

---

# **BACHELORARBEIT**

---

Herr  
**Willy Ulrich Lothar Delling**

**Analyse von Bewegungsfrei-  
heitsgraden unterschiedlicher  
Abstraktionsebenen von per-  
sonen-spezifischen Wirbel-  
säulenmodellen**

Mittweida, 2022



# **BACHELORARBEIT**

---

## **Analyse von Bewegungsfreiheitsgraden unterschiedlicher Abstraktionsebenen von personen-spezifischen Wirbelsäulenmodellen**

Autor:  
**Herr**

**Willy Ulrich Lothar Delling**

Studiengang:  
**Allgemeine und digitale Forensik**

Seminargruppe:  
**FO19w5-B**

Erstprüfer:  
**Prof. Dr. rer. nat. Dirk Labudde**

Zweitprüfer:  
**M.Sc. Sven Becker**

Einreichung:  
**Mittweida, 27.10.2022**

Verteidigung/Bewertung:  
**Mittweida, 2022**

## **BACHELOR THESIS**

---

# **Analysis of degrees of free- dom of motion for different abstraction levels of person- specific spine models**

author:

**Mr.**

**Willy Ulrich Lothar Delling**

course of studies:

**General and Digital Forensic Science**

seminar group:

**FO19w5-B**

first examiner:

**Prof. Dr. rer. nat. Dirk Labudde**

second examiner:

**M.Sc. Sven Becker**

submission:

**Mittweida, 27.10.2022**

defence/ evaluation:

**Mittweida, 2022**

## **Bibliografische Beschreibung:**

Delling, Willy:

Analyse von Bewegungsfreiheitsgraden unterschiedlicher Abstraktionsebenen von personen-spezifischen Wirbelsäulenmodelle. - 2022. - 12 Seiten Verzeichnisse, 48 Seiten Inhalt, 4 Seiten Anlagen

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Angewandte Computer- und Biowissenschaften, Bachelorarbeit, 2022

## **Referat:**

Der Einsatz von künstlicher Intelligenz soll in der Zukunft auch die Verbrechensaufklärung unterstützen. Ein Teilgebiet dessen ist die Bewegungsanalyse von Menschen. Ein wichtiger Aspekt dabei ist die Verformung und Bewegung der Wirbelsäule, mit der Frage, wie viele Wirbel als digitale Knochen einzeln benötigt werden, um eine Bewegung noch möglichst natürlich und anatomisch korrekt darstellen zu können. Diese Arbeit befasst sich mit der Reduktion der Wirbelsäule bzw. einzelner Wirbel anhand der Erstellung und posierung von 3D-Skeletten, welche je über anders zusammengefasste Wirbel verfügen.

# Inhalt

## Inhalt I

<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>III</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>VIII</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen .....</b>	<b>3</b>
2.1 <i>Aufbau der Wirbelsäule .....</i>	3
2.1.1 Wirbel.....	6
2.1.2 Halswirbelsäule .....	7
2.1.3 Brustwirbelsäule .....	9
2.1.4 Lendenwirbelsäule .....	9
2.1.5 Freiheitsgrade der Bewegung.....	10
2.2 <i>Bestimmung der Freiheitsgrade.....</i>	12
2.3 <i>Blender.....</i>	13
2.3.1 Grundlegende Begriffserklärungen .....	13
2.3.1.1 Frames.....	13
2.3.1.2 Render .....	13
2.3.1.3 Mesh .....	14
2.3.1.4 local und global Space .....	14
2.3.1.5 Object-, Edit- und Pose-Mode .....	14
2.3.2 Aufbau Blender .....	15
2.3.3 Properties.....	16
2.3.4 Rigify .....	19
2.4 <i>MakeHuman.....</i>	20
2.5 <i>Projektaufbau für Einposierung .....</i>	21
<b>3 Erstellung des Körpermeshs.....</b>	<b>27</b>
3.1 <i>fotogrammetrische Erfassung.....</i>	27
3.2 <i>Menschmodellgenerierung mit MakeHuman.....</i>	28
3.3 <i>Erfassung mittels 3D-Scanner .....</i>	29
<b>4 Methoden .....</b>	<b>33</b>

---

4.1	<i>Erstellung des Ur-Modells</i> .....	33
4.2	<i>Posieren des Ur-Modells in Referenzraum 1</i> .....	34
4.3	<i>Erstellung und Posierung der Varianten</i> .....	36
4.4	<i>Einposierung der Modelle in Referenzraum 2</i> .....	39
<b>5</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion</b> .....	<b>43</b>
5.1	<i>Einposierung des Ur-Modells in Referenzraum 1</i> .....	43
5.2	<i>Erstellung und Posierung der Varianten in Referenzraum 1</i> .....	44
5.3	<i>Einposierung in Referenzraum 2</i> .....	48
<b>6</b>	<b>Fazit</b> .....	<b>49</b>
<b>7</b>	<b>Ausblick</b> .....	<b>50</b>
<b>8</b>	<b>Danksagung</b> .....	<b>51</b>
<b>Literatur</b>		<b>53</b>
<b>Anlagen</b>		<b>55</b>
<b>Anlagen, Teil 1</b> .....		<b>I</b>
<b>Anlagen, Teil 2</b> .....		<b>V</b>
<b>Anlagen, Teil 3</b> .....		<b>IX</b>
<b>Anlagen, Teil 4</b> .....		<b>XVII</b>
<b>Selbstständigkeitserklärung</b> .....		<b>23</b>

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 : Knöchernen Wirbelsäule, a Ansicht von ventral [Schün, 2018, S. 104 Abb. A] Darstellung der Wirbelsäule mit ihren Wirbelsäulensegmenten. ....	4
Abbildung 2 : Abschnitte und Krümmungen der Wirbelsäule [Schün, 2018, S. 105 Abb. B] Darstellung der Krümmungen und Segmente in unterschiedlichen Farben in der Sagittalebene .....	5
Abbildung 3 : Bauelemente eines Wirbels [Schün, 2018, S. 108 Abb. A] Grundaufbau eines Wirbels, in Ausnahme der Wirbel C1, C2 und den Wirbeln der Sakralwirbelsäule....	6
Abbildung 4 : Atlas a Ansicht von links-lateral, (Prometheus LernAtlas. Thieme, 4. Aufl.) b kranial c und ventral [Aumü, 2020, Abb. C-1.25] Abbildung des Atlas (C1) mit lateinischen Beschriftungen .....	7
Abbildung 5 : Axis a Ansicht von links-lateral, b kranial c und ventral. (Prometheus LernAtlas. Thieme, 4.Aufl.) [Aumü, 2020, Abb. C-1.26] Abbildung des Axis (C2) mit lateinischen Beschriftungen.....	8
Abbildung 6 : Halswirbel a 4. Halswirbel in der Ansicht von links-lateral, (Prometheus LernAtlas. Thieme, 4. Aufl.) b kranial c und ventral [Aumü, 2020, Abb. C-1.8] Abbildung des 4. Halswirbels (C4) mit lateinischen Beschriftungen zur Anschauung des Grundaufbaus der Halswirbel .....	8
Abbildung 7 : Brustwirbel a 6. Brustwirbel in der Ansicht von links-lateral, (Prometheus LernAtlas. Thieme, 4. Aufl.) b kranial c und ventral. [Aumü, 2020, Abb. C-1.10] Darstellung des 6. Brustwirbels (T6) mit lateinischen Beschriftungen zur Anschauung des Grundaufbaus der Brustwirbel .....	9
Abbildung 8 : Lendenwirbel a 2. Lendenwirbel in der Ansicht von links-lateral, b kranial c und ventral. (Prometheus LernAtlas. Thieme, 4. Aufl.) [Aumü, 2020, Abb. C-1.13] Abbildung des 2. Lendenwirbels (L2) mit lateinischen Beschriftungen zur Anschauung des Grundaufbaus der Lendenwirbel .....	10



---

Abbildung 9 : Bewegungsumfänge der WS-Abschnitte nach der Neutral-Null-Methode [Aumü, 2020, Abb. C-1.29] Beispielhafte Darstellung der Bewegungen und der Freiheitsgrade der Wirbelsäule, aufgeteilt auf die einzelnen Wirbelsäulensegmente.....	11
Abbildung 10 : Neutral-Null-Methode am Beispiel des Kniegelenks a Neutral-Null-Stellung in der Ansicht von vorne (I) und von der Seite (II) (Prometheus LernAtlas. Thieme, 4. Aufl.) [Aumü, 2020, S. 233 Abb. B-4.7] Darstellung der Neutral-Null-Stellung in der Frontalebene und Sagittalebene .....	12
Abbildung 11 : Benutzeroberfläche von Blender beim Öffnen eines neuen Projekts. rot: 3D-Viewport, grün: Timeline, gelb: Outliner, blau: Properties .....	15
Abbildung 12 : Filter Dropout-Menü des Outliners.....	16
Abbildung 13 : Object Properties.....	17
Abbildung 14 : Auswahlmnü für das Hinzufügen eines Modifiers zu einem Objekt in Blender .....	18
Abbildung 15 : Bone-Constraints in Blender.....	19
Abbildung 16 : MakeHuman Ansicht bei neuem Projekt.....	20
Abbildung 17: Grobskizze Aufbau Referenzbildaufnahme. rot: abgegrenzter Bereich, blau: Kameras, orange: Blickrichtung der Kameras .....	21
Abbildung 18 : Kameraeigenschaften für die Referenzbildereinbindung in Blender.....	23
Abbildung 19 : fertiggestellter Viewport für Einposierung in Blender .....	24
Abbildung 20 : Versuchsaufbau für zweite Referenzraumaufnahme .....	25
Abbildung 21 : Darstellung abgeklebter Wirbel in der Transversalebene von L5 - C5 .....	26
Abbildung 22 : Versuchsaufbau für die fotogrammetrische Erfassung. links: Spiegelreflexkamera auf einem Dreifuß. rechts: einfarbige Leinwand mit darauf befindlichem Drehteller. ....	27
Abbildung 23 : Körpermesherstellung mithilfe der Referenzbilder in MakeHuman.....	29
Abbildung 24 : Modellaufbau des Laserscans. Erster Scan mit im Vordergrund positioniertem Scanner, zweiter Scan mit Scanner an Position im Hintergrund.....	30

Abbildungsverzeichnis	V
Abbildung 25 : lasergescanntes Mesh .....	31
Abbildung 26 : Ur-Modell unposiert in Frame 1 .....	34
Abbildung 27 : Unzureichende Bewegung bei Flexion .....	35
Abbildung 28 : Ur-Modell Flexionsbewegung – Fehler unter Einbeziehung des Meshs ...	35
Abbildung 29 : Modell 8 - ungeeignete Zusammenfassung an Wirbelsäulenknochen bei Flexion .....	38
Abbildung 30 : Ur-Modell .....	38
Abbildung 31 : Ausgangsposition Ur-Modell für Referenzraum 2 .....	39
Abbildung 32 : Key-Frame Menü .....	40
Abbildung 33 : Flexion Referenzraum 2 mit markierten Wirbeln .....	41
Abbildung 34 : Referenzraum 2 Viewport. orange: Frontalebene, blau: Sagittalebene, violett: Transversalebene, rot: freier Viewport.....	41
Abbildung 35 : Modell 7 Lateralneigung rechts .....	46
Abbildung 36 : Gegenüberstellung Modell 12 (links) und dem Ur-Modell (rechts) .....	47
Abbildung 37 : Gegenüberstellung Modell 15 (links) und dem Ur-Modell (rechts) .....	47
Abbildung 38 : Frame 10 - Flexionsbewegung Kamera 1 .....	V
Abbildung 39 : Frame 10 - Flexionsbewegung Kamera 2 .....	V
Abbildung 40 : Frame 41 - Lateralneigung rechts Kamera 1 .....	VI
Abbildung 41 : Frame 41 - Lateralneigung rechts Kamera 2 .....	VI
Abbildung 42 : Frame 46 - Lateralneigung links Kamera 1 .....	VII
Abbildung 43 : Frame 46 - Lateralneigung links Kamera 2 .....	VII
Abbildung 44 : Frame 55 – Extensionsbewegung Kamera 1 .....	VIII
Abbildung 45 : Frame 55 - Extensionsbewegung Kamera 2 .....	VIII

---

Abbildung 46 : Collage Ur-Modell - links nach rechts: Extension, Flexion, Lateralneigung Links, Lateralneigung Rechts .....	XVII
Abbildung 47 : Collage Modell 1 - links nach rechts: Extension, Flexion, Lateralneigung Links, Lateralneigung Rechts .....	XVII
Abbildung 48 : Collage Modell 2 - links nach rechts: Extension, Flexion, Lateralneigung Links, Lateralneigung Rechts .....	XVII
Abbildung 49 : Collage Modell 3 - links nach rechts: Extension, Flexion, Lateralneigung Links, Lateralneigung Rechts .....	XVIII
Abbildung 50 : Collage Modell 4 - links nach rechts: Extension, Flexion, Lateralneigung Links, Lateralneigung Rechts .....	XVIII
Abbildung 51 : Collage Modell 5 - links nach rechts: Extension, Flexion, Lateralneigung Links, Lateralneigung Rechts .....	XVIII
Abbildung 52 : Collage Modell 6 - links nach rechts: Extension, Flexion, Lateralneigung Links, Lateralneigung Rechts .....	XIX
Abbildung 53 : Collage Modell 7 - links nach rechts: Extension, Flexion, Lateralneigung Links, Lateralneigung Rechts .....	XIX
Abbildung 54 : Collage Modell 8 - links nach rechts: Extension, Flexion, Lateralneigung Links, Lateralneigung Rechts .....	XIX
Abbildung 55 : Collage Modell 9 - links nach rechts: Extension, Flexion, Lateralneigung Links, Lateralneigung Rechts .....	XX
Abbildung 56 : Collage Modell 10 - links nach rechts: Extension, Flexion, Lateralneigung Links, Lateralneigung Rechts .....	XX
Abbildung 57 : Collage Modell 11 - links nach rechts: Extension, Flexion, Lateralneigung Links, Lateralneigung Rechts .....	XX
Abbildung 58 : Collage Modell 12 - links nach rechts: Extension, Flexion, Lateralneigung Links, Lateralneigung Rechts .....	XXI
Abbildung 59 : Collage Modell 13 - links nach rechts: Extension, Flexion, Lateralneigung Links, Lateralneigung Rechts .....	XXI

---

Abbildung 60 : Collage Modell 14 - links nach rechts: Extension, Flexion, Lateralneigung  
Links, Lateralneigung Rechts ..... XXI

Abbildung 61 : Collage Modell 15 - links nach rechts: Extension, Flexion, Lateralneigung  
Links, Lateralneigung Rechts ..... XXII

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 : Geänderte Freiheitsgrade für Ur-Modell. grün: geänderte Freiheitsgrade .....	37
Tabelle 2 : Zusammenfassung der Wirbel in digitalen Knochen für alle Variantenmodelle .....	45
Tabelle 3 : Freiheitsgrade der Wirbelsäule, bestimmt durch meinen Vorgänger .....	I
Tabelle 4 : Neu recherchierte Freiheitsgrade .....	II
Tabelle 5 : Final zusammengefügte Freiheitsgrade .....	IV
Tabelle 6 : Tabelle der Freiheitsgrade für Variantenmodell 1, grün: geänderte Freiheitsgrade, orange: Zusammengefaste Werte durch Addition .....	IX
Tabelle 7 : Tabelle der Freiheitsgrade für Variantenmodell 2, grün: geänderte Freiheitsgrade, orange: Zusammengefaste Werte durch Addition .....	X
Tabelle 8 : Tabelle der Freiheitsgrade für Variantenmodell 3, grün: geänderte Freiheitsgrade, orange: Zusammengefaste Werte durch Addition .....	X
Tabelle 9 : Tabelle der Freiheitsgrade für Variantenmodell 4, grün: geänderte Freiheitsgrade, orange: Zusammengefaste Werte durch Addition .....	XI
Tabelle 10 : Tabelle der Freiheitsgrade für Variantenmodell 5, grün: geänderte Freiheitsgrade, orange: Zusammengefaste Werte durch Addition .....	XI
Tabelle 11 : Tabelle der Freiheitsgrade für Variantenmodell 6, grün: geänderte Freiheitsgrade, orange: Zusammengefaste Werte durch Addition .....	XII
Tabelle 12 : Tabelle der Freiheitsgrade für Variantenmodell 7, grün: geänderte Freiheitsgrade, orange: Zusammengefaste Werte durch Addition .....	XII
Tabelle 13 : Tabelle der Freiheitsgrade für Variantenmodell 8, grün: geänderte Freiheitsgrade, orange: Zusammengefaste Werte durch Addition .....	XIII
Tabelle 14 : Tabelle der Freiheitsgrade für Variantenmodell 9, grün: geänderte Freiheitsgrade, orange: Zusammengefaste Werte durch Addition .....	XIII

---

Tabelle 15 : Tabelle der Freiheitsgrade für Variantenmodell 10, grün: geänderte Freiheitsgrade, orange: Zusammengefasste Werte durch Addition .....	XIV
Tabelle 16 : Tabelle der Freiheitsgrade für Variantenmodell 11, grün: geänderte Freiheitsgrade, orange: Zusammengefasste Werte durch Addition .....	XIV
Tabelle 17 : Tabelle der Freiheitsgrade für Variantenmodell 12, grün: geänderte Freiheitsgrade, orange: Zusammengefasste Werte durch Addition .....	XV
Tabelle 18 : Tabelle der Freiheitsgrade für Variantenmodell 13, grün: geänderte Freiheitsgrade, orange: Zusammengefasste Werte durch Addition .....	XV
Tabelle 19 : Tabelle der Freiheitsgrade für Variantenmodell 14, grün: geänderte Freiheitsgrade, orange: Zusammengefasste Werte durch Addition .....	XVI
Tabelle 20 : : Tabelle der Freiheitsgrade für Variantenmodell 15, grün: geänderte Freiheitsgrade, orange: Zusammengefasste Werte durch Addition .....	XVI



# 1 Einleitung

Der Tankstellenraub in Großweitzschen bei Döbeln sorgt für großes Aufsehen. Die Täter kommen zu zweit auf einem Motorrad an einer Tankstelle an. Der Fahrer tankt das Motorrad voll und setzt sich auf dieses wieder drauf. Der Beifahrer bzw. Hintermann geht nach dem Volltanken in das Tankstellengebäude hinein. Die Gesichter beider Personen sind nicht zu erkennen, da beide ihre Helme während des gesamten Tatablaufs aufbehalten. Der Beifahrer schaut sich zunächst im Tankstellengebäude um und zieht eine Waffe. Diese richtet er auf den Kassierer, welcher seine Kasse öffnet, und das Geld herausgibt. Nachdem der Kassierer seine Kasse geleert hat, begibt sich der Täter aus dem Tankstellengebäude heraus, steigt wieder auf das Motorrad und fährt mit seinem Komplizen weg. [Labu, 2022, S. 163f]

Ein solcher Fall ist heute keine Seltenheit. Viele altbewährte Methoden der Forensik führen heute nicht mehr so einfach zu den gewünschten Ergebnissen. Die große Frage ist dabei, wie die Täter identifiziert werden können, obwohl sie keine verwertbaren Spuren hinterlassen haben oder diese nicht für eine Überführung und Verurteilung ausreichen. In einem solchen Fall, wie beim Tankstellenraub in Großweitzschen, kann die Rekonstruktion der Tat mithilfe eines digitalen Skeletts helfen.

Um die digitale Tatortrekonstruktion mithilfe eines digitalen Skeletts zu ermöglichen, bedarf es zunächst einiger Rahmenbedingungen. In dem oben geschilderten Sachverhalt half ein Video bei der Nachstellung der Tat. Dieses wurde von den Tankstellenkameras aufgenommen und zeigt den Tatablauf, auch wenn die Qualität der Aufnahmen nicht sehr hoch ist. Mithilfe dieser Aufnahmen ist es möglich, Modelle von Tatverdächtigen in die Einzelbilder des Videos, sogenannte Frames, zu posieren.

Für die Erstellung der Modelle und digitalen Skelette wurden die Tatverdächtigen zunächst vermessen. Dabei ist die Länge der einzelnen Gliedmaßen, wie z.B. die Länge der Unterarme oder der Abstand zwischen Hüfte und Knie, besonders wichtig, da an diese Stellen die digitalen Knochen mit exakt den genommenen Maßen eingesetzt werden müssen. Neben der Vermessung werden auch Bilder von den Verdächtigen gemacht, um das digitale Skelett genauer an den Körper anzupassen. [Labu, 2022, S. 167f]

Mithilfe dieser gesammelten Informationen wurden dann die digitalen Skelette generiert und in die Frames der Videoaufnahmen an der Tankstelle gesetzt. Dabei musste noch für jedes Frame einzeln das Skelet neu posiert werden. Mit den posierten Skeletten ist es nun möglich, anhand verschiedener Berechnungen, zu überprüfen, ob die digitalen Skelette der Tatverdächtigen mit den Aufnahmen übereinstimmen. Das Resultat dieses Verfahrens ist, dass die Vermessungen für einen Tatverdächtigen übereinstimmen, jedoch für den zweiten nicht. [Labu, 2022, S. 168ff]



Ein Problem bei diesem Verfahren ist, dass jedes Frame noch einzeln einposiert werden muss. Dies ist bei einer kurzen Tathandlung mit ein bis zwei Tatverdächtigen zwar noch händisch machbar, jedoch bei einer höheren Anzahl an Tatverdächtigen oder einer Tathandlung, die sich über einen längeren Zeitraum abspielt, sehr aufwendig und Ressourcen verbrennend. Aus diesem Grund wird daran gearbeitet das Verfahren zu automatisieren. Dafür wird momentan ein Programm namens Open-Pose verwendet. Dieses Programm versucht mit einer künstlichen Intelligenz Gelenkpunkte vorherzusagen. Ein Problem dabei stellt jedoch die Wirbelsäule dar, da diese lediglich durch eine gerade Linie zwischen Hüfte und Schulter dargestellt wird. [Boesc, 2022]

Gerade bei Beugungsbewegungen wird ersichtlich, dass eine einfache Linie, welche in diesem Fall einen einzelnen Knochen darstellt, nicht für eine Rekonstruktion ausreichen würde. Um dieses Problem zu beheben, soll die Bewegung der Wirbelsäule analysiert werden und überprüft werden, wie viele digitale Knochen überhaupt benötigt werden, um eine Bewegung so realitätsnah wie möglich darstellen zu können. Das Ziel dieser Arbeit ist es, verschiedene Wirbelsäulentypen in verschiedenen Bewegungen zu posieren und anhand des gegebenen Materials, Veränderungen im Posierverhalten auszumachen.

## 2 Grundlagen

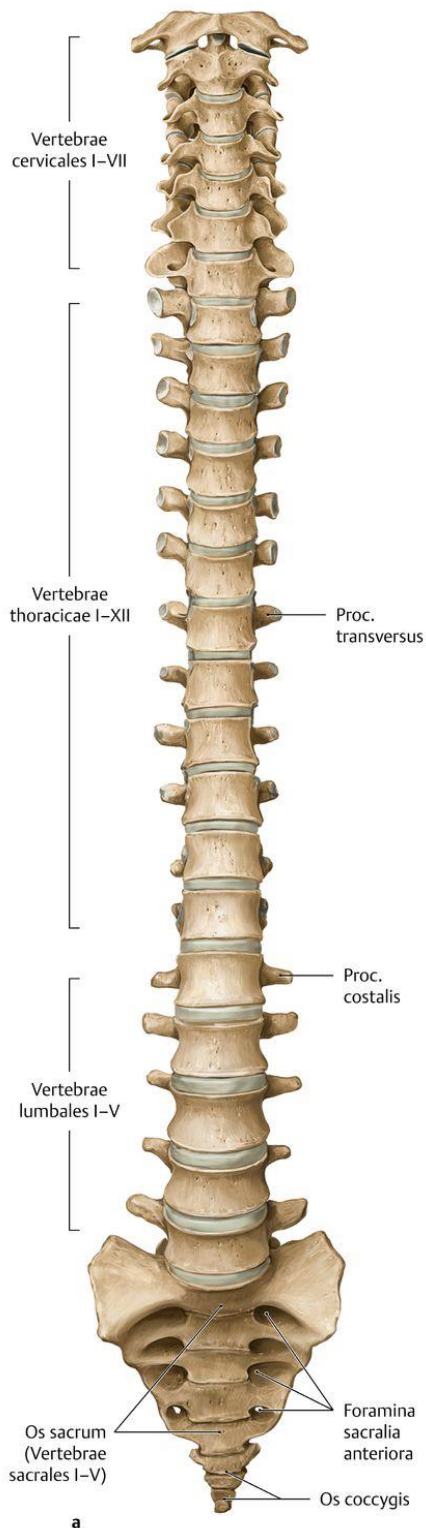
Im folgenden Kapitel werden die Grundlagen für die verwendeten Methoden erklärt. Dabei werden auch die Vorbereitungsschritte erläutert, welche für die Bearbeitung der eigentlichen Problemstellung notwendig sind.

### 2.1 Aufbau der Wirbelsäule

Die menschliche Wirbelsäule ist ein Kompromiss aus Stabilität und Beweglichkeit. Sie wird in 4 Einzelsegmente unterteilt. Diese sind die Halswirbelsäule (Vertebrae cervicales I-VII), die Brustwirbelsäule (Vertebrae thoracicae I-XII), die Lendenwirbelsäule (Vertebrae lumbales I-V) und die Sakralwirbelsäule (Vertebrae sacrales I-V). [Schün, 2018, S. 104]

Die Sakralwirbelsäule kann auch in 2 Einzelbestandteile aufgeteilt werden, sodass insgesamt 5 Wirbelsäulensegmente entstehen. Diese beiden Einzelbestandteile sind das Kreuzbein (Os sacrum) und das Steißbein (Os coccygis). [Wasch, 2015, S. 118]

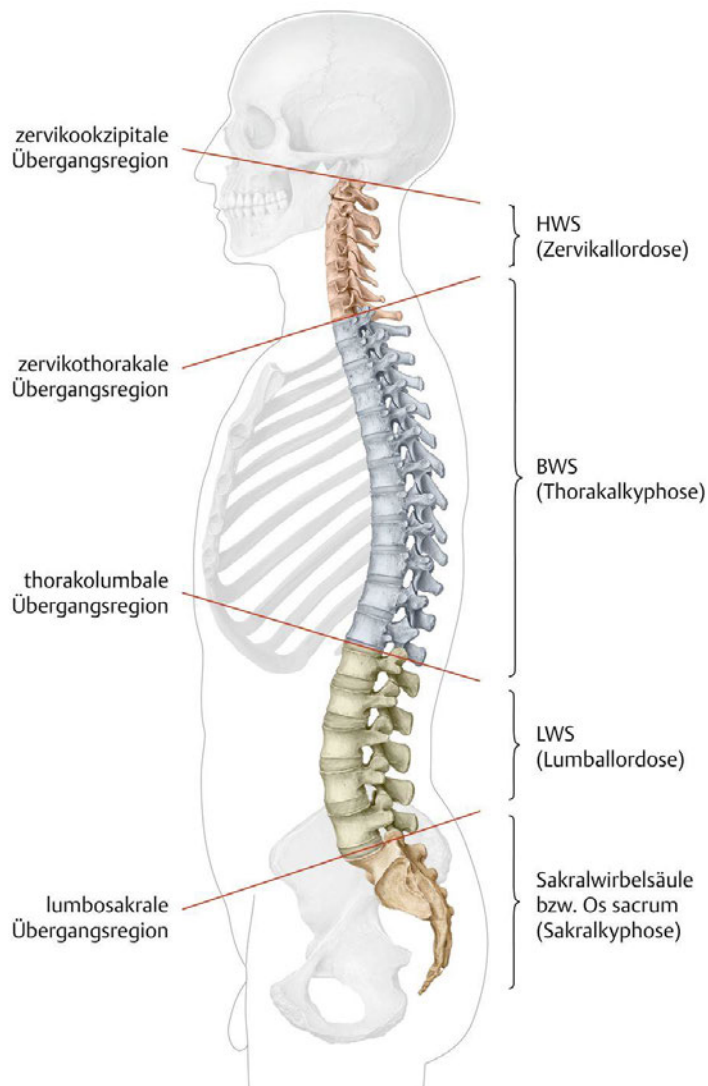
Die einzelnen Teilregionen bzw. Segmente der Wirbelsäule verfügen je über eine eigene Anzahl an Wirbeln. Jeder Wirbel wird dabei von kranial nach kaudal mit der Zugehörigkeit seiner Teilregion und einer Nummer bezeichnet. Die Zugehörigkeit zur Teilregion wird durch den ersten Buchstaben der lateinischen Bezeichnung des Wirbelsäulensegments ausgedrückt. Im Fall der Halswirbelsäule ist dies der Buchstabe C, vom lateinischen Wort „cervicales“. Der erste Wirbel der Halswirbelsäule wird dementsprechend als C1 bezeichnet und der 5. Wirbel der Halswirbelsäule als C5. Insgesamt besitzt die Halswirbelsäule 7 Wirbel. Als nächstes Wirbelsäulensegment kaudal zur Halswirbelsäule, folgt die Brustwirbelsäule. Diese Region beinhaltet insgesamt 12 Wirbel, T1 bis T12. Folgend auf die Brustwirbelsäule ist kaudal die Lendenwirbelsäule, welche die Wirbel L1-L5 beinhaltet und ihr demzufolge 5 Wirbel zugeschrieben werden. Abschließend befinden sich in der Sakralwirbelsäule die verwachsenen Wirbel des Kreuzbeins und Steißbein. Das Kreuzbein besteht aus ursprünglich 5 Wirbeln, welche folgend zur Geburt verschmelzen. Diese 5 verwachsenen Wirbel werden S1 bis S5 bezeichnet. Das Steißbein hingegen besteht aus drei bis fünf Wirbelrudimenten und ist mit dem Kreuzbein verwachsen. [Schün, 2018, S. 104,116] [Aumü, 2020, S. 248, 257f]



**Abbildung 1 : Knöchernen Wirbelsäule, a Ansicht von ventral [Schün, 2018, S. 104 Abb. A]**  
Darstellung der Wirbelsäule mit ihren Wirbelsäulensegmenten.

Die Wirbelkörper werden von kranial nach kaudal größer. Der Grund dafür ist, dass die Masse des Körpers vom oberen Teil weiter nach unten getragen wird. Demzufolge übertragen sie die Last des Körpers und die, welche durch Bewegungen entstehen. [Aumü, 2020, S. 250]

Eine gesunde Wirbelsäule besitzt zudem eine sogenannte Doppel-S-Form. Diese entsteht durch die Krümmungen der einzelnen Wirbelsäulensegmente im Verlauf des Heranwachsendens. Jedes Wirbelsäulensegment hat dabei eine eigene Bezeichnung für die Krümmung eines Segments. Die Krümmung der Halswirbelsäule wird Zervikallordose genannt. Bei der Brustwirbelsäule wird sie als Thorakalkyphose bezeichnet. Für die Lendenwirbelsäule, heißt die Krümmung Lumballordose und für die Sakralwirbelsäule, Sakralkyphose. Die Krümmungen dienen dabei als eine Art Stoßdämpfer, welche das Hirn vor Erschütterungen schützen. [Aumü, 2020, S. 248ff]

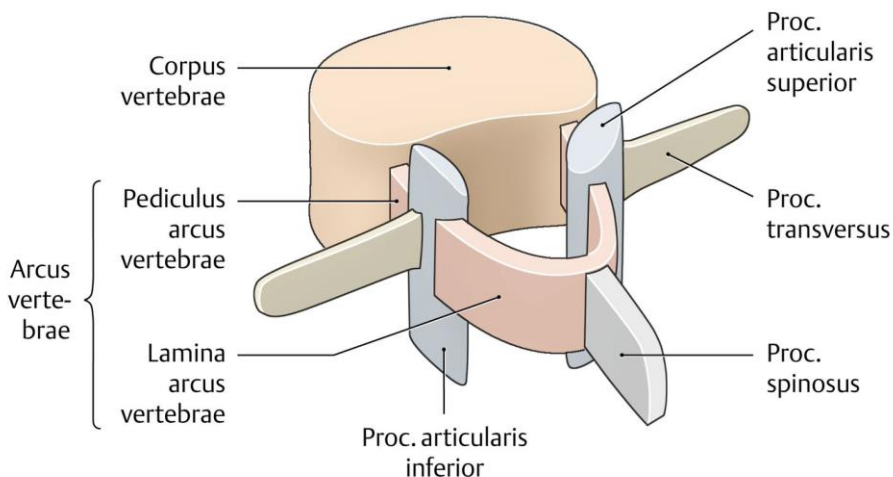


**Abbildung 2 : Abschnitte und Krümmungen der Wirbelsäule [Schün, 2018, S. 105 Abb. B]**  
Darstellung der Krümmungen und Segmente in unterschiedlichen Farben in der Sagittalebene

### 2.1.1 Wirbel

Die Wirbelsäule ist, wie der Name vermuten lässt, zum Großteil aus Wirbeln aufgebaut. Dabei sind bei einem gesunden Menschen 24 Wirbel frei beweglich und die Wirbel des Kreuz- und Steißbeins im Verlaufe des Heranwachsens verwachsen. Der Großteil aller Wirbel hat dabei einen ähnlichen Grundaufbau, welcher sich in der Ausprägung an den einzelnen Wirbel jedoch unterscheidet. Die Wirbel, welche diesem Grundaufbau nicht folgen, sind die Wirbel Atlas, Axis (C1 und C2) und die verwachsenen Wirbel der Sakralwirbelsäule. [Wasch, 2015, S. 119]

Der Grundaufbau der Wirbel besteht aus dem Wirbelkörper (Corpus vertebrae), dem Wirbelbogen (Arcus vertebrae) und den Wirbelbogenfortsätzen (Proc. Arcus vertebrae). [Wasch, 2015, S.119]



**Abbildung 3 : Bauelemente eines Wirbels [Schün, 2018, S. 108 Abb. A]** Grundaufbau eines Wirbels, in Ausnahme der Wirbel C1, C2 und den Wirbeln der Sakralwirbelsäule

Der Wirbelkörper besitzt eine Randleiste (Epiphysis anularis), welche die kaudal ausgerichteten Flächen (Facies intervertebralis) umgibt. Diese Flächen werden auch als Deck- und Bodenplatte bezeichnet, da sie sich kranial und kaudal am Wirbelkörper befinden. Dabei bestehen die genannten Elemente aus Knochen, die Flächen jedoch nur aus einer sehr dünnen Schicht, da sich im Innenraum des Wirbels die Spongiosa befindet. [Wasch, 2015, S. 119]

Der Wirbelbogen besteht aus zwei Anteilen, welche sowohl sinister als auch dexter von der Sagittalebene liegen. Es liegt somit eine Form der Symmetrie für den Aufbau dieses Bestandteils vor. Die beiden Bestandteile sind die Bogenwurzel (Pediculus arcus vertebrae) und die Bogenplatte (Lamina arcus vertebrae). Die Bogenplatten treffen im Dornfortsatz (Proc. Spinosus) aufeinander. Der Zwischenraum, welcher durch den Wirbelbogen aufgespannt wird, wird als Wirbelloch (Foramen vertebrale) bezeichnet. Durch die Gesamtheit der Wirbellocher der Wirbelsäule, welche als Wirbelkanal (Canalis vertebralis)

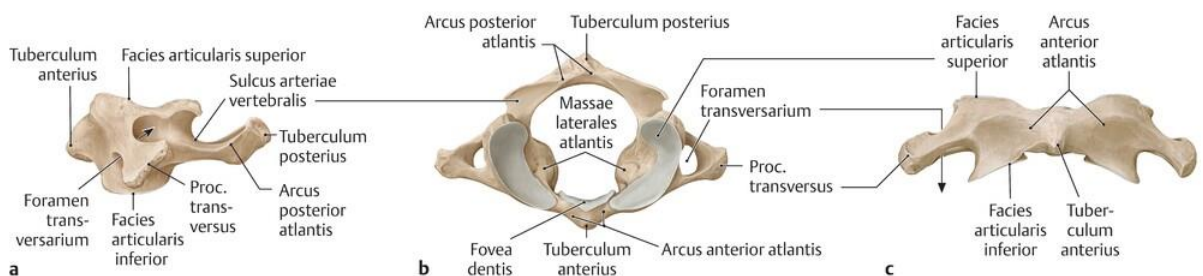
bezeichnet wird, verlaufen Bänder, das Rückenmark und die Rückenmarkshäute. [Wasch, 2015, S. 119]

Für die Wirbelbogenfortsätze gilt, dass sich diese zwischen der Bogenwurzel und der Bogenplatte, auf beiden Seiten, befinden. Diese sind lateral gerichtet und werden als Querfortsatz (Proc. Transversus) bezeichnet. Zudem ragen auf beiden Seiten Gelenkfortsätze (Procc. Articularis superior et inferior) nach oben und unten heraus, welche den darüber bzw. darunterliegenden Wirbel gelenkartig verbinden. [Wasch, 2015, S. 119]

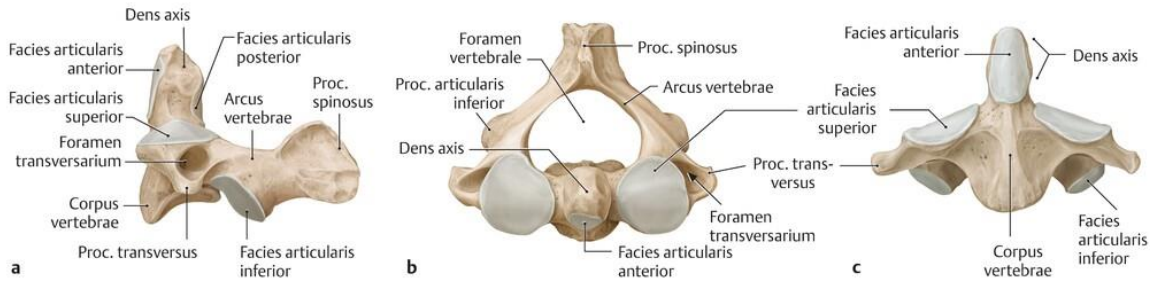
Zwischen den Wirbeln liegen 23 Zwischenwirbelscheiben, auch Bandscheiben (Disci intervertebrales) genannt, welche die Deck- und Grundplatte der Wirbel miteinander verbinden. Die Größe bzw. Dicke der Bandscheiben nimmt dabei nach kaudal zu, da sie wie auch die Wirbel mehr Last tragen, je tiefer sie liegen. Dabei liegt jedoch zwischen dem Schädel und dem Atlas und dem Atlas und dem Axis keine Bandscheibe, welche diese Segmente miteinander verbindet. Zudem nimmt die Höhe der Bandscheiben mit dem Verlauf des Tages ab, wobei ein Körpergrößenverlust von ca. 2 cm im Vergleich zum Morgen entsteht. [Wasch, 2015, S. 120] [Gehrke, 2020, S. 70]

## 2.1.2 Halswirbelsäule

Die Wirbel C1 (Atlas) und C2 (Axis) sind deutlich anders geformt als die weiteren Wirbel. Der Grund dafür ist, dass sie die Hauptlast des Kopfes tragen und ihm zudem die Bewegung in drei Freiheitsgraden ermöglichen. [Schün, 2018, S. 110]



**Abbildung 4 : Atlas a Ansicht von links-lateral, (Prometheus LernAtlas. Thieme, 4. Aufl.) b kranial c und ventral [Aumü, 2020, Abb. C-1.25) Abbildung des Atlas (C1) mit lateinischen Beschriftungen**

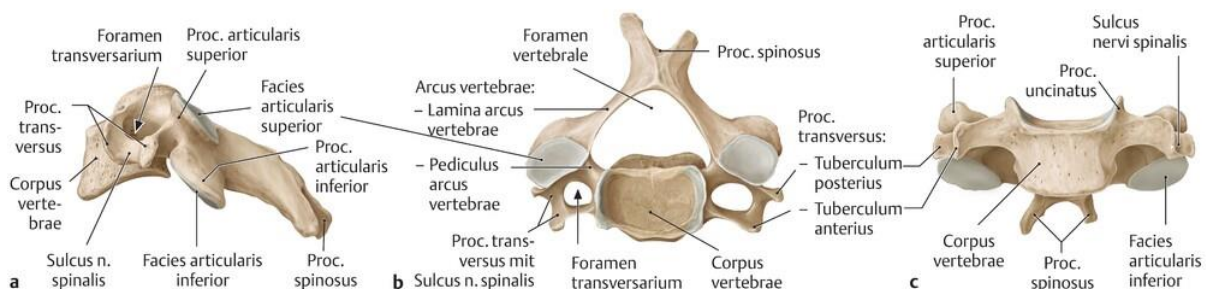


**Abbildung 5 : Axis a Ansicht von links-lateral, b kranial c und ventral. (Prometheus LernAtlas. Thieme, 4.Aufl.) [Aumü, 2020, Abb. C-1.26]** Abbildung des Axis (C2) mit lateinischen Beschriftungen

Der Atlas besitzt im Gegensatz zu den anderen Wirbeln keinen Wirbelkörper und auch keinen Dornfortsatz. Die Gelenkflächen bzw. die Seitenkörper (Massae laterales) an denen die beiden Gelenkflächen sitzen, sind über den vorderen Atlasbogen (Arcus anterior atlantis) verbunden. Diese Gelenkflächen sind für die Verbindung zwischen dem Atlas und Schädel bzw. Atlas und Axis zuständig. [Wasch, 2015, S. 124]

Der zweite Halswirbel, der Axis, besitzt hingegen einen Wirbelkörper. Am Wirbelbogen des Axis und dem Unterrand des Dens axis liegen die zwei superior gerichteten Gelenkflächen, welche den Axis mit dem Atlas verbinden. Zudem liegen dort auch die zwei inferior gerichteten Gelenkflächen in Richtung des dritten Halswirbels. [Wasch, 2015, S. 124f]

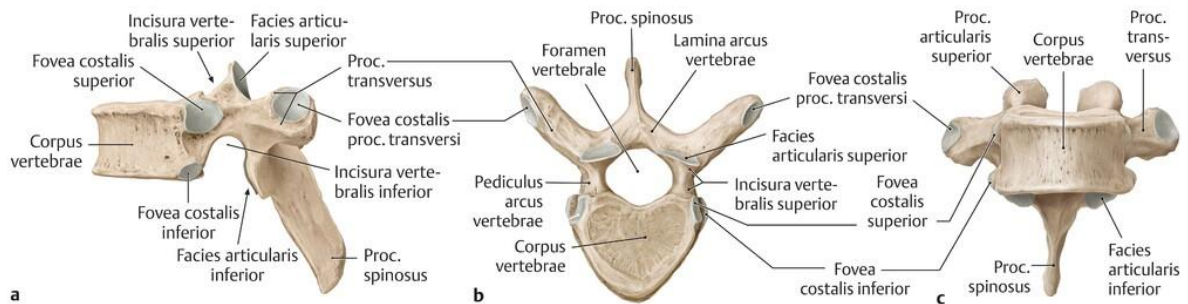
Die restlichen Halswirbel verfügen, im Unterschied zum Axis und Atlas, über einen ähnlichen Aufbau, welcher aus einem würfelförmigen Corpus vertebrae und einem dreiecksförmigen Foramen vertebrale besteht. Die Dornfortsätze der Wirbel C3 bis C6 sind im Vergleich zu den weiteren Wirbeln kurz und teilen sich gabelförmig. Der Dornfortsatz von C7 ist, abweichend von den Dornfortsätzen der darüberliegenden Wirbel, sehr lang und gut ertastbar. [Schün, 2018, S. 110]



**Abbildung 6 : Halswirbel a 4. Halswirbel in der Ansicht von links-lateral, (Prometheus LernAtlas. Thieme, 4. Aufl.) b kranial c und ventral [Aumü, 2020, Abb. C-1.8]** Abbildung des 4. Halswirbels (C4) mit lateinischen Beschriftungen zur Anschauung des Grundaufbaus der Halswirbel

### 2.1.3 Brustwirbelsäule

Im Gegensatz zu den anderen Wirbelsäulenabschnitten, ist die Brustwirbelsäule der unbeweglichste Teil der Wirbelsäule. Dies liegt daran, dass an den Brustwirbeln der Brustkorb liegt bzw. mit der Brustwirbelsäule verbunden ist. Diese Einschränkung sorgt für eine starke Beeinträchtigung der Bewegungsfreiheit. [Wasch, 2015, S. 128] [Gehrk, 2020, S. 82]



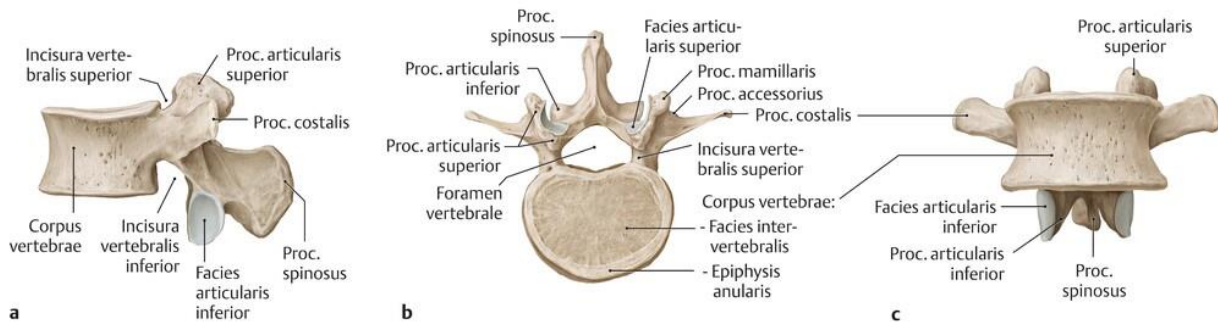
**Abbildung 7 : Brustwirbel a 6. Brustwirbel in der Ansicht von links-lateral, (Prometheus LernAtlas. Thieme, 4. Aufl.) b kranial c und ventral. [Aumü, 2020, Abb. C-1.10]** Darstellung des 6. Brustwirbels (T6) mit lateinischen Beschriftungen zur Anschauung des Grundaufbaus der Brustwirbel

Die Wirbelkörper der Brustwirbelsäule sind dabei herzähnlich geformt und besitzen vom ersten bis neunten Halswirbel zwei Gelenkflächen (Foveae costales superior et inferior) auf beiden Seiten des Wirbels, welche kaudal und kranial am Knochen bzw. Wirbel sitzen. Diese Gelenkflächen bilden mit dem darunter bzw. darüber gelegenen Wirbel eine Gelenkpfanne für Rippenköpfe bzw. das Rippenkopfgelenk (Articulatio capitis costae). Ab dem zehnten Brustwirbel besitzen die Wirbel nur noch eine Gelenkfläche auf jeder Seite. Bei dem zehnten und elften Brustwirbel sind die Gelenkflächen kranial. Der zwölfte Brustwirbel hat seine Gelenkfläche mittig am Wirbel. Die Dornfortsätze der Brustwirbelsäule sind lang und caudal gerichtet. [Wasch, 2015, S. 128] [Gehrk, 2020, S. 82]

### 2.1.4 Lendenwirbelsäule

Die Wirbelkörper der Lendenwirbelsäule haben eine Bohnen- bzw. Nierenform. Der Durchmesser des Wirbelkörpers ist dabei in der Transversalebene größer als der in der Sagittalebene. [Wasch, 2015, S. 128] [Aumü, 2020, S. 248, 256]





**Abbildung 8 : Lendenwirbel a 2. Lendenwirbel in der Ansicht von links-lateral, b kranial c und ventral. (Prometheus LernAtlas. Thieme, 4. Aufl.) [Aumü, 2020, Abb. C-1.13]** Abbildung des 2. Lendenwirbels (L2) mit lateinischen Beschriftungen zur Anschauung des Grundaufbaus der Lendenwirbel

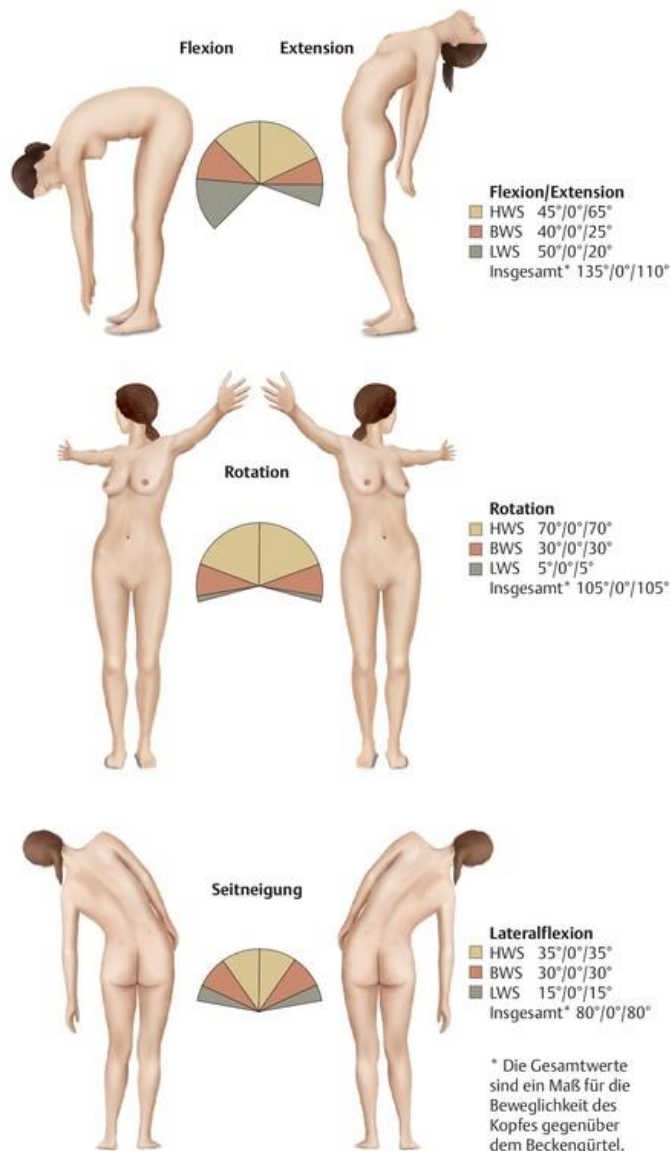
Die Wirbelbogenfortsätze verlaufen horizontal dorsal, sind sehr lang und werden als Rippenfortsatz (Proc.costalis) bezeichnet. Dies liegt daran, dass die eigentlichen Wirbelbogenfortsätze rudimentär an der Basis der Rippenfortsätze liegen und als Procc. Accessorii bezeichnet werden. [Wasch, 2015, S. 128] [Gehrke, 2020, S. 82]

### 2.1.5 Freiheitsgrade der Bewegung

Durch die Verwachsung der Wirbelkörper über die Bandscheiben (disci intervertebralis) und den Bändern in dieser Region kommt es dazu, dass die Bewegung der Wirbelsäule eingeschränkt wird. [Aumü, 2020, S. 268]

Diese Einschränkung wird als Freiheitsgrad bezeichnet, wobei damit die maximale Neigung bzw. Rotation der Wirbelsäulensegmente oder einzelner Wirbel angegeben werden kann. Eine Schwierigkeit stellt dabei die genaue Erfassung dar, da diese nur mithilfe spezieller Messverfahren bestimmt werden kann.

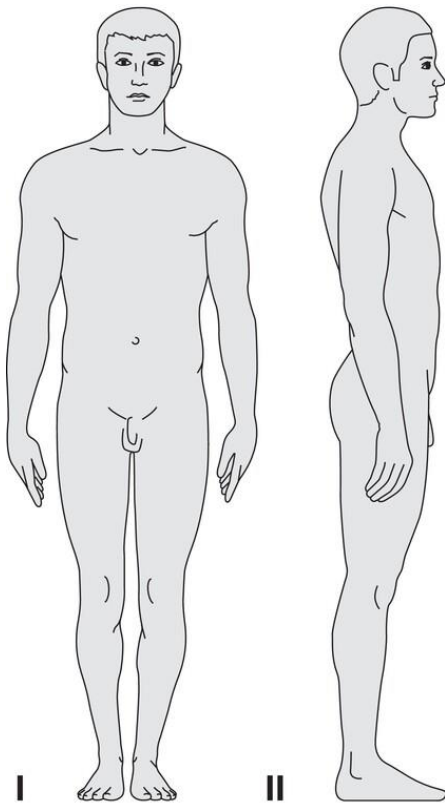
Eine Methode ist dabei die Verwendung von bildgebenden Verfahren. Bei diesen werden teilweise speziell angefertigte Geräte verwendet, um die Probanden in einer Position über die Dauer der Aufnahme zu halten. Oft werden dabei nur einzelne Wirbelsäulensegmente beobachtet, da eine Erfassung der gesamten Wirbelsäule schwierig ist. Andere, einfachere Verfahren sind z.B. der Finger-Boden-Abstand, das Ott-Maß oder das Schober-Maß. [Aumü, 2020, S. 268] [Madin, 2019, S. 1308]



**Abbildung 9 : Bewegungsumfänge der WS-Abschnitte nach der Neutral-Null-Methode [Aumü, 2020, Abb. C-1.29]** Beispielhafte Darstellung der Bewegungen und der Freiheitsgrade der Wirbelsäule, aufgeteilt auf die einzelnen Wirbelsäulensegmente

Eine weitere verwendete Methode für die Erfassung der Bewegungsfreiheitsgrade eines Gelenks ist die Neutral-Null-Methode. Dabei werden die Probanden in eine aufrechte Position, ohne Beugung, positioniert. Die Arme hängen dabei herab und die Handflächen sind zum Körper hingewendet. Diese Position wird als Neutral-Null-Stellung bezeichnet. Ausgehend von dieser Position wird dann das Gelenk bzw. in diesem Fall der Rücken in eine Bewegung gebracht und die Differenz zur neutralen Position gemessen. Die Angaben erfolgen dabei meist in Grad. [Aumü, 2020, S. 232]

Für die Freiheitsgrade der Wirbelsäule wurden die Flexion, Extension, Rotation und Lateralflexion bzw. Lateralneigung als Bewegungen erfasst. [Aumü, 2020, S. 268]



**Abbildung 10 : Neutral-Null-Methode am Beispiel des Kniegelenks a Neutral-Null-Stellung in der Ansicht von vorne (I) und von der Seite (II) (Prometheus LernAtlas. Thieme, 4. Aufl.) [Aumü, 2020, S. 233 Abb. B-4.7]** Darstellung der Neutral-Null-Stellung in der Frontalebene und Sagittalebene

## 2.2 Bestimmung der Freiheitsgrade

Um einen natürlichen Bewegungsumfang zu bestimmen, wurden die Freiheitsgrade der Wirbelsäule für die einzelnen Wirbel bestimmt. Die Recherche wurde auf die Wirbel C1-L5 beschränkt, da die Wirbel des Kreuz- und Steißbeins als verwachsen gelten und nur der aktive bzw. bewegliche Teil untersucht werden sollte. [Schün, 2018, S. 116]

Die Freiheitsgrade der Wirbelsäule wurden bereits in der Bachelorarbeit meines Vorgängers untersucht und zusammengetragen. Einige der von ihm verwendeten Quellen sind jedoch nicht mehr verfügbar, weshalb diese Werte neu belegt werden mussten. Die Tabelle der von ihm verwendeten Freiheitsgrade ist in Anlage Teil 1 Tabelle 3 zu finden.

Die Recherche der Freiheitsgrade stellte durch die geringe Menge an veröffentlichten Messdaten eine Herausforderung dar. Dies liegt an der schweren Erfassbarkeit der einzelnen Wirbel, da diese zunächst mittels bildgebender Verfahren aufgenommen und daraufhin untersucht werden müssen. Verwendete Verfahren für die Erfassung waren unter anderem Röntgenaufnahmen von Teilen oder einzelnen Segmenten der Wirbelsäule und Ultraschall. Wichtig war zudem, dass bei Studien aus denen Daten entnommen wurden, eine möglichst hohe Anzahl an gesunden, weiblichen und männlichen Probanden, mit

einem breiten Altersspektrum teilgenommen haben. [Madin, 2019, S. 1308] [Uluça, 2009, S. 30]

Die bestimmten Daten wurden dann in Tabelle 1 in Anlage 4 festgehalten und unter folgenden Regeln mit den Werten aus der Arbeit meines Vorgängers kombiniert:

1. Wenn der Wert meines Vorgängers in einem von mir recherchierten Intervall lag, wurde der Wert meines Vorgängers übernommen.
2. Wenn der Wert meines Vorgängers außerhalb des von mir recherchierten Intervalls lag, wurde der Maximal- bzw. Minimalwert des Intervalls verwendet, in Abhängigkeit, ob dieser ober- oder unterhalb der Grenze des Intervalls lag.
3. Wurde ein genauer Wert für einen Freiheitsgrad gefunden, wurde der Wert meines Vorgängers durch diesen ersetzt.
4. Wenn ich keinen Wert gefunden habe oder der Wert für mehrere Wirbel auf einmal galt, wurde der Wert meines Vorgängers beibehalten.

Die final verwendeten Freiheitsgrade der einzelnen Wirbel wurden in Tabelle 5 in Anlage Teil 1 festgehalten.

## 2.3 Blender

### 2.3.1 Grundlegende Begriffserklärungen

Während der gesamten Arbeit werden die folgenden Begriffe öfters wiederholt oder sind für das Verständnis der Arbeitsschritte wichtig, weshalb diese im Folgenden genauer, nach eigener Definition, definiert werden.

#### 2.3.1.1 *Frames*

Die Einzelbilder einer Animation oder eines Videos werden als Frames bezeichnet. Je nach Bildrate gibt es verschieden viele Frames pro Sekunde.

#### 2.3.1.2 *Render*

Der Begriff Render leitet sich vom Prozess der Erstellung eines virtuellen Bildes, dem Rendern ab. Bei diesem Prozess berechnet das Programm u.a. die physikalischen Eigenschaften von Materialien, Lichtreflektion, Einfallswinkel, Lichtstärke usw.. Das final errechnete Bild wird dann als Render bezeichnet.

### **2.3.1.3 Mesh**

Als Mesh bezeichnet man umgangssprachlich den Körper eines Objekts. Beispielsweise würde die physische Form eines Würfels in einem 3D-Programm als sein Mesh bezeichneten.

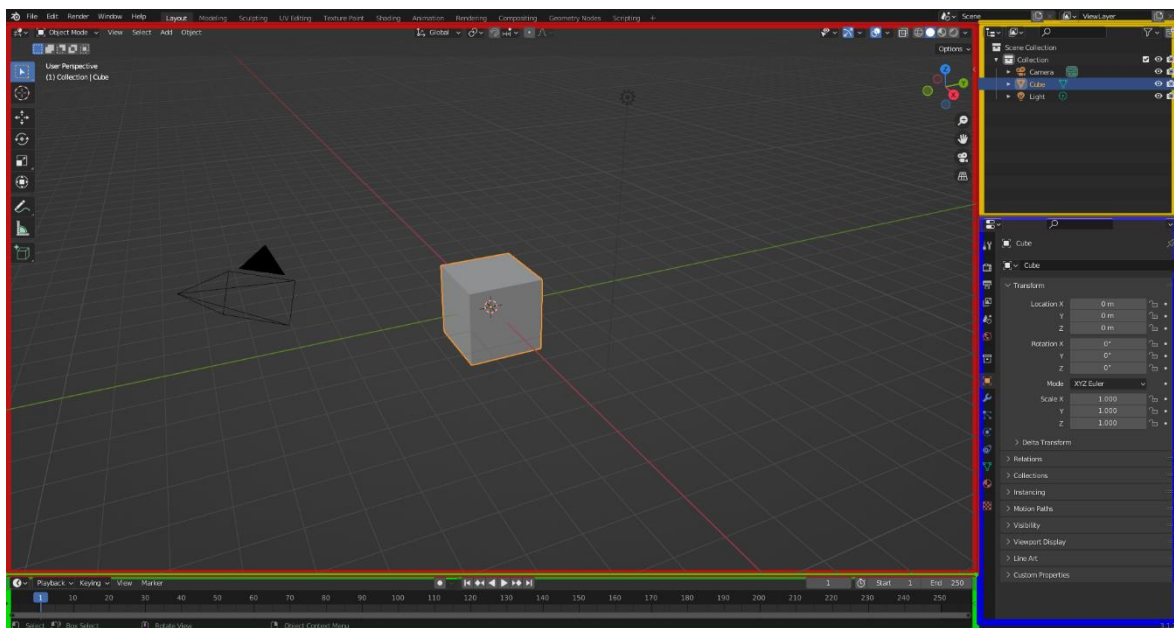
### **2.3.1.4 local und global Space**

Der „global Space“ ist der allgemeine Raum in Blender. In diesem Raum sind die 3 Hauptachsen vorgegeben und deren Ausrichtung ändert sich nicht. So wird im „global Space“ die Z-Achse immer nach oben zeigen. Der „local Space“ hingegen bezeichnet die Achsenausrichtung nach einem Objekt. Jedes Objekt, wenn es generiert wird, besitzt 3 lokale Achsen. Diese sind zunächst identisch mit denen des „global Space“. Wird das Objekt jedoch gedreht, so ändert sich auch die Achsenorientierung. Wenn z.B. ein Würfel im „global Space“ 90 ° um die X-Achse gedreht wird, dann ist seine Ausrichtung der X-Achse im „local Space“ die gleiche wie zuvor. Die Ausrichtung der Y-Achse, entspricht dann der Z-Achse im „global Space“. Der „local Space“ ist folglich nichts weiter als die Eigenorientierung eines Objekts im Raum.

### **2.3.1.5 Object-, Edit- und Pose-Mode**

In Blender existieren verschiedene Modi für die Anpassung eines Objekts. Der Object-Mode ist zuständig für die Auswahl und grobe Transformation, im 3D-Raum, eines Objekts. Wenn ein Objekt im Object-Mode ausgewählt wurde, lässt sich der Edit-Mode aufrufen. In diesem können dann feinere Einstellungen zum Objekt durchgeführt werden. Beispielsweise lässt sich ein Würfel in Blender im Object-Mode nur anwählen und herumschieben, jedoch können nicht die Eckpunkte, Kanten oder Flächen einzeln angepasst werden, denn diese Anpassungsfunktionen sind nur im Edit-Mode verfügbar. Soll dann wieder ein anderes Objekt angepasst werden, so muss dieses Objekt im Object-Mode ausgewählt werden und dann wieder im Edit-Mode angepasst werden. Der Pose-Mode ist zuständig für die Anpassung von digitalen Knochen und deshalb auch nur anwählbar, wenn im Object-Mode ein digitales Skelett oder ein einzelner Knochen ausgewählt wurde.

## 2.3.2 Aufbau Blender

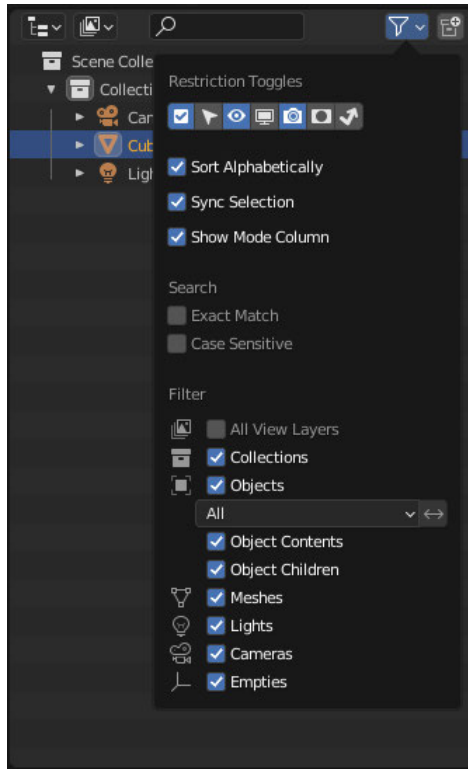


**Abbildung 11 : Benutzeroberfläche von Blender beim Öffnen eines neuen Projekts. rot: 3D-Viewport, grün: Timeline, gelb: Outliner, blau: Properties**

Beim Starten eines neuen Projekts stellt Blender standardgemäß vier verschiedene Fenster zur Verfügung. Diese sind der 3D-Viewport, der Outliner, die Properties und die Timeline.

Im 3D-Viewport wird die 3D-Umgebung dargestellt, in welcher gearbeitet wird. Dieser Raum wird durch drei Achsen aufgespannt, der X-, Y- und Z-Achse. Auf diesen 3 Achsen werden die Objekte dargestellt und können frei bewegt, skaliert und rotiert werden. Der 3D-Viewport ist folglich die visuelle Darstellung der Objekte im 3D-Raum.

Am unteren Bildschirmrand befindet sich die sogenannte Timeline. Diese ist zuständig für alle Transformationen, welche über einen gewissen Zeitraum stattfinden sollen. In der Timeline befindet sich eine Art Cursor, welcher auf die einzelnen Frames zeigt. Ein Beispiel für die Nutzung der Timeline wäre die Erstellung einer Animation, in welcher sich ein Objekt um eine Achse dreht wie auf einem Drehteller. Mithilfe des Cursors können dann die Einzelframes angewählt werden und auf ihnen sogenannte Keyframes platziert werden. Diese sind Informationsspeicherungspunkte, auf denen die Transformationen oder andere Eigenschaften eines Objekts gespeichert werden können. Ein Beispiel dafür wäre die Rotation eines Objekts. Bei Frame 0 wird ein Keyframe mit der Anfangsrotation  $0^\circ$  gesetzt und bei Frame 10 wird ein weiterer Keyframe gesetzt, in welchem das Objekt um  $45^\circ$  um die Z-Achse gedreht wurde. Blender kann nun zwischen den Keyframes das Verhalten des Objekts berechnen und es entsteht eine flüssige Animation von Frame 0 bis 10 bei der sich das Objekt gleichmäßig  $45^\circ$  um die Z-Achse dreht.



**Abbildung 12 : Filter Dropout-Menü des Outliners**

Der Outliner ist eine Art Ordnerstruktur eines Blender-Projekts. In diesem werden alle Objekte, welche in dem Projekt enthalten sind, aufgelistet. Die Objekte können hier ausgewählt werden und es kann über eine Vielzahl von Eigenschaften der Sichtbarkeit eines Objekts entschieden werden.

Die wichtigsten sind dabei der Ausschluss aus der Betrachtung, Anwählbarkeit, Sichtbarkeit und ob ein Objekt im finalen Render sichtbar ist. Des Weiteren können einzelne Objekte auch innerhalb des Drop-Downs des Outliners herausgefiltert werden, welche dann zwar da sind, jedoch nicht mit angezeigt werden.

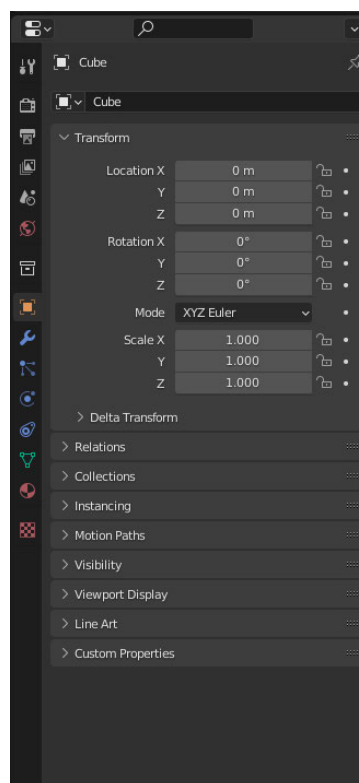
Bei der Arbeit mit Blender wurde die Version 3.2 verwendet.

### 2.3.3 Properties

Die Properties sind eine Sammlung an Menüs, welche zum Teil für das aktuell ausgewählte Element zuständig sind und zum anderen für Eigenschaften, die das gesamte Projekt betreffen. Das Property-Fenster verfügt über viele kleine Untermenüs, in welchen kleinere Anpassungen an einem Objekt vorgenommen werden können. Der Grund, warum dieses Fenster noch einmal speziell hervorgehoben wird, liegt in der Komplexität der einzelnen Menüs und um diese genauer zu erklären.

Das Standardmenü, welches Auskunft über die Lage eines Objektes im Raum gibt, nennt sich „Object Properties“. In ihm befinden sich alle Angaben zu globalen Transformationen, welche mit dem ausgewählten Objekt durchgeführt wurden. Des Weiteren lassen sich auch hier weitere Eigenschaften, wie z.B. die Eltern-Kind-Beziehung oder die Sichtbarkeit einstellen.

Ein weiteres, enorm wichtiges Menü in den Properties nennt sich „Modifier Properties“. In diesem können dem aktiven Objekt verschiedenste zusätzliche Funktionen zugewiesen werden. Wenn im Folgenden über „Modifier“ geschrieben wird, bezieht sich dies, in Ausnahme von digitalen Knochen, auf das aktive Objekt bzw. Mesh eines Körpers. Diese Modifier können einfache Eigenschaften wie z.B. das Spiegeln eines Meshs an einer Achse (Mirror-Modifier) oder das feiner Unterteilen eines Meshs (Subdivision-Surface-Modifier) sein. Es gibt jedoch auch deutlich kompliziertere Modifier, wie z.B. den Shrinkwrap-Modifier, mit welchem sich um das eigentliche Körpermesh ein zweites Mesh mit einem festgelegten Abstand legen lässt.



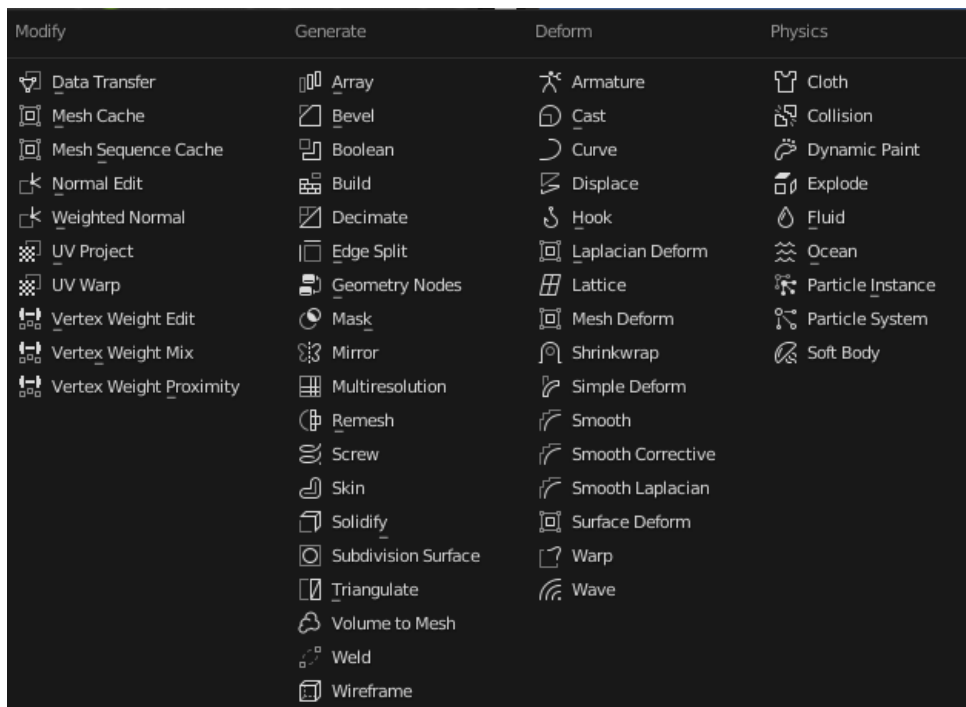
**Abbildung 13 : Object Properties**

Einer der wichtigsten Modifier für den weiteren Verlauf dieser Arbeit ist der „Armature-Modifier“. Dieser sorgt dafür, dass sich ein Mesh entsprechend zum hinterlegten digitalen Skelett verhält. Dieser Modifier wird in Blender zu einem Mesh automatisch hinzugefügt,



wenn ein Skelett mit einem Mesh in eine Eltern-Kind-Beziehung gesetzt wird, wobei das Skelett das Elternobjekt ist und das Mesh das Kindobjekt.

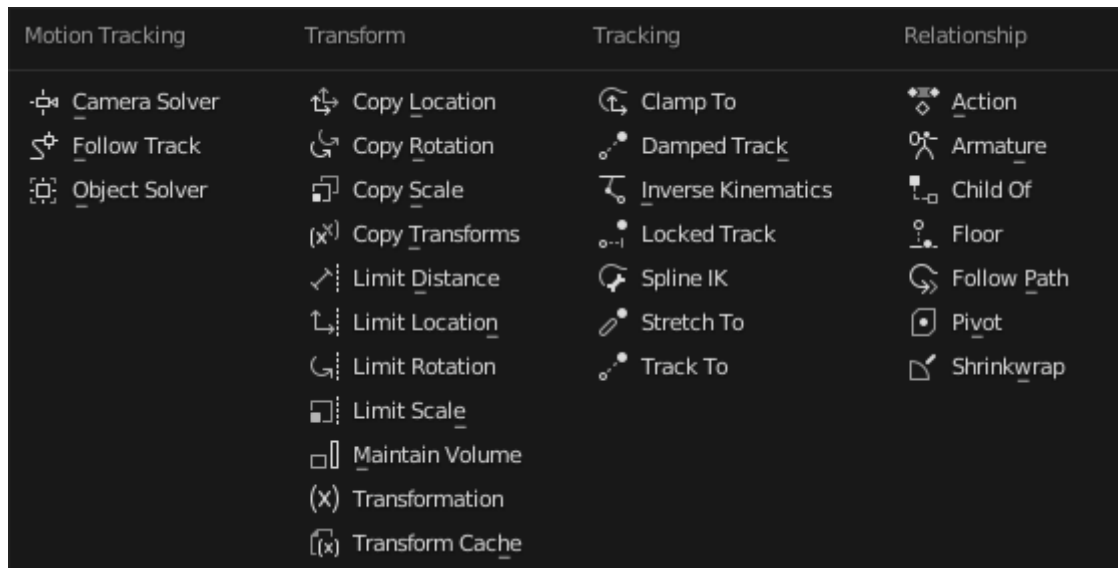
Neben den bereits aufgelisteten Modifiern gibt es noch weitere Eigenschaften, die einem Mesh hinzugefügt werden können, um dieses besser an die gegebenen Aufgaben anpassen zu können. Diese befinden sich in den „Physics Properties“. Diese Eigenschaften sind meist Simulationsblaupausen bzw. -frameworks, mit denen weitergearbeitet werden kann. Eines dieser Frameworks ist das des Rigid-Body. Dieses sorgt dafür, dass Objekte miteinander kollidieren können. Folglich lassen sich dadurch verschiedenste Fall- oder Kollisionssimulationen durchführen. Ein weiteres Framework wäre z.B. das des Soft-Body. In diesem kann unter anderem die Stärke der Spannung zwischen den Punkten des Objektes eingestellt werden. Wenn der Soft-Body dann mit einem Rigid Body kombiniert wird, lässt sich bei der Kollision eine Verformung erkennen, welche anhand der Einstellungen stärker oder schwächer ausfällt.



**Abbildung 14 : Auswahlmennü für das Hinzufügen eines Modifiers zu einem Objekt in Blender**

Doch nicht nur Meshs können verschiedene Eigenschaften in Blender zugewiesen bekommen, sondern auch digitalen Knochen. Diese Eigenschaften werden dann jedoch nicht direkt als Modifier bezeichnet, sondern als „Bone-Constraints“. Das Menü für die „Bone-Constraint-Properties“ ist nur während der Arbeit im sogenannten Pose-Mode eines digitalen Skeletts sichtbar. Dies liegt daran, dass jeder Knochen einzeln eigene „Bone-Constraints“ zugewiesen bekommt und nicht, wie normal für Objekte in Blender, im

Object-Mode. Die Bone-Constraints sind in der Regel Limitierungen für die Knochen bei ihrer Transformation im 3D-Raum.



**Abbildung 15 : Bone-Constraints in Blender**

Für die Erstellung der Modelle und der damit verbundenen Limitierung der Knochen wurde am häufigsten der Limit-Rotation-Constraint verwendet. Dieser sorgt, wie der Name übersetzt sagt, für die Limitierung des Knochens in seiner Rotationsfähigkeit. Für diese Arbeit wurden die Limitationen für die lokalen Achsen festgelegt. Werden Knochen mit dem Limit-Rotation-Constraint in Blender um ihre lokalen Achsen rotiert, machen sie bei einer im Constraint festgelegten Gradanzahl halt und bewegen sich nicht weiter.

Für Knochen bzw. ein digitales Skelett existiert in den Object Properties unter dem Unterpunkt „Visibility“ die Möglichkeit, diese durch ein Mesh hindurch sichtbar zu machen. Dies ist besonders hilfreich bei der Einposierung eines Körpers, da das Mesh nicht nach jedem Schritt sichtbar und wieder unsichtbar gemacht werden muss.

### 2.3.4 Rigify

Die Rigify-Erweiterung in Blender bietet die Möglichkeit, vorerstellte Skelette zu importieren bzw. Vorlagen für fertige Skelette zu laden. D.h. durch das Importieren der Erweiterung kann mittels des Create-Menüs ein neuer Unterpunkt aufgerufen werden, in welchem eine begrenzte Anzahl an Skelettstrukturen liegen, welche wiederum frei für z.B. die Animation von Charakteren oder anderen Lebewesen verwendet werden können.

Für diese Arbeit wurde das Basic-Human Modell verwendet. Dieses Modell wurde weiterverarbeitet für die erstellten Wirbelsäulenmodelle.

## 2.4 MakeHuman

MakeHuman ist eine Open Source Software, welche eine einfache Erstellung von Menschmodellen mit genauen Parametern ermöglicht. Für diese Arbeit wurde die Version 1.2.0 verwendet.

In MakeHuman können ein Großteil der Eigenschaften eines Menschmodells mit einfachen Schieberegler oder Knöpfen eingestellt werden. Diese wirken sich unmittelbar auf das Modell aus und ähnlich wie in Blender, befindet sich in der Mitte der Anwendung ein „Viewport“, in welchem das Modell dargestellt wird. Am unteren Bildschirmrand befindet sich ein kleines Textfenster, welches Informationen zum Modell ausgibt. Diese sind das Geschlecht, das Alter, die Muskelmasse, das Gewicht und die Körpergröße des Modells.

Neben der Erstellung von Menschmodellen lassen sich die Modelle auch posieren und mit einem digitalen Skelett ausstatten. Die Modelle haben dabei zwischen 31 und 163 Knochen. Der große Unterschied kommt hauptsächlich durch die zusätzliche Ausstattung mit Gesichts-, Finger- und Zehenknochen. Zudem unterscheiden sich die digitalen Skelette auch in der Anzahl an Wirbelsäulenknochen. Die Anzahl der Wirbelsäulenknochen reicht dabei von 6 bis 9 Knochen, je nach Modell.

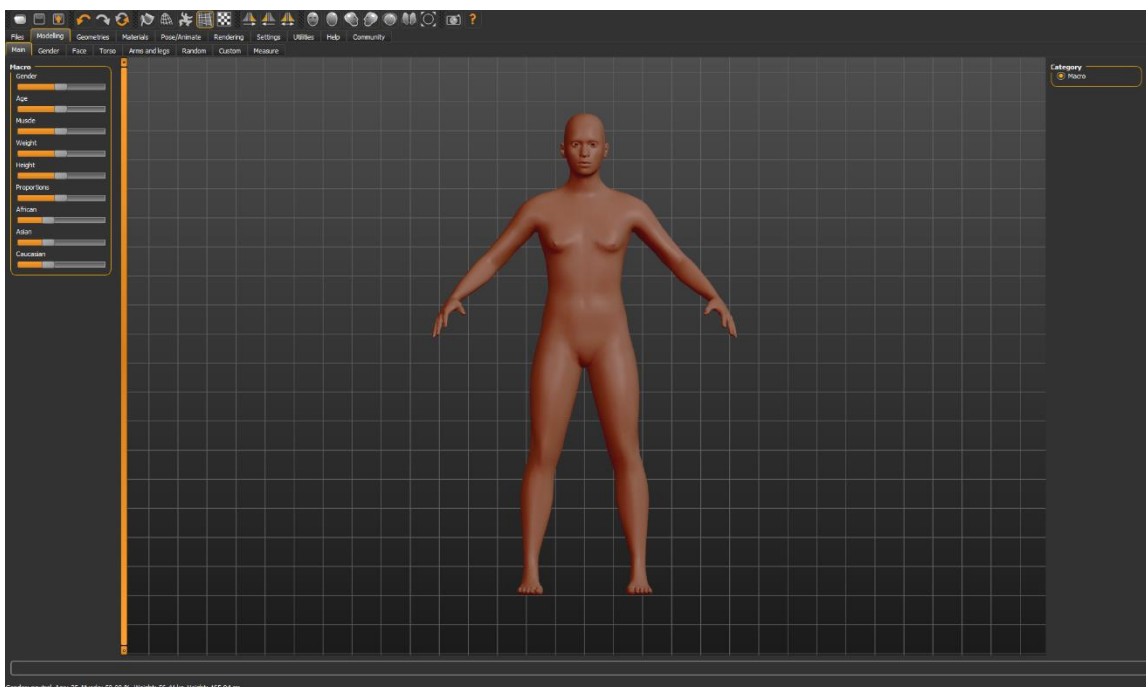
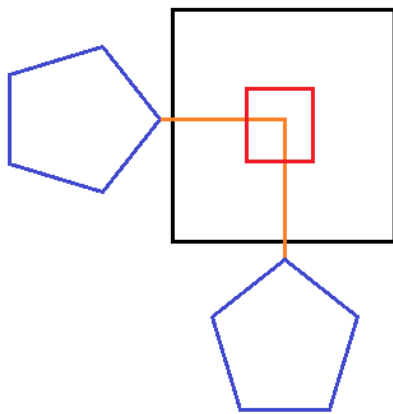


Abbildung 16 : MakeHuman Ansicht bei neuem Projekt

## 2.5 Projektaufbau für Einposierung

Für die spätere Einposierung der Wirbelsäulenmodelle werden Referenzbilder für die jeweiligen Posen angefertigt und in einen Referenzraum geladen. Für den Referenzraum 1 wurden diese Bilder aus 2 verschiedenen, orthogonal zueinander liegenden, Blickwinkeln aufgenommen. Zwischen den Kameras wurde auf dem Boden ein Bereich abgegrenzt, in welchem die Referenzperson später posieren soll. Um den Bereich herum wurden zudem Markierungsmarken angeracht, welche für die Orientierung des Programms Agisoft benötigt werden, um den Referenzraum als 3D-Modell zu generieren.

Zusätzlich müssen Bilder für die Abstandsmessung und den Maßstab angefertigt werden. In diesen Bildern wird an bestimmten Stellen eine Messlatte aufgestellt und fotografiert. Daraufhin werden dann die Referenzbilder mit der Referenzperson angefertigt. Die Kameras wurden bei der Aufzeichnung jeweils gleichzeitig ausgelöst.



**Abbildung 17: Grob-skizze Aufbau Referenzbildaufnahme. rot: abgegrenzter Bereich, blau: Kameras, orange: Blickrichtung der Kameras**

Die aufgenommenen Referenzbilder zeigen 4 verschiedene Bewegungen auf. Diese sind die Extension, Flexion, Lateralneigung links und rechts. Zudem wurden Einzelbilder für die Bewegung von der Flexion zur Extension aufgenommen. Alle Bewegungen wurden von der Modellperson, für die Referenzbilder in Referenzraum 1, in 3 Bekleidungszuständen aufgezeichnet. Diese sind voll bekleidet, entkleidet bis auf eine Badehose und entkleidet bis auf eine Badehose und zusätzlich mit Markern durch schwarzes Tape an den Handgelenken, Ellenbögen, Knien und Knöcheln. Diese Marker sind hilfreich für die Positionierung der Gelenke der digitalen Skelette.

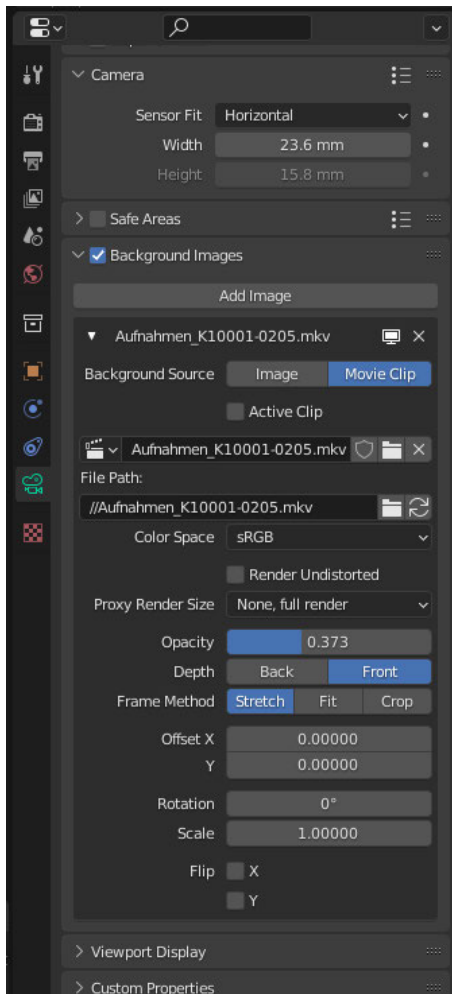
Aus den Aufnahmen wurden dann insgesamt 4 Einzelframes ausgewählt, welche die Bewegung am besten darstellen. Die Auswahl erfolgte dabei subjektiv, nach Qualität der Bilder. Mit Qualität wird die Schärfe des Bildes und die Qualität der Pose gemeint. Die ausgewählten Bilder sind Nr. 10, 41, 46 und 55. Diese sind in Anlage Teil 2 hinterlegt.

Nach der Aufnahme der Referenzbilder wurde zudem auch der Raum der Aufnahmen, welcher durch die Software Agisoft aus den Bildern generiert wurde, in Blender importiert.

In diesen Raum wurden 2 virtuelle Kameras positioniert, welche die realen Kameras simulieren sollen. In den Properties der Kameras wurde, unter den Object-Data-Properties im Untermenü „Background Images“, zunächst ein Bild derselben Kamera von den zusammengehörenden Aufnahmen gelegt. Diese Bilder sind mit dem 3D-Modell überlappend und der 3D-Raum ist, folglich aus der Perspektive der Kamera, deckungsgleich mit den Aufnahmen.

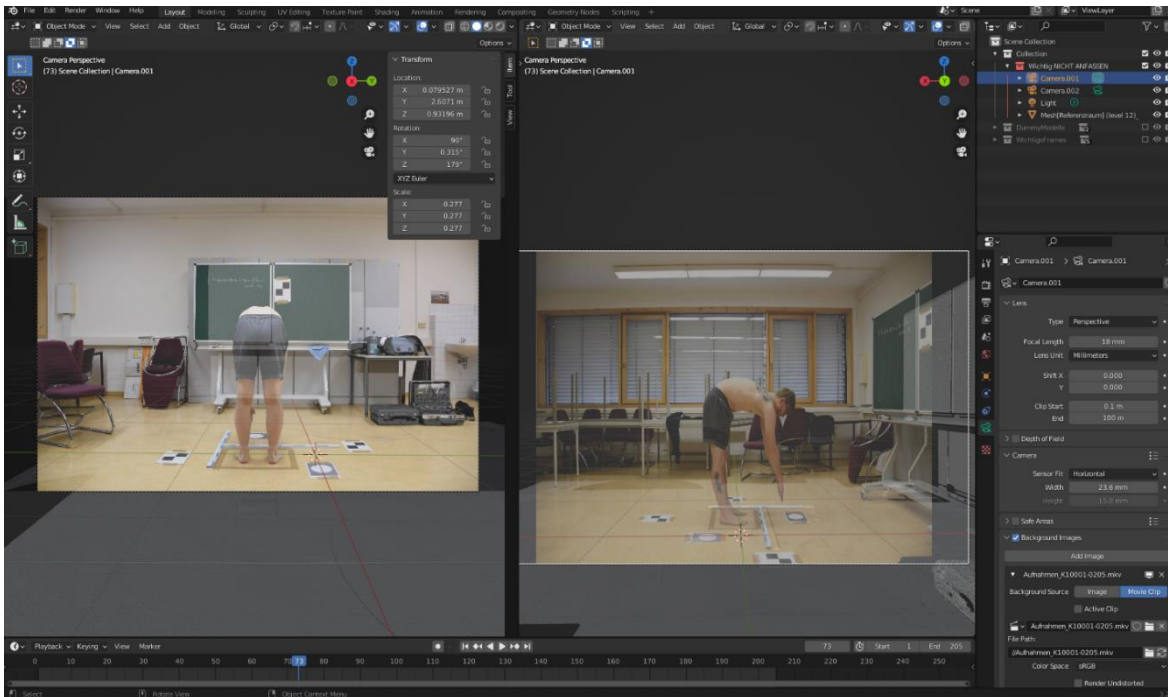
Da das neu Eingeben der Bilder bei der Positionierung einen großen Zeitaufwand darstellt, wurde sich dazu entschieden, nicht Einzelbilder als Hintergrund für die Kameras zu verwenden, sondern aus den Bildern Animationen zu fertigen und diese zu verwenden.

Für die Erstellung der Animationen wurde zunächst ein neues Projekt mit der Vorlage „Video Editing“ erstellt. In dieser Vorlage sind die für die Erstellung der Animation nötigen Fenster bereits eingestellt. Im Video-Sequencer Fenster kann dann mittels der Tastenkombination „Shift + A“ oder unter dem Menü Add, der Punkt „Image/Sequence“ ausgewählt werden und alle Bilder, die in die Animation aufgenommen werden sollen, ausgewählt werden. Mit dem Einfügen aller Bilder einer Kamera wird eine neue Sequenz in Blender generiert. Für die Bestimmung des Ausgabeorts kann im Property-Menü unter den Output-Properties im Menüpunkt Output ein Dateipfad und Dateityp festgelegt werden. Um die zuvor erstellte Sequenz zur Animation umzuwandeln muss, unter dem Menüpunkt Render, Render Animation ausgewählt werden. Der PC berechnet darauffolgend aus der eingegebenen Bildfolge eine Animation.



**Abbildung 18 : Kameraeigenschaften für die Referenzbildereinbindung in Blender**

Die ausgegebene Animation wurde dann, im Propertie-Menü anstatt des Einzelbildes, eingefügt. Die vorangegangenen Schritte wurden für beide Kameras durchgeführt, mit den jeweils durch diese Kamera aufgenommenen Bildern. Mithilfe des Timeline-Menüs lassen sich die Einzelframes für beide Kameras gleichzeitig beeinflussen.



**Abbildung 19 : fertiggestellter Viewport für Einposierung in Blender**

Zusätzlich zum bereits vorgestellten Referenzraum wurde ein zweiter Referenzraum erstellt. Dieser Referenzraum soll als zusätzliche Umgebung für die qualitative Überprüfung der Wirbelsäulenmodelle dienen. Im neuen Referenzraum werden insgesamt drei Kameras für die Erfassung der Modellperson verwendet. Der Versuchsaufbau bei der zweiten Aufnahme der Referenzbilder ist dabei unter gleichen Bedingungen wie bei der Aufnahme der Bilder des ersten Referenzraums. Dies bedeutet, dass zwei der drei Kameras im  $90^\circ$  Versatz auf einem Stativ aufgestellt wurden. Die Kameras wurden dabei auf die Körpermitte der Modellperson eingestellt, welche auf einer Höhe von 93 cm liegt. Zudem ist erneut ein Bereich um den Schnittpunkt der Kameraansichten markiert. In diesen wurde dann die Modellperson gestellt und Bilder in den gleichen Bewegungen bzw. Posen wie für Referenzraum 1 gemacht. Die Modellperson ist für beide Referenzräume dieselbe.



**Abbildung 20 : Versuchsaufbau für zweite Referenzraumaufnahme**

Die dritte Kamera wurde auf einem Stativ angebracht, welches vollständig ausgefahren wurde. Das ausgefahrene Stativ wurde dann auf einer Beamerschiene einer nahegelegenen Tafel mit Klebeband fixiert. Die Kamera hat ihre Blickrichtung dabei nach unten gerichtet und lichtet den abgeklebten Bereich und einen Teil darüber hinaus ab. Die Kameras wurden, wie auch bei der Aufnahme des ersten Referenzraums, gleichzeitig ausgelöst. Dadurch wird die Modellperson in allen drei medizinischen Ebenen, der Sagittal-, Frontal- und Transversalebene, abgelichtet.

Um die Einposierung für den zweiten Referenzraum genauer zu machen, wurden einzelne Wirbel auf dem Rücken der Modellperson, mithilfe von 1 cm langen Markern, abgeklebt. Die verwendeten Marker sind einfache M3 Distanzhülsen aus schwarzem Kunststoff, welche an der Unterseite mit Klebeband an den Körper angeheftet wurden. Abgeklebt wurden die einzelnen Wirbel fachmännisch von einem ehemaligen Physiotherapeuten. Insgesamt wurden 20 Wirbel markiert, L5 bis C5.





**Abbildung 21 : Darstellung abgeklebter Wirbel in der Transversalebene von L5 - C5**

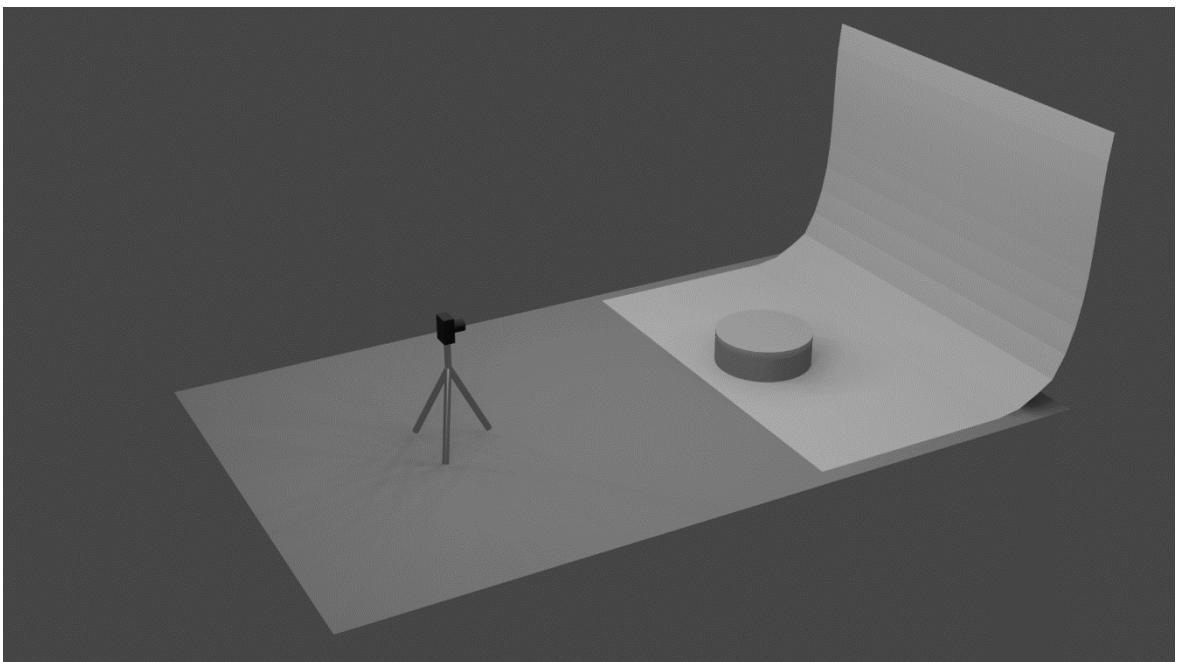
Zusätzlich wurden Papierröllchen in die Marker an den Wirbeln L5 bis L1 angebracht, da die Marker aus der Sagittalebene teilweise nur noch leicht bis nicht mehr ersichtlich sind. Die Anbringung der Marker ist später für die Einposierung vorgesehen, um die entsprechenden Skelette bzw. deren digitale Knochen richtig einzustellen.

## 3 Erstellung des Körpermeshs

Für die Vorgehensweise bei der Posierung des digitalen Skeletts ist es eine Möglichkeit, die tatsächliche Übereinstimmung mit der dargestellten Pose anhand eines Meshs zu überprüfen. Diese Methode wurde für den Referenzraum 1 angewendet, da die einzelnen Wirbel noch nicht abgeklebt wurden und die Knochen dementsprechend nicht genau bzw. eindeutig positioniert werden können. Die Möglichkeit der Übereinstimmung ist dabei jedoch subjektiv zu betrachten, da das Mesh nicht zu 100% mit dem dargestellten Körper übereinstimmt. Aus diesem Grund wurden verschiedene Methoden versucht, ein Mesh für die Posierung aufzunehmen, welche im Folgenden beschrieben werden.

### 3.1 fotogrammetrische Erfassung

Die fotogrammetrische Erfassung eines Körpers erfolgte durch die Eingabe vieler Bilder eines Objekts in eine entsprechende Verarbeitungssoftware. Für die Erstellung des Meshs aus den fotogrammetrischen Aufnahmen wurde die Software „Agisoft Metashape Professional“ in der Version 1.8.4 verwendet. Für die Aufnahme der Bilder zur Generierung des Meshs wurde eine Umgebung für die Erfassung aufgebaut. Diese besteht aus einem neutralen Hintergrund, einem elektrisch rotierenden Drehteller und einer eingestellten Spiegelreflexkamera auf einem Dreifußstativ. Für die Aufnahmen wurde eine Nikon D7500 verwendet.



**Abbildung 22 : Versuchsaufbau für die fotogrammetrische Erfassung. links: Spiegelreflexkamera auf einem Dreifuß. rechts: einfarbige Leinwand mit darauf befindlichem Drehteller.**

Die zu erfassende Person wurde dabei auf den Drehteller gestellt und darum gebeten, sich so wenig wie nur möglich zu bewegen. Die Person behielt während der Erfassung die sogenannte „Neutral-Null-Pose“.

Der neutrale Hintergrund dient bei der Erfassung dafür, dass das Programm bei der Verarbeitung der Bilder keine Referenzpunkte im Hintergrund sucht, sondern am Körper selbst. Das Programm bzw. der Verarbeitungsalgorithmus ist darauf trainiert, dass sich die Kamera eigentlich um das Modell dreht und nicht das Modell selbst. Aus diesem Grund wurde für den Hintergrund ein einfarbiges, weißes Tuch gewählt, welches zudem gleichmäßig ausgeleuchtet wurde. Sollten der Hintergrund oder Kontraste auf der Oberfläche jedoch vorhanden sein, würde eine Fehlermeldung ausgegeben werden, da das Programm erkennt, dass sich die Position der Kamera nicht verändert hat.

Mithilfe der Bilder wird eine Punktwolke generiert. Diese Punktwolke wird dann durch das Wiedererkennen markanter Punkte in die Form des eigentlichen Modells umgeformt.

Das Ergebnis der fotogrammetrischen Erfassung ist ein sehr ausgedelltes Modell. Es verfügt zudem über viele kleine Fragmente, d.h. kleine Flächen oder einzelne Punkte, die ohne eine erkennbare Zugehörigkeit im Raum liegen. Das Modell ist jedoch nutzbar, da das generierte Mesh an den wichtigen Stellen keine wichtigen bzw. großen Fehler aufweist. Diese wichtigen Stellen sind vor allem der Hüft- und Schulterbereich, sowie die Kopfform.

## 3.2 Menschmodellgenerierung mit MakeHuman

Innerhalb der Software MakeHuman wurde ein Menschmodell generiert. Für die Generierung des Modells wurden zunächst die Rahmenmaße der Modellperson aufgenommen, welche für die Referenzbilder posiert hat. Diese sind 186 cm Körpergröße, 80 kg Körpergewicht, das Alter mit 34 Jahren und männlich als Geschlecht.

Die aufgenommenen Maße wurden dann in die Software eingegeben. Darauffolgend wurde das Frame 1, welches eine neutrale Pose darstellt, als Hintergrundbild importiert. Dieses Bild dient als Referenzbild um das Modell an die Referenzperson auf den Bildern anzupassen. Die Anpassungen sind dabei nur sehr grob, da sich nicht jeder Punkt des Modells einzeln, mithilfe der Schieberegler, anpassen lässt.

Abschließend wurde das Modell mit allen 4 der vorgegebenen Skelette exportiert. Diese sind das Cmu mb-Modell mit 7 Wirbelsäulenknochen, das Game Engine-Modell mit 6 Wirbelsäulenknochen, das Default-Modell mit 9 Wirbelsäulenknochen und das Default no toes-Modell mit 8 Wirbelsäulenknochen.

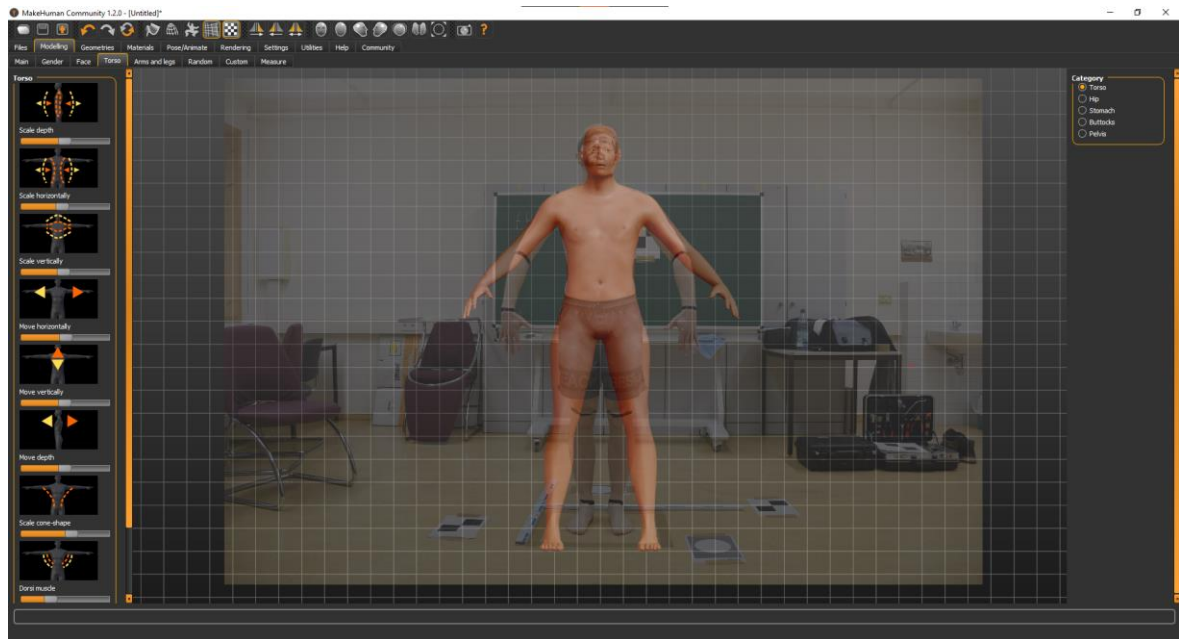


Abbildung 23 : Körpermesherstellung mithilfe der Referenzbilder in MakeHuman

### 3.3 Erfassung mittels 3D-Scanner

Als drittes Verfahren, für die Erstellung eines Körpermeshs, wurde ein 3D-Scanner verwendet. Bei dem Scanner handelt es sich um ein FARO Focus x130. Dieser wurde auf ein für den Scanner vorgesehenes Dreibeinstativ gestellt. Zudem mussten auch weitere Vorbereitungen für die Aufnahme getroffen werden. Diese bestanden daraus, auf dem Boden Markierungen, für den Scan und für die Füße der Modellperson, anzubringen. Da der Scan je nach Qualitätsstufe eine Dauer von min. 3 Minuten dauert, wurden auch Stühle links und rechts neben der Modellperson aufgestellt, auf der sie die Hände ablegen kann. Diese Vorbereitungen dienen dazu, dass es zu keinen Bewegungsfehlern während des Scans und der darauffolgenden Aufnahme der Farbbilder kommt.

Für den Scan wurde ein Scanwinkel von  $120^\circ$  in der Horizontalen und  $270^\circ$  in der Vertikalen eingestellt. Dies dient zusätzlich zur Einschränkung des Scans und zur Verkürzung der Scandauer. Zudem wurde die Qualität des Scans auf die niedrigste Stufe eingestellt, da es sich hierbei zunächst um einen Testversuch handelt. Insgesamt wurden 2 Scans für die Erfassung benötigt, da die Modellperson von vorne und von hinten gescannt wurde. Ein Scan dauerte dabei ca. 3 Minuten.

Nach Abschluss der Scans wurden die Daten zunächst mittels FARO Scene bearbeitet. Es wurden unnötige Daten wie der Hintergrund und die Decke des Raums entfernt, da nur das gescannte Mesh der Modellperson von Bedeutung ist.



**Abbildung 24 : Modellaufbau des Laserscans. Erster Scan mit im Vordergrund positioniertem Scanner, zweiter Scan mit Scanner an Position im Hintergrund**

Infolgedessen wurden die ausgeschnittenen Daten in das Programm CloudCompare eingefügt. Hier wurden die beiden Scans noch einmal kritisch auf die Verschiebung der Scans betrachtet und diese behoben. Zudem wurden auch mögliche Fehler der Modelle herausgefiltert, welche anhand der Normalen erkannt wurden.

Das Resultat wurde dann in Blender importiert und letzte Feinarbeiten daran vorgenommen, wie die saubere Entfernung des Bodens rund um die Füße des Modells. Das Resultat ist in Abbildung 25 sichtbar.



**Abbildung 25 : lasergescanntes Mesh**

Das Ergebnis ist ein Mesh, welches zwar deutlich weniger Fragmente besitzt als bei der fotogrammetrischen Erfassung, jedoch gerade an der Schnittfläche erhebliche Lücken aufweist. Dies ist in Abbildung 25 von der linken Axel zur Hüfte hinab sichtbar. Dieses Problem könnte sich vermutlich durch ein erneutes Scannen an 3 Positionen, statt 2, beheben lassen. Trotz dessen ist der Detailgrad an den entscheidenden Stellen sehr ausführlich vorhanden und nach subjektiver Einschätzung das beste Ergebnis aus den drei vorgestellten Methoden zur Erstellung des Körpermeshs.



## 4 Methoden

Die Erstellung und Untersuchung der verschiedenen Wirbelsäulentypen begann bereits während der Praktikumsphase im Studium „Allgemeine und digitale Forensik“. In dieser Zeit wurden insgesamt 5 verschiedene Wirbelsäulenmodelle erstellt, welche alle von einem Modell, dem sogenannten „Ur-Modell“, ausgingen. Mit diesen 5 Modellen wurden bereits erste Versuche zur Bewegungsdarstellung, in Form von zu Boden fallenden Ragdolls, vorgenommen. Diese festgestellten Untersuchungen gelten als Ausgangspunkt für die Untersuchung weiterer Vereinfachungen.

### 4.1 Erstellung des Ur-Modells

Für die Generierung des Ur-Modells wurde zunächst mithilfe der Rigify-Erweiterung ein „Basic-Human (Meta-Rig)“ erstellt. Dieses Modell verfügt über 7 Wirbelsäulenknöchel. Diese Anzahl entspricht bereits einer Vereinfachung, jedoch ist nicht nur die reduzierte Anzahl an Wirbelsäulenknöchel entscheidend, sondern auch die anatomische Korrektheit der Wirbelsäule.

Da eine Neumodellierung einer anatomisch korrekten Wirbelsäule einen immensen Zeitaufwand, aufgrund der Literaturrecherche und dem Abgleich mit medizinischen Daten, darstellen würde, wurde sich dazu entschieden, auf das Modell eines vorangegangenen Bachelor-Studenten zurückzugreifen. Dieser hat im Verlauf seiner Bachelor- bzw. Abschlussarbeit ein anatomisch korrektes Modell erstellt. Dieses Modell verfügt über eine vollständig modellierte Wirbelsäule. Für die Zwecke dieser Arbeit wurden jedoch nur die sogenannten DEF-Knöchel (Deformationsknöchel) des Modells extrahiert. Diese Knöchelkette ist die digitale Repräsentation der Wirbel C1-L5, befindet sich in der sogenannten doppel-S Form und entspricht der tatsächlichen Größe bzw. Höhe der Wirbel eines realen Menschen.

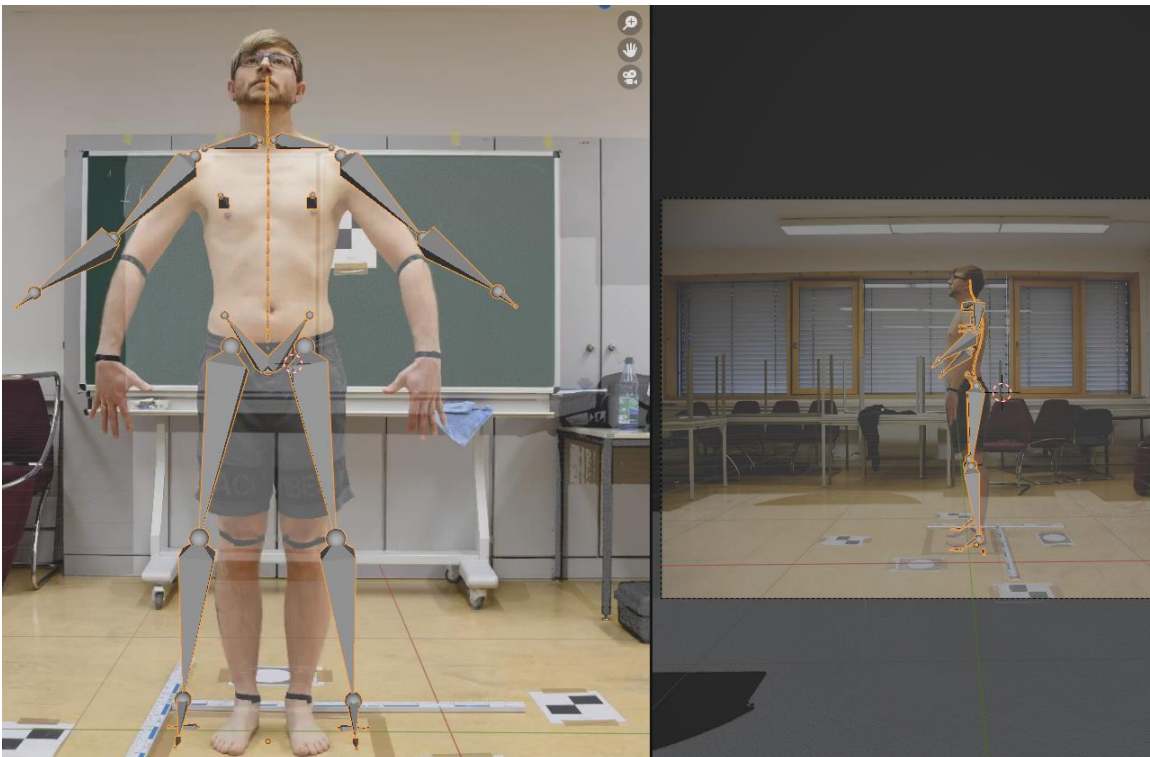
Die extrahierte Knöchelkette wurde dann an die Position der Wirbelsäule des zuvor erstellten „Basic-Human (Meta-Rig)“ bewegt. Die ursprüngliche Wirbelsäule des „Basic-Human (Meta-Rig)“ wurde daraufhin aus dem Eltern-Kind-Verhältnis zum Rest des digitalen Skeletts entfernt und das Modell, aus welchem die Wirbelsäule extrahiert wurde, gelöscht. Anhand der extrahierten Knöchelkette wurde eine neue Knöchelkette erstellt, welche mit der extrahierten Kette identisch ist. Die einzelnen Wirbel der Knöchelkette bzw. neuen Wirbelsäule wurden dann mit je einem Limit-Rotation-Constraints ausgestattet und die Werte entsprechend der Tabelle 5 in Anlage 1 angepasst. Die X-Achsen-Limitationen entsprechen im negativen Bereich der Extension und im positiven Bereich der Flexion. Die Y-Achse entspricht der Rotation um die eigene Achse und die Z-Achsen-Limitation der Lateralneigung.



An das erstellte Skelett wurde dann das, mithilfe der fotogrammetrischen Erfassung, erstellte Mesh gebunden. Die Gewichtsverteilung der Knochen wurde dabei automatisch erzeugt. Mit Gewichtsverteilung der Knochen wird nicht das physische Gewicht bezeichnet, sondern die Stärke, inwieweit ein Knochen einen Teil des Meshs bei seiner Bewegung mit beeinflusst.

## 4.2 Posieren des Ur-Modells in Referenzraum 1

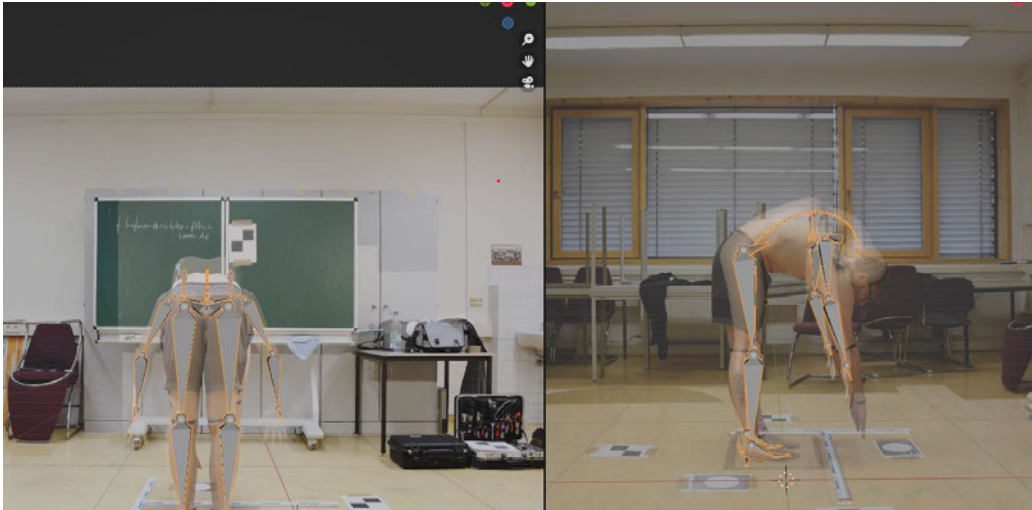
In den für die Posierung erstellten 3D-Raum wird das Ur-Modell hineingeladen. Dieses muss zunächst mittels der 2 3D-Viewport-Fenster an eine geeignete Stelle positioniert werden. Von dieser Position aus wird dann die Skalierung angepasst, sodass das Modell mit den Referenzbildern übereinstimmt. Für diese erste Einpassung wurde das Frame 1 verwendet. In diesem Frame steht die Person der Referenzbilder ventral zu Kamera 2 und lateral zu Kamera 1 in einer Ausgangspose. Diese Pose kann als A-Pose aufgefasst werden, wobei die Handrücken zu Kamera 2 gedreht sind und nicht wie bei einer normalen A-Pose mit den Handflächen zur Hüfte zeigend.



**Abbildung 26 : Ur-Modell unposiert in Frame 1**

Das Ur-Modell wurde zunächst in das Frame 1 einposiert, wobei der Fokus auf der Rückenform und der Positionierung des Torsos und Kopfs lag. Die Arme und Beine sind aufgrund der Überschneidung der Gliedmaßen in den Bildern nicht eindeutig positionierbar bzw. geht die genaue Stellung der verdeckten Gliedmaßen verloren.

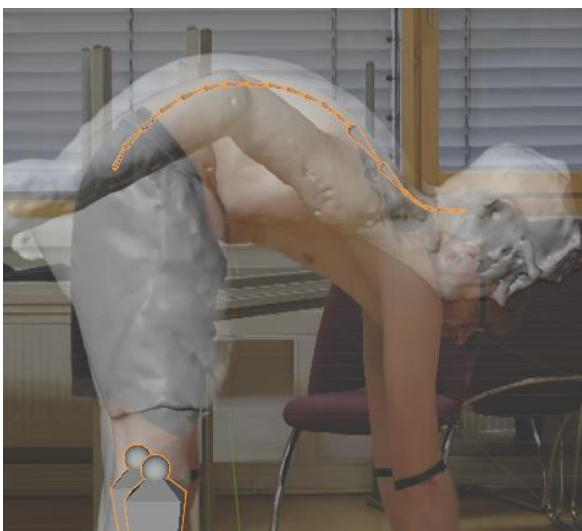
Ausgehend von der Posierung und Positionierung des Ur-Modells in Frame 1 wurde das Ur-Modell in die Einzelframes für die Extension, Flexion und beide lateralen Neigungen einposiert. Dabei wurde zunächst auf die Verformung des Meshs geachtet. Dieses sollte möglichst deckungsgleich mit der Modellperson übereinstimmen.



**Abbildung 27 : Unzureichende Bewegung bei Flexion**

Für die Bewegung der Flexion mussten die Freiheitsgrade angepasst werden, da die erreichte Position, von der im Hintergrundbild dargestellten, abweicht wie in Abbildung 27 dargestellt. Die geänderten Freiheitsgrade wurden dokumentiert und für die Erstellung der Varianten weiterverwendet.

Bei der Flexionsbewegung wurde auch auf die Einbeziehung des Meshs verzichtet. Der Grund dafür ist, dass sich die Wirbelsäule innerhalb des Meshs weiter nach vorne bewegt und nicht an derselben Stelle im Mesh bleibt (Abbildung 28). Die Folge ist, dass sich die Wirbelsäule bzw. die digitalen Knochen an der richtigen Position befinden, das Mesh jedoch viel weiter oben liegt.



**Abbildung 28 : Ur-Modell Flexionsbewegung – Fehler unter Einbeziehung des Meshs**

Für fast alle Modelle, welche im Referenzraum 1 posiert wurden, wurde das mithilfe der fotogrammetrischen Erfassung erstellte Mesh verwendet. Die Ausnahme bilden die vier Skelette aus MakeHuman, für welche das in MakeHuman erstellte Mesh verwendet wurde. Die Modelle wurden für die parallele Darstellung der einzelnen Bewegungen insgesamt je viermal dupliziert. Jedes der duplizierten Modelle wurde in eine der 4 Posen gebracht. Die Modelle wurden einzeln in sogenannte „Collections“ sortiert. Collections sind einfache Ordnerstrukturen innerhalb eines Blenderprojekts.

### 4.3 Erstellung und Posierung der Varianten

Folgend an die Einposierung des Ur-Modells wurden bei der Flexionsbewegung Freiheitsgrade geändert, welche als Ausgangspunkt für die weitere Erstellung von Varianten verwendet wurden. Die geänderten Freiheitsgrade wurden separat dokumentiert. Infolge der Dokumentation wurde mit der Zusammenfassung einzelner digitaler Knochen begonnen.

Um nicht willkürlich Knochen zusammenzufassen, wurde von der Annahme ausgegangen, dass Knochen ohne eine Änderung in ihren Freiheitsgraden einen niedrigeren Anteil bei der Bewegungsdarstellung besitzen und demzufolge zusammengefasst werden können. Begonnen wurde dabei mit zusammenhängenden Knochenkettens ohne Änderungen. Für das Ur-Modell wurde demnach die Knochenkette C6 – T4 betrachtet. Diese Knochenkette wurde dann so zusammengefasst, dass im ersten Modell zwei Knochen je drei Wirbel repräsentieren. Folglich besteht der erste Knochen aus den ursprünglichen Wirbeln C6 – T1 und der zweite Knochen aus T2 - T4. Des Weiteren entstand ein Modell, bei dem die Wirbelkette zu einem digitalen Knochen zusammengefasst wurde und ein Modell, bei dem die Wirbelkette auf drei digitale Knochen aufgeteilt wurde.

Die entstandenen Variantenmodelle wurden dann in den Referenzraum 1 zur Einposierung überführt und in Position und Skalierung identisch zum Ur-Modell transformiert, d.h. genauso wie das Ur-Modell skaliert und an dieselbe Position bewegt. Infolgedessen wurden die Variantenmodelle in die Einzelframes der Bewegungen einposiert und vorausschauend subjektiv begutachtet, inwieweit sich einzelne Variantenmodelle besser oder schlechter für die einzelnen Bewegungen eignen, um diese möglichst natürlich darzustellen.

Wie auch beim Ur-Modell wurde für die Flexionsbewegung auf das Körpermesh verzichtet. Besonders wichtig war die Pose möglichst genau anhand des Ur-Modells zu posieren bzw. den Verlauf der Wirbelsäule des Variantenmodells so nah wie möglich an den der Wirbelsäule des Ur-Modells zu posieren. Sollte es dabei zu einer großen Abweichung kommen, war dies ein Grund das Modell vorläufig als ungeeignet zu betrachten.

**Tabelle 1 : Geänderte Freiheitsgrade für Ur-Modell. grün: geänderte Freiheitsgrade**

Eingetragene Freiheitsgrade der Bewegung, in °

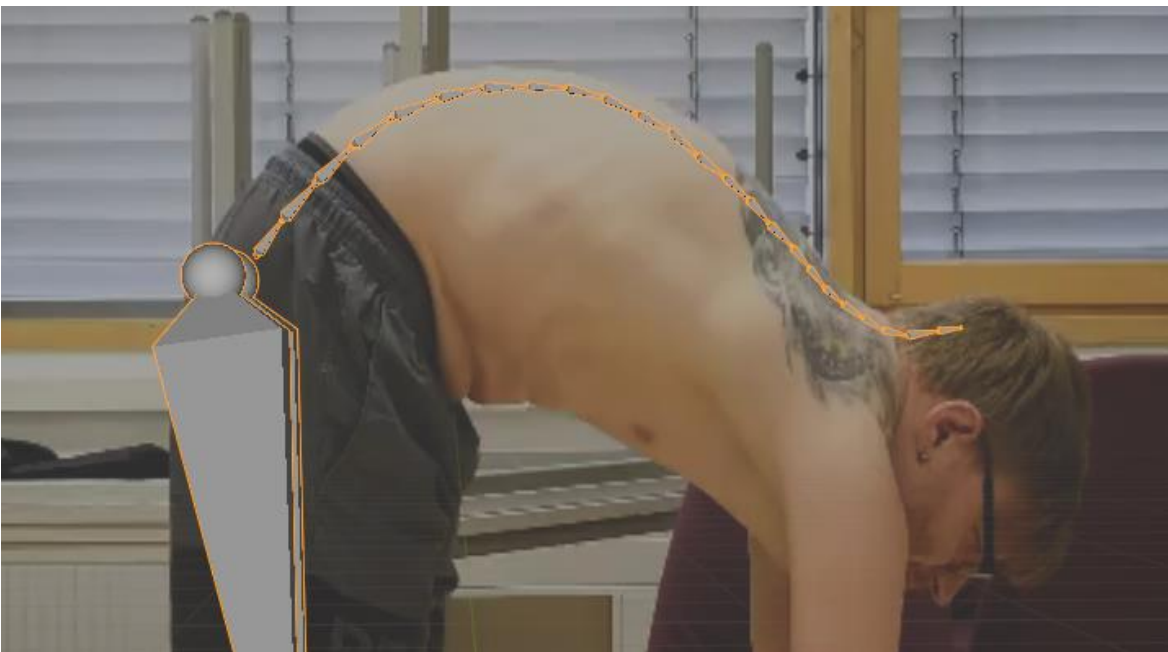
NormalRig	Flexion	Extension	Lateralflexion
C1	4,2	13	4
C2	7,7	19,1	3
C3	6,3	10,9	6,5
C4	9,7	16	6,8
C5	11	20,4	6,9
C6	11,9	11	2,1
C7	11	7,9	2,1
T1	1,9	2,3	2,6
T2	1,5	2,2	2
T3	1,4	2,1	1,8
T4	1,5	1,9	1,7
T5	6	1,6	1,7
T6	1,5	1,7	1,9
T7	4	1,4	2,3
T8	8,3	1,4	2,7
T9	4	1,5	3
T10	4,4	1,7	3,2
T11	4,8	2	3,4
T12	16,1	2,4	3,7
L1	14,2	3,2	2
L2	20	6,5	2
L3	22,8	6,4	3
L4	18,6	9,2	3
L5	18,6	7,8	2

Ein Beispiel für den ersten Ausschluss einzelner Variantenmodelle lässt sich anhand des Vergleichs zwischen Abbildung 29 und 30 erklären. In Abbildung 12 ist Modell 8 dargestellt, bei welchem die Wirbelsäulenknochen L3 bis L5 und T12 bis L2 in je einem Knochen zusammengefasst wurden. Der Grund, warum Modell 8 ungeeignet ist, liegt darin, dass es im L-Segment der Wirbelsäule zu keiner natürlichen Bewegung kommt, bzw. die Form der Wirbelsäule nicht mehr gerundet ist. Auf den genauen Unterschied, warum diese Modelle sich unterscheiden, wird noch einmal im Ergebnisteil eingegangen.

Die Tabellen zu den zusammengefassten Freiheitsgraden der einzelnen Variantenmodelle sind in Anlage 3 angehängen. In Anlage 4 sind die von mir erstellten Modelle in den 4 einposierten Positionen als Abbildung ohne die Referenzbilder im Hintergrund hinterlegt.



**Abbildung 29 : Modell 8 - ungeeignete Zusammenfassung an Wirbelsäulenknöcheln bei Flexion**



**Abbildung 30 : Ur-Modell**

## 4.4 Einposierung der Modelle in Referenzraum 2

Ausgehend von den Hintergrundbildern der drei Kameras, wurden die die Einzelbilder erneut in eine Animation zusammengefügt und in die einzelnen Kameras eingefügt. Folgend wurden die erstellten Modelle aus Referenzraum 1 importiert. Die folgenden Arbeitsschritte wurden für alle erstellten Modelle aus dem Referenzraum 1 verwendet, jedoch wird der Prozess nur anhand des Ur-Modells beschrieben, da alle anderen Modelle mit denselben Verfahren bearbeitet wurden.

Das Ur-Modell wurde zunächst in die Ausgangspose, anhand der aufgenommenen Bilder, posiert. Dabei mussten die Transformationen neu angepasst werden, um das Modell an die entsprechende Stelle im 3D-Raum zu positionieren, sodass es mit den Referenzbildern übereinstimmt.

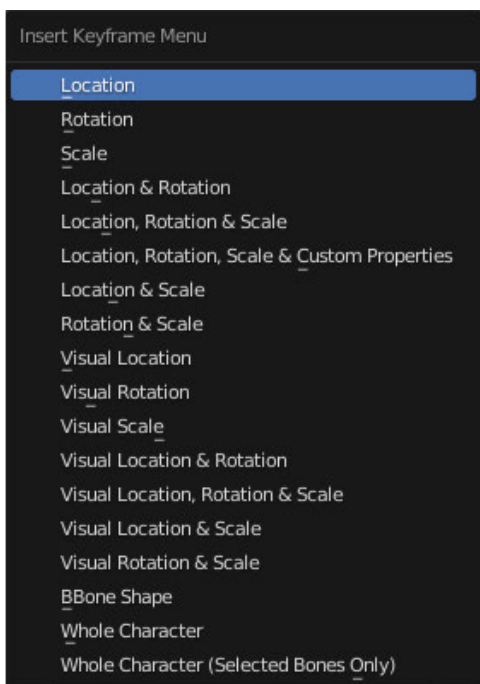


**Abbildung 31 : Ausgangsposition Ur-Modell für Referenzraum 2**

Für die Einposierung der einzelnen Posen wurde hier anders vorgegangen als im Referenzraum 1. Dies hängt damit zusammen, dass Blender bei der Duplikation eines Objektes ein neues Objekt erstellt, was bei der Dichte der Punkte im Referenzraum und den Modellen einen enormen Speicherplatz in Anspruch nimmt. Die Folge sind Programmabstürze und lange Ladezeiten. Aus diesem Grund wurde sich dafür entschieden, an dieser Stelle die Timelinefunktion in Blender einzubinden, welche eigentlich für das Erstellen von Animationen genutzt wird. In der Timeline lassen sich für digitale Skelette bzw. die einzel-

nen Knochen sogenannte Key-Frames festlegen, welche die Position der Objekte im Raum zum jeweiligen Zeitpunkt bzw. Einzelframe  $t$  speichert. Folglich muss das Ur-Modell nicht mehrfach, für die verschiedenen Posen, dupliziert werden und es werden Speicherplatz und Ressourcen gespart. [Blend, 2022]

Die Hintergrundbilder wurden demzufolge wieder, wie in Referenzraum 1, als Animation umgewandelt und anstatt der Einzelbilder in die Kameras positioniert. Um die Pose über die Frames speichern und ein Key-Frame zu erstellen, werden in Blender zunächst alle Knochen des Skeletts im Pose-Model markiert und die Maus über den 3D-Viewport positioniert. Folgend wird das „Insert Keyframe Menu“ aufgerufen, in welchem dann festgelegt werden kann, welche Transformationen im Key-Frame gespeichert werden.



**Abbildung 32 : Key-Frame Menü**

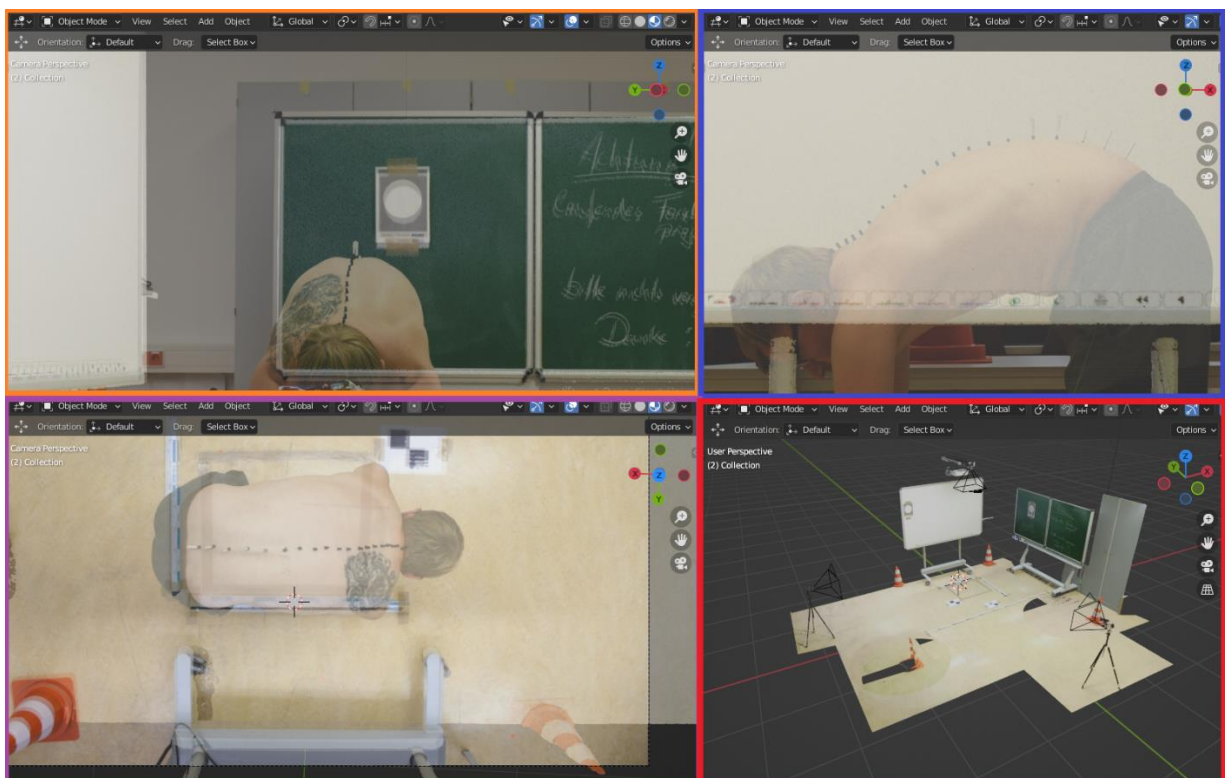
Für die Posierung wird der Unterpunkt „Location, Rotation & Scale“ verwendet. Darauffolgend wird der Zeiger bzw. Cursor in der Timeline auf das nächste Frame gestellt, in welches das Ur-Modell einposiert werden soll und da erneut ein Keyframe eingefügt. Dieser Prozess wird dann für alle weiteren Positionen bzw. Bewegungen wiederholt.

In den Referenzbildern für Referenzraum 2 wurden zudem 20 der 24 Wirbel mithilfe von 1 cm langen Hülsen auf dem Rücken der Modellperson markiert. Anhand dieser wird zunächst der Wirbel L5 einposiert, da dieser als Elternobjekt für den Rest des Skeletts fungiert. Ausgehend davon werden dann auch alle weiteren Wirbel bis C5 so positioniert, dass sie optimal mit den aufgeklebten Hülsen bzw. Markern alignieren. Die restlichen Wirbel, C4- C1, wurden dann nach subjektivem Augenmaß positioniert.



**Abbildung 33 : Flexion Referenzraum 2 mit markierten Wirbeln**

Im 3D-Viewport wurden für die parallele Arbeit vier 3D-Viewports geöffnet. In drei der vier Viewports wurde je eine andere Kamera als aktive Kamera verwendet, sodass die drei medizinischen Ebenen, Sagittal-, Frontal- und Transversalebene dargestellt wurden. Das vierte Fenster bzw. der vierte 3D-Viewport dient der freien Bewegung im Viewport, um das Objekt zusätzlich aus anderen Blickwinkeln betrachten zu können.



**Abbildung 34 : Referenzraum 2 Viewport. orange: Frontalebene, blau: Sagittalebene, violett: Transversalebene, rot: freier Viewport**





## 5 Ergebnisse und Diskussion

Insgesamt wurden im Verlauf der Arbeit 16 Modelle erstellt und insgesamt 20 Modelle auf ihre Eignung für die Frage, welches Modell am besten für die Darstellung geeignet ist, untersucht. Die Ergebnisse sollen im Folgenden präsentiert und diskutiert werden.

### 5.1 Einposierung des Ur-Modells in Referenzraum 1

Wie bereits in den Methoden beschrieben, mussten einige Freiheitsgrade zur Darstellung einzelner Bewegungen geändert werden. Die Bewegung, welche die Veränderungen benötigte, ist die Flexion.

Der Grund liegt in der Verwendung von standardisierten Daten bzw. Daten aus welchen Mittelwerte gebildet wurden. Diese Mittelwerte wurden durch Probanden beeinflusst, welche über und auch unter dem Alter der Modellperson für die Referenzbilder liegen. Folglich entsteht ein gemittelter Wert, in welchem zwar ein Großteil der Bevölkerung repräsentiert ist, jedoch nicht jedes Individuum. Dies liegt daran, dass nicht jeder die gleichen Freiheitsgrade für einzelne Bewegungen besitzt. Zudem kommt auch eine gewisse Grundveranlagung hinzu, welche sich teilweise in einer Über- oder Unterbeweglichkeit äußert. Um mit den recherchierten Werten die Bewegungen der Modellperson darzustellen, wurden die Freiheitsgrade dementsprechend, wie in Tabelle 1, erweitert bzw. angepasst.

Abseits der vorgenommenen Änderungen für die Flexion, konnten alle weiteren Bewegungen ohne Änderungen problemlos dargestellt werden. Für die Einposierung wurden insgesamt 4 Modelle des Ur-Modells erstellt, welche je in eine der 4 Bewegung eingestellt bzw. posiert wurden.

Während der Erstellung des Ur-Modells stellte die größte Herausforderung die Anpassung der Freiheitsgrade in Blender dar. Der Grund, warum Blender als Problemfall auftaucht, war die Verschiebung des Meshs in Relation zum Skelett (siehe Abbildung 28). Blender ist als Animationssoftware entwickelt worden. Folglich ist es kein Problem, wenn sich die Knochen, relativ zum Mesh, bei der Bewegung verschieben. Dies ist kein Problem, da die Knochen trotzdem denselben Teil des Meshs beeinflussen, auch wenn der Knochen an einem anderen Ort im Raum liegt. Für die Zwecke dieser Arbeit sorgt dies jedoch dafür, dass die Posierung mithilfe des Meshs sehr kritisch betrachtet werden muss, um zu schauen, ob eine Verschiebung der Knochen stattgefunden hat. Die Freiheitsgrade stellen in dem Sinne eine Herausforderung dar, dass die genaue Positionierung des Skeletts bzw. der digitalen Wirbelsäule nicht eindeutig bestimmbar ist. Dieses Problem wurde mithilfe der Marker, am Rücken der Modellperson, in Referenzraum 2 behoben.

## 5.2 Erstellung und Posierung der Varianten in Referenzraum 1

Bei der Erstellung der Variantenmodelle, wurde stets von ein und demselben Ur-Modell ausgegangen. Demzufolge besitzen alle Modelle bei ihrer Erstellung die gleichen Ausgangsbedingungen. Insgesamt wurden 15 verschiedene Variantenmodelle erstellt.

Bei den ersten sechs Modellen wurde auf die Anpassung der Freiheitsgrade für die Flexion geschaut, um festzustellen, welche Knochen keine Veränderung für die Posierung benötigten. Dabei fiel das Hauptaugenmerk auf die Knochenkette C6 – T1, welche keine Veränderung erfahren hatte. Diese Knochenkette wurde in den Modellen 1, 2 und 3 in jeweils zwei, drei und einem Knochen repräsentiert. Die Wirbel wurden dabei gleichmäßig auf die Knochen aufgeteilt. Ab Modell 4 wurden dann auch geänderte Wirbel mit nicht geänderten Wirbeln zusammengefasst, wie z.B. in Modell 4 der Knochen C1 – C2, wovon C2 ein Wirbel mit geändertem Freiheitsgrad bei der Flexion ist. Die Tabellen, welche beschreiben welche Knochen zusammengeführt wurden und welche Freiheitsgrade für die verschiedenen Variantenmodelle resultieren, sind im Teil 3 der Anlagen zu finden.

Ab Modell 7 wurde dann versucht das Posierverhalten durch die Veränderung der Wirbelanzahl, bzw. Anzahl an digitalen Knochen in einem bestimmten Bereich, zu untersuchen. Für Modell 7 bis 9 wurden die Wirbel T12 bis L5 untersucht und wie zuvor in einem, zwei und drei Knochen zusammengefasst. Dasselbe Verfahren wurde für die Modelle 10 bis 12, welche die untere Hälfte des T-Segments (T7 bis T12) versuchen zusammenzufassen, angewandt. Auch die Modelle 13 bis 15, welche die obere Hälfte des T-Segments zusammenfassen (T1-T6), wurden so behandelt.

Aufgrund der Untersuchung in den Modellen 4 bis 6, wurde von 3 weiteren Modellen, welche sich mit dem C-Segment auseinandersetzen sollten, abgesehen. Dies wurde mit der Begründung entschieden, dass bei der Einpassung der genannten Modelle eine subjektive, negative Tendenz festgestellt wurde. Modell 4 bis 6 hatten einen merkbaren Unterschied zur flüssigen Darstellung der Wirbelsäule und der Bewegungen.

Insgesamt wurden 15 Varianten erstellt, welche alle aufbauend auf dem Ur-Modell sind und alle abgegrenzt voneinander einen anderen Bereich bzw. eine andere Form eines Bereichs darstellen.

**Tabelle 2 : Zusammenfassung der Wirbel in digitalen Knochen für alle Variantenmodelle**

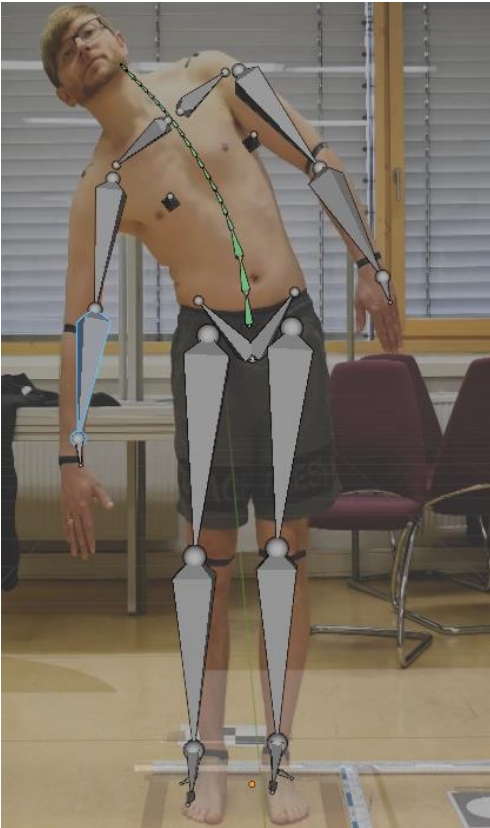
## Modellzusammenfassungen

	Knochen 1	Knochen 2	Knochen 3	Knochen 4	Knochen 5
Modell 1	C6 - T1	T2 - T4			
Modell 2	C6 - C7	T1 - T2	T3 - T4		
Modell 3	C6 - T4				
Modell 4	C1 - C2	C4 - C5	C6 - T4		
Modell 5	C1 - C2	C4 - C5	C6-T4	T6 - T7	
Modell 6	C1 - C2	C4 - C5	C6-T4	T6 - T7	L4 - L5
Modell 7	T12 - L1	L2 - L3	L4 - L5		
Modell 8	T12 - L2	L3 - L5			
Modell 9	T12 - L5				
Modell 10	T7 - T8	T9 - T10	T11 - T12		
Modell 11	T7 - T9	T10 - T12			
Modell 12	T7 - T12				
Modell 13	T1 - T2	T3 - T4	T5 - T6		
Modell 14	T1 - T3	T4 - T6			
Modell 15	T1 - T6				

Der Ausschluss einzelner Variantenmodelle erfolgte vorläufig durch subjektive Beurteilung bei der Einposierung in den Referenzraum 1. Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 29 und 30 zu sehen. In diesem Beispiel kommt es durch die Verschmelzung bzw. Zusammenfassung einzelner Wirbel dazu, dass die Wirbelsäule keine natürliche Rundung aufzeigt. Diese folgt durch die Kombination der Wirbel L5 bis L3 und L2 bis T12. Augenscheinlich würden sich die beiden Knochen noch weiter nach oben bewegen können, jedoch ist für T11 bereits das Maximum an Bewegung eingestellt.

Wenn also die beiden zusammengefassten Knochen weiter nach oben bewegt würden, so würden auch alle Wirbel oberhalb von T12 mit verschoben werden, da sie Kindobjekte von T12 sind. Die Folge daraus ist, dass sich die Wirbelsäule nicht in derselben Position befinden würde wie die Modellperson. Da dies jedoch das Ziel ist, müssen die beiden Knochen so eingestellt bleiben wie in Abbildung 29 dargestellt. Zudem wurden auch Modelle ausgeschlossen, welche infolge der Zusammenfassung einzelne Posen nicht darstellen konnten, da sie über nicht ausreichend große Bewegungsfreiheitsgrade verfügen.

Die genannten Kriterien wurden für alle 4 Bewegungen angewandt und jedes Modell für alle Bewegungen einposiert. Die mit diesem Verfahren vorläufig ausgeschlossenen Varianten sind: Modell 7, 8, 9 und 12.



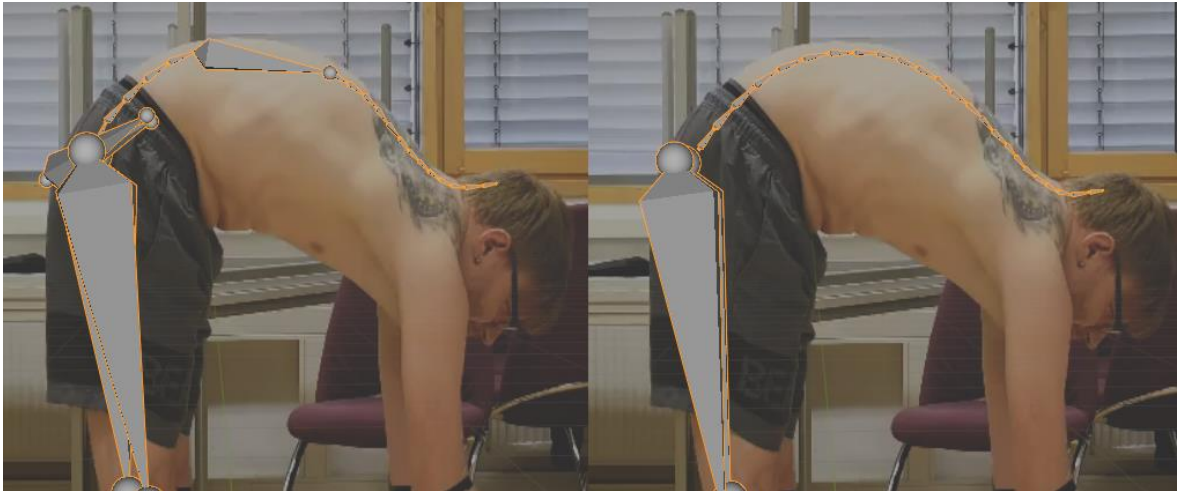
**Abbildung 35 : Modell 7 Lateralleugung rechts**

Modell 7 wurde aufgrund seiner Nichtdarstellbarkeit von der Lateralleugung rechts ausgeschlossen. Grund dafür ist, dass durch die Zusammenfassung in den unteren Wirbeln Neigung verloren geht, welche dann bei den weiter oben gelegenen Wirbeln fehlt. Dieses Problem sorgt auch für den Ausschluss der Modelle 8 und 9, da in diesen Modellen die gleiche Wirbelgruppe (T12 bis L5) versucht wurde zu vereinfachen.

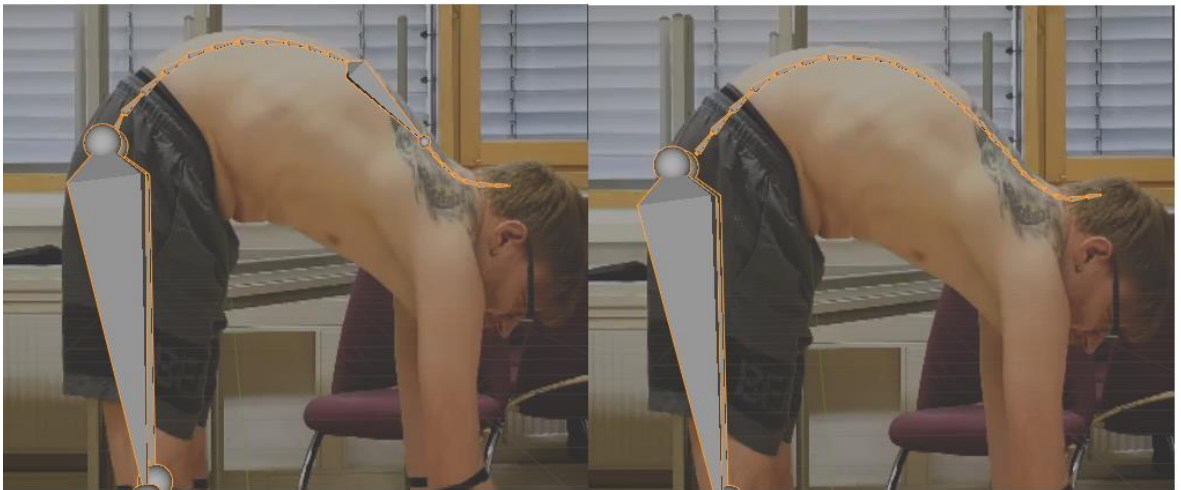
Modell 8 und 9 werden zusätzlich durch die Nichtdarstellbarkeit der Flexionsbewegung ausgeschlossen. Der Grund hierfür wurde bereits im Kapitel 4.3 Erstellung und Posierung der Varianten anhand von Modell 8 beschrieben und liegt an der Zusammenfassung der Wirbel im Bereich T12 bis L5.

Modell 12 hat hingegen das Problem, dass es bei der Flexionsbewegung zu einer unnatürlichen Gerade in der Wirbelsäulenstruktur führt. Diese entsteht durch die Kombination der Wirbel T7 bis T12.

Abbildung 36 und 37 sollen verdeutlichen, warum einige Modelle, anhand der zuvor festgelegten Kriterien, besser geeignet sind als andere. Dabei spielt die Krümmung der Wirbelsäule für einige Bewegungen eine sehr große Rolle bzw. die Lage der kombinierten Wirbel in der Krümmung.



**Abbildung 36 : Gegenüberstellung Modell 12 (links) und dem Ur-Modell (rechts)**



**Abbildung 37 : Gegenüberstellung Modell 15 (links) und dem Ur-Modell (rechts)**

Neben den erstellten Variantenmodellen wurden auch die aus MakeHuman importierten digitalen Skelette untersucht. Dabei fiel jedoch bereits vor der Posierung der einzelnen Bewegungen ein Skelett heraus. Dieses ist das Game engine-Modell. Der Grund für das Ausscheiden liegt darin, dass dieses Modell keine vollständig zusammenhängende Wirbelsäulenstruktur besitzt. Es fehlt beim Game engine-Modell ungefähr der Bereich zwischen T1 und T7. Da die Modelle jedoch möglichst anatomisch korrekt sein sollen, fiel dieses Modell bereits vor der Untersuchung als mögliche Vereinfachung heraus.

Die drei anderen Modelle verfügten zwar über eine vollständig zusammenhängende Wirbelsäule, jedoch zeigen sie starke Abweichungen von der anatomisch korrekten Form. Des Weiteren ließen sich auch die Freiheitsgrade nicht eindeutig für die einzelnen Knochen festlegen, da sie keine eindeutige Unterteilung besaßen bzw. nicht genau ersichtlich war, wie die Wirbel zusammengefasst wurden. Folglich lassen sich die drei verbleibenden digitalen Skelette von MakeHuman nicht vollständig ausschließen, da nicht überprüft werden konnte, ob die Bewegungen mit der vorgenommenen Vereinfachung noch dargestellt werden kann, da sich die Freiheitsgrade nicht eindeutig festlegen lassen haben. Aufgrund

dessen bedarf es eines besseren Ausschlusskriteriums durch bspw. einen empirischen Beweis.

Als Mesh für die Einposierung in Referenzraum 1 wurden alle 3 Varianten der Erstellung des Körpermeshs für das einposieren verwendet. Die höchste Genauigkeit, ein Individuum anhand seines Meshs richtig einzuposieren, liefern die fotogrammetrische Erfassung und der Laserscan. Dies liegt daran, dass bei beiden Methoden das Individuum selbst digitalisiert wird. Wiederum ist die Erfassung sehr umständlich und beide Verfahren sind leicht anfällig für Fehler durch Bewegungen. Das mit MakeHuman erstellte Körpermesh ist im Vergleich dazu weniger fehleranfällig, doch bei weitem nicht so genau, wenn es um anatomische Feinheiten geht.

### 5.3 Einposierung in Referenzraum 2

Für den Referenzraum 2 können noch keine Ergebnisse präsentiert werden, da die beschriebenen Methoden nur auf der Grundlage des Vorwissens aus Referenzraum 1 beschrieben wurden. Dies liegt daran, dass es noch kleinere Fehler in der Synchronisation der Kameras für den 3D-Raum gibt. Diese sind jedoch nur temporär, da die Kameras noch nicht das Referenzbild und den 3D-Raum deckungsgleich abdecken und kleine Verschiebungen besitzen. Dieses Problem wird jedoch voraussichtlich erst nach dem Abschluss dieser Arbeit behoben.

Es lässt sich jedoch bereits feststellen, dass sich die Modelle deutlich besser voneinander abgrenzen werden, da sie hier nicht mehr anhand ihres Meshs oder einer subjektiven Einschätzung des Wirbelsäulenverlaufs posiert werden, sondern anhand der tatsächlichen Lage der eingezeichneten Wirbelsäulenmarker.

## 6 Fazit

Die für diese Arbeit erstellten Modelle sind erste Prototypen für mögliche Vereinfachungen der Wirbelsäule. Die Modelle wurden dabei zwar nicht willkürlich erstellt, jedoch lassen sich sicherlich noch bessere Methoden finden, um eine optimale Vereinfachung zu erreichen.

Die Posierung im Referenzraum 1 ist dabei auch nur als ein Prototyp zu betrachten, da hier nicht auf empirische Daten zurückgegriffen wurde und die Modelle von Hand bewegt wurden. Demzufolge ist es ein erster Versuch, Modelle anhand von Referenzbildern zu überprüfen. Der zum Zeitpunkt dieser Arbeit noch entwickelte Referenzraum 2 ist daher ein guter Anfang die Versuche noch genauer und effizienter zu gestalten. Auch Blender an sich weist viele Probleme auf, welche es in der Zukunft noch zu umgehen angeht. Jedoch lässt sich sagen, dass mit der Erstellung und der ersten Posierung Fortschritte in Richtung der optimalen Wirbelsäuleneinfachung gemacht wurden und sich bereits merkbare Unterschiede in der Qualität der Modelle bemerkbar gemacht haben.



## 7 Ausblick

Während der Arbeit an der Posierung und Erstellung von vereinfachten Wirbelsäulenmodellen wurden parallel weitere Arbeiten angefertigt. Diese beschäftigen sich beispielsweise mit der Festlegung eines empirischen Maßes, welches die Eignung eines Variantenmodells bestimmen soll. Dazu werden verschiedene Metriken, wie z.B. die „Discrete Fretched distance“ oder die „Dynamic Time Warping distance“ verwendet. Anhand dieser wird dann ein Wert ermittelt, welcher einen genaueren Aufschluss darüber gibt, ob ein Modell besser oder schlechter geeignet ist. Diese Verfahren sollen dann jedoch an Modellen aus dem fertiggestelltem Referenzraum 2 angewendet werden, da dieser zur Einposierung besser geeignet ist als der bisher verwendete Referenzraum 1.

In der Zukunft soll dann ein Modell ermittelt werden, welches die beste und natürlichste Darstellung ermöglicht. Dieses Modell soll wiederum für die automatische Bewegungsanalyse verwendet werden, um mögliche Straftäter anhand ihres Bewegungsmusters zu erkennen und zu identifizieren.

## 8 Danksagung

Abschließend möchte ich noch all den Personen danken, die mich während der Ausarbeitung und Anfertigung dieser Arbeit unterstützt haben.

Vor allem bedanke ich mich bei meinem Betreuer, Herrn Sven Becker, welcher mich tatkräftig mit neuen Ideen und Materialien zur Thematik dieser Arbeit unterstützt hat und jederzeit ein offenes Ohr für meine Fragen hatte.

Ich möchte mich auch noch bei Herrn Karl Leonard Klein und Frau Katharina Dreblow bedanken, welche neben mir an dem Forschungsprojekt gearbeitet haben, von welchem meine Bachelorarbeit ein Teil ist. Beide haben mir hilfreiche Informationen aus ihrem Fachbereich zugearbeitet, welche mich wiederum bei meiner Arbeit vorangebracht haben. Zudem ermöglichte mir ihre Arbeit, einen Blick auf die Zukunft meiner Arbeit zu werfen.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern, welche mich sowohl während meines Studiums als auch während der Anfertigung dieser Arbeit mit allen Mitteln unterstützt haben.



## Literatur

- [Aumü, 2020] Aumüller, G., et al. (2020). Anatomie 5. Korrigierte Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG
- [Benne, 2002] Bennett, S. E., Schenk, R. J., & Simmons, E. D. (2002). Active range of motion utilized in the cervical spine to perform daily functional tasks. *Clinical Spine Surgery*, 15(4), 307-311.
- [Blend, 2022] Blender. Duplication.  
[https://docs.blender.org/manual/en/2.80/scene\\_layout/object/editing/duplication.html](https://docs.blender.org/manual/en/2.80/scene_layout/object/editing/duplication.html), verfügbar am 11.10.2022, 16:58 Uhr
- [Boesc, 2022] Boesch, G. A Guide to OpenPose in 2022. <https://viso.ai/deep-learning/openpose/>, verfügbar am 10.10.2022, 12:18 Uhr
- [Bogd, 2000] Bogduk, N., & Mercer, S. (2000). Biomechanics of the cervical spine. I: Normal kinematics. *Clinical biomechanics*, 15(9), 633-648.
- [Fujim, 2014] Fujimori, T., Iwasaki, M., Nagamoto, Y., Matsuo, Y., Ishii, T., Sugiura, T., ... & Yoshikawa, H. (2014). Kinematics of the thoracic spine in trunk lateral bending: in vivo three-dimensional analysis. *The Spine Journal*, 14(9), 1991-1999.
- [Gehrk, 2020] Gehrke, T. (2020). Sport Anatomie 12. Auflage. Hamburg: Nikol Verlagsgesellschaft mbH & Co.KG

- [Labu, 2022] Labudde, D., Vowinkel, H. (2022). *Digitale Forensik | Die Zukunft der Verbrechenaufklärung*. Köln: Bastei Lübbe AG
- [Lind, 1989] Lind, B., Sihlbom, H., Nordwall, A., & Malchau, H. (1989). Normal range of motion of the cervical spine. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 70(9), 692-695.
- [Madin, 2019] Madinei, S. S., & Arjmand, N. (2019). Sagittal range of motion of the thoracic spine using standing digital radiography: A throughout comparison with non-radiographic data reviewed from the literature. *Scientia Iranica*, 26(3), 1307-1315.
- [Mend, 2022] Mendeley. APA Format Citation Guide. <https://www.mendeley.com/guides/apa-citation-guide/>, verfügbar am 25.10.2022, 10:21 Uhr
- [Pearc, 1984] Pearcy, M. J., & Tibrewal, S. B. (1984). Axial rotation and lateral bending in the normal lumbar spine measured by three-dimensional radiography. *Spine*, 9(6), 582-587.
- [Schün, 2018] Schünke, Schulte, Schuhmacher, Voll, Wesker. (2018). *Prometheus Lernatlas der Anatomie Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem – [5., vollständig überarbeitete Auflage]*. New York: Georg Thieme Verlag
- [Uluça, 2009] Uluçam, E., & Cıgali, B. S. (2009). Measurement of normal lumbar spine range of motion in the college-aged Turkish population using a 3D ultrasound-based motion analysis system. *Trakya Üniversitesi Tıp Fakültesi Dergisi*.
- [Wasch, 2015] Waschke, Böckers, Paulsen. (2015). *Anatomie Das Lehrbuch*. München: Elsevier

# Anlagen

Teil 1 .....	A-I
Teil 2 .....	A-V
Teil 3 .....	A-IX
Teil 4.....	A-XVII



# Anlagen, Teil 1

Tabellen zur Bestimmung der Freiheitsgrade der Wirbelsäule:

**Tabelle 3 : Freiheitsgrade der Wirbelsäule, bestimmt durch meinen Vorgänger**

ROM Wirbelsäule angepasst, Angaben in °	Extension	Flexion	Lateralneigung	Rotation
C1	13	4,2	38	4
C2	10,5	7,7	6	6
C3	5,2	6,3	9,6	7,4
C4	10,1	9,7	10,3	8,4
C5	11,8	11	9,2	8,2
C6	8,4	11,9	5,8	7,2
C7	7,9	11	3,6	4,8
T1	2,3	1,9	4,5	2,6
T2	2,2	1,5	4,5	2
T3	2,1	1,4	4,8	1,8
T4	1,9	1,5	4,9	1,7
T5	1,6	1,6	4,8	1,7
T6	1,5	1,7	4,7	1,9
T7	1,4	1,8	4,4	2,3
T8	11,4	2	3,6	2,7
T9	1,5	2,2	3	3
T10	1,7	2,5	2,7	3,2
T11	2	3,4	2,5	3,4
T12	2,4	4,5	2,4	3,7
L1	3,2	9,8	2,8	5,5
L2	7,8	15,8	3	6,5
L3	9,5	20,2	3,1	7
L4	11,8	18,6	3,2	6,5
L5	8	17,5	3,2	4,5



Tabelle 4 : Neu recherchierte Freiheitsgrade

Wirbelsäulen Segment, Angaben in °	Extension	Flexion	L. Nei- gung	R. Nei- gung	L. Rota- tion	R. Rota- tion
C0 - C1	14 (Lind, 1989)		Insgesamt 91,4 (Benne, 2002)		1 (Bogd, 2000)	
C1 - C2	13 (Lind, 1989)				40,5 (Bogd, 2000)	
C2 - C3	10 (Lind, 1989)				3 (Bogd, 2000)	
C3 - C4	14(Lind, 1989)				6,5 (Bogd, 2000)	
C4 - C5	16 (Lind, 1989)				6,8 (Bogd, 2000)	
C5 - C6	15 (Lind, 1989)				6,9 (Bogd, 2000)	
C6 - C7	11 (Lind, 1989)				2,1 (Bogd, 2000)	
C7 - T1						
T1 - T2	Insgesamt 7.1 (Madin, 2019)		1,4 ± 1,3 (Fujim, 2014)			
T2 - T3			1,3 ± 1,2 (Fujim, 2014)			
T3 - T4			1,4 ± 1,3 (Fujim, 2014)			
T4 - T5			0,9 ± 0,9 (Fujim, 2014)			
T5 - T6			0,8 ± 1 (Fujim, 2014)			
T6 - T7			Insgesamt 15.5 (Madin, 2019)		1,1 ± 1,1 (Fujim, 2014)	
T7 - T8	1,7 ± 1,2 (Fujim, 2014)					
T8 - T9	1,3 ± 1,2 (Fujim, 2014)					
T9 - T10	1,6 ± 0,7 (Fujim, 2014)					
T10 - T11	1,8 ± 0,8 (Fujim, 2014)					
T11 - T12	2,3 ± 1 (Fujim, 2014)					
T12 - L1	2,2 ± 0,8 (Fujim, 2014)					
L1 - L2	2,1 ± 1,75 (Uluça, 2009)	7,45 ± 2,7 (Uluça, 2009)	10 (Pearc, 1984)	10 (Pearc, 1984)	2 (Pearc, 1984)	2 (Pearc, 1984)
L2 - L3	3,25 ± 4 (Uluça, 2009)	11,6 ± 3,75 (Uluça, 2009)	11 (Pearc, 1984)	11 (Pearc, 1984)	2 (Pearc, 1984)	2 (Pearc, 1984)
L3 - L4	3,85 ± 4,05 (Uluça, 2009)	14,45 ± 5,25 (Uluça, 2009)	10 (Pearc, 1984)	10 (Pearc, 1984)	3 (Pearc, 1984)	3 (Pearc, 1984)
L4 -L5	5,55 ± 4,9 (Uluça, 2009)	14,4 ± 5,35 (Uluça, 2009)	6 (Pearc, 1984)	6 (Pearc, 1984)	3 (Pearc, 1984)	3 (Pearc, 1984)
L5 - S1	4,15 ± 4,5 (Uluça, 2009)	13,85 ± 5,2 (Uluça, 2009)	3 (Pearc, 1984)	3 (Pearc, 1984)	2 (Pearc, 1984)	2 (Pearc, 1984)



Tabelle 5 : Final zusammengeführte Freiheitsgrade

ROM Wirbelsäule angepasst, Angaben in °	Extension	Flexion	Lateralneigung	Rotation
C1	13	4,2	38	40,5
C2	10	7,7	6	3
C3	1,4	6,3	9,6	6,5
C4	16	9,7	10,3	6,8
C5	15	11	9,2	6,9
C6	11	11,9	5,8	2,1
C7	7,9	11	3,6	2,1
T1	2,3	1,9	2,7	2,6
T2	2,2	1,5	2,5	2
T3	2,1	1,4	2,7	1,8
T4	1,9	1,5	1,8	1,7
T5	1,6	1,6	1,8	1,7
T6	1,5	1,7	2,2	1,9
T7	1,4	1,8	1,9	2,3
T8	1,4	2	2,5	2,7
T9	1,5	2,2	2,3	3
T10	1,7	2,5	2,7	3,2
T11	2	3,4	2,5	3,4
T12	2,4	4,5	2,4	3,7
L1	3,2	9,8	10	2
L2	7,3	15,4	11	2
L3	7,9	19,7	10	3
L4	10,45	18,6	6	3
L5	8	17,5	3	2

## Anlagen, Teil 2

Referenzbilder des Referenzraum 1:



Abbildung 38 : Frame 10 - Flexionsbewegung Kamera 1



Abbildung 39 : Frame 10 - Flexionsbewegung Kamera 2



Abbildung 40 : Frame 41 - Lateralneigung rechts Kamera 1

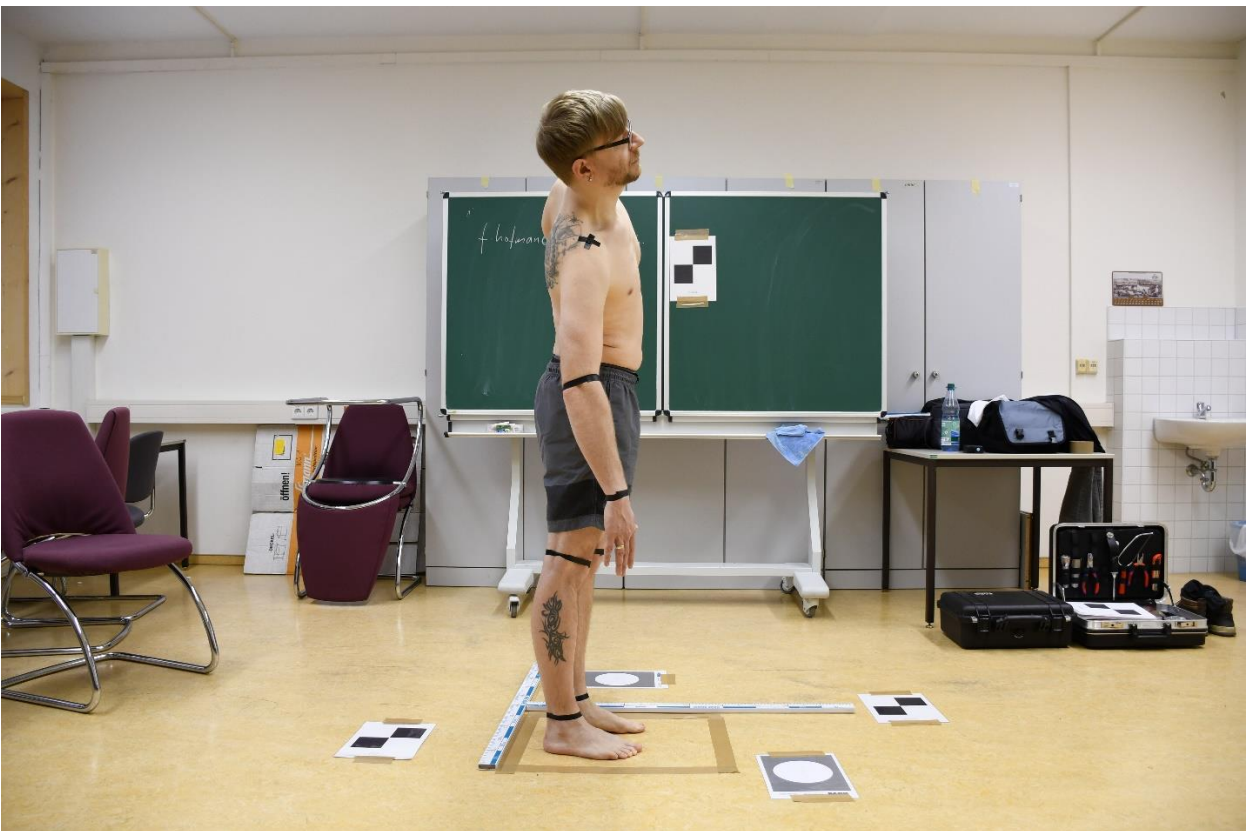


Abbildung 41 : Frame 41 - Lateralneigung rechts Kamera 2



Abbildung 42 : Frame 46 - Lateralneigung links Kamera 1

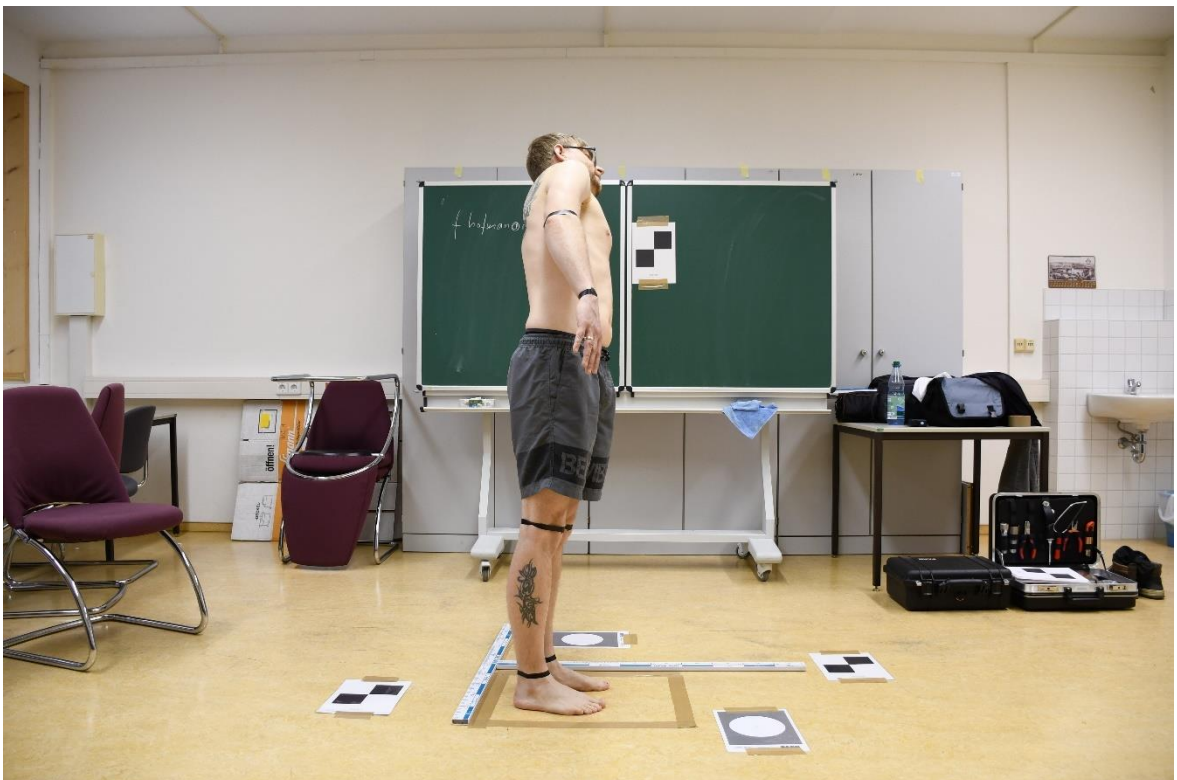


Abbildung 43 : Frame 46 - Lateralneigung links Kamera 2



Abbildung 44 : Frame 55 – Extensionsbewegung Kamera 1



Abbildung 45 : Frame 55 - Extensionsbewegung Kamera 2

## Anlagen, Teil 3

Tabellen der Freiheitsgrade für die einzelnen Wirbel, der Variantenmodelle.

**Tabelle 6 : Tabelle der Freiheitsgrade für Variantenmodell 1, grün: geänderte Freiheitsgrade, orange: Zusammengefasste Werte durch Addition**

Modell 1	Flexion in °	Extension in °	Lat.Neig in °
C1	4,2	13	4
C2	7,7	19,1	3
C3	6,3	10,9	6,5
C4	9,7	16	6,8
C5	11	20,4	6,9
C6-T1	24,5	21,2	6,8
T2-T4	4,4	6,2	5,5
T5	6	1,6	1,7
T6	1,5	1,7	1,9
T7	4	1,4	2,3
T8	8,3	1,4	2,7
T9	4	1,5	3
T10	4,4	1,7	3,2
T11	4,8	2	3,4
T12	16,1	2,4	3,7
L1	14,2	3,2	2
L2	20	6,5	2
L3	22,8	6,4	3
L4	18,6	9,2	3
L5	18,6	7,8	2



**Tabelle 7 : Tabelle der Freiheitsgrade für Variantenmodell 2, grün: geänderte Freiheitsgrade, orange: Zusammengefasste Werte durch Addition**

Modell 2	Flexion in °	Extension in °	Lat.Neig in °
C1		4,2	13
C2		7,7	19,1
C3		6,3	10,9
C4		9,7	16
C5		11	20,4
C6-C7		22,9	18,9
T1-T2		3,4	4,5
T3-T4		2,9	4
T5		6	1,6
T6		1,5	1,7
T7		4	1,4
T8		8,3	1,4
T9		4	1,5
T10		4,4	1,7
T11		4,8	2
T12		16,1	2,4
L1		14,2	3,2
L2		20	6,5
L3		22,8	6,4
L4		18,6	9,2
L5		18,6	7,8

**Tabelle 8 : Tabelle der Freiheitsgrade für Variantenmodell 3, grün: geänderte Freiheitsgrade, orange: Zusammengefasste Werte durch Addition**

Modell 3	Flexion in °	Extension in °	Lat.Neig in °
C1		4,2	13
C2		7,7	19,1
C3		6,3	10,9
C4		9,7	16
C5		11	20,4
C6-T4		28,9	27,4
T5		6	1,6
T6		1,5	1,7
T7		4	1,4
T8		8,3	1,4
T9		4	1,5
T10		4,4	1,7
T11		4,8	2
T12		16,1	2,4
L1		14,2	3,2
L2		20	6,5
L3		22,8	6,4
L4		18,6	9,2
L5		18,6	7,8

**Tabelle 9 : Tabelle der Freiheitsgrade für Variantenmodell 4, grün: geänderte Freiheitsgrade, orange: Zusammengefasste Werte durch Addition**

Modell 4	Flexion in °	Extension in °	Lat.Neig in °
C1 - C2	11,9	32,1	7
C3	6,3	10,9	6,5
C4 - C5	20,7	36,4	13,7
C6-T4	28,9	27,4	12,3
T5	6	1,6	1,7
T6	1,5	1,7	1,9
T7	4	1,4	2,3
T8	8,3	1,4	2,7
T9	4	1,5	3
T10	4,4	1,7	3,2
T11	4,8	2	3,4
T12	16,1	2,4	3,7
L1	14,2	3,2	2
L2	20	6,5	2
L3	22,8	6,4	3
L4	18,6	9,2	3
L5	18,6	7,8	2

**Tabelle 10 : Tabelle der Freiheitsgrade für Variantenmodell 5, grün: geänderte Freiheitsgrade, orange: Zusammengefasste Werte durch Addition**

Modell 5	Flexion in °	Extension in °	Lat.Neig in °
C1 - C2	11,9	32,1	7
C3	6,3	10,9	6,5
C4 - C5	20,7	36,4	13,7
C6-T4	28,9	27,4	12,3
T5	6	1,6	1,7
T6 - T7	5,5	3,3	4,2
T8	8,3	1,4	2,7
T9	4	1,5	3
T10	4,4	1,7	3,2
T11	4,8	2	3,4
T12	16,1	2,4	3,7
L1	14,2	3,2	2
L2	20	6,5	2
L3	22,8	6,4	3
L4	18,6	9,2	3
L5	18,6	7,8	2

**Tabelle 11 : Tabelle der Freiheitsgrade für Variantenmodell 6, grün: geänderte Freiheitsgrade, orange: Zusammengefasste Werte durch Addition**

Modell 6	Flexion in °	Extension in °	Lat.Neig in °
C1 - C2	11,9	32,1	7
C3	6,3	10,9	6,5
C4 - C5	20,7	36,4	13,7
C6-T4	28,9	27,4	12,3
T5	6	1,6	1,7
T6 - T7	5,5	3,3	4,2
T8	8,3	1,4	2,7
T9	4	1,5	3
T10	4,4	1,7	3,2
T11	4,8	2	3,4
T12	16,1	2,4	3,7
L1	14,2	3,2	2
L2	20	6,5	2
L3	22,8	6,4	3
L4 - L5	37,2	17	5

**Tabelle 12 : Tabelle der Freiheitsgrade für Variantenmodell 7, grün: geänderte Freiheitsgrade, orange: Zusammengefasste Werte durch Addition**

Modell 7	Flexion in °	Extension in °	Lat.Neig in °
C1	4,2	13	4
C2	7,7	19,1	3
C3	6,3	10,9	6,5
C4	9,7	16	6,8
C5	11	20,4	6,9
C6	11,9	11	2,1
C7	11	7,9	2,1
T1	1,9	2,3	2,6
T2	1,5	2,2	2
T3	1,4	2,1	1,8
T4	1,5	1,9	1,7
T5	6	1,6	1,7
T6	1,5	1,7	1,9
T7	4	1,4	2,3
T8	8,3	1,4	2,7
T9	4	1,5	3
T10	4,4	1,7	3,2
T11	4,8	2	3,4
T12 - L1	30,3	5,6	5,7
L2 - L3	42,8	12,9	5
L4 - L5	37,2	17	5

**Tabelle 13 : Tabelle der Freiheitsgrade für Variantenmodell 8, grün: geänderte Freiheitsgrade, orange: Zusammengefasste Werte durch Addition**

Modell 8	Flexion in °	Extension in °	Lat.Neig in °	
C1		4,2	13	4
C2		7,7	19,1	3
C3		6,3	10,9	6,5
C4		9,7	16	6,8
C5		11	20,4	6,9
C6		11,9	11	2,1
C7		11	7,9	2,1
T1		1,9	2,3	2,6
T2		1,5	2,2	2
T3		1,4	2,1	1,8
T4		1,5	1,9	1,7
T5		6	1,6	1,7
T6		1,5	1,7	1,9
T7		4	1,4	2,3
T8		8,3	1,4	2,7
T9		4	1,5	3
T10		4,4	1,7	3,2
T11		4,8	2	3,4
T12 - L2		50,3	12,1	7,7
L2 - L5		60	23,4	8

**Tabelle 14 : Tabelle der Freiheitsgrade für Variantenmodell 9, grün: geänderte Freiheitsgrade, orange: Zusammengefasste Werte durch Addition**

Modell 9	Flexion in °	Extension in °	Lat.Neig in °	
C1		4,2	13	4
C2		7,7	19,1	3
C3		6,3	10,9	6,5
C4		9,7	16	6,8
C5		11	20,4	6,9
C6		11,9	11	2,1
C7		11	7,9	2,1
T1		1,9	2,3	2,6
T2		1,5	2,2	2
T3		1,4	2,1	1,8
T4		1,5	1,9	1,7
T5		6	1,6	1,7
T6		1,5	1,7	1,9
T7		4	1,4	2,3
T8		8,3	1,4	2,7
T9		4	1,5	3
T10		4,4	1,7	3,2
T11		4,8	2	3,4
T12 - L5		110	35,5	15,7

**Tabelle 15 : Tabelle der Freiheitsgrade für Variantenmodell 10, grün: geänderte Freiheitsgrade, orange: Zusammengefasste Werte durch Addition**

Modell 10	Flexion in °	Extension in °	Lat.Neig in °
C1	4,2	13	4
C2	7,7	19,1	3
C3	6,3	10,9	6,5
C4	9,7	16	6,8
C5	11	20,4	6,9
C6	11,9	11	2,1
C7	11	7,9	2,1
T1	1,9	2,3	2,6
T2	1,5	2,2	2
T3	1,4	2,1	1,8
T4	1,5	1,9	1,7
T5	6	1,6	1,7
T6	1,5	1,7	1,9
T7 - T8	12,3	2,8	5
T9 - T10	8,4	3,2	6,2
T11 - T12	20,94	4,4	7,1
L1	14,2	3,2	2
L2	20	6,5	2
L3	22,8	6,4	3
L4	18,6	9,2	3
L5	18,6	7,8	2

**Tabelle 16 : Tabelle der Freiheitsgrade für Variantenmodell 11, grün: geänderte Freiheitsgrade, orange: Zusammengefasste Werte durch Addition**

Modell 11	Flexion in °	Extension in °	Lat.Neig in °
C1	4,2	13	4
C2	7,7	19,1	3
C3	6,3	10,9	6,5
C4	9,7	16	6,8
C5	11	20,4	6,9
C6	11,9	11	2,1
C7	11	7,9	2,1
T1	1,9	2,3	2,6
T2	1,5	2,2	2
T3	1,4	2,1	1,8
T4	1,5	1,9	1,7
T5	6	1,6	1,7
T6	1,5	1,7	1,9
T7 - T9	16,3	4,3	8
T10 - T12	25,3	6,1	10,3
L1	14,2	3,2	2
L2	20	6,5	2
L3	22,8	6,4	3
L4	18,6	9,2	3
L5	18,6	7,8	2

**Tabelle 17 : Tabelle der Freiheitsgrade für Variantenmodell 12, grün: geänderte Freiheitsgrade, orange: Zusammengefasste Werte durch Addition**

Modell 12	Flexion in °	Extension in °	Lat.Neig in °
C1	4,2	13	4
C2	7,7	19,1	3
C3	6,3	10,9	6,5
C4	9,7	16	6,8
C5	11	20,4	6,9
C6	11,9	11	2,1
C7	11	7,9	2,1
T1	1,9	2,3	2,6
T2	1,5	2,2	2
T3	1,4	2,1	1,8
T4	1,5	1,9	1,7
T5	6	1,6	1,7
T6	1,5	1,7	1,9
<b>T7 - T12</b>	<b>41,6</b>	<b>10,4</b>	<b>18,3</b>
L1	14,2	3,2	2
L2	20	6,5	2
L3	22,8	6,4	3
L4	18,6	9,2	3
L5	18,6	7,8	2

**Tabelle 18 : Tabelle der Freiheitsgrade für Variantenmodell 13, grün: geänderte Freiheitsgrade, orange: Zusammengefasste Werte durch Addition**

Modell 13	Flexion in °	Extension in °	Lat.Neig in °
C1	4,2	13	4
C2	7,7	19,1	3
C3	6,3	10,9	6,5
C4	9,7	16	6,8
C5	11	20,4	6,9
C6	11,9	11	2,1
C7	11	7,9	2,1
<b>T1 - T2</b>	<b>3,4</b>	<b>4,5</b>	<b>4,6</b>
<b>T3 - T4</b>	<b>2,9</b>	<b>4</b>	<b>3,5</b>
<b>T5 - T6</b>	<b>7,5</b>	<b>3,3</b>	<b>3,6</b>
T7	4	1,4	2,3
T8	8,3	1,4	2,7
T9	4	1,5	3
T10	4,4	1,7	3,2
T11	4,8	2	3,4
T12	16,1	2,4	3,7
L1	14,2	3,2	2
L2	20	6,5	2
L3	22,8	6,4	3
L4	18,6	9,2	3
L5	18,6	7,8	2

**Tabelle 19 : Tabelle der Freiheitsgrade für Variantenmodell 14, grün: geänderte Freiheitsgrade, orange: Zusammengefasste Werte durch Addition**

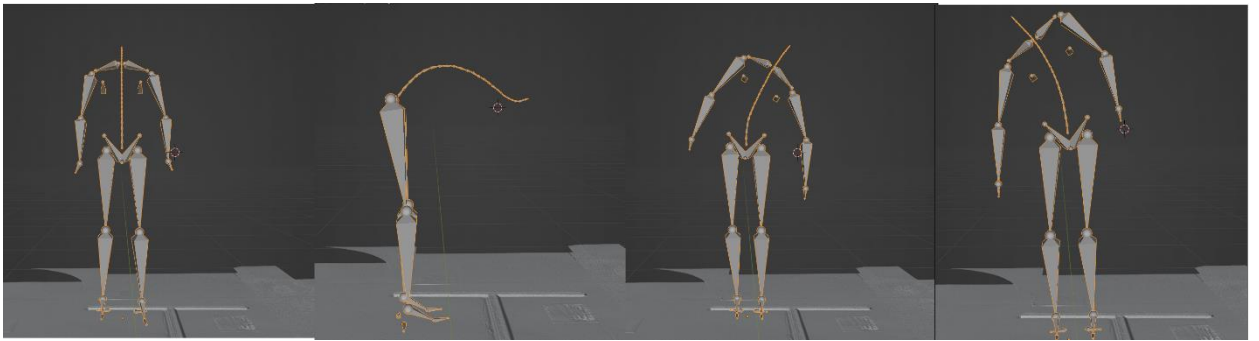
Modell 14	Flexion in °	Extension in °	Lat.Neig in °
C1	4,2	13	4
C2	7,7	19,1	3
C3	6,3	10,9	6,5
C4	9,7	16	6,8
C5	11	20,4	6,9
C6	11,9	11	2,1
C7	11	7,9	2,1
T1 - T3	4,8	6,6	6,4
T4 - T6	9	5,2	5,3
T7	4	1,4	2,3
T8	8,3	1,4	2,7
T9	4	1,5	3
T10	4,4	1,7	3,2
T11	4,8	2	3,4
T12	16,1	2,4	3,7
L1	14,2	3,2	2
L2	20	6,5	2
L3	22,8	6,4	3
L4	18,6	9,2	3
L5	18,6	7,8	2

**Tabelle 20 : : Tabelle der Freiheitsgrade für Variantenmodell 15, grün: geänderte Freiheitsgrade, orange: Zusammengefasste Werte durch Addition**

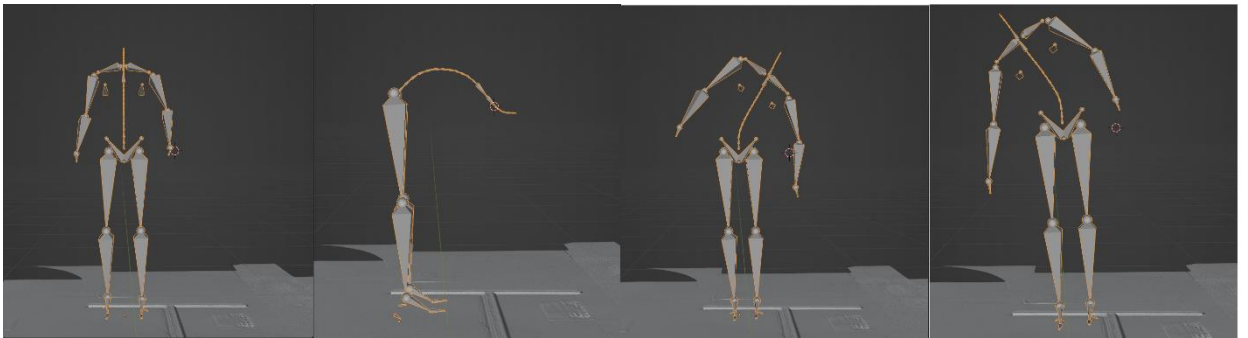
Modell 15	Flexion in °	Extension in °	Lat.Neig in °
C1	4,2	13	4
C2	7,7	19,1	3
C3	6,3	10,9	6,5
C4	9,7	16	6,8
C5	11	20,4	6,9
C6	11,9	11	2,1
C7	11	7,9	2,1
T1 - T6	13,8	11,8	11,7
T7	4	1,4	2,3
T8	8,3	1,4	2,7
T9	4	1,5	3
T10	4,4	1,7	3,2
T11	4,8	2	3,4
T12	16,1	2,4	3,7
L1	14,2	3,2	2
L2	20	6,5	2
L3	22,8	6,4	3
L4	18,6	9,2	3
L5	18,6	7,8	2

## Anlagen, Teil 4

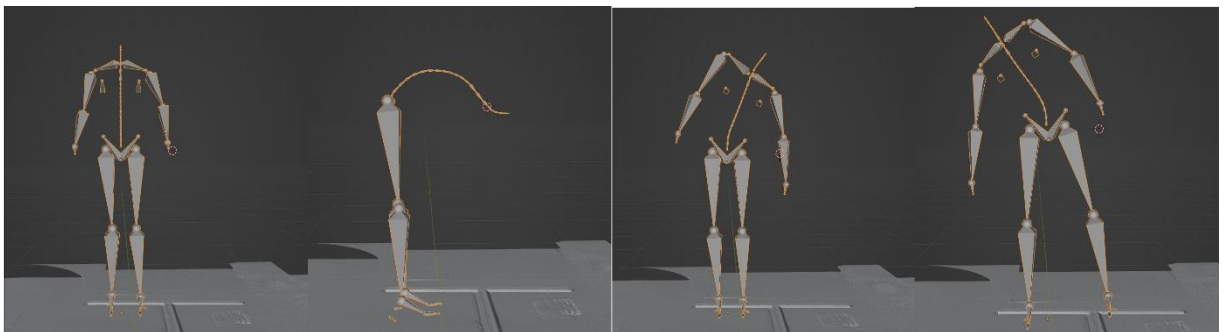
Collagen der einzelnen digitalen Skelette in den positionierten Bewegungen.



**Abbildung 46 : Collage Ur-Modell - links nach rechts: Extension, Flexion, Lateralneigung Links, Lateralneigung Rechts**

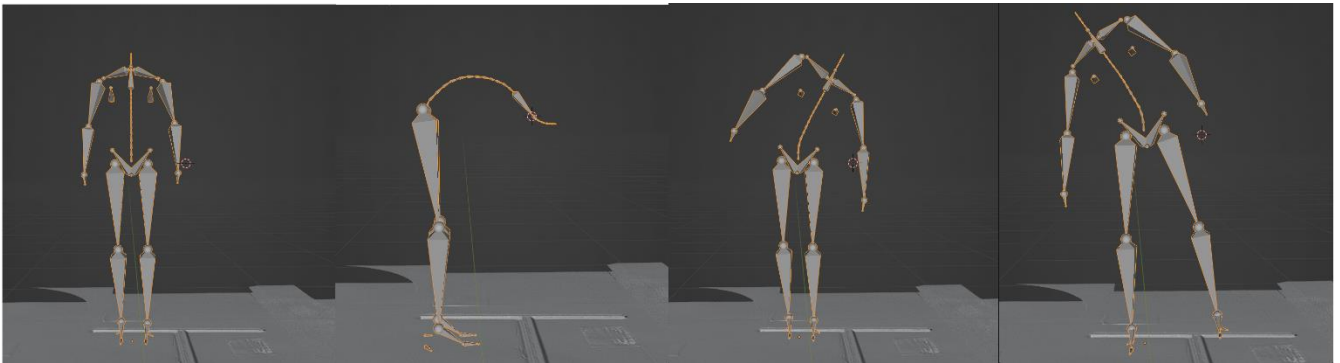


**Abbildung 47 : Collage Modell 1 - links nach rechts: Extension, Flexion, Lateralneigung Links, Lateralneigung Rechts**

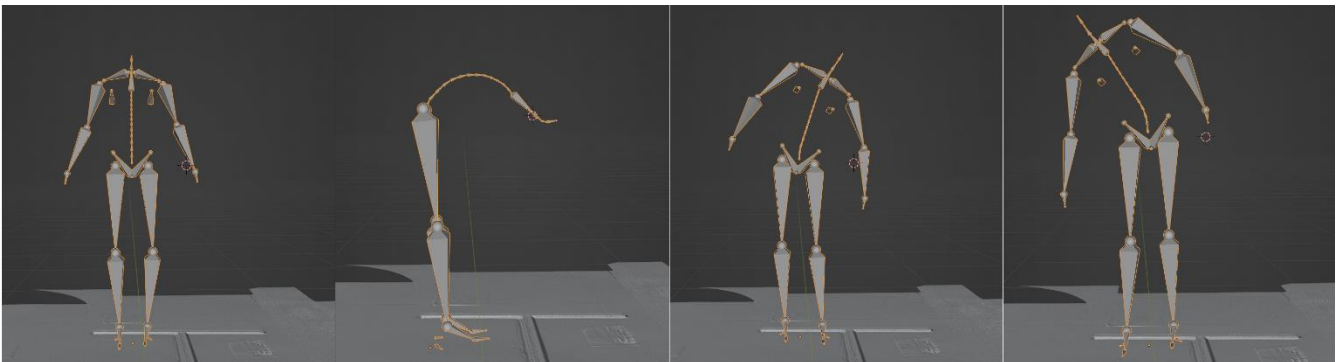


**Abbildung 48 : Collage Modell 2 - links nach rechts: Extension, Flexion, Lateralneigung Links, Lateralneigung Rechts**

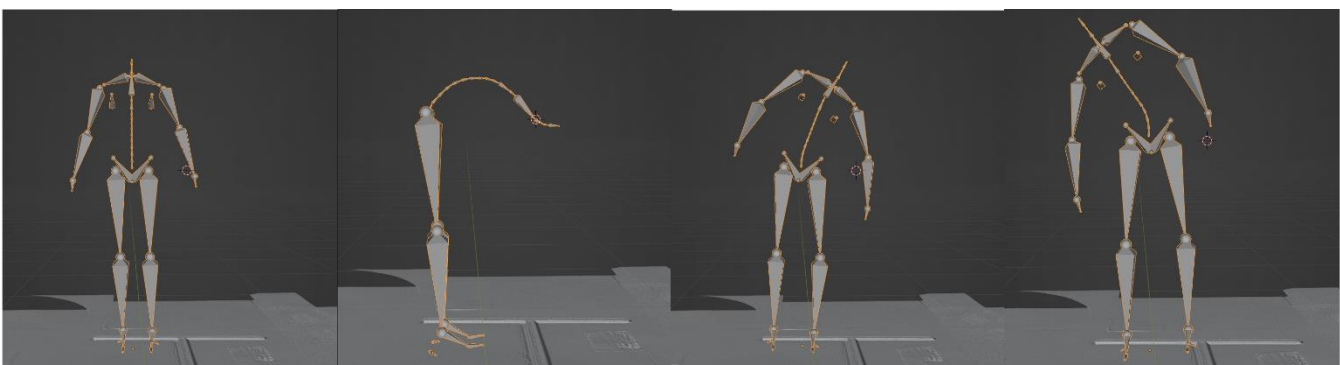




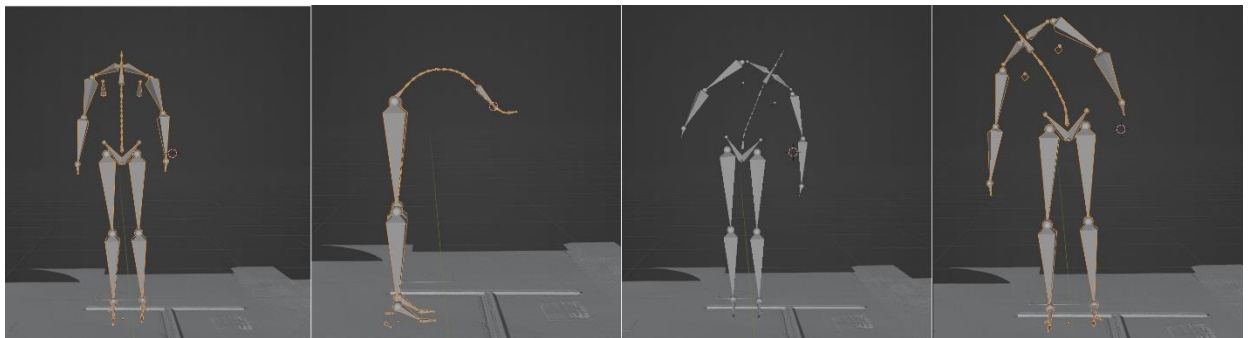
**Abbildung 49 : Collage Modell 3 - links nach rechts: Extension, Flexion, Lateralneigung Links, Lateralneigung Rechts**



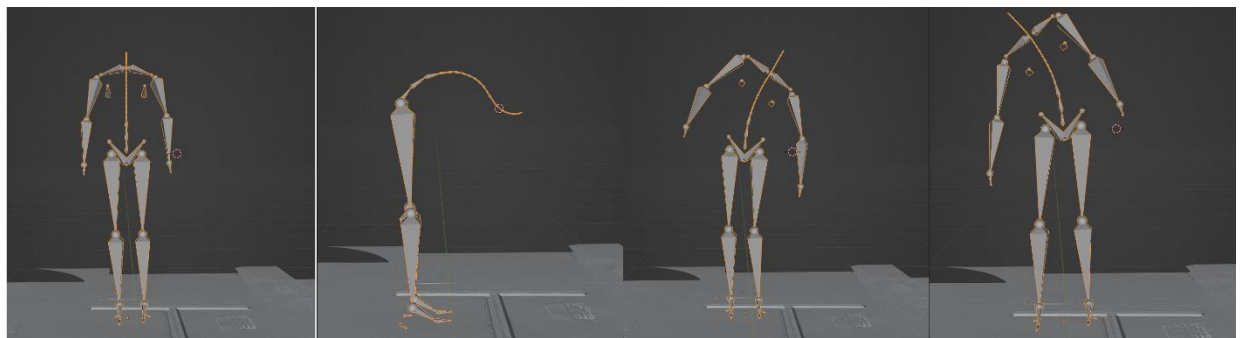
**Abbildung 50 : Collage Modell 4 - links nach rechts: Extension, Flexion, Lateralneigung Links, Lateralneigung Rechts**



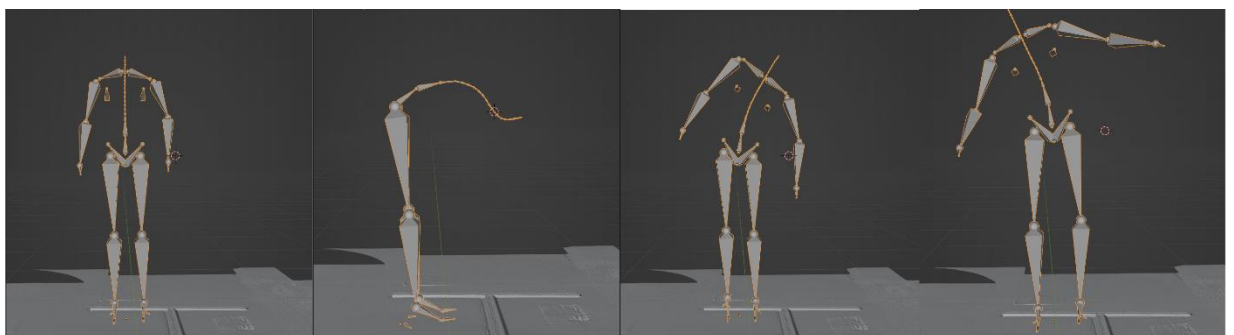
**Abbildung 51 : Collage Modell 5 - links nach rechts: Extension, Flexion, Lateralneigung Links, Lateralneigung Rechts**



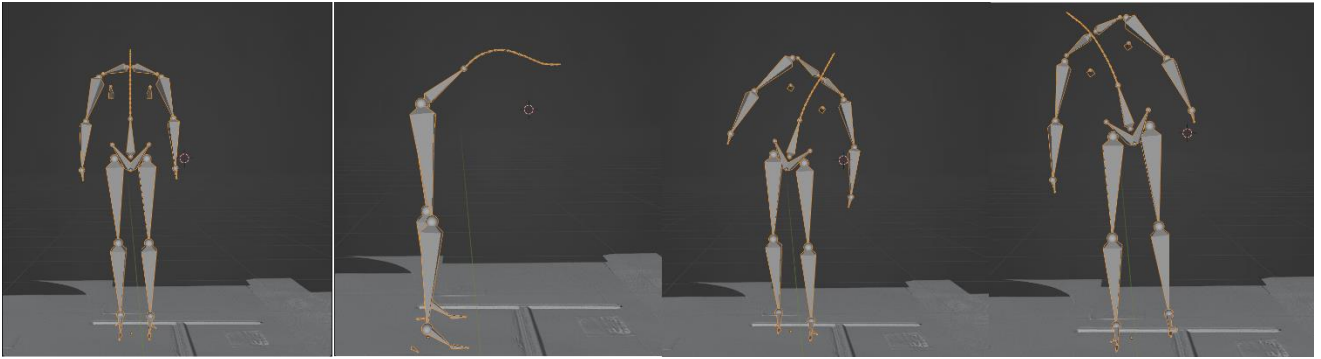
**Abbildung 52 : Collage Modell 6 - links nach rechts: Extension, Flexion, Lateralneigung Links, Lateralneigung Rechts**



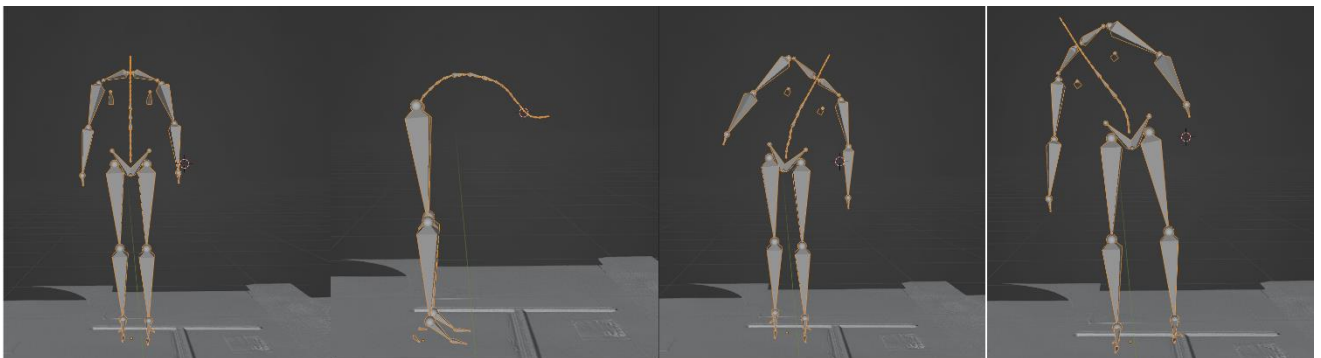
**Abbildung 53 : Collage Modell 7 - links nach rechts: Extension, Flexion, Lateralneigung Links, Lateralneigung Rechts**



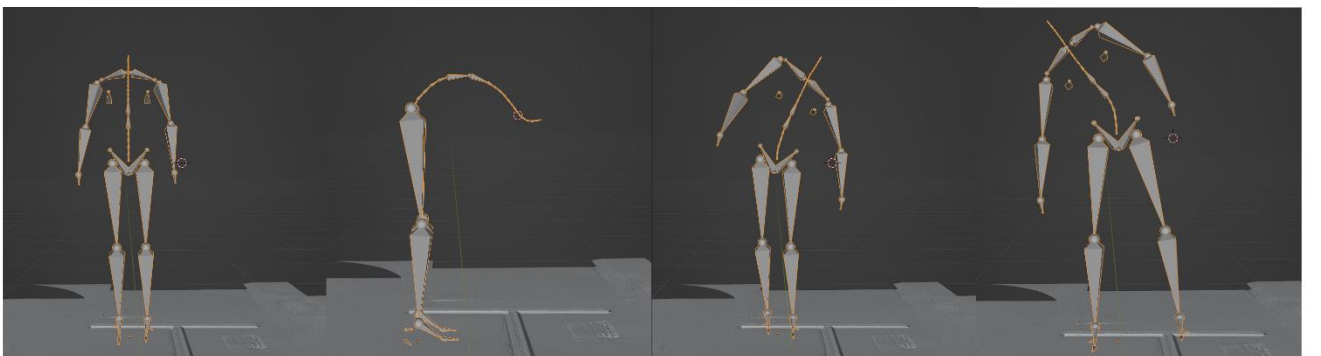
**Abbildung 54 : Collage Modell 8 - links nach rechts: Extension, Flexion, Lateralneigung Links, Lateralneigung Rechts**



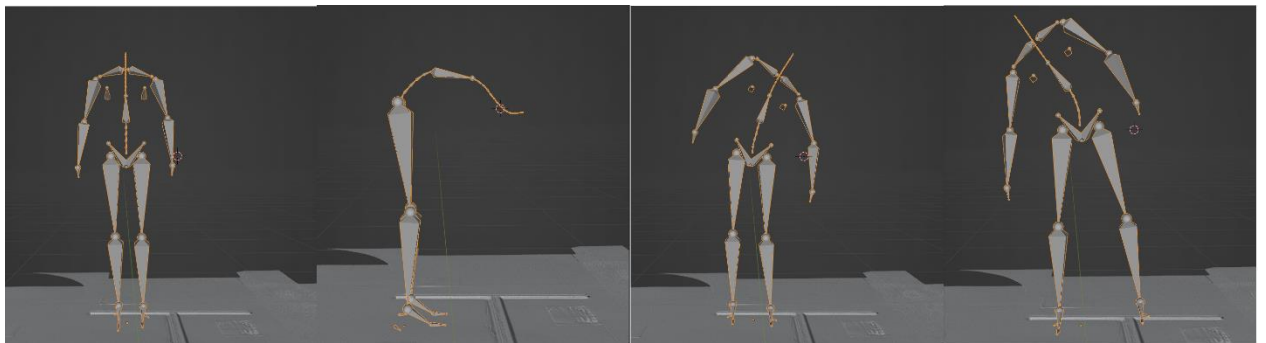
**Abbildung 55 : Collage Modell 9 - links nach rechts: Extension, Flexion, Lateralneigung Links, Lateralneigung Rechts**



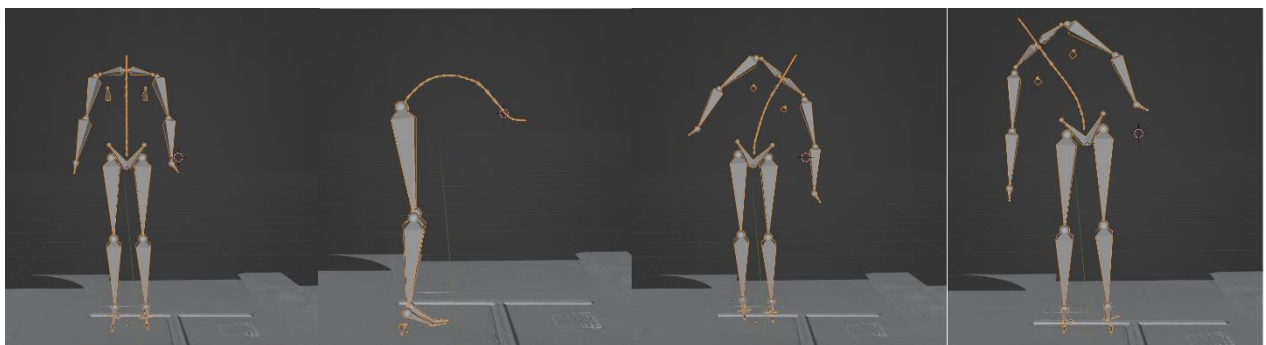
**Abbildung 56 : Collage Modell 10 - links nach rechts: Extension, Flexion, Lateralneigung Links, Lateralneigung Rechts**



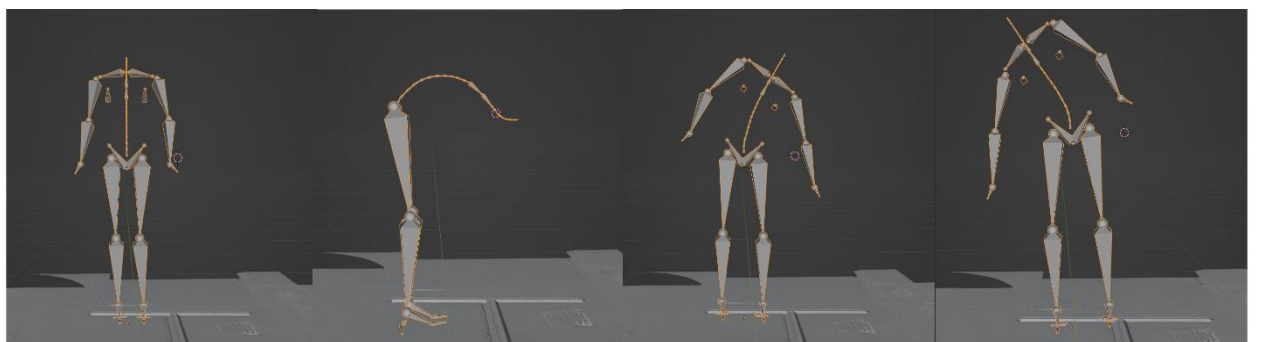
**Abbildung 57 : Collage Modell 11 - links nach rechts: Extension, Flexion, Lateralneigung Links, Lateralneigung Rechts**



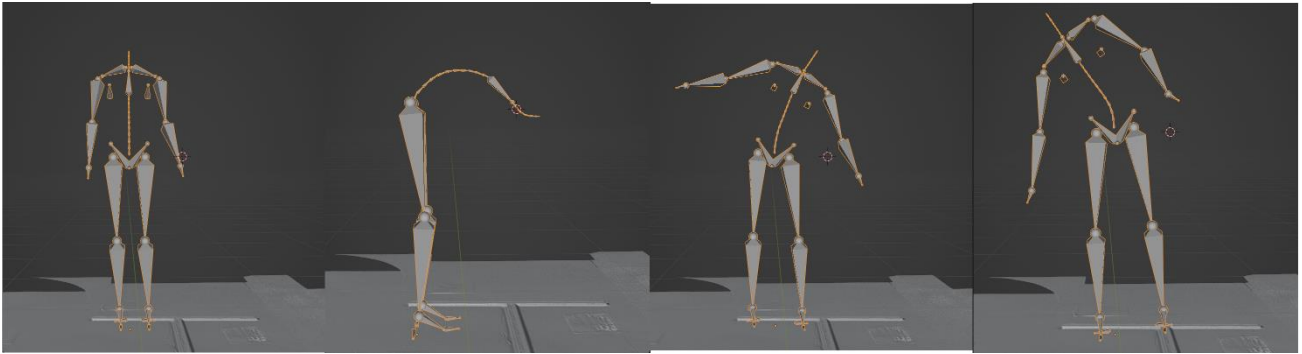
**Abbildung 58 : Collage Modell 12 - links nach rechts: Extension, Flexion, Lateralneigung Links, Lateralneigung Rechts**



**Abbildung 59 : Collage Modell 13 - links nach rechts: Extension, Flexion, Lateralneigung Links, Lateralneigung Rechts**



**Abbildung 60 : Collage Modell 14 - links nach rechts: Extension, Flexion, Lateralneigung Links, Lateralneigung Rechts**



**Abbildung 61 : Collage Modell 15 - links nach rechts: Extension, Flexion, Lateralneigung Links, Lateralneigung Rechts**

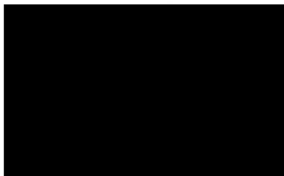
## Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

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

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, den 26.10.2022



Willy Delling