Evaluation von 3D-Visualisierungsmethoden zur Darstellung von Weichteildefekten im Gesichtsbereich

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades

Doctor medicinae dentariae (Dr. med. dent.)

vorgelegt dem Rat der Medizinischen Fakultät der Friedrich-Schiller-Universität Jena

von Saskia Kappler

geboren am 10.08.1993 in Belzig, jetzt Bad Belzig

Gutachter (akademischer Grad, Vor- und Nachname sowie Wirkungsort)

1. PD Dr. med. habil Gerlind Schneider, Jena
2. Prof. Dr. med. habil. Randolf Riemann, Stade
3. Prof. Dr. Dr. Bernd Sigusch, Jena

Tag der öffentlichen Verteidigung: 30.11.2021

Meinen Eltern und meinem Ehemann in Liebe und Dankbarkeit

Abkürzungsverzeichnis 7

Zusammenfassung 8

1 Einleitung 10

2 Zielstellung 13

3 Methodik 14

3.1 Streifenlichtprojektion 14

3.1.1 Davidlaserscanner 3di GmbH Jena 14

3.1.2 Streifenlichtscanner 3D-NIR Sensor IRESTRA 18

3.2 Strukturlichtprojektion 20

3.2.1 Strukturlichtscanner Artec Eva 20

3.2.2 Strukturlichtscanner Artec Spider 22

3.2.3 Handyscanner iSense 23

3.3 Photogrammetrie 25

3.3.1 Eigenaufbau im Fotolabor der HNO-Klinik Jena 25

3.4 Stereophotogrammetrie 31

3.4.1 DI3D capture™ Stereophotogrammetrie-System 31

3.5 Gesichtsvermessungen 33

3.5.1 Manuelle Messung 36

3.5.2 Digitale Messung 36

4 Ergebnisse 38

4.1 Ergebnisse der 3D-Rekonstruktion des Gesichts 38

4.1.1 Davidlaserscanner 3di GmbH Jena 39

4.1.2 Streifenlichtscanner 3D-NIR Sensor IRESTRA 43

4.1.3 Strukturlichtscanner Artec Eva 45

4.1.4 Handyscanner iSense 47

4.1.5 Photogrammetrie: Fotolabor: Rekonstruktion Agisoft Photoscan 49

4.1.6 Photogrammetrie: Fotolabor: Regard 3D 54

4.1.7 DI3D capture™ Stereophotogrammetrie- System 59

4.2	Ergebnisse 3D- Rekonstruktion Ohrmuschel	62
4.2.1	Davidlaserscanner 3di GmbH Jena	62
4.2.2	Strukturlichtscanner Artec Spider	65
4.2.3	Streifenlichtscanner 3D-NIR Sensor IRESTRA	67
4.2.4	Rekonstruktion mit Agisoft Photoscan	69
4.3	Ergebnisse der manuellen Gesichtsvermessung	72
4.4	Ergebnisse der digitalen Gesichtsvermessung	75
5	Diskussion	80
5.1	Methodendiskussion	80
5.1.1	Score	80
5.1.2	Gesichtsvermessungen	81
5.2	Ergebnisdiskussion	83
5.2.1	Diskussion Fragestellung 1	84
5.2.2	Diskussion Fragestellung 2	90
5.2.3	Diskussion Fragestellung 3	92
5.2.4	Diskussion Fragestellung 4	94
5.2.5	Diskussion Fragestellung 5	97
5.2.6	Diskussion Fragestellung 6	98
6	Schlussfolgerung	100
7	Literaturverzeichnis	102
8	Anhang	109
8.1	Abbildungsverzeichnis	109
8.2	Tabellenverzeichnis	113
8.3	Tabellen zur manuellen Gesichtsvermessung	117
8.4	Tabellen zur digitalen Gesichtsvermessung	125
8.5	Ehrenwörtliche Erklärung	180

Abkürzungsverzeichnis

ISTI: Istituto di Scienza e Tecnologie dell'Informazione

CNR: National Research Council

stl: Standard Triangulation/Tesselation Language

obj: Wavefront: Dateiformat zum Speichern von dreidimensionalen Formen

Zusammenfassung

Kappler, Saskia

Evaluation von 3D-Visualisierungsmethoden zur Darstellung von Weichteildefekten im Gesichtsbereich

Aktueller Forschungsstand: Die Darstellung von Weichteildefekten im Gesichtsbereich erfolgt durch konventionelle Abformtechnik.

Zielstellung: Die unterschiedlichen 3D- Visualisierungsverfahren werden hinsichtlich ihrer Eigenschaften, Qualität und Eignung für die klinische Praxis verglichen. Weiterhin wird die Möglichkeit der Schaffung einer Alternative zur konventionellen Abformung für die Herstellung von Epithesen untersucht. Die Eignung einer manuellen Vermessung des Probandengesichtes und einer digitalen Vermessung der Scanergebnisse zur Beurteilung der Qualität wird bewertet.

Material und Methoden: Es werden 3D- Gesichtsmodelle desselben Probanden mit 6 unterschiedlichen Scanverfahren und 3 Modelle der Ohrmuschel mit 3 Scanverfahren angefertigt. Die aktiven Scanverfahren umfassten den Davidlaserscanner, die Handscanner Artec Eva und Artec Spider, den Handyscanner iSense und das IRESTRA- System, die passiven Scanverfahren waren die Photogrammetrie und die Stereophotogrammetrie . Das Gesicht des Probanden wird durch eine manuelle Vermessung durch 3 Untersucher anhand definierter Gesichtspunkte und Strecken quantifiziert. Anschließend wird eine digitale Vermessung der 3D- Modelle des Probandengesichtes durch 3 Untersucher entsprechend der gleichen Messpunkte und Strecken durchgeführt.

Ergebnisse und Diskussion: Die Scanverfahren werden hinsichtlich Scaneigenschaften, Qualität und Anwendbarkeit am Patienten mit Hilfe eines eigens erstellten Scores bewertet. Die geringste (= schlechteste) Gesamtpunktzahl des Scans der Gesichtsoberfläche von 11 Punkten erzielten die Versuche der Photogrammetrie und des Davidlaserscanners. Die höchste Punktzahl mit 19 Punkten erzielte das Stereophotogrammetriesystem DI3D capture. Der Handyscanner iSense erzielte aufgrund der einfachen Anwendung die gleiche höchste Punktzahl, wies aber eine sehr geringe Scanqualität auf. Aufgrund der einfachen Handhabung, der schnellen Generierung der Bilddaten und der hohen Scanqualität eignet sich der Handscanner Artec Eva und das

Stereophotogrammetriesystem für die Darstellung von Gesichtsdefekten. Bei der Bewertung der Scanergebnisse der Ohrmuschel erzielte der Handscanner Artec Spider mit 17 Punkten die höchste und der Davidlaserscanner 3di Jena mit 9 Punkten die niedrigste Gesamtpunktzahl. Aufgrund der hohen Scanqualität und der guten Anwendungseigenschaften eignet sich daher der Handscanner Artec Spider für die Darstellung der Ohrmuschel als komplexer Struktur.

Eine Quantifizierung der Gesichtsoberfläche war sowohl bei der manuellen und der digitalen Gesichtsvermessung schwer durchzuführen. Die Messergebnisse weichen selbst bei der ausschließlichen Betrachtung der qualitativ hochwertigen Scans deutlich sowohl im Vergleich der gleichen Messstrecke als auch in Relation zur manuellen Vermessung ab, die ebenfalls eine hohe Abweichung innerhalb der einzelnen Messungen aufweist.

Schlussfolgerung: Die Verfahren der Photogrammetrie, der Davidlaserscanner und der Handyscanner iSense sind nicht als Alternative zur konventionellen Abformung zur Darstellung von Gesichts- und Ohrdefekten geeignet. Die Verfahren der Stereophotogrammetrie, der Handscanner Artec Eva und das IRESTRA- System erzielten im Rahmen der Untersuchung vielversprechende Resultate. Dabei ist das Verfahren der Stereophotogrammetrie und der Handscanner Artec Eva aufgrund der benutzerfreundlichen Anwendungseigenschaften und der hohen Scanqualität für die klinische Anwendung zur Darstellung des Gesichtes geeignet.

Sowohl die manuelle Vermessung der Gesichtsoberfläche des Probanden als auch die digitale Vermessung eignen sich aufgrund der Zeitdauer und der Fehleranfälligkeit nicht zur Quantifizierung der Gesichtsoberfläche.

1 Einleitung

Bei der Behandlung einer Vielzahl von Krankheitsbildern steht der behandelnde Arzt in der heutigen Zeit unter Berücksichtigung verschiedener patientenspezifischer, verfahrenstechnischer und letztlich auch wirtschaftlicher Faktoren vor der Aufgabe, ein auf seinen Patienten individuell angepasstes Therapiekonzept zu entwickeln. Die Hals-, Nasen- und Ohrenheilkunde widmet sich unter anderem der Behandlung einer der sensibelsten Regionen des menschlichen Körpers, dem Gesicht. Bei der Behandlung von Defekten des Gesichtes und des äußeren Ohres spielt, zusätzlich zu den krankheitsbedingten funktionellen Einschränkungen, auch die Beeinträchtigung der Ästhetik, die eine massive psychische und damit soziale Einschränkung für den Patienten bedeuten kann, eine entscheidende Rolle. Ist ein chirurgischer Therapieansatz durch das Vorliegen eines großen Defektes oder eines schlechten Allgemeinzustandes des Patienten nicht möglich, so kann die Rekonstruktion durch eine Epithese als alternativer Behandlungsansatz herangezogen werden (Thiele et al. 2015).

Epithesen sind individuell angefertigte Nachbildungen von Gesichtsstrukturen (Abb.1), die aus medizinisch zugelassenen Silikonen hergestellt werden. Um dem natürlichen Vorbild des Gesichtes gerecht zu werden, wird die Epithese der Hautbeschaffenheit und Hautfarbe des Patienten exakt angepasst (Brom und Löser 2011).

Abbildung 1: Patient mit eingesetzter Nasenepithese

Die Grundlage für die Anfertigung einer solchen Epithese bildet die möglichst genaue Darstellung des Defektes und der Verankerung. Diese wird durch eine ca. 30 minütige Abformung des Gebietes mittels speziellem, schnell aushärtendem Abformmaterial realisiert. Anhand dieser Abformung wird ein anatomisches Modell erstellt, welches als Basis für die anschließende Anfertigung der Epithese dient. Diese konventionelle Art der Darstellung von Gesichtsdefekten durch eine Abformung kann alternativ durch optische Scanverfahren des Gesichtes ersetzt werden, die im Anschluss eine dreidimensionale Darstellung ermöglichen. Innerhalb dieser Dissertation werden Scanverfahren mit verschiedenen Aufnahmemechanismen untersucht und verglichen. Die verschiedenen Methoden zur Generierung von Oberflächendaten können in passive und aktive Verfahren unterteilt werden (Abb.2). Die passiven Scanverfahren bringen keine Energie ein und sind somit von der Reflexion des Objektes abhängig. Bei den aktiven Oberflächen-Scanverfahren wird hingegen Energie ausgesendet und die vom Objekt reflektierte Energie wiederaufgenommen. Aus diesen Informationen kann dann die 3D-Gestalt des Objektes rekonstruiert werden.

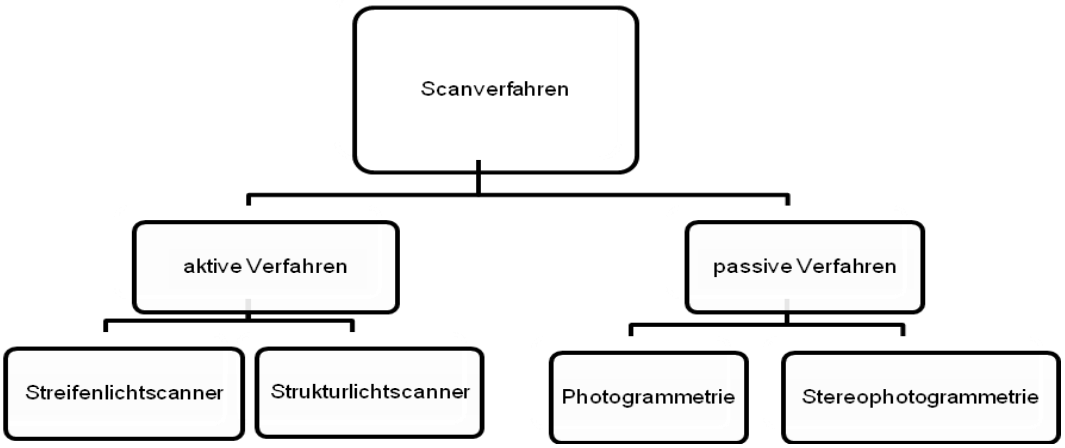

Abbildung 2: Übersicht der Scanmethoden zur Datenerfassung nach (Gühring 2002)

Die aktiven Scanverfahren der Struktur- und Streifenlichtprojektion bestehen aus drei Basiskomponenten, die in einem aktiven Triangulationsverfahren interagieren. Ein Projektor dient als „aktiver Musterspender“ (Engelmann 2011) und überträgt ein flächenhaftes Muster auf das Objekt. Die in definiertem Abstand und Länge positionierte Kamera arbeitet synchron und nimmt dieses objektspezifisch deformierte Muster auf (Przybilla 2007). Sowohl die exakte Anordnung der Komponenten als auch deren Auflösungsvermögen bestimmen die Genauigkeit des Scans. Die Herausforderung, die sich bei Durchführung von mehreren Scans oder bei der Anwendung von mehreren synchron arbeitenden Kameras ergibt, ist die exakte Zuordnung eines Bildpunktes in verschiedenen Bildern. Um die gewünschte hohe Genauigkeit zu erreichen, müssen die Punkte der Bildebene der Kamera subpixelgenau dem Projektor zugeordnet werden (Przybilla 2007).

Das passive Scanverfahren der Photogrammetrie beruht auf dem mathematischen Modell der Zentralperspektive und beschreibt damit die „Rekonstruktion eines Gegenstands aus ebenen Perspektiven“ (Finsterwalder 2013). Durch die Erstellung von überlappenden Bildern aus verschiedenen Perspektiven kann das Objekt im dreidimensionalen Raum definiert werden. In der anschließenden Bildverarbeitung werden die erstellten Bilder untereinander abgeglichen, um homologe Punkte zu identifizieren (Rodehorst 2004). Durch die Anwendung einer effizienten Verarbeitungssoftware für die Erstellung von dreidimensionalen Objektrekonstruktionen aus einer überlappenden Bilderserie werden Arbeitsschritte, wie die Festlegung der inneren und äußeren Orientierung (d.h. Bildorientierung und Kamerakalibrierung) sowie die Erstellung von Punktwolken und Oberflächenmodellen realisiert.

Das Verfahren der Stereophotogrammetrie ist ein Spezialfall der Photogrammetrie. Es funktioniert analog zu der Fähigkeit des Menschen, aus den zwei durch den stereoskopischen Sehvorgang gegebenen Perspektiven ein Raummodell zu bilden. Die dreidimensionale Rekonstruktion des Gesichtes wird aus Bildern erstellt, die zur gleichen Zeit aus unterschiedlichen Perspektiven erstellt wurden. Hierfür werden zwei oder mehrere Kameras verwendet, die zu einem Stereopaar miteinander verbunden sind (Kau et al. 2007).

2 Zielstellung

Die Anwendung eines optischen Scanverfahrens zur Darstellung der Gesichtsoberfläche bietet die Möglichkeit, die konventionelle Methode der Abformung zu ersetzen.

Dabei sollen folgende Fragestellungen beantwortet werden:

- Wie unterscheiden sich die unterschiedlichen Scanverfahren hinsichtlich Fehleranfälligkeit, Vor- und Nachbearbeitungsaufwand und Untersuchungsbedingungen hinsichtlich Zeitmanagement und Patientenkomfort?
- Ist auch die Abbildung komplexer Strukturen möglich?
- Welches Kosten-Nutzen-Verhältnis besteht zwischen den untersuchten Scanverfahren hinsichtlich einer ausreichenden Scanqualität?
- Sind die Scanverfahren hinsichtlich ihres Untersuchungsaufwandes und ihrer Qualität gleichwertig und kann eine Anwendbarkeit in die klinische Praxis abgeleitet werden?
- Eignen sich die Scanverfahren für die Generierung der Datengrundlage zur Herstellung von Epithesen und können somit eine Alternative zur konventionellen Abformung darstellen?

- Ist die Abweichung der einzelnen digitalen Scanergebnisse vom realen Gesicht durch eine Gesichtsvermessung zu ermitteln?

Im klinischen Alltag ist der behandelnde Arzt häufig auf die Erstellung von Abbildungen zur Beurteilung, Verlaufsdokumentation oder Therapieplanung angewiesen. Standard sind aktuell zweidimensionale fotografische Abbildungen, die mehr oder weniger professionell aufgenommen werden. Für die komplexen Gesichtsstrukturen sind dreidimensionale Darstellungen viel aussagekräftiger und können die Strukturen komplett abbilden. 3D-Darstellungen sind im speziellen Fall die Grundlage für die Modellerstellung von Epithesen oder individualisierten Implantaten. Diese Modelle können als Basis für die Anpassung der weiteren Herstellungsschritte wie der Anwendung eines additiven Druckverfahrens, dienen.

3 Methodik

3.1 Streifenlichtprojektion

3.1.1 Davidlaserscanner 3di GmbH Jena

Der verwendete Streifenlichtscanner ist eine Konstruktion, die in Aufbau und Software dem Bauprinzip des an der TU Braunschweig entwickelten Davidlaserscanners entspricht und sich aus einem Taschenbeamer und einer darunter angebrachten Webkamera (Logitech® Webcam Pro 9000, Logitech international SA, Schweiz) zusammensetzt. Im Unterschied zur ursprünglichen Konstruktion wird hier das strukturierte Licht nicht durch einen Laser, sondern durch den als Projektor dienenden Taschenbeamer erzeugt. Der Gesamtaufbau der 3di GmbH Jena, im Weiteren 3di genannt, wurde für die Darstellung des Mittelgesichts entwickelt. Diese Scankomponenten wurden beweglich auf einer Viertelkreisschiene montiert. Eine Kinn-Kopfstütze, die auf einer beweglichen Grundplatte angebracht war, vereinfachte die Positionierung des Probanden (Abb.3).

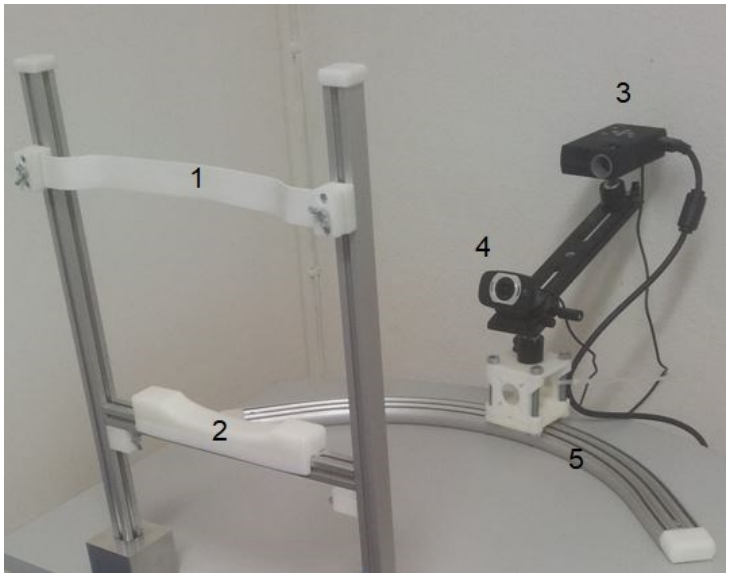

Abbildung 3: Versuchsaufbau Davidlaserscanner 3di GmbH Jena

1: Kopfstütze
2: Kinnstütze
3: Taschenbeamer
4: Kamera
5: Viertelkreisschiene

Zu Beginn des Versuches wurde mit Hilfe einer Kalibrierungszeichnung die korrekte Ausrichtung der Aufnahmeeinheit vorgenommen, indem der Aufnahmewinkel von 20 Grad zwischen Taschenbeamer und Kamera eingestellt wurde. Der Aufnahmeraum musste vollständig verdunkelt werden.

Unter Ausnutzung der Möglichkeit der freien Positionierung der Aufnahmeeinheit auf der Viertelkreisschiene wurden drei unterschiedliche Versuche geplant. Dabei sollte die mögliche Verbesserung der Genauigkeit durch die Erhöhung der Anzahl der Aufnahmen der Gefahr von Bewegungsartefakten bei längerer Aufnahmedauer gegenübergestellt werden.

1. Aufnahme Gesichtsstrukturen

1.1 Versuch mittels Standardpositionierung

Im ersten Versuch wurde jeweils ein Scan aus drei definierten Positionen (45Grad, frontal (0 Grad) und -45 Grad) erstellt. Bei jeder neuen Position wurde der Kamerafokus erneut an die Bildmitte durch Drehen des Aufbaus angepasst, wobei der Winkel zwischen Projektor und Kamera nicht verändert werden durfte.

Während der Aufnahme sollte der Proband die Augen geschlossen halten und möglichst flach atmen, um Bewegungsartefakte zu minimieren.

1.2 Versuch mit vier Scanpositionen

In diesem Versuch wurde zusätzlich zu den drei definierten Positionen ein vierter Scan in einer frei wählbaren Position angefertigt.

1.3 Versuch mit sieben Scanpositionen

Im dritten Versuch wurden ausgehend von der frontalen Winkeleinstellung sieben Aufnahmen in freier Positionierung angefertigt. Der Fokus wurde in der frontalen Position zu Beginn des Versuchs auf die Bildmitte ausgerichtet und während der weiteren sechs Aufnahmen nicht mehr verändert, um die erhöhte Aufnahmezeit durch die Reduktion der Zeit für die Neupositionierung der Aufnahmeeinheit zu kompensieren.

2. Aufnahme Ohrmuschel

2.1 Versuch mit vier Scanpositionen

Es wurden vier Scans der linken Ohrmuschel durch eine freie Positionierung der Einheit erstellt.

2.2 Versuch mit sieben Scanpositionen

Es wurden sieben Scans der linken Ohrmuschel durch eine freie Positionierung der Einheit erstellt.

Für die Bearbeitung der Rohdaten aus allen fünf Versuchen wurde die open source-Software „David 3D Scanner“ verwendet (Winkelbach und Molkenstruck 2017). Die Genauigkeit des Programmes wird mit 0,05 mm angegeben (Gartner 2013). Die Randbereiche der als Rohdaten vorliegenden Aufnahmen wurden zunächst manuell beschnitten und anschließend wurde das Alignment dieser Aufnahmen vorgenommen. Nachfolgend wurden diese Aufnahmen zu einem 3D-Polygonnetz des Gesichtes (Abb.4) sowie der Ohrmuschel (Abb.5) fusioniert.

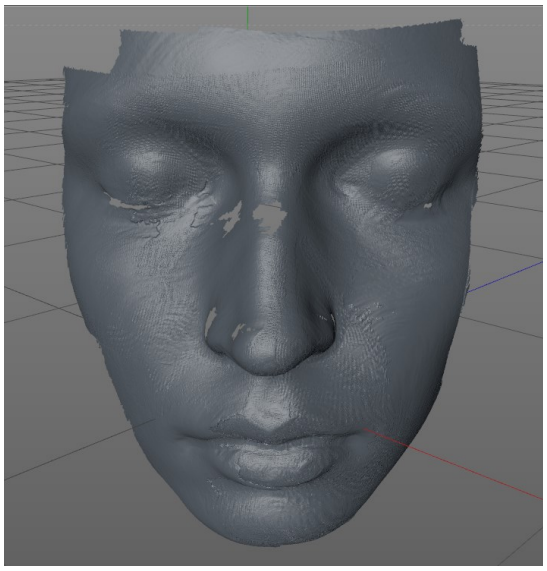

Abbildung 4: Polygonnetz Gesicht
Davidlaserscanner 3di GmbH Jena

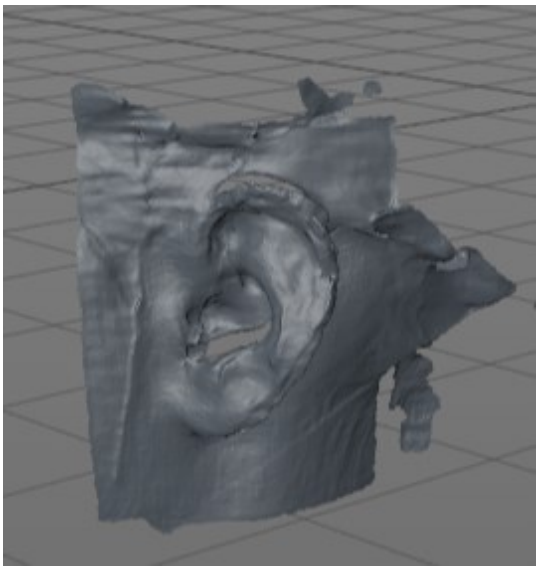

Abbildung 5: Polygonnetz Ohrmuschel
Davidlaserscanner 3di GmbH Jena

Zur Verbesserung der Übergänge im Nasen- und Kinnbereich und der Kurvatur der Ohrmuschel wurde hier noch zusätzlich ein manuelles Alignment mit dem zur Verfügung stehenden Tool des Programmes durchgeführt. Die 3D-Daten lagen nach der endgültigen Verarbeitung im .stl-Format (stl = Standard Triangulation/Tesselation Language) vor.

3.1.2 Streifenlichtscanner 3D-NIR Sensor IRESTRA

Der Streifenlichtscanner 3D-NIR Sensor IRESTRA ist ein Prototyp des Fraunhofer IOF in Jena. Er besteht aus zwei monochromen Kameras, einer Farbkamera und dem dazugehörigen NIR-(=Nahinfrarot-) Projektor zur Erzeugung des Musters (Abb.6).

Abbildung 4: Streifenlichtscannner 3D-NIR Sensor IRESTRA

1: monochrome Kameras
2: Farbkamera
3: NIR-Projektor

Für die Durchführung der Versuche wurde der Aufnahmeraum abgedunkelt und der Scanner wurde in einem mit dem Aufnahmebereich der Kameras abgestimmten Abstand (zwischen 1,3 und 1,4 m) positioniert.

1. Aufnahme Gesichtsstrukturen

Zur Generierung der Datengrundlage des ersten 3D-Modells wurden zwei hintereinander folgende Messreihen durchgeführt. Der Proband wurde dazu jeweils seitlich und frontal positioniert, um für die anschließende Fusionierung eine Datenbasis des Gesichtes aus zwei Perspektiven zur Verfügung zu haben (Abb.7).

2. Aufnahme Ohrmuschel

Zur vollständigen Darstellung der Ohrmuschel wurde noch eine zusätzliche Messreihe erstellt. Aus der seitlich angefertigten Messreihe der 1. Aufnahme konnte durch den großen Aufnahmebereich bereits die Darstellung der vorderen Partien der Ohrmuschel gewährleistet werden. Der Proband wurde in dieser dritten Messreihe von hinten gescannt, um den schwer zu erreichenden Hinterschnitt der Ohrmuschel abzubilden (Abb.8).

Abbildung 5: Fusionsergebnis Gesicht
Streifenlichtscanner 3D-NIR Sensor IRESTRA

Abbildung 6: Fusionsergebnis Ohrmuschel
Streifenlichtscanner 3D-NIR Sensor IRESTRA

3.2 Strukturlichtprojektion

3.2.1 Strukturlichtscanner Artec Eva

Der Artec Eva (Artec 3D, Luxemburg, LUX) ist ein handgeführter Strukturlichtscanner (Abb.9), der bis zu 16 Bilder pro Sekunde aufnehmen kann und eine Auflösung von bis zu 0,5 mm besitzt (Artec 3D 2020a).

Abbildung 7: Strukturlichtscanner Artec Eva

1: Projektor
2: Texturkamera
3: LED- Projektor
4: 3D Kamera
5: Handgriff

(Artec 3D 2020a)

Für den vorliegenden Versuch wurde der Scanner zunächst mit einem Lenovo THINKPAD Laptop (Lenovo Group Limited, China) über einen USB 2.0-Anschluss verbunden. Im dazugehörigen Scan- und Konstruktionsprogramm Artec Studio 9® sind die Scanparameter bereits voreingestellt.

Der Raum wurde entsprechend den Anwendungsempfehlungen des Herstellers abgedunkelt. Um reflektierende Regionen des Gesichtes zu eliminieren, musste der Proband abgepudert werden.

Der Kopf wurde zunächst in horizontaler Richtung von Ohr zu Ohr und danach von Stirn zu Kinn systematisch mit dem Handscanner überlappend abgetastet. Während des gesamten Scanvorgangs von ca. zwei Minuten hatte der Anwender die Möglichkeit, den Rohscan in Echtzeit auf dem Laptop zu beurteilen und entstandene Lücken im Scan durch erneutes Aufnehmen der entsprechenden Region zu schließen. Durch ein akustisches Signal wurde der korrekte Abstand von Objekt zu Scanner bestätigt.

Durch die Auswahl des Modus „*continuous scanning*“ in der Software Artec Studio 9® wurden die Scandaten automatisch vorausgerichtet. Um eine noch genauere Ausrichtung der Daten zu erreichen, wurde der „*global registration*“-Modus angewendet, in dessen Verlauf alle Bilder einzeln und untereinander abgeglichen werden. Die Scans wurden anschließend über die „*sharp fusion*“ zu einem 3D-Modell des Gesichtes vereinigt (Abb.10). Der Datensatz wurde als .stl-Datei gespeichert.

Abbildung 8: Fusionsergebnis Strukturlichtscanner Artec Eva

3.2.2 Strukturlichtscanner Artec Spider

Die Darstellung des Außenohres wurde mit dem Strukturlichtscanner Artec Spider (Artec 3D, Luxemburg, LUX) durchgeführt (Abb.11).

Abbildung 9: Artec Spider

1: 3D Kamera
2: LED Projektor
3: Texturkamera
4: 3D Kamera
5: 3D Kamera
6: Projektor

(Artec 3D 2020b)

Dieser Scanner soll für die Anwendung an kleinen Strukturen mit hohen Genauigkeitsanforderungen geeignet sein. Die Vorbereitung und Durchführung des Scans sowie die weitere Verarbeitung der Daten erfolgte analog dem in 3.2.1 beschriebenen Vorgehen.

3.2.3 Handyscanner iSense

Der 3D-Scanner iSense (3D Systems, Rock Hill, SC, USA) ist ein mobiler 3D-Scanner für die Anwendung mit dem iPhone oder iPad (Abb.12).

Abbildung 10: Handyscanner iSense

1: iPhone 6
2: Handyscanner iSense
3: Datenkabel

Im vorliegenden Versuch wurde der Scanner in Verbindung mit einem iPhone 6 verwendet. Der Scanner wurde hierfür auf dem Handy angebracht und das Datenkabel angeschlossen. Die benötigte iSense App (3D Systems, Rock Hill, SC, USA) wurde auf dem iPhone installiert. In den Voreinstellungen wurde das Scannen des Kopfbereichs einer Person ausgewählt. Der Proband wurde dem Tageslicht zugewandt positioniert. Die Navigation des Scans erfolgte über den Bildschirm des Handys. Der angegebene ideale Scanabstand von 15 Zoll, umgerechnet ca. 38 cm, wurde zu Anfang ausgemessen, die Einhaltung konnte während des Scans allerdings nicht überprüft werden. Der Scanvorgang dauerte zwei Minuten. Der erstellte Scan wurde durch die Bearbeitungstools zunächst zugeschnitten, dann verfestigt und durch die Verbesserungstools automatisch angepasst. Der Datensatz wurde als .stl-Datei gespeichert (Abb.13).

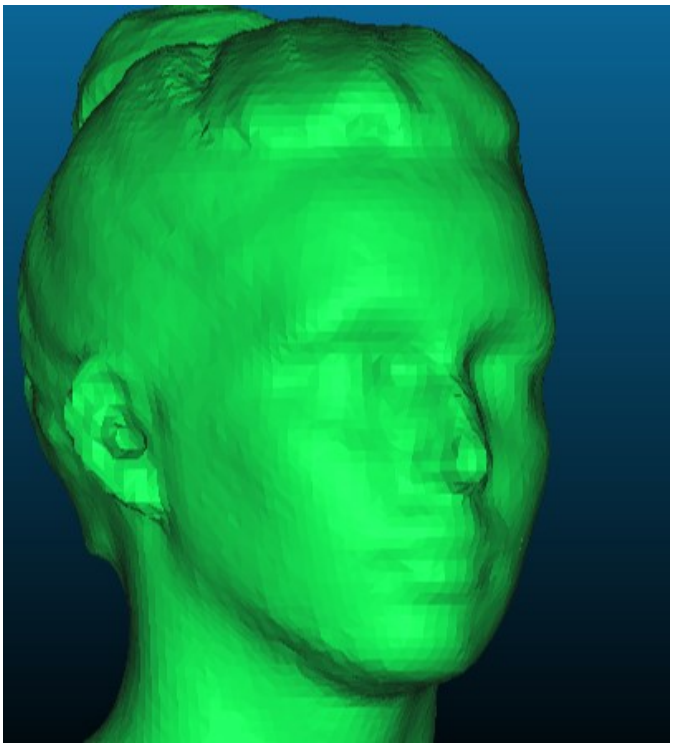

Abbildung 11: Fusionsergebnis Handyscanner iSense

3.3 Photogrammetrie

3.3.1 Eigenaufbau im Fotolabor der HNO-Klinik Jena

Für die Generierung von dreidimensionalen Oberflächendaten aus digitalen Fotografien mithilfe eines Konstruktionsprogrammes wurde im Rahmen dieser Dissertation in Zusammenarbeit mit dem Fotolabor der Poliklinik für Hals-, Nasen- und Ohrenheilkunde des Universitätsklinikums Jena ein eigener Versuchsaufbau entwickelt. Die Umgebungsbedingungen wurden dabei an die Empfehlung der zu verwendenden Konstruktionssoftware Agisoft Photoscan Professional angepasst. Die verwendete DSLR-Kamera (Nikon D90, Nikon Corporation, Chiyoda, Japan) wurde auf einem verstellbaren Stativ befestigt, um die Aufnahmen in verschiedenen Höhen durchführen zu können. Für alle Aufnahmen wurde eine Brennweite von 35 mm verwendet. Der Proband wurde auf einem umgebauten Drehstuhl platziert. Dieser wurde zu der bestehenden Armstütze noch durch Kopf- und Beinstützen ergänzt, um den Probanden möglichst ruhig zu positionieren und um Bewegungsartefakte zu vermeiden (Abb.14, 15).

Abbildung 12: Versuchsaufbau Photogrammetrie

1: Kopfstütze
2: Drehstuhl
3: Winkelmesser

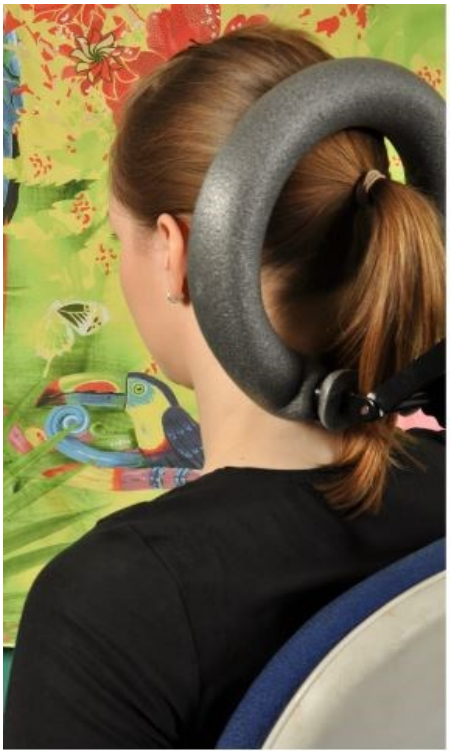

Abbildung 13: Positionierung des Probanden zur Erstellung der Fotografien

Um die Aufnahmen immer von den gleichen Positionen vornehmen zu können, die geforderte Überlappung der Bilder zu erreichen und damit die Versuchszeit zu reduzieren, wurde zusätzlich ein Winkelmesser in Form einer Scheibe am Fuß des Stuhls angebracht (Abb.16). Die Winkeleinteilung wurde hier in Form einer 240 Grad Kreisbahn mit einer 10 Grad -Einteilung vorgenommen. Die Aufnahmen aus diesen 24 verschiedenen Positionen wurden in zwei Fotoserien erstellt.

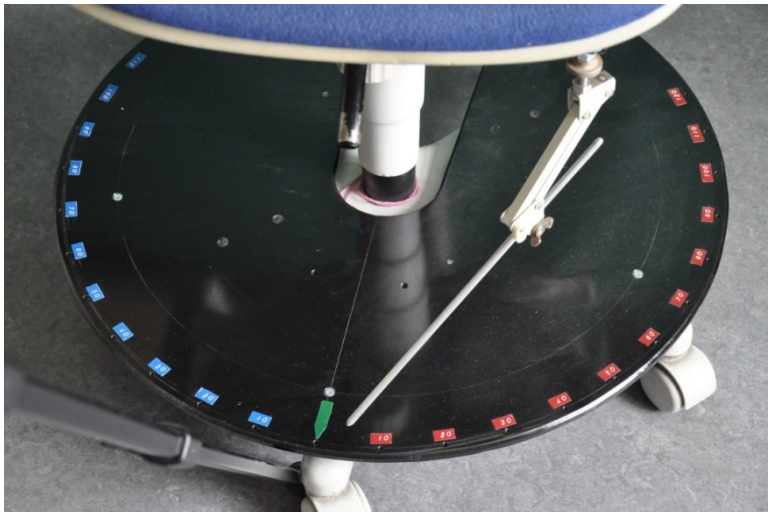

Abbildung 14: Winkeleinteilung

<u>1. Aufnahme Gesichtsstrukturen</u>

1. Fotoserie: Bewegung der Kamera

Der Proband wurde in 0 Grad -Stellung auf den Stuhl positioniert und die Aufnahmen wurden in den definierten Winkelabständen durch die Bewegung der Kamera um den still sitzenden Probanden erstellt. Die 24 Fotografien wurden jeweils in verschiedenen Höhen angefertigt.

2. Fotoserie: Bewegung des Probanden

Der Proband wurde in +240 Grad Ausgangsstellung auf dem Stuhl positioniert. Die Aufnahmen wurden in den definierten Winkelabständen durch die Drehung des Stuhls mit dem Probanden erstellt, wobei die Kamera auf dem Stativ fest positioniert war. Die 24 Bilder wurden ebenfalls in verschiedenen Höhen angefertigt.

2. Aufnahme Ohrmuschel

Der Proband wurde hierzu seitlich auf dem Stuhl positioniert. Alle weiteren Parameter wurden wie zuvor für die Abbildung des Gesichtes eingestellt. Es wurden nach gleichem Versuchsablauf zwei Fotoserien erstellt.

Die vier erstellten Fotoserien boten die Datengrundlage, um mit den zwei nachfolgenden Rekonstruktionsprogrammen der Photogrammetrie die Umwandlung der zweidimensionellen Bildserien in dreidimensionale Gesichtsmodelle zu ermöglichen. Alle vier Fotoserien wurden mit beiden nachfolgenden Programmen rekonstruiert.

Software Agisoft Photoscan Professional

Die erste verwendete photogrammetrische Rekonstruktionssoftware ist das Programm Agisoft Photoscan Professional (Agisoft LLC, St. Petersburg, Russia). Innerhalb dieser Software identifiziert und verknüpft der Programmalgorithmus charakteristische Punkte des Objektes über die gesamte Bildreihe miteinander und erstellt so ein dreidimensionales Modell. Aus den Bildern der erstellten Fotoserien wurden nach dem vollständigen *1. Laden der Bilder* im Verarbeitungsschritt *2. Alignment* überlappende Punkte in allen Bildern detektiert. Aus diesen Punkten wurden Punktpaare gebildet und übereinandergelegt. Anschließend wurde die Position der Kamera anhand jedes einzelnen Bildes bestimmt. Die gewünschte Genauigkeit kann durch den Benutzer angegeben werden. Für diese Rekonstruktion wurde eine hohe Genauigkeit ausgewählt. Für die im Weiteren erstellte Punktwolke, *3. Erstellen der Punktwolke (Dense Cloud)*, wurde ebenfalls eine hohe Qualität eingestellt. Im Anschluss wurde das texturierte Modell/ Netz, *4. Erstellen des Netzes (Mesh),* unter Anwendung der vom Programm vorgegebenen Paramater erstellt. Das fertige Modell kann in unterschiedlichen Ansichten, mit und ohne Textur, dargestellt werden, *5. Ansicht des Modells* (Abb.17). Der Export des Modells wurde im .stl-Format vorgenommen (Abb.18).

Workflow Agisoft Photoscan Professional

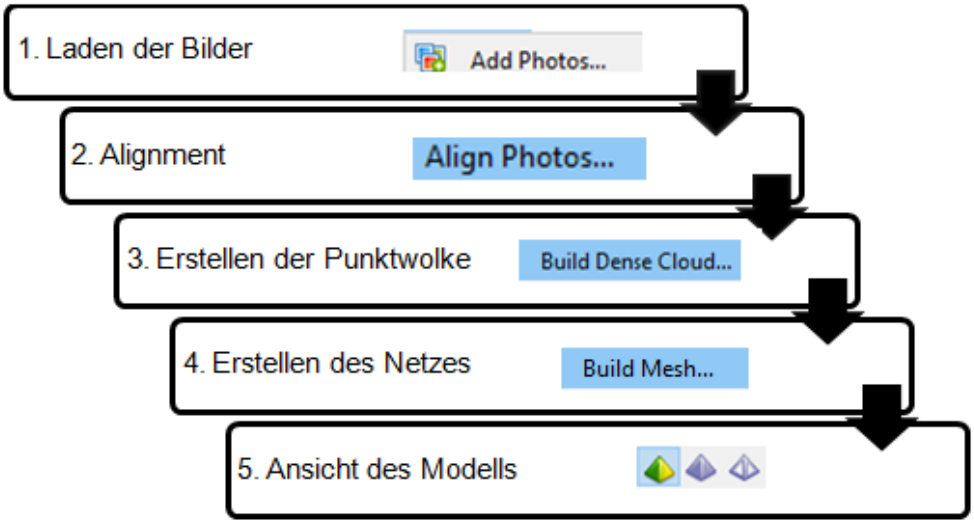

Abbildung 15: Workflow Agisoft Photoscan Professional

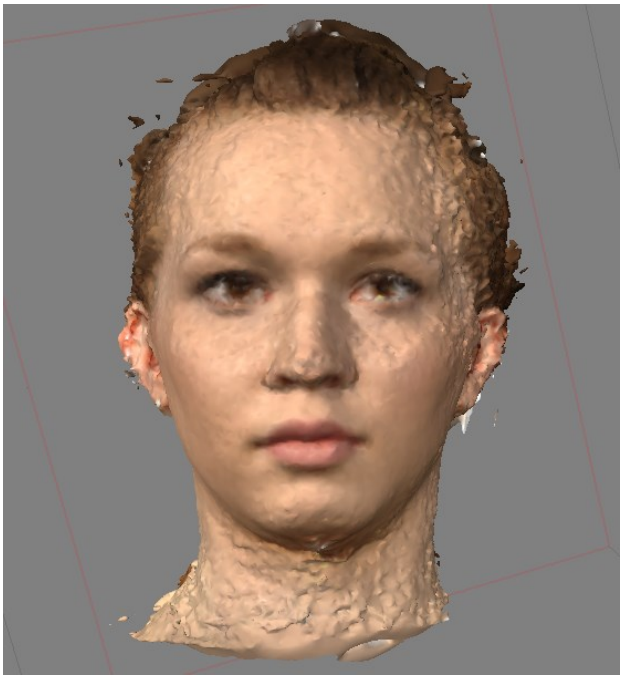

Abbildung 16: Fusionsergebnis Agisoft Photoscan
aus 72 Bildern der Fotoserie 1

Software Regard 3D

Die kostenlose open-source-Software Regard3D (FabLab, Zürich, Schweiz) steht seit dem Jahr 2015 für die Rekonstruktion von 3D-Modellen zur Verfügung. Da diese Software ebenfalls durch Anwendung der Structure-from-motion-Technik eine Verknüpfung von überlappenden markanten Punkten der Bilderserie vornimmt, sind die Anforderungen bei der Generierung der Bilddaten die gleichen wie bei Agisoft Photoscan.

Nach der Erstellung einer Projektdatei und dem vollständigen *1. Laden der Bilder* wurden die überlappenden Punkte automatisch vom Programm ermittelt, *2. Ermittlung überlappender Punkte.* Die Einstellung der Parameter wurde auf Ultra eingestellt, um die Genauigkeit zu verbessern. Nach der anschließenden *3. Triangulation* wurde im nächsten Arbeitsschritt die *Punktwolke* berechnet, *4. Berechnung der Punktwolke*. Abschließend wurde die Modelloberfläche erzeugt, *5. Erzeugen der Modelloberfläche*. Hierzu wurden folgende Parameter eingestellt: *Depth*: 9, *Samples per node*: 3, *Pointweight*: 3, *Trim treshold*: 7 (Abb. 19). Das fertige, texturierte Modell wurde im .obj-Format exportiert (Abb.20).

<u>Workflow Regard 3D</u>

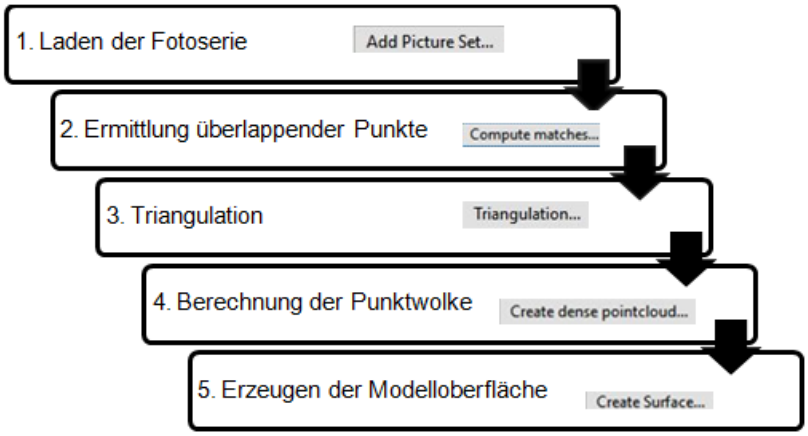

Abbildung 17: Workflow Regard 3D

Abbildung 18: Fusionsergebnis Regard 3D
aus 72 Bildern der Fotoserie 1

3.4 Stereophotogrammetrie

3.4.1 DI3D capture™ Stereophotogrammetrie-System

Das Stereophotogrammetriesystem DI3D capture™ (Dimensional Imaging, Glasgow, UK) wurde durch die Klinik für Psychologie des Universitätsklinikums Jena zur Verfügung gestellt und bietet ein vollständiges, abgeschlossenes System zur Generierung von dreidimensionalen Oberflächendaten. Die Aufnahmeeinheit besteht aus vier DX DSLR-Kameras vom Typ Canon EOS 1000D (Canon, Tokio, Japan) mit einer Auflösung von 10 Megapixeln, die fest an einem Stativ montiert sind (Abb.21). Die Kameras in Stereopaar-Anordnung werden für die Aufnahme simultan ausgelöst. Zu Beginn des Versuches wurde der Proband bei homogener Beleuchtung vor einem einfarbigen Hintergrund positioniert. Die fest stehende Aufnahmeeinheit wurde zunächst kalibriert und auf das Gesicht des Probanden fokussiert. Ein angezeichneter Punkt an der Wand diente dem Probanden dabei als Orientierung. Diese vorbereitenden Arbeitsschritte dauerten sechs Minuten. Die Erstellung der Aufnahme dauerte weniger als eine Sekunde. Im Anschluss erfolgte die automatische Verarbeitung der Daten durch das zum System gehörige Programm DI3D capture™3D Capture Software. Der Export der Daten erfolgte im .obj und im .stl-Format. Verarbeitung und Export dauerten insgesamt sechs Minuten (Abb.22) (DI3D 2015).

Abbildung 19: DI3D capture™ System

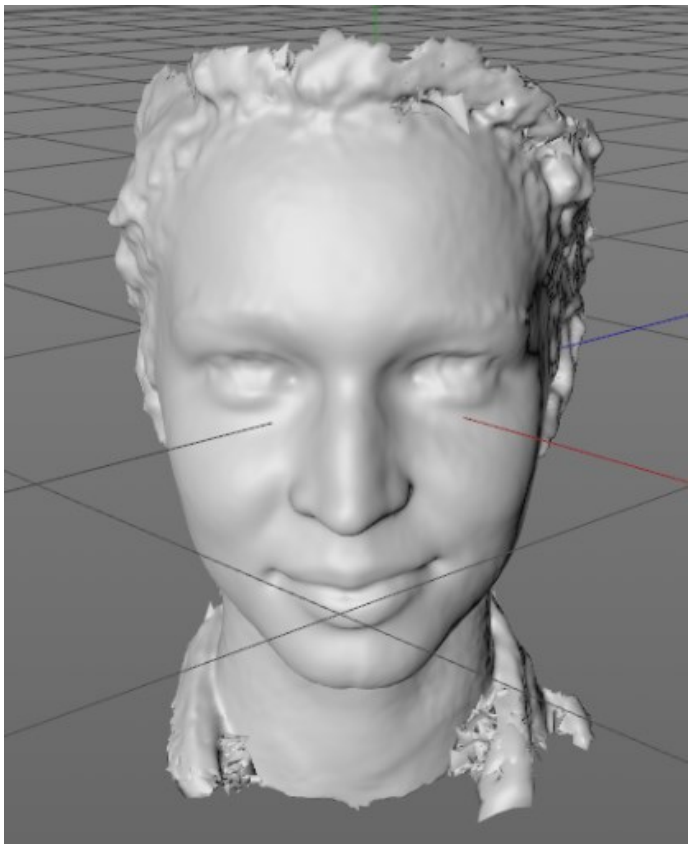

Abbildung 20: Fusionsergebnis
Stereophotogrammetriesystem DI3D capture™

3.5 Gesichtsvermessungen

Die 3D-Modelle des Gesichtes, die durch die unterschiedlichen Scanmethoden erstellt werden konnten, wurden im Weiteren hinsichtlich ihrer Qualität verglichen. Dazu wurde ein Messprotokoll (Tab.1) entwickelt, welches durch die Definition von Messpunkten und Strecken eine vergleichende Vermessung des Gesichts ermöglicht.

Tabelle 1: Messprotokoll zur Vermessung des Gesichtes anhand definierter Messpunkte- und strecken

Strecke	**Streckenbezeichnung**	**Messpunkte**
1	Glabella-Nasion	1-2
2	Nasion-Pronasale	2-3
3	Pronasale-Philtrummitte	3-4
4	Philtrummitte-Pogonion	4-5
5	Glabella-Pronasale	1-3
6	Glabella-Philtrummitte	1-4
7	Glabella-Pogonion	1-5
8	Nasion-Philtrummitte	2-4
9	Nasion-Pogonion	2-5
10	Glabella-lateraler Augenwinkel links	1-6
11	Glabella-lateraler Augenwinkel rechts	1-9
12	Glabella-medialer Augenwinkel links	1-7
13	Glabella-medialer Augenwinkel rechts	1-8
14	Nasion-lateraler Augenwinkel links	2-6
15	Nasion-lateraler Augenwinkel rechts	2-9
16	Nasion-medialer Augenwinkel links	2-7
17	Nasion-medialer Augenwinkel rechts	2-8
18	Pronasale-medialer Augenwinkel links	3-7
19	Pronasale-medialer Augenwinkel rechts	3-8
20	Pronasale-lateraler Augenwinkel links	3-6
21	Pronasale-lateraler Augenwinkel rechts	3-9
22	Philtrummitte-lateraler Augenwinkel links	4-6
23	Philtrummitte-lateraler Augenwinkel rechts	4-9
24	Philtrummitte-medialer Augenwinkel links	4-7
25	Philtrummitte-medialer Augenwinkel rechts	4-8
26	Pogonion-medialer Augenwinkel links	5-7
27	Pogonion-medialer Augenwinkel rechts	5-8
28	Pogonion-lateraler Augenwinkel links	5-6
29	Pogonion-lateraler Augenwinkel rechts	5-9
30	Lateraler Augenwinkel-medialer Augenwinkel links	6-7
31	Lateraler Augenwinkel-medialer Augenwinkel rechts	9-8
32	Lateraler Augenwinkel-medialer Augenwinkel	6-8
33	Lateraler Augenwinkel-medialer Augenwinkel	9-7
34	Lateraler Augenwinkel-lateraler Augenwinkel	6-9
35	Medialer Augenwinkel-medialer Augenwinkel	7-8

36	Glabella-Mundwinkel links	1-10
37	Glabella-Mundwinkel rechts	1-11
38	Glabella-Alare links	1-12
39	Glabella-Alare rechts	1-13
40	Nasion-Mundwinkel links	2-10
41	Nasion-Mundwinkel rechts	2-11
42	Nasion-Alare links	2-12
43	Nasion-Alare rechts	2-13
44	Philtrummitte-Mundwinkel links	4-10
45	Philtrummitte-Mundwinkel rechts	4-11
46	Philtrummitte-Alare links	4-12
47	Philtrummitte-Alare rechts	4-13
48	Pronasale-Mundwinkel links	3-10
49	Pronasale-Mundwinkel rechts	3-11
50	Pronasale-Alare links	3-12
51	Pronasale-Alare rechts	3-13
52	Pogonion-Mundwinkel links	5-10
53	Pogonion-Mundwinkel rechts	5-11
54	Pogonion-Alare links	5-12
55	Pogonion-Alare rechts	5-13
56	Alare-lateraler Augenwinkel links	12-6
57	Alare-medialer Augenwinkel links	12-7
58	Alare-lateraler Augenwinkel rechts	13-9
59	Alare-medialer Augenwinkel rechts	13-8
60	Mundwinkel-lateraler Augenwinkel links	10-6
61	Mundwinkel-medialer Augenwinkel links	10-7
62	Mundwinkel-lateraler Augenwinkel rechts	11-9
63	Mundwinkel-medialer Augenwinkel rechts	11-8
64	Tragus-lateraler Augenwinkel rechts	14-9
65	Tragus-lateraler Augenwinkel links	16-6
66	Tragus-Nasion rechts	14-2
67	Tragus-Nasion links	16-2
68	Tragus-Pronasale rechts	14-3
69	Tragus-Pronasale links	16-3
70	Tragus-Philtrummitte rechts	14-4
71	Tragus-Philtrummitte links	16-4
72	Tragus-Pogonion rechts	14-5
73	Tragus-Pogonion links	16-5
74	Tragus-Alare rechts	14-13
75	Tragus-Alare links	16-12
76	Tragus-Mundwinkel rechts	14-11
77	Tragus-Mundwinkel links	16-10
78	Ohrläppchen-lateraler Augenwinkel rechts	15-9
79	Ohrläppchen-lateraler Augenwinkel links	17-6
80	Ohrläppchen-Nasion rechts	15-2
81	Ohrläppchen-Nasion links	17-2
82	Ohrläppchen-Pronasale rechts	15-3
83	Ohrläppchen-Pronasale links	17-3
84	Ohrläppchen-Philtrummitte rechts	15-4

85	Ohrläppchen-Philtrummitte links	17-4
86	Ohrläppchen-Pogonion rechts	15-5
87	Ohrläppchen-Pogonion links	17-5
88	Ohrläppchen-Alare rechts	15-13
89	Ohrläppchen-Alare links	17-12
90	Ohrläppchen-Mundwinkel rechts	15-11
91	Ohrläppchen-Mundwinkel links	17-10

Die Definition der Messpunkte ist dabei angelehnt an Koban et al. (Koban et al. 2014). Zusätzlich wurden Messpunkte in der Vertikalen definiert. Zur Veranschaulichung der Messpunkte und Strecken in Abb. 23 und 24 wurde das 3D-Modell aus dem Versuch der Stereophotogrammetrie, welches hier im .stl Format zur Verfügung stand, im Programm Meshlab®, Version 2016, ISTI CNR geöffnet und als Bildschirmfotografie jeweils in der Frontal- und Seitenansicht festgehalten. Diese Bilder wurden im Anschluss innerhalb des Programmes Microsoft Paint® mit den entsprechenden Messpunkten beschriftet.

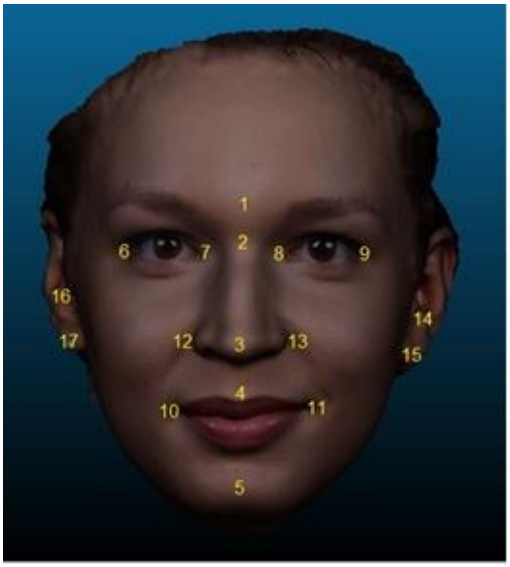

Abbildung 23: Übersicht der Messpunkte zur Gesichtsvermessung in der Frontalansicht

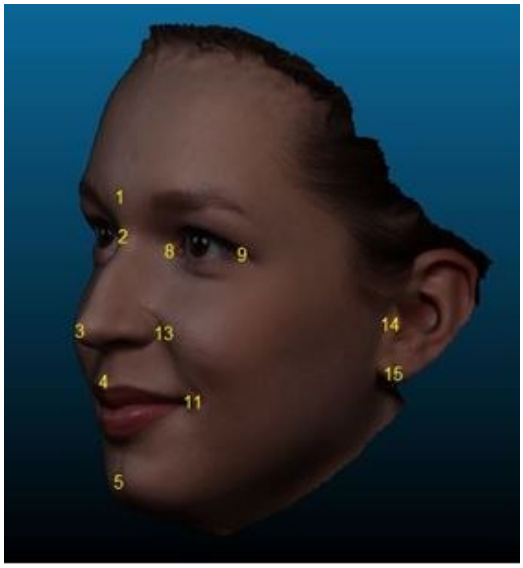

Abbildung 24: Übersicht der Messpunkte zur Gesichtsvermessung in der Seitenansicht

Im ersten Schritt der Untersuchung wurden die manuellen Messwerte den digital gemessenen Strecken an den verschiedenen 3D-Modellen gegenübergestellt, um Abweichungen zu ermitteln. Die digitalen Messungen erfolgten mit Hilfe der Software Meshlab®, Version 2016, ISTI CNR.

Zur weiterführenden Auswertung wurden alle Messungen durch drei verschiedene Untersucher vorgenommen und drei Mal wiederholt. Der endgültige Messwert wurde aus dem Mittelwert der drei Messungen ermittelt.

3.5.1 Manuelle Messung

Die Messungen der in Tab.1 definierten Gesichtsstrecken wurden zunächst manuell mit einer Messlehre (Powerfix, Electronic Digital Caliper, Lidl, Neckarsulm) am Kopf der Probandin durchgeführt. Die Messwerte wurden in mm angegeben.

3.5.2 Digitale Messung

Für die digitale Vermessung der 3D-Modelle wurden diese zunächst einzeln in die Software Meshlab® geladen. Die Modelle von Artec Eva, iSense und dem Streifenlichtscanner wurden im Format .stl geladen. Die Rekonstruktionen sowohl der Photogrammetrie (durch Agisoft Photoscan und Regard3D erstellt) als auch das Modell der Stereophotogrammetrie wurden im .obj-Format geladen.

Um einen Vergleich der manuell gemessenen Strecken mit den digitalen Messwerten vornehmen zu können, wurde als gemeinsame Einheit die Messung in Millimeter definiert. In Meshlab wird die Streckenmessung als Standardfunktion der Software durch eine Punkt-zu-Punkt-Messung ermöglicht. Durch das Einfügen einer Skalierung konnten diese Messungen ebenfalls in Millimeter durchgeführt werden. Dazu musste zunächst für jedes Modell ein Umrechnungsfaktor ermittelt werden. Eine definierte Gesichtsstrecke musste manuell am Kopf der Probandin im mm gemessen werden. Es wurde die in Tab. 1 definierte Strecke 30 (lateraler Augenwinkel zu medialem Augenwinkel) verwendet (Abb.25), da diese Strecke sowohl manuell als auch an jedem der virtuellen Modelle sicher zu definieren ist.

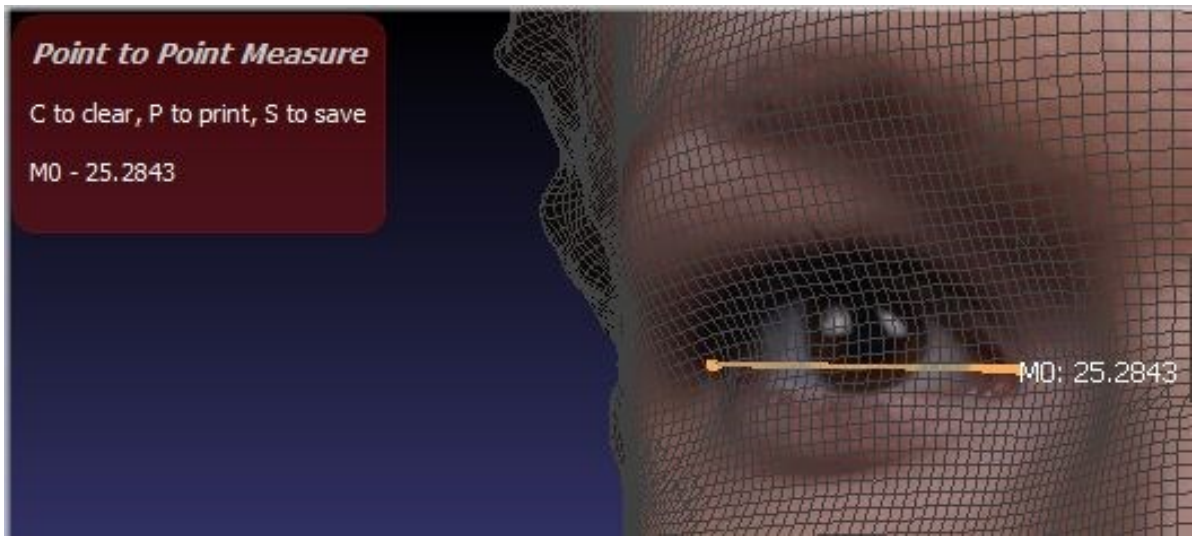

Abbildung 21: digitale Vermessung der Strecke 30 (lateraler Augenwinkel zu medialem Augenwinkel) zur Ermittlung der Variablen x

Der definitive Messwert der Strecke 30 (lateraler Augenwinkel zu medialem Augenwinkel) wurde aus den Mittelwerten der drei Messungen gebildet und ist in der Gleichung durch die Variable „y“ definiert. Die Strecke 30 wurde ebenfalls für jedes Modell in Meshlab® durch die Auswahl des *Measuring Tool* gemessen. Durch das Anklicken der in Tab. 1 definierten Messpunkte 6 und 7 wird die Distanz der Strecke 30 durch eine Punkt-zu-Punkt-Messung ermittelt. Dieser Wert wurde in der Umrechnungsgleichung durch die Variable „x“ definiert.

<u>Gleichung zur Ermittlung des Umrechnungsfaktor U</u>

$$U = y:x$$

U= Umrechnungsfaktor, y=manueller Messwert, x= digitaler Messwert

Der Umrechnungsfaktor wurde für jedes 3D-Modell einzeln ermittelt und im Anschluss in Meshlab® eingegeben. Durch Auswahl der Menüpunkte *Filters → Normals, Curvatures, Orientation → Transform Scale* erscheint ein Eingabefeld. Der ermittelte Umrechnungsfaktor wurde in die Felder der X-, Y- und Z-Achse eingetragen. Die Auswahl wurde durch das Anklicken des Feldes *Apply* bestätigt. Das skalierte Modell wurde durch Drücken der Tastenkombination *STRG+H* auf dem Bildschirm gezeigt. Über die erneute Anwendung des *Measuring Tools* konnten die Messwerte direkt in mm abgelesen und in die Tabelle eingetragen werden.

4 Ergebnisse

4.1 Ergebnisse der 3D-Rekonstruktion des Gesichts

Jedes der aktiven und passiven Scanverfahren konnte eine 3D-Visualisierung des Gesichts erzeugen. Die erzeugten Scans wurden nachfolgend anhand verschiedener Kriterien kategorisiert. Zur Kategorisierung der einzelnen Scanverfahren wurde ein Punktesystem zur Bewertung entwickelt. Die Einteilung der Punkte erfolgte von einem bis maximal drei möglichen Punkten in jeder Kategorie (Tab. 2).

Tabelle 2: Beschreibung der Kategorien des Punktesystems zur Bewertung der Scanverfahren

	1 Punkt Eingeschränkt praxistauglich	2 Punkte Gut	3 Punkte Sehr gut
Optische Qualität des Scans	Ungenaue oder fehlende Darstellung, deutliche Löcher und Fehlstellen	Vollständige Darstellung, wenige Löcher und Nahtstellen	Vollständige, präzise Abbildung der gesamten Gesichtsstruktur ohne Fehlstellen
Einfachheit der Handhabung	Komplexe, aufwendige Handhabung der Aufnahmeeinheit	Aufnahmeeinheit gut anzuwenden, Einarbeitung notwendig	Einfache, intuitive Handhabung der Aufnahmeeinheit
Dauer der Aufnahme	> 5 Minuten	1-5 Minuten	1-10 Sekunden
Umfang der Scannachbearbeitung	Komplexe, zeitaufwendige Nachbearbeitung, zahlreiche manuelle Arbeitsschritte	Nachbearbeitung zeitaufwendig aber automatisiert	Schnelle, automatisierte Nachbearbeitung
Vorbereitungszeit des Scans	> 30 Minuten	5-30 Minuten	1-5 Minuten
Komfort für den Probanden	Deutlich reduzierter Komfort durch Positionierung und Zeitaufwand	Eingeschränkter Komfort durch Zeitaufwand bei bequemer Sitzposition	Hoher Komfort durch schnelle Aufnahme bei sicherer Positionierung
Preis des Scanners	> 20.000 €	1.000 € - 20.000 €	< 1.000 €

4.1.1 Davidlaserscanner 3di GmbH Jena

Die Anzahl der erstellten Rohdaten war in den unterschiedlichen Positionen anhand ihrer Ausrichtung zu erkennen (Abb.26-28). Die Rohdaten wiesen noch deutliche Löcher im Bereich der Nase und der jeweiligen Gesichtsseite auf, die dem Scanner abgewandt war.

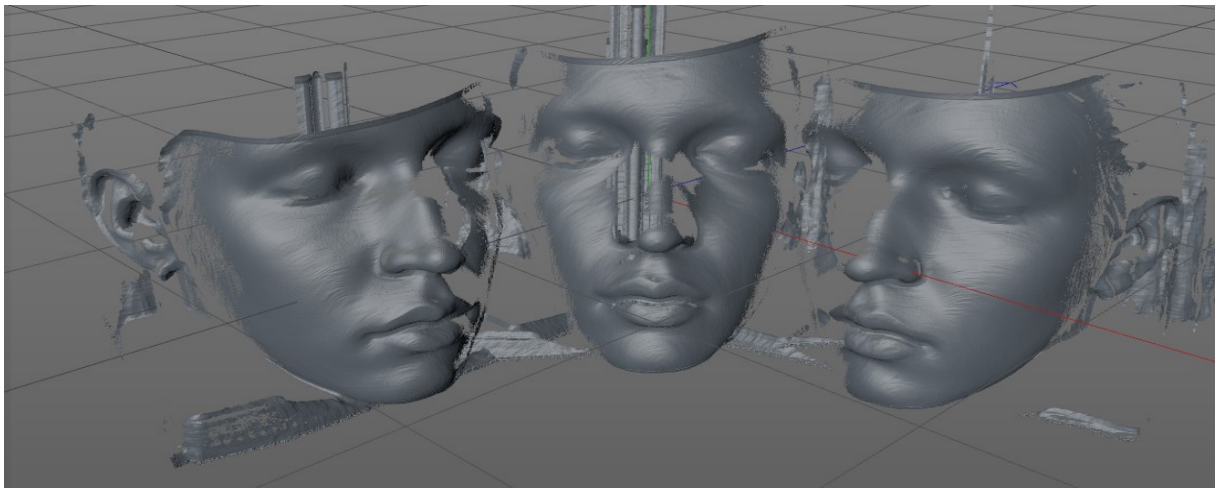

Abbildung 22: Rohdaten Versuch 1 des Davidlaserscanners 3di GmbH Jena

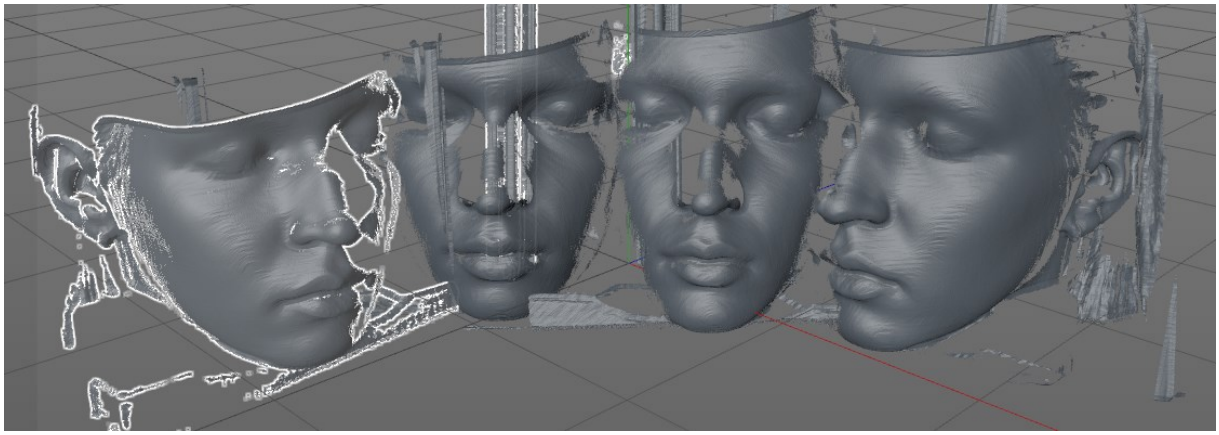

Abbildung 23: Rohdaten Versuch 2 des Davidlaserscanners 3di GmbH Jena

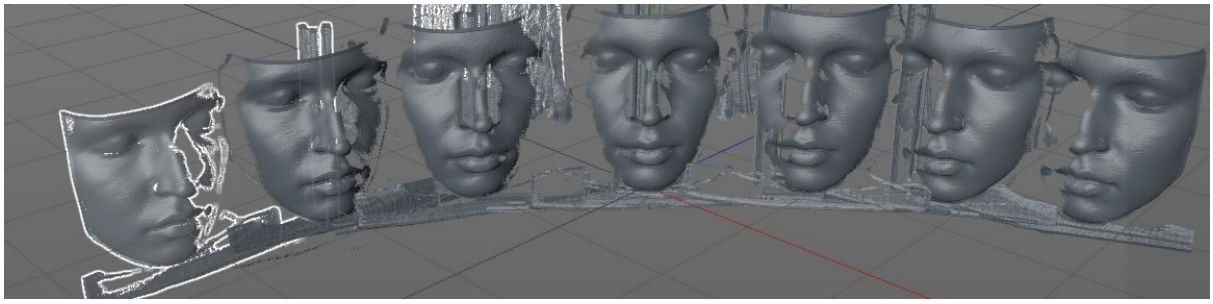

Abbildung 24: Rohdaten Versuch 3 des Davidlaserscanners 3di GmbH Jena

In Abbildung 29 und 30 waren im Bereich der Ränder und des Kinns die einzelnen fusionierten Scans noch deutlich zu erkennen. Ebenso fielen hier deutliche Lücken im Bereich der Nase und in Abbildung 29 im Bereich der Lippen auf. Abbildung 31 zeigt das Scanergebnis aus der dritten Versuchsreihe. Dieses 3D-Modell wies ebenfalls Löcher im Bereich der Nase auf, jedoch geringere als die beiden vorherigen Scans. Des Weiteren waren keine Nahtstellen festzustellen und die Scanoberfläche erschien homogener. Die Handhabung des Systems war durch die notwendige Neupositionierung aufwendig. Die Dauer der Aufnahmen wurde dadurch erhöht, während sich der Komfort für den Probanden deutlich reduzierte. Die Vorbereitungszeit war durch die komplexe Kalibrierung umfangreich. Die Nachbearbeitung war durch die Notwendigkeit des Beschneidens und des manuellen Alignments von erheblicher Dauer. Die Kosten für den Scanaufbau betragen 814 €. Es wurde eine Gesamtpunktzahl von 11 Punkten erreicht (Tab.3).

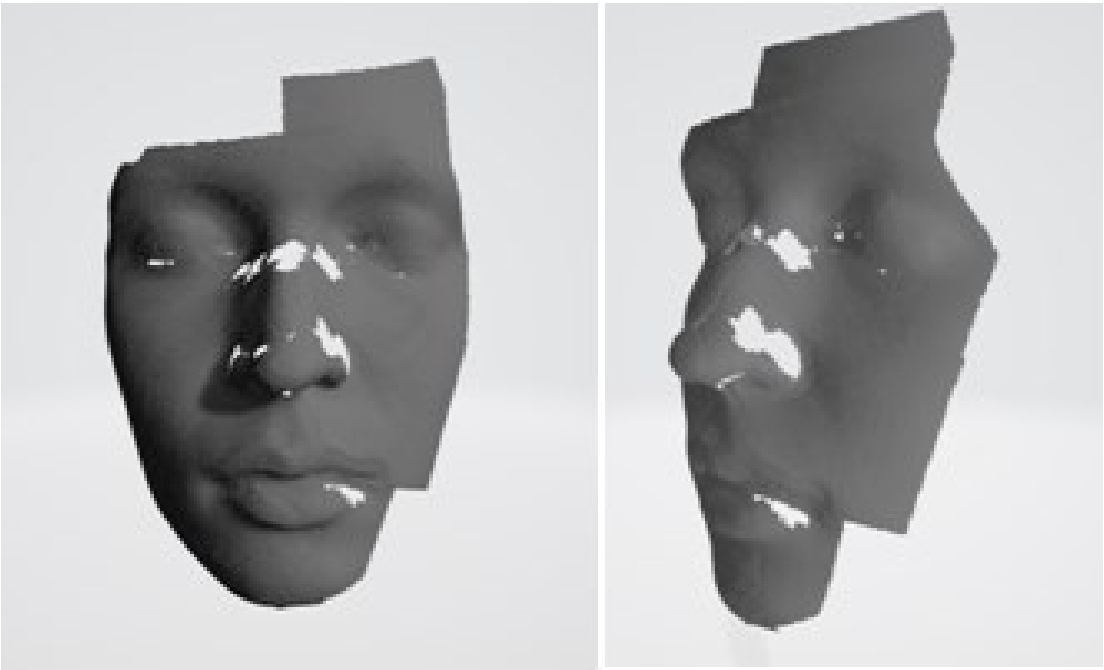

Abbildung 25: 3D-Modell Versuch 1 des Davidlaserscanners 3di GmbH Jena

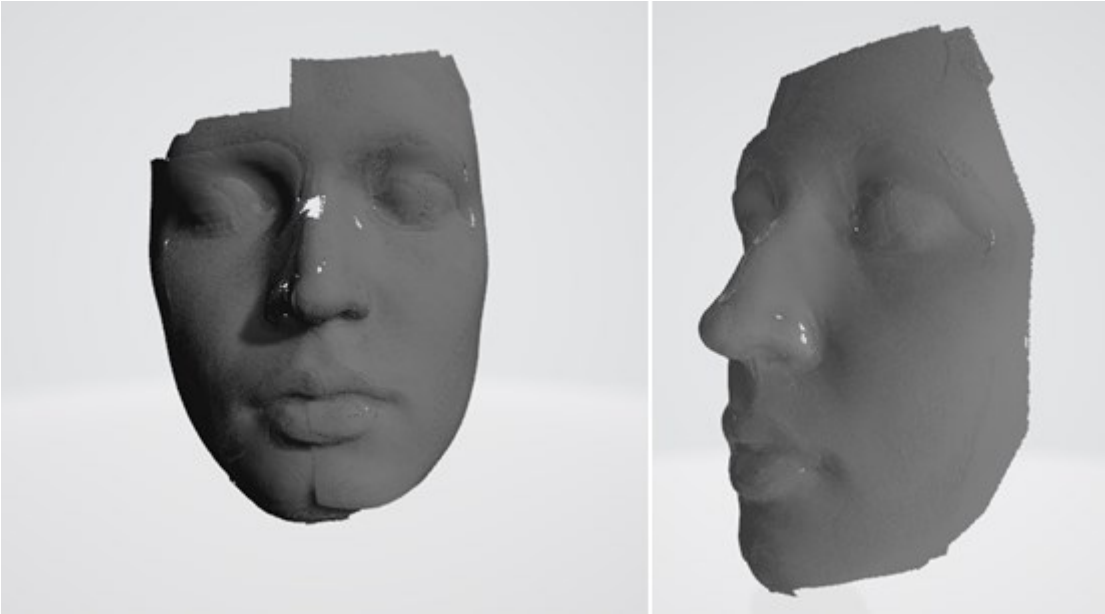

Abbildung 26: 3D-Modell Versuch 2 des Davidlaserscanners 3di GmbH Jena

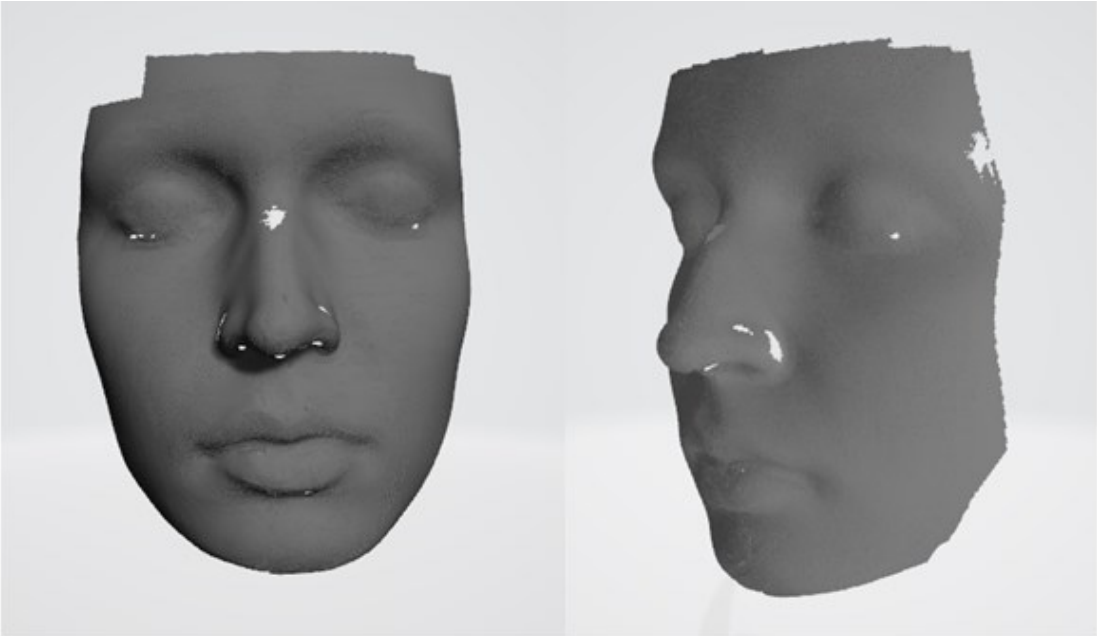

Abbildung 27: 3D-Modell Versuch 3 des Davidlaserscanners 3di GmbH Jena

Tabelle 3: Bewertung des Davidlaserscanner 3di GmbH Jena durch Punktesystem

Kategorie	Punktwert 1 eingeschränkt praxistauglich 2 gut 3 sehr gut
Optische Qualität des Scans	2
Einfachheit der Handhabung	1
Dauer der Aufnahme	1
Umfang der Scannachbearbeitung	1
Vorbereitungszeit des Scans	2
Komfort für den Probanden	1
Preis des Scanners	3
Gesamtpunktzahl	11

4.1.2 Streifenlichtscanner 3D-NIR Sensor IRESTRA

Das mit dem Streifenlichtscanner 3D-NIR Sensor IRESTRA erstellte texturierte Modell wies keine optischen Fehlstellen auf. Die zu erkennende unruhige Struktur und die Löcher entstanden durch die Darstellung innerhalb des Ansichtsprogrammes (Abb.32). Der Streifenlichtscanner konnte einen sehr großen Bereich des Gesichtes bis zur Ohrmuschel heran vollständig darstellen. Durch einen erfahrenen Anwender konnte das Gesichtsmodell in einer sehr kurzen Aufnahmezeit von einer Sekunde erstellt werden. Durch die kurze Versuchszeit und die einfache Positionierung war der Komfort für den Probanden hoch. Da der Streifenlichtscanner ein kompaktes geschlossenes System ist, war die Vorbereitungszeit gering. Die Nachbearbeitung der Rohdaten war durch Alignment und Konvertierung umfangreich. Die Kosten des Scanners konnten zur Zeit des Versuches nur geschätzt werden, da der verwendete Scanner ein Prototyp war. Zur Einordnung innerhalb des Punktesystems wurden Kosten über dem Wert von 20.000 € geschätzt, um die Zuweisung eines Punktes zu ermöglichen. Innerhalb der Bewertungskriterien konnte daher eine Gesamtpunktzahl von 15 Punkten erreicht werden (Tab. 4).

Abbildung 28: 3D- Modell Streifenlichtscanner 3D-NIR Sensor IRESTRA

Tabelle 4: Bewertung des Streifenlichtscanners 3D-NIR Sensor IRESTRA durch Punktesystem

Kategorie	Punktwert 1 eingeschränkt praxistauglich 2 gut 3 sehr gut
Optische Qualität des Scans	3
Einfachheit der Handhabung	2
Dauer der Aufnahme	3
Umfang der Scannachbearbeitung	1
Vorbereitungszeit des Scans	2
Komfort für den Probanden	3
Preis des Scanners	1
Gesamtpunktzahl	15

4.1.3 Strukturlichtscanner Artec Eva

Die Scanoberfläche des Gesichtsmodells, erzeugt durch Artec Eva, zeigte keine Löcher und bildet das gesamt Mittelgesicht ab (Abb.33). Die Anwendung war durch den Handscanner beweglich, das Gesicht konnte daher gut von allen Seiten abgebildet werden. Die Handhabung wurde durch die erschwerte Einhaltung des Abstandes eingeschränkt. Die Aufnahme dauerte zwei Minuten. Die Vorbereitungszeit für den Scan war sehr gering, da lediglich die Verbindung zum Laptop hergestellt werden musste. Der Komfort für den Probanden war durch die geringe Aufnahmezeit und die bequeme Positionierung hoch. Die Nachbearbeitung war weitestgehend automatisiert, dauerte allerdings durch die Verarbeitung der großen Datenmenge 45 Minuten. Der Preis für diesen Scanner betrug zum Zeitpunkt der Aufnahme 13.700 €. Es wurde eine Gesamtpunktzahl von 17 Punkten erreicht (Tab.5).

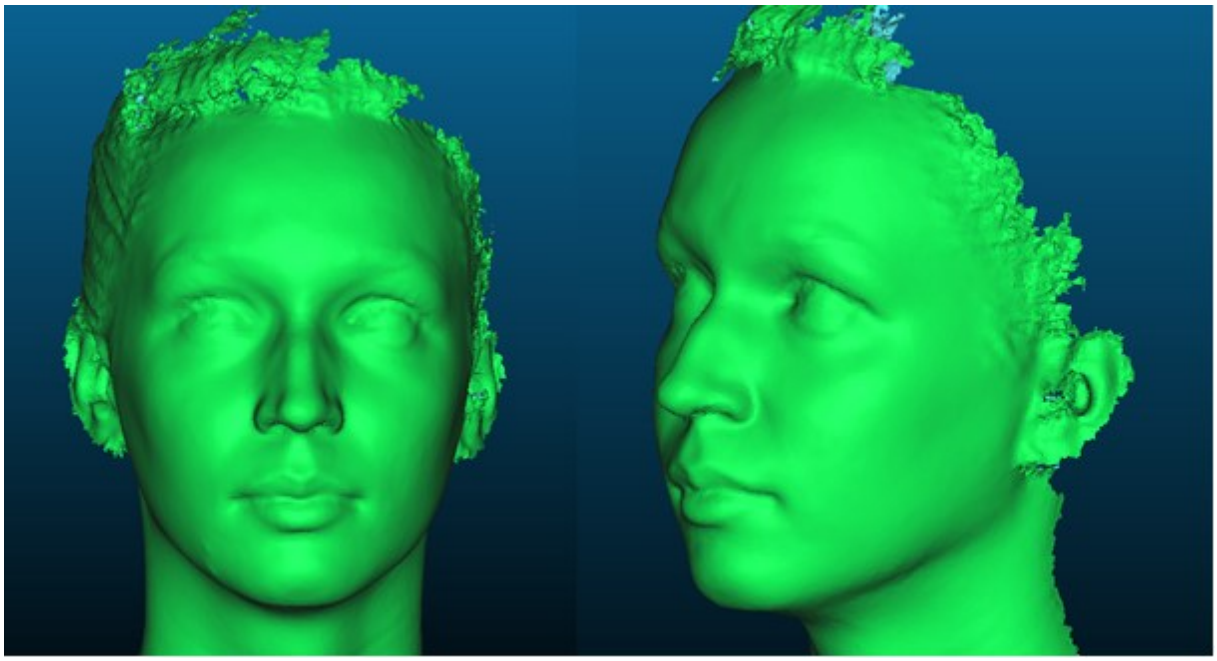

Abbildung 29: 3D-Modell Strukturlichtscanner Artec Eva

Tabelle 5: Bewertung des Strukturlichtscanners Artec Eva durch Punktesystem

Kategorie	Punktwert 1 eingeschränkt praxistauglich 2 gut 3 sehr gut
Optische Qualität des Scans	3
Einfachheit der Handhabung	2
Dauer der Aufnahme	2
Umfang der Scannachbearbeitung	2
Vorbereitungszeit des Scans	3
Komfort für den Probanden	3
Preis des Scanners	2
Gesamtpunktzahl	17

4.1.4 Handyscanner iSense

Der Handyscanner iSense konnte eine 3D-Visualisierung des gesamten Gesichtes erstellen (Abb. 34). Vor allem bei Betrachtung der rechten Abbildung fiel auf, dass das Gesicht vollständig, aber in schlechter Qualität dargestellt wurde. Die Pixelstruktur war deutlich zu erkennen. Die Scanqualität ist daher nicht ausreichend. Die Anwendung des Scanners war einfach. Die Aufnahme konnte in wenigen Sekunden erstellt werden. Der Komfort für den Patienten war aufgrund der geringen Aufnahmedauer hoch. Die Daten konnten in kurzer Zeit nachbearbeitet werden. Die Kosten für den Scanner beliefen sich zum Zeitpunkt der Aufnahme auf 306 €. Es wurde eine Gesamtpunktzahl von 19 Punkten erreicht (Tab.6).

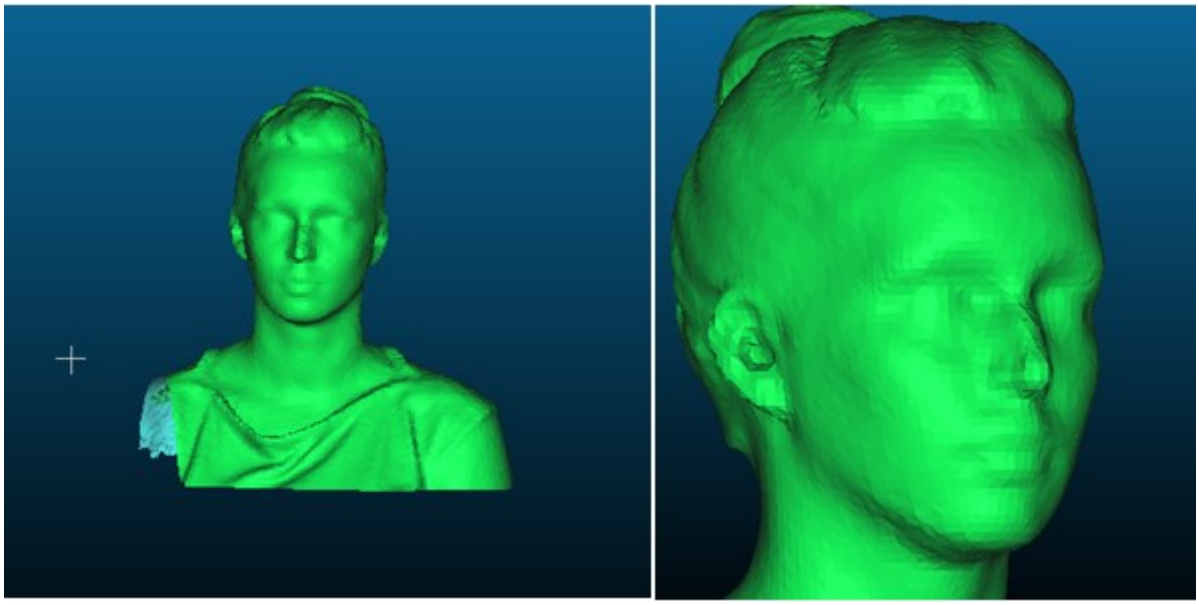

Abbildung 30: 3D-Modell Handyscanner iSense

Tabelle 6: Bewertung der Merkmale des Handyscanners iSense durch Punktesystem

Kategorie	Punktwert 1 eingeschränkt praxistauglich 2 gut 3 sehr gut
Optische Qualität des Scans	1
Einfachheit der Handhabung	3
Dauer der Aufnahme	3
Umfang der Scannachbearbeitung	3
Vorbereitungszeit des Scans	3
Komfort für den Probanden	3
Preis des Scanners	3
Gesamtpunktzahl	19

4.1.5 Photogrammetrie: Fotolabor: Rekonstruktion Agisoft Photoscan

Die Fotoserie 1 wurde durch die Bewegung der Kamera um den Probanden erstellt. In die anschließende 3D-Rekonstruktion wurden alle 72 Bilder dieser ersten Serie mit einbezogen und das Gesichtsmodell erstellt (Abb.35). Das Modell zeigt jedoch deutliche Ungenauigkeiten in nahezu allen Bereichen des Gesichtes. Es sind keine Löcher bei der Erstellung entstanden.

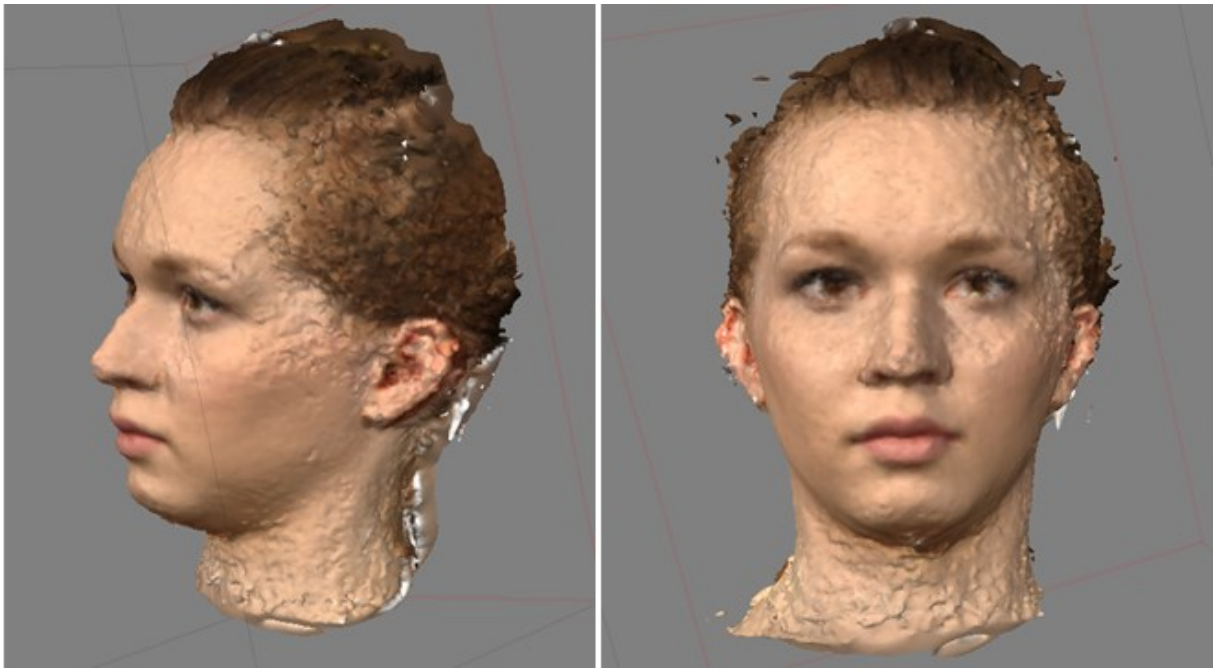

Abbildung 31: 3D-Modell Photogrammetrie Fotolabor HNO-Klinik Jena, Rekonstruktion mit Agisoft Photoscan aus 72 Bildern der Fotoserie 1

Die Bilder der ersten Fotoserie wurden für eine weitere Gesichtsrekonstruktion mit dem Programm Agisoft Photoscan verwendet. Es wurde eine reduzierte Bildanzahl von 36 Bildern als Datengrundlage verwendet. Das Programm konnte mit dieser reduzierten Rohdatenquelle keine Rekonstruktion des Gesichtes erzeugen. Die rechte Gesichtshälfte des Probanden ist in Abbildung 36 zu erkennen, wies aber auch massive Ungenauigkeiten und Fehlstellen auf. Die linke Hälfte des Gesichtes war verzerrt und nicht als solche zu erkennen.

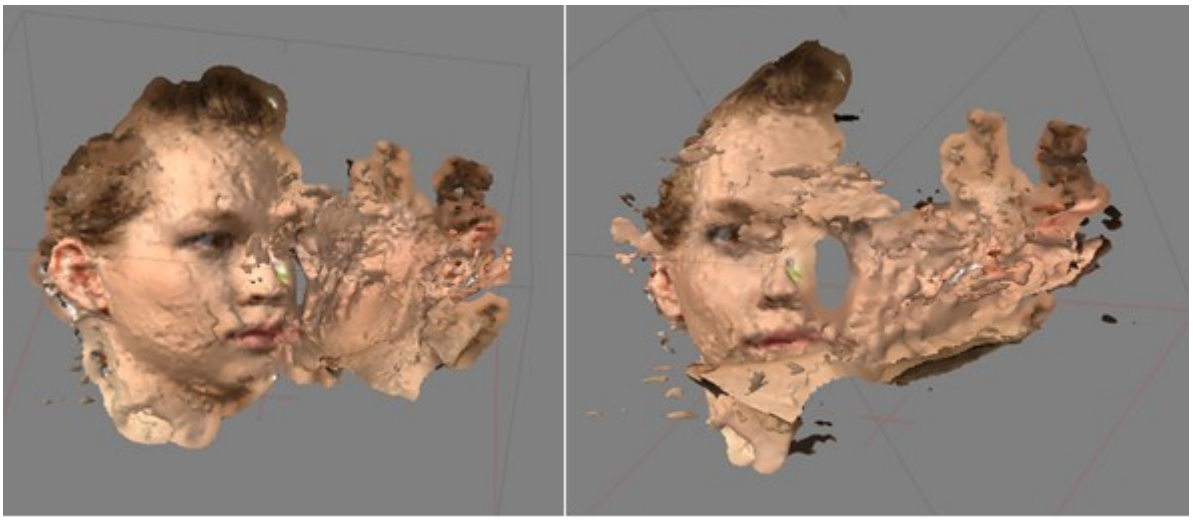

Abbildung 32: 3D Modell Photogrammetrie Fotolabor HNO- Klinik Jena, Rekonstruktion mit Agisoft Photoscan aus 36 Bildern der Fotoserie 1

Die Fotoserie 2 wurde durch die Drehung des Probanden bei feststehender Kameraeinheit erstellt. Die Rekonstruktion des Gesichtes konnte aus allen 72 Bildern erstellt werden und zeigte geringe Ungenauigkeiten im Bereich der Nasenspitze und der Stirn des Probanden (Abb.37). Das Modell wies keine Löcher oder Nahtstellen auf.

Abbildung 33: 3D-Modell Photogrammetrie Fotolabor HNO-Klinik Jena, Rekonstruktion mit Agisoft Photoscan aus 72 Bildern der Fotoserie 2

Aus der zweiten Fotoserie wurde ebenfalls eine Rekonstruktion mit einer reduzierten Bildanzahl von 36 erstellt (Abb.38). Es konnte keine eindeutige Rekonstruktion des Gesichtes erzeugt werden. Das Gesicht des Probanden konnte auf der rechte Seite bis hinüber zum Auge der linken Seite ungenau visualisiert werden. Der Rest der linken Seite erschien verzerrt und gespiegelt. Insgesamt waren deutliche Fehler der Scanoberfläche in allen Bereichen des Gesichtsmodelles sichtbar.

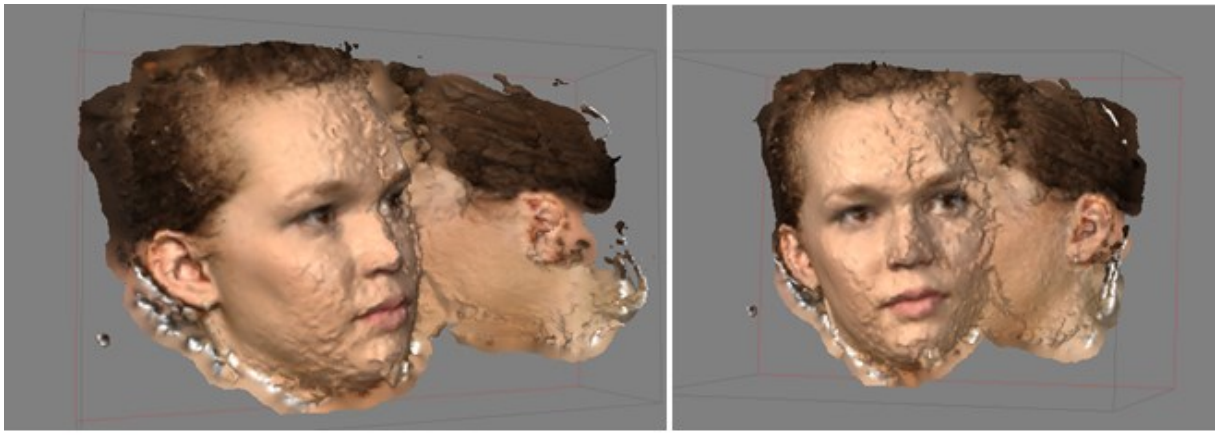

Abbildung 34: 3D-Modell Photogrammetrie Fotolabor HNO-Klinik Jena, Rekonstruktion mit Agisoft Photoscan aus 36 Bildern der Fotoserie 2

In Tabelle 7 ist die Dauer der jeweiligen Arbeitsschritte des Programmes Agisoft Photoscan bis zur fertigen Rekonstruktion des Gesichtes aufgeführt. Mit steigender Anzahl der verwendeten Bilder der zwei Fotoserien erhöhte sich die Dauer der Schritte, insbesondere bei der Erstellung der einzelnen Punktwolken.

Tabelle 7: Dauer der Arbeitsschritte bei 3D-Rekonstruktion der photogrammetrischen Aufnahmen aus dem Fotolabor der HNO-Klinik Jena mit dem Programm Agisoft Photoscan Professional aus jeweils 72 und 36 Bildern

	Fotoserie 1		Fotoserie 2		Fotoserie 3		Fotoserie 4	
Anzahl der Bilder	72	36	72	36	72	36	72	36
Arbeitsschritte	Dauer der Arbeitsschritte in min							
Alignment	2,03	0,48	2,12	1,04	3,8	0,87	3,95	3,47
Erstellen der Punktwolke	11,35	3,12	12,02	3,24	14,7	4,62	11,55	3,55
Erstellen des Netzes	0,39	0,47	0,36	0,22	0,56	0,51	0,61	0,63

Obgleich die Qualität der Scanergebnisse, insbesondere unter Berücksichtigung der Anzahl der verwendeten Bilder sehr unterschiedlich ist, wurde für die Punktvergabe das hochwertigste Scanergebnis in die Bewertung einbezogen. Die Erstellung der Aufnahmen dauerte von allen durchgeführten Versuchen am längsten. Der Komfort für den Patienten war durch die lange Dauer und die Positionierung auf dem Aufnahmestuhl reduziert. Vor- und Nachbearbeitung des Versuches waren einfach durchzuführen. Die Kosten des Programmes beliefen sich zum Zeitpunkt der Aufnahme auf 3.499 $. Es wurde eine Gesamtpunktzahl von 12 erreicht (Tab.8).

Tabelle 8 Bewertung Photogrammetrie: Fotolabor HNO-Klinik Jena, Rekonstruktion mit Agisoft Photoscan

Kategorie	Punktwert 1 eingeschränkt praxistauglich 2 gut 3 sehr gut
Optische Qualität des Scans	2
Einfachheit der Handhabung	1
Dauer der Aufnahme	1
Umfang der Scannachbearbeitung	2
Vorbereitungszeit des Scans	2
Komfort für den Probanden	1
Preis des Scanners	3
Gesamtpunktzahl	12

4.1.6 Photogrammetrie: Fotolabor: Regard 3D

Für die Rekonstruktion mit dem Programm Regard 3D wurden alle 72 Bilder der ersten Fotoserie verwendet. Es konnte ein Modell des Gesichtes erstellt werden, welches große Löcher im Bereich der Stirn und der Wangen aufwies (Abb. 39). Die Oberfläche des Modells ist in allen abgebildeten Bereichen sehr aufgeworfen.

Abbildung 35: 3D-Modell Photogrammetrie Fotolabor HNO-Klinik Jena, Rekonstruktion mit Regard 3D aus 72 Bildern der Fotoserie 1

Die reduzierte Anzahl von 36 Bildern der ersten Fotoserie wurde für eine weitere Rekonstruktion mit Regard 3D verwendet. Eine deutliche Ausbildung von Löchern war über die gesamte Modelloberfläche zu erkennen (Abb. 40). Es bestand nahezu keine zusammenhängende Modelloberfläche. Die erstellten Fragmente wiesen eine sehr grobe Oberfläche auf.

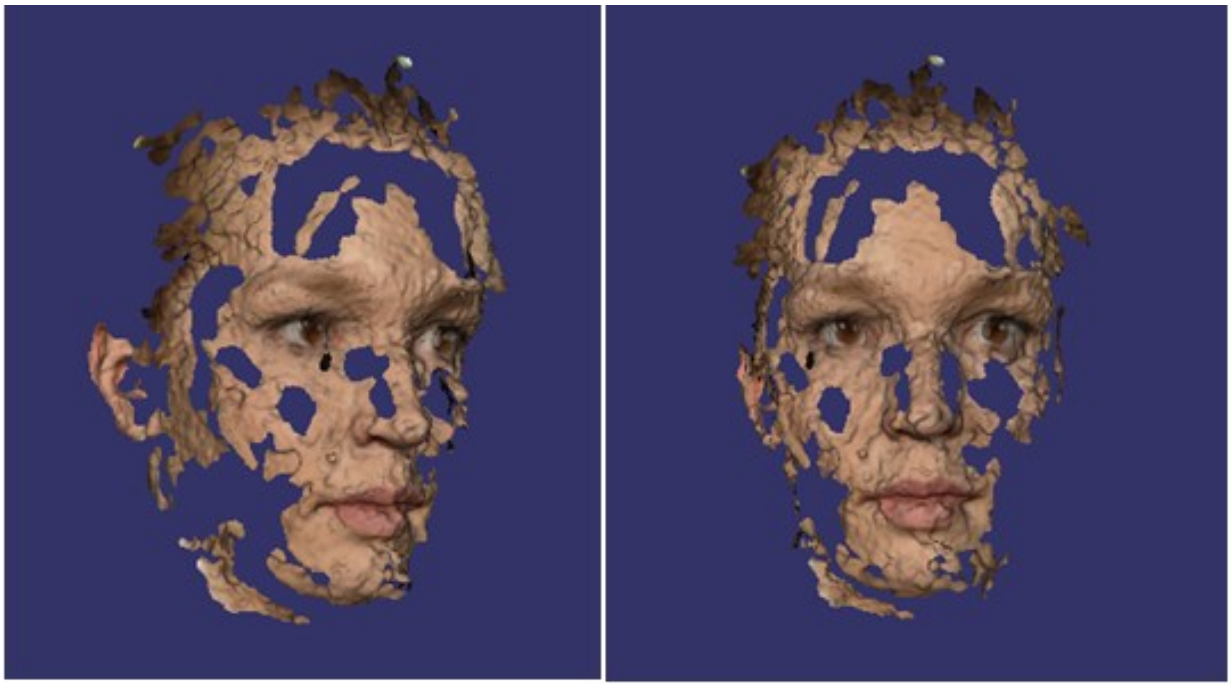

Abbildung 36: 3D-Modell Photogrammetrie Fotolabor HNO-Klinik Jena, Rekonstruktion mit Regard 3D aus 36 Bildern der Fotoserie 1

Mit dem Programm Regard 3D wurde aus allen 72 Bildern der zweiten Fotoserie eine weitere Rekonstruktion erstellt (Abb. 41). Das 3D-Modell zeigte deutliche Löcher im Bereich von Stirn, Augen und linker Gesichtshälfte. Eine blasige, aufgeworfene Oberflächenstruktur dominierte.

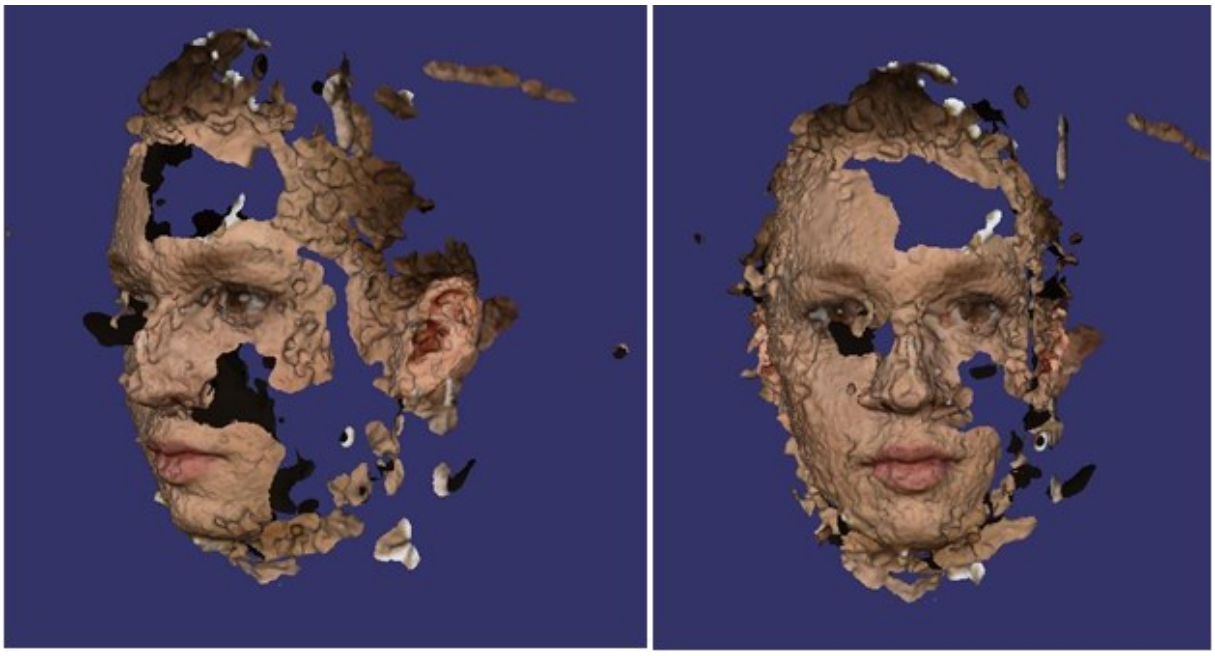

Abbildung 37: 3D-Modell Photogrammetrie Fotolabor HNO-Klinik Jena, Rekonstruktion mit Regard 3D aus 72 Bildern der Fotoserie 2

Aus der zweiten Fotoserie wurde mit dem Programm Regard 3D ebenfalls eine Rekonstruktion mit der reduzierten Bildanzahl von 36 erstellt. Es konnte keine 3D-Rekonstruktion des Gesichtes erstellt werden (Abb. 42). Das Programm zeigte leidglich unzusammenhängende Fragmente.

Abbildung 38: 3D-Modell Photogrammetrie Fotolabor HNO-Klinik Jena, Rekonstruktion mit Regard 3D aus 36 Bildern der Fotoserie 2

Die Tabelle 9 zeigt die zeitliche Aufstellung der Dauer der einzelnen Schritte der Rekonstruktion von Gesichtsmodellen aus der ersten und zweiten Fotoserie mit dem Programm Regard 3D. In der Tabelle wird weiterhin zwischen der Anwendung der vollständigen Fotoserien und einer reduzierten Anzahl von 36 Bildern unterschieden. Die Dauer der Arbeitsschritte stieg mit der Anzahl der verwendeten Bilder an. Die Rekonstruktion der 72 Bilder aus der zweiten Fotoserie dauerte etwas länger als die Verarbeitung der gleichen Anzahl Bilder aus der ersten Fotoserie.

Tabelle 9: Dauer der Arbeitsschritte bei 3D-Rekonstruktion der photogrammetrischen Aufnahmen aus dem Fotolabor der HNO-Klinik Jena mit dem Programm Regard 3D aus jeweils 72 und 36 Bildern

	Fotoserie 1		Fotoserie 2		Fotoserie 3		Fotoserie 4	
Anzahl der Bilder	72	36	72	36	72	36	72	36
Arbeitsschritte	Dauer der Arbeitsschritte in min							
Laden der Fotoserie	0,12	0,01	0,12	0,05	0,26	0,01	0,11	0,05
Ermittlung überlappender Punkte	2,05	0,42	2,23	0,47	3,68	0,36	2,11	0,5
Triangulation	1,25	0,05	0,50	0,01	1,23	0,01	0,38	0,01
Berechnung der Punktwolke	1,23	0,28	3,28	0,02	3,50	0,47	4,62	0,01
Erzeugen der Modelloberfläche	1,01	0,18	0,40	0,13	1,39	0,12	0,95	0,25

Die Qualität jedes der vier erstellten Gesichtsmodelle mit dem Programm Regard 3D war unzureichend. Der Komfort für den Patienten war durch die lange Dauer und die Positionierung auf dem Aufnahmestuhl reduziert. Es wurde wenig Zeit zur Vorbereitung benötigt. Die Nachbearbeitung der Aufnahmen war einfach durchzuführen. Das Programm ist kostenlos erhältlich. Es wurde eine Gesamtpunktzahl von 11 Punkten erreicht (Tab. 10).

Tabelle 10: Bewertung Photogrammetrie: Fotolabor HNO- Klinik Jena, Rekonstruktion mit Regard 3D

Kategorie	Punktwert 1 eingeschränkt praxistauglich 2 gut 3 sehr gut
Optische Qualität des Scans	1
Einfachheit der Handhabung	1
Dauer der Aufnahme	1
Umfang der Scannachbearbeitung	2
Vorbereitungszeit des Scans	2
Komfort für den Probanden	1
Preis des Scanners	3
Gesamtpunktzahl	11

4.1.7 DI3D capture™ Stereophotogrammetrie- System

Das texturierte Gesichtsmodell des Stereophotogrammetriesystems wies keine Löcher auf und ist durch eine sehr ebene Oberfläche gekennzeichnet. Abweichungen zeigen sich im Bereich des Haaransatzes des Probanden (Abb. 43). Die Handhabung des Systems war einfach und vorbereitende Maßnahmen beschränkten sich auf eine vorherige automatische Kalibrierung. Die Aufnahme dauerte eine Sekunde. Es war keine manuelle Nachbearbeitung notwendig. Die Kosten für das System variierten je nach Umfang zwischen 20.000 und 140.000 $. Es wurde eine Gesamtpunktzahl von 19 Punkten erreicht (Tab. 11).

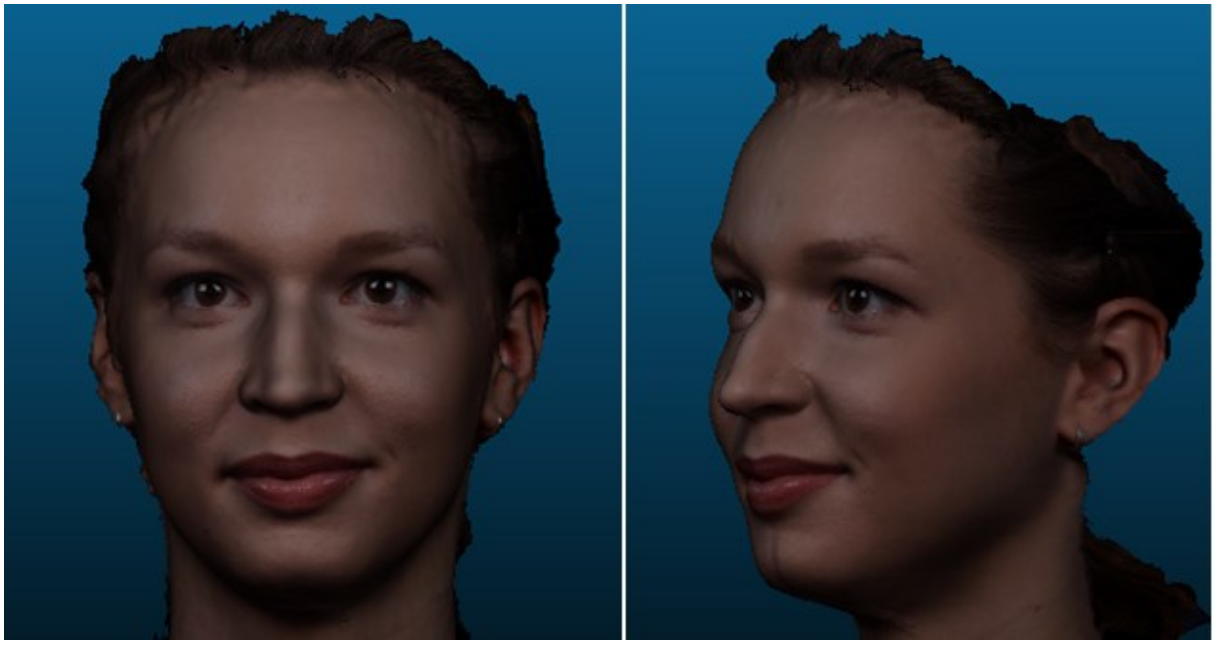

Abbildung 39: 3D-Modell DI3D capture™ Stereophotogrammetrie System

Tabelle 11: Bewertung des DI3D capture™ Stereophotogrammetrie- Systems durch Punktesystem

Kategorie	Punktwert 1 eingeschränkt praxistauglich 2 gut 3 sehr gut
Optische Qualität des Scans	3
Einfachheit der Handhabung	3
Dauer der Aufnahme	3
Umfang der Scannachbearbeitung	3
Vorbereitungszeit des Scans	3
Komfort für den Probanden	3
Preis des Scanners	1
Gesamtpunktzahl	19

Zusammenfassung der Punktzahlen der Scanverfahren zur Darstellung des Gesichtes

In der nachfolgenden Abbildung 44 sind die vergebenen Gesamtpunktzahlen der untersuchten Scanverfahren aufgeführt und gegenübergestellt. Die geringsten Gesamtpunktzahlen von 11 Punkten erzielten die Versuche der Photogrammetrie mit den dazugehörigen Programmen Regard 3D und Agisoft Photoscan und der Davidlaserscanner. Die gleiche höchste Punktzahl erzielte das Stereophotogrammetriesystem und der Handyscanner iSense mit 19 Punkten.

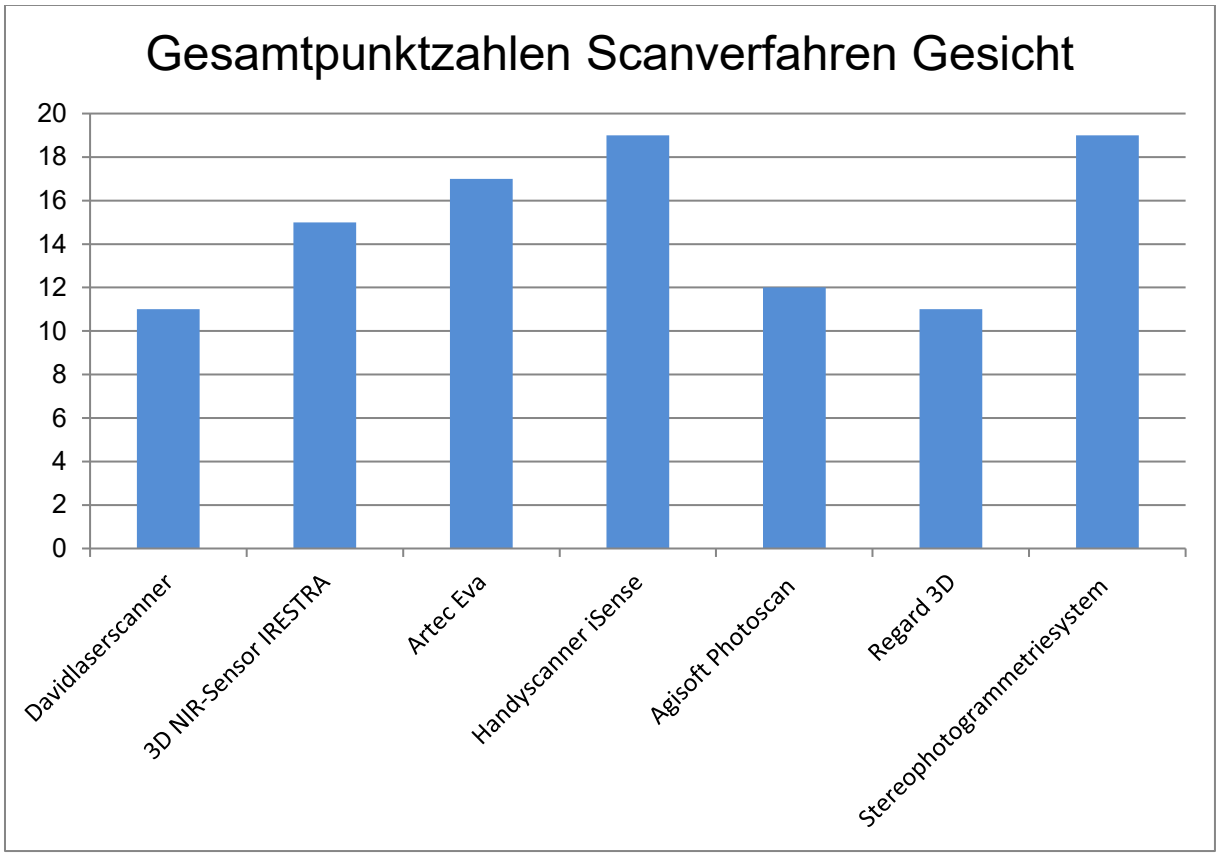

Abbildung 40: Gesamtpunktzahlen der Scanverfahren Gesicht

4.2 Ergebnisse 3D-Rekonstruktion Ohrmuschel

4.2.1 Davidlaserscanner 3di GmbH Jena

Für die Darstellung des Außenohres wurden zwei weitere Versuche mit dem Davidlaserscanner der 3di GmbH Jena durchgeführt. Im Rahmen des vierten Versuches wurden vier Aufnahmen aus unterschiedlichen Positionen (Abb. 45) und im fünften Versuch sieben Aufnahmen (Abb.46) erstellt.

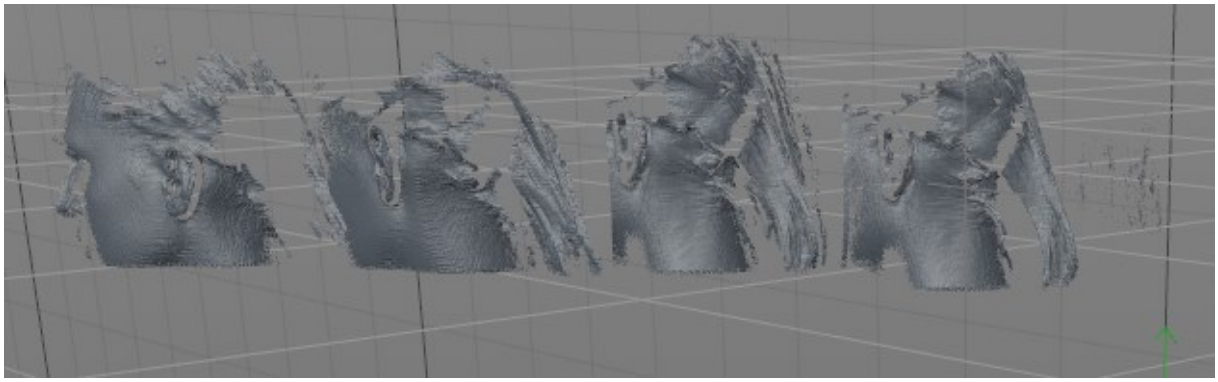

Abbildung 41: Rohdaten Versuch 4: Davidlaserscanner 3di GmbH Jena zur Darstellung der Ohrmuschel

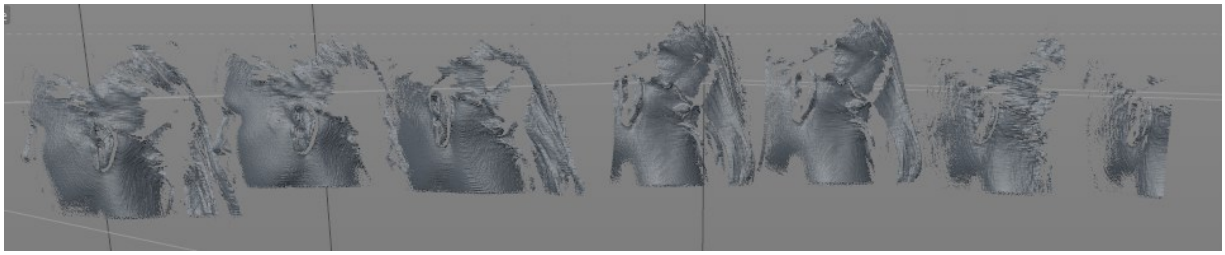

Abbildung 42: Rohdaten Versuch 5: Davidlaserscanner 3di GmbH Jena zur Darstellung der Ohrmuschel

Aus den Rohdaten der beiden Versuche konnten durch Fusionierung zwei 3D-Modelle erstellt werden (Abb. 47, 48). Beide Rekonstruktionen zeigten deutliche Abweichungen in der Kontur des Ohres. Die Modelloberfläche war uneben und die Ränder der einzelnen Scans waren noch voneinander zu unterscheiden. Durch die veränderte Positionierung des Probanden an der Aufnahmeeinheit verlängerte sich sowohl die Vorbereitungszeit, als auch die Dauer der Aufnahmen. Durch die verminderte Abstützung während der Aufnahmen war der Komfort für den Patienten deutlich reduziert. Die Nachbearbeitung war umfangreich. Die Kosten für die Scankomponenten beliefen sich auf 814 €. Es wurde eine Gesamtpunktzahl von 9 erreicht (Tab. 12).

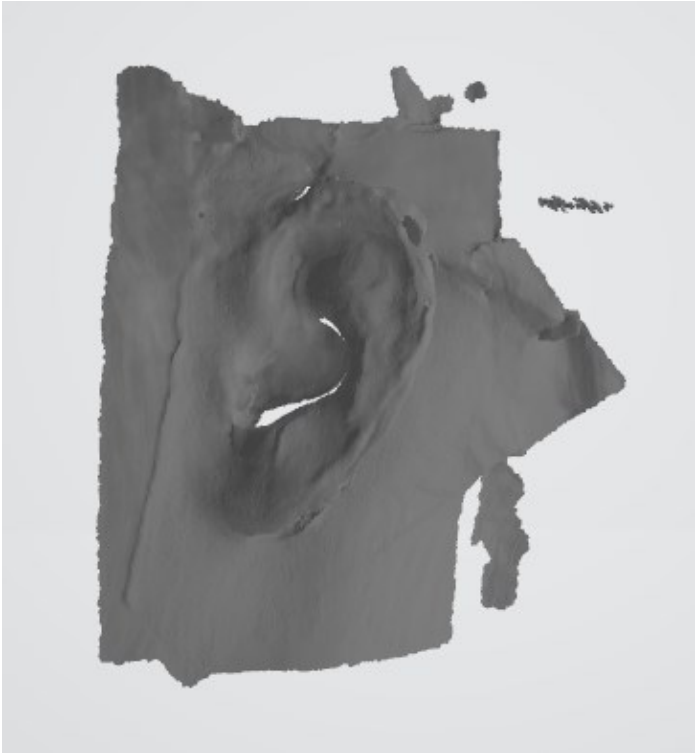

Abbildung 43: 3D-Modell Davidlaserscanner 3di GmbH Jena, Versuch 4: Darstellung der Ohrmuschel

Abbildung 44: 3D-Modell Davidlaserscanner 3di GmbH Jena, Versuch 5: Darstellung der Ohrmuschel

Tabelle 12: Bewertung des Davidlaserscanners 3di GmbH Jena zur Darstellung der Ohrmuschel

Kategorie	Punktwert 1 eingeschränkt praxistauglich 2 gut 3 sehr gut
Optische Qualität des Scans	1
Einfachheit der Handhabung	1
Dauer der Aufnahme	1
Umfang der Scannachbearbeitung	1
Vorbereitungszeit des Scans	2
Komfort für den Probanden	1
Preis des Scanners	2
Gesamtpunktzahl	9

4.2.2 Strukturlichtscanner Artec Spider

Zur Darstellung der Ohrmuschel wurde der handgeführte Strukturlichtscanner Artec Spider verwendet. Die Kontur und die Form des Ohres sind gut dargestellt (Abb.49). Auch die inneren Bereiche des Ohres sind ohne Löcher zu erkennen. Die Scanoberfläche erscheint ebenmäßig. Die Erstellung der Aufnahme dauerte wenige Minuten und verlief für den Probanden komfortabel. Die Vorbereitungszeit war gering. Die Nachbearbeitung erfolgte analog der Nachbearbeitung beim Artec Eva. Die Kosten für diesen Scanner beliefen sich auf 19.700 €. Es wurde eine Gesamtpunktzahl von 17 Punkten erreicht (Tab. 13).

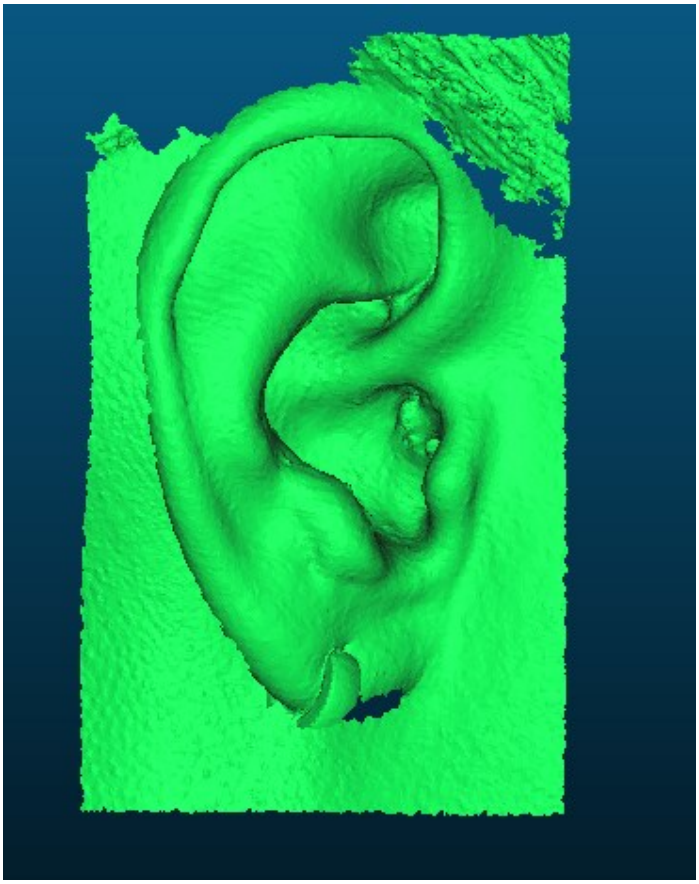

Abbildung 45: 3D- Modell Artec Spider

Tabelle 13: Bewertung des Strukturlichtscanners Artec Spider zur Darstellung der Ohrmuschel

Kategorie	Punktwert 1 eingeschränkt praxistauglich 2 gut 3 sehr gut
Optische Qualität des Scans	3
Einfachheit der Handhabung	2
Dauer der Aufnahme	2
Umfang der Scannachbearbeitung	2
Vorbereitungszeit des Scans	3
Komfort für den Probanden	3
Preis des Scanners	2
Gesamtpunktzahl	17

4.2.3 Streifenlichtscanner 3D-NIR Sensor IRESTRA

Das Scanergebnis des Streifenlichtscanners 3D-NIR Sensor IRESTRA zeigte insbesondere den schwer abzubildenden Hinterschnitt der Ohrmuschel (Abb. 50). Die vorderen Anteile der Ohrmuschel konnten bereits bei den Versuchen zur Darstellung des Gesichtes (Abb.32) in guter Qualität und ohne Lücken dargestellt werden. Die Handhabung des Scanners erfordert einen erfahrenen Anwender. Die Aufnahme wurde in weniger als einer Sekunde angefertigt. Der Komfort für den Patienten war hoch. Die Nachbearbeitung war durch Verarbeitung und Konvertierung der großen Datenmenge umfangreich. Es wurde eine Gesamtpunktzahl von 15 Punkten erreicht (Tab. 14).

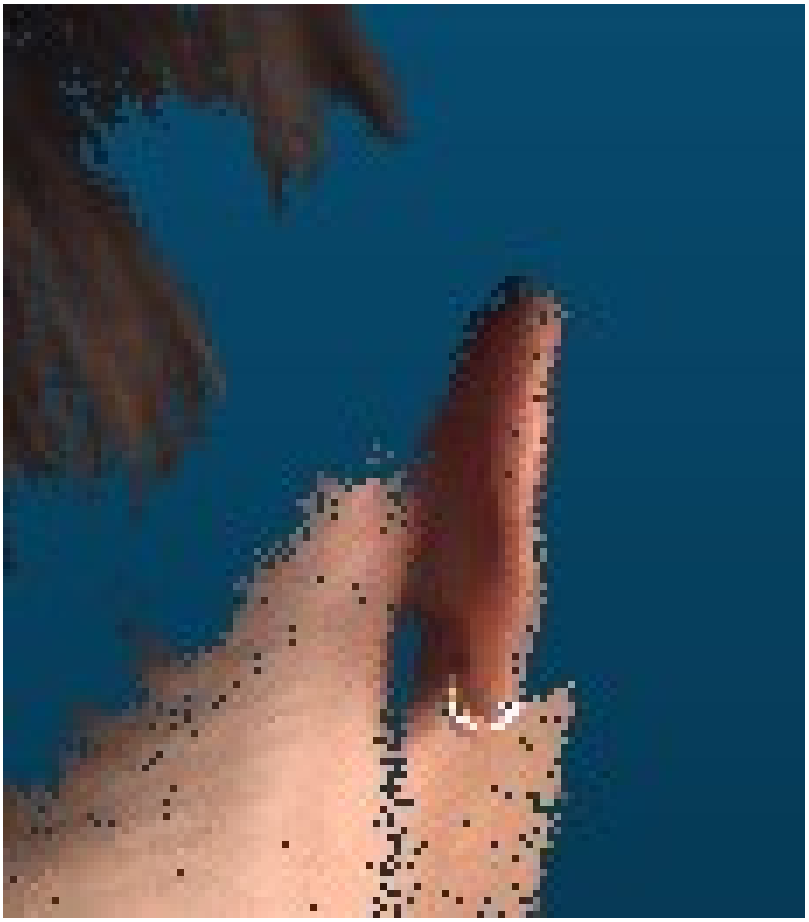

Abbildung 46: 3D- Modell Streifenlichtscanner 3D-NIR Sensor IRESTRA

Tabelle 14: Bewertung des Streifenlichtscanner 3D-NIR Sensor IRESTRA zur Darstellung der Ohrmuschel

Kategorie	Punktwert 1 eingeschränkt praxistauglich 2 gut 3 sehr gut
Optische Qualität des Scans	3
Einfachheit der Handhabung	2
Dauer der Aufnahme	3
Umfang der Scannachbearbeitung	1
Vorbereitungszeit des Scans	2
Komfort für den Probanden	3
Preis des Scanners	1
Gesamtpunktzahl	15

4.2.4 Rekonstruktion mit Agisoft Photoscan

Aus der Datengrundlage des Photogrammetrieversuches im Fotolabor der HNO-Klinik in Jena wurde mit dem Programm Agisoft Photoscan eine Rekonstruktion der Ohrmuschel erstellt. Im Bereich der Außenkante der Ohrmuschel waren deutliche Ungenauigkeiten und Verzerrungen zu erkennen (Abb. 51). Das Modell war unscharf. Die Handhabung als auch die Dauer der Aufnahmen waren sehr umfangreich. Durch die veränderte Positionierung und die lange Dauer war der Komfort für den Probanden deutlich reduziert. Vor- und Nachbereitung des Versuches waren leicht durchzuführen. Die Nachbearbeitung der Aufnahmen war durch die Datenmenge mit einem hohen Zeitaufwand verbunden. Es wurde eine Gesamtpunktzahl von 11 Punkten erreicht (Tab. 15).

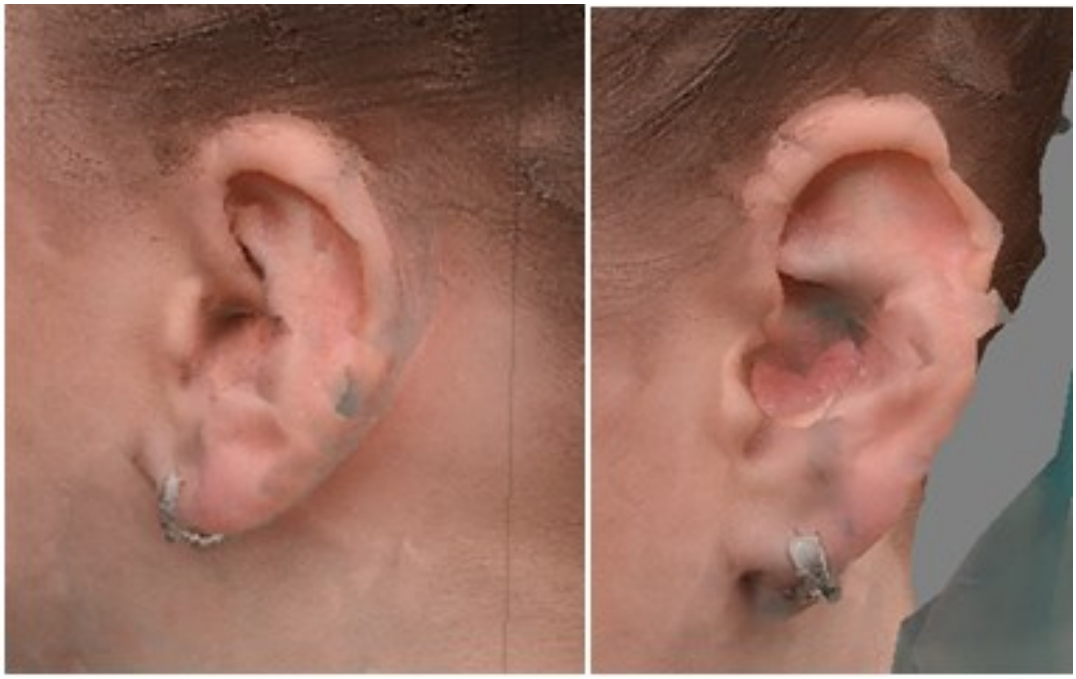

Abbildung 47: 3D Modell des Photogrammetrieversuchs im Fotolabor der HNO-Klinik Jena, Rekonstruktion der Ohrmuschel mit Agisoft Photoscan

Tabelle 15: Bewertung des 3D-Modelles der Photogrammetrie im Fotolabor HNO-Klinik Jena, Rekonstruktion mit Agisoft Photoscan

Kategorie	Punktwert 1 eingeschränkt praxistauglich 2 gut 3 sehr gut
Optische Qualität des Scans	1
Einfachheit der Handhabung	1
Dauer der Aufnahme	1
Umfang der Scannachbearbeitung	2
Vorbereitungszeit des Scans	2
Komfort für den Probanden	1
Preis des Scanners	3
Gesamtpunktzahl	11

Zusammenfassung der Punktzahlen der Scanverfahren zur Darstellung der Ohrmuschel

Im nachfolgenden Balkendiagramm (Abb.52) ist die Zusammenfassung der Gesamtpunktzahlen der vier Versuche zur dreidimensionalen Darstellung der Ohrmuschel aufgeführt. Die vier Versuche lassen sich in zwei Gruppen aufteilen. Das Streifenlichtverfahren IRESTRA und der Strukturlichtscanner Artec Eva erhielten hohe Gesamtpunktzahlen, wohingegen der Streifenlichtscanner Davidlaserscanner und die photogrammetrische Rekonstruktion deutlich niedrigere Bewertungen erhielten.

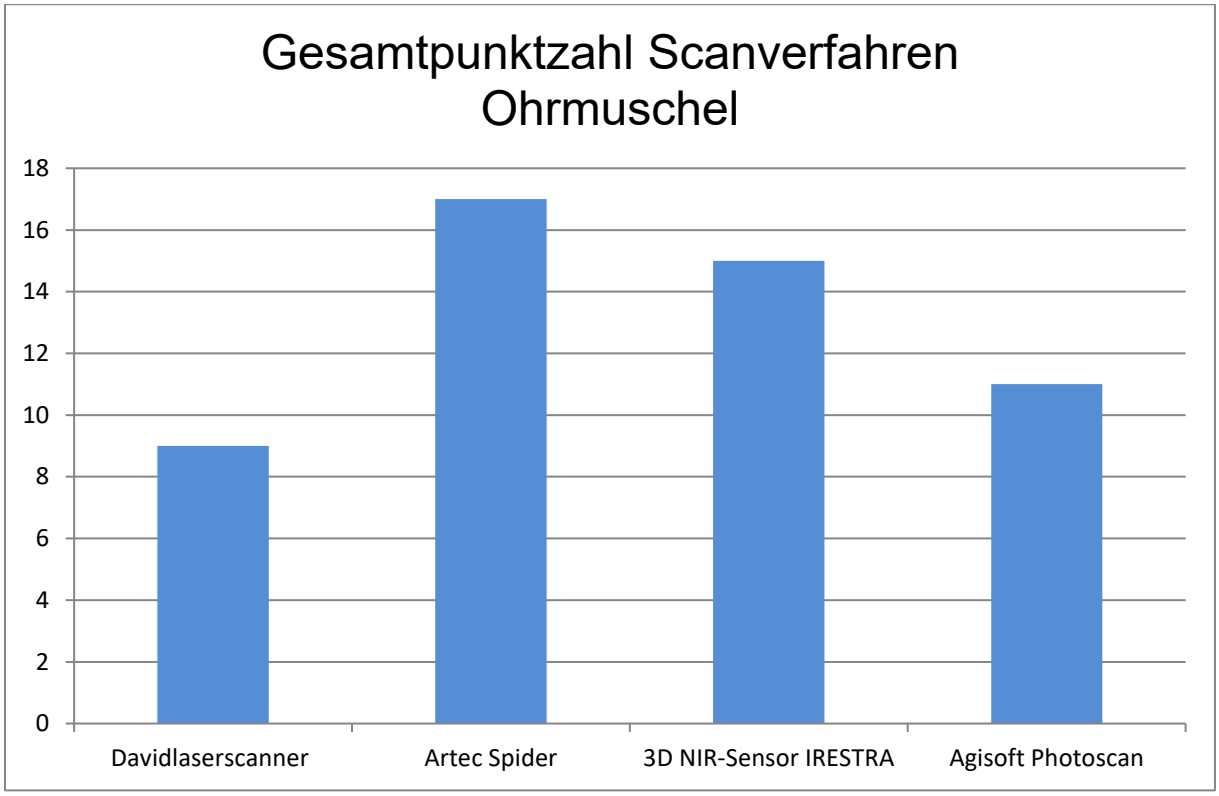

Abbildung 48: grafische Darstellung der Gesamtpunktzahl der Scanverfahren der Ohrmuschel

4.3 Ergebnisse der manuellen Gesichtsvermessung

Zur Ermittlung der in Tabelle 1 definierten Gesichtsstrecken wurde zunächst am Kopf des Probanden eine manuelle Messung vorgenommen (Abb. 53). Die Messung wurde von drei Untersuchern jeweils dreimal durchgeführt und daraus der Mittelwert gebildet.

Abbildung 49: Durchführung der manuellen Gesichtsvermessung

Zur weiterführenden Gegenüberstellung der manuellen und der digitalen Gesichtsvermessung und der Definition von Messfehlern wurden sieben exemplarische Messstrecken und die dazugehörigen Messpunkte für diesen Vergleich ausgewählt (Abb. 54). Die ausgewählten Messpunkte (Tab.16) sind in der klinischen Praxis der Vermessung von Gesichtern etabliert und konnten von den drei Untersuchern sicher am Gesicht des Probanden definiert werden (Sawyer et al. 2009, Koban et al. 2014).

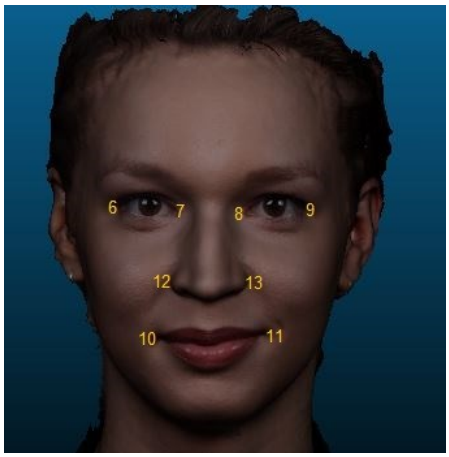

Abbildung 50: Übersicht der reduzierten Messpunkte des Mittelgesichtes

Tabelle 16: Auswahl von Messpunkten und Messstrecken zur Gegenüberstellung der manuellen und der digitalen Gesichtsvermessung

Strecke	**Streckenbezeichnung**	**Messpunkte**
31	Lateraler Augenwinkel-medialer Augenwinkel rechts	9-8
32	Lateraler Augenwinkel-medialer Augenwinkel	6-8
33	Lateraler Augenwinkel-medialer Augenwinkel	9-7
56	Alare-lateraler Augenwinkel links	12-6
58	Alare-lateraler Augenwinkel rechts	13-9
60	Mundwinkel-lateraler Augenwinkel links	10-6
62	Mundwinkel-lateraler Augenwinkel rechts	11-9

In Tabelle 17 sind die Mittelwerte (in mm) der jeweiligen drei Messungen der drei Untersucher und der daraus resultierende Gesamtmittelwert dargestellt. Weiterhin wurde aus den Messwerten der sieben Strecken die jeweilige Standardabweichung (in cm) ermittelt.

Tabelle 17: Übersicht der Mittelwerte der drei Untersucher der ausgewählten Messstrecken zur manuellen Gesichtsvermessung (in mm)

Strecke	Mittelwert der Distanzen Untersucher 1	Mittelwert der Distanzen Untersucher 2	Mittelwert der Distanzen Untersucher 3	Gesamtmittelwert der manuellen Messungen	Standard-abweichung (in mm)
31	34,00	38,11	36,43	36,18	1,69
32	64,67	67,98	68,11	66,92	1,59
33	62,96	66,79	67,63	65,79	2,03
56	54,74	54,37	53,68	54,26	0,44
58	53,29	53,01	52,67	52,99	0,25
60	76,03	74,95	75,34	75,44	0,45
62	74,18	74,36	73,97	74,17	0,16

4.4 Ergebnisse der digitalen Gesichtsvermessung

Alle 3D-Visualisierungen, die mit den untersuchten Gesichtsscannern erzeugt wurden, konnten durch eine digitale Vermessung der Gesichtsstrecken untersucht werden (Tab. 1). Das Messverfahren erfolgte analog der manuellen Gesichtsvermessung und wurde von drei Untersuchern jeweils dreimal durchgeführt. Den Abschluss bildet auch hier die Bildung des Gesamtmittelwertes. Zur weiterführenden Gegenüberstellung der digitalen Gesichtsvermessungen im Vergleich zur der manuellen Methode wurden die in Tabelle 18 ausgewählten Messstrecken verwendet. Aufgrund der reduzierten optischen Qualität einiger der untersuchten 3D-Visualisierungen wurden für den angestrebten Vergleich die Scanergebnisse des Artec Eva, des IRESTRA-Systems und der Stereophotogrammetrie herangezogen.

Tabelle 18: Übersicht der Mittelwerte der drei Untersucher der ausgewählten Messstrecken zur digitalen Gesichtsvermessung des 3D-Modelles Artec Eva (in mm)

Strecke	Mittelwert der Distanzen Untersucher 1	Mittelwert der Distanzen Untersucher 2	Mittelwert der Distanzen Untersucher 3	Gesamtmittelwert der digitalen Messungen	Standard-abweichung (in mm)
31	33,68	32,74	37,74	34,72	2,17
32	64,32	67,12	65,95	65,80	1,15
33	62,98	66,38	67,34	65,57	1,87
56	55,33	55,84	55,15	55,44	0,29
58	53,87	53,54	54,93	54,11	0,59
60	76,27	76,02	76,79	76,36	0,32
62	76,72	74,33	76,05	75,70	1,01

Tabelle 19: Übersicht der Mittelwerte der drei Untersucher der ausgewählten Messstrecken zur digitalen Gesichtsvermessung des 3D-Modelles IRESTRA (in mm)

Strecke	Mittelwert der Distanzen Untersucher 1	Mittelwert der Distanzen Untersucher 2	Mittelwert der Distanzen Untersucher 3	Gesamtmittelwert der digitalen Messungen	Standard-abweichung (in mm)
31	35,83	34,74	36,75	35,77	0,82
32	67,78	67,73	67,71	67,74	0,03
33	66,45	65,56	68,85	66,95	1,39
56	52,86	54,26	55,38	54,17	1,03
58	51,03	52,90	50,42	51,45	1,06
60	76,36	77,03	75,41	76,27	0,66
62	73,78	75,84	74,45	74,69	0,86

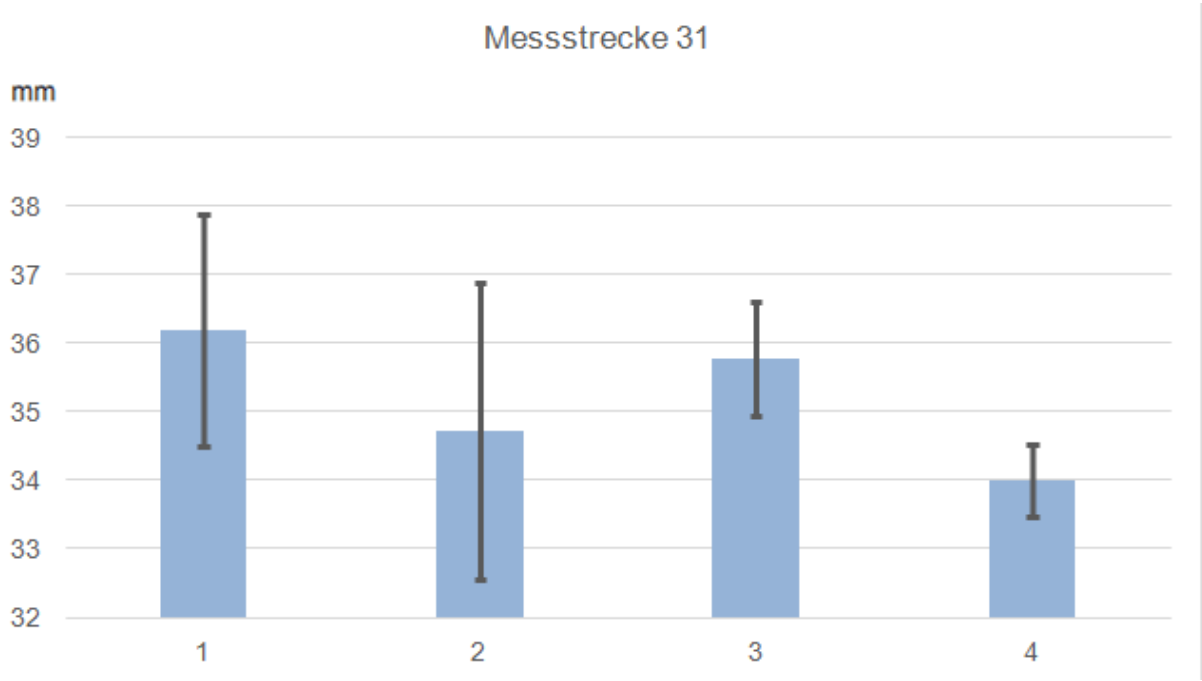

Abbildung 51: Darstellung der Messwerte der Messstrecke 31 und der Standardabweichung in mm
1: manuelle Gesichtsvermessung
2: digitale Gesichtsvermessung mittels Artec Eva
3: digitale Gesichtsvermessung mittels IRESTA
4: digitale Gesichtsvermessung mittels Stereophotogrammetrie

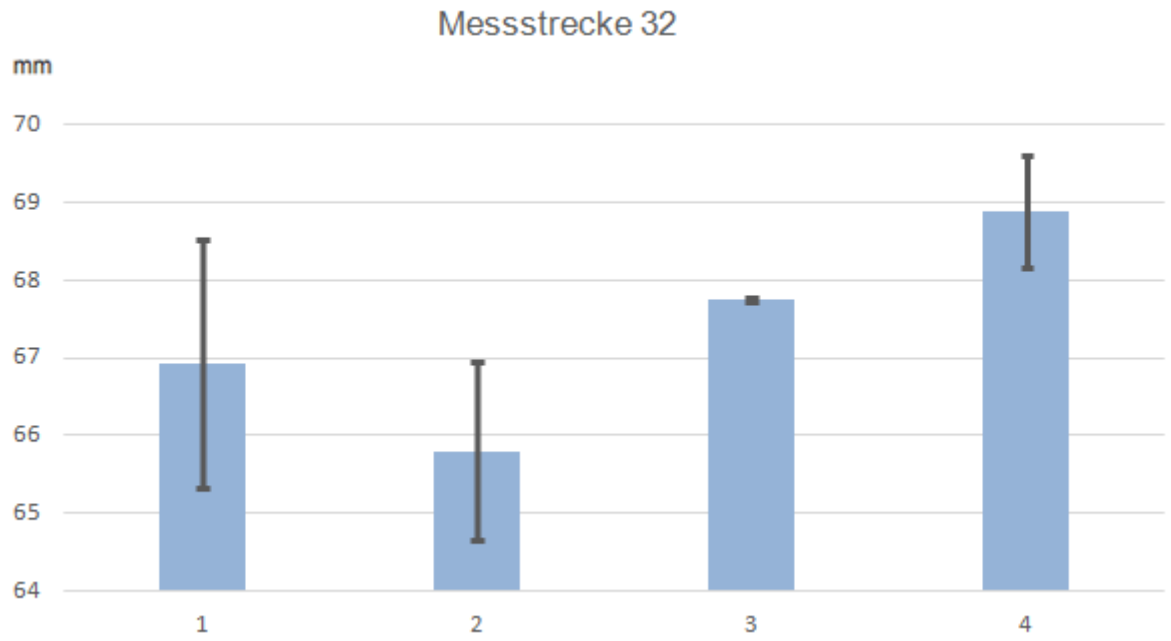

Abbildung 52: Darstellung der Messwerte der Messstrecke 32 und der Standardabweichung in mm
1: manuelle Gesichtsvermessung
2: digitale Gesichtsvermessung mittels Artec Eva
3: digitale Gesichtsvermessung mittels IRESTA
4: digitale Gesichtsvermessung mittels Stereophotogrammetrie

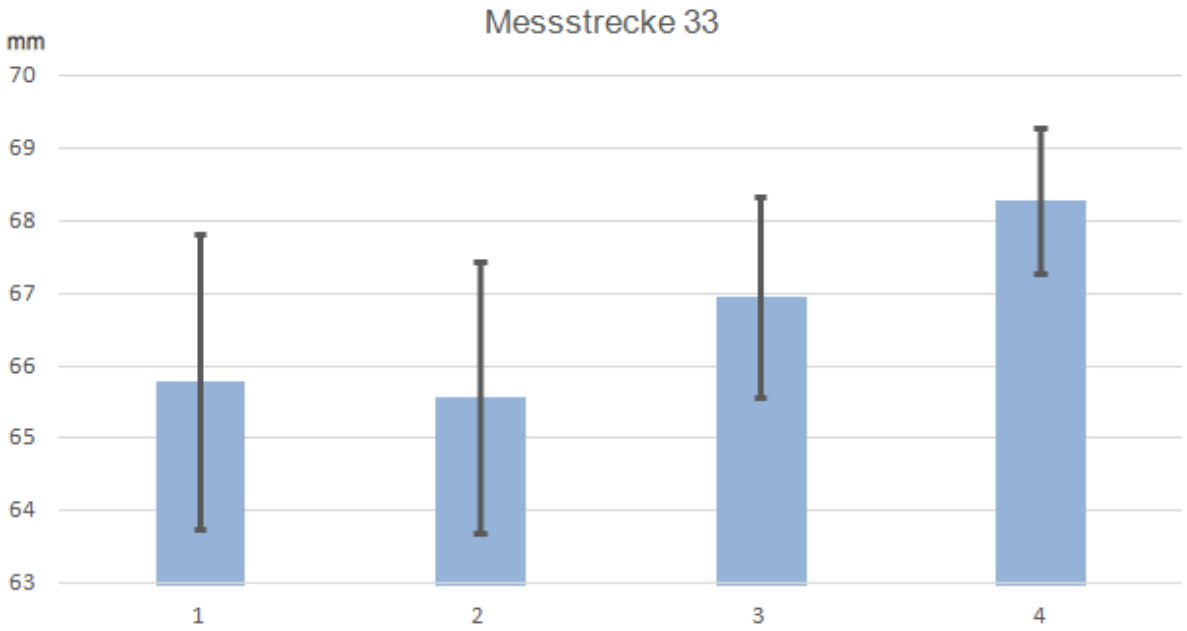

Abbildung 53: Darstellung der Messwerte der Messstrecke 33 und der Standardabweichung in mm
1: manuelle Gesichtsvermessung
2: digitale Gesichtsvermessung mittels Artec Eva
3: digitale Gesichtsvermessung mittels IRESTA
4: digitale Gesichtsvermessung mittels Stereophotogrammetrie

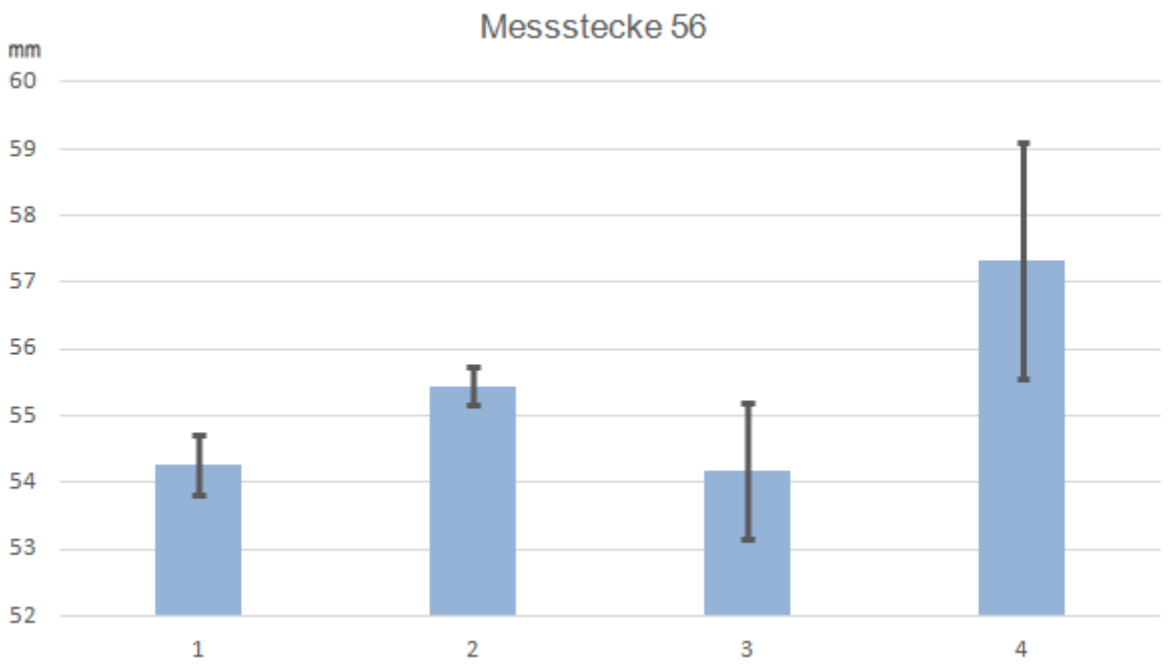

Abbildung 54: Darstellung der Messwerte der Messstrecke 56 und der Standardabweichung in mm
1: manuelle Gesichtsvermessung
2: digitale Gesichtsvermessung mittels Artec Eva
3: digitale Gesichtsvermessung mittels IRESTA
4: digitale Gesichtsvermessung mittels Stereophotogrammetrie

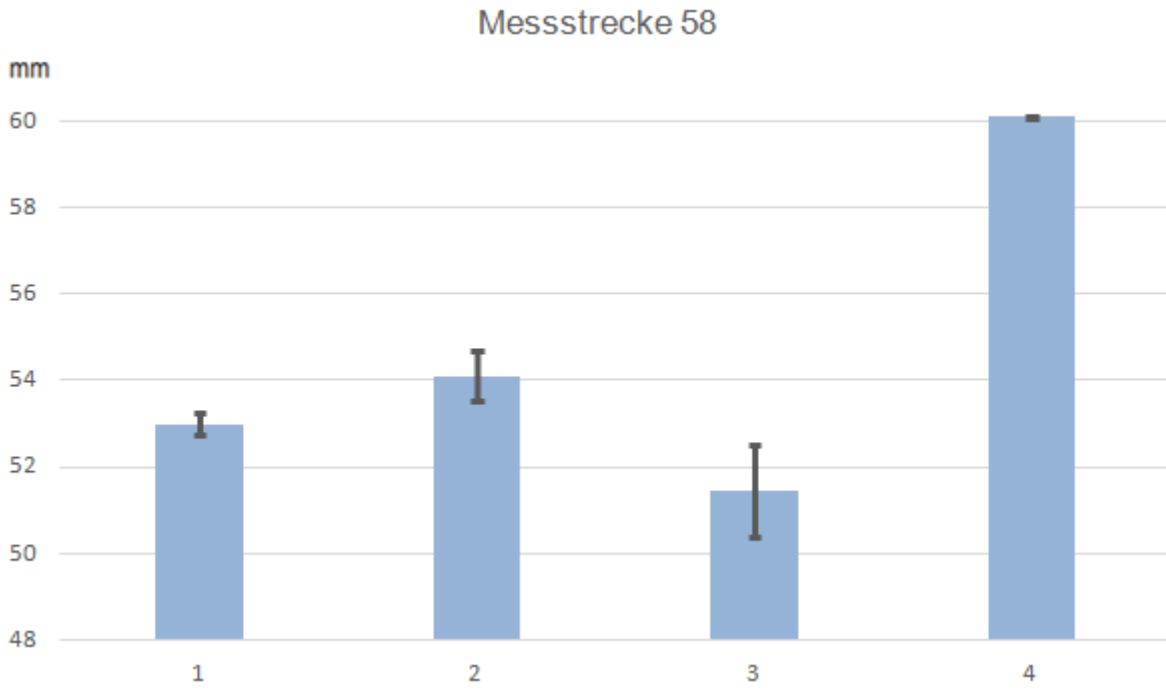

Abbildung 55: Darstellung der Messwerte der Messstrecke 58 und der Standardabweichung in mm
1: manuelle Gesichtsvermessung
2: digitale Gesichtsvermessung mittels Artec Eva
3: digitale Gesichtsvermessung mittels IRESTA
4: digitale Gesichtsvermessung mittels Stereophotogrammetrie

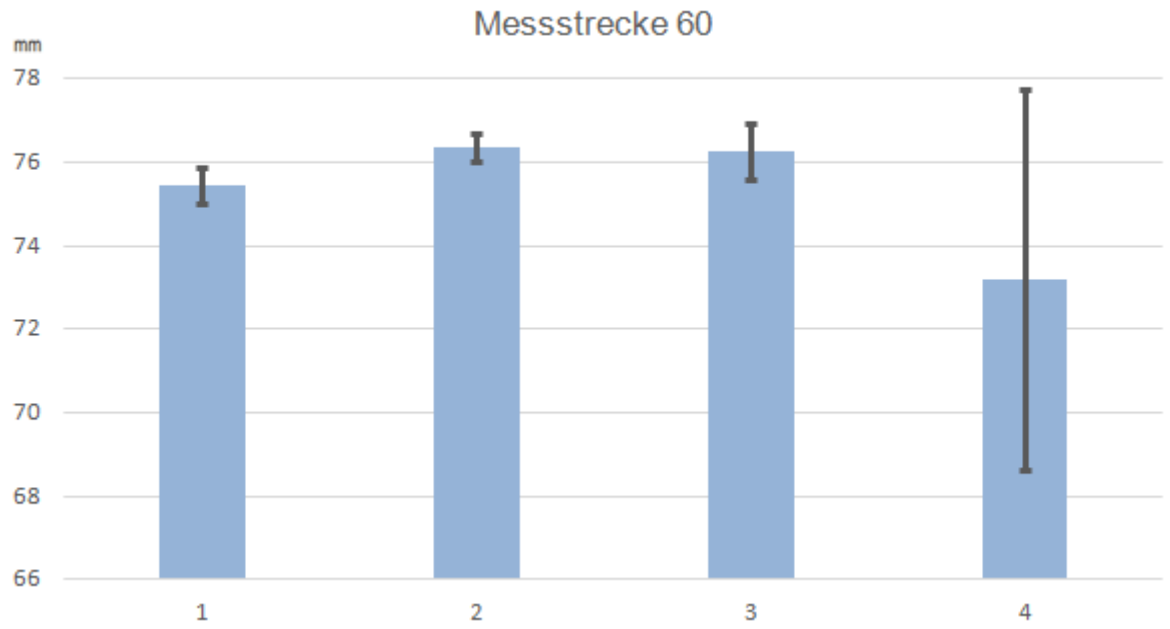

Abbildung 56: Darstellung der Messwerte der Messstrecke 60 und der Standardabweichung in mm
1: manuelle Gesichtsvermessung
2: digitale Gesichtsvermessung mittels Artec Eva
3: digitale Gesichtsvermessung mittels IRESTA
4: digitale Gesichtsvermessung mittels Stereophotogrammetrie

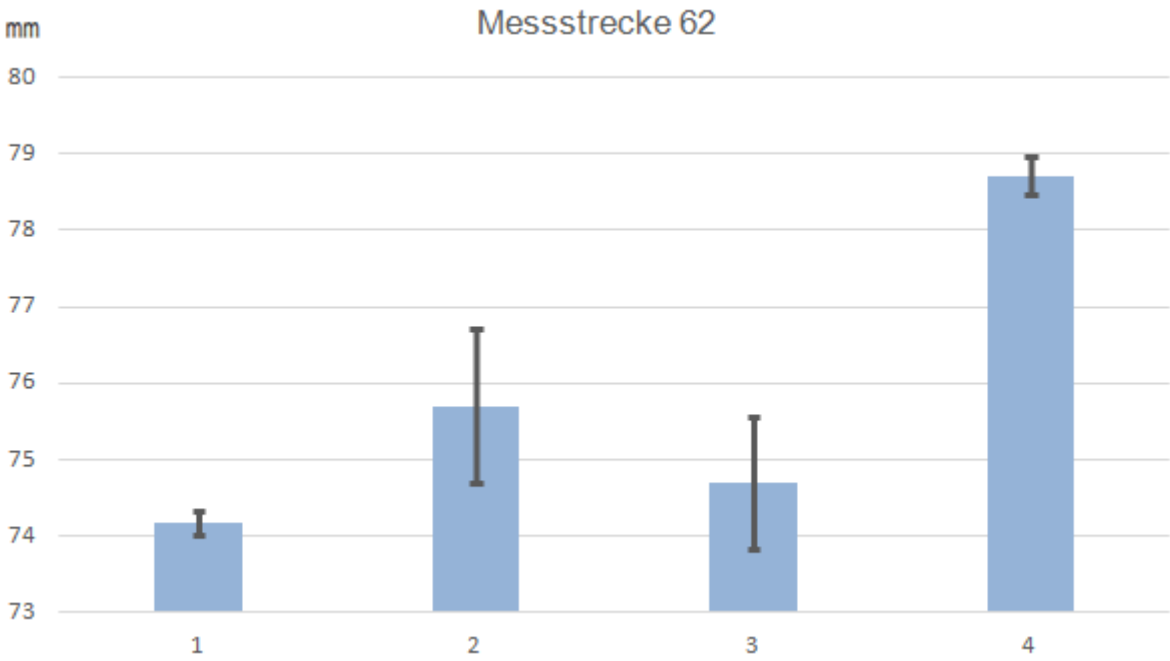

Abbildung 57: Darstellung der Messwerte der Messstrecke 62 und der Standardabweichung in mm
1: manuelle Gesichtsvermessung
2: digitale Gesichtsvermessung mittels Artec Eva
3: digitale Gesichtsvermessung mittels IRESTA
4: digitale Gesichtsvermessung mittels Stereophotogrammetrie

5 Diskussion

5.1 Methodendiskussion

Zur Erstellung einer Bewertungsgrundlage entsprechend der Ziel- und Fragestellung dieser Dissertation wurden verschiedene Methoden zur Untersuchung entwickelt und verwendet. Im Folgenden werden diese Methoden hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit zur wissenschaftlichen Untersuchung diskutiert.

5.1.1 Score

Das Ziel der Auswertung war, die Merkmale der einzelnen Scanner zu kategorisieren, um eine Übersichtlichkeit und Vergleichbarkeit herstellen zu können. Dazu wurde ein Scoresystem mit einer Punkteeinteilung entwickelt. Ein Score bietet die Möglichkeit der Schaffung einer Vergleichbarkeit von Merkmalen untereinander. In der Wissenschaft ist zur Evaluierung von Studien die Anwendung von Scoresystemen etabliert (Bein und Unertl 1993). Auch in der klinischen Praxis werden in den verschiedenen Fachrichtungen Scoresysteme entwickelt, um eine Quantifizierung und damit Verdichtung von Informationen zu erreichen. Innerhalb dieser Untersuchung wurde anhand der Merkmale und Eigenschaften der Scanverfahren und auf Grundlage der definierten Zielstellung ein eigenes Punktesystem entworfen. Es diente der Reduktion der komplexen Menge an unterschiedlichen Daten und sollte diese eindimensional auf einer Punkteskala abbilden, um wesentliche Informationen darzustellen (Neugebauer und Lefering 2004). Die Gestaltung des Scoresystems erfolgte dabei sowohl in Anlehnung an bereits etablierte medizinische Einteilungssysteme, wie sie bei Hürth für die Tumorpathologie der Radiologie oder bei Schönhofer für die Intensivmedizin beschrieben wurden (Hürth 2018, Schönhofer et al. 2002). Die bei Hürth geforderten Merkmale der Objektivität und Reliabilität sollten bei der Einteilung des Punktesystems durch eine genaue Definition der einzelnen Punktmerkmale von eins bis drei gewährleistet werden, um individuelle Interpretationen zu vermeiden (Tab .2) (Hürth 2018). In der Literatur werden bei Padole, Hürth und Arapakis Scoresysteme zur Auswertung von Bildqualitäten bei CT- Aufnahmen, bei MRT-Aufnahmen und Mammografieaufnahmen angewendet (Padole 2019, Hürth 2018, Arapakis I 2014).

Wir orientierten uns an diesen Arbeiten bezüglich der Bewertung der Merkmale hinsichtlich optischer Qualität der Ergebnisse der einzelnen Scanner. Durch die sehr genaue Beschreibung der Kriterien für das Scoresystem konnten wir die subjektiven Einflüsse der Bildbewertung minimieren. In der Literatur wird die Redundanz von Bildbewertungen (CT-Bilder) bei guter Auswahl und Beschreibung der Kriterien bei Padole et al. bestätigt (Padole 2019).

5.1.2 Gesichtsvermessungen

Ein wichtiger methodischer Aspekt war die Entwicklung eines Verfahrens zur Quantifizierung der Gesichtsoberfläche zur Beurteilung der Genauigkeit der Scanoberflächen. Es wurde ein individuelles Messprotokoll in Anlehnung an das bei Koban et al. beschriebene Verfahren erstellt (Koban et al. 2014). Koban et al. nutzen in ihrem Messverfahren eine manuelle Vermessung eines Puppenkopfes mit einem Maßband und zusätzlich eine digitale Vermessung von 3D-Modellen des Puppenkopfes. Das von uns angewendete Messverfahren besteht aus einer manuellen Vermessung der realen Gesichtsoberfläche des Probanden und einer digitalen Vermessung aller erzeugten 3D-Modelle nach dem gleichen Messvorgehen. Krimmel et al. beschreiben die traditionelle Methode zur anthropometrischen Analyse von Gesichtern durch eine direkte Vermessung der Gesichtsoberfläche (Krimmel et al. 2002). Die bisherige Standardtechnik der Vermessung von craniofazialen Fehlbildungen oder zur Planung von operativen Eingriffen wird dabei mit einem Messschieber durchgeführt (Liang et al. 2013). Bei der manuellen Vermessung unserer Untersuchung wurde anstelle des bei Koban et al. benutzen Maßbandes ein digitaler Messschieber verwendet, da dieser einfach für die Untersucher zu handhaben war und der digitale Messwert direkt auf dem Display abgelesen werden konnte (Koban et al. 2014). Nachteil des starren Messschiebers gegen ein flexibles Maßband kann die weniger gute Anpassung an die 3D-Strukturen des Gesichtes sein. Das spielte bei der durchgeführten Untersuchung eine untergeordnete Rolle, weil die gewählten Anfangs- und Endpunkte in einer Ebene lagen. Die direkte Vermessung von Weichteilproportionen am Gesicht des Probanden bietet laut Speckmann den Vorteil, dass weder kamerabedingte Verzerrungen oder Angulationen das Messergebnis beeinflussen können (Speckmann 2004).

Speckmann beschreibt weiterhin den geringen Ausstattungsaufwand und die Vereinfachung der Bestimmung der Messpunkte durch die Möglichkeit der Palpation der darunterliegenden Knochenstrukturen (Speckmann 2004). Die Gesichtsvermessung erfordert einen erfahrenen Anwender (Liang et al. 2013). Die gravierendste Schwierigkeit der Vermessung im Rahmen unserer Untersuchung war die Detektion und Reproduzierbarkeit der definierten Gesichtslandmarken durch die Untersucher. Die Ursache ist am ehesten die, wie bei Speckmann beschrieben, unterschiedliche Kompressibilität des Weichgewebes (Speckmann 2004). Zur Vereinfachung wurde bei unserer Untersuchung in das Messprotokoll eine Abbildung zur Veranschaulichung der Punkte und eine Tabelle zur Erläuterung der Messpunkte und Strecken integriert. Die drei Untersucher konnten unter Zuhilfenahme dieser Materialien die manuelle und die digitale Gesichtsvermessung sicher durchführen. Die Definition der hier verwendeten Messpunkte stütz sich dabei auf sicher zu definierende und in der medizinischen Praxis interdisziplinär angewandte Landmarken. Diese Landmarken werden bei Speckmann für die Durchführung von kieferorthopädischen Weichteilprofilanalysen, bei Ort für Anwendungen in der plastischen Chirurgie und bei Sawyer et al. für die Detektion von Gesichtsausdrücken in der HNO beschrieben (Speckmann 2004, Ort 2012, Sawyer et al. 2009). Auch das Messprotokoll, welches Koban et al. anwendeten, orientiert sich an diesen Landmarken (Koban et al. 2014). Die jeweils dreimal wiederholte Messung aller Strecken durch die drei Untersucher war, wie auch bei Liang et al. beschrieben, sehr zeitaufwendig und aus diesem Grund für den Probanden unangenehm. Dennoch musste die manuelle Vermessung zur Schaffung einer umfangreichen und damit vergleichbaren Datenbasis durchgeführt werden (Liang et al. 2013). Während bei Liang et al. und auch bei unserer Untersuchung die Größe des Messfehlers bei einer manuellen Gesichtsoberfläche als gravierender Nachteil festgestellt wurde, konnten Koban et al. keine signifikanten Messfehler zwischen der manuellen und der digitalen Vermessung ermitteln (Liang et al. 2013, Koban et al. 2014). Dies lässt sich dadurch begründen, dass bei Koban et al. ein unbeweglicher Puppenkopf verwendet wurde, dessen Oberfläche eine geringere oder gleichmäßigere Kompressibilität als das menschliche Gesicht des Probanden aufweist und zusätzlich in den schwer zu vermessenden Regionen von Mund und Nase angepasst wurde, um die Messung zu optimieren (Koban et al. 2014).

Wir führten neben der manuellen Vermessung der Gesichtsoberfläche des Probanden ebenfalls durch drei Untersucher eine digitale Vermessung jedes 3D-Modelles der untersuchten Scanverfahren durch. Wie bei Liang et al. wurden die gleichen Messpunkte und Strecken verwendet und wie bei Koban et al. von den gleichen Untersuchern dreimal gemessen (Liang et al. 2013).

5.2 Ergebnisdiskussion

Um eine Anwendbarkeit in der klinischen Praxis zu gewährleisten und damit außerdem eine Alternative zur konventionellen Methode der Abformung des Gesichtes zur Darstellung von Gesichtsdefekten darzustellen, muss zunächst der Untersuchungs- und Nachbearbeitungsaufwand der benutzen Scanverfahren bewertet werden. Da die untersuchten Verfahren nach der Einteilung von Gühring (Abb.2) sowohl aus aktiven als auch aus passiven Verfahren bestanden, war der Aufwand und die benötigte Ausstattung für die Generierung der 3D-Daten des Gesichtes sehr unterschiedlich (Gühring 2007). Der Vorbereitungsaufwand unterschied sich bei den angewendeten Scannern hinsichtlich benötigter Ausstattung und Zeit deutlich. Der Grundaufbau der Komponenten des verwendeten Davidlaserscanners, als aktives Scanverfahren, besteht aus einer Projektionseinheit, die in definiertem Winkel zu einer Kamera positioniert ist und folgt damit den bei Przybilla und Engelmann beschriebenen Grundlagen der aktiven Triangulation im Rahmen einer Streifenprojektion (Przybilla 2007, Engelmann 2011). Dieses Messprinzip wird ebenfalls beim Handscanner Artec Eva, dem IRESTRA-System und dem Handyscanner iSense angewendet. Der Davidlaserscanner ist das einzige der vier untersuchten aktiven Scanverfahren, welches nicht über eine geschlossene Aufnahmeeinheit, sondern über einzelne Komponenten verfügt. Die nach Gühring als passiv definierten Verfahren der Photogrammetrie und der Stereophotogrammetrie weisen diesen Unterschied ebenfalls auf (Gühring 2007). Das Verfahren der Photogrammetrie, die Erstellung von dreidimensionalen Objekten aus digitalen Fotografien, kann kein automatisches 3D- Modell des Probanden liefern. Es muss nach Engelmann eine nachträgliche Auswertung mit spezialisierten Computerprogrammen erfolgen (Engelmann 2011). Aus diesem Grunde wurde im Rahmen unserer Untersuchung als zusätzliches passives Scanverfahren das Stereophotogrammetriesystem untersucht.

Dieses Verfahren erweitert das passive Scanverfahren der Photogrammetrie nach Camison et al. um die Anwendung von mehreren simultan arbeitenden, herkömmlichen Digitalkameras, die jeweils als Stereopaar fungieren (Camison et al. 2018). Die Kameras sind bei diesem feststehenden Aufbau so angebracht, dass simultan Fotografien aus verschiedenen Positionen und Winkeln erstellt werden können. Dieser abgeschlossene Aufbau bildet die Grundlage der 3D-Visualisierung des Gesichtes.

5.2.1 Diskussion Fragestellung 1

Fehleranfälligkeit

Unter den untersuchten Scanverfahren waren der Davidlaserscanner und das Verfahren der Photogrammetrie die anfälligsten für die Entstehung von Fehlern. Eine geringe Fehleranfälligkeit konnte bei den Scannern Artec Eva, dem IRESTRA-System und dem Stereophogrammetriesystem festgestellt werden.

Die Fehleranfälligkeit des Davidlaserscanners und der Photogrammetrie resultieren aus den Bewegungsartefakten bedingt durch die Zeitdauer der Aufnahmen und die erschwerte Abbildung des Gesichtes hinsichtlich Textur und Hintergrund.

Bewegungsartefakte

Die von uns festgestellte Fehleranfälligkeit der beiden Systeme begründet sich durch den Zeitaufwand der Datengenerierung und der damit verbundenen Möglichkeit der Entstehung von Bewegungsartefakten beim Scannen von Menschen. Sowohl der Versuch mit dem Davidlaserscanners als auch die Photogrammetrie werden, wie bei Bausch et al. beschrieben, in einem mehrschrittigen, teilweise manuell durchzuführenden Ablauf angewendet (Bausch et al. 2016). Gleiches stellten auch Maté-Gonzáles et al. und Sforza et al. bei der Beschreibung der langen Dauer der Datengenerierung bei der Anwendung von Photogrammetrie und Thomas et al. und Engelmann bei der Beschreibung der Erhöhung der Aufnahmezeit bei der Anwendung des Davidlaserscanners durch die notwendige manuelle Neupositionierung des Scanners bei der Aufnahme mehrerer Scans fest (Maté-Gonzáles et al. 2017, Sforza et al. 2013, Thomas et al. 2016, Engelmann 2011).

Um eine ganzflächige Darstellung des Gesichtes des Probanden zu erreichen, mussten in unseren Untersuchungen mehrere Aufnahmen durchgeführt werden, auch wenn dies, wie bei Hsu und Chung- Lin beschrieben eine Erhöhung der Scanzeit bedeutete (Hsu und Chung- Lin 2016). Die Abhängigkeit der langen Scandauer dieser beiden Verfahren von der Entstehung von Bewegungsartefakten und der daraus resultierenden Ungenauigkeit wird in der Literatur bei Secher et al. und Sforza et al. beschrieben (Secher et al. 2017, Sforza et al. 2013). Secher et al. erläutern, dass die Anwendung des Davidlaserscanners für die Abbildung von Patientengesichtern nur dann ausreichend genau ist, wenn eine sichere Positionierung in der Sagittalebene gewährleistet ist (Secher et al. 2017). Diese Aussagen können wir anhand unserer Erkenntnisse nur teilweise unterstützen, da unser Proband durch die Kopfstütze in der Sagittalen sicher positioniert war, aber dennoch Ungenauigkeiten durch Bewegungsartefakte entstanden. Dies lässt sich durch die bei Bayram et al. beschriebene Entstehung von Fehlern beim Scannen von Gesichtern durch Mikrobewegungen der mimischen Muskulatur und der Atmung erklären (Bayram et al. 2018). Verhulst et al. bestätigen unsere Erkenntnisse durch die Beschreibung der möglichen Entstehung von Bewegungsartefakten selbst bei der Anwendung des Handscanners Artec Eva mit nur kurzer Scanzeit (Verhulst et al. 2018). Sowohl Verhulst et al., Tzou et al. und Berg et. al empfehlen aufgrund der Relation von Versuchszeit zu Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Scanergebnisse die Anwendung der Stereophotogrammetrie als schnellstes Scanverfahren (Verhulst et al. 2018, Tzou et al. 2014, Berg et al. 2020). Auch im Rahmen unserer Untersuchung erfolgte die Generierung der Bilddaten durch die Stereophotogrammetrie am schnellsten. Gomes et al. erzielen ähnliche Ergebnisse durch die Beschreibung der Voraussetzung einer möglichst geringen Scanzeit für das Erreichen einer hohen Qualität (Gomes et al. 2019).

Die deutlich geringere Fehleranfälligkeit der Verfahren der Stereophotogrammetrie, des Artec EVA und des IRESTRA-Systems lassen sich daher durch die schnelle Generierung der Bilddaten begründen. Allerdings muss bei diesen Systemen zusätzlich die teilweise komplexe Bedienung berücksichtigt werden. Besonders bei dem IRESTRA-System, welches noch ein Prototyp war, und dem Artec Eva war im Rahmen unserer Untersuchung die Erfahrung des Untersuchers entscheidend. Eine Fehlerquelle war das Führen des portablen Handscanners Artec Eva um den Kopf des Probanden unter Einhaltung des korrekten Abstandes.

Dies führte auch bei Modabber et al. zu einer erhöhten Fehleranfälligkeit (Modabber et al. 2016). Das Stereophotogrammetriesystem war hingegen einfach zu bedienen. Gleiche Erkenntnisse beschreiben auch Verhulst et al. und Koban et al. durch die Beschreibung der Benutzerfreundlichkeit und Delegierbarkeit der Stereophotogrammetrie an Anwender mit geringer Erfahrung (Verhulst et al. 2018, Koban et al. 2020).

Camison et al. stimmen mit unseren Ergebnissen hinsichtlich der schnellen und einfachen Anwendung des Stereophotgrammetriesystems bei einem Vergleich eines handgeführten Scanners mit einem fest stehenden Stereophotogrammetriesystem überein (Camison et al. 2018). Das Verfahren der Stereophotogrammetrie wird ebenfalls bei Majid et al., Schaaf et al. und Sforza et al. als präzises und schnelles Scanverfahren charakterisiert (Majid et al. 2005, Schaaf et al. 2010, Sforza et al. 2013).

Textur und Hintergrund

Die untersuchten Verfahren der Photogrammetrie und des Davidlaserscanners wiesen eine Fehlerquelle in der komplexen Darstellung von Gesichtern bezüglich der Textur und des Hintergrundes auf. Während unsere Genauigkeitsuntersuchungen mit dem Gesicht des Probanden durchgeführt wurden, werden in der Literatur die Genauigkeitsanalysen der beiden Verfahren bei Alby et al., bei Roodbandi et al., bei Engelmann und Hsu und Chung-Lin anhand von Scanergebnissen von Testkörpern unter Laborbedingungen durchgeführt (Alby et al. 2009, Roodbandi et al. 2017, Engelmann 2011, Hsu und Chung- Lin 2016). Der Versuch des Davidlaserscanners wurde zusätzlich bei Bayram et al. und Thomas et al, wie auch bei Engelmann vor dem Idealhintergrund (Kalibrierungszeichnung) durchgeführt (Bayram et al. 2018, Thomas et al. 2016, Engelmann 2011). Diese Herangehensweise ließ sich in unseren Untersuchungen nur eingeschränkt umsetzen, da die vorhandene Kalibrierungszeichnung zu klein für das Scannen eines Kopfes war und daher nicht als Hintergrund verwendet werden konnte. Roodbandi et al. verwendeten ebenfalls den Davidlaserscanner zum Ganzkörperscan und Bayram et al. für einen Gesichtsscan von Probanden und erzielten bessere Ergebnisse als in unseren Untersuchungen (Roodbandi et al. 2017, Bayram et al. 2018). Ursachen für die besseren Ergebnisse waren der verwendete Hintergrund und die Textur der Scanoberfläche.

Auch hier wurde der Idealhintergrund (Kalibrierungszeichnung) verwendet. Der Idealhintergrund konnte aufgrund der geringen Größe der Kalibrierungszeichnung nicht für die Darstellung des Gesichtes in unserer Untersuchung angewendet werden. Bezüglich der Textur traten Fehler mit dem Davidlaserscanner beim Scannen in verschatteten Bereichen auf.

Diese Probleme beschreiben ebenfalls Hsu und Chung- Lin und führen das auf das Vorhandensein von reflektierenden aber auch dunklen Bereichen im Gesicht zurück (Hsu und Chung- Lin 2016).

Vorbereitungsaufwand

Der Zeitaufwand der Vorbereitung der untersuchten sechs Scanverfahren resultierte aus der Notwendigkeit der Kalibrierung der Scanverfahren und der korrekten Positionierung des Probanden und der Scanner zueinander.

Das Verfahren des Davidlaserscanners und das Verfahren der digitalen Photogrammetrie waren in der Vorbereitung der Aufnahmen die zeitaufwendigsten.

Die Vorbereitung des Versuches mit dem Davidlaserscanner war im Rahmen unserer Untersuchung durch die zuvor notwendige Kalibrierung des Systems umfangreich und fehleranfällig. Obwohl wir, wie auch Alby et al., Roodbandi et al., Engelmann und Bayram et al., das gleiche Kalibrierungsblatt und den gleichen Ablauf der Kalibrierung wie bei Omlenaowsky et al. verwendeten, kam es zu wiederholten Fehlermeldungen (Alby et al. 2009, Roodbandi et al. 2017, Omelanowsky et al. 2013, Engelmann 2011, Bayram et al. 2018). Ursache bei unseren Untersuchungen war die notwendige Neupositionierung des Scanners auf das Probandengesicht weg von der Kalibrierungszeichnung. Ebenso wie auch Maté-Gonzáles et al. und Hsu und Chung-Ling führten die zuvor beschriebenen Untersucher nur idealisierte Untersuchungen an Testkörpern und keine komplexen Untersuchungen des Gesichtes durch (Hsu und Chung- Lin 2016, Maté- Gonzáles et al. 2017). Eine Verbesserung unserer Ergebnisse hätte möglicherweise durch einen eigens angefertigten Kalibrierungshintergrund wie bei Bayram et al. und Roodbandi et al. erzielt werden können (Bayram et al. 2018, Roodbandi et al. 2017). Die Testung der Scanverfahren bei unseren Untersuchungen sollte aber im praxisnahen Setting erfolgen. Die Anfertigung hätte weitere Kosten verursacht und mehrere Hintergründe für die Darstellung von Gesicht und Ohrmuschel erfordert.

Das Verfahren der digitalen Photogrammetrie war durch die Positionierung von Kamera und Proband sehr zeitaufwendig. Für jede Fotografie musste eine neue Position von Kamera und Proband zueinander eingestellt werden.

Dieser Zeitaufwand der Datenakquise wird ebenfalls bei Maté-Gonzáles et al. beschrieben. Die Beschreibung des Aufwandes der Technik bei Barros und Soares sowie bei Bayram et al. bestätigt unsere Ergebnisse ebenfalls (Maté- Gonzáles et al. 2017, Barros und Soares 2012, Bayram et al. 2018).

Im Gegensatz zu diesem Verfahren konnte das ebenfalls auf photogrammetrischer Rekonstruktion basierende Verfahren der Stereophotogrammetrie mit einer sehr geringen Vorbereitungszeit in Betrieb genommen werden.

Nachbearbeitungsaufwand

Der Zeitaufwand der Nachbearbeitung resultierte aus der Notwendigkeit der Rekonstruktion der Scandaten in den dazugehörigen Programmen.

Die umfangreichste Nachbearbeitung war bei den Versuchen mit dem Davidlaserscanner und bei der Photogrammetrie notwendig.

Aufgrund der Notwendigkeit der Erstellung mehrere Scans zur vollständigen Abbildung des Gesichtes musste die Nachbearbeitung der Daten des Davidlaserscanners durch die Entstehung von Fehlstellen durch Abschattung zum Teil händisch durchgeführt werden. Dieses mehrschrittige Vorgehen und die Entstehung von Abschattung bei der Durchführung mehrerer Scans wird ebenfalls bei Bayram et al. und Hsu und Chung-Lin beschrieben (Bayram et al. 2018, Hsu und Chung- Lin 2016).

Weder die Aufnahme der Daten noch die Verarbeitung dieser im Programm verlief im Rahmen unserer Untersuchung automatisch. Gleiches beschreiben auch Maté-Gonzales et al., während Alby et al. einen nahezu automatisierten Workflow mit einer Echtzeitdarstellung der Scandaten im Programm nutzten (Maté- Gonzáles et al. 2017, Alby et al. 2009). Sie arbeiteten im Gegensatz zu unseren Untersuchungen beim Scan eines kleinen Testkörpers mit deutlich weniger und einfacheren Einzelscans (Alby et al. 2009).

Für die vollständige Darstellung des Gesichtes war eine größere Anzahl von Scans notwendig, die durch das Programm nicht automatisch in ausreichender Qualität fusioniert werden konnten, sondern zuvor händisch beschnitten und geordnet werden mussten.

Bei der Anwendung der digitalen Photogrammetrie ist eine weiterführende Bearbeitung unumgänglich. In unserem Versuch bildeten die erstellten zweidimensionalen Fotoserien lediglich die Datengrundlage für die anschließende Rekonstruktion in den zwei untersuchten Programmen. Aufgrund der großen Datenmenge war die Bearbeitung zeitaufwendig. Ähnliche Erkenntnisse beschreiben auch Barros und Soares und Rodehorst (Barros und Soares 2012, Rodehorst 2004). Das von uns verwendete Stereophotogrammetrieverfahren benötigte keine Nachbearbeitung der Daten und erstellte ein automatisches Modell.

Die Scandaten, welche mit dem Handscanner Artec Eva erzeugt wurden, mussten im Anschluss an den erstellten 3D-Scan fusioniert und nachbearbeitet werden. Die Nachbearbeitung unserer Scandaten benötigte nur einen geringen Zeitaufwand, da diese durch einen erfahrenen Anwender durchgeführt wurde.

Bei dem Handyscanner iSense war die Nachbearbeitung zwar einfach und schnell durchzuführen, das Ergebnis blieb jedoch trotzdem fehlerhaft. Ursachen hierfür könnten die geringe Leistungsfähigkeit der Aufnahmeeinheit und der geringe Umfang der Rechenleistung des verwendeten Smartphone sein. Eine Verbesserung durch die Verbindung des Scanners mit einem externen Laptop beschreiben Koban et al. bei Nutzung eines Nachfolgemodells des Handyscanners iSense, welches zum Zeitpunkt der Untersuchung jedoch noch nicht erhältlich war (Koban et al. 2016).

Zusammenfassend ist festzustellen, dass das Verfahren der Stereophotogrammetrie, der Handscanner Artec Eva und das IRESTRA-System die geringste Fehleranfälligkeit und den geringsten Arbeitsaufwand aufweisen. Bei der Bewertung des Artec Eva und des IRESTRA-Systems muss allerdings hinsichtlich der Beurteilung der Fehleranfälligkeit beachtet werden, dass beide Systeme innerhalb unserer Untersuchung durch geschultes Fachpersonal angewendet wurden.

Nicht nutzbar für die dreidimensionale Darstellung von Gesichtern sind die Verfahren der Photogrammetrie und der Davidlaserscanner, weil diese sowohl deutlich anfälliger für die Entstehung von Fehlern als auch aufwendig in Vor- und Nachbearbeitung der Untersuchung waren.

5.2.2 Diskussion Fragestellung 2

Zur weiterführenden Beurteilung der Scanqualität wurden die Scanergebnisse des Gesichtes in den schwer darzustellenden Regionen von Nase und Augen bewertet. Zusätzlich wurde eine reduzierte Versuchsreihe zur Darstellung der Ohrmuschel durchgeführt.

Die beste qualitative Darstellung von Augen und Nase konnte mit dem Handscanner Artec Eva, dem IRESTRA-System und dem Stereophotogrammetriesystem erreicht werden. Ungenügende Ergebnisse lieferten der Davidlaserscanner, der Handyscanner iSense und die Photogrammetrie.

Die beste Darstellung des Außenohres konnte mit dem Handscanner Artec Spider (der Miniaturversion des Handscanners Artec Eva) und dem IRESTRA-System erstellt werden. Mit der Photogrammetrie und dem Davidlaserscanner konnten nur ein ungenügendes Ergebnis erzielt werden. Der Handyscanner iSense konnte diese kleine Region nicht darstellen.

Bei der Betrachtung der Scanergebnisse des Davidlaserscanners fielen Löcher und fehlerhafte Übergänge der Einzelscans vor allem im Bereich der schwer darzustellenden Bereiche der Augen und Nase sowie der Ohrmuschel auf. Diese Abweichungen bei der Darstellung komplexer Strukturen beschreiben Omelanowsky et al. und Hsu und Chung-Lin ebenfalls (Omelanowsky et al. 2013, Hsu und Chung-Lin 2016). Hier wurden Testkörper gescannt, bei denen schwierige Regionen, wie Einbuchtungen und Drehungen, nur schwer dargestellt werden konnten. Diese Abweichung wird bei Baron ebenfalls beschrieben und durch den aus verschiedenen Hardwarekomponenten bestehenden Grundaufbau erklärt (Baron 2011). Der Davidlaserscanner ist keine abgeschlossene Scaneinheit und besteht aus einem Projektor und einer Webcam, die in definiertem Winkel zueinander montiert werden.

Dadurch sind diese Komponenten während der notwendigen Neupositionierung der Einheit zur Durchführung mehrere Scans veränderbar und anfällig für Fehler. Die

klinische Anwendbarkeit dieses Systems ist nach Baron daher limitiert (Baron 2011). Roodbandi et al. und Bayram et al. erreichten bessere Scanergebnisse bei der Durchführung von Gesichts- und Ganzkörperscans bei der Anwendung des Davidlaserscanners (Roodbandi et al. 2017, Bayram et al. 2018).

Diese Versuche wurden unter Verwendung des Kalibrierungshintergrundes für die Dauer aller Aufnahmen durchgeführt, während in unserer Untersuchung der Scanner eingangs vor der Zeichnung kalibriert und dann auf das Probandengesicht ausgerichtet wurde.

In der Literatur wird bei Alby et al. ebenso wie bei uns ein Vergleich zwischen dem Davidlaserscanner und einem Photogrammetrieversuch durchgeführt (Alby et al. 2009). Während Alby et al. die Qualität bei beiden Verfahren durch die Beschreibung der vorhandenen Differenzierbarkeit von Details als gut einstufen, kann diese Aussage anhand unserer Resultate zur Darstellung des Gesichtes und der Ohrmuschel mit beiden Verfahren nicht bestätigt werden (Alby et al. 2009). Dies lässt sich durch die unterschiedliche Versuchsdurchführung erklären. Alby et al. wendeten im Gegensatz zu unseren Untersuchungen am Probanden beide Scanner für die Darstellung eines markierten Testkörpers unter Laborbedingungen an (Alby et al. 2009). Dieser wies weniger Hinterschnitte und Abschattungen auf als die von uns untersuchten Regionen der Augen, Nase und Ohrmuschel.

Die erfolgreiche Anwendung eines feststehenden Stereophtogrammetrieverfahrens zur qualitativ hochwertigen Darstellung von Gesichtern für die klinische Anwendung wird in zahlreichen Quellen beschrieben und kann anhand der Erkenntnisse unserer Untersuchungen bestätigt werden. Während bei Koban et al. und Majid et al. die Präzision der Aufnahmen beschrieben wird, verwenden Camison et al. und Verhulst et al. dieses Verfahren in ihren Untersuchungen sogar als Goldstandard zur Beurteilung anderer Scanverfahren (Koban et al. 2020, Majid et al. 2005, Camison et al. 2018, Verhulst et al. 2018).

Ähnlich gute Ergebnisse konnten wir bei der Anwendung der beiden Handscanner Artec Eva für die Abbildung komplexer Gesichtsstrukturen und Artec Spider für die Darstellung der Ohrmuschel erzielen.

Die hohe Qualität der Scanergebnisse des Artec Eva wird ebenfalls in der Literatur bei Gomes et al., Koban et al. und Verhulst et al. beschrieben (Gomes et al. 2019, Koban et al. 2016, Verhulst et al. 2018).

Der Artec Spider konnte die Ohrmuschel mit einer für klinische Anwendungen ausreichenden Genauigkeit deutlich abbilden. Gleiche Ergebnisse erzielte auch Kersten et al. bei Untersuchungen der Genauigkeit des Artec Spider (Kersten et al. 2012).

Zusammenfassend ist festzustellen, dass für die Darstellung von komplexen Gesichtsstrukturen die Handscanner Artec Eva und Artec Spider sowie das Stereophotogrammetriesystem am geeignetsten sind. Das Photogrammetriesystem und der Davidlaserscanner sind weder für die Darstellung von komplexen Gesichtsstrukturen noch für die Abbildung der Ohrmuschel geeignet.

5.2.3 Diskussion Fragestellung 3

Der Davidlaserscanner, das Verfahren der Photogrammetrie und der Handyscanner iSense waren in unserer Untersuchung zwar die preisgünstigsten Verfahren, es konnten aber keine verwertbaren Scans erzeugt werden.

Die Kosten für den Davidlaserscanner und das dazugehörige Programm belaufen sich auf ca. 400 € je nach Umfang der Programmfunktionen der dazugehörigen Software. Zusätzlich entstehen Kosten für den notwendigen Computer. Die geringen Kosten dieses Systems werden ebenfalls bei Alby et al., Omelanowsky et al. und Tallig et al. beschrieben (Alby et al. 2009, Omelanowsky et al. 2013, Tallig et al. 2015). Der Scanner benötigt nur den Bereich eines Büroarbeitsplatzes und muss nicht durch Fachpersonal betrieben werden. Eine Verbesserung der Scanqualität des Davidlaserscanners kann nach Alby et al. und Roodbandi et al. durch die Herstellung einer ausreichend großen Kalibrierungszeichnung erzielt werden, die zusätzliche Kosten verursachen würde (Alby et al. 2009, Roodbandi et al. 2017). Zu den Kosten der Photogrammetrie müssen neben der für die Aufnahmen notwendigen Kamera auch die Kosten für das Rekonstruktionsprogramm gezählt werden. Es stehen zahlreiche, auch kostenlose Programme zur Verfügung. In Rahmen unserer Untersuchung konnte das Programm Agisoft Photoscan Professional mit Kosten von 1300 € eine bessere Qualität als das verglichene kostenlose Programm erzeugen.

Gleiche Ergebnisse hinsichtlich der geringen Kosten des Verfahren werden bei Koban et al. und Sforza et al. beschrieben (Koban et al. 2014, Sforza et al. 2013). Sforza et al. beschreiben zudem eine Optimierung des gesamten Verfahrens durch die Anwendung mehrerer Kameras und der programmgestützten Vernetzung dieser. Sie weisen aber gleichzeitig auf den damit verbundenen deutlichen Anstieg der Kosten hin (Sforza et al. 2013). Der Artec Eva liegt in unserem Vergleich mit Kosten von 13.500 € im mittleren Preissegment und ist günstiger als das bei uns verwendete Stereophotogrammetrieverfahren.

Die Kosten für das Stereophotogrammetriesystem variieren laut Herstellerangaben deutlich hinsichtlich der Ausstattung des Systems zwischen 40.000 € und 120.000 €. Damit zählt dieses Verfahren zu den teureren Systemen unseres Vergleichs. Sowohl der Artec Eva als auch das Stereophotogrammetriesystem konnten eine gute bis sehr gute Scanqualität erzeugen. Der Kostenunterschied lässt sich durch den unterschiedlichen Aufbau erklären. Während der Artec Eva ein tragbarer Handscanner ist, besteht das Stereophotgrammetriesystem aus mehreren fest stehenden Kameras. Während die Verarbeitungssoftware bei der Stereophotogrammetrie bereits inkludiert ist, muss die Software für den Artec Eva zusätzlich mit 500 € einkalkuliert werden. Hinsichtlich zusätzlicher Kosten muss weiterhin berücksichtigt werden, dass der Artec Eva am sichersten durch einen geschulten Untersucher angewendet wird und das Stereophotogrammetriesystem einen festen Aufnahmeraum benötigt.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass eine Scanqualität, die für klinische Anwendungen angemessen ist, derzeit nur mit mittel- bis hochpreisigen Scannern zu erreichen ist.

5.2.4 Diskussion Fragestellung 4

Der Handscanner Artec Eva und das Stereophotogrammetriesystem wiesen innerhalb unserer Untersuchungen eine hohe Scanqualität und einen geringen Arbeitsaufwand bei der Erstellung der Aufnahmen auf. Diese Verfahren eignen sich daher für die klinische Anwendung.

Der Davidlaserscanner, das Verfahren der Photogrammetrie und der Handyscanner iSense eignet sich aufgrund der Fehleranfälligkeit, des Aufwandes der Untersuchung und der geringen Scanqualität anhand unserer Erkenntnisse nicht für die klinische Anwendung.

Die Anwendung des Artec Eva für rein medizinische Zwecke ist in der Literatur bereits umfassend beschrieben. So wird dieser Handscanner bei Sivanandan et al. für die Dokumentation bei Autopsien, bei Seminati et al. für die Darstellung von Amputationsstellen und bei Varga et al. für die Vermessung von Extremitäten beschrieben (Sivanandan et al. 2017, Seminati et al. 2017, Varga et al. 2019).

Aufgrund der erzielten hohen Qualität des Gesichtsscans mit dem Artec Eva, die ebenfalls bei Verhulst et al. und Gomes et al. beschrieben wird und der Faktoren des Untersuchungsaufwandes scheint der Scanner für die klinische Anwendung zur Darstellung von Patientengesichtern geeignet (Verhulst et al. 2018, Gomes et al. 2019). Der Scanner weist aufgrund seiner Tragbarkeit und des geringen Gewichtes ein breites klinisches Anwendungsspektrum auf. Die klinische Anwendung des Verfahrens wird ebenfalls durch Camison et al. und Artopoulos et al. empfohlen (Camison et al. 2018, Artopoulos et al. 2014). Das Verfahren der Stereophotogrammetrie ist für die klinische Anwendung zur Darstellung von Patientengesichtern konzipiert und wird in der Literatur bei Maués et al., bei Tzou et al., bei Codari et al., bei Fourie et al. und bei Kook et al. ebenfalls für die dreidimensionale Abbildung von Gesichtern verwendet (Maués et al. 2018, Tzou et al. 2014, Codari et al. 2015, Fourie et al. 2011, Kook et al. 2014). Durch den festen Aufbau des Systems können, wie bei Heike et al. und Winder et al. beschrieben, qualitative Aufnahmen mit einer geringen Fehleranfälligkeit erzeugt werden (Heike et al. 2010, Winder et al. 2007). Die Benutzerfreundlichkeit unseres Versuches war aufgrund der geringen Akquisitionszeit der Daten und der automatischen Bearbeitung der Software hoch.

Gleiche Erkenntnisse erzielten auch Artopoulos et al. und bei Verhulst et al. (Artopoulos et al. 2014, Verhulst et al. 2018). Die klinische Anwendbarkeit des Davidlaserscanners als Streifenprojektionsverfahren kann im Rahmen unserer Untersuchung nur bedingt bestätigt werden. Omelanowsky et al. zeigten bei der Untersuchung dieses Verfahrens, aufgrund der geringen Genauigkeit und Reproduzierbarkeit selbst unter Laborbedingungen, gleiche Ergebnisse wie bei unseren Untersuchungen (Omelanowsky et al. 2013). Die klinische Anwendbarkeit des Verfahrens wurde ebenfalls bei Olszewski et al. und bei Secher et al. untersucht (Olszewski et al. 2019, Secher et al. 2017). Diese beschreiben, ebenso wie Baron, eine sehr limitierte klinische Anwendbarkeit des Systems aufgrund der reduzierten Benutzerfreundlichkeit und Qualität (Baron 2011).

Das Einsatzgebiet der digitalen Photogrammetrie ist, wie bei Luhmann und Müller beschrieben, sehr vielfältig und reicht von der Geodäsie, über Maschinenbau und Kunst bis hin zu Medizin (Luhmann und Müller 2007). Anhand der Ergebnisse unserer Untersuchung kann die Anwendung der digitalen Photogrammetrie für den klinischen Alltag aufgrund der geringen Scanqualität und der aufwendigen Aufnahmen nicht empfohlen werden.

Im Gegensatz zu Koban et al., die eine ausreichende Genauigkeit der photogrammetrischen Rekonstruktion für die klinsche Anwendung beschreiben, waren die von uns detektierbaren qualitativen Mängel der 3D-Aufnahme des Probandengesichtes deutlich (Koban et al. 2014). Mögliche Ursache dieser Diskrepanz ist die Anwendung eines optimierten und mit Landmarken versehenen Puppenkopfes und die Verwendung einer alternativen Rekonstruktionssoftware bei Koban et al. (Koban et al. 2014). Brüschweiler et al. differierten zu unseren Ergebnissen durch die Beschreibung eines photogrammetrischen Verfahren zur Vermessung von Hautarealen (Brüschweiler et al. 1997). Diese unterschiedlichen Erkenntnisse lassen sich durch Unterschiede in der Versuchsdurchführung erklären. Brüschweiler et al. verwendeten ein speziell für diesen Zweck konzipiertes Rekonstruktions- und Vermessungsprogramm (Brüschweiler et al. 1997). Weitere Faktoren, die die Anwendung in der klinischen Praxis limitieren, sind die von uns festgestellte lange Dauer der Aufnahme und Auswertung.

Gleiche Ergebnisse hinsichtlich der limitierten klinischen Einsatzmöglichkeit der Photogrammetrie beschreiben Hecht und Schneider durch die Beschreibung des hohen Auswertungsaufwandes und der daraus resultierenden eingeschränkten Benutzerfreundlichkeit dieses Verfahrens (Hecht und Schneider 2015).

Der Handyscanner iSense ist für die kommerzielle Nutzung ausgelegt und kann aufgrund der geringen Genauigkeit und der Datenverarbeitung nicht für medizinische Zwecke angewendet werden. Er ist der einzige der untersuchten Scanner, dessen Daten extern verarbeitet und gespeichert werden, und genügt daher nicht den Datenschutzanforderungen für Patientendaten. Alle anderen untersuchten Verfahren erfüllen diese Anforderungen. Dieser Fakt wird ebenfalls bei Koban et al. beschrieben (Koban et al. 2014).

Zusammenfassend ist festzustellen, dass alle untersuchten Verfahren für die klinische Anwendung in der Medizin beschrieben werden. Anhand unserer Ergebnisse sind hinsichtlich Qualität und Untersuchungsaufwand nur die Stereophotogrammetrie und der Artec Eva geeignet. Bei der Auswahl des Verfahrens muss das Einsatzgebiet bezüglich Genauigkeitsansprüchen, Objektgröße und Mobilität der Einheit genau definiert werden.

5.2.5 Diskussion Fragestellung 5

Der konventionelle Herstellungsprozess einer Gesichts- oder Ohrepithese erstreckt sich, wie bei Brom und Löser und bei van Heerden et al. beschrieben über die Darstellung des Defekts mit Abformmasse und der anschließenden manuellen Erstellung von Gipsmodellen und Wachsmodellationen bis zur fertigen Silikonepithese (Brom und Löser 2011, Van Heerden et al. 2015). Im Rahmen unserer Untersuchung kann die Eignung des Stereophotogrammetriesystems und des Strukturlichtscanner Artec Eva für die Abbildung von Gesichtsdefekten für die Herstellung von Epithesen aufgrund der hohen Qualität und der nichtinvasiven und schnellen Datengenerierung festgestellt werden.

Die Anwendung eines kontaktlosen Scanverfahrens bietet gegenüber der bisher gebräuchlichen Methode der Abformung deutliche Vorteile. Der Komfort für den Patienten ist deutlich höher. Durch das kontaktlose Verfahren kommt es zu keiner Verschiebung von Defektgrenzen wie bei der Abformung. Die untersuchten Scanverfahren wenden im Gegensatz zu der bei Rosu et al. beschriebenen Methode der Defektdarstellung durch CT-Daten keine ionisierende Strahlung an (Rosu et al. 2014). Sowohl das Verfahren der Stereophotogrammetrie als auch der Handscanner Artec Eva konnten das Gesicht des Probanden schneller als eine Abformung abbilden. Gleiche Erkenntnisse beschreiben auch Berg et al. bei der Vorstellung eines optimierten Herstellungsprozesses für Gesichtsrekonstruktionen durch die Anwendung von Stereophotogrammetrie und Volkenstein et al. bei der Erläuterung des konventionellen Vorgehens (Berg et al. 2020, Volkenstein et al. 2007). Auch Sforza et al. stimmt mit unserer Ergebnissen hinsichtlich der Anwendbarkeit der Scanverfahren zur Rekonstruktion von Gesichtsdefekten überein (Sforza et al. 2013). Ein weiterer Vorteil, den die Anwendung der untersuchten digitalen Scanverfahren anstelle der Abformung des Defektes bietet, ist die damit verbundene Möglichkeit der digitalen Weiterverarbeitung der Daten. Berssenbrügge et al., Blomlof et al. und Ferreira und Vives nutzen die Möglichkeit der Spiegelung der gesunden, gescannten Gesichtsseite auf den Defekt, um die Datengrundlage für die Epithesenkonstruktion zu bilden (Berssenbrügge et al. 2015, Blomlof et al. 2011, Ferreira und Vives 2019). Die bei Blomlof et al. und Van Heerden et al. als aufwendig beschriebene manuelle Epithesenmodellation würde entfallen (Blomlof et al. 2011, Van Heerden et al. 2015).

Die Digitalisierung des Herstellungsprozesses bietet zudem die Möglichkeit auch die finale Herstellung der Epithese zu optimieren. In der Literatur wird dieses Ergebnis bei Blomlof et al., bei Fantini et al. und bei Maver et al. durch die weitere Optimierung des Herstellungsprozesses durch den 3D-Druck von Modellen anhand der Scandaten beschrieben, während van Heerden et al. auf Möglichkeit der Gestaltung einer Gussform anhand der 3D-Daten verweisen (Blomlof et al. 2011, Fantini et al. 2013, Maver et al. 2007, Van Heerden et al. 2015). Ein weiterer Vorteil der Anwendung der untersuchten Scanverfahren wäre die dadurch ermöglichte Verbesserung der Epithesenhaftung, wie bei Fantini et al. und Blomlof et al. beschrieben (Fantini et al. 2013, Blomlof et al. 2011). Auch eine Optimierung der Faktoren Kosten und Zeit, wie bei Couto et al. beschrieben, ist möglich (Couto et al. 2017).

Zusammenfassend erfüllen die Stereophotgrammetrie und der Handscanner Artec Eva aufgrund der hohen Scanqualität und der nichtinvasiven, effizienten Datenerfassung die Voraussetzungen für die Abbildung von Defekten zur Herstellung von Epithesen. Weiterhin können durch die Anwendung dieser Verfahren einige Nachteile der konventionellen Abformung umgangen werden. Die Anwendung eines 3D-Scanverfahrens bietet zudem das Potential, den gesamten Herstellungsprozess der Epithese zu verändern. So kann in einem schnellen präzisen Verfahren eine exakte Darstellung des Defektes in einer für den Patienten angenehmen Weise erstellt und eine Epithese mit guter Retention hergestellt werden, die die Lebensqualität der Patienten deutlich verbessert.

5.2.6 Diskussion Fragestellung 6

Im Rahmen dieser Untersuchung sollte durch die Vermessung des realen Gesichtes und der digitalen Scanergebnisse überprüft werden, ob die Methode der anthropometrischen Vermessung zur Analyse von Gesichtern geeignet ist. Anhand unserer Untersuchungsergebnisse ist sowohl die manuelle Vermessung des Probandengesichtes als auch die Vermessung der digitalen Scanergebnisse zeitaufwendig und durch die erschwerte Definition der Messpunkte fehleranfällig.

Das Verfahren der manuellen Gesichtsvermessung ist nach Krimmel et al. die traditionelle Methode zur anthropometrischen Analyse von Gesichtern und wird auch

bei Koban et al., der Literaturgrundlage des hier erstellten Messprotokolls, angewendet (Krimmel et al. 2002, Koban et al. 2014).

Im Rahmen der durchgeführten Messungen innerhalb der von uns durchgeführten Untersuchung zeigten sich jedoch deutliche Nachteile dieser Methode. Die Untersucher hatten Schwierigkeiten die Messpunkte am Probandengesicht trotz der angefertigten Messtabellen und der Abbildungen zu definieren und bei wiederholter Vermessung sicher zu reproduzieren. Die Messungen waren zeitaufwendig und ungenau.

Gleiche Erkenntnisse hinsichtlich der erschwerten Definition der Landmarken am realen Probandengesicht beschreiben auch Krimmel et al., Park et al. und Speckmann (Krimmel et al. 2002, Park et al. 2012, Speckmann 2004). Die Ursache für diese erschwerte Definition der Messpunkte liegt in der sehr unterschiedlichen Beschaffenheit des Gesichtsgewebes und der damit einhergehenden unterschiedlichen Kompressibilität (Speckmann 2004).

Die Vermessung der digitalen Scanoberflächen der 3D-Modelle war zeitaufwendig und durch die sehr unterschiedliche Qualität der Scanergebnisse waren die Landmarken erschwert zu definieren und zu reproduzieren.

Ähnliche Erkenntnisse erzielten auch Sforza et al. aufgrund der fehlenden Möglichkeit der Palpation tieferliegender Strukturen (Sforza et al. 2013). Aus diesem Grund war die Vermessung unserer Ergebnisse sehr fehleranfällig, entgegen den bei Park et al. und Weinberg et al. erhaltenen guten Ergebnissen der Vermessung von digitalen Landmarken (Park et al. 2012, Weinberg et al. 2006). Diese unterschiedlichen Ergebnisse lassen sich durch die Verwendung von Puppenköpfen bei Park et al. und Weinberg et al. im Gegensatz zu der bei uns durchgeführten Abbildung der realen Gesichtsoberfläche eines Probanden erklären.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass sowohl die Vermessung der realen Gesichtsoberfläche des Probanden als auch die Vermessung der digitalen dreidimensionalen Modelle durch die erschwerte Durchführbarkeit fehlerbehaftet und ungenau ist und daher für die Analyse von Patientengesichtern nicht geeignet.

6 Schlussfolgerung

Im Rahmen dieser Dissertation sollte die mögliche Anwendbarkeit eines optischen Scanverfahrens als Alternative zur konventionellen Methode der Abformung für die Darstellung von Gesichts- und Ohrdefekten untersucht werden. Die Beurteilung der Anwendbarkeit wurde anhand von Kriterien realisiert, die im Rahmen eines eigens erstellten Scoresystems zusammengefasst wurden. Die Bewertungsgrundlage orientierte sich dabei am Merkmal der Scanqualität aber auch an praktischen Merkmalen hinsichtlich der Anwendung und Wirtschaftlichkeit der Verfahren.

Die von uns untersuchten digitalen Scanverfahren unterscheiden sich deutlich hinsichtlich der definierten Bewertungskriterien. Anhand unserer Ergebnisse eignen sich die Verfahren der Photogrammetrie, der Davidlaserscanner und der Handyscanner iSense nicht als Alternative zur konventionellen Abformung zur Darstellung von Gesichts- und Ohrdefekten. Die Verfahren der Stereophotogrammetrie, der Handscanner Artec Eva und das IRESTRA-System erzielten im Rahmen der Untersuchung vielversprechende Resultate.

Die hohe Fehleranfälligkeit des Davidlaserscanners und der Photogrammetrie lässt sich durch die Entstehung von Bewegungsartefakten bedingt durch die Zeitdauer der Aufnahmen und die erschwerte Abbildung des Gesichtes und der Ohrmuschel hinsichtlich Textur und Scanhintergrund erklären. Ebenso konnte bei diesen beiden Verfahren der höchste Zeitaufwand hinsichtlich der Vor- und Nachbearbeitung der Aufnahmen festgestellt werden. Auch wenn der Handyscanner iSense eine geringere Fehleranfälligkeit aufwies und das dreidimensionale Gesichtsmodell schneller erstellt werden konnte, war auch hier, ebenso wie bei dem Modell des Davidlaserscanners und der Photogrammetrie, die Qualität der Scanoberfläche nicht ausreichend, da komplexe Strukturen nicht abgebildet werden konnten. Aufgrund dieser Ergebnisse kommen die drei preisgünstigsten untersuchten Verfahren für eine klinische Anwendung mit hohen Genauigkeitsansprüchen nicht in Frage. Daher kann auch eine Implementierung dieser drei Verfahren in den Herstellungsprozess der epithetischen Versorgung von Gesichtsdefekten nicht empfohlen werden.

Die Verfahren der Stereophotogrammetrie und der Handscanner Artec Eva wiesen durch die sehr kurze Versuchszeit und der damit verbundenen reduzierten Entstehung von Bewegungsartefakten eine geringe Fehleranfälligkeit auf.

Der Vor- und Nachbearbeitungsaufwand war gering. Die Qualität der Gesichtsmodelle von Artec Eva, der Stereophotogrammetrie und dem IRESTRA-System war hoch. Zum Zeitpunkt der Untersuchung war das IRESTRA-System noch ein Prototyp und wies daher einen höheren Zeitaufwand bei der Vor- und Nachbearbeitung des Scans auf, lieferte hinsichtlich der geringen Zeitdauer der Aufnahmen und der hohen Scanqualität, bei der auch komplexe Strukturen wie Nase und Ohrmuschel zuverlässig abgebildet werden konnten, vielversprechende Ergebnisse für zukünftige Untersuchungen. Das Verfahren der Stereophotogrammetrie und der Handscanner Artec Eva werden bereits im klinischen Alltag in einem breiten Anwendungsspektrum eingesetzt und eignen sich auch für die Abbildung von Gesichtsdefekten für die Herstellung von Epithesen. Durch die Digitalisierung des Herstellungsprozesses wird der Komfort für den Patienten bei der Defektabbildung erhöht und eine exakte Datengrundlage geschaffen, die es ermöglichen soll, eine gute Retention und Passform der Epithese für den Patienten zu schaffen. Zudem bietet die Digitalisierung des Herstellungsprozesses die Möglichkeit, auch die nachfolgenden Arbeitsschritte der Modellation der Epithese einfach und kosteneffizienter zu gestalten und sogar durch ein additives Druckverfahren zu realisieren. Ein Aspekt künftiger Untersuchungen könnte daher die Generierung einer digitalen Prozesskette zur Herstellung von Epithesen auf der Basis digitaler Scandaten sein.

Zusätzlich zur Durchführung der Scanverfahren und der Schaffung einer quantifizierbaren Bewertungsgrundlage der Scanergebnisse durch die Erstellung eines Scoresystems wurde eine Gesichtsvermessung durchgeführt. Da bei der Betrachtung unterschiedlicher Scanverfahren das Merkmal der Scanqualität einen bedeutenden Einfluss hat, sollte auch im Rahmen dieser Untersuchung eine Beurteilung dieser durchgeführt werden. In der Literatur wird dabei die Vermessung von Oberflächen als Standardmethode aufgeführt. Zur Gesichtsvermessung wurde ein Messprotokoll, in Anlehnung an wissenschaftlich anerkannte Messpunkte- und Strecken, erstellt und die Vermessung der realen Gesichtsoberfläche des Probanden aber auch aller digitaler Scanoberflächen durchgeführt. Sowohl die manuelle Vermessung der Gesichtsoberfläche des Probanden als auch die digitale Vermessung war aufgrund der erschwerten Definition der Messpunkte schwer durchzuführen und aufgrund des hohen Zeitaufwandes der Messungen nicht geeignet.

7 Literaturverzeichnis

Alby E, Smigiel E, Assali P, Grussenmeyer P, Kauffmann-Smigiel I. 2009. Low cost solutions for dense point clouds of small objects: PhotoModeler Scanner vs David Laserscanner. 22nd CIPA Symposium. Kyoto.

Arapakis I EE, Tsitsia V, Kordolaimi S, Economopoulos N, Argentos S, Economopoulos N. 2014. Using “iDose4” iterative reconstruction algorithm in adults’ chest-abdomen-pelvis CT examinations: effect on image. British Institute of Radiology. 87:20130613.

Artec 3D. 2020. Artec Eva. https://www.artec3d.com/de/portable-3d-scanners/artec-eva.

Artec 3D. 2020. Artec Spider. https://www.artec3d.com/de/portable-3d-scanners/artec-spider.

Artopoulos A, Buytaert J A N, Dirckx J J J, Coward T J. 2014. Comparison of the accuracy of digital stereophotogrammetry and projection moire profilometry for three-dimensional imaging of the face. International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery, 43 (5):654-662.

Baron K. 2011. Morphometric shape analysis of the human ear [Diplomarbeit]. Universität Wien.

Barros B, Soares M. 2012. An anthropometric survey using digital photogrammetry: a case study in Recife, Pernambuco, Brazil. Journal of Prevention Assessment & Rehabilitation, 41:4069-4075.

Bausch N, Dawkins D P, Frei R, Klein S. 2016. 3D Printing onto unknown uneven Surfaces. IFAC PapersOnLine, Elsevier Ltd, 49-21:583-590.

Bayram B, Ozkan T, Reis H C, Bakirman T, Cetin I, Seker D Z. 2018. Open Source Library-based 3D Face Point Cloud Generation. Chiang Mai Journal of Sciene, 45 (4):1875-1887.

Bein T, Unertl K. 1993. Möglichkeiten und Grenzen von Score-Systemen in der Intensivmedizin. AINS-Anästhesiologie· Intensivmedizin· Notfallmedizin· Schmerztherapie, 28 (08):476-483.

Berg B I, Kober C, Schwenzer-Zimmerer K. 2020. Laser Scanning in Maxillofacial Surgery. Lasers in Oral and Maxillofacial Surgery, Springer- Verlag, 195-207.

Berssenbrügge P, Abeler A, Runte C, Dekiff M, Klein M, Denz C, Dirksen D. 2015. Rechnergestützte Konstruktion von Epithesen auf der Basis optischer Oberflächenvermessung . Shaker Verlag.

Blomlof J, Sogard B, Norholt S. 2011. Soft Tissue Design - A New Application for CMF Planning Software iPlan. Journal of Oral and Maxillofacial Surgery, 69(9).

Brom J, Löser C. 2011. Epithetische Versorgung von Gesichtsdefekten. Aktuelle Dermatologie, 37 (08/09):289-293.

Brüschweiler W, Braun M, Fuchser H, Dirnhofer R. 1997. Photogrammetrische Auswertung von Haut-und Weichteilwunden sowie Knochenverletzungen zur Bestimmung des Tatwerkzeuges—Grundlegende Aspekte. Rechtsmedizin, 7 (3):76-83.

Camison L, Bykowski M, Lee W W, Carlson J C, Roosenboom J, Goldstein J A, Losee J E, Weinberg S M. 2018. Validation of the Vectra H1 portable three-dimensional photogrammetry system for facial imaging. International Journal of & Oral Maxillofacial Surgery 2018, 47:403–410.

Codari M, Pucciarelli L, Pisoni L, Sforza C. 2015. Laser scanner compared with stereophotogrammetry for measurements of area on nasal plaster casts. British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery, 53:769-770.

Couto M, Machado M, Reis A, Neto R, Alves J L. 2017. Comprehensive methodology for custom-design and manufacture of soft-tissue prosthesis: Orbital case-study. IEEE 5th Portuguese Meeting on Bioengineering (ENBENG).

DI3D. 2015. DI3D V5 high definition 3D surface image capture solutions. http://www.dirdim.com/pdfs/DDI_Dimensional_Imaging_DI3D.pdf.

Engelmann F. 2011. FabScan - Affordable 3D Laser Scanning of Physical Objects [Bachelorarbeit] RWTH Aachen.

Fantini M, De Crescenzio F, Ciocca L. 2013. Design and rapid manufacturing of anatomical prosthesis for facial rehabilitation. International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM), 7 (1):51-62.

Ferreira R, Vives P. 2019. Two auricular epithesis surgical cases retained by a custom titanium implant: result at four years. Journal of stomatology, oral and maxillofacial surgery, 120 (2):147-151.

Finsterwalder R. 2013. Photogrammetrie. Berlin, Walter de Gruyter Verlag.

Fourie Z, Damstra J, Gerrits P O, Ren Y. 2011. Evaluation of anthropometric accuracy and reliability using different three-dimensional scanning systems. Forensic Science International, 207:127-134.

Gartner J. 2013. DAVID Structured Light 3D-Scanner. https://3druck.com/programme/david-structured-light-3d-scanner-sls-0213054/.

Gomes C F, Libdy M R, Normando D. 2019. Scan time, reliability and accuracy of craniofacial measurements using a 3D light scanner. Journal of Oral Biology and Craniofacial Research, 9:331-335.

Gühring J. 2002. 3D-Erfassung und Objektrekonstruktion mittels Streifenprojektion [Dissertation]. Universität Stuttgart.

Gühring M. 2007. Evaluierung eines optischen Verfahrens zur dreidimensionalen Darstellung der Körperoberfläche im Gesichtsbereich [Dissertation]. Technische Universität München.

Hecht A, Schneider D. 2015. Photogrammetrische 3D- Erfassung und Auswertung medikamentös induzierter Gänsehaut. DGPF Tagungsband 24.

Heike CL, Upson K, Stuhaug E, Weinberg S. 2010. 3D digital stereophotogrammetry: a practical guide to facial image acquisition. Head & Face medicine, 6 (1):18.

Hsu C C, Chung- Lin H. 2016. Handheld 3D Scanner for Small Objects Using Kinect. Journal of electronic science and technology, 14 (4):377-383.

Hürth B. 2018. Erstellung eines radiologischen Scores anhand von Polytrauma-Computertomographien, in Anlehnung an den Injury Severity Score: Eine retrospektive Analyse von 2015-2016 [Dissertation] Universität Ulm.

Kau C H, Richmond S, Incrapera A, English J, Xia J J. 2007. Three-dimensional surface acquisition systems for the study of facial morphology and their application to maxillofacial surgery. International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, 3 (2):97-110.

Kersten T P, Lindstaedt M. 2012. Generierung von 3D-Punktwolken durch kamerabasierte low-cost Systeme–Workflow und praktische Beispiele. Terrestrisches Laserscanning 2012, Schriftenreihe des DVW, 69:25-46.

Koban K C, Schenck T, Metz P, Volkmer E, Haertnagl F, Titze V, Giunta R. 2016. Auf dem Weg zur objektiven Evaluation von Form, Volumen und Symmetrie in der Plastischen Chirurgie mittels intraoperativer 3D Scans. Handchirurgie Mikrochirurgie Plastische Chirurgie, 48 (02):78-84.

Koban K C, Leitsch S, Holzbach T, Volkmer E, Metz P M, Giunta R E. 2014. 3D-Imaging and Analysis for Plastic Surgery by Smartphone and Tablet: An Alternative to Professional Systems? Handchirurgie Mikrochirurgie Plastische Chirurgie, 46 (2):97-104.

Koban K C, Perko P, Etzel L, Li X, Schenck T L, Giunta R E. 2020. 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, Reconstuctive und Aestethic Surgery, 73:141-148.

Kook M S, Jung S, Park H J, Oh H K, Ryu S Y, Cho J H, Lee J S, Yoon S J, Kim M S, Shin H K. 2014. A comparison study of different facial soft tissue analysis methods. Journal of Cranio-Maxillo-Facial Surgery, 42:648-656.

Krimmel M, Bacher M, Cornelius C P, Schubert S, Göz G, Reinert S. 2002. Dreidimensionale Bildakquisition zur Analyse der primären, spaltbedingten Gesichtsdeformität mit einem optoelektronischen Oberflächenscanner. Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie, 6 (3):158-161.

Liang S, Wu J, Weinberg S M, Shapiro L G. 2013. Improved detection of landmarks on 3d human face data. Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 35th Annual International Conference of the IEEE, 6482-6485.

Luhmann T, Müller C. 2007. Photogrammetrie-Laserscanning-Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2017. Verlag: Wichmann.

Majid Z, Chong A K, Ahmad A, Setan H, Sasmsudin A R. 2005. photogrammetry an 3D laser scanning as spatila data capture techniques for a national craniofacial database.The Photogrammetric Record, 20 (109):48-68.

Maté- Gonzáles M A, Aramendi J, Gonzáles- Aguilera D, Yravedra J. 2017. Statistical Comparison between Low-Cost Methods for 3D Characterization of Cut-Marks on Bones. MDPI Remote Sensing, 9 (83).

Maués C P R, Casagrande M V S, Almeida R C C, Almeida M A O, Carvalho F A R. 2018. Three-dimensional surface models of the facial soft tissues acquired with a low-cost scanner. International Journal of Oral & Maxillofacial Surgery 47:1219-1225.

Maver T, Burger H, Ihan Hren N, Zuzek A, Butolin L, Weingartner J. 2007. Use of rapid prototyping technology in comprehensive rehabilitation of a patient with congenital facial deformity or partial finger or hand amputation. , IFMBE Proceedings 16, 943–946, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Modabber A, Peters F, Brokmeier A, Goloborodko E, Ghassemi A, Lethaus B, Holzle F, Mohlhenrich S C. 2016. Influence of Connecting Two Standalone Mobile Three-Dimensional Scanners on Accuracy Comparing with a Standard Device in Facial Scanning. Journal of Oral & Maxillofacial Research, 7 (4).

Neugebauer E, Lefering R. 2004. Scores. Die Intensivmedizin. Springer, 71-81.

Olszewski R, Szyper-Szczurowska J, Opach M, Bednarczyk P, Zapala J, Szczepanik S. 2019. Accuracy of digital dental models using the low-cost DAVID laser scanner. Advances in Clinical and Experimental Medicine, 28 (12):1647-1656.

Omelanowsky D, Kersten T, Lindstaedt M. 2013. Untersuchungen von Low-Cost Systemen zur 3D-Rekonstruktion kleiner Objekte. Wichmann Verlag, Heidelberg.

Ort R. 2012. Wiederhol-und Reproduzierbarkeit der anthropometrischen kraniofazialen Landmarkenbestimmung mit dem 3dMD-Fotosystem zwischen unterschiedlichen Untersuchern [Dissertation]. University of Zurich.

Padole A M, Sagar P, Westra S J, Lim R, Nimkin K, Kalra M K, Gee S M, Rehani M M. 2019. Development and validation of image quality scoring criteria (IQSC) for pediatric CT: a preliminary study.

Park H J, Sharman A A, Tai K, Iida S, Yanagai Y, Asaumi J, Shin J. 2012. Correlation between Direct Anthropometry and Di3D Camera System. Journal of Hard Tissue Biology, 21:87-92.

Przybilla, H J. 2007. Streifenprojektion–Grundlagen, Systeme und Anwendungen. Contributions from: 74th Society for Geodesy, Geoinformation, and Land Management (DVW) Seminar Terrestrical Laser Scanning–Terrestrisches-Laser-Scanning.

Rodehorst V. 2004. Photogrammetrische 3D-Rekonstruktion im Nahbereich durch Auto-Kalibrierung mit projektiver Geometrie [Dissertation]. Technische Universität Berlin.

Roodbandi A S J, Naderi H, Hashenmi-Nejad N, Choobineh A, Baneshi M R, Feyzi V. 2017. Technical report on the modification of 3-dimensional non-contact human body laser scanner for the measurement of anthropometric dimensions: verification of its accuracy and precision. Journal of Lasers in Medical Sciences, 8 (1):22.

Rosu S, Sirub A S, Tatu R F. 2014. Contours Identification in Modelling Facial Silicone Epistasis. Materiale Platice,317-318.

Sawyer A, See M, Nduka C. 2009. Assessment of the reproducibility of facial expressions with 3-D stereophotogrammetry. Otolaryngology–Head and Neck Surgery, 140 (2):76-81.

Schaaf H, Pons- Kuehnemann J, Mailk C Y, Streckbein P, Preuss M, Howaldt H P, Wilbrandt J F. 2010. Accuracy of Three-Dimensional Photogrammetric Images in Non-Synostotic Cranial Deformities 41:24-29.

Schönhofer B, Lefering R, Suchi S, Köhler D. 2002. Umfrage zur Einschätzung von Score-Systemen durch Intensivmediziner. Intensivmed 39:240- 245.

Secher J J, Darvann T A, Pinholt E M. 2017. Accuracy and reproducibility of the DAVID SLS-2 scanner in three-dimensional facial imaging. Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery, 45 (10):1662-1670.

Seminati E, Canepa Talamas D, Young M, Twiste M, Dhokia V, Bilzon JLJ. 2017. Validity and reliability of a novel 3D scanner for assessment of the shape and volume of amputees' residual limb models. PLoS One, 12 (9).

Sforza C, de Menzes M, Ferrario V F. 2013. Soft- and hard-tissue facial anthropometry in three dimensions: what's new. Journal of Anthropological Sciences, 91:159-784.

Sivanandan J, Liscio E, Eng P. 2017. Assessing structured light 3D scanning using Artec Eva for injury documentation during autopsy. Journal of Association Crime Scene Reconstruction, 21:5-14.

Speckmann A. 2004. Longitudinale zweidimensionale Weichteilanalyse elektronisch vermessener Profilfotos bei westfälischen Schulkindern im Alter von 7 bis 10 Jahren [Dissertation]. Universität Münster.

Tallig G, Zender R, Lucke U. 2015. Konzeption und Verifikation eines Auswahlverfahrens für 3D-Scantechnologien. DeLFI Workshops, 19-27.

Thiele O C, Brom J, Dunsche A, Ehrenfeld M, Federspil P, Frerich B, Holzle F, Klein M, Kreppel M, Kubler A C, Kubler N R, Kunkel M, Kuttenberger J, Lauer G, Mayer B, Mohr C, Neff A, Rasse M, Reich R H, Reinert S, Rothamel D, Sader R, Schliephake H, Schmelzeisen R, Schramm A, Sieg P, Terheyden H, Wiltfang J, Ziegler C M, Mischkowski R A, Zoller J E. 2015. The current state of facial prosthetics - A multicenter analysis. Journal of Craniomaxillofacial Surgery, 43 (7):1038-1041.

Thomas D B, Hoscox J D, Dixon B J, Potgieter J. 2016. 3D scanning and printing skeletal tissues for anatomy education.

Tzou C H J, Artner N M, Pona I, Hold A, Placheta E, Kropatsch W G, Frey M. 2014. Comparison of three-dimensional surface-imaging systems. Journal of Plastic Reconstructive and Aesthetic Surgery, 67 (4):489-497.

Van Heerden I, Fossey A, Van der Walt J G. 2015. Maxillofacial Prostheses Production through computer- aided design and manufacturing technologies-review of state of the art.

Varga M, Morisson S C, Price C. 2019. Reliability of Measuring Morphology of the Paediatric Foot Using the Artec Eva Hand Held Scanner. 10th Int. Conference and Exhibition on 3D Body Scanning and Processing Technologies.

Verhulst A, Hol M, Vreeken R, Becking A, Ulrich D, Maal T. 2018. Three-Dimensional Imaging of the Face: A Comparison Between Three Different Imaging Modalities. Aesthetic Surgery Journal 1-7.

Volkenstein S, Dazert S, Jahnke K, Schneider M, Neumann A. 2007. Prosthetic supply of tissue defects in head and neck surgery. Laryngo-Rhino-Otologie, 86 (12):854-860.

Weinberg S M, Naidoo S, Govier D P, Martin R A, Kane A A, Marazita M L. 2006. Anthropometric Precision and Accuracy of Digital Three-Dimensional Photogrammetry: Comparing the Genex and 3dMD Imaging Systems with One Another and with Direct Anthropometry.

Winder R J, Darvann T A, McNight W, Magee J D M, Ramsey- Baggs P. 2007. Technical validation of the Di3D stereophotogrammetry surface imaging system. British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery, 46:33-37.

Winkelbach S, Molkenstruck S. 2020. David 3D Scanner https://www.heise.de/download/product/david-3d-scanner-59308.

8 Anhang

8.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Patient mit eingesetzter Nasenepithese 10

Abbildung 2: Übersicht der Scanmethoden zur Datenerfassung nach (Gühring 2002) 11

Abbildung 3: Versuchsaufbau Davidlaserscanner 14

Abbildung 6: Streifenlichtscannner 3D-NIR Sensor IRESTRA..... 18

Abbildung 7: Fusionsergebnis Gesicht 19

Abbildung 8: Fusionsergebnis Ohrmuschel 19

Abbildung 9: Strukturlichtscanner Artec Eva..... 20

Abbildung 10: Fusionsergebnis Strukturlichtscanner Artec Eva 21

Abbildung 11: Artec Spider 22

Abbildung 12: Handyscanner iSense..... 23

Abbildung 13: Fusionsergebnis Handyscanner iSense 24

Abbildung 14: Versuchsaufbau Photogrammetrie 25

Abbildung 15: Positionierung des Probanden zur Erstellung der Fotografien..... 25

Abbildung 16: Winkeleinteilung..... 26

Abbildung 17: Workflow Agisoft Photoscan Professional 28

Abbildung 18: Fusionsergebnis Agisoft Photoscan..... 28

Abbildung 19: Workflow Regard 3D..... 29

Abbildung 20: Fusionsergebnis Regard 3D 30

Abbildung 21: DI3D capture™ System 31

Abbildung 22: Fusionsergebnis 32

Abbildung 25: digitale Vermessung der Strecke 30 (lateraler Augenwinkel zu medialem Augenwinkel) zur Ermittlung der Variablen x..... 37

Abbildung 26: Rohdaten Versuch 1 des Davidlaserscanners 3di GmbH Jena 39

Abbildung 27: Rohdaten Versuch 2 des Davidlaserscanners 3di GmbH Jena 39

Abbildung 28: Rohdaten Versuch 3 des Davidlaserscanners 3di GmbH Jena 39

Abbildung 29: 3D-Modell Versuch 1 des Davidlaserscanners 3di GmbH Jena 40

Abbildung 30: 3D-Modell Versuch 2 des Davidlaserscanners 3di GmbH Jena 41

Abbildung 31: 3D-Modell Versuch 3 des Davidlaserscanners 3di GmbH Jena 41

Abbildung 32: 3D- Modell Streifenlichtscanner 3D-NIR Sensor IRESTRA 43

Abbildung 33: 3D-Modell Strukturlichtscanner Artec Eva 45

Abbildung 34: 3D-Modell Handyscanner iSense 47

Abbildung 35: 3D-Modell Photogrammetrie Fotolabor HNO-Klinik Jena, Rekonstruktion mit Agisoft Photoscan aus 72 Bildern der Fotoserie 1..... 49

Abbildung 36: 3D Modell Photogrammetrie Fotolabor HNO- Klinik Jena, Rekonstruktion mit Agisoft Photoscan aus 36 Bildern der Fotoserie 1..... 50

Abbildung 37: 3D-Modell Photogrammetrie Fotolabor HNO-Klinik Jena, Rekonstruktion mit Agisoft Photoscan aus 72 Bildern der Fotoserie 2..... 50

Abbildung 38: 3D-Modell Photogrammetrie Fotolabor HNO-Klinik Jena, Rekonstruktion mit Agisoft Photoscan aus 36 Bildern der Fotoserie 2 51

Abbildung 39: 3D-Modell Photogrammetrie Fotolabor HNO-Klinik Jena, Rekonstruktion mit Regard 3D aus 72 Bildern der Fotoserie 1 54

Abbildung 40: 3D-Modell Photogrammetrie Fotolabor HNO-Klinik Jena, Rekonstruktion mit Regard 3D aus 36 Bildern der Fotoserie 1 55

Abbildung 41: 3D-Modell Photogrammetrie Fotolabor HNO-Klinik Jena, Rekonstruktion mit Regard 3D aus 72 Bildern der Fotoserie 2 55

Abbildung 42: 3D-Modell Photogrammetrie Fotolabor HNO-Klinik Jena, ... 56

Abbildung 43: 3D-Modell DI3D capture™ Stereophotogrammetrie System 59

Abbildung 44: Gesamtpunktzahlen der Scanverfahren Gesicht 61

Abbildung 45: Rohdaten Versuch 4: Davidlaserscanner 3di GmbH Jena zur Darstellung der Ohrmuschel 62

Abbildung 46: Rohdaten Versuch 5: Davidlaserscanner 3di GmbH Jena zur Darstellung der Ohrmuschel 62

Abbildung 47: 3D-Modell Davidlaserscanner 3di GmbH Jena, Versuch 4: Darstellung der Ohrmuschel 63

Abbildung 48: 3D-Modell Davidlaserscanner 3di GmbH Jena, Versuch 5: Darstellung der Ohrmuschel 63

Abbildung 49: 3D- Modell Artec Spider 65

Abbildung 50: 3D- Modell Streifenlichtscanner 3D-NIR Sensor IRESTRA 67

Abbildung 51: 3D Modell des Photogrammetrieversuchs im Fotolabor der HNO-Klinik Jena, Rekonstruktion der Ohrmuschel mit Agisoft Photoscan 69

Abbildung 52: grafische Darstellung der Gesamtpunktzahl der Scanverfahren der Ohrmuschel 71

Abbildung 53: Durchführung der manuellen Gesichtsvermessung 72

Abbildung 54: Übersicht der reduzierten Messpunkte des Mittelgesichtes 72

Abbildung 55: Darstellung der Messwerte der Messstrecke 31 und der Standardabweichung in mm 76

Abbildung 56: Darstellung der Messwerte der Messstrecke 32 und der Standardabweichung in mm 77

Abbildung 57: Darstellung der Messwerte der Messstrecke 33 und der Standardabweichung in mm 77

Abbildung 58: Darstellung der Messwerte der Messstrecke 56 und der Standardabweichung in mm 78

Abbildung 59: Darstellung der Messwerte der Messstrecke 58 und der Standardabweichung in mm 78

Abbildung 60: Darstellung der Messwerte der Messstrecke 60 und der Standardabweichung in mm 79

Abbildung 61: Darstellung der Messwerte der Messstrecke 62 und der Standardabweichung in mm 79

8.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Messprotokoll zur Vermessung des Gesichtes anhand definierter Messpunkte- und strecken 33

Tabelle 2: Beschreibung der Kategorien des Punktesystems zur Bewertung der Scanverfahren 38

Tabelle 3: Bewertung des Davidlaserscanner 3di GmbH Jena durch Punktesystem 42

Tabelle 4: Bewertung des Streifenlichtscanners 3D-NIR Sensor IRESTRA durch Punktesystem 44

Tabelle 5: Bewertung des Strukturlichtscanners Artec Eva durch Punktesystem 46

Tabelle 6: Bewertung der Merkmale des Handyscanners iSense durch Punktesystem 48

Tabelle 7: Dauer der Arbeitsschritte bei 3D-Rekonstruktion der photogrammetrischen Aufnahmen aus dem Fotolabor der HNO-Klinik Jena mit dem Programm Agisoft Photoscan Professional aus jeweils 72 und 36 Bildern 52

Tabelle 8 Bewertung Photogrammetrie: Fotolabor HNO-Klinik Jena, Rekonstruktion mit Agisoft Photoscan 53

Tabelle 9: Dauer der Arbeitsschritte bei 3D-Rekonstruktion der photogrammetrischen Aufnahmen aus dem Fotolabor der HNO-Klinik Jena mit dem Programm Regard 3D aus jeweils 72 und 36 Bildern 57

Tabelle 10: Bewertung Photogrammetrie: Fotolabor HNO- Klinik Jena, Rekonstruktion mit Regard 3D 58

Tabelle 11: Bewertung des DI3D capture™ Stereophotogrammetrie- Systems durch Punktesystem 60

Tabelle 12: Bewertung des Davidlaserscanners 3di GmbH Jena zur Darstellung der Ohrmuschel 64

Tabelle 13: Bewertung des Strukturlichtscanners Artec Spider zur Darstellung der Ohrmuschel 66

Tabelle 14: Bewertung des Streifenlichtscanner 3D-NIR Sensor IRESTRA zur Darstellung der Ohrmuschel 68

Tabelle 15: Bewertung des 3D-Modelles der Photogrammetrie im Fotolabor HNO-Klinik Jena, Rekonstruktion mit Agisoft Photoscan 70

Tabelle 16: Auswahl von Messpunkten und Messstrecken zur Gegenüberstellung der manuellen und der digitalen Gesichtsvermessung..... 74

Tabelle 17: Übersicht der Mittelwerte der drei Untersucher der ausgewählten Messstrecken zur manuellen Gesichtsvermessung (in mm)..... 74

Tabelle 18: Übersicht der Mittelwerte der drei Untersucher der ausgewählten Messstrecken zur digitalen Gesichtsvermessung des 3D-Modelles Artec Eva (in mm) 75

Tabelle 19: Übersicht der Mittelwerte der drei Untersucher der ausgewählten Messstrecken zur digitalen Gesichtsvermessung des 3D-Modelles IRESTRA (in mm) 76

Tabelle 20: Messergebnisse der manuellen Gesichtsvermessung; Untersucher 1 117

Tabelle 21: Messergebnisse der manuellen Gesichtsvermessung; Untersucher 2 119

Tabelle 22: Messergebnisse der manuellen Gesichtsvermessung; Untersucher 3 121

Tabelle 23: Ermittlung des Gesamtmittelwertes der manuellen Messwerte 123

Tabelle 24: Messergebnisse der digitalen Gesichtsvermessung mit Artec Eva; Untersucher 1 125

Tabelle 25: Messergebnisse der digitalen Gesichtsvermessung mit Artec Eva; Untersucher 2 127

Tabelle 26: Messergebnisse der digitalen Gesichtsvermessung mit Artec Eva; Untersucher 3 129

Tabelle 27: Ermittlung des Gesamtmittelwertes der digitalen Messwerte Artec Eva 131

Tabelle 28: Messergebnisse der digitalen Gesichtsvermessung mit iSense; Untersucher 1 133

Tabelle 29: Messergebnisse der digitalen Gesichtsvermessung mit iSense; Untersucher 2 135

Tabelle 30: Messergebnisse der digitalen Gesichtsvermessung mit iSense; Untersucher 3 137

Tabelle 31: Ermittlung des Gesamtmittelwertes der digitalen Messwerte iSense ... 139

Tabelle 32: Messergebnisse der digitalen Gesichtsvermessung mit IRESTRA; Untersucher 1 141

Tabelle 33: Messergebnisse der digitalen Gesichtsvermessung mit IRESTRA; Untersucher 2 143

Tabelle 34: Messergebnisse der digitalen Gesichtsvermessung mit IRESTRA; Untersucher 3 145

Tabelle 35: Ermittlung des Gesamtmittelwertes der digitalen Messwerte IRESTRA 147

Tabelle 36: Messergebnisse der digitalen Gesichtsvermessung mit Regard 3D; Untersucher 1 149

Tabelle 37: Messergebnisse der digitalen Gesichtsvermessung mit Regard 3D; Untersucher 2 151

Tabelle 38: Messergebnisse der digitalen Gesichtsvermessung mit Regard 3D; Untersucher 3 153

Tabelle 39: Ermittlung des Gesamtmittelwertes der digitalen Messwerte Regard 3D 155

Tabelle 40: Messergebnisse der digitalen Gesichtsvermessung mit Agisoft Photoscan; Untersucher 1 157

Tabelle 41: Messergebnisse der digitalen Gesichtsvermessung mit Agisoft Photoscan; Untersucher 2 159

Tabelle 42: Messergebnisse der digitalen Gesichtsvermessung mit Agisoft; Untersucher 3 161

Tabelle 43: Ermittlung des Gesamtmittelwertes der digitalen Messwerte Agisoft Photoscan 163

Tabelle 44: Messergebnisse der digitalen Gesichtsvermessung mit Stereophotogrammetrie; Untersucher 1 165

Tabelle 45: Messergebnisse der digitalen Gesichtsvermessung mit Stereophotogrammetrie; Untersucher 2 167

Tabelle 46: Messergebnisse der digitalen Gesichtsvermessung mit Stereophotogrammetrie; Untersucher 3 169

Tabelle 47: Ermittlung des Gesamtmittelwertes der digitalen Messwerte Stereophotogrammetrie 171

Tabelle 48: Messergebnisse der digitalen Gesichtsvermessung Davidlaserscanner; Untersucher 1 173

Tabelle 49: Messergebnisse der digitalen Gesichtsvermessung Davidlaserscanner; Untersucher 2 175

Tabelle 50: Messergebnisse der digitalen Gesichtsvermessung Davidlaserscanner; Untersucher 3 177

Tabelle 51: Ermittlung des Gesamtmittelwertes der digitalen Messwerte Davidlaserscanner 179

8.3 Tabellen zur manuellen Gesichtsvermessung

Tabelle 20: Messergebnisse der manuellen Gesichtsvermessung; Untersucher 1

Strecke	1. Durchlauf	2. Durchlauf	3. Durchlauf	Mittelwert der Distanzen
1	12,51	13,30	13,77	13,19
2	48,24	49,01	46,58	47,94
3	26,82	25,96	23,71	25,45
4	46,59	46,24	45,42	46,08
5	61,53	61,59	60,33	61,15
6	80,48	78,63	82,42	80,51
7	123,88	122,37	122,25	122,83
8	63,58	68,46	66,84	66,29
9	107,09	109,94	108,53	108,52
10	60,89	59,58	58,77	59,75
11	32,42	32,07	31,57	32,02
12	28,52	30,34	29,81	29,56
13	28,73	27,77	31,90	29,47
14	53,70	54,71	54,67	54,36
15	54,22	55,07	53,73	54,34
16	22,38	22,37	23,10	22,62
17	23,24	22,64	23,76	23,21
18	47,63	50,90	51,83	50,12
19	47,20	49,53	48,72	48,48
20	74,65	76,50	74,18	75,11
21	75,04	75,52	76,63	75,73
22	81,46	81,82	76,16	79,81
23	81,97	80,46	81,39	81,27
24	62,03	63,75	63,74	63,17
25	61,02	61,54	61,89	61,48
26	101,98	96,19	97,84	98,67
27	99,10	97,81	97,73	98,21
28	109,25	112,20	112,72	111,39
29	114,20	112,27	114,89	113,79
30	33,80	33,60	34,41	33,94
31	33,61	33,11	35,28	34,00
32	64,71	64,68	64,62	64,67
33	62,13	62,96	63,80	62,96
34	94,04	92,61	92,15	92,93
35	32,95	31,82	32,94	32,57
36	92,32	94,24	93,21	93,26
37	92,21	90,72	92,66	91,86
38	63,17	60,18	61,21	61,52
39	62,36	61,75	62,70	62,27
40	77,20	78,71	76,21	77,37
41	79,54	75,84	76,47	77,28
42	46,58	46,15	47,81	46,85

43	48,27	46,94	49,81	48,34
44	27,35	27,16	28,71	27,74
45	29,80	27,76	28,23	28,60
46	29,19	29,33	28,13	28,88
47	29,06	28,27	29,66	29,00
48	49,21	49,14	50,40	49,58
49	51,12	49,95	48,11	49,73
50	30,34	30,64	31,41	30,80
51	31,25	32,27	30,79	31,44
52	38,45	41,98	38,83	39,75
53	36,32	38,05	39,04	37,80
54	66,01	66,52	64,87	65,80
55	63,25	64,43	64,88	64,19
56	54,23	55,56	54,43	54,74
57	36,21	37,85	35,99	36,68
58	53,52	52,61	53,73	53,29
59	36,16	37,13	37,28	36,86
60	74,44	76,94	76,71	76,03
61	63,82	65,39	65,00	64,74
62	72,73	74,93	74,89	74,18
63	64,87	66,59	66,82	66,09
64	79,16	79,46	78,15	78,92
65	77,58	78,09	79,56	78,41
66	120,71	121,54	120,24	120,83
67	119,32	120,91	119,33	119,85
68	135,13	135,67	134,43	135,08
69	136,17	135,46	135,68	135,77
70	124,77	125,77	126,50	125,68
71	127,62	126,38	126,69	126,90
72	129,93	129,05	128,26	129,08
73	131,56	130,58	129,30	130,48
74	102,12	104,41	104,53	103,69
75	104,04	102,58	104,48	103,70
76	104,24	102,46	105,48	104,06
77	105,44	106,46	108,92	106,94
78	86,41	87,40	86,19	86,67
79	86,74	87,38	86,56	86,89
80	128,01	126,78	127,43	127,41
81	129,41	128,76	129,21	129,13
82	135,71	138,29	137,67	137,22
83	138,47	137,25	137,22	137,65
84	127,00	126,84	127,42	127,09
85	128,72	126,39	127,11	127,41
86	128,50	127,20	127,76	127,82
87	126,23	126,47	127,20	126,63
88	105,43	105,38	106,93	105,91
89	105,28	105,51	107,64	106,14
90	106,98	105,09	106,59	106,22
91	107,14	105,27	108,21	106,87

Tabelle 21: Messergebnisse der manuellen Gesichtsvermessung; Untersucher 2

Strecke	1. Durchlauf	2. Durchlauf	3. Durchlauf	Mittelwert der Distanzen
1	12,85	12,45	13,50	12,93
2	44,35	42,88	45,95	44,39
3	22,44	21,87	23,19	22,50
4	43,25	46,12	45,32	44,90
5	55,85	56,22	58,09	56,72
6	75,90	76,14	78,19	76,74
7	124,56	123,95	124,52	124,34
8	66,77	67,33	67,58	67,23
9	104,03	105,31	106,39	105,24
10	63,28	63,98	61,95	63,07
11	63,29	64,12	62,52	63,31
12	32,11	33,46	30,85	32,14
13	32,45	31,03	29,38	30,95
14	55,83	56,78	53,97	55,53
15	54,89	55,26	53,83	54,66
16	22,44	21,94	22,70	22,36
17	22,46	22,55	22,72	22,58
18	50,48	51,64	50,43	50,85
19	50,52	50,74	49,48	50,25
20	77,73	76,65	75,31	76,56
21	77,70	76,87	76,14	76,90
22	83,42	82,23	82,07	82,57
23	85,24	85,44	84,21	84,96
24	64,96	65,28	66,24	65,49
25	65,37	66,34	66,02	65,91
26	98,05	97,86	97,60	97,84
27	98,11	98,14	98,44	98,23
28	109,87	110,23	109,16	109,75
29	111,56	111,62	110,35	111,18
30	39,30	38,33	36,86	38,16
31	38,07	38,41	37,84	38,11
32	67,33	67,94	68,67	67,98
33	66,51	67,25	66,62	66,79
34	98,36	99,11	100,20	99,22
35	30,96	30,75	32,01	31,24
36	93,54	95,07	93,68	94,10
37	94,17	93,88	90,66	92,90
38	63,84	62,62	61,60	62,69
39	63,03	63,85	61,50	62,79
40	76,99	77,01	78,38	77,46
41	77,05	78,45	79,07	78,19
42	47,38	49,55	49,46	48,80
43	47,21	46,47	45,69	46,46
44	31,43	29,44	28,23	29,70

45	28,89	31,86	29,80	30,18
46	30,21	29,48	25,59	28,43
47	30,62	33,34	29,06	31,01
48	50,82	49,65	50,13	50,20
49	48,44	50,21	49,79	49,48
50	30,68	30,77	32,59	31,35
51	31,81	31,97	32,06	31,95
52	38,13	37,88	37,56	37,86
53	37,21	36,98	38,81	37,67
54	66,37	66,11	65,85	66,11
55	65,33	67,98	67,35	66,89
56	53,18	54,34	55,60	54,37
57	37,78	38,78	36,44	37,67
58	53,85	52,00	53,20	53,01
59	35,64	35,51	36,20	35,78
60	75,84	73,41	75,59	74,95
61	64,25	66,72	66,37	65,78
62	74,05	74,52	74,50	74,36
63	66,01	65,86	64,39	65,42
64	77,63	78,67	77,87	78,06
65	77,04	78,06	78,15	77,75
66	123,69	120,63	123,22	122,51
67	125,12	123,01	121,24	123,12
68	136,47	133,96	136,73	135,72
69	136,53	136,67	134,61	135,94
70	128,70	127,43	127,64	127,92
71	128,87	127,62	127,73	128,07
72	132,16	129,79	130,57	130,84
73	130,51	130,41	130,48	130,47
74	103,56	101,49	103,64	102,90
75	104,47	103,33	103,24	103,68
76	107,37	106,63	106,93	106,98
77	105,08	106,40	106,83	106,10
78	86,21	87,84	86,43	86,83
79	88,18	88,52	87,73	88,14
80	130,47	127,79	130,48	129,58
81	129,09	127,73	128,74	128,52
82	139,41	139,40	140,76	139,86
83	138,13	139,68	139,70	139,17
84	126,93	125,72	125,27	125,97
85	125,71	124,46	126,56	125,58
86	125,03	127,13	126,32	126,16
87	126,73	128,50	125,52	126,92
88	105,47	104,59	105,86	105,31
89	106,71	105,56	106,64	106,30
90	103,53	103,72	104,49	103,91
91	103,14	103,85	105,12	104,04

Tabelle 22: Messergebnisse der manuellen Gesichtsvermessung; Untersucher 3

Strecke	1. Durchlauf	2. Durchlauf	3. Durchlauf	Mittelwert der Distanzen
1	13,50	12,90	12,14	12,85
2	48,96	46,47	47,50	47,64
3	25,29	24,20	27,23	25,57
4	48,29	49,43	48,24	48,65
5	58,78	57,54	56,67	57,66
6	78,70	76,47	77,23	77,47
7	124,16	123,77	122,66	123,53
8	67,94	67,50	65,62	67,02
9	106,53	108,42	107,03	107,33
10	59,28	58,11	60,71	59,37
11	62,01	61,06	60,31	61,13
12	32,73	32,35	30,62	31,90
13	32,19	30,95	31,91	31,68
14	55,87	54,53	56,28	55,56
15	55,50	55,16	56,35	55,67
16	22,99	23,41	23,77	23,39
17	21,37	23,17	22,85	22,46
18	48,93	49,21	50,82	49,65
19	50,13	49,18	49,32	49,54
20	76,49	75,06	75,34	75,63
21	75,91	75,98	76,72	76,20
22	82,51	83,70	82,45	82,89
23	82,27	81,48	83,77	82,51
24	64,11	64,70	63,61	64,14
25	63,48	64,53	63,24	63,75
26	96,92	98,22	98,95	98,03
27	99,72	98,11	98,60	98,81
28	111,40	110,32	111,81	111,18
29	111,43	110,75	109,15	110,44
30	36,65	38,02	38,06	37,58
31	35,63	36,48	37,19	36,43
32	67,88	68,90	67,55	68,11
33	68,61	66,91	67,36	67,63
34	98,77	98,80	96,41	97,99
35	33,95	32,44	31,51	32,63
36	94,24	92,99	92,74	93,32
37	92,23	93,18	93,10	92,84
38	64,58	63,45	62,97	63,67
39	60,10	62,57	61,18	61,28
40	77,21	78,47	77,38	77,69
41	76,72	79,01	77,25	77,66
42	47,51	48,37	48,50	48,13
43	48,17	46,72	48,75	47,88
44	30,50	28,88	28,83	29,40

45	29,41	29,62	30,63	29,89
46	28,93	29,85	29,21	29,33
47	29,48	28,55	29,43	29,15
48	50,02	49,51	49,63	49,72
49	49,13	50,29	50,77	50,06
50	30,61	32,06	31,89	31,52
51	31,30	30,34	31,44	31,03
52	38,42	38,85	36,99	38,09
53	37,34	38,02	38,92	38,09
54	66,26	67,51	66,89	66,89
55	67,74	66,06	67,29	67,03
56	54,21	53,55	53,29	53,68
57	38,85	35,90	37,37	37,37
58	52,01	53,78	52,22	52,67
59	36,17	36,12	35,88	36,06
60	74,70	75,30	76,03	75,34
61	66,72	66,13	67,25	66,70
62	73,38	74,87	73,66	73,97
63	65,03	64,30	65,11	64,81
64	76,53	77,90	78,58	77,67
65	77,68	78,43	78,48	78,20
66	121,47	122,45	121,42	121,78
67	119,18	120,55	119,91	119,88
68	136,30	135,67	137,22	136,40
69	136,60	135,75	136,27	136,21
70	126,90	126,33	127,09	126,77
71	126,22	126,43	127,53	126,73
72	133,42	131,39	130,45	131,75
73	133,30	131,47	130,03	131,60
74	106,43	105,59	104,86	105,63
75	105,87	106,41	105,83	106,04
76	105,89	104,81	104,12	104,94
77	105,77	106,60	105,86	106,08
78	88,33	87,93	87,38	87,88
79	89,71	87,42	88,56	88,56
80	127,59	125,85	126,81	126,75
81	127,91	127,27	126,32	127,17
82	136,92	135,64	137,79	136,78
83	137,48	138,08	136,71	137,42
84	122,66	124,27	123,43	123,45
85	124,32	123,02	124,43	123,92
86	124,25	124,34	123,60	124,06
87	126,07	123,25	125,17	124,83
88	104,02	105,59	105,61	105,07
89	106,07	105,22	107,13	106,14
90	103,02	103,35	102,43	102,93
91	104,73	103,28	104,94	104,32

Tabelle 23: Ermittlung des Gesamtmittelwertes der manuellen Messwerte

Strecke	Mittelwert der Distanzen Untersucher 1	Mittelwert der Distanzen Untersucher 2	Mittelwert der Distanzen Untersucher 3	Gesamtmittelwert der manuellen Messungen
1	13,19	12,93	12,85	12,99
2	47,94	44,39	47,64	46,66
3	25,45	22,50	25,57	24,51
4	46,08	44,90	48,65	46,54
5	61,15	56,72	57,66	58,51
6	80,51	76,74	77,47	78,24
7	122,83	124,34	123,53	123,57
8	66,29	67,23	67,02	66,85
9	108,52	105,24	107,33	107,03
10	59,75	63,07	59,37	60,73
11	32,02	63,31	61,13	52,15
12	29,56	32,14	31,90	31,20
13	29,47	30,95	31,68	30,70
14	54,36	55,53	55,56	55,15
15	54,34	54,66	55,67	54,89
16	22,62	22,36	23,39	22,79
17	23,21	22,58	22,46	22,75
18	50,12	50,85	49,65	50,21
19	48,48	50,25	49,54	49,42
20	75,11	76,56	75,63	75,77
21	75,73	76,90	76,20	76,28
22	79,81	82,57	82,89	81,76
23	81,27	84,96	82,51	82,91
24	63,17	65,49	64,14	64,27
25	61,48	65,91	63,75	63,71
26	98,67	97,84	98,03	98,18
27	98,21	98,23	98,81	98,42
28	111,39	109,75	111,18	110,77
29	113,79	111,18	110,44	111,80
30	33,94	38,16	37,58	36,56
31	34,00	38,11	36,43	36,18
32	64,67	67,98	68,11	66,92
33	62,96	66,79	67,63	65,79
34	92,93	99,22	97,99	96,71
35	32,57	31,24	32,63	32,15
36	93,26	94,10	93,32	93,56
37	91,86	92,90	92,84	92,53
38	61,52	62,69	63,67	62,63
39	62,27	62,79	61,28	62,11
40	77,37	77,46	77,69	77,51
41	77,28	78,19	77,66	77,71
42	46,85	48,80	48,13	47,93
43	48,34	46,46	47,88	47,56

44	27,74	29,70	29,40	28,95
45	28,60	30,18	29,89	29,56
46	28,88	28,43	29,33	28,88
47	29,00	31,01	29,15	29,72
48	49,58	50,20	49,72	49,83
49	49,73	49,48	50,06	49,76
50	30,80	31,35	31,52	31,22
51	31,44	31,95	31,03	31,47
52	39,75	37,86	38,09	38,57
53	37,80	37,67	38,09	37,85
54	65,80	66,11	66,89	66,27
55	64,19	66,89	67,03	66,04
56	54,74	54,37	53,68	54,26
57	36,68	37,67	37,37	37,24
58	53,29	53,01	52,67	52,99
59	36,86	35,78	36,06	36,23
60	76,03	74,95	75,34	75,44
61	64,74	65,78	66,70	65,74
62	74,18	74,36	73,97	74,17
63	66,09	65,42	64,81	65,44
64	78,92	78,06	77,67	78,22
65	78,41	77,75	78,20	78,12
66	120,83	122,51	121,78	121,71
67	119,85	123,12	119,88	120,95
68	135,08	135,72	136,40	135,73
69	135,77	135,94	136,21	135,97
70	125,68	127,92	126,77	126,79
71	126,90	128,07	126,73	127,23
72	129,08	130,84	131,75	130,56
73	130,48	130,47	131,60	130,85
74	103,69	102,90	105,63	104,07
75	103,70	103,68	106,04	104,47
76	104,06	106,98	104,94	105,33
77	106,94	106,10	106,08	106,37
78	86,67	86,83	87,88	87,13
79	86,89	88,14	88,56	87,86
80	127,41	129,58	126,75	127,91
81	129,13	128,52	127,17	128,27
82	137,22	139,86	136,78	137,95
83	137,65	139,17	137,42	138,08
84	127,09	125,97	123,45	125,50
85	127,41	125,58	123,92	125,64
86	127,82	126,16	124,06	126,01
87	126,63	126,92	124,83	126,13
88	105,91	105,31	105,07	105,43
89	106,14	106,30	106,14	106,19
90	106,22	103,91	102,93	104,35
91	106,87	104,04	104,32	105,08

8.4 Tabellen zur digitalen Gesichtsvermessung

Tabelle 24: Messergebnisse der digitalen Gesichtsvermessung mit Artec Eva; Untersucher 1

Strecke	1. Durchlauf	2. Durchlauf	3. Durchlauf	Mittelwert der Distanzen
1	15,23	15,04	16,58	15,62
2	46,35	45,30	49,78	47,14
3	29,58	29,66	26,39	28,54
4	46,21	46,30	45,58	46,03
5	59,28	57,16	59,36	58,60
6	80,75	78,50	78,66	79,30
7	120,72	120,06	121,85	120,88
8	68,34	67,50	68,28	68,04
9	106,37	106,04	108,61	107,01
10	58,25	57,31	58,06	57,87
11	58,08	59,83	57,55	58,49
12	29,61	27,80	30,28	29,23
13	26,52	26,70	27,45	26,89
14	54,08	53,88	54,93	54,30
15	53,73	54,68	54,89	54,43
16	22,56	21,97	22,85	22,46
17	21,72	23,06	22,03	22,27
18	51,89	51,36	48,76	50,67
19	49,77	50,64	50,28	50,23
20	75,63	76,21	75,08	75,64
21	75,72	76,54	76,93	76,40
22	83,88	81,37	80,25	81,83
23	80,65	80,04	81,72	80,80
24	63,56	62,27	62,83	62,89
25	62,72	63,59	61,88	62,73
26	103,92	103,7	101,86	103,16
27	100,95	102,63	101,06	101,55
28	114,73	112,70	112,61	113,35
29	113,62	111,29	112,80	112,57
30	33,52	34,86	34,77	34,38
31	34,21	33,10	33,73	33,68
32	64,75	65,04	63,16	64,32
33	62,48	63,04	63,43	62,98
34	96,33	97,86	96,28	96,82
35	35,88	35,81	34,21	35,30
36	91,80	91,60	92,56	91,99
37	91,62	92,37	92,78	92,26
38	58,90	57,80	57,36	58,02
39	61,92	60,72	61,46	61,37
40	77,22	76,67	77,02	76,97
41	78,63	76,77	76,80	77,40
42	46,09	47,36	47,56	47,00

43	48,52	47,78	48,75	48,35
44	30,56	31,83	30,22	30,87
45	30,70	31,33	31,86	31,30
46	31,02	31,51	30,46	30,99
47	30,73	29,52	31,38	30,54
48	49,80	50,23	50,64	50,22
49	48,90	51,06	51,26	50,41
50	30,87	31,16	31,72	31,25
51	32,47	33,88	32,90	33,08
52	38,76	39,11	40,88	39,58
53	43,77	40,70	41,53	42,00
54	63,82	66,58	67,08	65,83
55	66,04	65,89	64,32	65,42
56	54,71	55,93	55,36	55,33
57	36,14	38,77	38,73	37,88
58	53,06	54,26	54,28	53,87
59	34,76	34,52	35,81	35,03
60	75,59	77,99	75,24	76,27
61	68,35	71,37	68,25	69,32
62	77,84	77,13	75,20	76,72
63	70,78	72,63	69,62	71,01
64	79,44	80,54	80,40	80,13
65	80,43	80,36	79,73	80,17
66	123,02	124,51	123,06	123,53
67	124,36	123,59	122,20	123,38
68	136,58	133,17	134,27	134,67
69	136,94	135,62	137,11	136,56
70	128,24	130,27	130,93	129,81
71	130,87	132,07	129,60	130,85
72	131,75	129,38	129,85	130,33
73	133,00	129,35	130,57	130,97
74	103,01	105,39	105,67	104,69
75	104,88	105,51	105,90	105,43
76	107,15	108,29	107,56	107,67
77	108,96	108,02	106,47	107,82
78	85,44	85,86	85,72	85,67
79	88,65	86,36	86,21	87,07
80	130,02	132,91	130,56	131,16
81	128,81	130,71	131,23	130,25
82	139,05	143,29	141,13	141,16
83	141,93	139,83	140,50	140,75
84	126,21	128,88	128,26	127,78
85	125,35	127,42	127,56	126,78
86	125,47	128,80	127,87	127,38
87	125,12	127,76	126,94	126,61
88	106,81	105,06	105,16	105,68
89	106,00	105,82	106,43	106,08
90	104,42	106,61	106,13	105,72
91	105,59	105,39	105,24	105,41

Tabelle 25: Messergebnisse der digitalen Gesichtsvermessung mit Artec Eva; Untersucher 2

Strecke	1. Durchlauf	2. Durchlauf	3. Durchlauf	Mittelwert der Distanzen
1	17,79	18,19	17,63	17,87
2	48,62	46,23	46,00	46,95
3	27,28	31,32	30,86	29,82
4	45,95	45,56	45,71	45,74
5	59,43	56,16	57,52	57,70
6	81,21	80,39	78,38	79,99
7	121,45	120,05	120,86	120,79
8	65,95	65,33	68,64	66,64
9	106,07	107,26	107,18	106,84
10	60,00	60,69	61,62	60,77
11	56,98	58,76	59,36	58,37
12	26,26	26,83	27,34	26,81
13	27,96	28,98	27,25	28,06
14	54,17	54,79	53,87	54,28
15	54,75	53,97	55,39	54,70
16	21,66	19,87	20,28	20,60
17	19,07	21,98	21,88	20,98
18	53,52	54,80	53,39	53,90
19	51,25	54,74	54,31	53,43
20	74,59	76,95	74,94	75,49
21	75,51	75,39	74,12	75,01
22	84,63	84,82	82,04	83,83
23	82,72	83,79	82,03	82,85
24	67,63	69,97	69,48	69,03
25	67,92	68,69	66,28	67,63
26	99,91	103,37	100,17	101,15
27	98,03	101,07	101,58	100,23
28	112,91	113,81	110,29	112,34
29	110,85	110,89	111,46	111,07
30	34,94	34,49	33,31	34,25
31	33,73	31,72	32,78	32,74
32	67,48	67,68	66,20	67,12
33	66,86	66,33	65,94	66,38
34	95,34	99,18	98,17	97,56
35	33,79	35,57	33,44	34,27
36	92,98	92,07	91,81	92,29
37	91,71	90,94	91,16	91,27
38	58,87	60,37	58,71	59,32
39	57,79	57,59	57,37	57,58
40	76,04	76,00	76,03	76,02
41	77,59	77,12	75,25	76,65
42	47,07	45,46	46,26	46,26
43	47,34	47,27	48,39	47,67
44	29,46	31,92	30,95	30,78

45	29,10	30,51	29,24	29,62
46	28,24	30,71	30,90	29,95
47	29,75	32,55	32,09	31,46
48	49,95	48,61	48,24	48,93
49	49,91	50,49	49,58	49,99
50	33,82	33,00	31,11	32,64
51	31,24	33,34	33,09	32,56
52	41,12	41,63	39,32	40,69
53	39,95	38,30	39,64	39,30
54	66,08	67,95	66,13	66,72
55	65,91	66,46	67,95	66,77
56	55,71	56,75	55,07	55,84
57	36,52	35,38	37,89	36,60
58	52,09	55,33	53,19	53,54
59	38,38	37,63	37,96	37,99
60	74,56	76,84	76,67	76,02
61	67,87	66,44	66,01	66,77
62	73,94	74,88	74,18	74,33
63	67,14	69,97	67,67	68,26
64	80,33	80,12	79,53	79,99
65	79,70	79,83	80,09	79,87
66	120,66	123,35	120,24	121,42
67	122,61	124,63	120,45	122,56
68	136,29	140,53	137,80	138,21
69	136,02	137,75	138,30	137,36
70	125,14	127,43	125,95	126,17
71	124,11	125,42	125,09	124,87
72	129,49	129,01	130,32	129,61
73	130,75	130,58	128,23	129,85
74	101,51	101,91	105,32	102,91
75	105,86	105,34	104,73	105,31
76	107,98	107,37	105,42	106,92
77	105,21	103,43	107,45	105,36
78	85,89	84,90	87,52	86,10
79	86,56	86,73	88,33	87,21
80	130,50	132,72	129,88	131,03
81	129,95	128,92	131,46	130,11
82	135,91	140,09	138,83	138,28
83	137,96	138,86	135,19	137,34
84	130,73	130,38	127,73	129,61
85	126,90	129,21	128,57	128,23
86	127,97	128,45	128,22	128,21
87	126,05	126,53	126,90	126,49
88	105,97	108,69	106,70	107,12
89	106,36	105,34	105,58	105,76
90	107,59	107,25	106,50	107,11
91	105,22	107,25	107,86	106,78

Tabelle 26: Messergebnisse der digitalen Gesichtsvermessung mit Artec Eva; Untersucher 3

Strecke	1. Durchlauf	2. Durchlauf	3. Durchlauf	Mittelwert der Distanzen
1	13,18	16,14	16,45	15,26
2	45,02	45,79	44,83	45,21
3	25,78	26,15	25,11	25,68
4	46,79	44,52	44,25	45,19
5	56,73	58,81	58,67	58,07
6	77,65	78,95	77,15	77,92
7	123,62	120,23	120,68	121,51
8	67,09	64,91	65,47	65,82
9	105,63	104,75	104,67	105,02
10	61,74	59,34	60,90	60,66
11	63,65	63,43	63,92	63,67
12	31,23	28,15	30,23	29,87
13	32,81	32,93	29,46	31,73
14	53,59	55,29	55,14	54,67
15	55,50	54,05	55,09	54,88
16	22,61	20,59	20,32	21,17
17	22,20	22,40	21,24	21,95
18	50,58	53,86	50,90	51,78
19	51,79	50,94	51,66	51,46
20	76,41	76,86	75,64	76,30
21	75,99	74,81	75,24	75,35
22	84,76	83,06	84,64	84,15
23	85,25	84,64	84,42	84,77
24	66,84	67,78	66,77	67,13
25	67,39	67,52	67,16	67,36
26	97,79	98,82	98,92	98,51
27	97,21	98,43	97,05	97,56
28	109,86	112,61	110,13	110,87
29	111,73	111,34	110,76	111,28
30	38,59	37,86	37,85	38,10
31	38,33	38,40	36,48	37,74
32	65,71	65,27	66,88	65,95
33	66,76	67,92	67,34	67,34
34	100,42	97,55	98,75	98,91
35	30,88	32,06	30,24	31,06
36	94,64	91,47	93,68	93,26
37	94,04	93,35	94,61	94,00
38	60,77	58,47	60,60	59,95
39	63,84	60,99	63,70	62,84
40	75,60	74,81	77,53	75,98
41	77,37	78,32	78,13	77,94
42	49,19	48,88	48,86	48,98
43	46,95	46,78	48,88	47,54
44	32,56	32,04	31,17	31,92

45	29,79	30,22	30,33	30,11
46	28,44	28,91	29,15	28,83
47	29,60	30,27	29,59	29,82
48	49,36	50,87	49,90	50,04
49	49,15	51,46	49,54	50,05
50	30,77	29,87	30,61	30,42
51	31,24	30,09	30,21	30,51
52	39,70	39,60	37,92	39,07
53	38,79	38,09	36,05	37,64
54	67,83	66,93	66,10	66,95
55	67,92	66,54	66,77	67,08
56	55,04	55,60	54,80	55,15
57	37,18	38,79	37,86	37,94
58	55,00	55,16	54,62	54,93
59	37,30	36,71	36,19	36,73
60	77,57	76,25	76,54	76,79
61	68,33	67,83	67,66	67,94
62	75,94	77,03	75,18	76,05
63	65,36	66,75	66,57	66,23
64	77,44	77,32	77,20	77,32
65	78,47	77,82	78,91	78,40
66	124,89	125,57	122,79	124,42
67	120,56	122,73	122,43	121,91
68	136,38	136,69	135,33	136,13
69	135,21	135,36	137,18	135,92
70	126,55	127,56	126,50	126,87
71	126,82	127,02	127,96	127,27
72	133,20	135,34	132,77	133,77
73	131,83	130,85	129,50	130,73
74	107,48	106,21	105,11	106,27
75	106,07	106,41	105,76	106,08
76	105,88	109,30	106,13	107,10
77	105,02	106,37	107,75	106,38
78	87,95	88,56	88,74	88,42
79	89,60	88,10	88,36	88,69
80	127,43	127,88	126,70	127,34
81	127,23	129,73	126,55	127,84
82	135,56	138,36	135,08	136,33
83	139,26	138,09	135,15	137,50
84	123,87	120,44	124,34	122,88
85	126,11	127,96	123,94	126,00
86	127,12	128,69	124,35	126,72
87	126,40	128,69	126,31	127,13
88	105,79	104,70	106,32	105,60
89	105,59	106,70	106,98	106,42
90	106,71	105,68	107,76	106,72
91	105,04	104,68	104,90	104,87

Tabelle 27: Ermittlung des Gesamtmittelwertes der digitalen Messwerte Artec Eva

Strecke	Mittelwert der Distanzen Untersucher 1	Mittelwert der Distanzen Untersucher 2	Mittelwert der Distanzen Untersucher 3	Gesamtmittelwert der digitalen Messungen
1	15,62	17,87	15,26	16,25
2	47,14	46,95	45,21	46,43
3	28,54	29,82	25,68	28,01
4	46,03	45,74	45,19	45,65
5	58,60	57,70	58,07	58,12
6	79,30	79,99	77,92	79,07
7	120,88	120,79	121,51	121,06
8	68,04	66,64	65,82	66,83
9	107,01	106,84	105,02	106,29
10	57,87	60,77	60,66	59,77
11	58,49	58,37	63,67	60,18
12	29,23	26,81	29,87	28,64
13	26,89	28,06	31,73	28,89
14	54,30	54,28	54,67	54,42
15	54,43	54,70	54,88	54,67
16	22,46	20,60	21,17	21,41
17	22,27	20,98	21,95	21,73
18	50,67	53,90	51,78	52,12
19	50,23	53,43	51,46	51,71
20	75,64	75,49	76,30	75,81
21	76,40	75,01	75,35	75,59
22	81,83	83,83	84,15	83,27
23	80,80	82,85	84,77	82,81
24	62,89	69,03	67,13	66,35
25	62,73	67,63	67,36	65,91
26	103,16	101,15	98,51	100,94
27	101,55	100,23	97,56	99,78
28	113,35	112,34	110,87	112,19
29	112,57	111,07	111,28	111,64
30	34,38	34,25	38,10	35,58
31	33,68	32,74	37,74	34,72
32	64,32	67,12	65,95	65,80
33	62,98	66,38	67,34	65,57
34	96,82	97,56	98,91	97,76
35	35,30	34,27	31,06	33,54
36	91,99	92,29	93,26	92,51
37	92,26	91,27	94,00	92,51
38	58,02	59,32	59,95	59,10
39	61,37	57,58	62,84	60,59
40	76,97	76,02	75,98	76,32
41	77,40	76,65	77,94	77,33
42	47,00	46,26	48,98	47,41
43	48,35	47,67	47,54	47,85

44	30,87	30,78	31,92	31,19
45	31,30	29,62	30,11	30,34
46	30,99	29,95	28,83	29,92
47	30,54	31,46	29,82	30,61
48	50,22	48,93	50,04	49,73
49	50,41	49,99	50,05	50,15
50	31,25	32,64	30,42	31,44
51	33,08	32,56	30,51	32,05
52	39,58	40,69	39,07	39,78
53	42,00	39,30	37,64	39,65
54	65,83	66,72	66,95	66,50
55	65,42	66,77	67,08	66,42
56	55,33	55,84	55,15	55,44
57	37,88	36,60	37,94	37,47
58	53,87	53,54	54,93	54,11
59	35,03	37,99	36,73	36,58
60	76,27	76,02	76,79	76,36
61	69,32	66,77	67,94	68,01
62	76,72	74,33	76,05	75,70
63	71,01	68,26	66,23	68,50
64	80,13	79,99	77,32	79,15
65	80,17	79,87	78,40	79,48
66	123,53	121,42	124,42	123,12
67	123,38	122,56	121,91	122,62
68	134,67	138,21	136,13	136,34
69	136,56	137,36	135,92	136,61
70	129,81	126,17	126,87	127,62
71	130,85	124,87	127,27	127,66
72	130,33	129,61	133,77	131,24
73	130,97	129,85	130,73	130,52
74	104,69	102,91	106,27	104,62
75	105,43	105,31	106,08	105,61
76	107,67	106,92	107,10	107,23
77	107,82	105,36	106,38	106,52
78	85,67	86,10	88,42	86,73
79	87,07	87,21	88,69	87,66
80	131,16	131,03	127,34	129,84
81	130,25	130,11	127,84	129,40
82	141,16	138,28	136,33	138,59
83	140,75	137,34	137,50	138,53
84	127,78	129,61	122,88	126,76
85	126,78	128,23	126,00	127,00
86	127,38	128,21	126,72	127,44
87	126,61	126,49	127,13	126,74
88	105,68	107,12	105,60	106,13
89	106,08	105,76	106,42	106,09
90	105,72	107,11	106,72	106,52
91	105,41	106,78	104,87	105,69

Tabelle 28: Messergebnisse der digitalen Gesichtsvermessung mit iSense; Untersucher 1

Strecke	1. Durchlauf	2. Durchlauf	3. Durchlauf	Mittelwert der Distanzen
1	16,64	17,97	16,85	17,15
2	45,10	45,04	44,27	44,80
3	33,93	28,16	28,93	30,34
4	44,21	44,79	45,87	44,96
5	61,51	61,59	63,10	62,07
6	83,68	79,67	80,91	81,42
7	120,66	120,71	120,74	120,70
8	64,71	64,65	63,84	64,40
9	10,26	106,65	108,05	74,99
10	64,70	64,45	65,24	64,80
11	60,06	60,19	61,47	60,57
12	30,14	29,84	30,66	30,21
13	30,84	30,14	29,67	30,22
14	56,66	55,80	56,85	56,44
15	54,17	54,87	54,09	54,38
16	22,82	21,51	22,02	22,12
17	21,86	21,66	22,18	21,90
18	56,29	55,88	56,88	56,35
19	55,90	53,63	57,33	55,62
20	76,43	76,34	75,31	76,03
21	75,91	73,01	73,08	74,00
22	82,04	81,04	81,56	81,55
23	87,05	86,41	83,60	85,69
24	66,69	67,90	67,01	67,20
25	70,74	68,01	69,57	69,44
26	104,87	102,11	104,07	103,68
27	105,49	106,81	106,82	106,37
28	115,45	114,85	117,29	115,86
29	115,32	115,13	116,29	115,58
30	43,79	41,14	43,38	42,77
31	42,71	40,16	42,73	41,87
32	65,02	65,66	63,30	64,66
33	67,95	67,48	68,19	67,87
34	107,82	107,48	106,99	107,43
35	34,68	29,46	30,16	31,43
36	91,22	91,78	88,33	90,44
37	87,75	90,37	87,59	88,57
38	54,67	54,95	56,26	55,29
39	58,92	58,07	60,36	59,12
40	72,35	73,52	73,87	73,25
41	77,24	77,06	76,18	76,83
42	44,25	44,86	43,27	44,13
43	48,93	47,42	48,32	48,22
44	27,59	27,67	25,47	26,91

45	32,93	32,74	33,53	33,07
46	34,66	32,71	32,50	33,29
47	36,27	36,30	38,28	36,95
48	50,69	50,61	49,31	50,20
49	49,00	49,17	49,77	49,31
50	29,98	28,89	27,17	28,68
51	35,22	35,87	36,66	35,92
52	46,76	46,25	46,23	46,41
53	47,47	48,11	48,84	48,14
54	70,74	72,08	70,99	71,27
55	71,90	72,46	71,67	72,01
56	56,31	56,03	56,75	56,36
57	36,29	36,29	36,51	36,36
58	53,41	52,60	52,01	52,67
59	37,70	37,76	35,83	37,10
60	77,46	77,33	76,91	77,23
61	67,33	68,34	67,82	67,83
62	73,09	73,73	74,82	73,88
63	69,03	69,84	68,03	68,97
64	85,98	85,56	85,70	85,75
65	76,03	75,27	76,09	75,80
66	129,14	129,33	129,07	129,18
67	123,93	120,84	124,94	123,24
68	144,81	144,59	145,36	144,92
69	114,96	115,11	115,58	115,22
70	134,94	134,94	133,18	134,35
71	128,16	128,38	127,84	128,13
72	141,32	141,16	139,24	140,57
73	132,66	132,77	130,65	132,03
74	111,10	113,25	110,16	111,50
75	106,61	107,44	106,87	106,97
76	111,67	113,56	109,73	111,65
77	106,76	107,42	106,64	106,94
78	99,63	99,62	97,34	98,86
79	88,95	88,92	88,53	88,80
80	134,36	136,19	134,81	135,12
81	134,63	134,01	135,91	134,85
82	141,64	143,47	140,04	141,72
83	139,60	139,86	139,32	139,59
84	130,87	132,41	130,10	131,13
85	129,17	126,30	129,63	128,37
86	130,28	132,42	129,26	130,65
87	129,93	129,12	129,41	129,49
88	110,66	114,13	109,75	111,51
89	106,64	106,74	105,04	106,14
90	116,84	116,44	117,28	116,85
91	103,82	103,51	104,05	103,79

Tabelle 29: Messergebnisse der digitalen Gesichtsvermessung mit iSense; Untersucher 2

Strecke	1. Durchlauf	2. Durchlauf	3. Durchlauf	Mittelwert der Distanzen
1	17,89	17,36	17,06	17,44
2	45,02	45,18	46,88	45,69
3	30,15	30,93	29,91	30,33
4	48,27	47,34	48,98	48,20
5	59,79	58,72	58,55	59,02
6	80,90	80,60	81,77	81,09
7	121,27	120,56	121,14	120,99
8	69,46	68,41	68,97	68,95
9	108,43	107,81	106,59	107,61
10	58,62	58,46	58,44	58,51
11	54,43	55,07	54,21	54,57
12	31,79	31,18	31,22	31,40
13	32,36	28,98	29,17	30,17
14	54,73	54,21	55,41	54,78
15	58,51	55,51	55,26	56,43
16	24,78	24,32	24,75	24,62
17	19,63	19,44	17,28	18,78
18	56,58	56,22	56,88	56,56
19	53,15	53,24	53,97	53,45
20	77,50	76,28	75,76	76,51
21	69,66	69,65	70,84	70,05
22	83,68	83,06	83,37	83,37
23	83,37	83,46	82,14	82,99
24	67,50	67,70	68,88	68,03
25	71,31	69,55	69,11	69,99
26	103,29	103,89	104,75	103,98
27	105,02	105,56	106,14	105,57
28	115,20	116,25	116,75	116,07
29	114,55	115,32	115,63	115,17
30	39,90	40,45	40,36	40,24
31	38,10	38,14	39,57	38,60
32	67,85	69,82	68,64	68,77
33	68,24	69,35	69,89	69,16
34	102,36	102,01	101,74	102,04
35	35,44	35,82	33,29	34,85
36	92,36	93,59	93,70	93,22
37	93,69	94,20	94,30	94,06
38	58,10	58,17	58,26	58,18
39	58,06	59,39	60,23	59,23
40	75,16	75,58	76,71	75,82
41	77,81	77,03	78,54	77,79
42	42,91	42,93	41,99	42,61
43	43,32	43,60	42,96	43,29
44	32,12	32,86	32,06	32,35

45	33,60	33,47	33,09	33,39
46	30,79	30,23	29,40	30,14
47	33,82	33,94	30,38	32,71
48	49,20	50,23	50,92	50,12
49	49,44	49,60	49,91	49,65
50	29,06	29,66	30,60	29,77
51	31,42	31,73	31,66	31,60
52	44,53	43,49	43,05	43,69
53	45,19	45,41	44,58	45,06
54	69,98	71,27	71,97	71,07
55	68,19	68,39	69,37	68,65
56	54,53	54,84	53,04	54,14
57	41,34	41,60	40,21	41,05
58	50,88	50,74	51,78	51,13
59	36,20	41,81	40,56	39,52
60	76,84	75,84	75,33	76,00
61	72,51	72,89	72,52	72,64
62	75,93	75,27	75,49	75,56
63	71,29	71,46	70,32	71,02
64	81,53	81,39	81,55	81,49
65	81,21	81,53	80,65	81,13
66	128,41	128,31	126,53	127,75
67	124,71	124,83	125,14	124,89
68	142,14	142,70	140,65	141,83
69	137,54	137,03	137,96	137,51
70	134,67	135,42	135,84	135,31
71	128,87	128,66	129,12	128,88
72	135,44	135,40	132,50	134,45
73	126,78	126,52	126,36	126,55
74	138,36	138,97	138,86	138,73
75	137,72	138,56	137,31	137,86
76	117,55	117,34	116,73	117,21
77	106,15	106,42	105,37	105,98
78	118,03	118,50	117,52	118,02
79	108,95	109,61	106,68	108,41
80	93,14	93,49	93,78	93,47
81	84,91	84,32	86,89	85,37
82	135,82	134,75	135,32	135,30
83	134,17	132,49	134,74	133,80
84	144,35	144,63	144,28	144,42
85	141,87	140,34	140,57	140,93
86	129,94	130,96	131,91	130,94
87	129,69	129,05	129,66	129,47
88	130,78	131,04	130,22	130,68
89	130,08	130,10	131,38	130,52
90	113,67	113,70	111,15	112,84
91	112,01	111,67	110,99	111,56

Tabelle 30: Messergebnisse der digitalen Gesichtsvermessung mit iSense; Untersucher 3

Strecke	1. Durchlauf	2. Durchlauf	3. Durchlauf	Mittelwert der Distanzen
1	18,92	18,22	17,62	18,25
2	45,78	45,50	43,73	45,00
3	29,02	30,79	30,58	30,13
4	45,48	46,94	45,21	45,88
5	57,45	57,97	56,84	57,42
6	80,10	80,72	80,65	80,49
7	125,12	125,11	124,80	125,01
8	65,61	65,15	65,88	65,55
9	105,25	107,86	106,13	106,41
10	58,28	57,82	58,48	58,19
11	57,04	58,58	58,86	58,16
12	31,84	31,67	31,48	31,66
13	32,09	31,13	32,13	31,78
14	56,68	55,68	55,61	55,99
15	54,42	53,76	55,77	54,65
16	21,87	22,05	22,39	22,10
17	22,74	23,20	22,97	22,97
18	54,60	54,66	53,40	54,22
19	54,50	54,04	54,97	54,50
20	74,17	74,38	75,26	74,60
21	70,12	71,95	71,13	71,07
22	85,68	85,06	85,77	85,50
23	86,03	86,35	85,59	85,99
24	67,10	67,21	68,75	67,69
25	66,97	65,76	65,65	66,13
26	106,89	106,19	105,48	106,19
27	106,19	107,85	107,76	107,27
28	111,62	112,95	111,79	112,12
29	114,11	115,82	114,11	114,68
30	37,41	38,73	38,69	38,28
31	37,47	36,13	36,25	36,62
32	66,34	66,24	67,16	66,58
33	67,96	69,61	69,49	69,02
34	98,38	98,60	98,57	98,52
35	31,13	31,30	31,42	31,28
36	92,36	92,33	93,70	92,80
37	91,89	91,98	92,44	92,10
38	58,32	58,48	59,34	58,71
39	62,21	61,90	61,99	62,03
40	76,13	75,22	75,07	75,47
41	74,80	73,37	73,42	73,86
42	43,52	43,00	42,26	42,93
43	45,15	44,72	44,53	44,80
44	29,56	29,09	30,95	29,87

45	30,49	30,84	30,91	30,75
46	29,79	29,47	29,16	29,47
47	32,75	32,11	30,66	31,84
48	49,48	49,87	49,13	49,49
49	51,35	51,56	50,42	51,11
50	28,04	28,21	29,43	28,56
51	31,22	31,47	31,24	31,31
52	46,56	46,21	46,46	46,41
53	46,08	47,73	47,92	47,24
54	69,87	69,99	68,29	69,38
55	66,23	67,26	67,42	66,97
56	51,62	51,92	53,95	52,50
57	40,21	42,85	40,98	41,35
58	50,59	50,07	51,40	50,69
59	42,91	42,26	42,30	42,49
60	74,71	74,95	75,79	75,15
61	71,17	71,44	70,37	70,99
62	74,92	75,99	75,02	75,31
63	70,81	70,16	70,16	70,38
64	88,19	88,92	87,25	88,12
65	83,57	83,29	83,26	83,37
66	131,98	131,42	130,82	131,41
67	122,14	123,40	123,43	122,99
68	145,52	145,08	146,02	145,54
69	139,54	139,51	138,22	139,09
70	136,31	136,73	137,39	136,81
71	137,12	136,73	136,98	136,94
72	139,34	139,63	138,14	139,04
73	115,45	115,69	114,52	115,22
74	111,34	110,25	111,75	111,11
75	118,66	117,42	118,14	118,07
76	106,52	108,42	107,08	107,34
77	94,61	94,43	95,20	94,75
78	89,67	89,83	89,37	89,62
79	135,70	134,32	135,69	135,24
80	133,81	133,71	133,28	133,60
81	140,49	141,22	140,99	140,90
82	141,89	141,54	141,05	141,49
83	130,68	129,03	126,26	128,66
84	129,25	128,81	128,28	128,78
85	129,77	132,86	130,18	130,94
86	126,81	126,96	125,04	126,27
87	116,79	116,77	118,18	117,25
88	111,98	111,51	110,99	111,49
89	108,07	111,13	111,81	110,34
90	106,45	105,91	105,39	105,92
91	104,96	106,77	106,57	106,10

Tabelle 31: Ermittlung des Gesamtmittelwertes der digitalen Messwerte iSense

Strecke	Mittelwert der Distanzen Untersucher 1	Mittelwert der Distanzen Untersucher 2	Mittelwert der Distanzen Untersucher 3	Gesamtmittelwert der manuellen Messungen
1	17,15	17,44	18,25	17,61
2	44,80	45,69	45,00	45,16
3	30,34	30,33	30,13	30,27
4	44,96	48,20	45,88	46,35
5	62,07	59,02	57,42	59,50
6	81,42	81,09	80,49	81,00
7	120,70	120,99	125,01	122,23
8	64,40	68,95	65,55	66,30
9	74,99	107,61	106,41	96,34
10	64,80	58,51	58,19	60,50
11	60,57	54,57	58,16	57,77
12	30,21	31,40	31,66	31,09
13	30,22	30,17	31,78	30,72
14	56,44	54,78	55,99	55,74
15	54,38	56,43	54,65	55,15
16	22,12	24,62	22,10	22,95
17	21,90	18,78	22,97	21,22
18	56,35	56,56	54,22	55,71
19	55,62	53,45	54,50	54,52
20	76,03	76,51	74,60	75,71
21	74,00	70,05	71,07	71,71
22	81,55	83,37	85,50	83,47
23	85,69	82,99	85,99	84,89
24	67,20	68,03	67,69	67,64
25	69,44	69,99	66,13	68,52
26	103,68	103,98	106,19	104,62
27	106,37	105,57	107,27	106,40
28	115,86	116,07	112,12	114,68
29	115,58	115,17	114,68	115,14
30	42,77	40,24	38,28	40,43
31	41,87	38,60	36,62	39,03
32	64,66	68,77	66,58	66,67
33	67,87	69,16	69,02	68,68
34	107,43	102,04	98,52	102,66
35	31,43	34,85	31,28	32,52
36	90,44	93,22	92,80	92,15
37	88,57	94,06	92,10	91,58
38	55,29	58,18	58,71	57,39
39	59,12	59,23	62,03	60,13
40	73,25	75,82	75,47	74,85
41	76,83	77,79	73,86	76,16
42	44,13	42,61	42,93	43,22
43	48,22	43,29	44,80	45,44

44	26,91	32,35	29,87	29,71
45	33,07	33,39	30,75	32,40
46	33,29	30,14	29,47	30,97
47	36,95	32,71	31,84	33,83
48	50,20	50,12	49,49	49,94
49	49,31	49,65	51,11	50,02
50	28,68	29,77	28,56	29,00
51	35,92	31,60	31,31	32,94
52	46,41	43,69	46,41	45,50
53	48,14	45,06	47,24	46,81
54	71,27	71,07	69,38	70,57
55	72,01	68,65	66,97	69,21
56	56,36	54,14	52,50	54,33
57	36,36	41,05	41,35	39,59
58	52,67	51,13	50,69	51,50
59	37,10	39,52	42,49	39,70
60	77,23	76,00	75,15	76,13
61	67,83	72,64	70,99	70,49
62	73,88	75,56	75,31	74,92
63	68,97	71,02	70,38	70,12
64	85,75	81,49	88,12	85,12
65	75,80	81,13	83,37	80,10
66	129,18	127,75	131,41	129,45
67	123,24	124,89	122,99	123,71
68	144,92	141,83	145,54	144,10
69	115,22	137,51	139,09	130,61
70	134,35	135,31	136,81	135,49
71	128,13	128,88	136,94	131,32
72	140,57	134,45	139,04	138,02
73	132,03	126,55	115,22	124,60
74	111,50	138,73	111,11	120,45
75	106,97	137,86	118,07	120,97
76	111,65	117,21	107,34	112,07
77	106,94	105,98	94,75	102,56
78	98,86	118,02	89,62	102,17
79	88,80	108,41	135,24	110,82
80	135,12	93,47	133,60	120,73
81	134,85	85,37	140,90	120,37
82	141,72	135,30	141,49	139,50
83	139,59	133,80	128,66	134,02
84	131,13	144,42	128,78	134,78
85	128,37	140,93	130,94	133,41
86	130,65	130,94	126,27	129,29
87	129,49	129,47	117,25	125,40
88	111,51	130,68	111,49	117,89
89	106,14	130,52	110,34	115,67
90	116,85	112,84	105,92	111,87
91	103,79	111,56	106,10	107,15

Tabelle 32: Messergebnisse der digitalen Gesichtsvermessung mit IRESTRA; Untersucher 1

Strecke	1. Durchlauf	2. Durchlauf	3. Durchlauf	Mittelwert der Distanzen
1	12,89	13,16	12,53	12,86
2	47,36	47,88	46,75	47,33
3	25,67	27,78	25,98	26,48
4	48,93	48,65	46,96	48,18
5	61,59	61,30	59,63	60,84
6	80,33	80,47	79,92	80,24
7	122,78	123,69	123,37	123,28
8	68,46	67,63	67,63	67,91
9	104,31	105,86	105,74	105,30
10	59,76	60,21	59,78	59,92
11	60,96	61,58	60,86	61,13
12	32,40	34,39	33,19	33,33
13	34,68	34,16	33,21	34,02
14	55,89	55,79	55,95	55,88
15	54,36	53,12	54,28	53,92
16	22,37	24,21	22,21	22,93
17	24,77	24,05	24,03	24,28
18	50,89	51,86	49,89	50,88
19	50,47	51,23	50,00	50,57
20	78,24	79,27	77,05	78,19
21	77,43	76,54	76,31	76,76
22	82,36	82,95	81,11	82,14
23	82,13	85,31	84,76	84,07
24	64,72	65,83	64,93	65,16
25	65,17	65,53	64,01	64,90
26	100,27	102,45	98,48	100,40
27	98,56	100,96	99,89	99,80
28	109,72	111,15	109,98	110,28
29	110,64	109,28	110,83	110,25
30	37,27	36,41	36,21	36,63
31	37,03	33,64	36,81	35,83
32	68,47	67,30	67,57	67,78
33	66,88	65,93	66,55	66,45
34	98,24	99,36	98,78	98,79
35	34,89	34,10	34,09	34,36
36	93,35	92,85	93,41	93,20
37	94,09	94,82	93,19	94,03
38	61,75	62,48	62,77	62,33
39	62,95	61,69	62,54	62,39
40	77,62	78,62	77,26	77,83
41	79,57	80,58	78,58	79,58
42	48,33	47,66	47,62	47,87
43	46,63	45,88	46,69	46,40
44	30,32	32,22	30,36	30,97

45	29,80	33,04	30,57	31,14
46	29,63	31,23	30,79	30,55
47	31,96	32,91	30,61	31,83
48	50,86	49,20	49,07	49,71
49	50,63	53,64	49,04	51,10
50	30,00	28,07	30,26	29,44
51	31,07	33,16	31,10	31,78
52	38,95	40,96	38,82	39,58
53	38,02	43,44	38,86	40,11
54	67,55	71,60	68,93	69,36
55	66,99	68,65	67,31	67,65
56	53,57	51,94	53,08	52,86
57	37,77	38,94	38,36	38,36
58	50,38	50,49	52,24	51,03
59	36,49	36,55	36,54	36,53
60	76,66	76,53	75,88	76,36
61	67,83	67,48	68,17	67,83
62	73,64	73,35	74,35	73,78
63	66,56	68,64	66,87	67,36
64	78,15	78,30	77,31	77,92
65	77,28	78,76	77,51	77,85
66	120,08	120,69	121,04	120,60
67	120,35	120,96	111,81	117,71
68	138,61	135,39	135,06	136,35
69	138,78	136,17	138,34	137,76
70	127,42	126,87	126,38	126,89
71	126,81	127,33	126,83	126,99
72	130,60	131,13	130,72	130,82
73	129,68	130,00	130,08	129,92
74	106,01	105,94	105,69	105,88
75	106,08	106,62	104,28	105,66
76	108,86	105,27	106,29	106,81
77	108,79	107,33	105,54	107,22
78	90,99	88,47	88,97	89,48
79	88,71	87,06	87,91	87,89
80	130,69	128,66	130,38	129,91
81	130,83	129,27	131,25	130,45
82	140,29	136,32	135,61	137,41
83	139,99	138,60	138,05	138,88
84	123,64	124,94	126,69	125,09
85	123,81	126,43	124,63	124,96
86	123,39	124,15	126,33	124,62
87	126,97	124,17	126,52	125,89
88	107,86	107,96	106,31	107,38
89	105,56	105,68	107,48	106,24
90	103,16	104,96	107,67	105,26
91	103,84	103,49	105,56	104,30

Tabelle 33: Messergebnisse der digitalen Gesichtsvermessung mit IRESTRA; Untersucher 2

Strecke	1. Durchlauf	2. Durchlauf	3. Durchlauf	Mittelwert der Distanzen
1	12,80	12,66	13,81	13,09
2	44,42	46,49	45,98	45,63
3	26,75	27,89	26,25	26,96
4	46,24	47,46	47,39	47,03
5	59,59	60,28	59,99	59,95
6	79,61	80,43	80,14	80,06
7	121,11	119,99	121,31	120,80
8	67,77	66,85	66,42	67,01
9	106,52	109,45	106,05	107,34
10	60,47	60,38	60,28	60,38
11	60,54	58,82	60,76	60,04
12	35,29	36,02	35,12	35,48
13	33,50	36,61	36,96	35,69
14	55,65	55,22	54,26	55,04
15	54,24	55,95	55,47	55,22
16	24,98	23,97	23,08	24,01
17	23,87	25,59	23,27	24,24
18	50,84	54,38	51,60	52,27
19	50,16	49,47	49,30	49,64
20	76,96	75,86	76,79	76,54
21	77,18	76,07	77,99	77,08
22	84,45	83,06	83,62	83,71
23	84,29	84,37	85,84	84,83
24	64,30	64,15	63,48	63,98
25	65,35	65,23	65,09	65,22
26	100,90	103,86	100,23	101,66
27	99,95	101,29	99,43	100,22
28	109,64	114,75	109,36	111,25
29	109,67	110,07	110,61	110,12
30	36,92	35,12	36,89	36,31
31	36,67	31,35	36,19	34,74
32	68,15	67,87	67,16	67,73
33	65,19	64,83	66,66	65,56
34	100,32	103,23	100,88	101,48
35	36,51	39,57	36,67	37,58
36	92,69	92,39	93,90	92,99
37	93,16	94,63	93,09	93,63
38	63,12	64,05	63,68	63,62
39	64,25	64,93	64,29	64,49
40	80,75	81,05	80,30	80,70
41	78,72	78,87	79,67	79,09
42	48,31	47,51	47,42	47,75
43	46,47	44,50	46,95	45,97
44	28,48	30,22	30,04	29,58

45	29,95	31,25	30,27	30,49
46	29,19	27,81	30,87	29,29
47	29,32	33,72	31,02	31,35
48	49,10	49,98	49,34	49,47
49	50,43	53,04	50,84	51,44
50	33,83	34,25	31,79	33,29
51	30,22	30,65	30,41	30,43
52	40,15	41,89	40,25	40,76
53	38,37	42,55	40,33	40,42
54	66,56	68,35	66,92	67,28
55	67,72	67,63	67,86	67,74
56	53,90	54,74	54,14	54,26
57	37,58	38,91	38,28	38,26
58	53,87	52,24	52,60	52,90
59	36,21	37,63	37,09	36,98
60	77,85	77,18	76,07	77,03
61	68,33	68,63	67,97	68,31
62	76,24	76,99	74,29	75,84
63	67,93	66,95	66,98	67,29
64	76,32	78,28	77,37	77,32
65	77,97	77,60	77,71	77,76
66	122,77	120,52	119,15	120,81
67	122,40	122,63	122,89	122,64
68	136,23	139,40	138,55	138,06
69	137,51	136,52	136,08	136,70
70	129,27	131,19	130,36	130,27
71	130,39	131,93	133,78	132,03
72	132,69	130,75	130,03	131,16
73	132,17	132,42	131,43	132,01
74	103,92	105,63	105,28	104,94
75	104,84	105,10	105,21	105,05
76	107,78	109,16	109,22	108,72
77	109,08	107,49	106,31	107,63
78	87,10	88,87	87,26	87,74
79	89,62	88,62	87,79	88,68
80	128,63	130,12	130,03	129,59
81	129,46	129,85	128,02	129,11
82	140,88	140,52	140,87	140,76
83	141,20	139,76	140,45	140,47
84	126,55	126,25	125,29	126,03
85	126,14	123,74	126,87	125,58
86	126,07	125,21	126,19	125,82
87	125,32	128,88	125,67	126,62
88	106,55	105,96	106,96	106,49
89	105,76	105,02	104,35	105,04
90	103,66	103,96	104,34	103,99
91	104,05	103,38	105,63	104,35

Tabelle 34: Messergebnisse der digitalen Gesichtsvermessung mit IRESTRA; Untersucher 3

Strecke	1. Durchlauf	2. Durchlauf	3. Durchlauf	Mittelwert der Distanzen
1	13,25	13,64	13,19	13,36
2	46,60	46,83	47,43	46,95
3	26,14	26,69	28,93	27,25
4	47,34	46,29	47,08	46,90
5	60,98	61,67	60,75	61,13
6	78,37	79,52	78,31	78,73
7	124,13	124,95	123,95	124,34
8	66,34	64,53	64,27	65,05
9	106,14	107,07	106,40	106,54
10	59,88	60,99	59,07	59,98
11	62,79	62,23	60,13	61,72
12	33,04	35,56	34,73	34,44
13	36,26	37,42	34,07	35,92
14	54,48	54,43	55,55	54,82
15	54,36	51,19	52,05	52,53
16	24,61	23,99	24,48	24,36
17	23,12	25,14	25,81	24,69
18	52,77	52,71	50,79	52,09
19	50,89	50,72	51,63	51,08
20	78,46	78,45	77,09	78,00
21	76,02	73,06	76,87	75,32
22	82,10	82,35	82,77	82,41
23	82,19	82,66	81,35	82,07
24	64,24	64,35	65,82	64,80
25	64,53	66,06	65,96	65,52
26	101,06	103,79	100,40	101,75
27	101,66	101,37	99,99	101,01
28	111,17	111,99	109,61	110,92
29	110,35	111,39	111,78	111,17
30	38,37	37,38	37,28	37,68
31	36,83	36,54	36,88	36,75
32	68,03	67,35	67,74	67,71
33	68,88	69,01	68,66	68,85
34	99,32	100,14	99,88	99,78
35	34,23	34,82	33,04	34,03
36	93,95	93,34	94,14	93,81
37	94,19	96,42	94,36	94,99
38	63,85	65,01	63,54	64,13
39	64,46	65,16	64,47	64,70
40	78,77	76,82	78,99	78,19
41	77,75	77,51	77,21	77,49
42	47,29	46,07	47,61	46,99
43	47,98	45,78	47,34	47,03
44	28,15	27,68	28,31	28,05

45	30,19	32,06	30,58	30,94
46	31,44	27,95	30,34	29,91
47	30,39	32,58	29,12	30,70
48	49,31	50,84	50,65	50,27
49	50,34	51,10	50,51	50,65
50	30,46	28,46	30,52	29,81
51	31,91	33,37	30,66	31,98
52	41,17	41,87	40,54	41,19
53	38,82	39,27	38,26	38,78
54	66,86	67,36	67,00	67,07
55	68,19	66,40	66,41	67,00
56	54,81	56,68	54,66	55,38
57	38,24	41,63	38,82	39,56
58	50,01	50,23	51,01	50,42
59	39,05	39,72	37,27	38,68
60	75,69	75,94	74,59	75,41
61	68,34	68,02	67,44	67,93
62	74,95	73,43	74,97	74,45
63	69,79	68,00	68,06	68,62
64	78,14	79,28	78,81	78,74
65	79,81	79,61	79,60	79,67
66	122,57	125,12	123,14	123,61
67	123,06	123,68	124,72	123,82
68	134,16	133,29	133,57	133,67
69	135,73	136,06	133,28	135,02
70	127,61	127,83	128,80	128,08
71	126,64	126,41	128,73	127,26
72	130,48	130,59	131,34	130,80
73	130,33	129,12	130,76	130,07
74	103,23	105,38	106,52	105,04
75	105,11	107,95	105,92	106,33
76	105,91	107,86	105,74	106,50
77	105,27	105,71	106,14	105,71
78	86,30	86,47	88,01	86,93
79	85,25	88,23	87,07	86,85
80	130,26	130,77	128,84	129,96
81	130,71	130,29	127,76	129,59
82	142,40	142,69	140,94	142,01
83	139,37	140,07	139,15	139,53
84	126,77	126,22	127,19	126,73
85	125,72	125,31	125,37	125,47
86	126,86	126,10	127,11	126,69
87	127,13	128,49	128,08	127,90
88	105,67	106,88	105,15	105,90
89	105,66	105,01	103,84	104,84
90	104,09	103,43	104,73	104,08
91	103,95	103,28	103,67	103,63

Tabelle 35: Ermittlung des Gesamtmittelwertes der digitalen Messwerte IRESTRA

Strecke	Mittelwert der Distanzen Untersucher 1	Mittelwert der Distanzen Untersucher 2	Mittelwert der Distanzen Untersucher 3	Gesamtmittelwert der manuellen Messungen
1	12,86	13,09	13,36	13,10
2	47,33	45,63	46,95	46,64
3	26,48	26,96	27,25	26,90
4	48,18	47,03	46,90	47,37
5	60,84	59,95	61,13	60,64
6	80,24	80,06	78,73	79,68
7	123,28	120,80	124,34	122,81
8	67,91	67,01	65,05	66,66
9	105,30	107,34	106,54	106,39
10	59,92	60,38	59,98	60,09
11	61,13	60,04	61,72	60,96
12	33,33	35,48	34,44	34,42
13	34,02	35,69	35,92	35,21
14	55,88	55,04	54,82	55,25
15	53,92	55,22	52,53	53,89
16	22,93	24,01	24,36	23,77
17	24,28	24,24	24,69	24,40
18	50,88	52,27	52,09	51,75
19	50,57	49,64	51,08	50,43
20	78,19	76,54	78,00	77,58
21	76,76	77,08	75,32	76,39
22	82,14	83,71	82,41	82,75
23	84,07	84,83	82,07	83,66
24	65,16	63,98	64,80	64,65
25	64,90	65,22	65,52	65,21
26	100,40	101,66	101,75	101,27
27	99,80	100,22	101,01	100,34
28	110,28	111,25	110,92	110,82
29	110,25	110,12	111,17	110,51
30	36,63	36,31	37,68	36,87
31	35,83	34,74	36,75	35,77
32	67,78	67,73	67,71	67,74
33	66,45	65,56	68,85	66,95
34	98,79	101,48	99,78	100,02
35	34,36	37,58	34,03	35,32
36	93,20	92,99	93,81	93,33
37	94,03	93,63	94,99	94,22
38	62,33	63,62	64,13	63,36
39	62,39	64,49	64,70	63,86
40	77,83	80,70	78,19	78,91
41	79,58	79,09	77,49	78,72
42	47,87	47,75	46,99	47,54
43	46,40	45,97	47,03	46,47

44	30,97	29,58	28,05	29,53
45	31,14	30,49	30,94	30,86
46	30,55	29,29	29,91	29,92
47	31,83	31,35	30,70	31,29
48	49,71	49,47	50,27	49,82
49	51,10	51,44	50,65	51,06
50	29,44	33,29	29,81	30,85
51	31,78	30,43	31,98	31,40
52	39,58	40,76	41,19	40,51
53	40,11	40,42	38,78	39,77
54	69,36	67,28	67,07	67,90
55	67,65	67,74	67,00	67,46
56	52,86	54,26	55,38	54,17
57	38,36	38,26	39,56	38,73
58	51,03	52,90	50,42	51,45
59	36,53	36,98	38,68	37,40
60	76,36	77,03	75,41	76,27
61	67,83	68,31	67,93	68,02
62	73,78	75,84	74,45	74,69
63	67,36	67,29	68,62	67,76
64	77,92	77,32	78,74	77,99
65	77,85	77,76	79,67	78,43
66	120,60	120,81	123,61	121,67
67	117,71	122,64	123,82	121,39
68	136,35	138,06	133,67	136,03
69	137,76	136,70	135,02	136,49
70	126,89	130,27	128,08	128,41
71	126,99	132,03	127,26	128,76
72	130,82	131,16	130,80	130,93
73	129,92	132,01	130,07	130,67
74	105,88	104,94	105,04	105,29
75	105,66	105,05	106,33	105,68
76	106,81	108,72	106,50	107,34
77	107,22	107,63	105,71	106,85
78	89,48	87,74	86,93	88,05
79	87,89	88,68	86,85	87,81
80	129,91	129,59	129,96	129,82
81	130,45	129,11	129,59	129,72
82	137,41	140,76	142,01	140,06
83	138,88	140,47	139,53	139,63
84	125,09	126,03	126,73	125,95
85	124,96	125,58	125,47	125,34
86	124,62	125,82	126,69	125,71
87	125,89	126,62	127,90	126,80
88	107,38	106,49	105,90	106,59
89	106,24	105,04	104,84	105,37
90	105,26	103,99	104,08	104,44
91	104,30	104,35	103,63	104,09

Tabelle 36: Messergebnisse der digitalen Gesichtsvermessung mit Regard 3D; Untersucher 1

Strecke	1. Durchlauf	2. Durchlauf	3. Durchlauf	Mittelwert der Distanzen
1	20,94	21,60	21,70	21,41
2	46,12	46,13	45,55	45,93
3	30,31	31,32	31,03	30,89
4	44,54	45,83	45,69	45,35
5	63,47	63,74	64,61	63,94
6	84,01	83,98	83,47	83,82
7	120,62	121,49	121,05	121,05
8	65,27	64,16	64,40	64,61
9	100,86	101,92	100,43	101,07
10	66,09	66,99	67,49	66,86
11	61,01	60,71	61,31	61,01
12	33,25	33,42	32,80	33,16
13	29,02	28,77	69,66	42,48
14	55,35	56,78	55,55	55,89
15	55,84	55,23	55,11	55,39
16	23,14	22,46	23,57	23,06
17	23,42	23,16	24,87	23,82
18	54,46	54,18	53,18	53,94
19	51,60	50,59	51,16	51,12
20	77,28	76,16	77,67	77,04
21	74,45	73,69	74,85	74,33
22	81,62	82,80	81,07	81,83
23	84,07	84,94	83,66	84,22
24	68,09	67,74	68,93	68,25
25	71,97	71,32	70,56	71,28
26	100,15	100,82	101,20	100,72
27	101,66	102,24	99,73	101,21
28	118,44	118,81	117,43	118,23
29	118,14	118,41	119,89	118,81
30	39,67	41,00	41,13	40,60
31	40,09	42,14	41,39	41,21
32	66,97	67,20	66,46	66,88
33	66,06	68,23	67,91	67,40
34	109,91	109,59	108,58	109,36
35	29,26	28,32	28,01	28,53
36	90,24	89,75	89,82	89,94
37	90,77	89,85	90,30	90,31
38	55,17	56,30	56,68	56,05
39	58,78	59,73	58,02	58,84
40	73,63	73,59	73,57	73,60
41	78,52	77,98	77,57	78,02
42	45,84	45,09	46,23	45,72
43	49,14	48,26	48,84	48,75
44	26,56	28,77	28,93	28,09

45	30,43	31,92	30,48	30,94
46	31,91	33,25	31,92	32,36
47	37,19	36,35	37,72	37,09
48	51,89	50,31	50,40	50,87
49	50,83	50,80	51,42	51,02
50	30,72	30,25	31,35	30,77
51	37,65	36,76	37,95	37,45
52	48,10	49,75	49,99	49,28
53	48,94	48,35	49,06	48,78
54	69,11	70,32	69,92	69,78
55	71,29	76,84	71,60	73,24
56	54,75	54,93	55,41	55,03
57	37,20	36,93	36,64	36,92
58	51,63	52,79	52,42	52,28
59	35,61	34,33	34,63	34,86
60	78,14	78,75	77,02	77,97
61	67,95	67,32	67,22	67,50
62	74,94	74,99	74,65	74,86
63	70,59	71,91	70,05	70,85
64	87,02	86,81	86,35	86,73
65	74,46	75,93	74,98	75,12
66	130,73	130,23	129,12	130,03
67	123,65	123,09	124,85	123,86
68	144,94	145,03	144,92	144,96
69	115,52	115,10	114,90	115,17
70	135,65	134,29	135,64	135,19
71	130,58	129,01	130,24	129,94
72	141,45	140,53	140,38	140,79
73	130,47	129,77	129,82	130,02
74	111,50	110,94	111,79	111,41
75	108,66	107,13	107,26	107,68
76	113,76	114,27	113,04	113,69
77	108,79	107,44	107,03	107,75
78	100,98	99,84	100,24	100,35
79	89,46	88,92	89,28	89,22
80	137,70	136,73	136,50	136,98
81	135,31	134,31	134,06	134,56
82	141,11	141,79	142,27	141,72
83	139,92	140,41	139,29	139,87
84	131,70	131,03	131,25	131,33
85	125,74	125,61	126,92	126,09
86	133,78	132,41	133,40	133,20
87	129,20	128,67	128,96	128,94
88	111,65	111,56	109,51	110,91
89	106,93	106,03	105,55	106,17
90	102,03	107,88	107,05	105,65
91	0,70	102,90	102,39	68,66

Tabelle 37: Messergebnisse der digitalen Gesichtsvermessung mit Regard 3D; Untersucher 2

Strecke	1. Durchlauf	2. Durchlauf	3. Durchlauf	Mittelwert der Distanzen
1	18,21	18,67	19,21	18,70
2	46,56	46,23	47,64	46,81
3	30,11	30,54	29,38	30,01
4	45,66	44,87	45,48	45,34
5	63,94	64,10	64,99	64,34
6	84,84	83,69	84,82	84,45
7	121,69	120,18	120,61	120,83
8	65,10	66,11	65,55	65,59
9	100,17	101,14	100,20	100,50
10	67,78	66,56	66,04	66,79
11	60,69	61,77	59,28	60,58
12	33,38	31,20	31,73	32,10
13	29,31	29,25	29,62	29,39
14	56,44	56,54	56,05	56,34
15	55,46	55,67	55,31	55,48
16	23,59	24,44	24,60	24,21
17	23,65	22,99	22,26	22,97
18	53,98	53,30	53,55	53,67
19	51,57	52,88	51,14	51,86
20	77,15	77,27	77,01	77,14
21	74,28	75,90	75,37	75,18
22	81,11	82,86	82,55	82,17
23	85,03	85,35	84,89	85,09
24	68,68	68,82	68,65	68,72
25	70,58	70,46	71,78	70,94
26	99,20	99,05	98,56	98,94
27	100,08	99,19	99,64	99,64
28	117,78	117,89	118,45	118,04
29	116,22	116,64	117,66	116,84
30	40,51	40,27	40,94	40,57
31	40,72	41,58	41,48	41,26
32	67,73	68,20	67,62	67,85
33	66,49	67,86	67,77	67,37
34	108,75	108,59	107,98	108,44
35	29,72	29,98	28,22	29,31
36	90,89	89,89	89,54	90,11
37	90,62	90,73	90,48	90,61
38	54,22	54,99	54,55	54,59
39	58,35	58,19	58,94	58,49
40	73,42	74,55	74,19	74,05
41	77,34	76,19	76,52	76,68
42	46,91	46,09	46,52	46,51
43	50,86	50,76	49,88	50,50
44	27,94	27,97	27,18	27,70

45	29,52	30,09	29,01	29,54
46	31,21	31,94	32,90	32,02
47	31,78	31,37	31,47	31,54
48	50,29	49,13	49,96	49,79
49	50,00	50,67	51,22	50,63
50	32,55	31,51	31,40	31,82
51	37,68	37,30	37,87	37,62
52	49,74	49,28	48,84	49,29
53	49,22	49,88	48,81	49,30
54	70,69	70,09	71,91	70,90
55	71,19	70,32	69,17	70,23
56	55,16	55,59	53,81	54,85
57	37,23	36,43	37,48	37,05
58	53,20	53,22	53,64	53,35
59	36,75	36,87	35,27	36,30
60	79,45	78,07	78,68	78,73
61	66,11	66,98	66,18	66,42
62	75,72	75,60	74,28	75,20
63	69,51	69,20	69,46	69,39
64	87,65	87,04	86,08	86,92
65	74,64	75,34	74,16	74,71
66	128,17	129,50	128,69	128,79
67	124,73	124,77	124,71	124,74
68	146,31	145,37	146,11	145,93
69	115,14	113,31	113,42	113,96
70	136,69	135,81	135,20	135,90
71	130,99	130,96	129,09	130,35
72	140,68	139,98	139,69	140,12
73	129,95	130,93	130,99	130,62
74	109,79	110,99	110,42	110,40
75	110,58	109,49	109,41	109,83
76	113,33	112,13	113,05	112,84
77	106,23	107,92	107,96	107,37
78	100,79	100,72	100,98	100,83
79	89,94	89,74	88,11	89,26
80	135,65	136,38	136,53	136,19
81	135,60	136,43	135,44	135,82
82	140,96	139,60	139,58	140,05
83	139,35	140,41	140,28	140,01
84	132,12	131,31	132,07	131,83
85	125,95	125,51	126,87	126,11
86	133,26	132,48	133,24	132,99
87	129,98	128,55	129,49	129,34
88	110,04	110,67	109,47	110,06
89	106,95	106,91	105,20	106,35
90	105,46	103,08	105,75	104,76
91	106,40	106,90	103,37	105,56

Tabelle 38: Messergebnisse der digitalen Gesichtsvermessung mit Regard 3D; Untersucher 3

Strecke	1. Durchlauf	2. Durchlauf	3. Durchlauf	Mittelwert der Distanzen
1	19,82	19,71	19,75	19,76
2	45,40	46,49	45,44	45,78
3	29,09	28,50	29,09	28,89
4	44,57	44,24	45,72	44,84
5	64,37	64,80	64,46	64,54
6	84,10	84,13	83,29	83,84
7	120,98	120,58	119,38	120,31
8	66,09	67,51	66,54	66,71
9	100,46	98,34	100,22	99,67
10	67,84	66,22	67,64	67,23
11	59,00	59,78	60,63	59,80
12	30,68	31,03	31,00	30,90
13	30,14	31,55	30,06	30,58
14	57,85	56,57	56,94	57,12
15	55,40	55,99	56,81	56,07
16	24,07	23,11	23,92	23,70
17	22,06	22,96	22,79	22,60
18	54,83	53,12	54,82	54,26
19	52,23	53,05	52,75	52,68
20	76,86	77,59	77,94	77,46
21	75,27	75,48	75,55	75,43
22	81,88	81,18	81,78	81,61
23	85,93	84,73	85,25	85,30
24	69,88	68,53	68,43	68,95
25	69,65	70,08	70,87	70,20
26	100,60	99,20	100,97	100,26
27	99,47	100,99	100,77	100,41
28	116,73	117,91	115,87	116,84
29	113,46	114,29	113,20	113,65
30	40,74	40,10	40,63	40,49
31	39,55	40,03	40,55	40,04
32	67,36	68,44	68,25	68,02
33	67,83	67,14	66,72	67,23
34	107,16	107,67	108,82	107,88
35	107,85	107,96	106,68	107,50
36	89,54	89,82	89,62	89,66
37	90,67	88,11	89,27	89,35
38	55,14	54,33	54,62	54,70
39	58,73	59,67	58,63	59,01
40	72,49	72,49	73,78	72,92
41	77,80	77,50	77,95	77,75
42	45,08	46,65	46,71	46,15
43	51,12	51,54	51,05	51,24
44	28,79	27,74	28,29	28,27

45	30,80	30,14	30,54	30,49
46	31,06	30,17	31,21	30,81
47	36,41	37,82	37,53	37,25
48	37,50	37,33	38,56	37,80
49	50,49	50,16	50,98	50,54
50	30,87	31,35	31,92	31,38
51	36,39	36,39	36,57	36,45
52	49,55	49,95	49,43	49,64
53	48,41	47,82	47,33	47,85
54	69,67	69,40	69,71	69,59
55	70,64	69,01	70,96	70,20
56	54,85	54,52	54,45	54,61
57	37,17	36,11	37,25	36,84
58	53,91	53,88	52,41	53,40
59	34,63	34,56	34,19	34,46
60	77,26	76,97	76,29	76,84
61	67,29	68,98	67,02	67,76
62	74,34	75,03	75,70	75,02
63	69,90	69,18	69,56	69,55
64	87,76	87,51	86,73	87,33
65	76,89	76,75	75,94	76,53
66	129,40	129,51	129,44	129,45
67	124,18	124,78	124,78	124,58
68	143,10	144,19	144,67	143,99
69	115,13	114,28	115,13	114,85
70	136,51	136,33	135,33	136,06
71	128,46	129,28	128,44	128,73
72	139,86	140,16	140,19	140,07
73	130,95	130,85	130,05	130,62
74	109,21	110,41	110,24	109,95
75	108,08	108,50	107,58	108,05
76	113,88	112,66	113,34	113,29
77	108,26	108,23	107,59	108,03
78	99,50	100,80	99,49	99,93
79	88,24	89,62	90,35	89,40
80	137,85	137,84	135,77	137,15
81	135,73	134,55	135,68	135,32
82	140,42	140,04	140,76	140,41
83	139,71	140,49	140,39	140,20
84	130,84	130,89	130,78	130,84
85	124,76	124,51	125,11	124,79
86	133,18	132,77	133,66	133,20
87	128,95	128,72	127,35	128,34
88	110,58	110,75	107,16	109,50
89	106,81	107,22	106,01	106,68
90	105,15	104,49	104,87	104,84
91	105,25	103,54	103,08	103,96

Tabelle 39: Ermittlung des Gesamtmittelwertes der digitalen Messwerte Regard 3D

Strecke	Mittelwert der Distanzen Untersucher 1	Mittelwert der Distanzen Untersucher 2	Mittelwert der Distanzen Untersucher 3	Gesamtmittelwert der manuellen Messungen
1	21,41	18,70	19,76	19,96
2	45,93	46,81	45,78	46,17
3	30,89	30,01	28,89	29,93
4	45,35	45,34	44,84	45,18
5	63,94	64,34	64,54	64,27
6	83,82	84,45	83,84	84,04
7	121,05	120,83	120,31	120,73
8	64,61	65,59	66,71	65,64
9	101,07	100,50	99,67	100,41
10	66,86	66,79	67,23	66,96
11	61,01	60,58	59,80	60,46
12	33,16	32,10	30,90	32,05
13	42,48	29,39	30,58	34,15
14	55,89	56,34	57,12	56,45
15	55,39	55,48	56,07	55,65
16	23,06	24,21	23,70	23,66
17	23,82	22,97	22,60	23,13
18	53,94	53,67	54,26	53,96
19	51,12	51,86	52,68	51,89
20	77,04	77,14	77,46	77,21
21	74,33	75,18	75,43	74,98
22	81,83	82,17	81,61	81,87
23	84,22	85,09	85,30	84,87
24	68,25	68,72	68,95	68,64
25	71,28	70,94	70,20	70,81
26	100,72	98,94	100,26	99,97
27	101,21	99,64	100,41	100,42
28	118,23	118,04	116,84	117,70
29	118,81	116,84	113,65	116,43
30	40,60	40,57	40,49	40,55
31	41,21	41,26	40,04	40,84
32	66,88	67,85	68,02	67,58
33	67,40	67,37	67,23	67,33
34	109,36	108,44	107,88	108,56
35	28,53	29,31	107,50	55,11
36	89,94	90,11	89,66	89,90
37	90,31	90,61	89,35	90,09
38	56,05	54,59	54,70	55,11
39	58,84	58,49	59,01	58,78
40	73,60	74,05	72,92	73,52
41	78,02	76,68	77,75	77,48
42	45,72	46,51	46,15	46,13
43	48,75	50,50	51,24	50,16

44	28,09	27,70	28,27	28,02
45	30,94	29,54	30,49	30,32
46	32,36	32,02	30,81	31,73
47	37,09	31,54	37,25	35,29
48	50,87	49,79	37,80	46,15
49	51,02	50,63	50,54	50,73
50	30,77	31,82	31,38	31,32
51	37,45	37,62	36,45	37,17
52	49,28	49,29	49,64	49,40
53	48,78	49,30	47,85	48,64
54	69,78	70,90	69,59	70,09
55	73,24	70,23	70,20	71,22
56	55,03	54,85	54,61	54,83
57	36,92	37,05	36,84	36,94
58	52,28	53,35	53,40	53,01
59	34,86	36,30	34,46	35,21
60	77,97	78,73	76,84	77,85
61	67,50	66,42	67,76	67,23
62	74,86	75,20	75,02	75,03
63	70,85	69,39	69,55	69,93
64	86,73	86,92	87,33	86,99
65	75,12	74,71	76,53	75,45
66	130,03	128,79	129,45	129,42
67	123,86	124,74	124,58	124,39
68	144,96	145,93	143,99	144,96
69	115,17	113,96	114,85	114,66
70	135,19	135,90	136,06	135,72
71	129,94	130,35	128,73	129,67
72	140,79	140,12	140,07	140,33
73	130,02	130,62	130,62	130,42
74	111,41	110,40	109,95	110,59
75	107,68	109,83	108,05	108,52
76	113,69	112,84	113,29	113,27
77	107,75	107,37	108,03	107,72
78	100,35	100,83	99,93	100,37
79	89,22	89,26	89,40	89,29
80	136,98	136,19	137,15	136,77
81	134,56	135,82	135,32	135,23
82	141,72	140,05	140,41	140,73
83	139,87	140,01	140,20	140,03
84	131,33	131,83	130,84	131,33
85	126,09	126,11	124,79	125,66
86	133,20	132,99	133,20	133,13
87	128,94	129,34	128,34	128,87
88	110,91	110,06	109,50	110,16
89	106,17	106,35	106,68	106,40
90	105,65	104,76	104,84	105,08
91	68,66	105,56	103,96	92,73

Tabelle 40: Messergebnisse der digitalen Gesichtsvermessung mit Agisoft Photoscan; Untersucher 1

Strecke	1. Durchlauf	2. Durchlauf	3. Durchlauf	Mittelwert der Distanzen
1	14,89	13,55	14,06	14,17
2	46,10	47,23	47,87	47,07
3	26,26	27,93	26,99	27,06
4	50,31	50,55	48,83	49,90
5	60,22	60,13	60,53	60,29
6	77,98	76,12	76,10	76,73
7	123,28	124,09	123,53	123,63
8	63,69	63,04	63,80	63,51
9	111,49	110,82	110,76	111,02
10	68,78	68,80	68,24	68,61
11	63,05	63,74	62,28	63,02
12	36,45	34,42	34,71	35,19
13	31,70	32,87	31,31	31,96
14	65,01	65,66	65,84	65,50
15	64,94	63,86	64,90	64,57
16	27,86	27,95	27,57	27,79
17	27,66	28,71	28,54	28,30
18	59,00	59,02	61,85	59,96
19	61,11	64,81	61,17	62,36
20	83,48	84,36	84,83	84,22
21	85,65	84,75	85,73	85,38
22	92,73	92,50	93,37	92,87
23	83,66	84,05	84,43	84,05
24	69,07	69,10	69,56	69,24
25	70,64	71,84	70,92	71,13
26	111,27	111,54	110,73	111,18
27	110,37	109,80	110,41	110,19
28	125,27	126,71	125,44	125,81
29	125,87	123,16	123,45	124,16
30	45,68	45,02	45,63	45,44
31	36,33	35,70	36,04	36,02
32	70,86	70,05	71,76	70,89
33	72,02	71,71	71,54	71,76
34	108,98	107,35	108,37	108,23
35	37,10	36,07	36,39	36,52
36	98,42	98,46	97,13	98,00
37	98,04	97,76	98,52	98,11
38	64,72	64,64	63,11	64,16
39	64,18	64,49	65,82	64,83
40	82,77	82,61	81,70	82,36
41	82,83	81,12	82,66	82,20
42	48,43	47,97	48,42	48,27
43	49,92	49,36	49,00	49,43
44	31,69	32,49	31,56	31,91

45	33,41	33,19	33,81	33,47
46	34,81	33,91	34,88	34,53
47	29,45	29,62	29,08	29,38
48	50,90	51,43	50,33	50,89
49	59,60	60,48	59,01	59,70
50	33,59	33,85	34,43	33,96
51	38,97	39,00	39,35	39,11
52	43,27	42,31	43,17	42,92
53	40,50	40,12	41,07	40,56
54	70,18	70,89	69,05	70,04
55	69,66	68,18	68,64	68,83
56	59,59	58,65	58,45	58,90
57	46,92	47,56	47,51	47,33
58	55,77	54,16	54,12	54,68
59	43,21	44,91	43,66	43,93
60	80,39	81,50	80,68	80,86
61	76,49	76,92	76,37	76,59
62	78,38	76,77	78,29	77,81
63	78,14	77,08	78,71	77,98
64	83,26	82,04	83,82	83,04
65	80,48	82,58	81,78	81,61
66	126,05	126,89	125,85	126,26
67	126,44	127,84	126,20	126,83
68	136,87	136,75	136,11	136,58
69	136,74	135,24	136,13	136,04
70	120,51	120,63	119,50	120,21
71	119,52	121,45	120,66	120,54
72	131,24	131,10	131,61	131,32
73	129,93	131,09	132,72	131,25
74	101,14	102,50	101,44	101,69
75	101,12	102,25	103,39	102,25
76	110,36	109,72	109,45	109,84
77	111,94	110,46	107,49	109,96
78	96,26	96,39	98,92	97,19
79	96,03	97,03	96,17	96,41
80	126,68	126,63	126,51	126,61
81	127,43	127,62	126,47	127,17
82	141,17	141,22	142,35	141,58
83	141,39	142,16	141,04	141,53
84	119,72	118,99	118,63	119,11
85	117,59	118,58	119,83	118,67
86	119,82	118,67	121,93	120,14
87	120,77	119,34	120,95	120,35
88	105,56	105,29	106,44	105,76
89	107,51	106,73	110,63	108,29
90	106,24	103,69	104,01	104,65
91	105,89	105,55	105,06	105,50

Tabelle 41: Messergebnisse der digitalen Gesichtsvermessung mit Agisoft Photoscan; Untersucher 2

Strecke	1. Durchlauf	2. Durchlauf	3. Durchlauf	Mittelwert der Distanzen
1	14,69	14,60	14,74	14,68
2	47,12	47,61	48,39	47,71
3	27,50	27,29	28,92	27,90
4	50,09	51,86	51,73	51,23
5	60,92	61,24	60,67	60,94
6	75,30	76,96	75,65	75,97
7	123,77	123,80	122,01	123,19
8	63,91	64,47	63,88	64,09
9	110,13	109,79	110,31	110,08
10	68,04	69,03	68,36	68,48
11	62,12	61,61	62,31	62,01
12	35,57	36,28	35,74	35,86
13	32,17	33,78	33,23	33,06
14	65,74	65,72	65,03	65,50
15	61,33	62,07	62,94	62,11
16	28,40	28,08	27,81	28,10
17	28,80	28,76	28,48	28,68
18	61,25	61,89	60,99	61,38
19	61,47	62,52	61,49	61,83
20	85,57	86,81	85,41	85,93
21	85,18	86,37	85,46	85,67
22	91,94	90,56	91,21	91,24
23	84,56	85,53	85,78	85,29
24	70,54	71,86	71,61	71,34
25	70,50	70,60	69,18	70,09
26	112,72	111,28	111,59	111,86
27	110,28	109,97	109,81	110,02
28	126,72	126,94	125,07	126,24
29	125,34	125,59	124,55	125,16
30	45,96	45,95	45,49	45,80
31	36,18	37,84	36,30	36,77
32	71,55	70,21	70,46	70,74
33	70,04	71,37	71,25	70,89
34	109,54	108,36	109,91	109,27
35	108,40	108,30	107,26	107,99
36	99,66	98,53	98,59	98,93
37	98,64	98,57	97,42	98,21
38	65,11	65,69	65,18	65,33
39	65,73	65,27	64,68	65,23
40	82,36	82,28	83,40	82,68
41	82,24	82,26	82,59	82,36
42	50,13	50,67	49,37	50,06
43	49,05	50,29	49,79	49,71
44	33,13	32,59	33,35	33,02

45	34,49	33,89	33,08	33,82
46	34,06	34,68	34,15	34,30
47	30,99	29,76	29,70	30,15
48	50,14	50,43	50,25	50,27
49	60,31	59,37	60,23	59,97
50	34,49	33,71	33,35	33,85
51	38,23	38,78	39,86	38,96
52	43,15	44,04	43,72	43,64
53	40,88	41,40	40,40	40,89
54	70,45	70,70	69,93	70,36
55	69,42	70,66	69,33	69,80
56	59,71	59,58	59,01	59,43
57	47,15	48,65	48,59	48,13
58	56,37	55,56	55,32	55,75
59	45,64	45,01	44,33	44,99
60	80,67	80,27	80,87	80,60
61	77,95	77,14	76,26	77,12
62	78,78	78,47	77,96	78,40
63	77,64	78,24	78,95	78,28
64	83,20	83,48	83,66	83,45
65	82,34	83,49	83,51	83,11
66	127,85	127,13	127,19	127,39
67	126,22	126,15	125,04	125,80
68	135,20	134,37	135,51	135,03
69	135,07	135,96	136,29	135,77
70	121,09	119,06	120,13	120,09
71	119,03	121,08	120,75	120,29
72	130,35	129,35	130,98	130,23
73	129,32	130,45	131,80	130,52
74	103,90	102,60	102,76	103,09
75	102,74	104,76	101,72	103,07
76	111,94	111,33	110,44	111,24
77	108,43	107,23	108,11	107,92
78	98,42	98,86	97,18	98,15
79	98,70	97,61	98,59	98,30
80	127,09	127,10	126,13	126,77
81	127,82	128,76	126,21	127,60
82	138,38	139,03	139,97	139,13
83	139,68	140,24	139,78	139,90
84	118,66	119,62	118,73	119,00
85	117,26	118,99	117,00	117,75
86	120,60	121,20	120,45	120,75
87	119,18	120,56	119,44	119,73
88	106,13	106,12	105,38	105,87
89	105,57	106,69	103,10	105,12
90	105,03	105,94	104,56	105,18
91	106,30	106,98	105,46	106,25

Tabelle 42: Messergebnisse der digitalen Gesichtsvermessung mit Agisoft; Untersucher 3

Strecke	1. Durchlauf	2. Durchlauf	3. Durchlauf	Mittelwert der Distanzen
1	14,22	13,48	14,26	13,99
2	46,56	46,09	47,27	46,64
3	26,56	26,70	25,16	26,14
4	51,16	50,04	50,79	50,66
5	61,31	60,70	60,74	60,92
6	76,59	76,37	76,87	76,61
7	125,24	124,21	125,27	124,91
8	64,35	64,19	63,76	64,10
9	110,23	110,20	109,04	109,82
10	69,13	68,13	68,57	68,61
11	64,92	64,99	63,10	64,34
12	35,13	35,04	35,26	35,14
13	31,04	31,63	31,57	31,41
14	66,20	66,87	65,32	66,13
15	63,28	63,11	63,59	63,33
16	26,42	26,82	26,25	26,50
17	29,99	28,13	28,64	28,92
18	60,03	61,41	59,29	60,24
19	64,18	63,66	63,58	63,81
20	84,91	83,69	84,75	84,45
21	86,02	85,62	85,87	85,84
22	93,40	93,74	94,82	93,99
23	84,59	84,88	84,64	84,70
24	70,09	70,89	71,00	70,66
25	71,63	70,54	71,53	71,23
26	109,27	110,38	109,84	109,83
27	109,41	109,98	111,39	110,26
28	126,69	125,86	126,09	126,21
29	127,98	125,51	123,67	125,72
30	45,74	45,70	46,41	45,95
31	37,58	37,46	36,15	37,06
32	71,60	71,37	70,46	71,14
33	71,83	72,11	71,85	71,93
34	106,68	106,54	107,45	106,89
35	37,91	36,42	37,73	37,35
36	100,84	99,78	99,80	100,14
37	99,85	98,07	98,00	98,64
38	65,02	64,01	65,73	64,92
39	65,11	65,69	66,08	65,63
40	80,09	80,03	81,10	80,41
41	82,22	80,10	81,02	81,11
42	49,57	48,69	48,84	49,03
43	49,40	50,15	49,23	49,59
44	30,52	31,20	31,85	31,19

45	33,99	33,29	32,80	33,36
46	34,08	33,64	34,14	33,95
47	30,89	30,94	31,58	31,14
48	49,28	49,29	50,75	49,77
49	59,93	58,16	58,02	58,70
50	35,54	35,84	34,67	35,35
51	39,71	39,43	39,90	39,68
52	41,73	41,04	42,33	41,70
53	40,98	40,29	41,09	40,79
54	70,21	70,71	71,17	70,70
55	69,33	70,91	70,32	70,19
56	57,82	57,85	58,93	58,20
57	48,21	48,64	48,64	48,50
58	53,62	53,58	54,35	53,85
59	45,83	45,62	43,27	44,91
60	82,71	81,96	82,96	82,54
61	77,75	77,55	78,29	77,86
62	78,37	78,80	77,30	78,16
63	79,21	80,31	80,22	79,91
64	80,35	80,74	81,85	80,98
65	81,60	82,52	82,41	82,18
66	125,66	125,33	125,76	125,58
67	126,08	127,52	126,28	126,63
68	134,11	134,93	135,67	134,90
69	134,03	136,71	136,86	135,87
70	119,77	119,55	120,67	120,00
71	119,12	122,05	122,21	121,13
72	130,03	129,59	130,81	130,14
73	131,46	131,82	131,26	131,51
74	100,44	99,49	100,47	100,13
75	101,62	100,88	98,87	100,46
76	110,29	110,72	111,57	110,86
77	109,02	109,17	109,72	109,30
78	98,47	98,41	97,59	98,16
79	97,99	97,86	96,99	97,61
80	123,45	124,85	123,24	123,85
81	122,97	122,15	123,67	122,93
82	143,28	142,47	142,79	142,85
83	141,60	141,10	142,81	141,84
84	116,53	115,51	116,40	116,15
85	118,43	118,97	119,80	119,07
86	119,34	120,95	120,46	120,25
87	120,17	120,25	121,21	120,54
88	107,68	106,56	107,85	107,36
89	107,08	108,99	108,79	108,29
90	103,72	104,13	103,09	103,65
91	104,01	104,62	105,99	104,87

Tabelle 43: Ermittlung des Gesamtmittelwertes der digitalen Messwerte Agisoft Photoscan

Strecke	Mittelwert der Distanzen Untersucher 1	Mittelwert der Distanzen Untersucher 2	Mittelwert der Distanzen Untersucher 3	Gesamtmittelwert der manuellen Messungen
1	14,17	14,68	13,99	14,28
2	47,07	47,71	46,64	47,14
3	27,06	27,90	26,14	27,03
4	49,90	51,23	50,66	50,60
5	60,29	60,94	60,92	60,72
6	76,73	75,97	76,61	76,44
7	123,63	123,19	124,91	123,91
8	63,51	64,09	64,10	63,90
9	111,02	110,08	109,82	110,31
10	68,61	68,48	68,61	68,57
11	63,02	62,01	64,34	63,12
12	35,19	35,86	35,14	35,40
13	31,96	33,06	31,41	32,14
14	65,50	65,50	66,13	65,71
15	64,57	62,11	63,33	63,34
16	27,79	28,10	26,50	27,46
17	28,30	28,68	28,92	28,63
18	59,96	61,38	60,24	60,53
19	62,36	61,83	63,81	62,67
20	84,22	85,93	84,45	84,87
21	85,38	85,67	85,84	85,63
22	92,87	91,24	93,99	92,70
23	84,05	85,29	84,70	84,68
24	69,24	71,34	70,66	70,41
25	71,13	70,09	71,23	70,82
26	111,18	111,86	109,83	110,96
27	110,19	110,02	110,26	110,16
28	125,81	126,24	126,21	126,09
29	124,16	125,16	125,72	125,01
30	45,44	45,80	45,95	45,73
31	36,02	36,77	37,06	36,62
32	70,89	70,74	71,14	70,92
33	71,76	70,89	71,93	71,53
34	108,23	109,27	106,89	108,13
35	36,52	107,99	37,35	60,62
36	98,00	98,93	100,14	99,02
37	98,11	98,21	98,64	98,32
38	64,16	65,33	64,92	64,80
39	64,83	65,23	65,63	65,23
40	82,36	82,68	80,41	81,82
41	82,20	82,36	81,11	81,89
42	48,27	50,06	49,03	49,12
43	49,43	49,71	49,59	49,58

44	31,91	33,02	31,19	32,04
45	33,47	33,82	33,36	33,55
46	34,53	34,30	33,95	34,26
47	29,38	30,15	31,14	30,22
48	50,89	50,27	49,77	50,31
49	59,70	59,97	58,70	59,46
50	33,96	33,85	35,35	34,39
51	39,11	38,96	39,68	39,25
52	42,92	43,64	41,70	42,75
53	40,56	40,89	40,79	40,75
54	70,04	70,36	70,70	70,37
55	68,83	69,80	70,19	69,61
56	58,90	59,43	58,20	58,84
57	47,33	48,13	48,50	47,99
58	54,68	55,75	53,85	54,76
59	43,93	44,99	44,91	44,61
60	80,86	80,60	82,54	81,33
61	76,59	77,12	77,86	77,19
62	77,81	78,40	78,16	78,12
63	77,98	78,28	79,91	78,72
64	83,04	83,45	80,98	82,49
65	81,61	83,11	82,18	82,30
66	126,26	127,39	125,58	126,41
67	126,83	125,80	126,63	126,42
68	136,58	135,03	134,90	135,50
69	136,04	135,77	135,87	135,89
70	120,21	120,09	120,00	120,10
71	120,54	120,29	121,13	120,65
72	131,32	130,23	130,14	130,56
73	131,25	130,52	131,51	131,09
74	101,69	103,09	100,13	101,64
75	102,25	103,07	100,46	101,93
76	109,84	111,24	110,86	110,65
77	109,96	107,92	109,30	109,06
78	97,19	98,15	98,16	97,83
79	96,41	98,30	97,61	97,44
80	126,61	126,77	123,85	125,74
81	127,17	127,60	122,93	125,90
82	141,58	139,13	142,85	141,19
83	141,53	139,90	141,84	141,09
84	119,11	119,00	116,15	118,09
85	118,67	117,75	119,07	118,50
86	120,14	120,75	120,25	120,38
87	120,35	119,73	120,54	120,21
88	105,76	105,87	107,36	106,33
89	108,29	105,12	108,29	107,23
90	104,65	105,18	103,65	104,49
91	105,50	106,25	104,87	105,54

Tabelle 44: Messergebnisse der digitalen Gesichtsvermessung mit Stereophotogrammetrie; Untersucher 1

Strecke	1. Durchlauf	2. Durchlauf	3. Durchlauf	Mittelwert der Distanzen
1	13,16	16,61	13,14	14,30
2	46,59	48,95	49,05	48,20
3	27,85	29,37	26,87	28,03
4	44,21	44,35	46,13	44,90
5	57,87	58,99	57,38	58,08
6	79,03	81,38	82,24	80,88
7	123,41	123,21	122,76	123,13
8	67,46	68,26	65,46	67,06
9	110,33	110,86	107,41	109,53
10	65,82	61,66	58,36	61,95
11	63,88	63,19	62,44	63,17
12	29,05	32,59	30,43	30,69
13	34,69	34,72	33,37	34,26
14	57,36	57,99	55,77	57,04
15	56,13	56,95	56,31	56,46
16	25,10	24,25	25,41	24,92
17	24,33	26,96	25,88	25,72
18	60,79	57,08	56,17	58,01
19	56,06	57,21	57,21	56,83
20	81,85	80,85	79,79	80,83
21	75,11	81,46	79,05	78,54
22	85,20	87,16	84,42	85,59
23	87,69	87,95	86,44	87,36
24	63,58	68,36	65,06	65,67
25	66,65	69,11	69,48	68,41
26	101,13	105,82	107,94	104,96
27	99,55	104,37	103,25	102,39
28	119,24	119,85	114,95	118,01
29	118,35	118,35	112,14	116,28
30	33,48	33,25	33,03	33,25
31	34,58	32,96	33,05	33,53
32	65,87	71,49	66,85	68,07
33	69,05	68,98	64,51	67,51
34	98,41	100,56	96,63	98,53
35	36,88	37,27	33,21	35,79
36	93,06	93,54	92,18	92,93
37	92,18	93,21	94,43	93,27
38	60,86	61,17	63,90	61,98
39	60,87	59,65	61,81	60,78
40	78,92	82,29	80,15	80,45
41	79,36	80,97	79,05	79,79
42	48,80	48,75	47,39	48,31
43	48,56	48,36	47,54	48,15

44	35,27	34,09	30,57	33,31
45	32,95	33,73	31,37	32,68
46	29,96	31,57	30,50	30,68
47	30,49	33,42	32,04	31,98
48	52,81	56,59	54,87	54,76
49	49,54	55,12	56,78	53,81
50	30,70	28,35	30,10	29,72
51	31,61	34,5	32,04	32,72
52	39,14	45,50	45,60	43,41
53	46,82	42,02	41,25	43,36
54	66,06	70,19	68,27	68,17
55	69,00	67,13	65,84	67,32
56	55,45	56,62	55,68	55,92
57	38,57	41,19	38,58	39,45
58	61,66	60,29	58,47	60,14
59	40,45	40,75	38,22	39,81
60	76,08	78,42	76,65	77,05
61	72,99	71,22	68,96	71,06
62	76,90	79,38	79,69	78,66
63	70,88	71,39	67,74	70,00
64	85,34	85,60	86,78	85,91
65	77,19	76,57	77,57	77,11
66	132,86	132,12	130,00	131,66
67	125,49	125,22	125,02	125,24
68	140,26	143,88	143,24	142,46
69	140,15	141,67	139,10	140,31
70	130,36	132,82	128,63	130,60
71	120,74	129,06	129,40	126,40
72	137,17	138,66	140,91	138,91
73	140,50	139,69	138,19	139,46
74	109,29	111,83	111,67	110,93
75	107,41	109,06	110,45	108,97
76	112,02	113,86	113,65	113,18
77	114,35	110,79	117,06	114,07
78	93,92	93,46	90,52	92,63
79	90,91	90,21	91,03	90,72
80	136,42	134,72	129,89	133,68
81	134,78	137,31	136,77	136,29
82	143,74	143,38	146,36	144,49
83	145,06	144,93	148,14	146,04
84	130,76	130,99	129,39	130,38
85	128,18	130,69	130,84	129,90
86	128,06	128,92	127,61	128,20
87	129,97	135,19	133,20	132,79
88	110,90	110,86	111,00	110,92
89	108,56	113,27	115,85	112,56
90	105,77	104,68	105,19	105,21
91	106,99	107,54	104,31	106,28

Tabelle 45: Messergebnisse der digitalen Gesichtsvermessung mit Stereophotogrammetrie; Untersucher 2

Strecke	1. Durchlauf	2. Durchlauf	3. Durchlauf	Mittelwert der Distanzen
1	13,37	16,60	14,10	14,69
2	50,69	51,08	48,87	50,21
3	29,35	30,95	29,24	29,85
4	47,09	45,53	45,52	46,05
5	60,25	61,52	60,47	60,75
6	83,02	81,74	80,76	81,84
7	123,25	124,99	123,89	124,04
8	69,93	67,89	68,88	68,90
9	108,66	111,53	110,45	110,21
10	64,15	64,31	65,63	64,70
11	63,10	64,53	63,28	63,64
12	29,41	28,83	31,03	29,76
13	34,38	36,53	34,38	35,10
14	58,02	57,06	56,91	57,33
15	57,23	57,04	56,33	56,87
16	26,61	26,78	25,76	26,38
17	27,36	25,60	27,46	26,81
18	61,66	58,36	60,33	60,12
19	56,43	58,16	56,68	57,09
20	80,94	77,92	78,56	79,14
21	76,93	79,28	78,38	78,20
22	89,09	89,04	86,26	88,13
23	87,61	88,06	87,22	87,63
24	68,57	70,32	68,07	68,99
25	69,14	69,46	69,66	69,42
26	107,50	104,86	105,45	105,94
27	103,53	98,48	105,08	102,36
28	110,58	120,46	119,84	116,96
29	119,71	114,32	119,36	117,80
30	33,90	31,98	30,25	32,04
31	33,01	34,18	33,98	33,72
32	67,53	71,87	66,83	68,74
33	69,36	65,35	68,21	67,64
34	95,99	99,09	98,96	98,01
35	34,91	37,83	37,94	36,89
36	98,89	98,46	97,63	98,33
37	90,29	92,51	91,74	91,51
38	63,70	62,72	62,49	62,97
39	61,47	61,30	63,34	62,04
40	79,55	79,93	78,60	79,36
41	79,49	79,25	77,81	78,85
42	46,93	48,87	47,73	47,84
43	48,15	48,35	48,54	48,35

44	34,71	35,19	35,98	35,29
45	32,86	33,25	33,43	33,18
46	33,37	34,69	33,94	34,00
47	34,35	34,25	30,24	32,95
48	31,37	33,36	33,48	32,74
49	56,06	56,09	55,84	56,00
50	30,60	35,43	31,18	32,40
51	30,87	31,65	30,16	30,89
52	44,19	41,86	40,53	42,19
53	41,93	40,39	45,98	42,77
54	68,64	68,86	69,41	68,97
55	68,98	69,74	69,66	69,46
56	55,58	55,53	57,61	56,24
57	40,10	40,56	39,84	40,17
58	58,72	60,78	60,66	60,05
59	40,34	38,37	37,33	38,68
60	73,04	76,23	77,94	75,74
61	71,27	71,96	70,71	71,31
62	80,33	79,02	77,79	79,05
63	68,05	70,64	70,56	69,75
64	86,49	86,01	86,88	86,46
65	77,57	77,42	76,45	77,15
66	128,72	127,89	130,24	128,95
67	127,07	131,92	125,97	128,32
68	143,21	142,14	146,77	144,04
69	141,82	140,77	141,42	141,34
70	132,46	134,82	132,35	133,21
71	131,82	130,52	129,92	130,75
72	136,43	139,94	139,69	138,69
73	140,20	140,28	138,49	139,66
74	109,49	110,59	111,84	110,64
75	108,56	108,19	109,31	108,69
76	108,47	109,19	111,48	109,71
77	107,01	111,59	113,83	110,81
78	95,55	95,39	93,38	94,77
79	90,37	89,90	90,06	90,11
80	136,76	137,24	136,88	136,96
81	136,97	138,38	138,84	138,06
82	143,12	143,74	142,47	143,11
83	145,62	146,03	146,25	145,97
84	130,78	126,67	125,02	127,49
85	130,22	129,24	130,94	130,13
86	127,21	127,77	127,75	127,58
87	127,74	130,26	133,57	130,52
88	111,31	110,88	111,14	111,11
89	114,98	113,05	109,22	112,42
90	105,53	104,03	105,43	104,99
91	108,60	110,04	110,54	109,73

Tabelle 46: Messergebnisse der digitalen Gesichtsvermessung mit Stereophotogrammetrie; Untersucher 3

Strecke	1. Durchlauf	2. Durchlauf	3. Durchlauf	Mittelwert der Distanzen
1	14,02	14,73	14,66	14,47
2	49,66	49,12	48,99	49,26
3	31,93	30,25	30,29	30,82
4	45,64	44,01	45,33	44,99
5	58,76	60,17	57,69	58,87
6	78,58	84,23	81,48	81,43
7	122,04	125,98	123,83	123,95
8	70,43	69,70	67,86	69,33
9	110,30	111,93	108,17	110,13
10	66,46	66,19	64,75	65,80
11	61,99	64,75	62,78	63,17
12	34,70	35,52	33,77	34,66
13	33,99	34,31	29,90	32,73
14	58,42	57,26	56,50	57,39
15	58,38	58,02	59,46	58,62
16	27,36	25,70	25,36	26,14
17	26,37	26,28	24,70	25,78
18	56,28	58,35	58,65	57,76
19	57,09	58,70	56,16	57,32
20	76,35	79,36	79,17	78,29
21	80,65	81,22	77,90	79,92
22	85,19	88,17	86,35	86,57
23	87,85	88,82	89,90	88,86
24	67,39	69,67	68,91	68,66
25	66,16	69,91	69,11	68,39
26	104,31	106,98	104,98	105,42
27	106,94	105,74	104,28	105,65
28	120,84	120,12	118,83	119,93
29	114,25	117,24	118,41	116,63
30	33,31	36,15	35,73	35,06
31	36,19	33,15	34,86	34,73
32	70,00	69,91	69,60	69,84
33	68,82	70,94	69,34	69,70
34	100,36	101,55	100,77	100,89
35	36,80	38,65	36,35	37,27
36	99,33	99,36	97,11	98,60
37	98,59	96,15	96,38	97,04
38	63,26	61,86	60,13	61,75
39	60,32	63,07	61,51	61,63
40	80,53	81,41	79,62	80,52
41	78,25	82,65	75,60	78,83
42	47,85	48,29	48,93	48,36
43	46,81	48,87	48,89	48,19

44	29,20	31,83	30,44	30,49
45	35,57	34,29	31,38	33,75
46	35,67	34,32	32,97	34,32
47	32,65	34,22	30,44	32,44
48	55,05	55,05	51,01	53,70
49	54,17	57,42	55,24	55,61
50	35,77	33,35	30,67	33,26
51	31,51	34,63	36,21	34,12
52	33,43	29,00	34,67	32,37
53	41,86	36,12	38,99	38,99
54	64,56	64,19	66,17	64,97
55	63,08	64,43	63,29	63,60
56	59,14	59,46	60,83	59,81
57	38,55	37,72	40,13	38,80
58	59,88	59,60	60,77	60,08
59	44,76	43,19	40,43	42,79
60	70,04	61,04	69,38	66,82
61	65,33	70,10	65,96	67,13
62	78,37	78,58	78,43	78,46
63	71,11	71,45	70,44	71,00
64	79,72	78,61	78,10	78,81
65	73,20	71,94	74,52	73,22
66	121,32	117,33	114,42	117,69
67	123,58	118,54	119,69	120,60
68	129,87	128,72	130,52	129,70
69	134,12	127,75	135,50	132,46
70	128,82	129,67	134,79	131,09
71	131,98	130,45	135,51	132,65
72	130,90	134,13	129,83	131,62
73	130,09	130,72	135,50	132,10
74	104,28	104,94	110,72	106,65
75	109,87	106,96	104,37	107,07
76	108,29	111,67	109,71	109,89
77	111,51	109,67	107,32	109,50
78	87,24	80,81	85,50	84,52
79	81,15	86,44	86,49	84,69
80	136,66	129,57	137,71	134,65
81	130,02	131,29	130,69	130,67
82	135,56	138,41	139,68	137,88
83	137,59	137,41	137,39	137,46
84	130,12	128,51	127,63	128,75
85	127,85	127,30	131,44	128,86
86	126,14	128,49	130,23	128,29
87	126,33	128,90	127,77	127,67
88	111,44	106,10	110,95	109,50
89	105,68	107,54	109,03	107,42
90	110,37	111,07	111,90	111,11
91	111,38	113,92	112,02	112,44

Tabelle 47: Ermittlung des Gesamtmittelwertes der digitalen Messwerte Stereophotogrammetrie

Strecke	Mittelwert der Distanzen Untersucher 1	Mittelwert der Distanzen Untersucher 2	Mittelwert der Distanzen Untersucher 3	Gesamtmittelwert der manuellen Messungen
1	14,30	14,69	14,47	14,49
2	48,20	50,21	49,26	49,22
3	28,03	29,85	30,82	29,57
4	44,90	46,05	44,99	45,31
5	58,08	60,75	58,87	59,23
6	80,88	81,84	81,43	81,38
7	123,13	124,04	123,95	123,71
8	67,06	68,90	69,33	68,43
9	109,53	110,21	110,13	109,96
10	61,95	64,70	65,80	64,15
11	63,17	63,64	63,17	63,33
12	30,69	29,76	34,66	31,70
13	34,26	35,10	32,73	34,03
14	57,04	57,33	57,39	57,25
15	56,46	56,87	58,62	57,32
16	24,92	26,38	26,14	25,81
17	25,72	26,81	25,78	26,10
18	58,01	60,12	57,76	58,63
19	56,83	57,09	57,32	57,08
20	80,83	79,14	78,29	79,42
21	78,54	78,20	79,92	78,89
22	85,59	88,13	86,57	86,76
23	87,36	87,63	88,86	87,95
24	65,67	68,99	68,66	67,77
25	68,41	69,42	68,39	68,74
26	104,96	105,94	105,42	105,44
27	102,39	102,36	105,65	103,47
28	118,01	116,96	119,93	118,30
29	116,28	117,80	116,63	116,90
30	33,25	32,04	35,06	33,45
31	33,53	33,72	34,73	33,99
32	68,07	68,74	69,84	68,88
33	67,51	67,64	69,70	68,28
34	98,53	98,01	100,89	99,14
35	35,79	36,89	37,27	36,65
36	92,93	98,33	98,60	96,62
37	93,27	91,51	97,04	93,94
38	61,98	62,97	61,75	62,23
39	60,78	62,04	61,63	61,48
40	80,45	79,36	80,52	80,11
41	79,79	78,85	78,83	79,16
42	48,31	47,84	48,36	48,17
43	48,15	48,35	48,19	48,23

44	33,31	35,29	30,49	33,03
45	32,68	33,18	33,75	33,20
46	30,68	34,00	34,32	33,00
47	31,98	32,95	32,44	32,46
48	54,76	32,74	53,70	47,07
49	53,81	56,00	55,61	55,14
50	29,72	32,40	33,26	31,79
51	32,72	30,89	34,12	32,58
52	43,41	42,19	32,37	39,32
53	43,36	42,77	38,99	41,71
54	68,17	68,97	64,97	67,37
55	67,32	69,46	63,60	66,79
56	55,92	56,24	59,81	57,32
57	39,45	40,17	38,80	39,47
58	60,14	60,05	60,08	60,09
59	39,81	38,68	42,79	40,43
60	77,05	75,74	66,82	73,20
61	71,06	71,31	67,13	69,83
62	78,66	79,05	78,46	78,72
63	70,00	69,75	71,00	70,25
64	85,91	86,46	78,81	83,73
65	77,11	77,15	73,22	75,83
66	131,66	128,95	117,69	126,10
67	125,24	128,32	120,60	124,72
68	142,46	144,04	129,70	138,73
69	140,31	141,34	132,46	138,04
70	130,60	133,21	131,09	131,63
71	126,40	130,75	132,65	129,93
72	138,91	138,69	131,62	136,41
73	139,46	139,66	132,10	137,07
74	110,93	110,64	106,65	109,41
75	108,97	108,69	107,07	108,24
76	113,18	109,71	109,89	110,93
77	114,07	110,81	109,50	111,46
78	92,63	94,77	84,52	90,64
79	90,72	90,11	84,69	88,51
80	133,68	136,96	134,65	135,10
81	136,29	138,06	130,67	135,01
82	144,49	143,11	137,88	141,83
83	146,04	145,97	137,46	143,16
84	130,38	127,49	128,75	128,87
85	129,90	130,13	128,86	129,63
86	128,20	127,58	128,29	128,02
87	132,79	130,52	127,67	130,33
88	110,92	111,11	109,50	110,51
89	112,56	112,42	107,42	110,80
90	105,21	104,99	111,11	107,10
91	106,28	109,73	112,44	109,48

Tabelle 48: Messergebnisse der digitalen Gesichtsvermessung Davidlaserscanner; Untersucher 1

Strecke	1. Durchlauf	2. Durchlauf	3. Durchlauf	Mittelwert der Distanzen
1	14,95	15,28	15,45	15,23
2	51,01	51,07	50,74	50,94
3	27,49	28,87	27,48	27,95
4	48,60	46,71	48,34	47,88
5	58,40	58,79	58,77	58,65
6	76,72	78,99	79,71	78,47
7	123,01	123,19	124,86	123,69
8	67,26	67,91	67,41	67,53
9	110,61	110,12	111,73	110,82
10	69,21	65,34	66,74	67,10
11	60,98	63,09	63,66	62,58
12	31,25	31,70	31,69	31,55
13	31,07	31,48	30,47	31,01
14	63,08	63,94	65,22	64,08
15	64,41	65,77	64,83	65,00
16	25,17	25,12	24,25	24,85
17	25,67	24,98	25,77	25,47
18	60,38	58,52	58,82	59,24
19	59,32	59,92	58,39	59,21
20	83,02	83,42	84,46	83,63
21	84,70	84,34	83,98	84,34
22	90,80	92,84	90,87	91,50
23	87,52	88,33	88,75	88,20
24	69,98	69,05	66,36	68,46
25	68,20	71,42	68,76	69,46
26	106,73	111,38	110,31	109,47
27	109,48	109,72	109,40	109,53
28	122,49	123,46	125,62	123,86
29	121,61	120,86	122,14	121,54
30	42,32	42,51	40,28	41,70
31	38,51	39,40	38,90	38,94
32	70,76	72,37	69,32	70,82
33	71,14	73,38	69,52	71,35
34	111,52	109,06	107,10	109,23
35	37,95	36,12	34,55	36,21
36	91,50	97,84	96,99	95,44
37	97,36	95,79	96,83	96,66
38	60,47	61,71	60,92	61,03
39	64,02	64,41	63,98	64,14
40	84,28	85,37	85,54	85,06
41	84,39	84,85	83,78	84,34
42	48,74	49,64	46,26	48,21
43	49,91	49,65	48,49	49,35
44	35,41	35,55	33,74	34,90

45	33,83	34,06	33,52	33,80
46	35,05	33,13	31,52	33,23
47	32,46	29,93	30,16	30,85
48	48,19	51,77	50,21	50,06
49	58,42	57,64	52,72	56,26
50	31,48	35,55	33,24	33,42
51	38,24	37,20	38,82	38,09
52	42,70	42,70	40,48	41,96
53	38,99	40,03	38,64	39,22
54	72,72	72,57	69,32	71,54
55	69,39	69,99	68,37	69,25
56	56,70	56,58	55,72	56,33
57	46,47	46,50	46,45	46,47
58	54,50	54,84	53,06	54,13
59	39,06	43,77	44,08	42,30
60	80,51	81,19	78,62	80,11
61	75,91	75,76	76,90	76,19
62	79,49	79,29	74,09	77,62
63	77,73	77,55	47,68	67,65
64				
65				
66				
67				
68				
69				
70				
71				
72				
73				
74				
75				
76				
77				
78				
79				
80				
81				
82				
83				
84				
85				
86				
87				
88				
89				
90				
91				

Tabelle 49: Messergebnisse der digitalen Gesichtsvermessung Davidlaserscanner; Untersucher 2

Strecke	1. Durchlauf	2. Durchlauf	3. Durchlauf	Mittelwert der Distanzen
1	14,88	14,45	14,76	14,70
2	51,69	50,79	50,77	51,08
3	31,51	31,18	28,81	30,50
4	48,44	46,24	48,59	47,76
5	60,70	60,90	58,30	59,97
6	78,10	30,91	78,64	62,55
7	123,19	124,47	123,17	123,61
8	66,72	67,30	67,41	67,14
9	110,31	108,76	109,83	109,63
10	66,34	67,48	65,38	66,40
11	65,47	65,48	65,91	65,62
12	33,40	34,10	34,27	33,92
13	33,12	32,35	33,08	32,85
14	60,56	60,57	61,67	60,93
15	60,84	56,19	59,77	58,93
16	26,07	26,58	25,21	25,95
17	26,34	25,03	26,15	25,84
18	59,54	56,39	57,87	57,93
19	59,38	59,29	60,58	59,75
20	81,02	81,17	83,79	81,99
21	84,75	83,09	84,90	84,25
22	89,37	89,19	90,57	89,71
23	84,21	84,94	85,25	84,80
24	70,99	70,74	69,09	70,27
25	71,50	72,22	70,02	71,25
26	110,73	108,24	110,30	109,76
27	112,91	111,23	111,42	111,85
28	119,52	119,61	117,09	118,74
29	120,82	118,28	120,30	119,80
30	39,90	39,76	40,21	39,96
31	35,61	35,95	37,17	36,24
32	75,57	74,41	75,55	75,18
33	74,17	72,00	74,47	73,55
34	109,46	107,64	109,32	108,81
35	37,07	35,61	36,46	36,38
36	97,26	94,02	96,15	95,81
37	94,16	97,53	96,36	96,02
38	60,52	59,02	60,11	59,88
39	62,56	62,00	61,62	62,06
40	85,65	95,09	83,16	87,97
41	84,21	85,88	84,12	84,74
42	48,42	47,90	48,20	48,17
43	50,07	51,74	50,82	50,88
44	35,43	35,27	36,33	35,68

45	33,68	34,57	33,96	34,07
46	34,14	32,42	35,65	34,07
47	33,34	33,56	32,92	33,27
48	53,26	57,83	56,71	55,93
49	58,11	58,86	58,12	58,36
50	27,03	27,41	28,88	27,77
51	36,54	36,74	36,60	36,63
52	41,75	41,16	40,69	41,20
53	38,58	39,61	38,81	39,00
54	71,52	71,10	70,02	70,88
55	68,06	68,94	68,24	68,41
56	56,01	57,78	57,65	57,15
57	45,60	45,94	45,49	45,68
58	53,53	53,34	52,22	53,03
59	40,21	43,18	40,48	41,29
60	81,72	82,97	82,46	82,38
61	76,31	75,25	75,31	75,62
62	81,89	81,18	80,56	81,21
63	80,68	79,43	78,65	79,59
64				
65				
66				
67				
68				
69				
70				
71				
72				
73				
74				
75				
76				
77				
78				
79				
80				
81				
82				
83				
84				
85				
86				
87				
88				
89				
90				
91				

Tabelle 50: Messergebnisse der digitalen Gesichtsvermessung Davidlaserscanner; Untersucher 3

Strecke	1. Durchlauf	2. Durchlauf	3. Durchlauf	Mittelwert der Distanzen
1	13,15	15,38	13,74	14,09
2	49,94	49,42	47,26	48,87
3	28,15	29,50	26,01	27,89
4	48,36	48,23	48,19	48,26
5	60,56	59,30	59,76	59,87
6	81,34	78,69	80,64	80,22
7	125,73	125,65	126,91	126,10
8	64,65	64,93	64,30	64,63
9	111,25	112,73	111,47	111,82
10	66,28	62,17	63,95	64,13
11	63,25	64,50	63,27	63,67
12	32,98	31,55	31,48	32,00
13	31,06	31,73	32,56	31,78
14	60,98	60,76	60,84	60,86
15	61,62	60,56	58,93	60,37
16	23,31	23,53	25,99	24,28
17	25,08	27,74	25,70	26,17
18	63,62	58,49	59,16	60,42
19	59,15	60,44	60,59	60,06
20	85,53	85,41	83,60	84,85
21	75,13	77,53	77,72	76,79
22	92,04	92,95	90,36	91,78
23	84,30	86,92	87,74	86,32
24	72,82	70,24	69,32	70,79
25	69,12	70,82	71,26	70,40
26	112,21	112,57	111,32	112,03
27	108,47	110,66	109,96	109,70
28	123,15	123,18	122,23	122,85
29	119,56	120,68	122,38	120,87
30	44,53	44,94	43,75	44,41
31	37,61	37,93	38,52	38,02
32	70,06	71,82	70,07	70,65
33	72,73	75,04	71,59	73,12
34	113,90	114,24	111,35	113,16
35	39,40	34,18	36,93	36,84
36	90,68	92,98	93,40	92,35
37	96,31	96,88	97,44	96,88
38	61,55	61,03	60,92	61,17
39	63,53	63,83	61,91	63,09
40	81,93	80,17	84,98	82,36
41	84,89	85,06	82,62	84,19
42	48,47	48,29	48,82	48,53
43	48,95	48,13	49,29	48,79
44	29,58	28,84	29,83	29,42

45	33,42	34,21	33,36	33,66
46	32,08	29,14	31,49	30,90
47	30,33	33,55	31,88	31,92
48	51,43	51,30	49,19	50,64
49	58,42	57,98	58,11	58,17
50	32,90	32,76	32,94	32,87
51	37,03	36,15	36,48	36,55
52	42,43	43,21	42,92	42,85
53	43,04	42,71	42,34	42,70
54	70,95	71,18	70,53	70,89
55	69,48	69,95	69,87	69,77
56	58,36	60,41	57,20	58,66
57	46,13	46,26	46,36	46,25
58	53,78	53,27	54,30	53,78
59	40,05	43,95	39,46	41,15
60	81,84	81,24	80,28	81,12
61	78,89	78,41	76,82	78,04
62	77,13	77,21	78,90	77,75
63	79,04	80,74	79,25	79,68
64				
65				
66				
67				
68				
69				
70				
71				
72				
73				
74				
75				
76				
77				
78				
79				
80				
81				
82				
83				
84				
85				
86				
87				
88				
89				
90				
91				

Tabelle 51: Ermittlung des Gesamtmittelwertes der digitalen Messwerte Davidlaserscanner

Strecke	Mittelwert der Distanzen Untersucher 1	Mittelwert der Distanzen Untersucher 2	Mittelwert der Distanzen Untersucher 3	Gesamtmittelwert der manuellen Messungen
1	15,23	14,70	14,09	14,67
2	50,94	51,08	48,87	50,30
3	27,95	30,50	27,89	28,78
4	47,88	47,76	48,26	47,97
5	58,65	59,97	59,87	59,50
6	78,47	62,55	80,22	73,75
7	123,69	123,61	126,10	124,45
8	67,53	67,14	64,63	66,43
9	110,82	109,63	111,82	110,76
10	67,10	66,40	64,13	65,88
11	62,58	65,62	63,67	63,96
12	31,55	33,92	32,00	32,49
13	31,01	32,85	31,78	31,88
14	64,08	60,93	60,86	61,96
15	65,00	58,93	60,37	61,43
16	24,85	25,95	24,28	25,03
17	25,47	25,84	26,17	25,83
18	59,24	57,93	60,42	59,19
19	59,21	59,75	60,06	59,67
20	83,63	81,99	84,85	83,49
21	84,34	84,25	76,79	81,79
22	91,50	89,71	91,78	91,00
23	88,20	84,80	86,32	86,44
24	68,46	70,27	70,79	69,84
25	69,46	71,25	70,40	70,37
26	109,47	109,76	112,03	110,42
27	109,53	111,85	109,70	110,36
28	123,86	118,74	122,85	121,82
29	121,54	119,80	120,87	120,74
30	41,70	39,96	44,41	42,02
31	38,94	36,24	38,02	37,73
32	70,82	75,18	70,65	72,22
33	71,35	73,55	73,12	72,67
34	109,23	108,81	113,16	110,40
35	36,21	36,38	36,84	36,48
36	95,44	95,81	92,35	94,53
37	96,66	96,02	96,88	96,52
38	61,03	59,88	61,17	60,69
39	64,14	62,06	63,09	63,10
40	85,06	87,97	82,36	85,13
41	84,34	84,74	84,19	84,42
42	48,21	48,17	48,53	48,30
43	49,35	50,88	48,79	49,67

44	34,90	35,68	29,42	33,33
45	33,80	34,07	33,66	33,84
46	33,23	34,07	30,90	32,73
47	30,85	33,27	31,92	32,01
48	50,06	55,93	50,64	52,21
49	56,26	58,36	58,17	57,60
50	33,42	27,77	32,87	31,35
51	38,09	36,63	36,55	37,09
52	41,96	41,20	42,85	42,00
53	39,22	39,00	42,70	40,31
54	71,54	70,88	70,89	71,10
55	69,25	68,41	69,77	69,14
56	56,33	57,15	58,66	57,38
57	46,47	45,68	46,25	46,13
58	54,13	53,03	53,78	53,65
59	42,30	41,29	41,15	41,58
60	80,11	82,38	81,12	81,20
61	76,19	75,62	78,04	76,62
62	77,62	81,21	77,75	78,86
63	67,65	79,59	79,68	75,64
64				
65				
66				
67				
68				
69				
70				
71				
72				
73				
74				
75				
76				
77				
78				
79				
80				
81				
82				
83				
84				
85				
86				
87				
88				
89				
90				
91				