



BACHELORARBEIT

Frau
Marie-Luise Heym

Rekonstruktion des Griffgeschehens

2022



BACHELOR THESIS

Ms.
Marie-Luise Heym

Reconstruction of the grip movement

2022

BACHELORARBEIT

Rekonstruktion des Griffgeschehens

Autorin:

Marie-Luise Heym

Studiengang:

Allgemeine und Digitale Forensik

Seminargruppe:

FO19w3-B

Erstprüfer:

Prof. Dr. rer. nat. Dirk Labudde

Zweitprüfer:

B.Sc. Hanjo Tim Fritzscht

Mittweida, August 2022

Bibliografische Angaben

Heym, Marie-Luise: Rekonstruktion des Griffgeschehens, 75 Seiten, 46 Abbildungen, 15 Tabellen, Hochschule Mittweida, University of Applied Sciences, Fakultät Angewandte Computer- und Biowissenschaften

Bachelorarbeit, 2022

Referat

In dieser Bachelorarbeit wird sich mit der Frage beschäftigt ,Ob und inwieweit ist es möglich, das Griffgeschehen bzw. den Griff zu rekonstruieren?'. Um diese zu beantworten, wird sich mit der Anatomie der menschlichen Hand und deren Bewegungsmöglichkeiten auseinandergesetzt. Mit der Hand wird sich deshalb beschäftigt, da diese im Alltag eine wichtige Funktion besitzt und Spuren in Form von Abdrücken auf Objekten hinterlässt. Aufgrund dieser Spuren werden in dieser Arbeit verschiedene Modelle der Hand, einer Vase als Beispiel Objekt und dem Griff um diesen erstellt. Des Weiteren wird sich mit der Erstellung einer bewegungsfähigen Hand in Blender beschäftigt, welche schlussendlich für die Rekonstruktion von zwei verschiedenen Griffen verwendet wird. Es stellt sich heraus, dass die Rekonstruktion von Griffen mit dieser Methode jedoch mit geringen Abweichungen möglich ist. Diese könnten vermindert bzw. verhindert werden, indem die Modelle weiter verbessert werden oder die Stichprobe der Griffen und Personen vergrößert wird.

I. Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung	2
1.3 Kapitelübersicht	2
2 Grundlagen	5
2.1 Anatomie der menschlichen Hand	5
2.2 Gelenke	6
2.2.1 Bewegungsrichtungen	8
2.2.2 Gelenke der Hand	10
Das Handgelenk	11
Die Fingergelenke	13
Die Daumengelenke	14
2.3 Muskeln	15
2.4 Messungen der Bewegungen	16
2.5 Greifarten	17
2.5.1 Statische Griffe	18
2.5.2 Weitere Griffarten	20
2.6 Beeinträchtigungen in der Bewegung	21
2.7 Photogrammetrie	22
2.8 3D-Scanner	23
3 Material und Methoden	25
3.1 Materialien	25
3.2 Methoden	27

3.2.1	Handvermessung	27
3.2.2	Aufnahmen mittels Scanner und Photogrammetrie	29
3.2.3	Modelle in Blender	33
4	Ergebnisse	39
4.1	Entstandene Modelle	39
4.2	Wrap und Blender Ergebnisse	43
5	Diskussion.....	49
6	Fazit und Ausblick.....	55
	Literaturverzeichnis	57
A	Vorgehen bei den Aufnahmen des Scans und der Photogrammetrie	61
B	Ergebnisse der Handvermessungen.....	63
C	Zusätzliche Abbildungen zur Gegenüberstellung der Rekonstruktion des Griffs	69

II. Abbildungsverzeichnis

2.1	Äußere Erscheinung der Hand [Nag74]	5
2.2	Schematischer Aufbau von Diarthrosen [Til10]	7
2.3	Gelenktypen und deren Bewegungsachsen [Til10]	8
2.4	Rechtes Handskelett mit eigenen Einzeichnungen der Gelenke [Til10]	11
2.5	Beispiele für Fingergriffe	19
2.6	Beispiel für einen Handflächengriff mit Daumen	20
2.7	Beispiele für weitere Griffarten	21
2.8	CC-Tag Typ 3 als Referenzmaß bei der Datenverarbeitung	23
2.9	3D-Scanner Artec Leo [3Db]	24
3.1	Verwendete Vase mit Maßstab	25
3.2	Linke und rechte Hand der Autorin	27
3.3	Bildliche Veranschaulichung der Positionierung der 16 Messstrecken [Pan99]	29
3.4	Armband aus Papier mit unterschiedlichen Symbolen	30
3.5	Versuchsaufbau bei Scanner-Aufnahmen der Hand und des Griffs	30
3.6	Sichtbarmachung der Fingerabdrücke an der Vase mit Floureszenzpulver	31
3.7	Aufbau des Photogrammetrie Setups	32
3.8	Hand Modell und blaues Basemesh in Wrap	33
3.9	Aufbau des Node-Graphen in Wrap für das Wrapping und Verknüpfen der Textur	34
3.10	Positionierung der Armatures	35
3.11	Anwendung des Weight Paint	36
3.12	Einstellung der Bone Constraints Limit Rotation und Copy Rotation	37
3.13	Rekonstruierte Griffe	37
3.14	Überlagerung der Vasen in Blender	38
4.1	Modelle der Hand mit kompletten Aufnahmen der Hand	39
4.2	Modelle der Hand mit zwei Aufnahmen von vorn und hinten	40
4.3	Modelle der Vase mit sichtbaren Spuren des Griffs Normal	41
4.4	Modelle der Vase mit sichtbaren Spuren des Griffs Schlag	41

4.5	Modelle des Griffs Normal	42
4.6	Modelle des Griffs Schlag	42
4.7	Ergebnis des automatischen Wrappings mittels Wrap	43
4.8	Bewegungsmöglichkeiten des Handmodells am Beispiel des Zeigefingers in Blender	44
4.9	Rekonstruierter Griff Normal mit Modell des Griff Normal übereinander liegend	45
4.10	Hand der Autorin mit Markierung und Nummerierung der Messpunkte	45
4.11	Rekonstruierter Griff Schlag mit Modell des Griff Schlag übereinander liegend	47
5.1	Auswirkungen auf das Mesh des Handmodells bei Bewegung in Blender	50
A.1	Ablaufliste für die Aufnahmen mit dem Scanner und der Photogrammetrie	61
C.1	Rekonstruierter Griff Normal (in orange) mit Modell des Griffs Normal übereinander liegend mit zusätzlicher Markierung in Blender	69
C.2	Rekonstruierter Griff Schlag (in orange) mit Modell des Griffs Schlag übereinander liegend mit zusätzlicher Markierung in Blender	69
C.3	Nahaufnahme des Daumens von Griff Normal	70
C.4	Nahaufnahme des Zeige- und Mittelfingers von Griff Normal	70
C.5	Nahaufnahme des Ringfingers und kleinen Fingers von Griff Normal	71
C.6	Nahaufnahme des Daumens von Griff Schlag	71
C.7	Nahaufnahme des Zeigefingers von Griff Schlag	72
C.8	Nahaufnahme der Fingerspitze von Griff Schlag	72
C.9	Nahaufnahme der Position des Mittelfingers von Griff Schlag	73
C.10	Nahaufnahme des Ringfingers und kleinen Fingers von Griff Schlag	73

III. Tabellenverzeichnis

2.1 Bewegungsrichtungen der Gelenke [Kor07] [Str12]	9
2.2 Bewegungen und Bewegungsausmaße im Handgelenk aus verschiedenen Quellen [Til10] [Kor07] [Str12]	12
2.3 Bewegungen und Bewegungsausmaße in den Fingern aus verschiedenen Quellen [Til10] [Kor07] [Str12]	14
2.4 Bewegungen und Bewegungsausmaße der Daumengelenke [Str12].....	15
3.1 Abmessungen der verwendeten Vase in mm (Eigene Darstellung)	26
3.2 Verwendete Materialien (Eigene Darstellung)	26
3.3 Beschreibung der Messstrecken an der Hand (Eigene Darstellung)	28
4.1 Ergebnisse der Messungen von den Abweichungen der Messpunkte vom Griff Normal nach Zusammenführung beider Modelle in mm (Eigene Darstellung)	46
4.2 Ergebnisse der Messungen von den Abweichungen der Messpunkte vom Griff Schlag nach Zusammenführung beider Modelle in mm (Eigene Darstellung)	47
5.1 Mittelwerte der Abweichungen für die einzelnen Finger in mm (Eigene Darstellung) ...	51
5.2 Mittelwerte der Abweichungen für die einzelnen Punktgruppen der Gelenke in mm (Eigene Darstellung)	52
B.1 Ergebnisse der Messungen der Strecken der rechten und linken Hand in mm (Eigene Darstellung)	63
B.1 Ergebnisse der Messungen der Strecken der rechten und linken Hand in mm (Eigene Darstellung)	64
B.2 Ergebnisse der Messungen der Bewegungsumfänge der rechten Hand in Grad (Eigene Darstellung)	64
B.2 Ergebnisse der Messungen der Bewegungsumfänge der rechten Hand in Grad (Eigene Darstellung)	65
B.3 Abmessungen der Hand von Person A	66
B.4 Bewegungsausmaße der einzelnen Gelenke der rechten Hand von Person A.....	67

IV. Abkürzungsverzeichnis

3D	dreidimensional
HD	High Definition; hohe Auflösung bei Bildmaterial
ISO-Wert	Lichtempfindlichkeit von Kameras
KI	künstliche Intelligenz
MCP	Daumensattelgelenk
ROM	Range of Motion
TMC	Trapeziometakarpalgelenk

1 Einleitung

Die Hände des Menschen erfüllen im Alltag verschiedene Funktionen. So haben sie eine wahrnehmende Funktion zum Fühlen, die Arbeitsfunktion, indem sie als Werkzeug fungieren, eine gestaltende Funktion und eine Ausdrucksfunktion, zum Beispiel bei der Gebärdensprache [Pfe73]. Aufgrund dieser Vielfältigkeit sind die Hände Tag täglich im Einsatz und berühren somit die verschiedensten Objekte und Gegenstände. Ersichtlich wird dies beim Sichtbarmachen von Finger- und Handabdrücken, zum Beispiel bei der Tatortsicherung.

In vergangenen Arbeiten wurde sich bereits mit der Erstellung von 3D-Modellen und der Abbildung der Fingerabdrücke auf diesen beschäftigt. Dabei wurde sich jedoch auf die einzelnen Fingerspuren konzentriert und nicht auf Abdrücke der kompletten Finger oder gar der Hand. Zudem folgte die Auswertung der Spuren auf deren Merkmale, nicht aber wie die Finger auf dem Gegenstand positioniert sind und was dies bedeutet. Deshalb beschäftigt sich diese Bachelorarbeit mit der Lagebeziehung der einzelnen Spuren der Finger und der Hand zueinander, um den Griff, mit welchem ein Objekt berührt oder gehalten wurde, zu rekonstruieren und wieder zuerkennen.

1.1 Motivation

Mithilfe von 3D-Modellen ist es möglich, eine Vielzahl von Objekten darzustellen, um so einen Tatort rekonstruieren und Tatabläufe nachvollziehen zu können. Zudem können so auch Spuren zusammen mit ihren Lagebeziehungen zueinander und zum jeweiligen Objekt gesichert werden, indem sie fotogrammetrisch aufgenommen und im Nachhinein digitalisiert werden.

Vorstellbar wäre zum Beispiel ein Fall, indem Aussage gegen Aussage steht. Das Opfer besteht darauf, dass es mit einem Küchenmesser attackiert wurde, indem auf ihn eingestochen wurde. Der vermeintliche Täter allerdings sagt aus, es wäre ein Versehen gewesen. Er hatte sich beim Hantieren mit dem Küchenmesser umgedreht und so die andere Person verletzt. Bleiben die Abdrücke der Hand auf dem Griff des Messers zurück, könnte von diesem ein Modell erstellt und der Griff rekonstruiert werden. Diese Rekonstruktion liefert dann Auskünfte über die Position der Hand, wobei sich zudem Informationen zum Tathergang ableiten lassen. Andererseits wäre es auch vorstellbar, die Griffrekonstruktion zur Überprüfung zu verwenden. Zum Beispiel, ob die Spuren mit der beschriebenen Handlung einer Person übereinstimmen oder ob die Hand nicht in der Lage wahr, diese oder jene Bewegung zu vollziehen.

In dieser Arbeit soll der Gesichtspunkt der Rekonstruktion, welche eine Wiederherstel-

lung eines ursprünglichen Zustandes ist, betrachtet werden und nicht die Simulation oder Animation von Griffen [Dud]. Diese Begriffe sind dabei von dem der Rekonstruktion abzugrenzen. Von einer Animation wird dann gesprochen, wenn einzelne Bilder bewegt werden, um so einen Film zu erschaffen. Für die zu sehende Bewegung sind 24 Bilder in der Sekunde nötig, welche nicht der physikalischen Realität entsprechen müssen. Eine Simulation dagegen wird meist bei einer Analyse von dynamischen Systemen verwendet. Hierbei werden an einem Modell verschiedene Experimente durchgeführt, um so an Informationen über ein real bestehendes System zu erlangen. Da es sich in dieser Arbeit also um eine reine Wiederherstellung des Griiffs handelt, wird der Begriff Rekonstruktion verwendet. [Mos17]

1.2 Zielsetzung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Fragestellung ‚Ob und inwieweit ist es möglich, das Griffgeschehen bzw. den Griff zu rekonstruieren?‘. Um diese zu beantworten, setzt sich folgende Arbeit zuallererst mit der grundlegenden Anatomie der Hand und deren Bewegungsmöglichkeiten auseinander. Auf dieser Grundlage wird danach beschrieben, wie ein bewegliches Handmodell erstellt wird. Es werden zwei unterschiedliche Griffe bei der Rekonstruktion betrachtet, die beide am gleichen Objekt, einer Vase, Anwendung finden. Der erste Griff stellt hierbei ein Anheben oder Bewegen der Vase dar, der zweite einen Schlag mit der Vase. Bei der Vase handelt es sich dabei um einen Gegenstand, welcher einfach digitalisiert werden kann. Mit der bewegungsfähigen Hand und einem Modell der Vase mit Spuren der Abdrücke wird eine Rekonstruktion des Griiffs in der Open Source Software Blender versucht und zum Schluss mit einem Modell des originalen Griiffs verglichen. Ziel soll somit sein, beide Griffe anhand der zurückgebliebenen Spuren nachzubilden und so gut wie möglich wieder zu erkennen.

Da sich diese Bachelorarbeit zuerst mit dem Thema des Griiffs und deren Rekonstruktion beschäftigt, kann davon ausgegangen werden, dass sie als Grundlage für weitere Forschungen in dem Bereich fungiert. So könnte in späteren Arbeiten nicht nur auf die Wiederherstellung des Griiffs eingegangen werden, sondern auch auf eine Simulation und wie dieser entstanden sein könnte.

1.3 Kapitelübersicht

Die vorliegende Arbeit ist in sechs Kapitel unterteilt. Nachdem Kapitel 1 eine kurze Einleitung gibt, wird in Kapitel 2 auf die Grundlagen eingegangen, um ein besseres Verständnis für die Hand und deren anatomischen Aufbau und Funktion zu bekommen. Neben der Hand wird hier auch auf die Photogrammetrie und 3D-Scanner eingegangen. In Kapitel 3 werden die verwendeten Materialien und Methoden der Arbeit aufgezeigt. Dabei werden die verschiedenen Aufnahmen, die Modellerstellung und die Arbeit in

Blender beschrieben. Die Ergebnisse der vorgestellten Methoden werden in Kapitel 4 betrachtet und im Nachhinein in Kapitel 5 diskutiert. Im letzten Kapitel 6 werden ein Fazit und ein kleiner Ausblick auf eventuell folgende Arbeiten gegeben.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die allgemeinen Grundlagen beschrieben, welche benötigt werden, um ein Verständnis für die späteren Experimente zu gewinnen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Anatomie der Hand und die sich daraus ergebenden Bewegungen. Zudem soll das Themengebiet der Photogrammetrie kurz beleuchtet werden.

2.1 Anatomie der menschlichen Hand

Um ein Verständnis dafür zu gewinnen, wie sich die menschliche Hand bewegt und in welchem Ausmaß das Greifen möglich ist, wird sich in den nachfolgenden Abschnitten mit dem Aufbau der Hand und deren Funktion auseinandergesetzt.

Zu Beginn muss gesagt werden, dass das Aussehen der Hände von Mensch zu Mensch aufgrund von verschiedenen Faktoren, wie Alter, Arbeit oder auch Verletzungen, anders ausfällt. So können entsprechende Unterschiede in der Gestalt erkannt werden, wie zum Beispiel dicke oder dünne Finger, schmale oder breite Hände. Allgemein lässt sich die äußere Erscheinung der Hand in unterschiedliche Teile gliedern. So besteht sie, wie auch die Abbildung 2.1 zeigt, aus dem Handrücken, den Fingern, der Hohlhand mit dem Daumenballen und dem Kleinfingerballen. [Kor07]

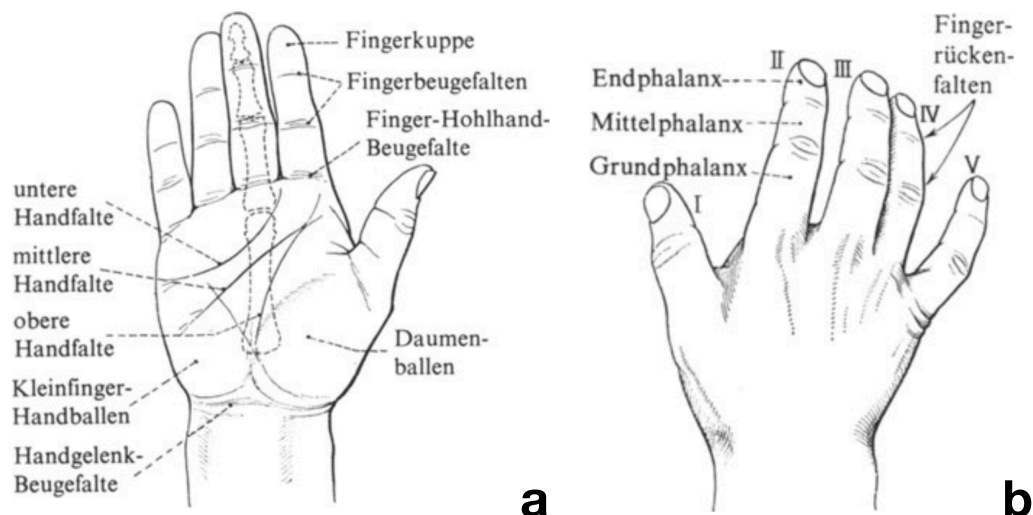


Abbildung 2.1: Äußere Erscheinung der Hand. a Handinnenfläche, b Handrücken [Nag74]

Die Innenflächen der Hand sowie die Hohlhand selbst sind durch Handlinien, sogenannten Handfalten, gekennzeichnet. Diese werden umso deutlicher, desto mehr die Hand zu einer Faust verschlossen wird. Je nach Erscheinungsform der Hand kann bei einer starken Streckung der Finger die Sehnen der Fingerstrecke erkannt werden. [Kor07]

Die Hand gehört anatomisch zum Bewegungsapparat des Menschen, somit wird auch sie in passive und in aktive Bestandteile unterteilt. Zu dem passiven Bewegungsapparat werden Knochen und deren Verbindungen, die Gelenke, gezählt. Die quergestreifte Skelettmuskulatur gehört zum aktiven Bewegungsapparat. Die Hand besteht normalerweise aus insgesamt 27 Knochen. Acht dieser Knochen bilden die Handwurzel und fünf sind Mittelhandknochen. Die vier Finger bestehen jeweils aus einem Grund-, Mittel- und Endknochen. Der Daumen besteht im Gegensatz dazu nur aus zwei Gliedern. [Fal95]

Die genaueren Beschreibungen von den Gelenken und der Muskulatur der Hand werden in den nachfolgenden Abschnitten 2.2 bzw. 2.3 erläutert, da diese Bestandteile für die eigentliche Bewegung ausschlaggebend sind.

2.2 Gelenke

Um die Funktion der Bewegung zwischen den verschiedenen Abschnitten des Rumpfes und der oberen und unteren Extremitäten zu gewährleisten und die dabei auftretenden Kräfte zu übermitteln, werden Gelenke benötigt. Diese sind Verbindungen zwischen knöchernen und oder knorpeligen Elementen des Skeletts. Gelenke sind somit von großer Bedeutung, wenn es um die statische und dynamische Aktivität des Bewegungsapparates geht. [Til10]

Gelenke werden nach der systematischen Anatomie in Synarthrosen, sogenannte unechte Gelenke und Diarthrosen, auch echte Gelenke genannt, unterteilt. Synarthrosen sind kontinuierliche Knochenverbindungen, welche aus Knorpel oder Bindegewebe bestehen. Als Beispiel einer solchen Gelenkart können die Schädelnähte bei Säuglingen betrachtet werden. Da sich die vorliegende Arbeit mit der Anatomie der Hand beschäftigt, werden die Synarthrosen im Nachfolgenden nicht genauer betrachtet, da diese keine weitere Bedeutung für die Betrachtung der Hand und deren Funktion haben. Diarthrosen dagegen sind diskontinuierliche Knochenverbindungen. Sie besitzen einen Gelenkspalt zwischen 2 oder mehreren Gelenkenden, welche mit Knorpel bedeckt sind. [Til10]

Diarthrosen bestehen, wie Abbildung 2.2 zeigt, aus Gelenkflächen, welche mit Gelenkknorpeln bedeckt sind, einer Gelenkkapsel, entsprechenden Gelenkbändern und einer Gelenkhöhle.

Je nach Art des Gelenks und dessen Bewegung sind die Gelenkknorpel unterschiedlich geformt. Aufgrund der ständigen Bewegung stehen die Knorpel bei den meisten Gelenken unter enormen Druck. Deshalb spielt die Eigenschaft der Verformbarkeit eine große Rolle, da somit die Kontaktstellen der entsprechenden Gelenkflächen größer wird und der Druck durch die Verteilung besser ausgeglichen wird. Umschlossen wird das Gelenk von allen Seiten durch die Gelenkkapsel, welche aus einer inneren Schicht, der

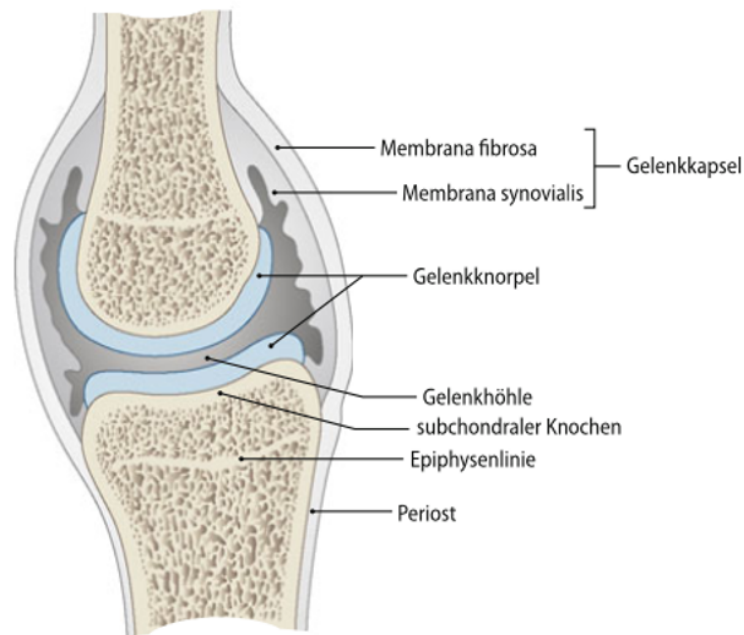


Abbildung 2.2: Schematischer Aufbau von Diarthrosen [Til10]

Membrana synovialis, und einer äußeren Schicht, der Membrana fibrosa, besteht. Eine große Bedeutung, vor allem bei der Bewegung der Gelenke, haben die Gelenkbänder. Sie bestehen aus parallel verlaufenden Kollagenfasern und dienen oft als Verstärkungsbänder in der äußeren Schicht der Gelenkkapsel. Die Bänder haben zwei wesentliche Aufgaben in Bezug auf die Bewegung. Zum einen die Gelenkführung und zum anderen die Begrenzung von Gelenkexkursionen durch Bänderhemmung. Eine ausführlichere Beschreibung dieser beiden Aufgaben erfolgt zu einem späteren Zeitpunkt im Abschnitt 2.2.1. Der letzte Bestandteil der Diarthrosen ist die Gelenkhöhle. Diese ist ein kapillärer Spalt, welcher mit einer minimalen Menge an Gleitmittel, auch Synovia genannt, versehen ist. Das Gleitmittel ist nicht nur für eine reibungslosere Bewegung zuständig, sondern ernährt gleichzeitig den gefäßlosen Knorpel. [Kor07]

Diarthrosen werden in Bezug auf unterschiedliche Gesichtspunkte nochmals unterteilt. So kann eine Unterteilung durch die Anzahl der miteinander artikulierenden Knochen erfolgen. Dabei werden einfache Gelenke, nur zwei Knochen bewegen sich miteinander, und zusammengesetzte Gelenke, mehr als zwei Knochen sind bei der Bewegung beteiligt, unterschieden. Zudem kann eine weitere Einteilung nach den Gelenkkörper und deren Geometrie erfolgen. Diese Unterteilung hebt die verschiedenen Gelenkmechaniken und die Kinematik hervor. Es wird unterschieden in Ebene Gelenke, Walzengelenke, Scharniergelenke, Zapfen- oder Radgelenk, Eigelenk, Kondylengelenk, Sattelgelenk und Kugelgelenk (siehe Abbildung 2.3). [Til10]

Wenn es um die Anatomie der Hand geht, sind nur vier von den oben genannten Gelenkarten von besonderer Bedeutung, darunter zählen das Scharniergelenk, Eige-

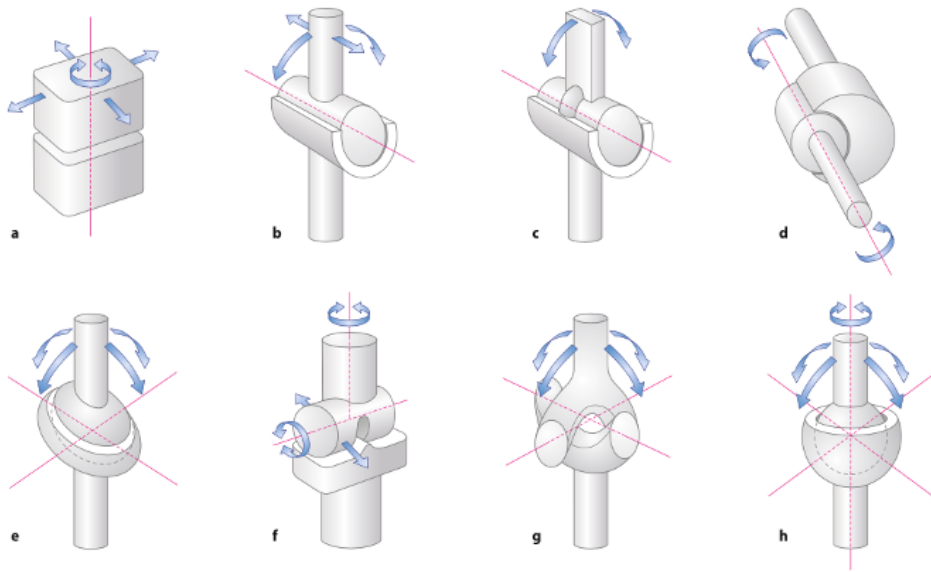


Abbildung 2.3: Gelenktypen und deren Bewegungsachsen. a Ebenes Gelenk, b Walzengelenk, c Scharniergelenk, d Zapfen- oder Walzengelenk, e Eigelenk, f Kondylengelenk, g Sattelgelenk, h Kugelgelenk [Til10]

lenk, Sattelgelenk und das Kugelgelenk. Scharniergelenke bezeichnen oftmals einachsige Gelenke, welche Beugung und Streckung ausführen können. Bewegungen in der Längsachse sind dabei nicht möglich, da die gegenüberliegenden Gelenkflächen ineinandergreifen (siehe Abbildung 2.3c). Das Eigelenk oder auch Ellipsoidgelenk kann aufgrund des eiförmigen Gelenkkopfes Bewegungen in zwei Achsen ausführen. Da das Gelenk nicht vollständig rund ist, ist eine Rotation um die eigene Achse nicht möglich (siehe Abbildung 2.3e). Beim Sattelgelenk handelt es sich um Gelenke, bei dem die Gelenkpartner eine konkave und eine konvexe Krümmung aufweisen. Somit können Bewegungen um zwei verschiedene Achsen ermöglicht werden. Bei einer Kombination dieser ist zudem eine eingeschränkte Rotation möglich, die dadurch zustande kommt, wenn der Flächenkontakt der Gelenkflächen aufgehoben wird (siehe Abbildung 2.3g). Kugelgelenke besitzen einen runden Gelenkkopf und eine entsprechend ausgehöhlte Gelenkpfanne. Im Gegensatz zu Eigelenken können sich diese auch um ihre eigene Achse rotieren und sind somit von der Bewegung in alle Richtungen beweglich (siehe Abbildung 2.3h). [Kor07] [Til10]

Eine weitere Aufteilung hinsichtlich der Diarthrosen sind straffe Gelenke oder auch Amphiarthrosen. Diese kennzeichnen sich durch starke Bänder, welche die Beweglichkeit des Gelenkes beeinträchtigen, aus. [Til10]

2.2.1 Bewegungsrichtungen

Wie genau sich ein Gelenk bewegen kann bzw. sollte bestimmt der Begriff der Freiheitsgrade. Dieser beschreibt die Bewegungsrichtungen, welche zwischen zwei Gelenken

möglich sind. Die Richtungen der Bewegung selbst spielen sich in der Gelenkmechanik auf den drei Hauptachsen, welche auch Bewegungsachsen genannt werden, ab. Je nach Gelenktyp und der Wirkung der Muskeln und Bänder kann ein Gelenk unterschiedliche Bewegungen ausführen. So findet eine Unterscheidung in einem, zwei oder drei Freiheitsgraden statt. Kugelgelenke gehören zu den dreiachsigen Gelenken und besitzen somit drei Freiheitsgrade. Zwei Freiheitsgrade finden sich in zweiachsigen Gelenken, wie bei Eigelenken und Sattelgelenken, wieder. Scharniergelenke und Radgelenke verfügen über nur einen Freiheitsgrad und können nur auf einer Achse bewegt werden. [Kor07]

Hierzu muss gesagt werden, dass pro Achse zwei Bewegungsrichtungen möglich sind. So wird auf der ersten Hauptachse die innere und äußere Rotation, also eine Drehung um die eigene Achse des betreffenden Knochens ermöglicht. Auf der zweiten Achse der transversal Achse, werden Beugung (Flexion) und Streckung (Extension) ausgeführt. Die Bewegungen der Abduktion und der Adduktion, also das Abspreizen vom Körper und das Heranführen, sind Bewegungen, welche sich auf der dritten, der sagittalen Achse abspielen. Zudem gibt es eine Bewegungsmöglichkeit, bei der sich Flexion/Extension und Abduktion/Adduktion kombinieren lassen, um so eine kreisende Bewegung zu zulassen. Eine genauere Beschreibung der Bewegungsrichtungen kann der Tabelle 2.1 entnommen werden. [Kor07] [Str12]

Tabelle 2.1: Bewegungsrichtungen der Gelenke [Kor07] [Str12]

Beschreibung		Achse
Innenrotation	Innendrehung um die Längsachse	1. Hauptachse
Außenrotation	Außendrehung um die Längsachse	
Flexion	Beugung um die Transversale Achse	2. Hauptachse
Extension	Streckung um die Transversale Achse	
Abduktion	Wegführen vom Körper um die Sagittale Achse	3. Hauptachse
Adduktion	Heranführen an den Körper um die Sagittale Achse	
Zirkumduktion	Umführbewegung, durch Kombination der Bewegung um die 2. und 3. Achse	2. und 3. Hauptachse

Ein weiterer Punkt, welcher berücksichtigt werden muss, wenn es um die Bewegung von Gelenken geht, ist die Führung und Hemmung von Gelenken. Dabei ist die Gelenkführung für die entsprechende Bewegung sowie für die Absicherung des Gelenks zuständig und die Hemmung schränkt bestimmte Bewegungen ein. Dabei können vier verschiedene Arten der Führung bzw. Hemmung genannt werden. Die Bänderführung kommt bei Gelenken vor, bei denen eine Knochenführung nicht vorhanden ist. Zum Beispiel bei Scharniergelenken, planen Gelenkflächen, wie die Handwurzelgelenke, und stark inkongruenten Gelenkflächen. Bei einer Führung durch Bänder werden nur aus-

gewählte Richtungen freigegeben und ausgeführt. Die Bänderhemmung schränkt vor allem die Streckung der Gelenke ein, beispielsweise bei den Fingergelenken. Da die wenigsten Gelenke durch eine Knochenführung bewegt werden und dies in der Hand auch nicht der Fall ist, wird diese hier nicht genauer erklärt. Die Muskelführung und -hemmung entfällt bei der Hand ebenfalls. Diese findet nur Anwendung bei Gelenken, welche nicht durch Knochen- oder Bänderführung unterstützt wird. Die letzte Form ist die Weichteilhemmung, welche eher im Kiefer und im Ellenbogen- oder Kniegelenk auftritt. Allgemein muss gesagt werden, dass der Bewegungsumfang von verschiedenen Faktoren abhängig ist. So kommt es auch auf die Person selbst an, nicht nur auf die generelle anatomische Voraussetzung. Es gibt sowohl Unterschiede in den Altersgruppen als auch in den Geschlechtern. Zudem können Unfälle oder Krankheiten eine Ursache für Bewegungseinschränkungen oder sogar Überbeweglichkeit sein. [Kor07]

2.2.2 Gelenke der Hand

Die Bewegungsmöglichkeiten, welche die Hand bietet, kommen vor allem zustande, da sie viele Gelenke besitzt [Kor07]. Hauptsächlich sind für die Bewegungen die Gelenke des Daumens und der einzelnen Finger und die des distalen und proximalen Handgelenks verantwortlich. Dabei erfüllen die Handinnenfläche, der Daumen und die Finger, genauer gesagt die Fingerbeeren, die Aufgabe des Tastens. Die Ausrichtung der Hand selbst wird vom Handgelenk gesteuert, um so das Tasten und auch das Greifen zu ermöglichen. [Til10]

Ein weiterer Bestandteil, welcher die Bewegung der Hand ermöglicht, aber nicht direkt zur Hand gehört, ist das Radioulnargelenk, auch Ellenbogengelenk genannt. Dieses soll hier nur kurz erwähnt werden, um die zusätzliche Bewegung zu verdeutlichen. Die Knochen des Unterarms, Radius und Ulna, sind für eine Wendebewegung zuständig, dabei dreht sich Radius um Ulna. Die Wendebewegung besteht aus zwei Bewegungsrichtungen, Pronation und Supination. Die Mittelstellung oder auch Ruhestellung kann beobachtet werden, wenn der Arm gerade am Körper herabhängt. Die Hand wird so gerichtet, dass der Daumen nach vorne zeigt. Bei der Supination richtet sich die Handinnenfläche nach hinten und der Handrücken nach vorn, dabei liegen Radius und Ulna parallel. Der Gegensatz hierzu ist die Pronation, wobei die Handfläche vor und der Handrücken nach hinten zeigt, Radius und Ulna sind überkreuzt. Dabei ermöglicht die Pronation eine Bewegung von 85° und die Supination eine von 90° . Wird der Oberarm zudem rotiert, kann diese Bewegung sogar um 360° erweitert werden. Diese Wendebewegung ist vor allem von Bedeutung, wenn Bewegungen ausgeführt werden müssen, die sich mit dem Schrauben oder Drehen beschäftigen, zum Beispiel beim Öffnen einer Tür mit einem Schlüssel. [Kor07]

Wie bereits erwähnt, sind die wichtigsten Gelenktypen in Bezug auf die Hand das Scharniergelenk, Sattelgelenk, Kugelgelenk und Eigelenk. Dabei ermöglichen die Scharnier-

gelenke die Bewegungen in den Fingermittelgelenken und Endgelenken. Das Handgelenk gehört zu den Eigelenken. Kugelgelenke sind Bestandteile der Fingergrundgelenke und das Sattelgelenk ist für die Bewegung des Daumens ausschlaggebend. Eine Übersicht der Positionen der einzelnen Gelenke in der Hand kann der Abbildung 2.4 entnommen werden. [Til10]

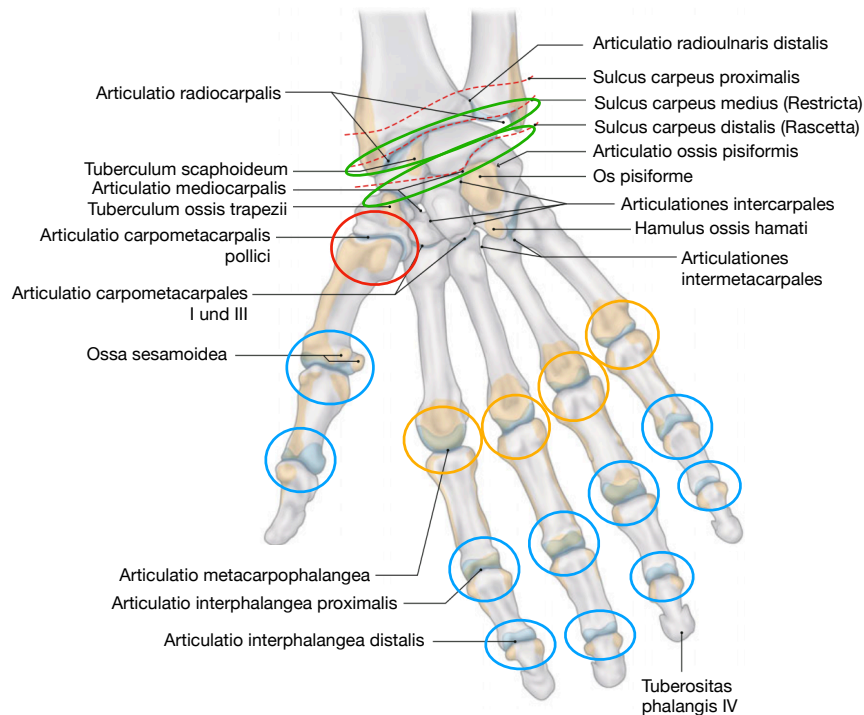


Abbildung 2.4: Rechtes Handskelett mit Einzeichnungen der Gelenke. grün: Eigelenke, rot: Sattelgelenk, orange: Kugelgelenke, blau: Scharniergelenke [Til10] (Einzeichnungen und Beschriftung selbst erstellt)

In den nachfolgenden Abschnitten werden die einzelnen Bestandteile der Hand und deren Bewegungsmöglichkeiten genauer dargestellt und erläutert.

Das Handgelenk

Das Handgelenk besteht aus 15 Knochen, welche die Gelenke der Mittelhand und die der Handwurzelgelenke bilden [Kor07]. Es erfolgt eine Einteilung in zwei Teilen, dem proximalen und dem distalen Handgelenk. Dabei handelt es sich bei dem proximalen Handgelenk um ein Eigelenk, welches zwischen Radial und Ulna und dem proximalen Handwurzelgelenk liegt. Das distale Handgelenk wird auch verzahntes Scharniergelenk genannt [Kor07]. Es liegt zwischen der distalen und proximalen Handwurzelreihe, wie in Abbildung 2.4 zu sehen ist. Beide Gelenke wirken bei Bewegungen der Hand zusammen. Allerdings entstehen die meisten Bewegungen im proximalen Handgelenk, dies ist der Verzahnung des distalen Handgelenks geschuldet. [Fal95]

Die Handwurzelmittelgelenke (Articulationes intercarpales) sind straffe Gelenke, da die Knochen der Handwurzel durch Bänder in der distalen und proximalen Reihe miteinander verbunden sind. Somit ist ihre Bewegung stark eingeschränkt. Die Handwurzel-Mittelhand-Gelenke (Articulationes carpometacarpales) gehören ebenfalls zu den Amphiarthrosen, da diese durch straffe Bänder zusammengehalten werden. Sie befinden sich zwischen der distalen Handwurzelknochenreihe und den Enden der Mittelhandknochen. In Verbindung mit diesen stehen die Gelenke zwischen den Mittelhandknochen (Articulationes intermetacarpales). Diese liegen zwischen den Mittelhandknochen II-V und bilden drei Gelenke, welche durch feste Bänder verstärkt werden und somit zu den straffen Gelenken zuzuordnen sind. [Til10]

Es sind verschiedene Bewegungen mit dem Handgelenk möglich, wobei es eine Unterscheidung in drei Bewegungen gibt. Die Randbewegungen, welche Ulnar- und Radialabduktion beinhalten, Flächenbewegungen mit Flexion und Extension und eine Kombination beider die sog. Zwischenbewegungen. Alle Bewegungen gehen hierbei von der Normalstellung der Hand aus. [Pla91]

Die reine Abduktion, sowohl in ulnar als auch in radial Richtung, findet auf einer dorso-palmaren Achse statt. Die Palmarflexion und die Dorsalextension erfolgen um eine transversale Achse. Dabei wird die Dorsalextension von dem distalen Handgelenk ausgeführt und die Palmarflexion hauptsächlich von dem proximalen Handgelenk. Eine Auflistung aus verschiedenen Quellen zu den einzelnen Bewegungsmöglichkeiten des Handgelenks findet sich in Tabelle 2.2 wieder. Das Handgelenk kann diese vier Bewegungen auch kombinieren, um so eine Zirkumduktion zu ermöglichen [Kor07]. [Til10]

Tabelle 2.2: Bewegungen und Bewegungsausmaße im Handgelenk aus verschiedenen Quellen [Til10] [Kor07] [Str12]

	Anatomie von Karl Zilles; Bernhard N. Tillmann (2010)	Anatomie von Theodor Schiebler; Horst-W. Korf (2007)	Waldeyer – Anatomie des Menschen von Friedrich Anderhuber et al. (2012)
<i>Handgelenk (rechts):</i>			
Dorsalextension	35 - 60°	70°	50°
Palmarflexion	50 - 60°	80°	60°
Radialabduktion	25 - 30°	15°	20°
Ulnarabduktion	30 - 40°	40°	30°

Aufgrund der Anatomie der Hand können einige Bewegungen allerdings nicht kombiniert werden. So kann das Handgelenk, wenn es maximal gebeugt ist, keine Abduktionsbewegung ausführen. Dies liegt an den festen Bändern, welche die Handwurzelreihe verbinden. Dadurch ist es nicht möglich, diese Reihe an Knochen zu verschieben und somit kann diese Bewegung nicht stattfinden. [Pla91]

Die Fingergelenke

Die Finger werden mit II bis V nummeriert, wobei der Zeigefinger die II, der kleine Finger die V und der Ring- und Mittelfinger die übrigen Zahlen in Reihenfolge repräsentieren. Jeder Finger besitzt dabei drei Gelenke, das Fingergrundgelenk (*Articulatio metacarpophalangea*), das Fingermittelgelenk (*Articulatio interphalangea proximalis*) und das Fingerendgelenk (*Articulatio interphalangea distalis*). [Til10]

Bei den Fingergrundgelenken handelt es sich um Kugelgelenke, welche sich zwischen den Mittelhandknochen und den Basen der Fingerknochen (den Phalangen) befinden. Aufgrund der Kollateralbänder, welche das Gelenk verstärken, sind sie in ihrem Bewegungsumfang leicht eingeschränkt. Eine zusätzliche Verstärkung des Gelenks kommt durch Faserzüge, welche sich auf der Handflächenseite befinden. Die einzelnen Fingergrundgelenke II bis V sind über ein Band (*Lig. metacarpale transversum profundum*) miteinander verbunden, dies hat zur Folge, dass die Bewegung des Spreizens begrenzt ist. Sowohl die Mittelgelenke als auch die Endgelenke der Finger sind Scharniergelenke. Aufgrund einer Vertiefung am Gelenkkopf und der dazu passenden Leiste aus Knorpeln in der Gelenkpfanne werden diese auch reine Scharniergelenke genannt. Diese Gelenke werden auch von verschiedenen Bändern stabilisiert und verstärkt. [Kor07]

Die Fingergrundgelenke lassen sich aufgrund ihres Gelenktyps in verschiedene Richtungen bewegen. So lassen sich die Finger je nach Quelle (siehe Tabelle 2.3) unterschiedlich stark in Richtung der Handfläche beugen bzw. in Richtung des Handrückens strecken. Hierbei ist das Strecken allerdings nur gering möglich, was auf die Bänderverbindungen zurückzuführen ist. Bei den Grundgelenken erfolgt die Abduktion aufgrund der Verbindung der Finger untereinander nur eingeschränkt, dennoch ist sie individuell möglich. Dabei werden die Finger II, IV und V entweder vom Mittelfinger, welcher die dorsopalmare Achse darstellt, weggespreizt oder herangeführt. Die Rotation wird bei diesen Kugelgelenken stark beschränkt, was wiederum auf die Bänder zurückzuführen ist. So ist eine aktive Bewegung wohl kaum möglich, passiv, allerdings kann das Gelenk in einem geringen Maß in beide Richtungen um die eigene Achse gedreht werden [Kor07]. Eine Kombination der eben erwähnten Bewegungen der Extension/Flexion und Abduktion/Adduktion ist im Grundgelenk ebenfalls möglich. Diese Zirkumduktion kann vor allem im Zeigefinger gut beobachtet werden [Kor07]. Die Mittel- und Endgelenke der Finger können aufgrund ihres Aufbaus keine Abduktion bzw. Adduktion ausführen. Dafür ist es möglich, diese aktiv zu beugen und geringfügig zu strecken. Um Sicherheit in diesen Bewegungen zu gewährleisten, sind die Bänder je nach Ablauf der Bewegung unterschiedlich gespannt. So spannen sich die Bänder bei der Streckung auf der Handinnenseite und bei Beugung auf der Seite des Handrückens [Kor07]. Die Ausmaße der einzelnen Bewegungsmöglichkeiten sind in Tabelle 2.3 aufgelistet. [Til10]

Einige Bewegungen lassen sich mit den Fingern allerdings nicht ausführen. So zum Beispiel die aktive Rotation der Grundgelenke, welche für Kugelgelenke normalerweise

Tabelle 2.3: Bewegungen und Bewegungsausmaße in den Fingern aus verschiedenen Quellen [Til10] [Kor07] [Str12]

	Anatomie von Karl Zilles; Bernhard N. Tillmann (2010)	Anatomie von Theodor Schiebler; Horst-W. Korf (2007)	Waldeyer – Anatomie des Menschen von Friedrich Anderhuber et al. (2012)
Finger:			
Fingergrundgelenke:			
Flexion	90°	80 - 90°	90°
Extension	30°	10 - 30°	
Mittelgelenke:			
Flexion	100°	bis 90°	100°
Endgelenk:			
Flexion	45°	bis 90°	90°

möglich wäre, aber aufgrund der verschiedenen Verbindungen der Bänder hier entfällt. Die passive Rotation ist wohl möglich, aber auch nur, wenn die Finger sich nicht in einer gebeugten Stellung befinden. Dies liegt wiederum an den Bändern, welche bei Beugungen gespannt und bei Streckungen locker sind. Weiterhin ist das Abspreizen der Finger voneinander nur möglich, wenn diese auch gestreckt sind. [Kor07]

Die Daumengelenke

Der Daumen besteht wiederum aus drei Gelenken, das Daumensattelgelenk (Articulatio carpometacarpalis pollicis), das Daumengrundgelenk (Articulatio metacarophalangea pollicis) und das Interphalangeagelenk des Daumens auch Daumenendgelenk (Articulatio interphalangea pollicis) genannt. [Til10]

Besonders wichtig für die Bewegungen des Daumens ist hierbei das Sattelgelenk, da dieses für die freie Bewegung zuständig ist. Es liegt zwischen dem Os trapezium und dem Os metacarpale I (siehe Abbildung 2.4). Es unterscheidet sich nicht nur in Form und Art des Gelenkes von den übrigen Fingern, sondern auch in seiner Bewegungsmöglichkeit. So kann dieses Gelenk den Daumen beugen und strecken. Bei ausgestreckter Hand bewegt sich der Daumen somit in Richtung der Finger hin bzw. weg [Str12]. Senkrecht zur Handinnenfläche findet die Abduktion und die Adduktion des Daumens statt. Diese Achse steht in einem 90° Winkel zu der Achse, welche für die Flexion und Extension verwendet wird. [Kor07]

Aufgrund der Form des Sattelgelenks ist es möglich, eine Rotation zu ermöglichen, indem der Kontakt der Gelenkflächen aufgehoben wird. Dabei handelt sich allerdings nicht

um eine vollständige Rotation, sondern nur um eine Ein- und Auswärtsdrehung. Die Besonderheit des Daumensattelgelenks ist die Möglichkeit der Ausführung von Opposition und Reposition, dabei handelt es sich um die Bewegung, die es der Hand ermöglicht zu greifen. Wird der Daumen mit dem Mittelhandknochen den restlichen Fingern gegenübergestellt, wird von einer Oppositionsbewegung gesprochen. Das Zurückführen des Daumens in seine ursprüngliche Stellung ist die Repositionsbewegung. Werden Opposition/Reposition und Abduktion/Adduktion wiederum kombiniert, kann eine Zirkumduktion stattfinden, wobei der Daumen in Form eines Kegels bewegt werden kann. Die Bewegungsmöglichkeiten der Daumengelenke werden in Tabelle 2.4 aufgeführt. [Kor07]

Tabelle 2.4: Bewegungen und Bewegungsausmaße der Daumengelenke [Str12]

Waldeyer – Anatomie des Menschen von Friedrich Anderhuber et al. (2012)	
Daumen:	
Sattelgelenk:	
Flexion/Extension	70°
Abduktion/Adduktion	70°
Grundgelenk:	
Flexion/Extension	50°
Endgelenk:	
Flexion/Extension	80°

Anders als bei den Grundgelenken der Finger handelt es sich bei dem Daumengrundgelenk nicht um ein Kugelgelenk, sondern um ein reines Scharniergelenk, welches durch Kollateralbänder verstärkt wird. Zudem besitzt es zwei Sesambeine, welche sich an der Gelenkkapsel befinden. Das Daumenendgelenk ist sowohl in seiner Form als auch in der Funktion den der restlichen Fingermittel- und Endgelenken gleichzusetzten [Til10]. Da beide Gelenke reine Scharniergelenke sind, können diese gebeugt und eingeschränkt gestreckt werden, wie der Tabelle 2.4 entnommen werden kann. [Kor07]

2.3 Muskeln

Die Bewegung der Hand wird allerdings nicht nur allein von den Gelenken und deren stützenden Bändern ausgeführt, sondern auch durch Muskeln. Wobei es hier auf deren Anordnung ankommt. Die Gelenke werden durch die Muskeln und deren Kräfte gesichert und sie bestimmen zudem die Art und die Richtung der Bewegung. Somit ist die aktive Bewegung der Hand möglich. [Fal95]

Die Muskeln, welche für die Bewegung der Hand verantwortlich sind, liegen am Unterarm. Im Handgelenk sind jeweils zwei Beuger und Strecker für die Bewegung vorgesehen. Zu den Beugern gehören der radiale und der ulnare Handbeuger, wirken diese beiden zusammen kann das Handgelenk gebeugt (Palmarflexion) werden. Eine Streckung

(Dorsalextension) erfolgt, wenn die beiden Strecker, der ulnare und radiale Handstrecker gleichzeitig arbeiten. Werden sowohl der radiale Handstrecker als auch der radiale Handbeuger verkürzt, so entsteht eine Radialabduktion. Die Ulnarabduktion ist genauso möglich nur mit den entsprechenden Gegenspielern. [Wit20]

Die restlichen Beuger und Strecker, welche im Unterarm liegen, sind für die Bewegung der Finger bzw. des Daumens verantwortlich. Da der Daumen eine besondere Rolle in den Bewegungsabläufen der Hand einnimmt, besitzt dieser auch eine Vielzahl an verschiedenen Muskeln. Dabei handelt es sich nicht nur um Strecker und Beuger, sondern auch um Abzieher und Anzieher. Der lange Daumenbeuger bewirkt dabei das Beugen des Daumens mit all seinen Gelenken. Der Daumenstrecker und der Daumenabzieher strecken alle Gelenke des Daumens und sind zudem dafür zuständig das Sattelgelenk abzuspreizen. [Wit20]

Die Finger II bis V werden durch den oberflächlichen und tiefen Fingerbeuger bewegt. Dabei beugt der Oberflächliche überwiegend die Grund- und Mittelgelenke und der Tiefe ist für die der Endgelenke der Finger zuständig. Der Fingerstrecker ist für das Strecken aller Finger und deren Fingergelenke verantwortlich. Um die Finger von einander zu spreizen, liegen zwischen ihnen die Zwischenknochenmuskeln. [Wit20]

2.4 Messungen der Bewegungen

Um die Beweglichkeit von Gelenken beschreiben zu können, wird die Range of Motion, kurz ROM genutzt. Es wird hierbei in passiven und aktiven ROM unterschieden. Wenn Gelenke durch die eigene Muskelkraft der auszuführenden Person bewegt werden, wird von einem aktiven ROM gesprochen. Bei einem passiven ROM bewegt sich das Gelenk aufgrund einer äußeren Krafteinwirkung, zum Beispiel weil eine andere Person das Gelenk bewegt. [CMB12]

Aufgrund der Anwendung von Kraft oder auch Schwung ist die passive Beweglichkeit somit größer als die aktive. Die Bewegungsbereiche werden in Winkelgraden beschrieben, wobei jeweils von der maximalen Bewegung ausgegangen wird. [oSBsZ]

Die Neutral-Null-Methode ist eine Messmethode, um die Beweglichkeit von Gelenken zu erfassen. Dabei werden immer von einer bestimmten Position ausgehend, der Nullstellung, die Winkel der Bewegung gemessen. Die Notation erfolgt wiederum mit einer standardisierten Methode, der Null-Durchgangsmethode. Hierbei werden drei Zahlen notiert, wobei die mittlere die Nullstellung, also 0° , repräsentiert. Links und rechts von dieser stehen die entsprechenden Bewegungsausschläge des Gelenks. So zum Beispiel betragen die Flexion und die Extension des Handgelenks $60^\circ/0^\circ/50^\circ$, wobei immer von der maximalen Bewegung ausgegangen wird. Diese Methode findet vor allem in der Diagnostik, in Verlaufskontrollen, bei Therapien und bei der Feststellung von Bewe-

gungseinschränkungen Anwendung. [Str12]

Um die Bewegungsumfänge der Gelenke zu messen, wird ein Winkelmesser verwendet. Bei den Gelenken der Finger wird zuerst die Extension und danach die Flexion bestimmt. Bei dem Sattelgelenk werden zwei verschiedene Messungen vorgenommen. Die Abduktionsfähigkeit wird gemessen, indem der Winkel zwischen den Mittelhandknochen I und II am Sattelgelenk bestimmt wird. Dabei steht der Daumen nahezu senkrecht zur Handfläche. Die zweite Messung wird zwischen Daumen und Zeigefinger vorgenommen und gibt die Abspreizfähigkeit des Daumens in der Handhauptebeane an. [HSS02]

2.5 Greifarten

Die Hand besitzt, wie bereits erwähnt, mehrere Funktionen, welche im Alltag eine wichtige Rolle spielen. Eine dieser Funktionen ist die Arbeitsfunktion, wobei die Hand als Werkzeug beim Greifen dient [Pfe73]. Je nach Art des Griffs und der Griffform sind beim Greifen die einzelnen anatomischen Bestandteile der Hand, Finger, Daumen und Handgelenk, unterschiedlich stark bei den Bewegungen beteiligt. Dabei ist vor allem der Daumen mit seinem Sattelgelenk und der daraus resultierenden großen Bewegungsfreiheit, welche die Opposition und die Reposition bieten, ausschlaggebend, wenn es um das Greifen geht. [Til10]

Nach Zilles und Tillmann (2010) erfolgt das Griffgeschehen indem, als erstes die Endgelenke, daraufhin die Mittelgelenke und erst zum Schluss die Grundgelenke der Finger gebeugt werden. Dabei bestimmen die jeweiligen Grundgelenke die Form des Griffes und die Anordnung der Finger. Aufgrund anatomischer Gegebenheiten der Finger, verhindert eine Flexion dieser, die weitere Abduktion und so werden die Finger beim Beugen zueinander bewegt, diese Bewegung wird auch Konvergenzbewegung genannt. Werden die Finger beim Öffnen der Hand wiederum gestreckt, so erfolgt eine Divergenzbewegung und die Finger werden voneinander wegbewegt, also abduziert. Dabei werden die Gelenke in umgekehrter Reihenfolge gestreckt, beginnend bei den Grundgelenken, danach die Mittelgelenke und als letztes die Endgelenke. [Til10]

Je nach Literatur werden Griffe unterschiedlich unterteilt. So teilt Allgöwer, et al. (1973) die Griffarten in Breit-, Ring- und Grobgriff, Schlüsselgriff, Hakengriff und Spitz- bzw. Feingriff ein [Pfe73]. Leger und Nagel (1974) unterscheiden die verschiedenen Griffe ebenfalls mithilfe dieser Formulierungen, wobei allerdings der Ringgriff nicht erwähnt wird, wenn es um die Prüfung der Handfunktion geht [Nag74]. Zilles und Tillmann (2010) unterteilen die Griffformen in drei Kategorien, den Fein- oder Spitzgriff, den Schreibgriff und den Grobgriff, wobei bei diesem alle Finger und der Daumen mit der Handinnenfläche beim Greifen involviert sind [Til10]. Die Einteilung der Griffarten und Formen, welche in dieser Arbeit Anwendung findet, stammt von Kapandji (2009), welche die verschiedenen Griffformen zunächst in drei Gruppen unterteilt. Bei diesen drei Griffarten

handelt es sich um die statischen Griffe, Griffe, welche unter dem Einfluss der Schwerkraft stehen und dynamische Griffe [Kap09].

2.5.1 Statische Griffe

Statische Griffe sind nicht von der Schwerkraft beeinflusst und werden nach Ibrahim Kapandji in weitere drei Gruppen unterteilt. Dazu gehören die Fingergriffe, die Handflächengriffe und die symmetrischen Griffe. [Kap09]

Fingergriffe können wiederum in bidigitale und pluridigitale Griffe unterschieden werden. Dabei handelt es sich bei bidigitalen um pinzettenartige Griffe zwischen dem Daumen und einem Finger, meistens den Zeigefinger. Hier können wiederum verschiedene Arten, je nach Auflage des zu ergreifenden Objektes, unterschieden werden. Der akkurateste ist dabei der Fingerspitzengriff, dieser wird verwendet, um kleine Gegenstände, wie zum Beispiel Nadeln, zu halten (siehe Abbildung 2.5a). Die Spitzen des Daumens und des Zeigefingers stehen sich dabei gegenüber. In manchen Situationen kann bei diesem Griff auch der entsprechende Fingernagel zu Hilfe genommen werden, um besonders kleine Gegenstände zu greifen. Eine weitaus gängigere Form ist der Fingerbeerengriff (Abbildung 2.5b), wobei nicht die Spitzen des Fingers und Daumens, sondern die palmaren Flächen gegenüberstehen. Die Endgelenke können dabei sowohl gebeugt als auch gestreckt sein. Dieser Griff ermöglicht es, größere Gegenstände zu halten oder aufzunehmen, wie zum Beispiel einen Stift. Werden Objekte zwischen Daumenfingerbeere und der Seitenfläche des Zeigefingers gehalten, so wird dieser Griff Fingerbeeren-Fingerseitengriff genannt. In anderer Literatur wird dieser auch als Lateralgriff (siehe Abbildung 2.5c) bezeichnet [Tay55]. Einsatz findet er beim Halten von Münzen oder auch Schlüsseln. Der letzte bidigitale Griff ist der interdigitale Griff, bei welchem der Daumen im Gegensatz zu den anderen Formen nicht verwendet wird. Der Gegenstand wird meistens zwischen dem Zeige- und Mittelfinger gehalten, dies geschieht zum Beispiel beim Halten einer Zigarette. Bei pluridigitalen Griffen werden neben dem Daumen noch zwei bis alle Finger eingesetzt. Dies ermöglicht im Vergleich zu den bidigitalen Griffen einen festeren Griff und mehr Präzision. Werden der Daumen, der Zeige- und Mittelfinger zum Greifen von Objekten benutzt, so wird von einer tridigitalen Griffform gesprochen, dabei ist diese Kombination von Fingern am häufigsten vertreten. So kann zum Beispiel ein kleiner Ball mithilfe der Fingerbeeren gehalten werden, der Verschluss einer Flasche kann aufgedreht werden oder er ermöglicht das Schreiben mit einem Stift. Der Stift liegt beim Schreiben, wie in Abbildung 2.5d dargestellt, zwischen den Fingerbeeren des Zeigefingers und Daumen und wird von der Seitenfläche des Mittelfingers gestützt. Zudem liegt der Stift in der ersten interdigitalen Spalte für einen stabileren Halt. Da beim Schreiben die Bewegung auch in der Schulter bzw. in der gesamten Hand stattfindet, hat dieser Griff zudem Ähnlichkeit mit den dynamischen Griffen. Tetradigitale Griffe finden Anwendung, wenn es sich um größere Gegenstände handelt, welche stabil und sicher zu greifen sind. Dies ist zum Beispiel

der Fall, wenn Gläser aufgeschraubt werden, dabei haben der Daumen und drei weitere Finger mit den Fingerbeeren Kontakt zum Deckel. Werden alle Finger der Hand beim Greifen und Halten eingesetzt, so handelt es sich um einen pentadigitalen Griff (siehe Abbildung 2.5e). Meistens werden somit große Objekte ergriffen, aber es ist auch möglich, kleinere Gegenstände mit diesem Griff zu halten. Beispielsweise können kleinere kugelförmige Objekte mithilfe dieses Griffs gehalten werden. Dabei wird auch oft von dem sog. Sphärengriff gesprochen [Tay55]. Es ist zudem möglich, große flache Gegenstände von oben zu greifen, wie zum Beispiel eine Untertasse. Hierbei werden die Finger so weit wie möglich gespreizt, wobei der Daumen sich in der größten Reposition befindet und somit maximal vom Kleinfinger entfernt liegt. [Kap09]

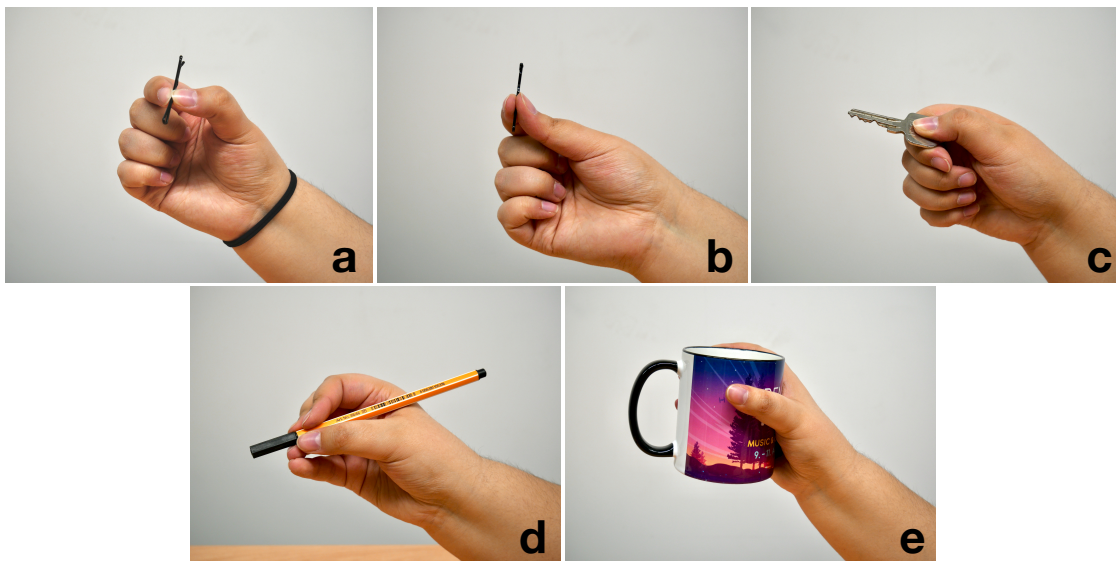


Abbildung 2.5: Beispiele für Fingergriffe. a Fingerspitzengriff, b Fingerbeerengriff, c Lateralgriff, d tridigitale Griffform, e Pentadigitaler Griff (Eigene Darstellung)

Bei Handflächengriffen werden zusätzlich zu den Fingern noch die Handballen zum Greifen und Halten verwendet. Hierbei gibt es wiederum zwei Unterscheidungen, wobei entweder der Daumen mitbetrachtet wird oder nicht. Der Finger-Handflächengriff findet wenig Anwendung. Er ist davon geprägt, dass der Daumen unbeteiligt ist und nur die Finger und die Handfläche das Objekt fixieren. Dies kann beim Betätigen eines Türgriffes beobachtet werden. Allerdings ist dieser Griff nicht für größere Gegenstände geeignet, da mit der Größe auch die Instabilität des Griffs einhergeht. Wird dagegen die gesamte Hand mit Daumen verwendet, um Objekte zu greifen, wird von einem Handflächengriff (siehe Abbildung 2.6) gesprochen. Mit diesem können auch große und schwere Gegenstände gehalten werden, indem sich die Hand um das Objekt legt. Die aufgewendete Kraft für den Griff ist dabei abhängig von dem Volumen des Gegenstands. Je nachdem wie weit der Daumen am Zeigefinger liegt, desto größer ist die Kraft, welche aufgewendet werden kann. [Kap09]

Bei symmetrischen Griffen handelt es sich um Griffe, welche zentriert sind. Dabei wird auf eine vom Unterarm fortgesetzte Längsachse Bezug genommen. Es ist wichtig, dass



Abbildung 2.6: Beispiel für einen Handflächengriff mit Daumen (Eigene Darstellung)

die Finger III bis V gebeugt werden können und der Zeigefinger gestreckt wird. Zudem ist die Fähigkeit des Daumens zur Opposition ein wichtiger Bestandteil dieser Form. Mithilfe dieser Anordnung kann zum Beispiel eine Gabel oder ein Schraubenzieher gehalten werden. [Sch10]

2.5.2 Weitere Griffarten

Eine weitere Griffart sind die Griffe, welche unter Einfluss der Schwerkraft stehen. Bei diesen wird die Hand oftmals als flache Plattform, zum Beispiel wenn ein Teller von unten getragen wird, eingesetzt. Die Hand wird dabei gestreckt und die Handflächen zeigen nach oben, um das Objekt zu halten. Zudem kann mit dieser Art des Greifens Flüssigkeit oder feine Substanzen wie Sand transportiert werden, indem die Hände zu einer Schale geformt werden, wobei die Handinnenflächen wiederum nach oben zeigen. Um diese Greifformen zu ermöglichen, ist zusätzlich die Supination des Ellenbogengelenks nötig. Eine andere Form der schwerkraftabhängigen Griffe ist der Hakengriff [Sch10]. Bei diesem werden die Finger, einer oder mehrere, zu einem Haken gebeugt, um so Gegenstände wie Eimer, Tassen oder auch Koffer zu halten (siehe Abbildung 2.7a). [Kap09]

Von dynamischen Griffen wird gesprochen, wenn die Hand zusätzlich zum eigentlichen Greifen weitere Handlungen ausführt. Bei dieser Form gibt es unzählige verschiedene Handgriffe, welche sich sowohl im Griff als auch in der auszuführenden Aktion unterscheiden. Somit sollen hier nur einige Beispiele für dynamische Griffe genannt werden. Das Schneiden mit einer Schere, wie in Abbildung 2.7b beispielsweise. Die Schere wird dabei von Mittelfinger und Daumen gehalten und bewegt, wobei der Daumen zum größten Teil für das Öffnen und Schließen zuständig ist. Ein weiteres Beispiel ist das Betätigen einer Sprühflasche. Hierbei liegt die Flasche in der Hand und der Zeigefinger liegt

gekrümmt auf dem Hebel und löst diesen aus (Abbildung 2.7c). [Kap09]



Abbildung 2.7: Beispiele für weitere Griffarten. a Hakengriff, b und c dynamische Griffe (Eigene Darstellung)

2.6 Beeinträchtigungen in der Bewegung

Aufgrund von Verletzungen oder Krankheiten können einige Bewegungen und somit auch die daraus folgenden Griffe nicht oder nur zum Teil ausgeführt werden. In diesem Abschnitt sollen nur kurz einige Beispiele für solche Beeinträchtigungen genannt werden, welche für das Griffgeschehen und den Griff ausschlaggebend sind.

Ein Krankheitsbild, welches zur Einschränkung in den Bewegungsabläufen der Hand sorgt, ist die Arthrose. Hierbei handelt es sich nach dem deutschen Rheuma-Liga-Bundesverband (2021) um eine Beeinträchtigung des Gelenkknorpels, wobei diese nicht von allein behoben werden kann. Dabei ändert sich nicht nur der Knorpel, indem dieser zurückgeht, sondern auch der betreffende Knochen [eV21]. Von Rhizarthrose wird gesprochen, wenn die Arthrose sich im Sattelgelenk des Daumens befindet, welches am meisten betroffen ist [Dei19]. In einer Studie aus dem Jahr 2014, wurden die ROM des Trapeziometakarpalgelenk (TMC) und des Daumensattelgelenks (MCP) gemessen, wobei 18 Probanden keinerlei Beschwerden aufwiesen und weitere 18 an Arthrose erkrankt waren. Mithilfe einem Motion-Capture-System wurde somit die Bewegungsumfänge der Flexion/Extension, Abduktion/Adduktion und Pronation/Supination aufgenommen. Die Studie zeigt, dass eine Erkrankung an Rhizarthrosen zur Beeinträchtigung in den Bewegungen des Daumens führt. So ist die Bewegung des MCP-Gelenks in Abduktion und Adduktion zu 48% kleiner als bei den Probanden, welche keine Beschwerden aufweisen. Die Pronation und Supination fiel bei der Gruppe mit Arthrose um 42% geringer aus. Im TMC-Gelenk konnte nur ein geringerer Bewegungsumfang bei der Abduktion und Adduktion festgestellt werden, dieser war 32% kleiner als bei der gesunden Gruppe. Bei beiden Gelenken wurden bei der Flexion und Extension keine signifikanten Unterschiede festgestellt. [Brü14]

Ein weiteres Beispiel ist die Radiallähmung, es handelt sich hierbei um eine Nervenverletzung, wobei eine sog. Fallhand entsteht. Dabei ist es nicht mehr möglich, die Hand anzuheben und den Daumen zu strecken. Die Ulnarislähmung führt zu einer Schwur-

hand, wobei die Finger IV und V nicht mehr gestreckt werden können und gebeugt bleiben. Zudem werden Abduktion und Adduktion zwischen den Fingern gestört. [Nag74]

2.7 Photogrammetrie

Toni Schenk definiert den Begriff der Photogrammetrie wie folgt:

„Die Photogrammetrie ist die Wissenschaft von der Gewinnung zuverlässiger Informationen über die Eigenschaften von Oberflächen und Objekten ohne physischen Kontakt mit den Objekten sowie von der Messung und Interpretation dieser Informationen.“¹ [Sch05] S. 3

Merkmale der Photogrammetrie sind, dass die Aufnahmen berührungslos stattfinden und die Dauer dieser gering ist. Diese kurze Aufnahmedauer bewirkt zudem eine hohe Aufnahmefrequenz, was wiederum dazu führt, dass auch dynamische Prozesse erfasst werden können. Das Objekt oder auch die entsprechende Szene wird flächenhaft und bildlich dokumentiert und die Auswertung kann in zwei, drei oder auch vier Dimensionen geschehen. Zudem kann die Photogrammetrie verschieden große Objekte bzw. Szenen erfassen und bearbeiten. [Hei17]

Mitt den Aufnahmen eines bestimmten Objekts oder auch einer Szene wird ein 3D-Scan erstellt. Hierzu können einzelne Bilder oder Bildpaare, aber auch ganze Bildverbände und Sequenzen verwendet werden, wobei es sich hier entweder um Helligkeitsbilder in Schwarz-Weiß, Farbe oder Infrarot oder um Punktwolken bzw. Entfernungsbilder handeln kann [Hei17]. Für die Aufnahmen kann dabei jede Kamera genutzt werden, dabei ist es vor allem wichtig, dass diese, scharfe Bilder erzeugt, um so gute 3D-Modelle erstellen zu können. Die Verwendung von Stativen als Stabilisierung für die entsprechenden Kameras ist somit bei den Aufnahmen empfohlen. [Hof19]

Moons, Van Gool und Vergauwen beschreiben in ihrem Buch unterschiedliche Methoden und Herangehensweisen, um Objekte dreidimensional abbilden zu können. Dabei werden mehrere Kameras verwendet, die um das entsprechende Objekt positioniert werden. Die Fotografien werden dann entweder von vielen Kameras gleichzeitig aufgenommen oder in kurzen Zeitintervallen, während das Objekt sich um sich selbst dreht. Zudem können Videokameras zu Anwendung kommen, um so dynamische Szenen zu erfassen. Werden mehrere Bilder zeitversetzt aufgenommen, so erhöht sich die Möglichkeit, die entsprechenden Merkmalspunkte, auch Feature genannt, zu erkennen. Außerdem versprechen unterschiedliche Kameraperspektiven vollständigere Modelle der Objekte. [Ver10]

¹ Übersetzt von Autor

Die Erstellung des Modells erfolgt dann mit einem Softwareprogramm. Dabei werden Daten und Informationen aus den Aufnahmen durch bestimmte Algorithmen extrahiert, um im nächsten Schritt ein digitales 3D-Modell zu generieren. Um das Modell später kalibrieren zu können, werden zusätzlich Referenzmaße verwendet, welche während der Aufnahmen neben dem Objekt gelegt werden [Mos17]. In dieser Arbeit wurde hierbei mit dem Concentric Circle Tag kurz CC-Tag (siehe Abbildung 2.8) gearbeitet. Dabei handelt es sich um Marker, welche aus konzentrischen Ringen aufgebaut sind und für die Erkennung und Identifizierung der Merkmale in den Bildern zuständig sind [Gas16]. Genauere Modelle lassen sich erstellen, indem mehr Bilder für die Erstellung verwendet werden. [Hof19]



Abbildung 2.8: CC-Tag Typ 3 als Referenzmaß bei der Datenverarbeitung (Eigene Darstellung)

In der Forensik finden sich Verfahren der Photogrammetrie wieder. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf die Wiederherstellung von Objekten und deren räumliche Lage. Um diese Lagebeziehungen zu bestimmen, werden verschiedene Auswerteverfahren und Messmethoden angewandt. Somit ist es möglich, von Objekten, welche zunächst auf Fotografien abgebildet werden, ihre dreidimensionale Gestalt zu erhalten. Photogrammetrie wird beispielsweise bei der Dokumentation des Tatortes verwendet. Es gibt allerdings auch andere Anwendungen, wie in der Robotik, der industriellen Messtechnik, der Architektur, der Medizin oder auch der Dokumentation von Unfällen [Hei17]. [Spr17]

2.8 3D-Scanner

Geräte, welche sowohl reale Objekte als auch Umgebungen analysieren, um deren Eigenschaften, wie zum Beispiel dessen Aussehen und Form zu erfassen, werden 3D-Scanner genannt. Nachdem die entsprechenden Daten aufgenommen wurden, entstehen Punktwolken, welche sich in ihrer Genauigkeit und Dichte unterscheiden. Die Punktwolken werden mithilfe von Software und verschiedenen Techniken bearbeitet, um im Anschluss digitale 3D-Modelle zu generieren. Es gibt dabei eine Vielzahl an unterschiedlichen Scannern, wie die Scanner mit moduliertem Licht, photometrische Sys-

teme, berührungslose passive Scanner und Silhouetten Scanner. In dieser Arbeit soll etwas genauer auf den Strukturlicht Scanner eingegangen werden, da dieser Verwendung fand. [Val10]

Strukturlicht Scanner können als Alternative zu Laserscannern gesehen werden. Diese Scanner werfen Lichtmuster auf das entsprechende Objekt, um so Verformung des Musters zu erkennen. Sie gehören zu den berührungslosen optischen Systemen und wandeln Bildpaare in deren Oberflächeninformationen um. Hierbei wird mit einem trigonometrischen Triangulationsverfahren gearbeitet, wobei die Entfernung zu jedem Punkt berechnet wird. Strukturlicht Scanner verfügen über einen oder auch mehrere Sensoren, um die Form eines Objektes zu bestimmen und verwenden entweder weißes oder blaues LED-Projektionslicht [Ser15]. Ein großer Vorteil dieser 3D-Scanner ist deren Geschwindigkeit, da nicht jeder Punkt einzeln gescannt wird, sondern mehrere Punkte auf einmal bzw. das komplette Sichtfeld aufgenommen werden kann. Dies führt auch zu einer Verringerung der Verzerrung, welche bei schnellen Bewegungen auftritt. [Val10]

In dieser Arbeit wurde, wie im späteren Abschnitt 3.2.2 beschrieben, mit dem 3D-Scanner Artec Leo der Marke Artec 3D gearbeitet (siehe Abbildung 2.9). Bei diesem handelt es sich ebenfalls um einen Strukturlicht Scanner, welcher KI-gesteuert ist und über ein integriertes Display verfügt, auf welchem eine Modellvorschau des gescannten Objekts in Echtzeit möglich ist. Es können zusätzliche Fotos mit einer Kamera aufgenommen werden, um diese im Nachhinein mit den Aufnahmen des Scans in der eigenen Software Artec Studio zu kombinieren, um so eine bessere Textur zu erhalten. Zudem ist er kabellos und als Handscanner vielseitig einsetzbar, wie zum Beispiel beim Scannen von Möbeln, verschiedenen Autoteilen, Statuen und auch beim Scannen von Tatorten. [3Db]



Abbildung 2.9: Für diese Arbeit genutzter 3D-Scanner Artec Leo [3Db]

3 Material und Methoden

In diesem Kapitel sollen die verwendeten Materialien und Hilfsmittel im Abschnitt 3.1 aufgezeigt und im Abschnitt 3.2 die angewandten Methoden erläutert werden. Letzterer beschäftigt sich mit der Vermessung von Händen, der Aufnahme von Hand, Objekt und Griff und der Erstellung von Modellen, welche im Nachhinein in Blender ausgewertet werden.

3.1 Materialien

Für die Aufnahmen, welche im späteren Abschnitt 3.2.2 beschrieben werden, wurde eine braune Vase mit grauen Sprenkeln und gelben Innenleben verwendet (siehe Abbildung 3.1). Die Oberfläche dieser ist glatt und ihr Erscheinungsbild ist nahezu matt.



Abbildung 3.1: Verwendete Vase mit Maßstab (Eigene Darstellung)

Die Abmessungen der Vase, welche mit einem digitalen Messschieber bestimmt wurden, können der Tabelle 3.1 entnommen werden.

Neben der Vase wurden zudem andere Hilfsmittel bzw. Materialien für die Aufnahmen verwendet, diese sind in der Tabelle 3.2 aufgelistet.

Tabelle 3.1: Abmessungen der verwendeten Vase in mm (Eigene Darstellung)

	08.06.	09.06.	10.06.	Mittelwert	Standardabweichung
Vase					
Höhe	153,64	153,88	153,23	153,58	0,2684
Durchm. breiteste Stelle	81,16	81,48	80,56	81,07	0,3813
Durchm. Hals	49,39	49,16	49,14	49,23	0,1134
Durchm. Öffnung	60,80	60,93	60,74	60,82	0,0793
Durchm. Boden	56,32	62,17	60,47	59,65	2,4571

Tabelle 3.2: Verwendete Materialien (Eigene Darstellung)

Bezeichnung	Hersteller	Details
Kamera (vorn)	Nikon D7100	Objektiv: AF-P Nikkor 18-55mm 1:3.5-5.6G
Kamera (oben)	Nikon D7500	Objektiv: AF-S Nikkor 18-140mm 1:3.5-5.6 ED
Kamera (unten)	Nikon D7100	Objektiv: AF-S Nikkor 18-55mm 1:3.5-5.6G
3D-Scanner	Artec 3D	Modell: Artec Leo; kabellos; KI-gesteuert; integriertes Display
Maßstab weiß	Armor Forensics	L-förmiger Maßstab in Millimeterschritten; 455x185 mm
Digitaler Messschieber	Powerfix	Messbereich 150 mm; zwei Nachkommastellen
Digitaler Winkelmesser	Powerfix	von 0° bis 360° mit einer Nachkommastelle
Floureszenzpulver	Sirchie	Flourescent Magnetic Latent Print Powder; Farbe: grün; 30ml
Magnetstab	Coloprint GmbH	Standard Magnetic Powder Applicator; No. 125L
Spurensicherungsfolie	Coloprint GmbH	Gelatine-Spurensicherungsfolie; Farbe: schwarz; Format: 13x18cm
Acryl Stift	Flysea	0,7mm; Farbe: schwarz
Drehteller	Stageonair 4	

3.2 Methoden

Nun soll auf die verschiedenen Methoden und deren Ablauf eingegangen werden. Dabei beschäftigt sich der Unterabschnitt 3.2.1 mit der Vermessung der Hand. Im nachfolgenden Abschnitt 3.2.2 wird der Ablauf der einzelnen Aufnahmen von der Hand, dem Objekt und der Griffe mithilfe eines 3D-Scanners bzw. der Photogrammetrie beschrieben. Der letzte Unterabschnitt 3.2.3 beschäftigt sich danach mit der Erstellung einer beweglichen Hand und der Rekonstruktion des Griffes in Blender.

3.2.1 Handvermessung

Um im späteren Verlauf die Griffe beschreiben zu können und in Blender umzusetzen, wurden zunächst verschiedene Messungen der linken und der rechten Hand vorgenommen. Dabei handelt es sich um die Hände der Autorin. Zum einen wurden Messstrecken der Hände gemessen, um so auf die Größe der Hand zu schließen und zum anderen wurden die ROMs der verschiedenen Gelenke vermessen. Abbildung 3.2 zeigt die beiden Hände von oben fotografiert, dabei liegen diese flach auf einem Blatt Papier mit Punkten, welches wiederum auf einem Tisch liegt. Das Papier dient hier dazu, damit die Finger in einem bestimmten Abstand zueinanderstehen und beide Hände gleich liegen.

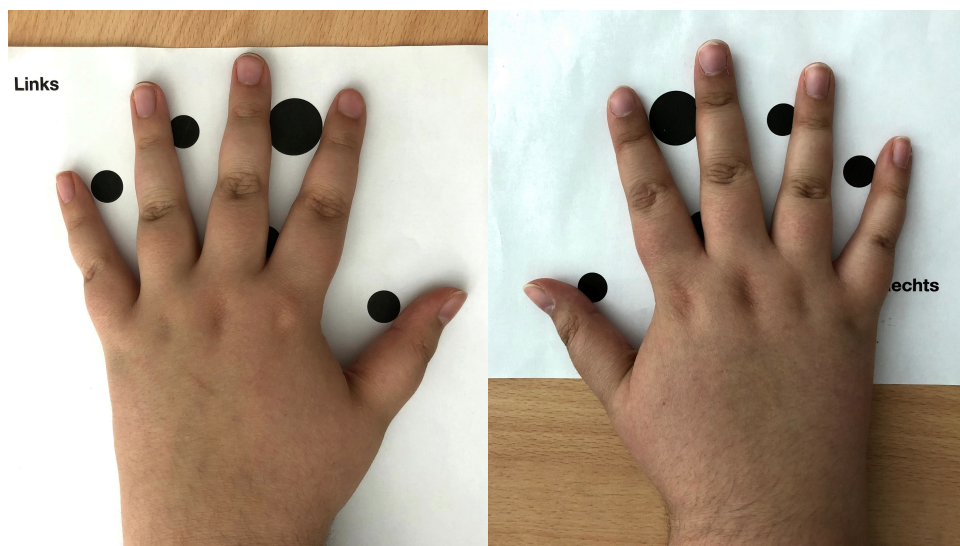


Abbildung 3.2: Linke und rechte Hand der Autorin flach von oben fotografiert (Eigene Darstellung)

Es wurden insgesamt 16 unterschiedliche Messstrecken sowohl an der linken als auch an der rechten Hand mit einem digitalen Messschieber vermessen. Die Strecken werden in der Tabelle 3.3 beschrieben und zusätzlich in Abbildung 3.3 bildlich dargestellt, wobei diese sich am Paper von Ross, Jain und Pankanti aus dem Jahr 1999 orientieren [Pan99].

Tabelle 3.3: Beschreibung der Messstrecken an der Hand (Eigene Darstellung)

Messstreckennummer	Beschreibung
Nr. 1	Oberhalb des Daumengrundgelenks bis unterhalb des Fingergrundgelenks des Kleinen Fingers
Nr. 2	Seitlich unterhalb des Fingergrundgelenks des Zeigefingers bis seitlich unterhalb des Kleinen Fingers
Nr. 3	Unterhalb des Fingergrundgelenks des Zeigefingers bis zu seiner Fingerspitze
Nr. 4	Unterhalb des Fingergrundgelenks des Mittelfingers bis zu seiner Fingerspitze
Nr. 5	Unterhalb des Fingergrundgelenks des Ringfingers bis zu seiner Fingerspitze
Nr. 6	Unterhalb des Fingergrundgelenks des Kleinen Fingers bis zu seiner Fingerspitze
Nr. 7	Oberhalb des Daumenendgelenks bis zu seiner Beugefurche
Nr. 8	Breite des Mittelgelenks des Zeigefingers
Nr. 9	Breite des Endgelenks des Zeigefingers
Nr. 10	Breite des Mittelgelenks des Mittelfingers
Nr. 11	Breite des Endgelenks des Mittelfingers
Nr. 12	Breite des Mittelgelenks des Ringfingers
Nr. 13	Breite des Endgelenks des Ringfingers
Nr. 14	Breite des Endgelenks des Kleinen Fingers
Nr. 15	Höhe des Zeigefingers vor dem Mittelgelenk (Richtung Fingerspitze)
Nr. 16	Höhe des Zeigefingers hinter dem Mittelgelenk (Richtung Handwurzel)

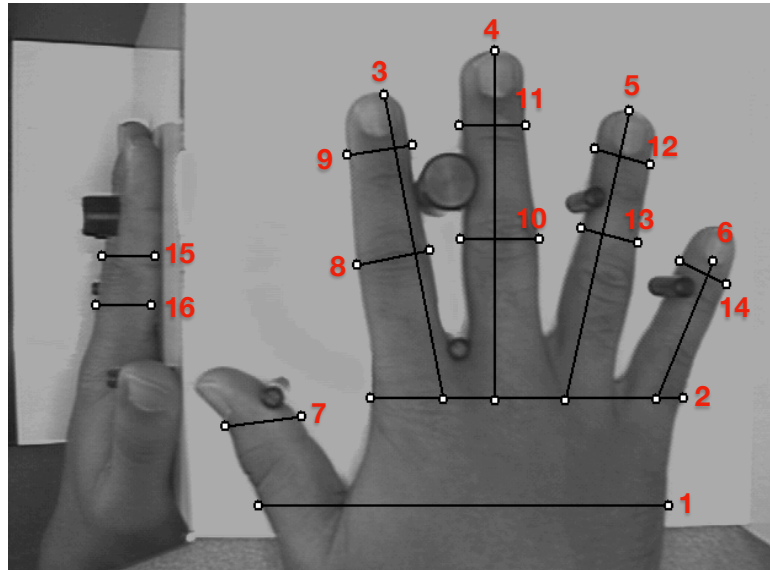


Abbildung 3.3: Bildliche Veranschaulichung der Positionierung der 16 Messstrecken [Pan99] (Beschriftung in rot selbst erstellt)

Die Ausmaße der Bewegungen wurden an der dominanten Hand gemessen, dabei handelt es sich um die rechte Hand. Die Vermessung des Sattelgelenkes fand wie in den Grundlagen 2.4 beschrieben statt. Hierbei wurde der digitale Winkelmesser verwendet, wie auch bei den übrigen Gelenken der Hand. Orientiert wurde sich bei den Messungen an ein Video von der University of Derby, welches sich mit der Goniometrie und deren Messung beschäftigt [oD10].

3.2.2 Aufnahmen mittels Scanner und Photogrammetrie

Um später den Griff rekonstruieren zu können, wurden zunächst verschiedene Aufnahmen erstellt, mit denen danach 3D-Modelle erzeugt wurden. Dazu gehören Aufnahmen der Hand, der Vase mit Fingerabdrücken und die Hand, welche die Vase in zwei verschiedenen Positionen hält. Für die spätere Evaluierung wurden zudem Markierungen in Form von Punkten auf die Hand gesetzt, wobei diese in allen Aufnahmen identisch sind. Die Punkte wurden jeweils unterhalb der Fingergelenke bzw. Daumengelenke gesetzt und zudem auf der Spitze der Fingernägel. Es wurde außerdem das proximale Handgelenk mit einem Strich, welcher mittig einen Punkt besitzt, markiert. Insgesamt wurden somit 20 Punkte auf die rechte Hand angebracht. Während der Aufnahmen wurde zusätzlich ein Armband aus Papier mit verschiedenen Symbolen um das Handgelenk getragen, welches hierbei als Referenzmaß dient. Dieses wurde mit einem weißen Klebeband befestigt und kann der Abbildung 3.4 entnommen werden.

Als erstes wurde mit dem 3D-Scanner Artec Leo die Hand aufgenommen. Dabei wurde der Versuchsaufbau, wie in Abbildung 3.5 zu sehen ist, verwendet. Alle Scans wurden mit dem HD-Mode des Artec Leo aufgenommen, somit entstanden ausschließlich HD-

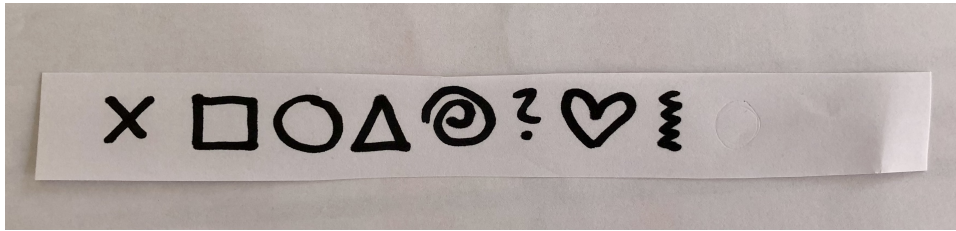


Abbildung 3.4: Armband aus Papier mit unterschiedlichen Symbolen (Eigene Darstellung)

Frames, wobei die HD-data density 16x betrug. Es wurde ein Besenstiel mithilfe von Stühlen und Tischen auf die Höhe der Brust horizontal befestigt. Mittig des Stiels wurde ein Blatt Papier mit verschiedenen Schriftarten und Größen und unterschiedlichen Sprachen mit Klebeband angebracht. Dieses Papier diente ebenfalls als Referenzmaß. Für die Aufnahme wurde der Arm über die Stange gelegt, sodass dieser auf dem Ellenbogen lag und der Unterarm und die Hand locker herunterhingen. Während der Aufnahmen wurde der rechte Arm zusätzlich mit der linken Hand stabilisiert, indem diese den Unterarm umgriff. Die rechte Hand selbst wurde so ruhig wie möglich, leicht gespreizt gehalten. Nachdem alles positioniert wurde, begann der Scanvorgang mit dem Scanner. Hierbei wurde dieser von einer weiteren Person um die Hand bewegt, um so die komplette Hand zu erfassen. Es wurden dabei mehrere Aufnahmen getätigt. Es wurde zudem eine andere Aufnahmemethode für die Hand versucht. Diese bestand aus zwei verschiedenen Aufnahmen, bei denen die Hand flach auflag und einmal die Handinnenfläche und einmal der Handrücken nach oben zeigte. Hierbei lag die Hand wie in der Abbildung 3.2 auf dem Papier mit den Punkten, um so auch beim Wenden der Hand die gleichen Abstände der Finger zu haben.



Abbildung 3.5: Versuchsaufbau bei Scanner-Aufnahmen der Hand und des Griffs (Eigene Darstellung)

Es wurden für die Aufnahmen des Griiffs zwei verschiedene Formen gewählt, dabei handelte es sich bei beiden um pentadigitale Griiffe (siehe Abschnitt 2.5.1). Der erste Griff wird im Nachfolgenden als Normal bezeichnet, dabei wurde die Vase mit allen Fingern um den Bauch gefasst und gehalten. Mit solch einem Griff könnte die Vase von einem Ort zum Nächsten transportiert worden sein. Der zweite Griff soll einen Angriff bzw. einen Schlag mit der Vase zeigen und wird somit künftig als Schlag bezeichnet. Hierbei wurde die Vase kopfüber nahe dem Hals gehalten. Beide Aufnahmen wurden nach dem gleichen Prinzip angefertigt und somit wird der Vorgang nur einmal beschrieben. Der Aufbau der Aufnahmen entspricht dem der ersten Scans von der Hand aus Abbildung 3.5. Die Vase wurde vorher gereinigt und anschließend je nach Griff umgriffen. Als Nächstes wurde der Ellenbogen wiederum auf dem Besenstiel gestützt und mit der linken Hand stabilisiert. Es folgten auch hier jeweils mehrere Scans mit dem 3D-Scanner. Im Anschluss wurde die Vase vorsichtig abgestellt und die Hand wurde von ihr entfernt. Mit einem Magnetstab und grünem Floureszenzpulver wurden danach die Fingerabdrücke sichtbar gemacht und fotografisch aufgenommen. Diese Aufnahmen können der Abbildung 3.6 entnommen werden, wobei a den Griff Normal und b den Griff Schlag zeigt.



Abbildung 3.6: Sichtbarmachung der Fingerabdrücke an der Vase mit Floureszenzpulver. a erster Griff "Normal", b zweiter Griff "Schlag" (Eigene Darstellung)

Die letzten Aufnahmen, welche angefertigt wurden, waren die der Vase mit den sichtbaren Spuren. Hierbei wurden zwei verschiedene Methoden verwendet. Zuerst wurde die Vase mit dem Artec Leo gescannt. Die Vase wurde hierfür auf eine Acrylglasscheibe gestellt, zudem wurden zwei Blätter mit unterschiedlichen Schriften neben diese gelegt. Insgesamt wurde bei dieser Methode dreimal gescannt, die Vase richtig herum, auf dem Kopf mit der Öffnung nach unten und direkt von oben, um das Innere der Vase zu scannen. Zudem wurden zusätzliche Fotografien der Vase mit einem Mobil Telefon

angefertigt. Als zweite Methode zur Aufnahme der Vase wurde die Photogrammetrie genutzt. Hierbei wurde ein Drehteller verwendet, auf welchem sich ein Stativ mit einem Acrylglasgestell befand. Es wurden drei Kameras für die Aufnahmen verwendet, wobei eine frontal zum Gestell stand, die zweite schräg oberhalb und die letzte schräg unterhalb. Die Kameras stehen, wie in Abbildung 3.7 zu sehen, mit etwas Abstand zueinander um den Drehteller. Alle Kameras hatten die gleichen Einstellungen, wobei der ISO-Wert 400, die Belichtungszeit $1/20$ s und die Blendenöffnung 20f betrugen. Um den Drehteller wurden Studioleuchten gestellt, für eine gute Beleuchtung. Die Vase wurde mit einem CC-Tag, welches daneben lag, auf dem Glas platziert. Der Drehteller wurde mithilfe des Programms stageonair control auf die Stage Stufe 2, welche die geringste Geschwindigkeit ist, gestellt und gestartet. Mit dem Programm digiCamControl wurden danach alle fünf Sekunden 53 Mal alle drei Kameras gleichzeitig ausgelöst. Es entstanden hierbei insgesamt je 159 Fotos der Vase. Nachdem die Vase aufgenommen wurde, wurden die Fingerabdrücke mit einer Spurensicherungsfolie abgenommen und sichergestellt, danach wurde die Vase für den zweiten Griff gereinigt und das erläuterte Vorgehen wurde wiederholt. Eine grafische Darstellung des Ablaufs findet sich zusätzlich im Anhang A wieder.



Abbildung 3.7: Aufbau des Photogrammetrie Setups (Eigene Darstellung)

Um aus den entstandenen Aufnahmen die entsprechenden 3D-Modelle zu generieren, wurden zwei verschiedene Programme verwendet. Bei den fotogrammetrischen Aufnahmen der Vase mit den sichtbaren Spuren wurde die Software Meshroom verwendet, da diese auch Anwendung in vergangenen Arbeiten fand, wird die Datenverarbeitung mit diesem Programm hier nicht näher erläutert. Die Aufnahmen, welche mit dem Artec Leo entstanden sind, wurden mit der eigenen Software Artec Studio 16 weiterverarbeitet. Dabei bestand die Datenverarbeitung bei allen Scans aus den gleichen Grundprozessen. Der erste Schritt, das Global Registration, ist besonders für die weiteren Schritte von großer Bedeutung. Hierbei werden alle Einzelbildoberflächen in ein einziges Koordi-

natensystem mithilfe von speziellen Geometriepunkten konvertiert. Für den Fall der Vase mit den sichtbaren Spuren, bei welcher mehrere Aufnahmen entstanden, wurden vor dem Schritt der Global Registration die verschiedenen Scans mittels manuellem setzen von Punktpaaren miteinander aligniert. Als Nächstes folgte die Fusion, diese erstellt ein polygonales 3D-Modell indem die einzelnen Bilder miteinander verschmolzen werden. Genauer wurde hier die Sharp Fusion verwendet, welche feine Merkmale rekonstruiert und sich besonders gut für industrielle Objekte oder den menschlichen Körper eignet. Da das Mesh nach der Fusion sehr komplex werden kann, wurde im Anschluss die Mesh Simplification angewandt. Hierbei wird unter der Voraussetzung, dass die Genauigkeit des Modells beibehalten wird, das Mesh vereinfacht, um so die weitere Verarbeitung nicht zu verhindern. Im letzten Schritt, dem Texturing wurde dann die jeweilige Textur, welche beim Scannen mit der Farbkamera erfasst wurde, auf das Mesh projiziert. Es wurde zudem das Eraser Tool verwendet, dabei können unerwünschte Element, wie zum Beispiel der Hintergrund, entfernt werden. Dieses Tool wurde entweder vor der Verarbeitung angewandt, falls das Modell zu groß für die nächsten Schritte war oder vor der Texturierung. Außerdem wurde der Small-Objekt Filter verwendet, mit diesem ist es möglich, mehrere kleinere Artefakte auf einmal zu löschen. [3Da]

3.2.3 Modelle in Blender

Um den Griff aus den entstandenen Modellen zu rekonstruieren, wurde zuerst das Modell der Hand mit der Software Wrap² verarbeitet, welche mit einer Node-Graph Architektur arbeitet. Hierbei wurde ausschließlich das Feature des Wrappings verwendet, um der Hand ein Basemesh zu generieren. Es wurde zum einen der Scan der Hand geladen und zum anderen ein Basemesh einer Hand, welches das Programm in verschiedenen Positionen mitliefert. In diesem Fall wurde das Basemesh einer offenen Hand mit leicht gespreizten Fingern gewählt (siehe Abbildung 3.8a).

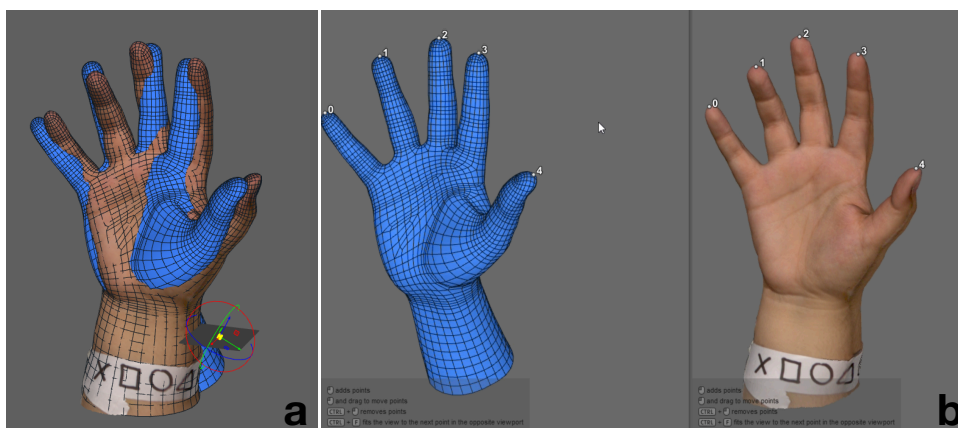


Abbildung 3.8: Hand Modell und blaues Basemesh in Wrap. a Modell und Basemesh vor Wrapping, b Modell und Mesh mit SelectPointPairs Option (Eigene Darstellung)

² <https://www.russian3dscanner.com>, Abgerufen am 07. Juli 2022

Zusätzlich wurde die Option `SelectPointPairs` verwendet, um das Wrapping noch genauer zu gestalten. Hierbei wurden sowohl beim Scan als auch beim Basemesh die Fingerspitzen mit Punkten versehen, um eine genauere Übereinstimmung zu erhalten (siehe Abbildung 3.8b). Das Wrapping wurde dann automatisch vom Programm ausgeführt. Die nächsten Schritte im Graphen dienen danach nur noch der erneuten Verknüpfung der Textur mit der entstandenen Hand und deren Mesh. Hierbei wurde mit `ExtrapolateImage` zusätzlich die Textur erweitert, um so Löcher im Modell zu vermeiden, welche durch das neue Verknüpfen mit der Textur und des Scans entstehen können. Danach wurde alles verbunden und die Hand wurde mit ihrem neuen Mesh gespeichert. Die Abbildung 3.9 zeigt den kompletten Aufbau des Graphen, welcher für das oben beschriebene Vorgehen in `Wrap` verwendet wurde.

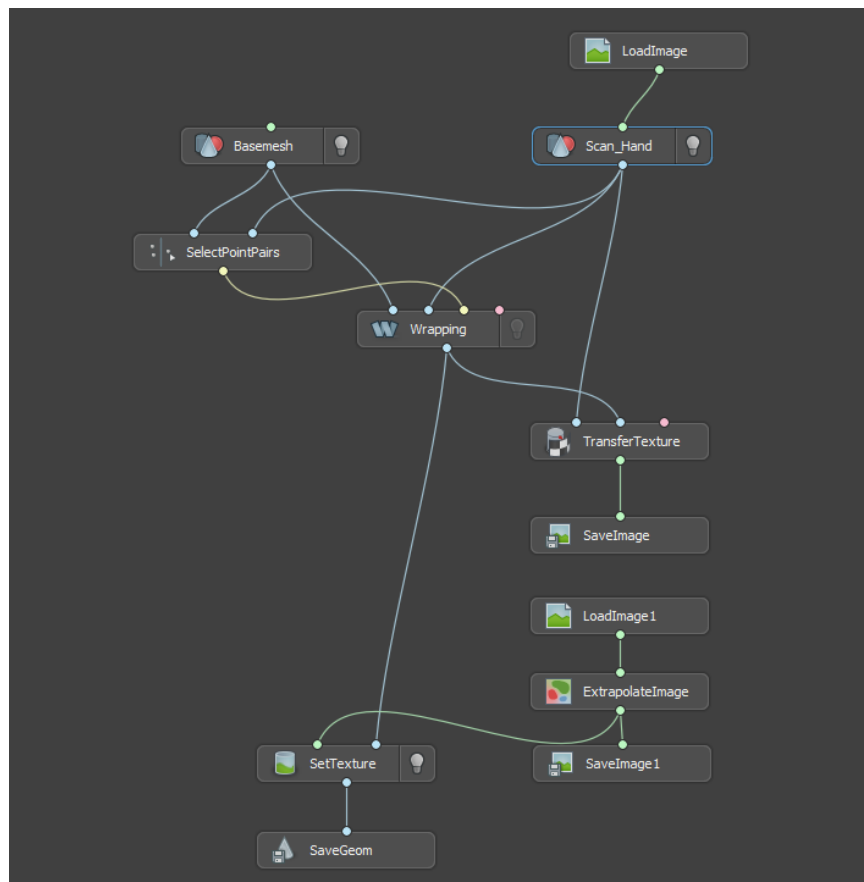


Abbildung 3.9: Aufbau des Node-Graphen in `Wrap` für das Wrapping und Verknüpfen der Textur (Eigene Darstellung)

Nach der Verwendung des Programms `Wrap` wurde weiter mit der Open Source Software `Blender` gearbeitet. Hierbei wurde sich an einigen Stellen an Video Tutorials orientiert, welche angegeben sind. Alle verwendeten Modelle wurden hierfür skaliert, damit sie ihrer realen Größe entsprechen. Im ersten Schritt der Rekonstruktion wurde zunächst das Modell der Hand importiert, dieses musste im Vergleich zu den anderen Modellen noch zusätzliche Schritte durchlaufen, damit es sich im Nachhinein bewegen lässt. Dafür wurde die Hand im `Edit Mode` mit `Armatures` bestückt, welche im Inneren der Hand liegen, dies wird auch `Rigging` genannt. Dabei dienen diese `Armatures` als Knochen und

Gelenke der Hand. Die Positionierung dieser kann der Abbildung 3.10 entnommen werden. Die drei Armatures im Daumen wurden zusätzlich um ihre eigene Achse gedreht, damit die Achsen der Gelenke mit der einer realen Hand übereinstimmen. Das Mesh der Hand wurde als Nächstes mit den Armatures vereint, damit sich bei den späteren Bewegungen beides gemeinsam bewegt. Es wurden alle Komponenten im Object Mode ausgewählt und danach unter Set Parent To mit der Option With Automatic Weights vereinigt.³

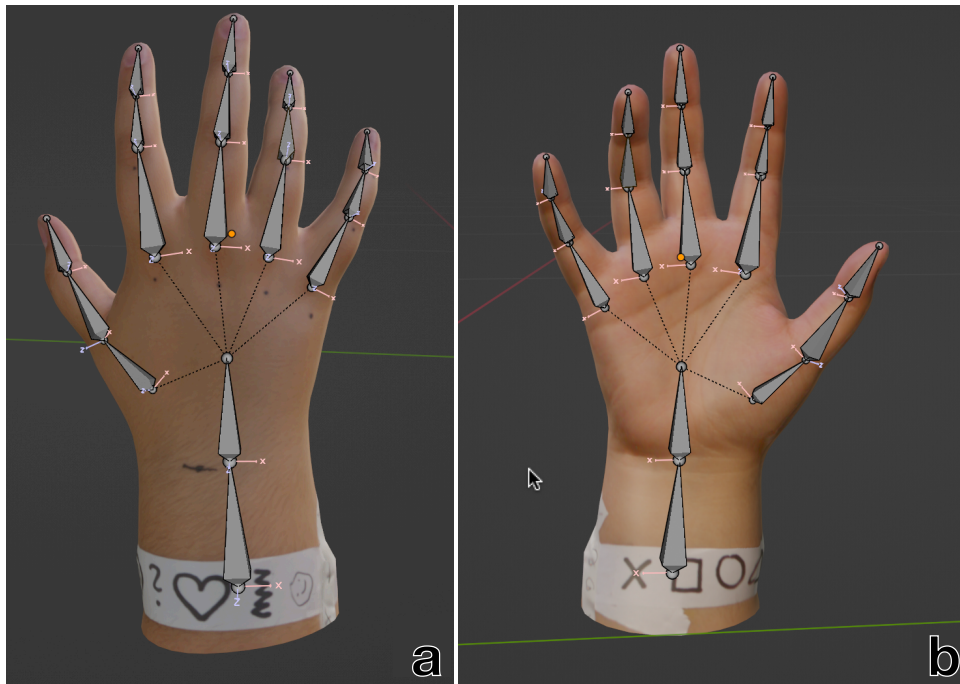


Abbildung 3.10: Positionierung der Armatures. a Aus Sicht des Handrückens, b Aus Sicht der Handinnenfläche (Eigene Darstellung)

Damit sich das Mesh der Hand ordnungsgemäß mit den einzelnen Armatures bewegt und es der menschlichen Hand möglichst nah kommt, wurde danach im Weight Paint Mode gearbeitet. Hier wurden durch das Parenting schon Weights an den entsprechenden Stellen der Gelenke angebracht, wie die Abbildung 3.11a zeigt, allerdings waren diese noch nicht perfekt und es entstanden beim Bewegen der Finger große Verformungen des Meshs. Um dies zu verbessern, wurde, wie in Abbildung 3.11b zu sehen ist, die Einstellung Weight auf null gesetzt. Danach wurden die entsprechenden Stellen, welche auf dem Mesh zu erkennen waren, übermalt, bis das Ergebnis aus Abbildung 3.11b erreicht war. Dies wurde für jeden Finger an den Grundgelenken angewandt und auch für die innen Seite der Hand, damit die Auswirkung der Bewegungen auf das Mesh gering bleibt. Die restlichen Gelenke wiesen keine Weights auf, welche die Bewegungen maßgeblich beeinflussen und wurden somit nicht bearbeitet.⁴

³ https://www.youtube.com/watch?v=M6GWX_0aZhs&list=PLnxbzdzq9G5lj0C9tIBljynUwwfHeWVLhB&index=5, Abgerufen am 21. April 2022

⁴ <https://www.youtube.com/watch?v=6lFm8laDk0k&list=PLnxbzdzq9G5lj0C9tIBljynUwwfHeWVLhB&index=6>, Abgerufen am 21. April 2022

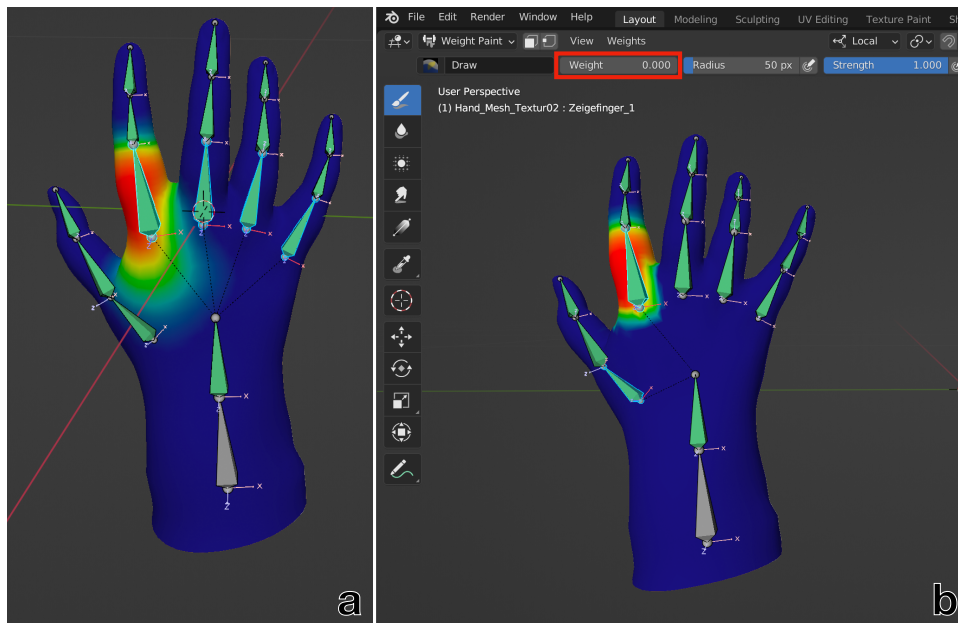


Abbildung 3.11: Anwendung des Weight Paint. a Hand vor dem Weight Paint, b Ergebnis nach Weight Paint mit roter Einzeichnung des veränderten Wertes (Eigene Darstellung)

Als letzten Schritt wurden die vorher gemessenen Winkel der realen Hand der Autorin für das Modell in Blender übernommen. Dabei wurde im Pose Mode unter Properties für jeden Knochen unter Add Bone Constraint die Limit Rotation hinzugefügt (Abbildung 3.12a). Nun wurden die Achsen ausgewählt, welche beschränkt werden sollten und mit den vorher gemessenen Werten bestückt. Weiterhin wurde die Option Owner zu Local Space gesetzt, siehe Abbildung 3.12b. Zusätzlich wurde unter Add Bone Constraint Copy Rotation ausgewählt. Mit dieser Option ist es möglich, das Grundgelenk eines Fingers zu bewegen und die restlichen Gelenke folgen dieser Beugung oder Streckung, wie es im Abschnitt 2.5 beschrieben wurde. Dabei wurde zunächst das Mittelgelenk und danach das Endgelenk markiert und daraufhin die Copy Rotation ausgewählt. Des Weiteren mussten Target und Owner auf Local Space gestellt werden. Als Nächstes wurde das Grundgelenk und danach das Mittelgelenk markiert und das Vorgehen wurde wiederholt. Dies musste bei alle Finger mit Ausnahme der Daumengelenke angewandt werden. Es ist zudem wichtig, dass in den Einstellungen der Bone Constraints die Copy Rotation vor der Limit Rotation aufgelistet ist, andernfalls werden die Bewegungsradien nicht übernommen (siehe Abbildung 3.12b). Nachdem alle Knochen eingestellt wurden, konnte die Hand in den entsprechenden Bewegungsausmaßen bewegt werden, indem die jeweiligen Armatures markiert und rotiert wurden.

Nun wurden die beiden Griffe Normal und Schlag mit der beweglichen Hand und dem Modell der jeweiligen Vase rekonstruiert, wobei der Vorgang des Ansetzens gleich war. Zuerst wurde das Modell der Hand kopiert, damit es zweimal zur Verfügung stand. Danach wurde die Vase mit den sichtbaren Spuren importiert und skaliert. Als Nächstes wurden die Finger bzw. die Hand an die Vase platziert, dabei wurde sich an den Ab-

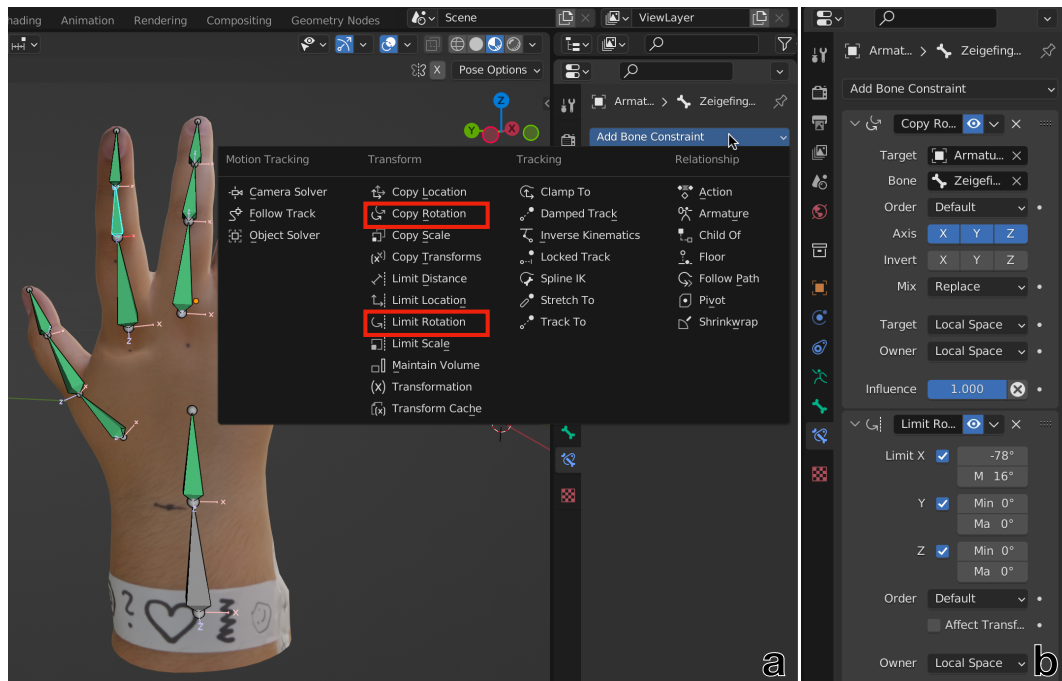


Abbildung 3.12: Einstellung der Bone Constraints Limit Rotation und Copy Rotation. a Add Bone Constraint, b Reihenfolge der Constraints und Einstellung der gemessenen Winkel (Eigene Darstellung)

drücken orientiert. Hierbei wurde allerdings auf den Constraint Copy Rotation bei allen Fingern verzichtet, da dieser Schwierigkeiten beim Positionieren der Finger bereitete und so eine Ausrichtung nach den Spuren nicht möglich war. Da es sich bei der Hand um ein steifes Modell handelt und nicht wie in echt die Haut nachgibt, wenn sie etwas berührt, wurden die Finger bzw. die Stellen, welche die Vase berühren, leicht in die Vase gesetzt. Der Vorgang des Platzierens erstreckte sich bei beiden Modellen über zwei bis drei Tage hinweg. Die am Ende entstandenen Griffe können der Abbildung 3.13 entnommen werden.

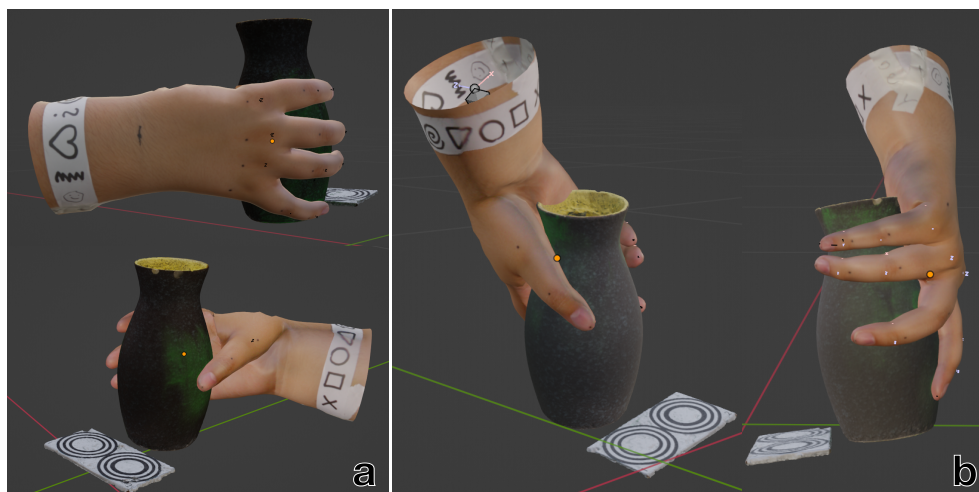


Abbildung 3.13: Rekonstruierte Griffe. a Griff Normal, b Griff Schlag (Eigene Darstellung)

Als Nächstes wurde der jeweilige positionierte Griff mit dem gescannten Modell des Griffes übereinandergelegt. Wichtig ist hierbei zu sagen, dass die Griffmodelle erst in diesem Schritt zum ersten Mal gesehen wurden und vor der fertigen Rekonstruktion keine Übergabe dieser stattfand. Ausgerichtet wurden die Modelle anhand der beiden Vasen und der rekonstruierte Griff wurde zunächst nicht berücksichtigt und ausgeblendet. Bei den Vasen wurde sich beim Übereinanderlegen an deren Form und an zwei kleinen Beschädigungen an der Vasenöffnung, zu sehen in Abbildung 3.14a, orientiert. In der Abbildung 3.14b ist die Überlagerung der Vasen von Griff Normal und in c die des Griffes Schlag zu sehen. Im letzten Schritt wurde die vorher platzierte Hand wieder eingeblendet und es folgten Messungen in Blender. Hierbei wurden die Entfernungen der Punkte, welche auf dem Handrücken markiert waren, zueinander gemessen und notiert. Es wurden bei beiden Griffen jeweils drei Messungen an unterschiedlichen Tagen vorgenommen.

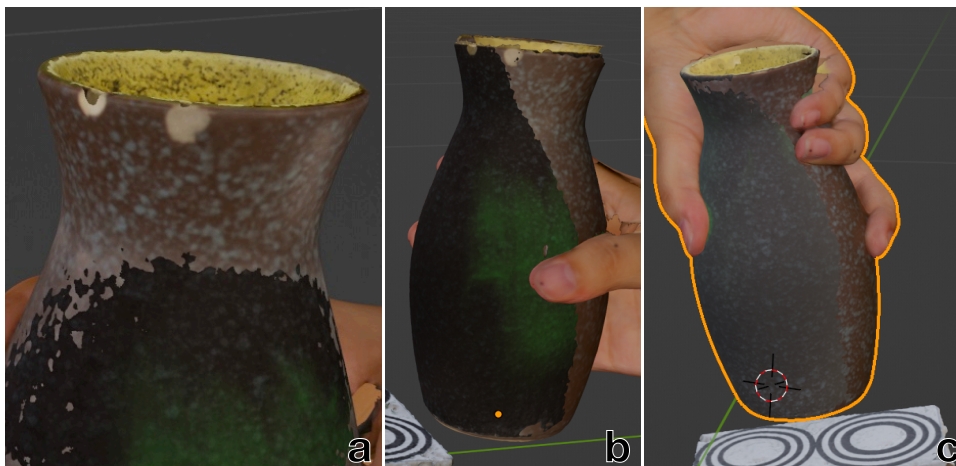


Abbildung 3.14: Überlagerung der Vasen in Blender. a Orientierungspunkte beim Ausrichten der Vase, b Vasen bei Griff Normal, c Vasen bei Griff Schlag (Eigene Darstellung)

4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden kurz die entstandenen Ergebnisse der vorher erläuterten Methoden dargestellt. Dabei werden im Abschnitt 4.1 die entstandenen Modelle gezeigt und der Abschnitt 4.2 stellt die Ergebnisse, welche mit Blender entstanden sind und die daraus resultierenden Messungen, dar. Die Ergebnisse der Handvermessungen sind im Anhang B zu finden. Dabei werden die Messungen der Messstrecken in der Tabelle B.3 und die der Bewegungsausmaße der einzelnen Gelenke in der Tabelle B.2 aufgelistet.

4.1 Entstandene Modelle

Dieser Abschnitt stellt kurz die entstandenen Modelle der verschiedenen Aufnahmen mittels Scanner bzw. Photogrammetrie Aufnahmen dar. Da mehrere Modelle bei den unterschiedlichen Aufnahmen entstanden sind, wird außerdem darauf eingegangen, welche der aufgezeigten Modelle für die weitere Verarbeitung in Blender verwendet wurden. Alle Modelle wurden für die Abbildungen in Meshlab geöffnet und fotografiert.

Aus den Aufnahmen der Hand, wobei die komplette Hand in der hängenden Position aufgenommen wurde, konnten zwei Modelle erstellt werden. Es handelt sich hierbei um unterschiedliche Aufnahmen, dies ist auch an der unterschiedlichen Positionierung der Finger in den Modellen zu erkennen. Das erste Modell, zu sehen in Abbildung 4.1a, weist dabei leichte Verzerrungen an den Fingern, genauer an den Fingernägeln auf. Solche sind im Modell Nummer 2 nicht zu finden (siehe Abbildung 4.1b).

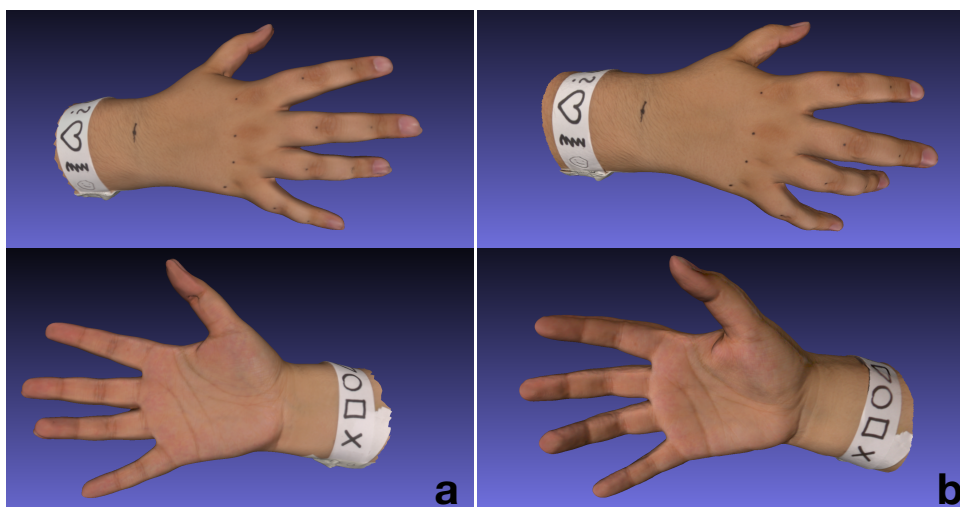


Abbildung 4.1: Modelle der Hand mit kompletten Aufnahmen der Hand. a Modell Nummer 1, b Modell Nummer 2 (Eigene Darstellung)

Die zweite Aufnahmemethode für den Scan der Hand, bei welcher die Hand zweimal gescannt wurde, kann der Abbildung 4.2 entnommen werden. Dabei zeigt a das Modell des Handrückens und b das der Handinnenfläche, wobei bei beiden Modellen jeweils der hintere Teil, welcher nicht abgebildet ist, komplett entfällt. Nach Alignierung der beiden Seiten entstand danach das Modell, welches in Abbildung 4.2c zu sehen ist. Zu sehen sind hier zahlreiche Löcher im Bereich der Finger und Verzerrungen. Aufgrund dieser Ergebnisse wurde sich für die weitere Verarbeitung in Blender für das zweite Modell aus Abbildung 4.1b entschieden.

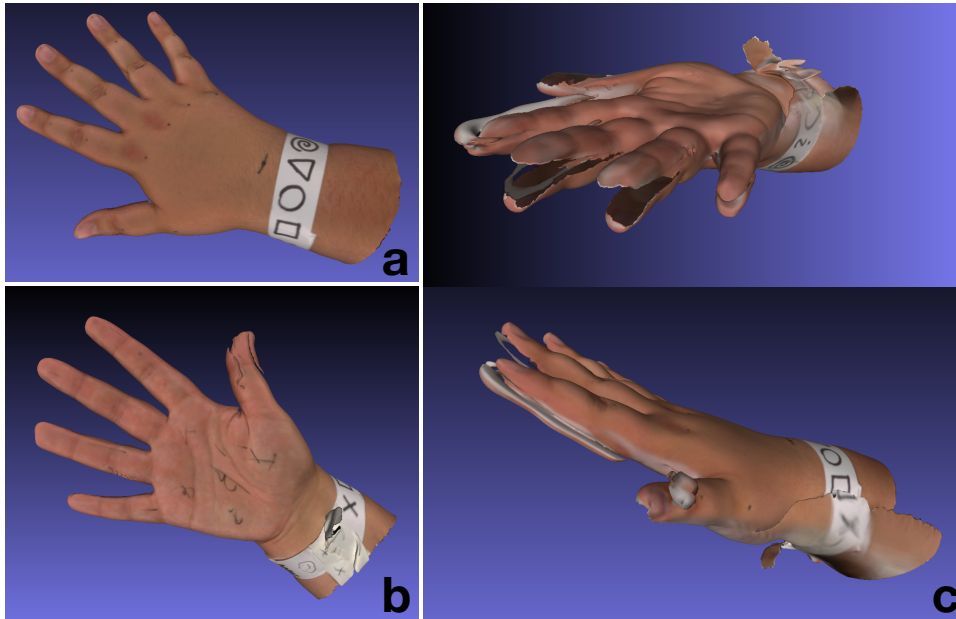


Abbildung 4.2: Modelle der Hand mit zwei Aufnahmen von vorn und hinten. a Modell des Handrückens, b Modell der Handinnenfläche, c Modell der kompletten Hand nach Alignierung (Eigene Darstellung)

Bei den Aufnahmen der Vase mit den sichtbaren Spuren des ersten Griffs entstanden drei Modelle mithilfe des Scanners und ein Modell mittels der Photogrammetrie Aufnahmen (siehe Abbildung 4.3). Die Modelle 1 und 2, zu sehen in Abbildung 4.3a und b, sind dabei die gleichen Scans und beinhalten zusätzlich die Aufnahmen der Vase, welche von oben und vom inneren angefertigt wurden. Zu sehen sind bei beiden Scans leichte Verzerrungen und die Abdrücke der Hand sowie deren Oberfläche sind nur verschwommen zu erkennen. Das dritte Modell in c zeigt wiederum den gleichen Scan, allerdings wurden hier die Aufnahmen von oben nicht genutzt und das Innenleben der Vase entfällt. Die Verzerrungen entfallen und die Spuren sind deutlicher zu erkennen, jedoch sind die Papillarlinien wiederum verschwommen. Das Modell, welches mithilfe der Photogrammetrie generiert wurde, weist keine Verzerrungen auf und die Spuren der Hand sind deutlich zu erkennen (siehe Abbildung 4.3d). Aufgrund dieser Ergebnisse wurde sich für die weitere Arbeit für das letzte Modell, welches mit dem Photogrammetrie Setup aufgenommen wurde, entschieden.

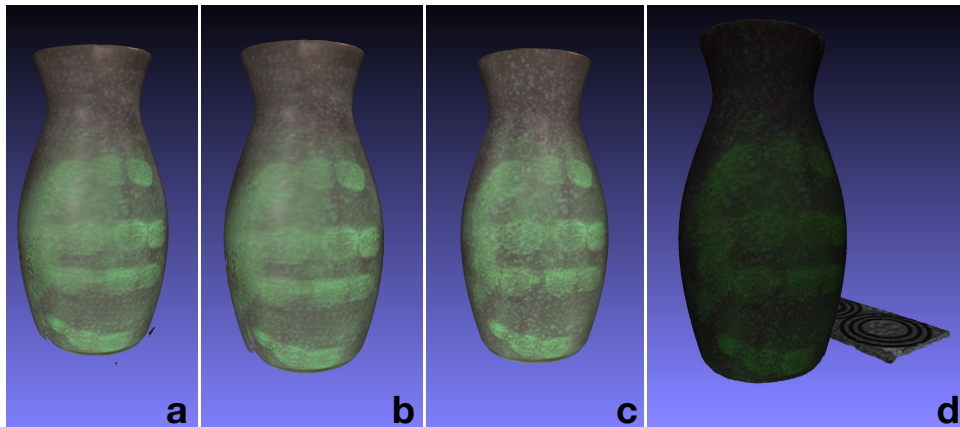


Abbildung 4.3: Modelle der Vase mit sichtbaren Spuren des Griffes Normal. a Modell Nummer 1, b Modell Nummer 2, Modell Nummer 3 ohne Innenleben der Vase, d Modell mit Photogrammetrie Aufnahmen der Vase (Eigene Darstellung)

Die entstandenen Modelle der Vase mit den Spuren des zweiten Griffes finden sich in der Abbildung 4.4 wieder. Hierbei handelt es sich um zwei Modelle, wobei das Modell aus a aus den Aufnahmen des Scanners und Modell b aus denen des Photogrammetrie Setups entstanden sind. Bei beiden Modellen entstanden keine Verzerrungen und die Abdrücke sind gut erkennbar. Das Modell b bildet diese und die gesamte Oberfläche der Vase jedoch in einer besseren Qualität ab, somit wurde auch dieses für die Rekonstruktion gewählt.

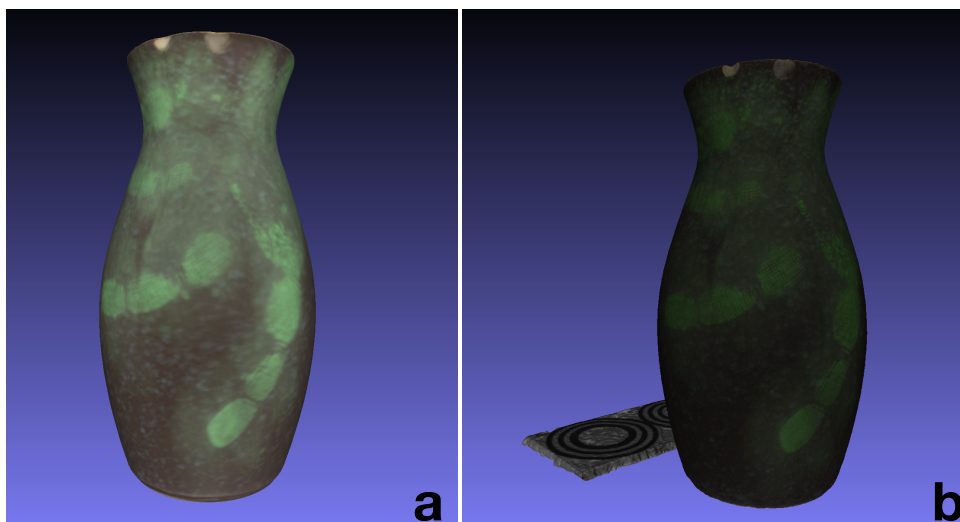


Abbildung 4.4: Modelle der Vase mit sichtbaren Spuren des Griffes Schlag. a Modell mit Scan Aufnahmen, b Modell mit Photogrammetrie Aufnahmen der Vase (Eigene Darstellung)

Für den ersten Griff entstanden zwei Modelle aus unterschiedlichen Scans, zu sehen sind diese in Abbildung 4.5, wobei a das erste und b das zweite Modell darstellen. Bei beiden ist zu erkennen, dass die Unterseite eine Vielzahl an Löchern aufweist und auch manche Finger von der Unterseite nicht generiert werden konnten. Somit fehlen bei beiden Modellen die Messpunkte des kleinen Fingers, wobei Modell a einen Punkt mehr

aufweist. Allerdings wurde sich dennoch für Modell b entschieden, da die Textur der Vase in Modell a verschoben wurde und somit nicht mit dem Modell der Vase und den sichtbaren Spuren übereinstimmt. Dies wird ersichtlich, wenn jeweils die ersten Bilder beider Modelle in Abbildung 4.5 miteinander verglichen werden. Hier ist zu erkennen, dass die Beschädigungen der Vase bei beiden an einer unterschiedlichen Stelle liegen.



Abbildung 4.5: Modelle des Griffs Normal. a Modell Nummer 1 mit verschobener Textur der Vase, b Modell Nummer 2 (Eigene Darstellung)

Aus den Scans des Griffs Schlag konnten drei verschiedene Modelle erstellt werden. Die Modelle 2 und 3, zu sehen in 4.6b und c, weisen hierbei Verzerrungen bei den Fingern und der Vase auf und die Hände sind uneben dargestellt. Das Modell 1 aus a weist weniger bis keine Verzerrungen der Hand auf, allerdings treten diese am Unterarm auf. Alle drei Modelle besitzen kleinere Löcher, welche sich in den Zwischenräumen der Finger und der Vase befinden. Für die weitere Arbeit wurde sich für das erste Modell aus Abbildung 4.6a entschieden, da dieses keine Verzerrungen an den Messpunkten aufzeigt.

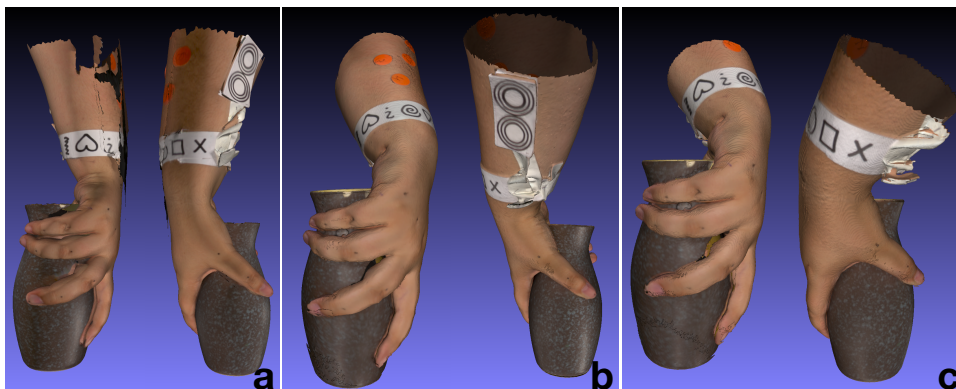


Abbildung 4.6: Modelle des Griffs Schlag. a Modell Nummer 1, b Modell Nummer 2, c Modell Nummer 3 (Eigene Darstellung)

4.2 Wrap und Blender Ergebnisse

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit den Ergebnissen der Software Wrap und Blender. Wobei vor allem die Ergebnisse der Rekonstruktion und deren Messungen aufgezeigt werden.

Die Abbildung 4.7 zeigt das Ergebnis des automatischen Wrappings mittels der Software Wrap, nach dem der Node-Graph, wie in der Abbildung 3.9 zu sehen, durchlaufen wurde. Dabei stellt 4.7a das Resultat nach dem Wrapping in der Software dar, wobei das Basemesh um das Handmodell gelegt wurde. Das Modell der Hand vor der Verarbeitung mittels Wrap kann der Abbildung 4.7b entnommen werden, wobei hier noch kein Mesh zu erkennen ist. Das fertige Modell mit eigenem Mesh, welches für die weitere Arbeit verwendet wurde, kann der Abbildung 4.7c entnommen werden.

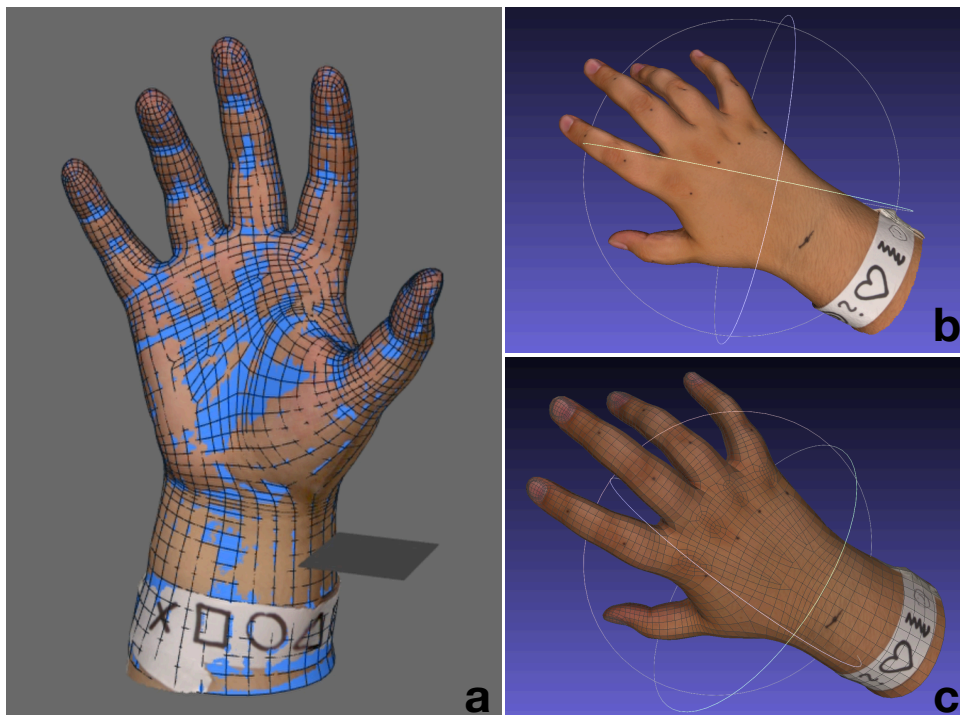


Abbildung 4.7: Ergebnis des automatischen Wrappings mittels Wrap. a Überlagerung des gescannten Modells und des Basemeshs, b Modell vor Bearbeitung mit Wrap, c Modell nach Bearbeitung mit Mesh (Eigene Darstellung)

Durch das Rigging des Handmodells lässt sich dieses an den einzelnen Armatures vollständig bewegen. Diese Bewegungen können durch manuelle Rotationen der einzelnen Gelenke im Pose Mode durchgeführt werden. Die Abbildung 4.8 zeigt am Beispiel des Zeigefingers, wie dieser sich bewegen lässt. Dabei Beugen und Strecken sich Mittel- und Endgelenk, wenn das Grundgelenk bewegt wird, dabei werden die Winkel der einzelnen Gelenke beibehalten und nicht verändert. Allerdings lassen sich die Gelenke durch die Einstellung Copy Rotation nicht einzeln bewegen, sondern nur gemeinsam.

Für die Abbildungen 4.8b, c und d wurde diese Einstellung versteckt, damit es möglich war, die Gelenke einzeln zu bewegen und die Winkel zu messen. Dabei zeigt Abbildung b den Zeigefinger mit gemessenen Winkelmaßen des Mittel- und Endgelenks. In Abbildung c kann die Beschränkung des Mittelgelenks und in d die des Endgelenks abgelesen werden. Bei beiden wurden alle Achsen ausgewählt und somit beschränkt, wobei nur die x-Achse beweglich gemacht wurde, und mit den realen Winkelabmessungen versehen wurde. Es ist zu sehen, dass das Mittelgelenk um 94° gebeugt wurde und dies auch das maximale Maß an Beugung für dieses Gelenk ist. Dabei muss beachtet werden, dass die Hand nicht mit gestreckten Fingern, sondern mit leicht gebeugten aufgenommen wurde. Somit wurden die maximal zu erreichenden 94° aufgeteilt in 78° Beugung und 16° Streckung. Dies wurde auch bei den anderen Gelenken angewandt, falls diese nicht ausgestreckt im Modell abgebildet waren. Das Endgelenk wurde nur um 46° gebeugt, was nicht die maximale Rotation ist, jedoch liegt diese Bewegung im Bereich der Bewegungsausmaße, welche eingestellt ist.

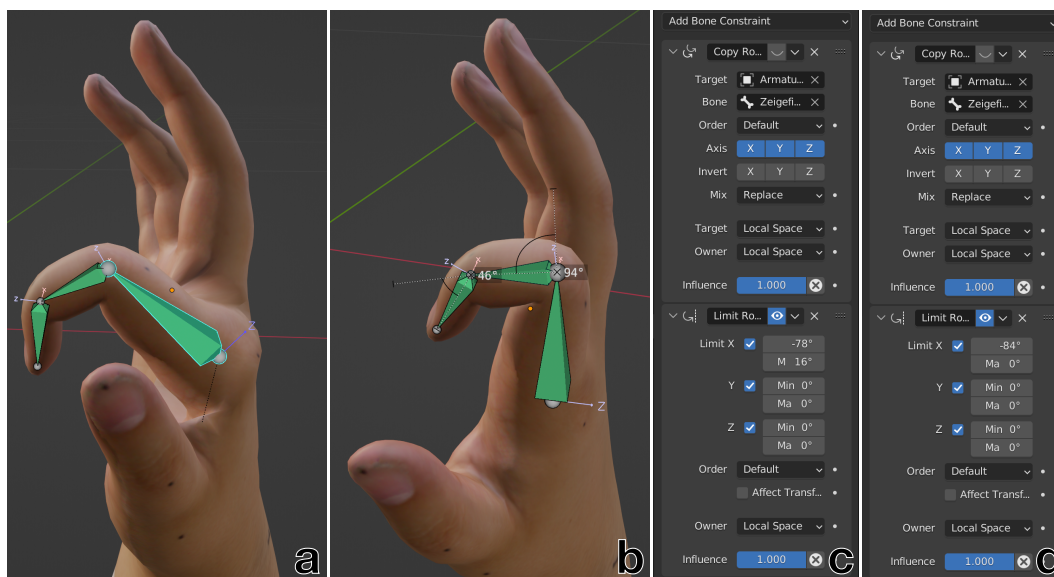


Abbildung 4.8: Bewegungsmöglichkeiten des Handmodells am Beispiel des Zeigefingers in Blender. a Bewegung des Zeigefingers mit Copy Rotation, b Zeigefinger mit Winkelmaßen an den Gelenken ohne Copy Rotation, c Bewegungseinschränkung des Mittelgelenks, d Bewegungseinschränkung des Endgelenks (Eigene Darstellung)

Das einzelne Ergebnis der Rekonstruktion des Griffes Normal kann der Abbildung 3.13a entnommen werden. Nach der Übereinanderlegung der positionierten Hand mit dem Modell des gesamten Griffes entstand das Ergebnis, welches in der Abbildung 4.9 dargestellt ist. Hierbei sind verschiedene Sichten auf dem Griff abgebildet. Bei der jeweils helleren Hand handelt es sich um die rekonstruierte und die dunklere Hand stellt das Griffmodell dar. Damit die beiden Hände besser unterschieden werden können, findet sich im Anhang C zusätzlich die Abbildung C.1. Hier wurde das Modell der Hand, welche an die Vase platziert wurde, in Blender ausgewählt und somit orange umrandet.

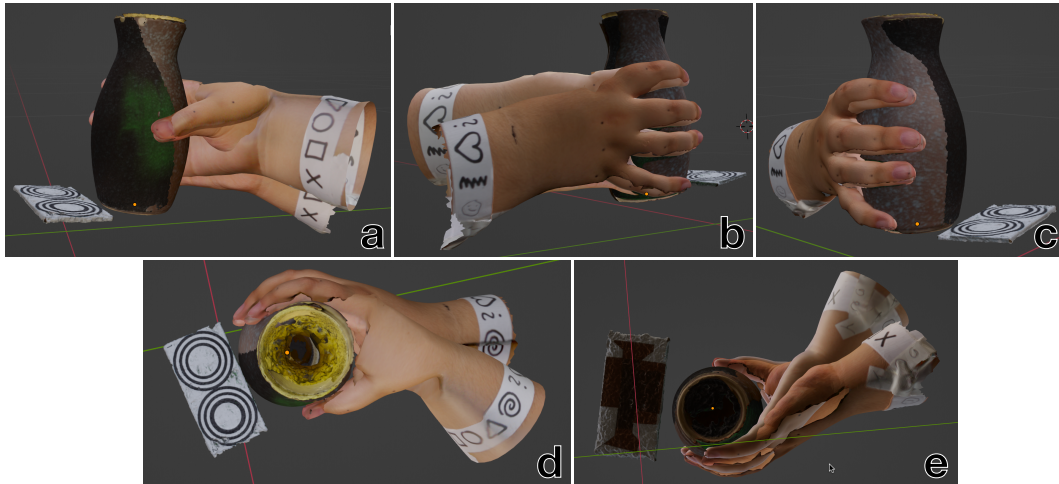


Abbildung 4.9: Rekonstruierter Griff Normal mit Modell des Griff Normal übereinander liegend.
a Daumensicht, b Handrückensicht, c Fingersicht, Draufsicht, d Sicht von Unten
(Eigene Darstellung)

Die Messpunkte, welche zur Bestimmung der Entfernung zwischen Handmodell und Modell des Griff Normal verwendet und auf die Hand vor den Aufnahmen angebracht wurden, können der Abbildung 4.10 entnommen werden. Dabei handelt es sich nicht um die verwendeten Punkte, sondern nur um eine Veranschaulichung, damit diese nachvollziehbar sind. Insgesamt handelt es sich um insgesamt 20 Messpunkte, welche bei beiden Griffen Normal und Schlag gemessen wurden.

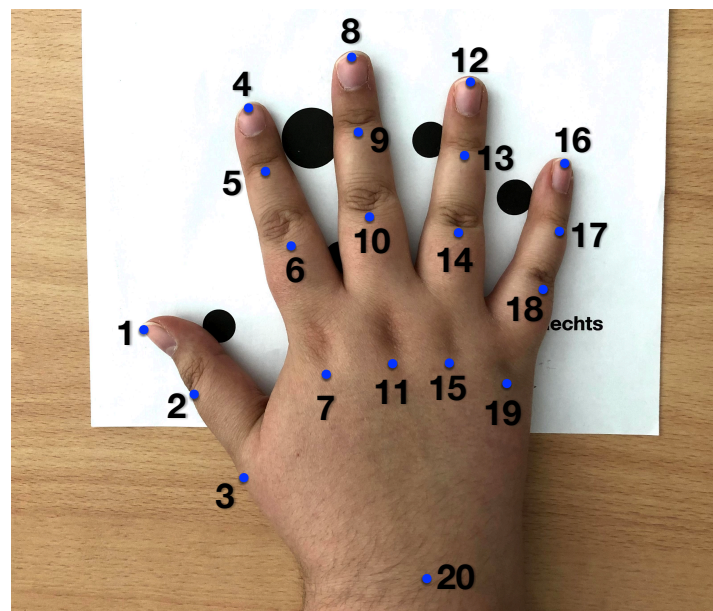


Abbildung 4.10: Hand der Autorin mit Markierung und Nummerierung der Messpunkte, welche auf den Modellen der Hände angebracht wurden (Eigene Darstellung)

Die Tabelle B.4 listet die Ergebnisse der Messungen der Entfernung vom Griff Normal auf. Es handelt sich dabei um drei Messungen von unterschiedlichen Tagen, dem je-

weiligen Mittelwert und der Standardabweichung. Zudem entfallen die Ergebnisse der Messpunkte 16 bis 18 des kleinen Fingers, da diese in dem Modell des Griiffs nicht abgebildet wurden.

Tabelle 4.1: Ergebnisse der Messungen von den Abweichungen der Messpunkte vom Griff Normal nach Zusammenführung beider Modelle in mm (Eigene Darstellung)

	19.07.	20.07.	21.07.	Mittelwert	Standardabweichung
1	4,881	4,879	4,874	4,878	0,003
2	5,479	5,409	5,194	5,361	0,121
3	12,396	12,441	12,385	12,407	0,024
4	5,253	4,810	5,058	5,040	0,181
5	7,821	8,156	8,133	8,037	0,153
6	5,924	5,770	5,811	5,835	0,065
7	2,686	3,288	2,997	2,990	0,246
8	4,737	4,359	4,028	4,375	0,290
9	6,555	5,821	5,672	6,016	0,386
10	5,387	5,796	5,867	5,683	0,212
11	11,166	11,192	11,196	11,185	0,013
12	4,431	4,885	5,016	4,777	0,251
13	5,165	4,942	4,577	4,895	0,242
14	7,389	6,826	6,714	6,976	0,295
15	15,323	14,959	14,986	15,089	0,166
16	-	-	-	-	-
17	-	-	-	-	-
18	-	-	-	-	-
19	17,617	17,759	17,832	17,736	0,089
20	31,363	32,166	31,754	31,761	0,328
Insgesamt	9,002				

Die fertige Rekonstruktion des Griiffs Schlag kann wiederum der Abbildung 3.13b entnommen werden. Das Ergebnis nach der Überlagerung der beiden Modelle zeigt die Abbildung 4.11, auch hier aus verschiedenen Perspektiven. Es handelt sich hier wie zuvor um die rekonstruierte Hand, welche heller dargestellt ist und zudem den kleineren Unterarm besitzt. Im Anhang C findet sich zu diesem Ergebnis zusätzlich die Abbildung C.2, welche die platzierte Hand in orange umrahmt.

Die Ergebnisse der Messungen der Entfernung vom Griff Schlag zueinander zeigt die Tabelle 4.2 auf. Wie in der vorherigen besteht diese aus drei Messungen, dem Mittelwert und der Standardabweichung. In diesem Fall konnten alle Messpunkte verwendet werden.

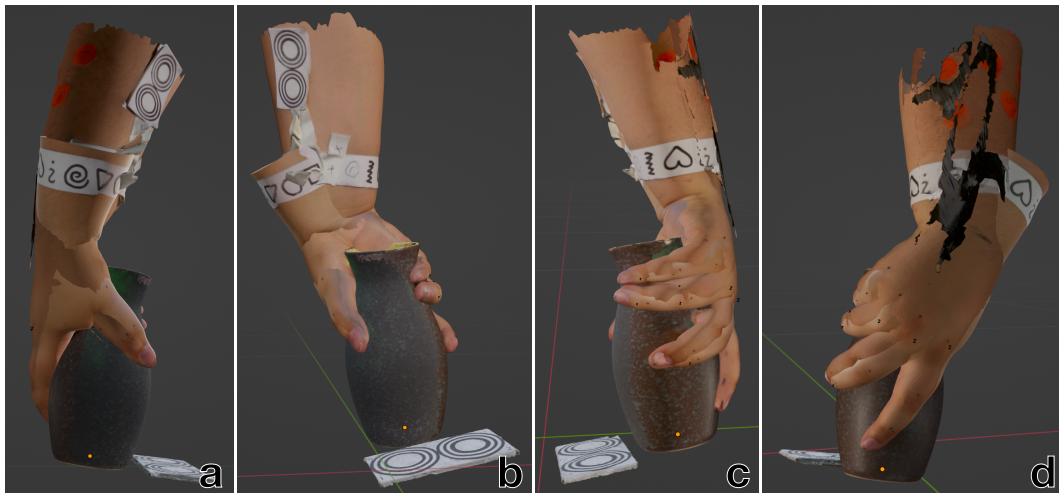


Abbildung 4.11: Rekonstruierter Griff Schlag mit Modell des Griff Schlag übereinander liegend.
a Daumensicht, b Unterarmsicht, c Fingersicht, d Handrückensicht (Eigene Darstellung)

Tabelle 4.2: Ergebnisse der Messungen von den Abweichungen der Messpunkte vom Griff Schlag nach Zusammenführung beider Modelle in mm (Eigene Darstellung)

	19.07.	20.07.	21.07.	Mittelwert	Standardabweichung
1	4,061	4,189	4,219	4,156	0,069
2	8,817	8,816	9,085	8,906	0,127
3	13,818	13,754	13,601	13,724	0,091
4	3,944	4,212	3,741	3,966	0,193
5	4,100	4,189	4,250	4,180	0,062
6	6,129	6,376	6,109	6,205	0,121
7	7,051	7,082	7,290	7,141	0,106
8	1,353	1,439	1,401	1,398	0,035
9	8,317	8,323	8,269	8,303	0,024
10	10,876	11,428	11,314	11,206	0,238
11	6,815	6,321	7,267	6,801	0,386
12	3,311	3,364	3,388	3,354	0,032
13	1,084	1,069	1,101	1,085	0,013
14	2,588	2,725	2,226	2,513	0,211
15	6,441	6,435	6,439	6,438	0,002
16	3,355	3,157	3,269	3,260	0,081
17	3,331	3,401	3,142	3,291	0,109
18	2,947	2,936	3,034	2,972	0,044
19	4,609	5,105	4,623	4,779	0,231
20	7,112	6,232	6,494	6,613	0,369
Insgesamt	5,515				

5 Diskussion

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde durch Erstellung verschiedener Modelle untersucht, inwieweit es möglich ist, einen Griff anhand von hinterlassenen Fingerabdrücken zu rekonstruieren. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass dies am Beispiel von zwei unterschiedlichen Griffen annähernd möglich ist.

Um sich mit den Ergebnissen der Rekonstruktion auseinandersetzen zu können, soll zunächst das bewegliche Handmodell, welches in Blender erstellt wurde, betrachtet werden. Dieses kann mittels der gesetzten Armatures, welche die Knochen und Gelenke der Hand darstellen, im Pose Mode mittels Rotation bewegt werden. Weiterhin lassen sich die einzelnen Gelenke nur so weit bewegen, wie die Winkel in der Einstellung der Bone Constraint unter Limit Rotation beschränkt wurden. Bei diesen handelt es sich um die Bewegungsausmaße der Autorin, welche im Vorfeld gemessen wurden. Um die Bewegung der Hand an die einer Realen anzupassen, wurde zusätzlich der Bone Constraint Copy Rotation verwendet. Mit diesem bewegen sich die Gelenke eines Fingers nun gleichzeitig, falls diese gebeugt bzw. gestreckt werden. Dies ist ähnlich dem echten Verhalten beim Greifen, welches im Abschnitt 2.5 auf der Grundlage von Zilles und Tillmann beschrieben wurde, wobei zuerst die Endgelenke, danach die Mittelgelenke und als letztes die Grundgelenke gebeugt werden [Til10]. Das im gleichen Abschnitt beschriebene automatische zueinander bewegen der Finger beim Beugen bzw. auseinander bewegen beim Strecken konnte allerdings nicht im Modell übernommen werden. Das somit entstandene Rig kann auch für andere Hände übernommen werden und ist beliebig austauschbar. Je nach Position der Hand und Finger im Modell müssen nur die Armatures entsprechend der Gelenke verschoben und mit den neuen Winkeln bestückt werden.

Eine besondere Schwierigkeit weist bei diesem Modell der Daumen genauer das Sattelgelenk auf. Da dieses ein sehr komplexes Gelenk ist und somit die verschiedenen Bewegungen, wie Flexion/Extension, Abduktion/Adduktion und Reposition/Opposition, ausführen kann, gestaltet sich die Beschränkung der auszuführenden Winkel als schwierig. Die Beschränkungen können nur auf den drei Achsen des jeweiligen Armatures angewendet werden. Dies wurde bei diesem Gelenk ebenfalls mit den Messungen getan, allerdings lässt sich dieses nicht so gezielt bewegen, wie es in echt der Fall ist. So ist zum Beispiel die Oppositionsbewegung wohl möglich jedoch geht sie mit einer großen Verschiebung des Meshs einher und ist nicht sonderlich präzise (siehe Abbildung 5.1a). Zudem kommt es bei der Wegbewegung des Daumens von den Fingern zu einer Verschiebung im Mesh, welche trotz mehrmaliger Anwendung des Weight Paints nicht gänzlich behoben werden konnte (siehe Abbildung 5.1b). Solche Verzerrungen des Meshs treten auch in der Handfläche auf, falls die Grundgelenke der Finger gebeugt werden, wie in Abbildung 5.1c zu sehen ist.

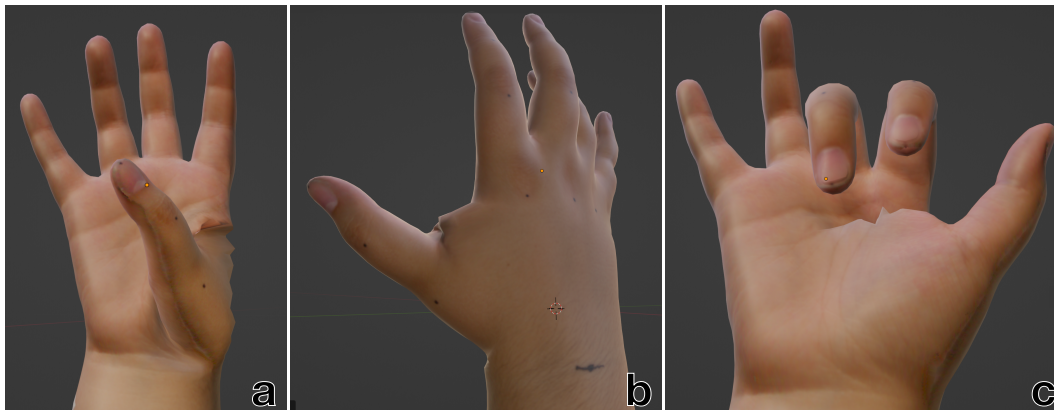


Abbildung 5.1: Auswirkungen auf das Mesh des Handmodells bei Bewegung in Blender. a Oppositionsbewegung, b Verzerrung des Meshs bei Bewegung des Daumens von den Fingern weg, c Verzerrung der Handfläche bei Beugung der Finger (Eigene Darstellung)

Das Setzen der beweglichen Hand an die Vase erfolgte ohne den Bone Constraint Copy Rotation, da diese Einstellung wohl nützlich beim Beugen der einzelnen Finger ist und somit nicht jedes Gelenk einzeln bewegt werden muss, allerdings ist sie eher unpraktisch, wenn es zur Rekonstruktion eines Griffs kommt. Wird die Abbildung 2.5, in welcher Beispiele von Fingergriffen aufgeführt werden, betrachtet, so wird ersichtlich, dass nur weil ein Gelenk sich beugt nicht zwangsläufig alle Gelenke des Fingers mitbewegt werden. Zum Beispiel wird das Endgelenk beim Halten eines Stiftes beim tridigitalen Griff in Bild c gestreckt, obwohl Mittel- und Grundgelenk gebeugt sind. Somit wurde bei der Rekonstruktion ohne diese Einstellung gearbeitet, um die einzelnen Finger besser an die Spuren anpassen zu können.

Bei beiden Griffen wurde das Handgelenk nicht rekonstruiert und in seiner Ausgangsposition belassen. Dies liegt daran, dass es keine Punkte an der Vase gab, welche darauf hinwiesen, wie das Handgelenk bei der Aufnahme der Modelle ausgerichtet war. Somit lässt sich sagen, wenn es keine Spuren zu einem Teil der Hand gibt, kann dieses auch nicht gesetzt werden, da es immer einen Bezugspunkt zum Objekt braucht. Zudem kann sich die Stellung des Handgelenks während eines Griffs verändern. Dies wird bei der Betrachtung der Abbildungen 4.5 und 4.6 ersichtlich. Hierbei handelt es sich jeweils um den gleichen Griff, aber um unterschiedlich Aufnahmen, bei welchen das Handgelenk je nach Positionierung der Hand anders ausgerichtet ist. Ein weiterer Punkt, welcher für beide Griffe zutrifft, ist der, dass das Mesh des Modells der beweglichen Hand nicht auf Berührungen von außen reagiert. Wird eine reale Hand berührt oder greift diese nach einem Gegenstand, so gibt die Haut nach. Das Modell allerdings tut dies nicht und bleibt steif, was es schwieriger gestaltet, die Hand an die Spuren der Vase anzupassen. Aus diesem Grund wurde die Hand leicht in die Vase gesetzt, wobei hier auf die sichtbaren Spuren geachtet wurde. In den Abbildungen 4.9 und 4.11 wird deutlich, dass die rekonstruierte Hand meistens zu weit in der Vase liegt, als es tatsächlich der Fall war.

Die Ergebnisse der Messungen von den Entfernungen der jeweiligen Messpunkte zueinander aus Tabelle B.4 und 4.2 zeigen, dass der Griff Schlag insgesamt mit einer Abweichung von 5,515 mm besser rekonstruiert werden konnte als der Griff Normal mit einer Abweichung von 9,002 mm. Hierbei muss allerdings darauf geachtet werden, dass der Griff Normal nicht über die Messpunkte 16 bis 18 verfügt und somit kann der kleine Finger bei diesem Griff nicht mit in die Bewertung einfließen. Bei beiden Griffen fällt zudem eine verhältnismäßig große Abweichung im Messpunkt 3 auf, welcher das Sattelgelenk repräsentiert. Dabei liegt der Wert beim Griff Normal bei 12,407 mm und beim Griff Schlag bei 13,724 mm. Diese Ergebnisse zeigen nochmals die Komplexität dieses Gelenks und die Schwierigkeit, jenes zu platzieren, da hier eine Vielzahl an Bewegungen möglich sind.

Die Tabelle 5.1 zeigt die Mittelwerte der einzelnen Finger sowohl für die einzelnen Griffe als auch für beide zusammen. Dabei wurden jeweils die Punkte, welche unterhalb des Mittel- und Endgelenks und auf dem Fingernagel sitzen, zusammengefasst und als ein Finger betrachtet. Zu sehen ist, dass der Daumen jeweils die größte Abweichung aufweist, was überwiegend am Sattelgelenk liegt. Werden beide Griffe gemeinsam betrachtet, ergeben sich die geringsten Abweichungen beim Ringfinger und beim kleinen Finger, wobei der kleine Finger beim Griff Normal entfällt. Ein weiterer Punkt, welcher auffällt, ist der Messpunkt Nummer 10 für den Griff Schlag in der Tabelle 4.2. Dieser Punkt spiegelt das Mittelgelenk des Mittelfingers wieder und die Abweichung liegt hier bei 11,206 mm. Dieser Wert kann damit erklärt werden, dass der Finger nicht flach auf der Vase aufliegt, sondern eher seitlich, dies geben auch die Spuren auf der Vase wieder. Wie weit seitlich der Finger aufliegt, ist allerdings im Bereich des Mittelgelenks nur schwer zu bestimmen, weshalb wohl die Fingerspitzen mit 1,398 mm recht nah beieinanderliegen, der Punkt 10 allerdings nicht, wie in den Abbildungen C.8 und C.9 aus dem Anhang C zu sehen ist.

Tabelle 5.1: Mittelwerte der Abweichungen für die einzelnen Finger in mm (Eigene Darstellung)

Messpunkte	Bezeichnung	Mittelwert Griff	Mittelwert Griff	Beide Griffe
		Normal	Schlag	
1, 2, 3	Daumen	7,549	8,929	8,239
4, 5, 6	Zeigefinger	6,304	4,783	5,544
8, 9, 10	Mittelfinger	5,358	6,969	6,163
12, 13, 14	Ringfinger	5,549	2,317	3,933
16, 17, 18	kleiner Finger	-	3,175	3,175

Neben den einzelnen Fingern werden auch die Mittelwerte der einzelnen Gelenke der Finger in der Tabelle 5.2 aufgelistet. Diese fasst die Grund-, Mittel- und Endgelenke sowie die Messpunkte der Fingerspitzen für beide Griffe zusammen. Der Daumen wird in dieser Tabelle nicht mit betrachtet. Auffällig dabei ist, dass die Punkte, welche die Fingerspitzen markieren, jeweils und auch insgesamt die kleinsten Abweichungen aufweisen mit 3,863 mm. Die Fingerbeeren sind aufgrund der gut sichtbaren Fingerabdrücke

im Vergleich zu dem Rest der Hand am einfachsten zu positionieren. Die größten Abweichungen zueinander liegen bei den Messpunkten der Grundgelenke mit 9,020 mm. Dabei schneidet der Griff Normal mit 11,750 mm allerdings deutlich schlechter ab als der Griff Schlag mit 6,290 mm. Ein Grund für dieses Ergebnis ist die Positionierung der Messpunkte, wobei diese hinter dem Gelenk und nicht auf diesem gesetzt wurden. So sind die Spuren des Handballens der Finger wohl deutlicher zu erkennen als beim Griff Schlag, allerdings besitzt dieser mehr Auskunft darüber wie der Daumen lag (siehe Abbildung 3.6). Je nachdem wie der Daumen beim Griff Normal positioniert wird, bewegt sich der Handrücken, auf welchem die Punkte markiert wurden und so entstehen größere Abweichungen.

Tabelle 5.2: Mittelwerte der Abweichungen für die einzelnen Punktgruppen der Gelenke in mm (Eigene Darstellung)

Messpunkte	Bezeichnung	Mittelwert Griff	Mittelwert Griff	Beide Griffe
		Normal	Schlag	
7, 11, 15, 19	Grundgelenke	11,750	6,290	9,020
6, 10, 14, 18	Mittelgelenke	6,165	5,724	5,944
5, 9, 13, 17	Endgelenke	6,316	4,215	5,265
4, 8, 12, 16	Fingerspitzen	4,731	2,995	3,863

Wie zu sehen ist, konnten beide Griffe rekonstruiert werden, auch wenn an einigen Stellen leichte Abweichungen entstanden sind, können die Griffe erkannt werden. Dies bezieht sich wie bereits erwähnt, allerdings nicht auf das Handgelenk, welches aufgrund fehlender Bezugspunkte nicht ausgerichtet und in seiner originalen Position belassen wurde. Der Griff Schlag weist dabei bessere Ergebnisse sowohl beim Betrachten als auch bei den Messungen auf, als der Griff Normal. Dabei ist dieser um einiges komplexer aufgrund der ungewöhnlichen Fingerstellung weist aber mehr sichtbare Spuren der Hand auf, an welchen sich bei der Positionierung orientiert werden können. Somit kann im Allgemeinen gesagt werden, umso mehr Spuren sichtbar sind, desto besser kann die Hand an diese platziert werden und umso genauer auch das Ergebnis. Das Griffgeschehen konnte nicht rekonstruiert werden, da sich für dieses eher eine Simulation des Greifens eignen würde. Allerdings ist das generelle Modell der beweglichen Hand im Stande das allgemeine Griffgeschehen auszuführen, dies jedoch nur mit jedem Finger einzeln und nicht als fließende Bewegung.

Die Modelle, welche durch Aufnahmen des Scanners bzw. mithilfe der Photogrammetrie entstanden sind, sind mit wenigen Verzerrungen und Löchern gut gelungen. Dabei muss gesagt werden, dass vor allem die Verzerrungen der Hand, welche durch Bewegungen entstanden, kaum zu vermeiden sind. Bei den Aufnahmen wurde versucht die Hand, ob allein oder mit Vase, so still wie möglich zu halten, allerdings können Mikrobewegungen der Finger nicht kontrolliert werden und treten somit auf. Diese nehmen natürlich auch mit der Dauer des Scans zu. Verhindert werden könnten diese, indem alle Aufnahmen der kompletten Hand auf einmal entstehen, zum Beispiel mithilfe einer

sogenannten Cave. Bei dieser handelt es sich um einen Aufbau mit mehreren Kameras, welche gemeinsam auslösen und das Objekt in wenigen Sekunden komplett aufnehmen. Das Auflegen der Hand und das Scannen von beiden Seiten zeigt sich als eher ungünstig, da die exakte Position der Finger beim Drehen nicht gewährleistet ist und somit die Alignierung der beiden Hälften nicht möglich ist. Die Modelle der Griffe weisen neben den Verzerrungen der Finger aufgrund der Bewegung zusätzlich Löcher auf. Diese befinden sich meist zwischen den Fingern und sind ein Resultat dafür, dass der Scanner diese Bereiche nicht richtig einfangen konnte. Dies gilt auch für das Modell des Griffs Normal und dessen unterer Seite. Da der Arm auf einem Stiel gestützt wurde und die Hand zusammen mit der Vase in der Luft hingen, konnte die untere Seite nicht gescannt werden, da diese nicht erreichbar war. Insgesamt konnten die Griffe trotzdem gut dargestellt werden und sind als solche erkennbar. Bei den Modellen der Vase zeigt die, welche mittels Photogrammetrie entstand, bessere Ergebnisse. Hier sind scharfe Texturen vor allem im Bereich der Fingerspuren zuerkennen und keinerlei Verzerrungen.

Die Messungen der Hand, welche vorgenommen wurden, zeigen, dass selbst die linke und rechte Hand einer Person nicht identisch sind und sich in den Messstrecken voneinander unterscheiden. Die Bewegungsausmaße der Gelenke können allerdings nicht verglichen werden, da diese nur von der rechten Hand ermittelt wurden. Bei solchen Messungen können natürlich Fehler entstehen, weshalb alle Messungen dreimal an verschiedenen Tagen wiederholt wurden. Das Anlegen der Messgeräte erfolgte wohl anhand von definierten Strecken, allerdings weist die menschliche Hand keine Ecken und Kanten auf, an welchen sich orientiert werden kann, damit immer an der exakt gleichen Stelle gemessen wird. Zudem muss gesagt werden, dass der verwendete Digitale Winkelmesser im Normalfall nicht dafür geeignet ist, Winkel von Gelenken zu messen und somit auch Fehler entstehen können.

Diese Bachelorarbeit betrachtet nur, ob eine Rekonstruktion von Griffen möglich ist, nicht aber, was ein bestimmter Griff aussagt oder wie dieser entstanden ist. Zudem wurden nur zwei Griffe aufgenommen und rekonstruiert, wobei diese an einem Objekt ausgeführt wurden, welches einfach modelliert werden kann. Es wurde außerdem nur eine Versuchsperson für die verschiedenen Messungen und die Rekonstruktion betrachtet, auf weitere Personen wurde in dieser Arbeit verzichtet. Weiterhin muss gesagt werden, dass die Spuren, die gesetzt wurden, unter Laborbedingungen entstanden sind. Dies bedeutet, dass die Vase vor dem Anfassen gereinigt wurde, um so überlappende Spuren oder sonstige Beschmutzung zu verhindern und optimale Bedingungen für die Rekonstruktion zu schaffen.

Eine Empfehlung für weitere Forschung ist daher, die Anzahl der Griffe zu erhöhen und nicht nur eine Person, sondern mehrere zu betrachten. Dabei sollte die Person, welche die Rekonstruktion ausführt, falls möglich, die Griffe vorher nicht kennen und die Positionierung der Hand blind durchführen. Dies war in dieser Arbeit nicht der Fall und es

war von Anfang an klar, welche Spur zu welchem Griff gehört. Zudem sollte versucht werden, inwieweit die Möglichkeit besteht, eine Spur mittels einer Griffrekonstruktion einer bestimmten Person zuordnen zu können. Eine weitere Ergänzung könnte es sein, die Rekonstruktion zu betrachten, indem die Bedingungen der Spuren an die Realität angepasst werden. Das Objekt besitzt also keine perfekten Fingerabdrücke oder vielleicht auch Überlappungen von Spuren, um so zu prüfen, ob diese Methode auch außerhalb des Labors anwendbar ist. Weiterhin sollten die Aufnahmebedingungen für die Modellerstellung verbessert werden, um so Verzerrungen und auch Löcher zu beseitigen, beispielsweise mit der bereits erwähnten Cave. Außerdem empfiehlt es sich, das bewegliche Modell der Hand weiter auszubauen, indem am Weight Paint gearbeitet wird oder die Einstellungen des Sattelgelenks verbessert werden. Das Problem der nicht realistischen Hautbewegung bei Berührung wäre auch ein weiterer Ansatzpunkt zur Optimierung des Modells.

6 Fazit und Ausblick

Die vorliegende Bachelorarbeit beschäftigte sich mit der Frage ‚Ob und inwieweit ist es möglich, das Griffgeschehen bzw. den Griff zu rekonstruieren?‘. Anhand dieser wurden zwei unterschiedliche Griffe betrachtet, dabei stellte einer von beiden ein normales Halten einer Vase dar und der andere einen Schlag mit einer Vase. Durch unterschiedliche Aufnahmen mittels eines Scanners und einem Photogrammetrie Setup, wurden Modelle von einer Hand, der Vase und dem jeweiligen Griff, also wie die Hand die Vase hält, erstellt. Die weitere Arbeit fand in Blender statt, hierbei wurde die Hand mithilfe von Rigging beweglich gemacht, um diese danach manuell an die Vase, welche mit sichtbaren Spuren versehen war, zu setzen. Als letzten Punkt wurde die Rekonstruktion mit dem Modell des Griffs verglichen, indem diese übereinandergelegt wurden und mittels Messpunkten auf den Fingern wurde die Abweichung zueinander bestimmt.

Die Ergebnisse zeigen die Möglichkeit einer Rekonstruktion des Griffs mit geringen Abweichungen. Dabei weicht die manuell platzierte Hand beim Griff Normal um 9,002 mm und beim Griff Schlag um 5,515 mm ab. Bei beiden Griffen stellt das Sattelgelenk des Daumens die größte Abweichung dar, wobei diese beim ersten Griff 12,407 mm und beim zweiten 13,724 mm beträgt. Allgemein sind beide Griffe bei der Betrachtung mit dem jeweiligen Modell des Griffs recht ähnlich und wiedererkennbar. Ein weiteres Ergebnis dieser Arbeit ist das entstandene Handmodell, welches an den Gelenken beweglich ist. Diese Bewegungen sind zusätzlich mit den realen Bewegungsausmaßen der einzelnen Gelenke beschränkt, somit beugen und strecken sich die Finger nur im möglichen Rahmen.

Aus den Ergebnissen wird ersichtlich, dass die Rekonstruktion des Griffs nur stattfinden kann, wenn genügend Spuren auf dem entsprechenden Objekt zurückbleiben. Dabei kann gesagt werden, je mehr Abdrücke auf einem Gegenstand vorhanden sind, umso mehr Bezugspunkte gibt es für die Rekonstruktion und umso besser und genauer wird das Ergebnis dieser. Zudem liegt eine besondere Schwierigkeit beim Setzen der Hand darin, das Sattelgelenk des Daumens präzise auszurichten. Dies liegt überwiegend an der Komplexität des Gelenks und dessen möglichen Bewegungen. Die Beschränkung, welche in Blender vorgenommen wird, hat somit Auswirkungen auf die Bewegung des Modells, wobei diese nicht so akkurat ausführbar sind wie in der Realität. Ein weiterer Punkt, welcher Auswirkung auf die Ergebnisse hat, ist die fehlende Hautbewegung bei Berührung des Meshs, weshalb das Modell meistens zu weit in der Vase positioniert wurde. Zu der erstellten beweglichen Hand kann allgemein gesagt werden, dass diese entsprechend der eingestellten Winkel bewegt werden kann. Allerdings entstehen bei einigen Bewegungen noch Verzerrungen am Mesh, welche weiter optimiert werden sollten. Das einzige Gelenk der Hand, welches nicht rekonstruiert werden konnte, ist das Handgelenk. Dies liegt, an fehlenden Bezugspunkten aber auch daran, dass sich

dieses Gelenk, trotz halten eines bestimmten Griffs, verändern kann, ohne Auswirkungen auf die Position der Hand und deren Finger zu haben. Das Rig bzw. das Skelett der Hand kann so wie es erstellt wurde, wiederverwendet werden und ist je nach Hand beliebig austauschbar. So kann Zeit bei der Verarbeitung mit unterschiedlichen Personen gespart werden, da hier nur minimale Veränderungen stattfinden müssen, statt das ganze Rig erneut zu bauen.

Durch diese Arbeit wurde gezeigt, dass das Rekonstruieren eines Griffes anhand von Handabdrücken, welche auf einem Objekt zurückgelassen wurden, möglich ist. Dabei sind wohl gewisse Abweichungen vom eigentlichen Griff aufgetreten, der Griff als dieser ist jedoch gut zu erkennen und kann Auskunft darüber geben, wie ein Objekt, in dem Fall die Vase, gehalten wurde. Hierbei sind vor allem die zurückgebliebenen Spuren ausschlaggebend, da ohne diese eine Rekonstruktion nicht möglich ist. Eine Rekonstruktion des Griffgeschehens ist allerdings nicht möglich, da die Spuren nur Angaben zum letztendlichen Griff geben, nicht aber wie dieser entstanden ist. Um dies zu erforschen könnten sich Simulationen anschließen, um einen möglichen Ablauf beim Greifen zu erhalten. Aufgrund der entstandenen Ergebnisse wird zudem ersichtlich, dass sich mit der Rekonstruktion des Griffs weiter beschäftigt werden sollte, um so nicht nur die Modelle, sondern auch das Rigging der Hand zu verbessern, damit bessere Ergebnisse erzielt werden können.

Diese Bachelorarbeit dient somit als Grundlage für weiterführende Forschungen in diesem Bereich, wobei sich hier viele Möglichkeiten ergeben. So sollten in zukünftigen Arbeiten weitere Griffe auch mit unterschiedlichen Personen untersucht werden, um so ein größeres Sichtfeld zu erlangen. Außerdem könnte sich mit der Frage beschäftigt werden, inwieweit es möglich ist, Personen anhand eines Griffs zu unterscheiden und ob dies überhaupt effektiv ist. Da zudem festgestellt wurde, dass das bewegliche Modell der Hand noch ausbaufähig ist, sollte daran gearbeitet werden, dieses weiter zu verbessern. Diese Optimierung trifft auch auf die allgemeine Erstellung der verschiedenen Modelle zu. Währe dafür ein anderes Vorgehen bei den Aufnahmen vielleicht besser geeignet?

Anwendung könnte die Griffrekonstruktion in der Praxis bei der Tathergangsrekonstruktion finden. Somit kann herausgefunden werden, wie ein Gegenstand umgriffen wurde und was gegebenenfalls mit diesem getan wurde. Um herauszufinden, ob die Rekonstruktion des Griffs in der Zukunft Anwendung in der Forensik findet, sollten die erläuterten Methoden auch an reale Bedingungen angepasst und erforscht werden. Dies bezieht sich vor allem auf die Spuren, welche an einem Tatort nicht unter Laborbedingungen gesetzt werden und somit oftmals nicht perfekt sind bzw. auch Überlappungen mit anderen Spuren aufweisen. Kann die Rekonstruktion unter solchen Bedingungen auch stattfinden oder stößt diese Methode hier an ihre Grenzen?

Literaturverzeichnis

- [3Da] Artec 3D. Data processing — artec studio 16 documentation. Artec 3D Documentation. <http://docs.artec-group.com/as/16/en/process.html?highlight=sharp%20fusion#sec-fusion>. Abgerufen am 03. August 2022.
- [3Db] Artec 3D. Drahtlose handgeführte 3d-scanner | artec leo | optimale 3d-scanning-lösungen. Professionelle Lösungen für 3D-Scanning | Artec3D. <https://www.artec3d.com/de/portable-3d-scanners/artec-leo>. Abgerufen am 06. Juli 2022.
- [Brü14] Nina Hamann; Jörn Heidemann; Kai Heinrich; Han Wu; Judith Bleuel; Christiane Gonska; Gert-Peter Brüggemann. Effect of carpometacarpal joint osteoarthritis, sex, and handedness on thumb in vivo kinematics. *The Journal of Hand Surgery*, 39(11):2161–2167, 2014.
- [CMB12] Rosana Martins Ferreira de Carvalho, Nilton Mazzer, and Claudio Henrique Barbieri. Analysis of the reliability and reproducibility goniometry photogrammetry regarding the hand. *Acta Ortopédica Brasileira*, 20(3):139–149, 2012.
- [Dei19] Stephan Deiler. Daumensattelgelenkarthrose. *Der Orthopäde*, 48(4):351–366, 2019.
- [Dud] Rekonstruktion. Duden online. <https://www.duden.de/node/120528/revision/874048>, Abgerufen am 17. August 2022.
- [eV21] Deutsche Rheuma-Liga Bundesverband e. V. Arthrose, Dezember 2021. <https://www.rheuma-liga.de/rheuma/krankheitsbilder/arthrose>. Abgerufen am 04. April 2022.
- [Fal95] Adolf Faller. *Der Körper des Menschen Einführung in Bau und Funktion*. dtv 3014. Georg Thieme Verlag, 12. aufl. edition, 1995.
- [Gas16] Lilian Calvet; Pierre Gurdjos; Carsten Griwodz; Simone Gasparini. Detection and accurate localization of circular fiducials under highly challenging conditions. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 562–570. 2016.
- [Hei17] Christian Heipke. *Photogrammetrie und Fernkunde: Handbuch der Geodäsie, herausgegeben von Willi Freeden und Reiner Rummel*, volume 1. Auflage. Springer Spektrum, 2017.

- [Hof19] Christian Hofstadler. *Aktuelle Entwicklungen in Baubetrieb, Bauwirtschaft und Bauvertragsrecht: 50 Jahre Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft der TU Graz*. Springer Vieweg, 2019.
- [HSS02] M. Haerle, G. Schmidt, and H. E. Schaller. Messung von Bewegungsumfängen, Sensibilität, Volumen, Kraft und Funktion der Hand. *Aktuelle Traumatologie*, 32(3):129–136, 2002.
- [Kap09] Ibrahim A. Kapandji. *Funktionelle Anatomie der Gelenke: schematisierte und kommentierte Zeichnungen zur menschlichen Biomechanik*, volume 5. Auflage. Geoge Thieme Verlag, 2009.
- [Kor07] Theodor H. Schiebler; Horst-W. Korf. *Anatomie: Histologie, Entwicklungsgeschichte, makroskopische und mikroskopische Anatomie, Topographie*. Steinkopf Verlag, 2007.
- [Mos17] Heinz Burg; Andreas Moser. *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion: Unfallaufnahme, Fahrdynamik, Simulation*, volume 3. aktualisierte Auflage. Springer Vieweg, 2017.
- [Nag74] Lucien Leger; Martin Nagel. *Chirurgische Diagnostik: Krankheitslehre und Untersuchungstechnik*. Springer Verlag, 1974.
- [oD10] University of Derby. Hand therapy - goniometry. YouTube, Mai 2010. <https://www.youtube.com/watch?v=dbwhZQbLuK0&list=PLnxbzdzq9G5ljOC9tIBljynUwwfHeWVLhB&index=11>. Abgerufen am 06. April 2022.
- [oSBSZ] Academy of Sports Bildung schafft Zukunft. Rom (range of motion) | definition und erklärung. <https://www.academyofsports.de/de/lexikon/rom-range-of-motion/>. Abgerufen am 09. März 2022.
- [Pan99] Arun Ross; Anil Jain; Sharath Pankanti. A prototype hand geometry-based verification system. *Proceedings of 2nd conference on audio and video based biometric person authentication*, pages 166–171, März 1999.
- [Pfe73] M. Allgöwer; J. U. Baumann; R. Berchtold; C. Burri; L. Eckmann; F. Enderlin; J. P. Gigon; E. Grädel; U. F. Gruber; F. Harder; W. Hügin; L. Jani; M. Klingler; A. Lévy; E. Morscher; W. Müller; R. Nicole; H. Nigst; J. Oeri; K. M. Pfeiffer. *Allgemeine und spezielle Chirurgie*, volume 2. neubearbeitete Auflage. Springer Verlag, 1973.

- [Pla91] Werner Platzer. *Bewegungsapparat*. Taschenatlas Anatomie 1. Georg Thieme Verlag, 6., überarb. Aufl. edition, 1991.
- [Sch05] Toni Schenk. Introduction to photogrammetry. *The Ohio State University, Columbus*, 106, 2005.
- [Sch10] Michael Schäfer. Funktionale Bedeutung der prothetischen Versorgung nach Amputationen im Finger- und Handbereich. *MOT*, pages 13–29, 2010.
- [Ser15] Engineering Manufacturing Services. Types of 3d scanners and 3d scanning technologies, November 2015. <https://ems-usa.com/3d-knowledge-center/3d-scanning-knowledge-center/types-of-3d-scanners-and-3d-scanning-technologies/>. Abgerufen am 06. Juli 2022.
- [Spr17] Dirk Labudde; Michael Spranger. *Forensik in der digitalen Welt: Moderne Methoden der forensischen Fallarbeit in der digitalen und digitalisierten realen Welt*. Springer Spektrum, 2017.
- [Str12] Friedrich Anderhuber; Franz Pera; Johannes Streicher. *Waldeyer – Anatomie des Menschen Lehrbuch und Atlas in einem Band*. De Gruyter, 2012.
- [Tay55] R. J. Schwarz; C. Taylor. The anatomy and mechanics of the human hand. In *Artificial Limbs*, pages 22–35. 1955.
- [Til10] Karl Zilles; Bernhard N. Tillmann. *Anatomie*. Springer, 2010.
- [Val10] Andreas Georgopoulos; Charalabos Ioannidis; Artemis Valanis. Assessing the performance of a structured light scanner. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(5):251–155, 2010.
- [Ver10] Theo Moons; Luc Van Gool; Maarten Vergauwen. *3D Reconstruction from Multiple Images, Part 1: Principles (Foundations and Trends(r) in Computer Graphics and Vision)*. Now Publishers, 2010.
- [Wit20] Erwin-Josef Speckmann; Werner Wittkowski. *Handbuch Anatomie: Bau und Funktion des menschlichen Körpers*. Urban Fischer Verlag/Elsevier GmbH, 21. edition, 2020.

Anhang A: Vorgehen bei den Aufnahmen des Scans und der Photogrammetrie

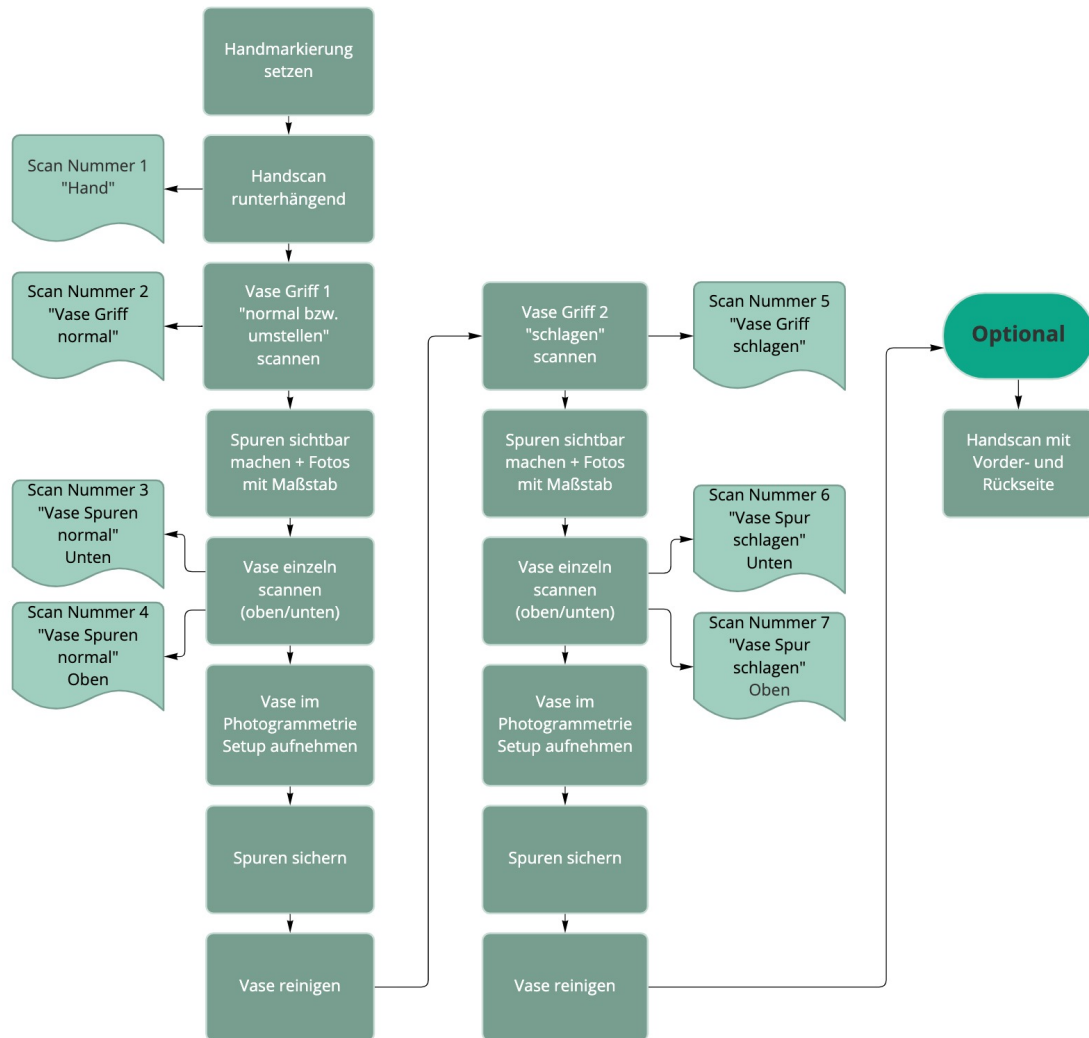


Abbildung A.1: Ablauffliste für die Aufnahmen mit dem Scanner und der Photogrammetrie (Eigene Darstellung)

Anhang B: Ergebnisse der Handvermessungen

In den unten stehenden Tabellen können die Ergebnisse der Messungen der Hand entnommen werden. Dabei stellt die Tabelle B.3 die Ergebnisse der 16 Messstrecken sowohl an der rechten als auch an der linken Hand dar und die Tabelle B.2 zeigt die gemessenen Winkel an den Gelenken der rechten Hand.

Tabelle B.1: Ergebnisse der Messungen der Strecken der rechten und linken Hand in mm (Eigene Darstellung)

	14.03.	15.03.	17.03.	Mittelwert	Standardabweichung
Rechts:					
1	103,51	104,40	106,82	104,91	1,40
2	79,83	80,59	82,63	81,02	1,18
3	97,18	96,38	97,12	96,89	0,36
4	107,14	106,15	105,47	106,25	0,69
5	100,66	98,83	99,17	99,55	0,79
6	80,63	80,06	81,77	80,82	0,71
7	16,54	18,82	17,82	17,73	0,93
8	16,31	17,61	18,65	17,52	0,96
9	13,69	15,38	14,58	14,55	0,69
10	16,64	17,77	17,94	17,45	0,58
11	14,10	14,96	14,75	14,60	0,37
12	14,95	16,91	16,51	16,12	0,85
13	12,75	13,57	13,94	13,42	0,50
14	11,21	12,33	11,94	11,83	0,46
15	13,75	14,10	14,79	14,21	0,43
16	19,92	19,79	19,58	19,76	0,14
Links:					
1	103,50	106,52	105,57	105,20	1,26
2	75,07	76,91	76,87	76,28	0,86
3	98,86	97,11	98,76	98,24	0,80
4	105,41	104,52	105,27	105,07	0,39
5	98,61	98,39	98,67	98,56	0,12
6	79,09	79,89	78,50	79,16	0,57
7	14,77	16,01	16,23	15,67	0,64
8	15,73	16,81	16,65	16,40	0,48
9	13,15	13,66	13,90	13,57	0,31

Tabelle B.1: Ergebnisse der Messungen der Strecken der rechten und linken Hand in mm (Eigene Darstellung)

	14.03.	15.03.	17.03.	Mittelwert	Standardabweichung
10	16,27	16,77	16,92	16,65	0,28
11	13,35	14,90	14,02	14,09	0,63
12	15,59	15,58	15,94	15,70	0,17
13	13,20	13,58	13,11	13,30	0,20
14	11,11	11,03	11,42	11,19	0,17
15	13,67	13,89	14,46	14,01	0,33
16	19,45	20,58	19,80	19,94	0,47

Tabelle B.2: Ergebnisse der Messungen der Bewegungsumfänge der rechten Hand in Grad (Eigene Darstellung)

	25.04.	28.04.	29.04.	Mittelwert	Standardabweichung
Handgelenk					
Palmarflexion	71,2	68,6	68,8	69,53	1,18
Dorsalextension	63,3	58,3	69,5	63,70	4,58
Radialabduktion	19,6	25,7	18,2	21,17	3,26
Ulnarabduktion	33,4	33,5	28,7	31,87	2,24
Daumen					
Flexion Grundgelenk	63,1	68,9	70,5	67,50	3,18
Flexion Endgelenk	78,8	79,0	83,4	80,40	2,12
Flexion Sattelgelenk	52,2	69,8	62,3	61,43	7,21
Abduktion Sattelgelenk	70,3	66,8	62,7	66,60	3,11
Zeigefinger					
Grundgelenk Flexion	87,6	81,0	90,7	86,43	4,05
Grundgelenk Extension	21,7	23,2	24,4	23,10	1,10
Mittelgelenk Flexion	96,1	93,5	91,7	93,77	1,81
Endgelenk Flexion	78,1	85,7	87,2	83,67	3,98
Mittelfinger					
Grundgelenk Flexion	92,0	85,7	95,4	91,03	4,02
Grundgelenk Extension	20,4	19,4	18,6	19,47	0,74
Mittelgelenk Flexion	94,2	98,1	101,3	97,87	2,90
Endgelenk Flexion	84,8	79,2	92,1	85,37	5,28
Ringfinger					
Grundgelenk Flexion	103,3	98,7	98,3	100,10	2,27

Tabelle B.2: Ergebnisse der Messungen der Bewegungsumfänge der rechten Hand in Grad (Eigene Darstellung)

	25.04.	28.04.	29.04.	Mittelwert	Standardabweichung
Grundgelenk Extension	19,2	17,9	20,4	19,17	1,02
Mittelgelenk Flexion	101,8	98,6	101,3	100,57	1,41
Endgelenk Flexion	82,9	89,2	86,8	86,30	2,60
Kleiner Finger					
Grundgelenk Flexion	104,0	98,3	102,8	101,70	2,45
Grundgelenk Extension	21,8	22,6	21,3	21,90	0,54
Mittelgelenk Flexion	92,0	91,7	96,3	93,33	2,10
Endgelenk Flexion	80,3	82,0	85,8	82,70	2,30

Anhang C: Zusätzliche Abbildungen zur Gegenüberstellung der Rekonstruktion des Griffs

Bei den Abbildungen C.1 und C.2 handelt es sich bei der Hand, welche orange umrandet ist um den rekonstruierten Griff. Die andere stellt das Griffmodell dar. In den Abbildungen der Nahaufnahmen der jeweiligen Griffe können die Hände anhand von der unebenen Struktur der Textur erkannt werden. Dabei handelt es sich bei der sowohl dunkleren und leicht unebeneren Hand um das Griffmodell.

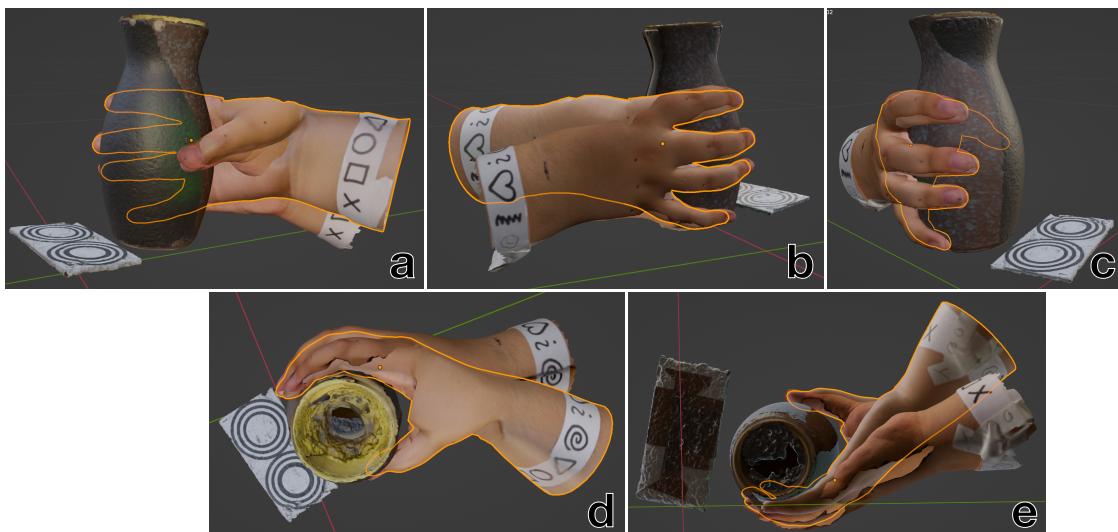


Abbildung C.1: Rekonstruierter Griff Normal (in orange) mit Modell des Griff Normal übereinander liegend mit zusätzlicher Markierung in Blender. a Daumensicht, b Handrückensicht, c Fingersicht, Draufsicht, d Sicht von Unten (Eigene Darstellung)

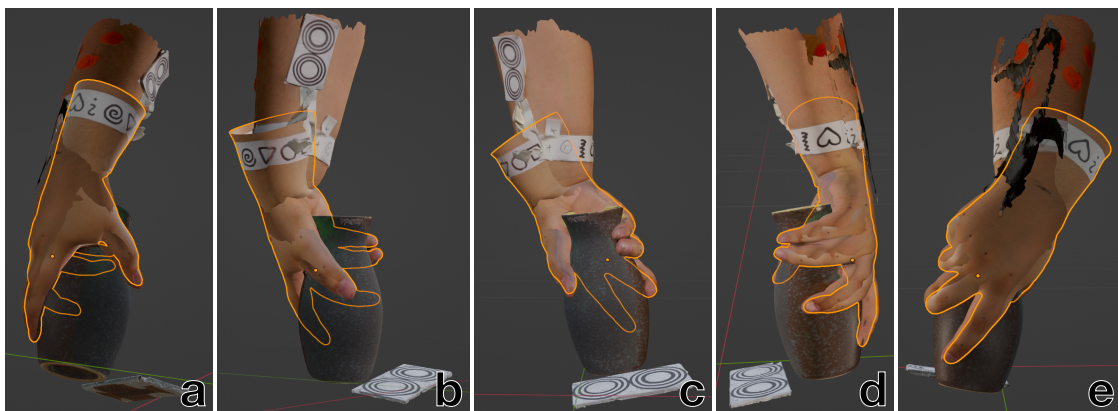


Abbildung C.2: Rekonstruierter Griff Schlag (in orange) mit Modell des Griff Schlag übereinander liegend mit zusätzlicher Markierung in Blender. a Seitenansicht, b Daumensicht, c Unterarmsicht, d Fingersicht, e Handrückensicht (Eigene Darstellung)

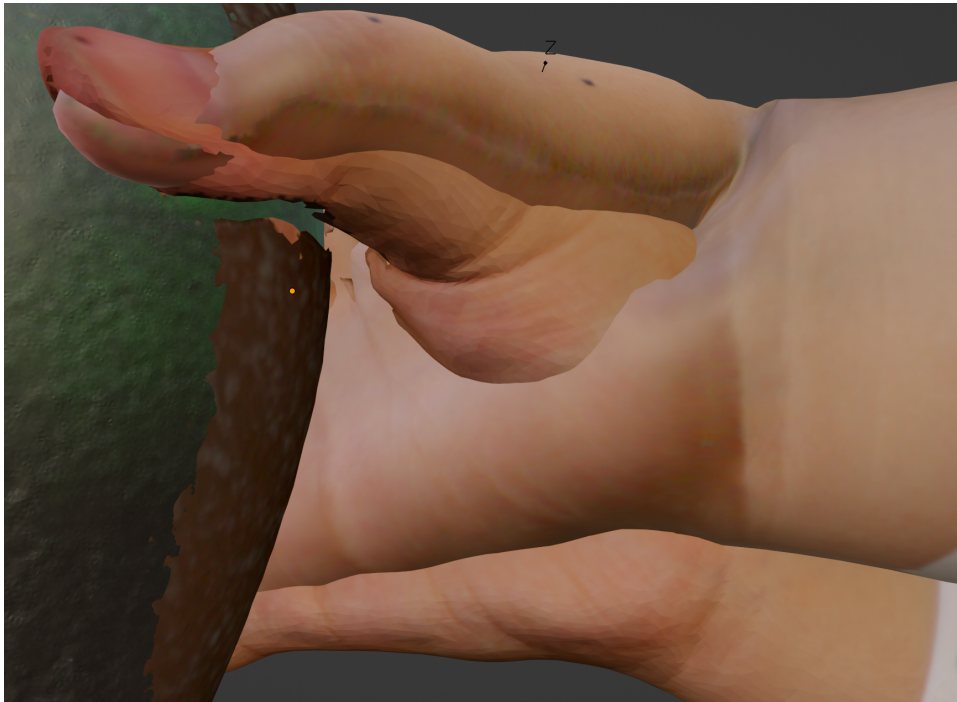


Abbildung C.3: Nahaufnahme des Daumens von Griff Normal (Eigene Darstellung)



Abbildung C.4: Nahaufnahme des Zeige- und Mittelfingers von Griff Normal (Eigene Darstellung)

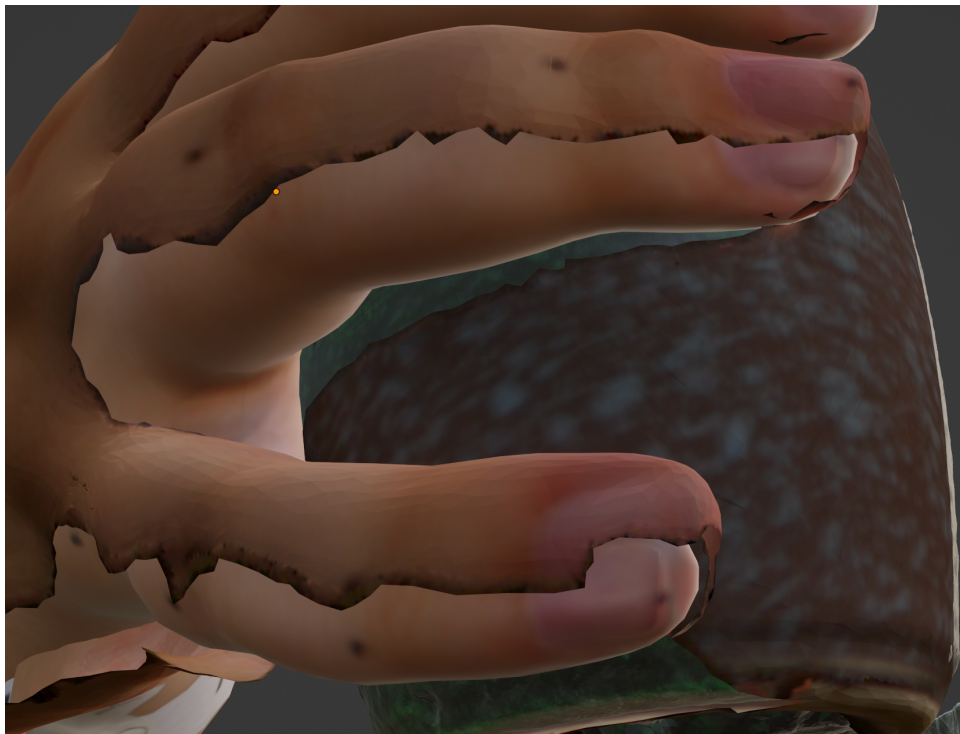


Abbildung C.5: Nahaufnahme des Ringfingers und kleinen Fingers von Griff Normal (Eigene Darstellung)

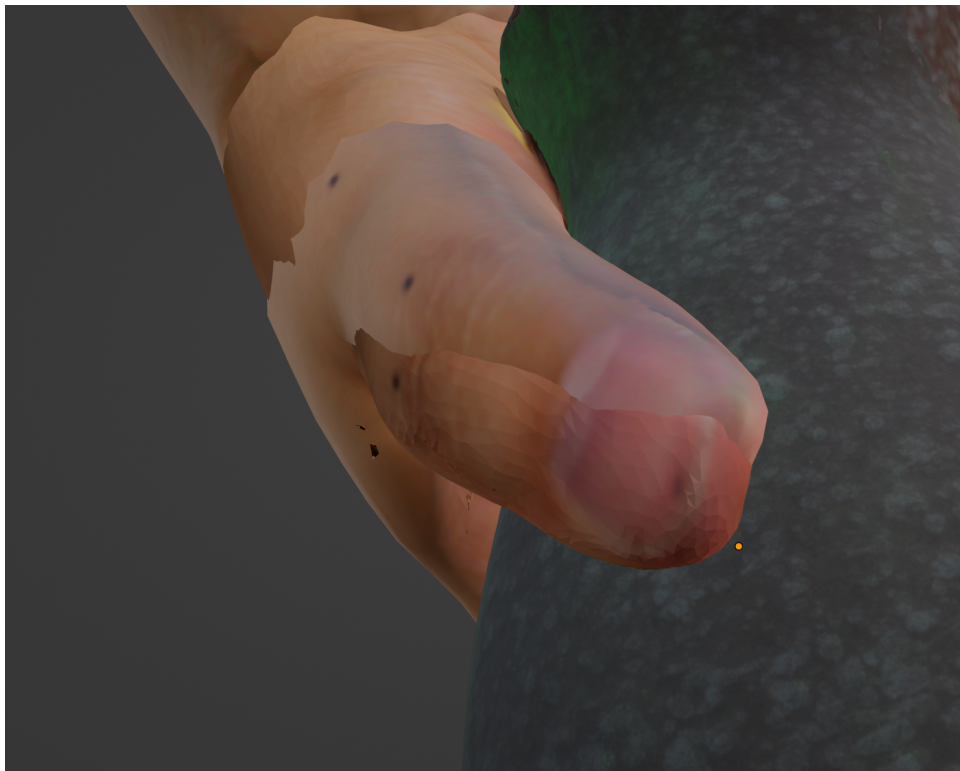


Abbildung C.6: Nahaufnahme des Daumens von Griff Schlag (Eigene Darstellung)



Abbildung C.7: Nahaufnahme des Zeigefingers von Griff Schlag (Eigene Darstellung)

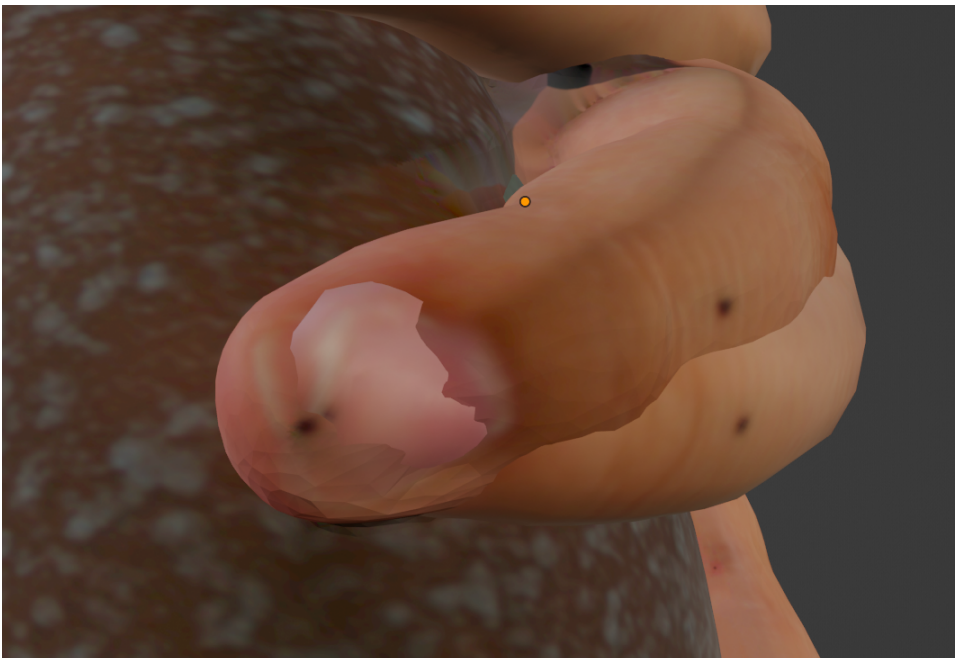


Abbildung C.8: Nahaufnahme der Fingerspitze des von Griff Schlag (Eigene Darstellung)



Abbildung C.9: Nahaufnahme der Position des Mittelfingers von Griff Schlag (Eigene Darstellung)

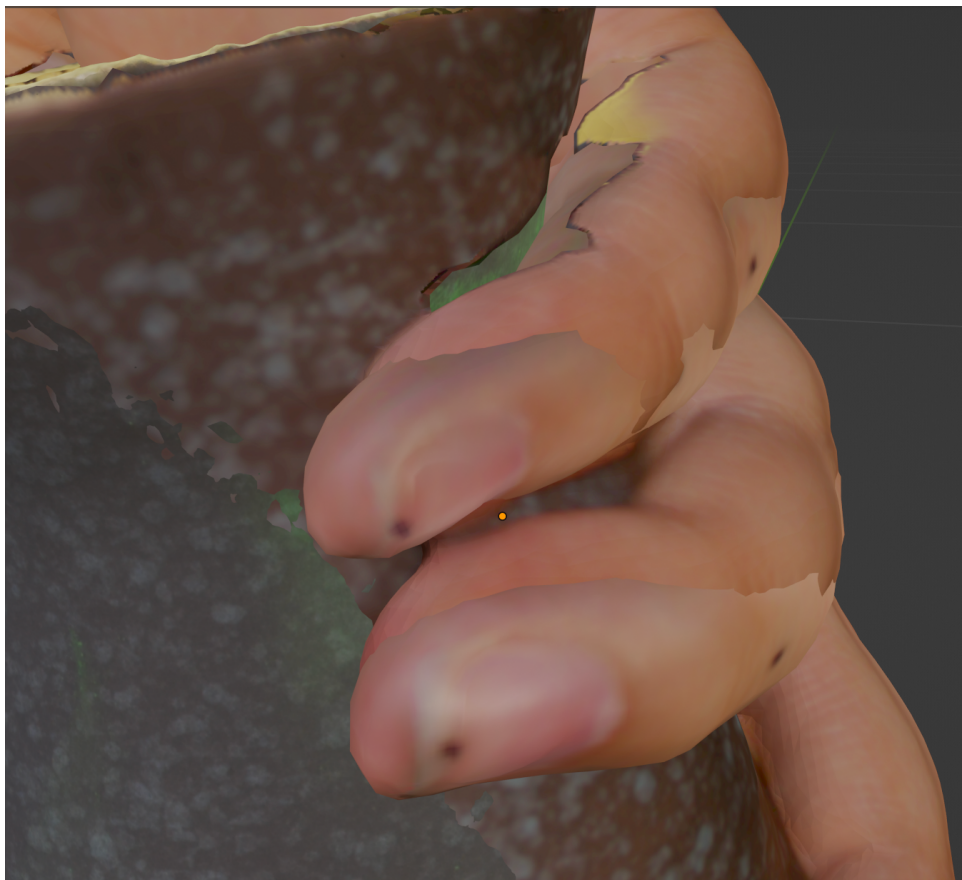


Abbildung C.10: Nahaufnahme des Ringfingers und kleinen Fingers von Griff Schlag (Eigene Darstellung)

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich meine Arbeit selbstständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die Arbeit noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Mittweida, 30. August 2022