet: eine Alternative zu professionellen Systemen? *Handchirurgie · Mikrochirurgie · Plast Chir* [Internet]. 2014 Apr 28;46(02):97–104. Available from: <http://www.thieme-connect.de/DOI/DOI?10.1055/s-0034-1371822>
35. Sasaki GH. The Safety and Efficacy of Cell-Assisted Fat Grafting to Traditional Fat Grafting in the Anterior Mid-Face: An Indirect Assessment by 3D Imaging. *Aesthetic Plast Surg* [Internet]. 2015 Dec 3;39(6):833–46. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/s00266-015-0533-5>
36. de Menezes M, Rosati R, Ferrario VF, Sforza C. Accuracy and Reproducibility of a 3-Dimensional Stereophotogrammetric Imaging System. *J Oral Maxillofac Surg* [Internet]. 2010 Sep;68(9):2129–35. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0278239109017406>
37. Schreiber JE, Turner J, Stern CS, Beut J, Jelks EB, Jelks GW, et al. The Boomerang Lift. *Plast Reconstr Surg* [Internet]. 2018 Apr;141(4):910–3. Available from: <http://journals.lww.com/00006534-201804000-00017>
38. Koudelová J, Brůžek J, Cagánová V, Krajíček V, Velemínská J. Development of facial sexual dimorphism in children aged between 12 and 15 years: a three-dimensional longitudinal study. *Orthod Craniofac Res* [Internet]. 2015 Aug;18(3):175–84. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ocr.12096>
39. Artec3D. Artec Eva Specifications [Internet]. Artec3D. 2021. Available from: <https://www.artec3d.com/portable-3d-scanners/artec-eva>
40. Modabber A, Peters F, Brokmeier A, Goloborodko E, Ghassemi A, Lethaus B, et al. Influence of Connecting Two Standalone Mobile Three-Dimensional Scanners on Accuracy Comparing with a Standard Device in Facial Scanning. *J Oral Maxillofac Res* [Internet]. 2016 Dec 28;7(4). Available from: <http://www.ejomr.org/JOMR/archives/2016/4/e4/v7n4e4ht.htm>
41. Yamamoto S, Miyachi H, Fujii H, Ochiai S, Watanabe S, Shimoizato K. Intuitive Facial Imaging Method for Evaluation of Postoperative Swelling: A Combination of 3-Dimensional Computed Tomography and Laser Surface Scanning in Orthognathic Surgery. *J Oral Maxillofac Surg* [Internet]. 2016 Dec;74(12):2506.e1-2506.e10. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S027823911630773X>
42. Conzález-Ulloa M. REGIONAL AESTHETIC UNITS OF THE FACE. *Plast Reconstr Surg* [Internet]. 1987 Mar;79(3):489. Available from: <http://journals.lww.com/00006534-198703000-00044>

43. Weinberg SM, Naidoo S, Govier DP, Martin RA, Kane AA, Marazita ML. Anthropometric Precision and Accuracy of Digital Three-Dimensional Photogrammetry. *J Craniofac Surg* [Internet]. 2006 May;17(3):477–83. Available from: <http://journals.lww.com/00001665-200605000-00015>
44. 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 Oct 1;71(10):1417–23.
45. Koban KC, Frank K, Etzel L, Schenck TL, Giunta RE. 3D Mammometric Changes in the Treatment of Idiopathic Gynecomastia. *Aesthetic Plast Surg* [Internet]. 2019 Jun 27;43(3):616–24. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/s00266-019-01341-5>
46. Koban KC, Leitsch S, Holzbach T et al. [3D-imaging and analysis for plastic surgery by smartphone and tablet: an alternative to professional systems?]. *Handchirurgie, Mikrochirurgie, Plast Chir Organ der Deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft für Handchirurgie Organ der Deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft für Mikrochirurgie der Peripher Nerven und Gefässe Organ der V..* 2014 Apr;46(2).
47. Sebastian Cotofana, Konstantin Koban, Tatjana Pavicic, Mariya Yankonva, Konstantin Frank, Jeremy B. Green, Robert H. Gotkin, Lukas Etzel, Riccardo E. Giunta TLS. Clinical Validation of the Surface Volume Coefficient for Minimally Invasive Treatment of the Temple. *J Drugs Dermatol* 2019 Jun 1;18(6)533 PMID 31251545.
48. Koban KC, Leitsch S, Holzbach T, Volkmer E, Metz PM, Giunta RE. 3D Bilderfassung und Analyse in der Plastischen Chirurgie mit Smartphone und Tablet: eine Alternative zu professionellen Systemen? *Handchirurgie Mikrochirurgie Plast Chir.* 2014;46(2).
49. Koban KC, Titze V, Etzel L, Frank K, Schenck T, Giunta R. Quantitative volumetric analysis of the lower extremity: Validation against established tape measurement and water displacement. *Handchirurgie Mikrochirurgie Plast Chir.* 2018;50(6).
50. David L Freytag, MD, Michael G Alfertshofer, Konstantin Frank, MD, Dmitry V Melnikov, MD, PhD, Nicholas Moellhoff, MD, Arthur Swift, MD, Stephan Heisinger, MD, Robert H Gotkin, MD, FACS, Denis Ehrl, MD, PhD, Sebastian Cotofana, MD P. The Difference in Facial Movement Between the Medial and the Lateral Midface: A 3-Dimensional Skin Surface Vector Analysis. *Aesthetic Surg Journal*, Vol 42, Issue 1, January 2022, Pages 1–9, <https://doi.org/101093/asj/sjab152>.
51. Corey CL, Popelka GR, Barrera JE MS. An analysis of malar fat volume in two age groups: implications for craniofacial surgery. *Craniofacial Trauma Reconstr* 2012 Dec;5(4)231-4 doi 101055/s-0032-1329545 Epub 2012 Oct 22 PMID 24294406; PMCID PMC3577599 [Internet]. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24294406/>

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei all jenen Menschen bedanken, die mich beim Verfassen meiner Doktorarbeit unterstützt haben.

Mein aufrichtiger Dank gilt Herrn Univ.- Prof. Dr. Giunta, der mich das gesamte Studium über unterstützend begleitet und gefördert hat und mich auch bei meiner Doktorarbeit ausgezeichnet betreut hat. Ich danke Herrn Univ.- Prof. Dr. Giunta für die Überlassung dieses spannenden Themas und die Erlaubnis, die Räumlichkeiten und die Untersuchungsgeräte an der Abteilung für Hand-, Plastische und Ästhetische Chirurgie am Klinikum der Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU) benutzen zu dürfen.

Ganz besonders möchte ich mich bei Herrn Dr. Koban für die hervorragende wissenschaftliche Betreuung bedanken. Durch seine fachliche Kompetenz, sein enormes Engagement, die konstruktiven Anregungen und den produktiven Austausch unterstützte er mich außerordentlich bei der Umsetzung der Arbeit.

Mein großer Dank gilt auch meiner Familie und meiner Ehefrau, die mich immer bestmöglich unterstützt haben.