

Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (<http://www.ub.tuwien.ac.at>).

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (<http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/>).

# D I P L O M A R B E I T

## **Erstellung eines 3D-CAD Modells der unteren Extremitäten eines Kindes basierend auf Magnetresonanzaufnahmen**

ausgeführt am Institut für Maschinenelemente der Technischen  
Universität Wien

unter Anleitung von  
Ao.Univ.Prof.Dr. Margit Gföhler

durch

Nikola Bojanić  
Zieglergasse 27/2/1  
1070 Wien

Diese Arbeit ist in Kooperation zwischen der Technischen Universität Wien und dem "MR/CT Institut Liesing" entstanden. Ich möchte allen danken, die dies ermöglicht haben, insbesondere Fr. Claudia Kronnerwetter, die die Erstellung von Magnetresonanzaufnahmen durch Ihren aussergewöhnlichen fachlichen Einsatz ermöglicht hatte, sowie der Probandin Caroline Bruckmüller für Ihre Mitarbeit und Geduld, ohne die diese Arbeit nicht hätte entstehen können.

Weiters danke ich Frau Prof. Dr. M. Gföhler und Herrn Prof. Dr. M. Grafinger, die mich bei der Erstellung der vorliegenden Arbeit mit Hingabe unterstützten und mir in zahlreichen Diskussionen und mit vielen konstruktiven Hinweisen den Weg wiesen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Methoden</b>	<b>8</b>
2.1	MRI-Prozedur . . . . .	10
2.2	Erstellung der Konturen in 2D . . . . .	15
2.3	Erstellung des 3D-Modells . . . . .	17
2.3.1	Wireframe and Surface Design-Mode . . . . .	17
2.3.2	Part Design-Mode . . . . .	18
2.3.3	Assembly Design-Mode . . . . .	19
<b>3</b>	<b>Resultate</b>	<b>20</b>
3.1	Skelettmodell . . . . .	20
3.2	Muskelmodell . . . . .	23
3.3	Sehnenmodell . . . . .	30
3.4	Skelettmuskelmodell . . . . .	35
3.5	Muskel- und Sehnenparameter . . . . .	40
3.6	Vergleich mit Literaturdaten . . . . .	45
<b>4</b>	<b>Diskussion</b>	<b>49</b>
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>51</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Muskeln des Unterschenkels und des Fußes; von vorne (links) und von lateral (rechts), Sobotta, 2000 . . . . .	8
2.2	Muskeln des Oberschenkels und der Hüfte; von vorne (links) und von lateral (rechts), Sobotta, 2000 . . . . .	9
2.3	Beispiel von den axialen (links) bzw. sagittalen (rechts) Aufnahmen . . . . .	10
2.4	Serien Anordnung . . . . .	12
2.5	Letzter Scan der ersten Serie (links) und erster Scan der zweiten Serie (rechts) . . . . .	12
2.6	Letzter Scan der zweiten Serie (links) und erster Scan der dritten Serie (rechts) . . . . .	13
2.7	Unbrauchbarer Scan der zweiten Serie (links) und unbrauchbarer Scan der dritten Serie (rechts) . . . . .	13
2.8	Beispiel von Skelettmuskelkonturen . . . . .	15
2.9	Beispiel zur Vergrößerung von Skelettmuskelkonturen . . . . .	16
2.10	Konturen der <i>flexor digitorum longus tendo</i> . . . . .	17
2.11	Beispiel einer Umhüllung, <i>fibularis tendo</i> . . . . .	18
2.12	Beispiel eines durch zwei Serien gewonnenen Teils, Muskel <i>biceps femoris, caput longum</i> . . . . .	19
3.1	Modell vom Hüftbein, <i>Os coxae</i> . . . . .	20
3.2	Modelle vom Oberschenkelknochen, <i>femur</i> (links) und der Kniescheibe <i>patella</i> (rechts) . . . . .	21
3.3	Modelle vom Schienbein, <i>tibia</i> (links) und Wadenbein, <i>fibula</i> (rechts) . . . . .	21
3.4	Skelettmodell in drei Ansichten: von vorne (links), von lateral (mitte) und zwischen der rückwertigen und medialen Ansicht (rechts) . . . . .	22

3.5	Modelle der Muskeln, jeweils von links nach rechts: erste Reihe: <i>adductor longus, adductor magnus</i> ; zweite Reihe: <i>biceps femoris caput breve, biceps femoris caput longum</i> ; dritte Reihe: <i>extensor longus, fibularis</i> ; vierte Reihe: <i>flexor digitorum longus, flexor hallucis longus</i> . . . . .	24
3.6	Modelle der Muskeln, jeweils von links nach rechts: erste Reihe: <i>gastrocnemius caput laterale, gastrocnemius caput mediale</i> ; zweite Reihe: <i>gluteus maximus, gluteus medius</i> ; dritte Reihe: <i>gluteus minimus, gracilis</i> ; vierte Reihe: <i>iliacus, psoas major</i> . . . . .	25
3.7	Modelle der Muskeln, jeweils von links nach rechts: erste Reihe: <i>oburatorius externus, oburatorius internus</i> ; zweite Reihe: <i>pectineus, piriformis</i> ; dritte Reihe: <i>popliteus, soleus</i> ; vierte Reihe: <i>quadratus femoris, sartorius</i> . . . . .	27
3.8	Modelle der Muskeln, jeweils von links nach rechts: erste Reihe: <i>semimembranosus, semitendinosus</i> ; zweite Reihe: <i>tibialis anterior, tibialis posterior</i> ; dritte Reihe: <i>tensor fasciae latae, vastus intermedius</i> ; vierte Reihe: <i>vastus lateralis, vastus medialis</i> . . . . .	28
3.9	Modell des Muskels <i>rectus femoris</i> zusammen mit <i>caput rectum tendo</i> und <i>caput reflexum tendo</i> . . . . .	29
3.10	Modelle der Sehnen, jeweils von links nach rechts: erste Reihe: <i>adductor magnus tendo, biceps femoris caput breve tendo</i> ; zweite Reihe: <i>extensor longus tendo, fibularis tendo</i> ; dritte Reihe: <i>flexor digitorum longus tendo, gastrocnemius tendo</i> . . . . .	30
3.11	Modelle der Sehnen, jeweils von links nach rechts: erste Reihe: <i>gracilis tendo, sartorius tendo</i> ; zweite Reihe: <i>rectus femoris tendo, ligamentum patellae</i> ; dritte Reihe: <i>semimembranosus tendo, semitendinosus tendo</i> ; vierte Reihe: <i>tibialis anterior tendo, tibialis posterior tendo</i> . . . . .	31
3.12	Sehnemuskellmodelle, jeweils von links nach rechts: erste Reihe: <i>adductor magnus + tendo, biceps femoris caput breve + tendo</i> ; zweite Reihe: <i>extensor longus + tendo, fibularis + tendo</i> ; dritte Reihe: <i>flexor digitorum longus + tendo, gastrocnemius caput laterale + gastrocnemius caput mediale + soleus + tendo</i> . . . . .	32
3.13	Sehnemuskellmodelle, jeweils von links nach rechts: erste Reihe: <i>gracilis + tendo, sartorius + tendo</i> ; zweite Reihe: <i>rectus femoris + tendo + caput rectum tendo + caput reflexum tendo, ligamentum patellae + patella + tibia</i> ; dritte Reihe: <i>semimembranosus + tendo, semitendinosus + tendo</i> ; vierte Reihe: <i>tibialis anterior + tendo, tibialis posterior + tendo</i> . . . . .	33
3.14	Skelettmuskellmodell mit inneren Muskel- und Sehnenmodellen in zwei Ansichten: von vorne (links) und von lateral (rechts)	35

3.15	Skelettmuskelmodell mit inneren Muskel- und Sehnenmodellen in zwei Ansichten: von hinten (links) und von medial (rechts)	36
3.16	Skelettmuskelmodell mit allen Muskel- und Sehnenmodellen, in zwei Ansichten: von vorne (links) und von lateral (rechts)	. 37
3.17	Skelettmuskelmodell mit allen Muskel- und Sehnenmodellen, in vier Ansichten: von hinten (links) und von medial (rechts)	. 38
3.18	Muskelmittellinien mit Gelenksmittelpunkten in zwei Ansichten: von lateral (links) und von medial (rechts)	. . . . . 41
3.19	Hebelarme jeweils von links nach rechts: erste Reihe: von <i>rectus femoris</i> im Knie- und Hüftgelenk; zweite Reihe: von <i>ligamentum patellae</i> und von <i>vastii</i> ; dritte Reihe: von <i>hamstrings</i> im Knie- und Hüftgelenk; vierte Reihe: von <i>gluteus maximus</i>	. . . 42
3.20	Schematische Darstellung eines Muskels	. . . . . 45

# Tabellenverzeichnis

2.1	Daten der MRI Prozedur . . . . .	11
3.1	Exakte Gesamtlänge der Mittellinie der Sehnemuskelmodelle, Muskelvolumen, Hebelarme im Knie- und Hüftgelenk . . . . .	40
3.2	Muskellängen . . . . .	43
3.3	Sehnenlängen . . . . .	44
3.4	Vergleich von Hebelarmen [ $mm$ ] im Kniegelenk . . . . .	45
3.5	Vergleich von Hebelarmen [ $mm$ ] im Hüftgelenk . . . . .	46
3.6	Vergleich der Gesamtlänge [ $mm$ ] der Muskeln und Muskel- gruppen . . . . .	46
3.7	Gelenkwinkel bei dem optimale Muskelfaserlänge ohne Akti- vierung auftritt, nach Pawlik . . . . .	47
3.8	Vergleich von Muskelvolumina [ $cm^3$ ] . . . . .	48

# Kapitel 1

## Einleitung

Das Ziel dieser Diplomarbeit ist zu zeigen, wie man ein subjektspezifisiertes 3D-CAD Modell der unteren Extremitäten eines Kindes mit Hilfe von Magnetresonanzaufnahmen (MRI-magnetic resonance imaging) konstruieren kann und wie danach die Skelettmuskelparameter wie z.B. Muskellänge, Hebelarme, und Muskelvolumina daraus ermittelt (gemessen) werden können.

Eine solche nicht-invasive, schmerzfreie Methode zur Erstellung des Skelettmuskelmodells *in vivo* (Murray, 1998) kann bei der Untersuchung von Gangabnormalitäten wie z.B. Zerebralparese sehr nützlich sein, siehe Arnold, 2000 wo die Hebelarme von den unteren Extremitäten, die mit Hilfe von Modellen abgemessen wurden, mit experimentell ermittelten Hebelarmen bezüglich des gleichen Subjekts verglichen wurden. Die Resultate, die bei dieser Studie (Arnold, 2000), sowie auch bei anderen, siehe Murray 1998, wo ein 3D-Modell der oberen Extremitäten analysiert wird, erzielt worden sind, deuten darauf hin, dass die auf MR basierende Modellierung eine genauere Repräsentation eines Individuums im Vergleich zu dem üblicherweise in der Literatur verwendeten Normmenschen (Anderson, 1999; Pawlik, 1992; Soest, 2000; Pandy, 2003; Delp, 1990; Scott, 1993) anbietet.

In diesen Studien wurden die MR Aufnahmen von Erwachsenen für die Modellerstellung benutzt. Für die Untersuchungen an Kindern, hat man dann von den Daten des Normmenschen, durch die Skalierung mit einem konstanten Faktor, die Skelettmuskelparameter näherungsweise ausgerechnet.

In dieser Arbeit wird zum ersten Mal das 3D-CAD Skelettmuskelmodell der unteren Extremitäten eines Kindes erstellt, wobei die Daten eines gesunden neunjährigen Kindes als Muster benutzt wurden.

Es ist fraglich ob eine Skalierung der Daten von den Erwachsenen auf die Skelettmuskelgeometrie eines Kindes wirklich die richtigen Daten liefert. Da das die einzige zur Verfügung stehende Möglichkeit für die Verifikation des 3D-CAD Modells ist, wurde hier der Vergleich mit skalierten Grössen von den Modellen erwachsener Normmenschen benutzt.

Im Folgenden wird die Prozedur der Modellerstellung in drei Kapiteln, nämlich

- Methoden
- Resultate
- Diskussion

genau erklärt und diskutiert, wobei die vom Modell ermittelten Skelettmuskelparameter mit Daten aus der Literatur verglichen wurden.

# Kapitel 2

## Methoden

In diesem Kapitel werden die Methoden für die Erstellung des subjektspezifischen 3D-Skelettmuskelmodells basierend auf Magnetresonananzaufnahmen

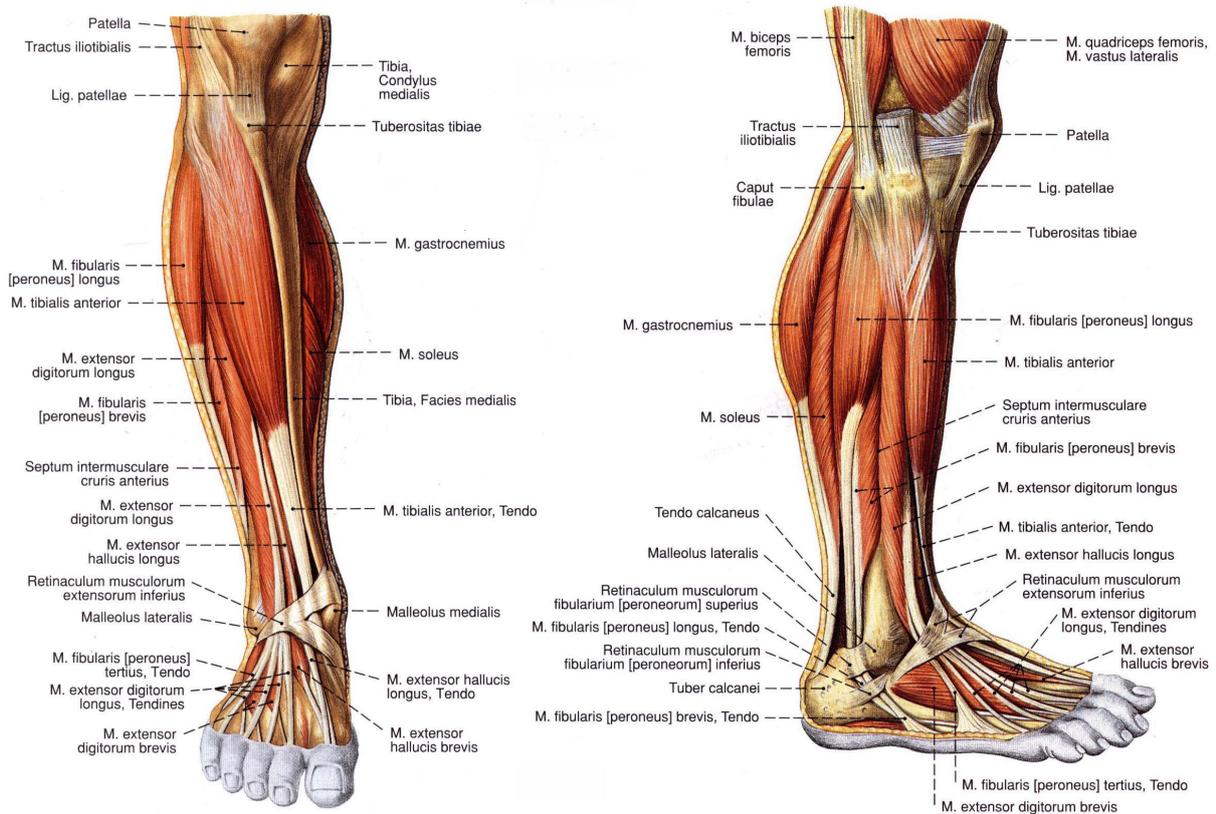


Abbildung 2.1: Muskeln des Unterschenkels und des Fußes; von vorne (links) und von lateral (rechts), Sobotta, 2000

der unteren Extremitäten (Abbildung 2.1 und 2.2) eines gesunden Kindes (Grösse 1.4 m) durch drei Abschnitte, nämlich

- MRI-Prozedur
- Erstellung der Konturen in 2D
- Erstellung des 3D-Modells

genau beschrieben. Dabei hat man die Aufnahmen für beide Beine gemacht, wobei nur das rechte Bein modelliert wird. Im Fall vom gesunden Kind wird für das linke Bein die gleiche Struktur angenommen.

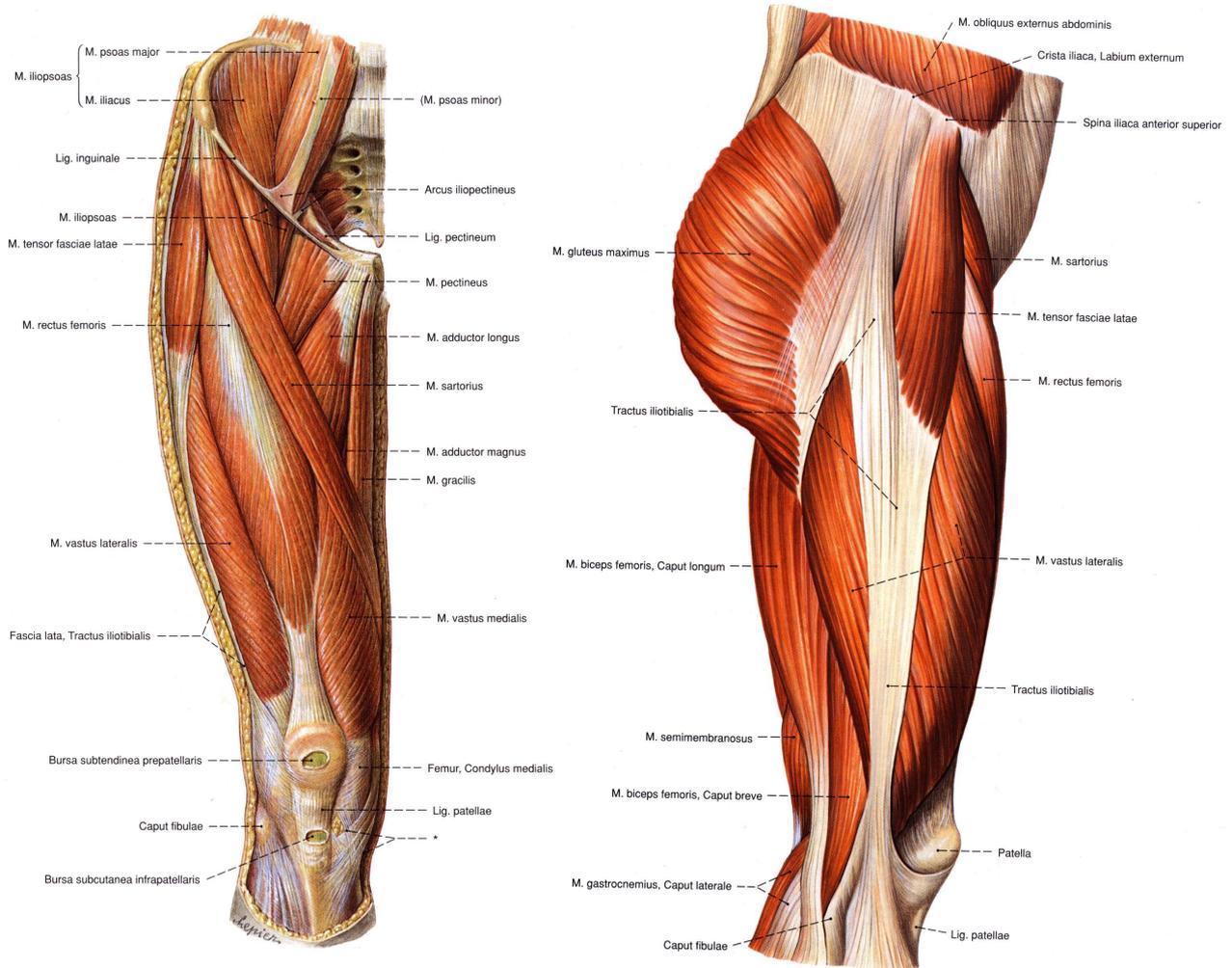


Abbildung 2.2: Muskeln des Oberschenkels und der Hüfte; von vorne (links) und von lateral (rechts), Sobotta, 2000

## 2.1 MRI-Prozedur

Die Erstellung der MR Aufnahmen wurde im "MR/CT Institut Liesing", Wien durchgeführt, wobei ein Siemens Symphony Maestro Class Scanner mit Magnetfeldstärke vom 1.5 Tesla verwendet wurde.

Als Probestperson für diese Studie wurde ein neunjähriges weibliches Kind gewählt.

Die Aufnahme-prozedur hat ungefähr 30 Minuten gedauert wobei 2-Typen von Aufnahmen im Bereich vom Knöchel bis über das Becken gemacht wurden, nämlich

1. AXIALE Aufnahmen, im Abstand 5 mm (vgl. Abbildung 2.3 links)
2. SAGITTALE Aufnahmen, im Abstand 8 mm. (vgl. Abbildung 2.3 rechts)

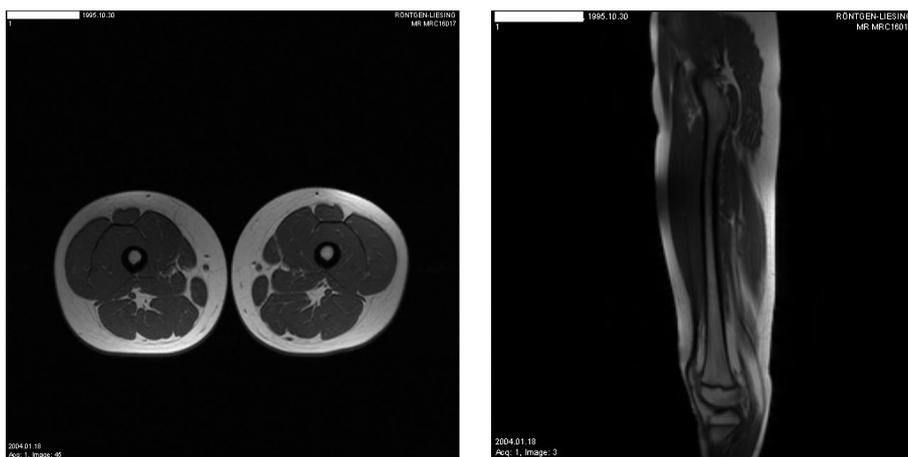


Abbildung 2.3: Beispiel von den axialen (links) bzw. sagittalen (rechts) Aufnahmen

Die Daten der MRI-Prozedur findet sind in Tabelle 2.1 zu finden.

Durch die speziell auf die Aufgabenstellung abgestimmten Parameter ist eine sehr gute Unterscheidung von Muskel-, Knochen- und Fettgewebe möglich.

Für die Erstellung des Modells wurden hauptsächlich die axialen Aufnahmen verwendet, weil diese mehr Informationen über die Muskeln-, Sehnen- und Knochengeometrie beinhalten (siehe Abschnitt 2.3). Andererseits werden die sagittalen Aufnahmen als Hilfe bei der Konturenerstellung in 2D, wo einige axiale Aufnahmen unklar waren, für die Erkennung des Knochen- und Muskelgruppenverlaufes benutzt (siehe Abschnitt 2.2).

Aufgrund der Länge der unteren Extremitäten der untersuchten Person,

Sequenztechnik		TI ES AXIAL	TI ES SAGITAL
TR	ms	591	645
TE	ms	7,8	20
FOV read	mm	300	450
FOV phase	%	100	93,8
Slice		70	8
Slice thickness	mm	5	8
Dist. Factor		0	30
Contatentions		2	1
Filter		Elliptical	Elliptical
Phase enc. Dir.		R-L	A-P
Phase oversampling	%	0	0
Averages		1	1
Flip angle		70	90
Base resolution		320	256
Phase resolution	%	100	100
Voxel size	mm	0,9x0,9x5,0	1,8x,8x8,0
Rel. SNR		1,00	1
Scan time		6,24	2,36
Spulentechnik		Array spine + Array body	Array spine + Array body
Arbeitsablauf		3 Blöcke + table movement	2 Blöcke + table movement

Tabelle 2.1: Daten der MRI Prozedur

mussten die axialen MR Aufnahmen in mehrere Serien unterteilt werden. In dieser Studie wurden drei Serien angefertigt (siehe Abbildung 2.4), wobei für zukünftige Studien hierbei angemerkt werden muss, dass es günstiger wäre vier oder mehr Serien zu machen um den ganzen Bereich von der Fußsohle bis über das Becken abzudecken.

In Abbildung 2.5 ist offensichtlich, dass im Übergang zwischen erster und zweiter Serie mehrere Aufnahmen fehlen. Als Nachweis dafür sieht man im rechten Bild, wie stark sich Position und Form von einigen Muskeln wie z.B. *semimembranosus*, *semitendinosus*, *biceps femoris caput longum* im Vergleich zum linken Bild ändern. Größt abgeschätzt wird angenommen, dass mindestens vier Aufnahmen fehlen, es ist jedoch möglich, dass es mehr fehlende MR Aufnahmen gibt, die diesen Bereich abdecken würden.

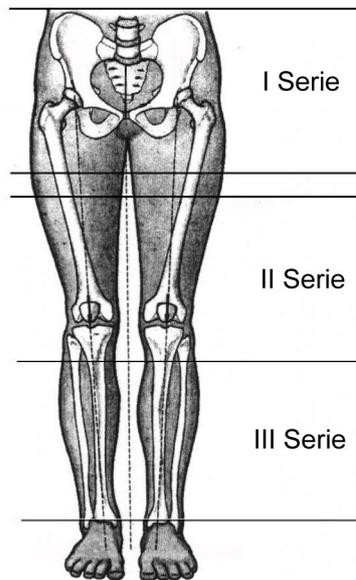


Abbildung 2.4: Serien Anordnung

In Abbildung 2.6 sieht man den Übergang von der zweiten auf die dritte Serie, wo ersichtlich ist, dass das Ende (die letzten zwölf Aufnahmen) der zweiten Serie stufenweise verkleinert und verzerrt ist. Weiters muss angemerkt werden, dass einige Aufnahmen am Ende der zweiten und dritten Serie sind unbrauchbar. Zwei Beispiele von solchen Aufnahmen sind in Abbildung 2.7 dargestellt.

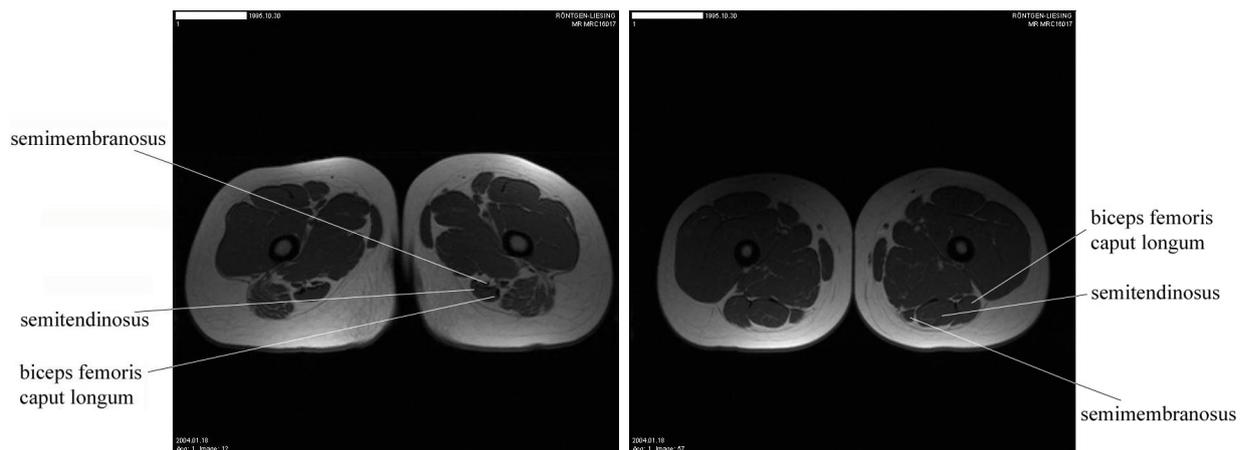


Abbildung 2.5: Letzter Scan der ersten Serie (links) und erster Scan der zweiten Serie (rechts)

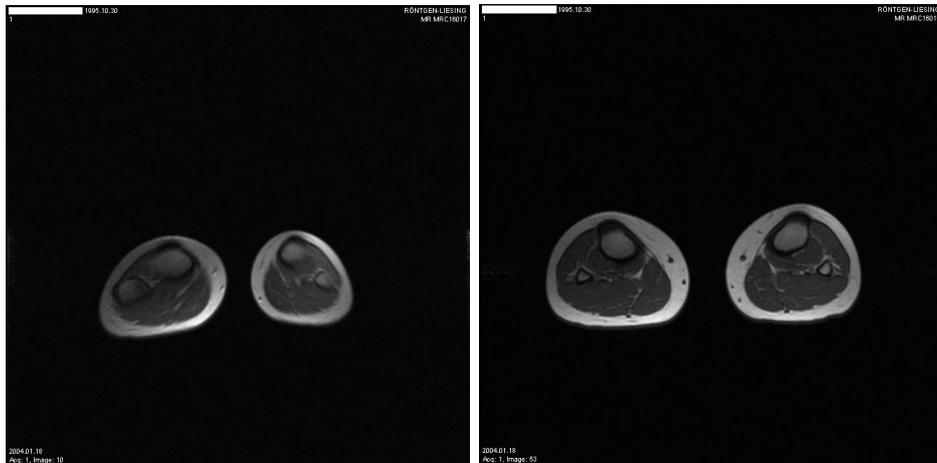


Abbildung 2.6: Letzter Scan der zweiten Serie (links) und erster Scan der dritten Serie (rechts)

Es ist wichtig zu bemerken, dass sich der Patient während der Aufnahme möglichst wenig bewegt, damit man nachher bei der Modellerstellung den Übergang zwischen zwei Serien genauer modellieren kann (siehe Abschnitt 2.3.2).

Um die Aufnahmen auf dem Rechner betrachten zu können, wurde eine

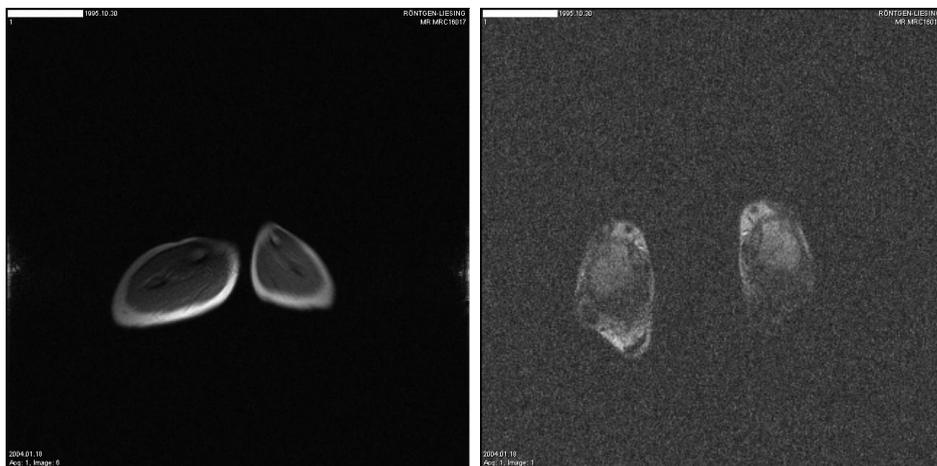


Abbildung 2.7: Unbrauchbarer Scan der zweiten Serie (links) und unbrauchbarer Scan der dritten Serie (rechts)

Freeware namens **Osiris 4** verwendet. Mit diesem Programm kann man Aufnahmen einzeln sowie in Reihenfolge in der Form eines Zeichentricksfilms (unter DICOMDIR) betrachten. Durch die Möglichkeit einer Animation er-

stellen zu können, ist der Verlauf den Muskeln und Knochen erkennbar. Ausserdem dient dieses Programm auch für die Umwandlung von Scanfiles die im `.papyrus` Dateiformat vom Scanner abgespeichert wurden, in das `.tiff` Dateiformat, das für das Importieren der Aufnahmen in ein 2D CAD-Programm notwendig ist. Dies wird im nächsten Abschnitt genauer erklärt.

## 2.2 Erstellung der Konturen in 2D

Für das Bestimmen und Zeichnen von Skelettmuskelkonturen, hat man von allen zur Verfügung stehenden CAD-Programmen ME10 2002 (2D-Programm) ausgewählt. Der Grund dafür liegt in der Tatsache, dass es mittels ME10 möglich ist, das Bild im .tiff Dateiformat zu importieren und weiter zu bearbeiten, was z.B. mit dem CAD-Programm Catia, das für die Erstellung des 3D-Modells benötigt wird, nicht möglich ist.

Dabei muss man allerdings beachten, dass die Unix-Version von ME10 das Importieren von .tiff Dateien bzw. von Bildern allgemein nicht unterstützt. Deswegen sollte man sich für diesen Vorgang auf die Windows-Version beschränken.

Beim Importieren wird nach der Position des Bildes gefragt, wobei man bei jedem Scan die gleiche Koordinate (z.B. (0,0)) eingeben sollte, damit im Nachhinein bei der Erstellung des 3D-Modells, die entsprechenden Konturen in gleicher vertikaler Linie liegen.

Das Zeichnen von Konturen erfolgt mit der Funktion geschlossene Spline,

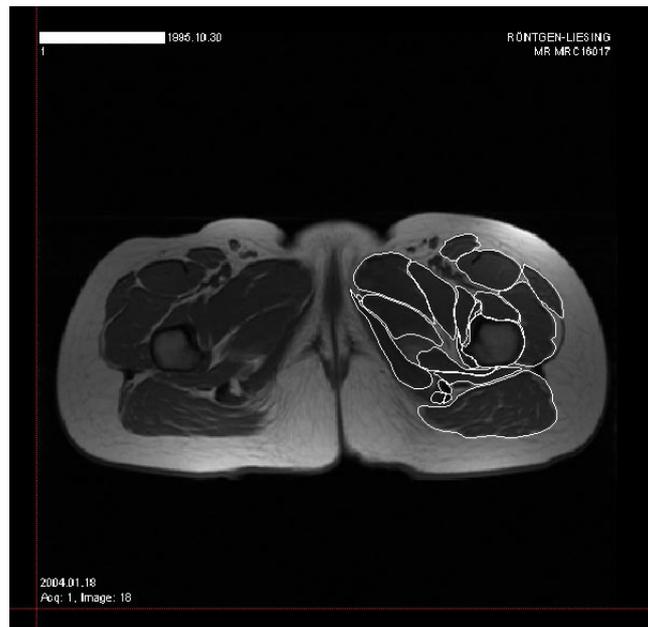


Abbildung 2.8: Beispiel von Skelettmuskelkonturen

die im Menü Geometrie zu finden ist. Das Resultat auf einem beliebigen Scan ist in Abbildung 2.8 zu sehen. Für die leichtere Erkennung von Muskelskelettkonturen wurde Sobotta, 2000, Atlas der Anatomie Band 2 benutzt.

Während der Konvertierung des `.papyrus`-Dateiformates in das `.tiff`-Dateiformat wird das Bild (Scan) mit einem konstanten Faktor verkleinert. Deshalb müssen die gezeichneten Konturen mit dem gleichen Faktor vergrößert werden. Aufgrund der Abmessungen der Bildrahmen (`.papyrus`: 319x319 ; `.tiff`: 81.28x81.28) hat sich herausgestellt, dass dieser Faktor genau 3,924704724 beträgt. Als Referenzpunkt bei der Vergrößerung wurde bei allen Aufnahmen der Ursprung (0,0) genommen.

In Abbildung 2.9 ist dieser Vorgang dargestellt.

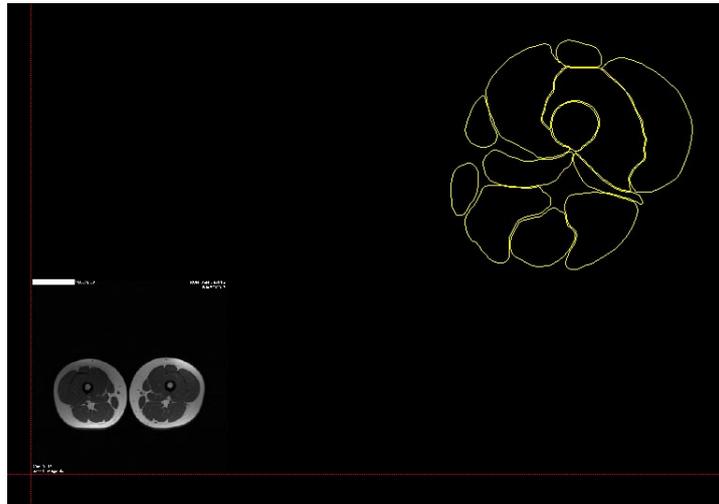


Abbildung 2.9: Beispiel zur Vergrößerung von Skelettmuskelkonturen

Wie schon im vorherigen Abschnitt 2.1 beschrieben wurde, sind einige Aufnahmen, genauer zwölf der zweiten Serie, stufenweise verkleinert und verzerrt. Um diese Deformation teilweise zu korrigieren, sollte man diese Aufnahmen mit einem stufenweise höheren Faktor als 3,924704724 vergrößern. Dabei wird allerdings nur die Verkleinerung behoben. Die Verzerrung bleibt leider noch merkbar, was später am 3D-Modell ersichtlich ist, siehe Kapitel 3.

Schliesslich sollte man die Konturzeichnungen weiters als `.igs` (Initial Graphics Exchange Format) Dateiformat speichern, um nachher die Zeichnungen in `Catia` laden zu können.

## 2.3 Erstellung des 3D-Modells

Für die 3D-Erstellung des Modells hat man das CAD-Programm Catia V5R10 wegen seiner umfangreichen Funktionsfähigkeiten ausgewählt.

Die Konstruktion des Modells wird in folgender Weise durchgeführt:

Zuerst werden alle Muskeln, Sehnen und Knochen mit entsprechenden Konturen, die in .igs Dateien gespeichert sind, einzeln im **Wireframe and Surface Design-Mode** und **Part Design-Mode** erstellt und danach im **Assembly Design-Mode** zusammengebaut.

Bevor man dazu kommt, soll man damit rechnen, dass alle Konturen vom jeden .igs Datei, weil diese im 2D-Programm erstellt sind, die gleiche z-Koordinate ( $z = 0$ ) haben. Das ist für das 3D-Konstruieren in Catia sehr ungünstig, weil man dann jede Kontur einzeln auf die richtige z-Koordinate verschieben muss. Um das zu vermeiden hat man die z-Koordinate aller .igs Dateien mit Hilfe des am Institut für Maschinenelemente zur Verfügung stehenden Programms, geändert. So wird die z-Koordinate von allen .igs Dateien rückwärts mit Schrittweite von 5 mm gesetzt, d.h. der letzte Scan der dritten Serie hat die z-Koordinate 0 und der erste Scan der ersten Serie die z-Koordinate 695. Das Programm ist von Herrn Professor Manfred Grafinger in Visual C Programmiersprache geschrieben worden.

### 2.3.1 Wireframe and Surface Design-Mode

Am Anfang ist es notwendig die .igs Dateien in Catia unter **Wireframe and Surface Design-Mode** zu öffnen und nur die Konturen, die zur Erstellung eines bestimmten Skelettmuskelteils benötigt werden, in neugeöffnete **Part-Fenster** zu kopieren. Das Ergebnis ist in Abbildung 2.10 dargestellt.

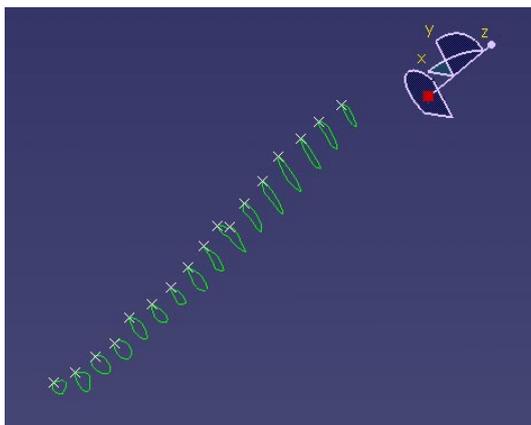


Abbildung 2.10: Konturen der *flexor digitorum longus tendo*

Im nächsten Schritt sollte man von diesen Konturen eine Umhüllung mittels Loft Befehl konstruieren, siehe Abbildung 2.11. Dabei muss man die

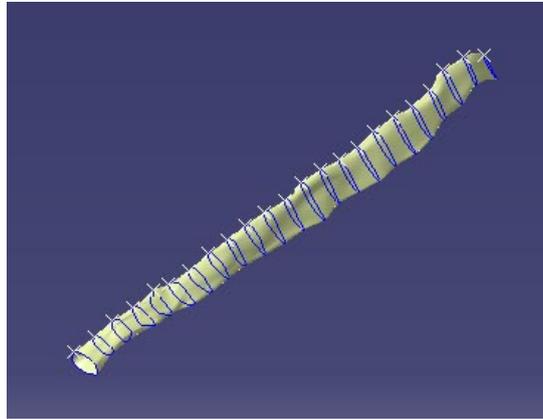


Abbildung 2.11: Beispiel einer Umhüllung, *fibularis tendo*

Richtungspfeile aller Konturen in gleiche Richtung stellen. Wenn es zu einer Verdrehung der Umhüllung zwischen zwei Konturen kommt, sollte man die Endpunkte dieser Konturen, axial betrachtet, in die selber Flucht setzen.

Bei einigen Teilen vom Skelettmuskel, z.B. bei Teilen, die sich ab einer bestimmten Ebene abzweigen (siehe Abbildungen: 3.2 (links) und 3.7 (erste Reihe)) oder bei einem Knochen mit einem Loch, das auch eine Form der Abzweigung darstellt, (siehe Abbildung 3.1), ist es nicht möglich die Umhüllung in üblicher Weise zu erstellen. Hier sollte man schon beim Zeichnen von 2D-Konturen in der Aufnahme, die die Abzweigungsebene enthält, zwei neue Konturen zeichnen. Diese beiden Konturen werden im Inneren von der Grenzkontur des entsprechenden Teiles, möglichst genau anliegend gezeichnet. Der Innenbereich wird auf zwei Teile zerlegt, wobei sich besagte Konturen im Inneren überlappen sollten. Dies wird so gemacht um den eckigen Abzweigungsübergang zu vermeiden. Mittels dieser neuen Konturen werden ab der Abzweigungsebene zwei neue Umhüllungen getrennt erstellt.

Wie man von einer oder mehreren Umhüllungen ein Volumen bzw. einen Teil erstellt, wird im nächsten Abschnitt erklärt.

### 2.3.2 Part Design-Mode

Um die Umhüllung von jedem einzelnen Teil des Skelettmuskels zu füllen, muss man zur **Part Design-Mode** übergehen. Dies wird mit dem Befehl **Fläche schliessen** ausgeführt.

Wenn ein Teil (Muskel, Sehne oder Knochen) durch zwei oder sogar drei

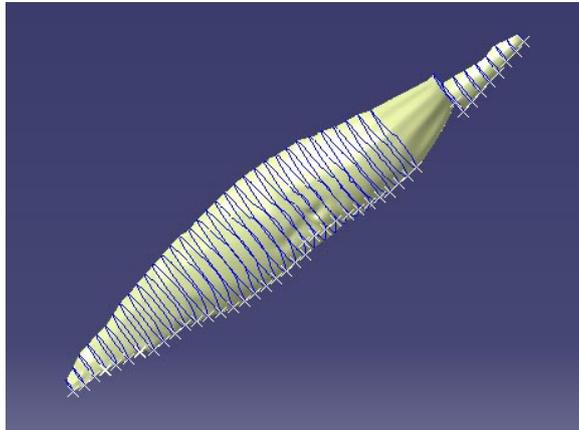


Abbildung 2.12: Beispiel eines durch zwei Serien gewonnenen Teils, Muskel *biceps femoris, caput longum*

Serien verläuft (siehe Abbildung 2.12) wird es nötig, die Umhüllung jeder Serie als neuen Körper einzeln zu füllen. Danach werden diese Umhüllungen mit dem Befehl **Verschiebung** angepasst, wie z.B. in dieser Arbeit wo die dritte Serie fixiert ist, die zweite für  $(x + 14, y + 10)$  mm und die erste für  $(x + 11, y + 6)$  mm verschoben werden. Schliesslich werden alle entsprechenden Körper mit dem Befehl **Hinzufügen** zusammengebracht.

Die gleiche Verschiebung gilt auch für alle Teile die nicht in mehrere Serien verteilt sind, sondern in einer Serie enthalten sind.

Ausserdem muss man bei solchen Teilen, die eine Abzweigung oder ein Loch enthalten, jede Umhüllung als einzelnen Körper füllen. Danach wird es nötig, um die Fehlermeldung bei der Zusammenbringung von entsprechenden Körpern zu vermeiden, einige Körper, die eine Abzweigung darstellen, um 0,05 mm in z-Richtung zu verschieben.

### 2.3.3 Assembly Design-Mode

Bevor man mit dem Zusammenbau von Skelettmuskelteilen anfängt, sollten alle Teile richtig benannt werden und zur besseren Erkennung die Farben von Muskeln, Sehnen und Knochen unterschiedlich gewählt werden. In dieser Arbeit hat man für die Sehnen weisse, für die Knochen ocker und für die Muskeln rosa Farbe genommen.

Die Modellkomponenten werden dann innerhalb der **Assembly Design-Mode** mit dem Befehl **Vorhandene Komponente** aufgerufen und gleichzeitig zusammengebaut. Für Illustration siehe Kapitel 3.

# Kapitel 3

## Resultate

In diesem Kapitel werden alle Teilmodelle vom 3D-CAD Skelettmuskelmodell, einschliesslich Knochen-, Muskel- und Sehnenmodelle dargestellt und bezüglich ihrer Geometrie beschrieben. Im weitem werden die Skelettmuskelparameter vom Modell zusammen mit zur Verfügung stehenden Literaturdaten verglichen und diskutiert.

### 3.1 Skelettmodell

In Abbildung 3.1 ist das Hüftbein in zwei Ansichten dargestellt. Es befindet sich in der ersten Serie und wurde wegen der Abzweigung bzw. des Lochs im unteren Teil aus mehreren Umhüllungen konstruiert (siehe Abschnitt 2.3.1).

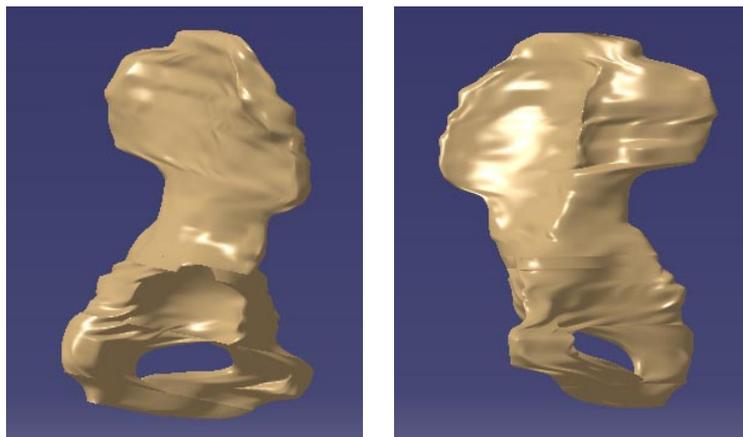


Abbildung 3.1: Modell vom Hüftbein, *Os coxae*

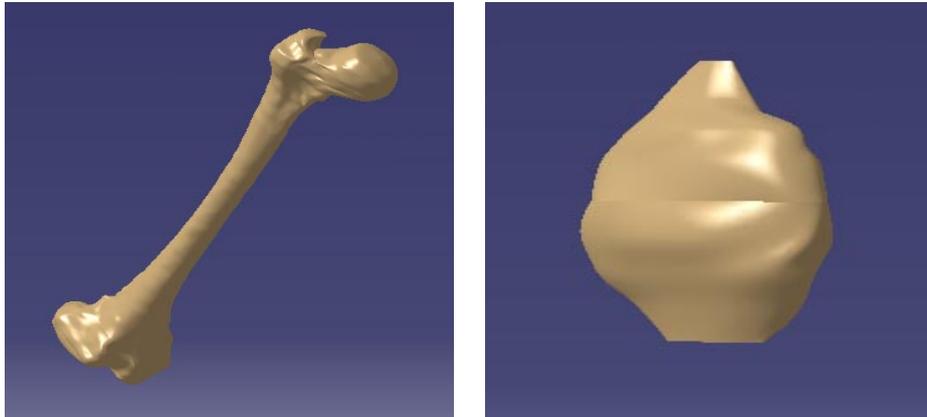


Abbildung 3.2: Modelle vom Oberschenkelknochen, *femur* (links) und der Kniescheibe *patella* (rechts)

In Abbildung 3.2 sind die Oberschenkelknochen *femur* (links) und die Kniescheibe *patella* (rechts) dargestellt. Der Oberschenkelknochen ist aus den Aufnahmen von der ersten und zweiten Serie gemacht. Wegen der Abzweigungen im oberen und unteren Teil wurde das Modell des Oberschenkels aus mehreren Umhüllungen erstellt. Andererseits gehört der rechte Knochen zur zweiten Serie, werden aber wegen der Verkleinerung der letzten ein Paar Aufnahmen von der zweiten Serie aus zwei Umhüllungen gemacht. Im unteren Teil der beiden Knochen ist auch eine kleine Verzerrung sichtbar.

In Abbildung 3.3 sind Schienbein *tibia* (links) und Wadenbein, *fibula* (rechts)



Abbildung 3.3: Modelle vom Schienbein, *tibia* (links) und Wadenbein, *fibula* (rechts)

dargestellt. Beide Knochen wurden aus den Aufnahmen von der zweiten und

dritten Serie gemacht. Im Unterschied zur Abbildung 3.2 ist hier die Verzerrung im oberen Teil zu erkennen.

Schliesslich ist das ganze Skelettmodell des linken Beines in Abbildung 3.4 in drei Ansichten dargestellt.



Abbildung 3.4: Skelettmodell in drei Ansichten: von vorne (links), von lateral (mitte) und zwischen der rückwertigen und medialen Ansicht (rechts)

## 3.2 Muskelmodell

Das Modell vom Muskel *adductor longus* (Abbildung 3.5) wurde aus den Aufnahmen der ersten und zweiten Serie erstellt. Dieser Muskel wurde zusammen mit der zugehörigen Sehne gezeichnet, weil in den MR Aufnahmen nicht unterschieden werden konnte, wo die Grenze zwischen dem Muskel und der Sehne liegt. Es wird auch angenommen, dass der Muskel *adductor brevis*, dessen Modell nicht in dieser Arbeit konstruiert wurde, zusammen mit *adductor longus* erstellt wurde, weil die Grenze zwischen den beiden überhaupt nicht zu sehen war.

Das Modell vom Muskel *adductor magnus* (Abbildung 3.5) wurde auch aus den Aufnahmen der ersten und zweiten Serie erstellt, wobei seine Sehne getrennt konstruiert wurde (Abbildung 3.10). Der Muskel *adductor minimus* wurde zusammen mit *adductor magnus* erstellt.

Das Modell vom Muskel *biceps femoris caput breve* (Abbildung 3.5) wurde aus den Aufnahmen der ersten Serie erstellt, wobei seine Sehne getrennt konstruiert wurde (Abbildung 3.10).

Das Modell vom Muskel *biceps femoris caput longum* (Abbildung 3.5) wurde aus den Aufnahmen der ersten und zweiten Serie zusammen mit zu ihm gehöriger Sehne erstellt.

Das Modell von *extensor longus* (Abbildung 3.5), das durch die zweite und dritte Serie verläuft, besteht aus *extensor hallucis longus* und *extensor digitorum longus*, weil die Grenze zwischen den beiden nicht sichtbar war. Seine Sehne ist in Abbildung 3.10 zu sehen.

Im Fall vom Modell *fibularis* (Abbildung 3.5), das aus den Aufnahmen der zweiten und dritten Serie erstellt wurde, hat man die gleiche Situation, d.h. dieses Modell enthält *fibularis brevis* und *fibularis longus* und seine Sehne ist in Abbildung 3.10 dargestellt.

Die zwei Modelle der Muskeln *flexor digitorum longus* und *flexor hallucis longus* (Abbildung 3.5) gehören nur zur dritten Serie, wobei die Sehne vom *flexor digitorum longus* in Abbildung 3.10 zu finden ist und mit *flexor hallucis longus* zusammen konstruiert wurde.

Bei den Modellen von *gastrocnemius caput laterale* und *gastrocnemius caput mediale* (Abbildung 3.6) ist die Verzerrung im oberen Teil schon offensichtlich, weil sie zum Ende der zweiten und zur dritten Serie gehören. Ihre Sehne befindet sich in Abbildung 3.10.

Die Modelle der Muskeln *gluteus maximus*, *gluteus medius*, *gluteus minimus* und *Iliacus* (Abbildung 3.6) haben die Gemeinsamkeit, dass sie zur ersten

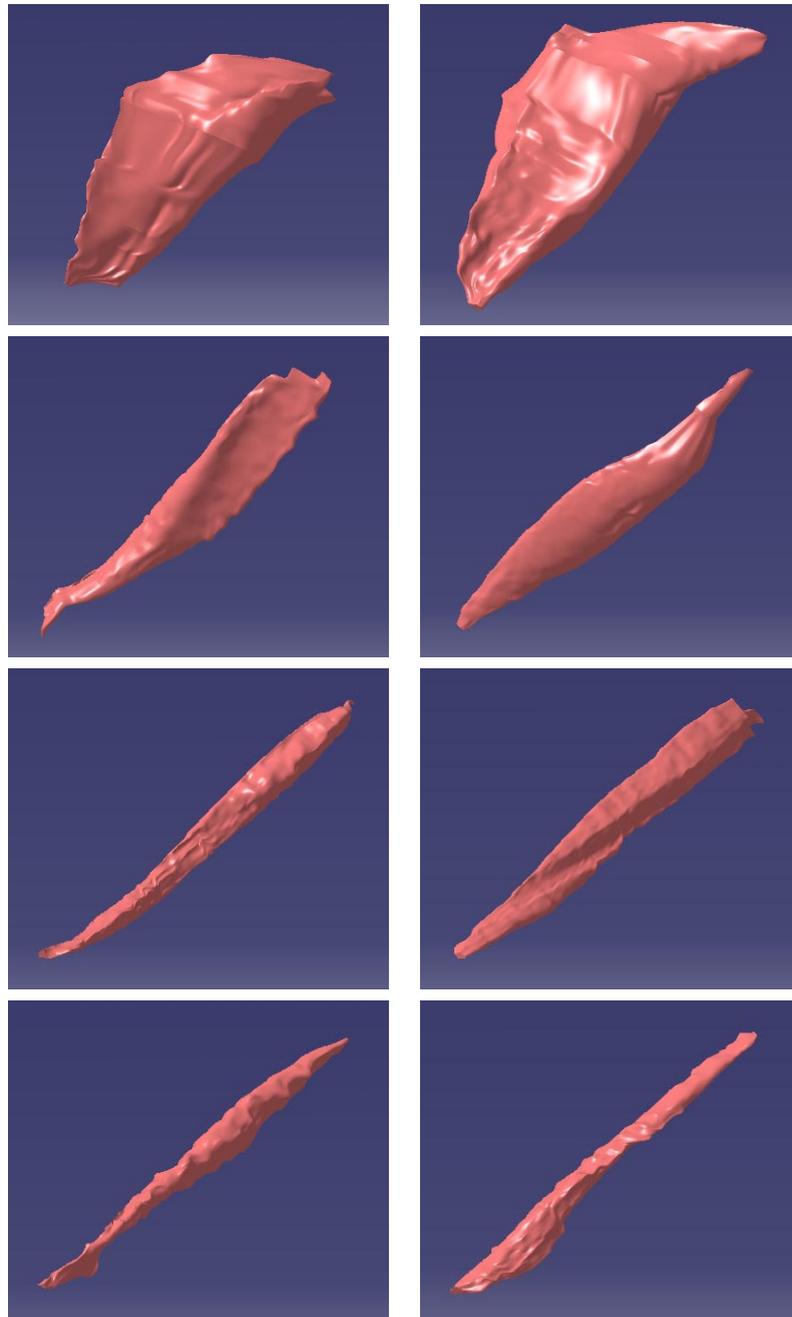


Abbildung 3.5: Modelle der Muskeln, jeweils von links nach rechts: erste Reihe: *adductor longus*, *adductor magnus*; zweite Reihe: *biceps femoris caput breve*, *biceps femoris caput longum*; dritte Reihe: *extensor longus*, *fibularis*; vierte Reihe: *flexor digitorum longus*, *flexor hallucis longus*

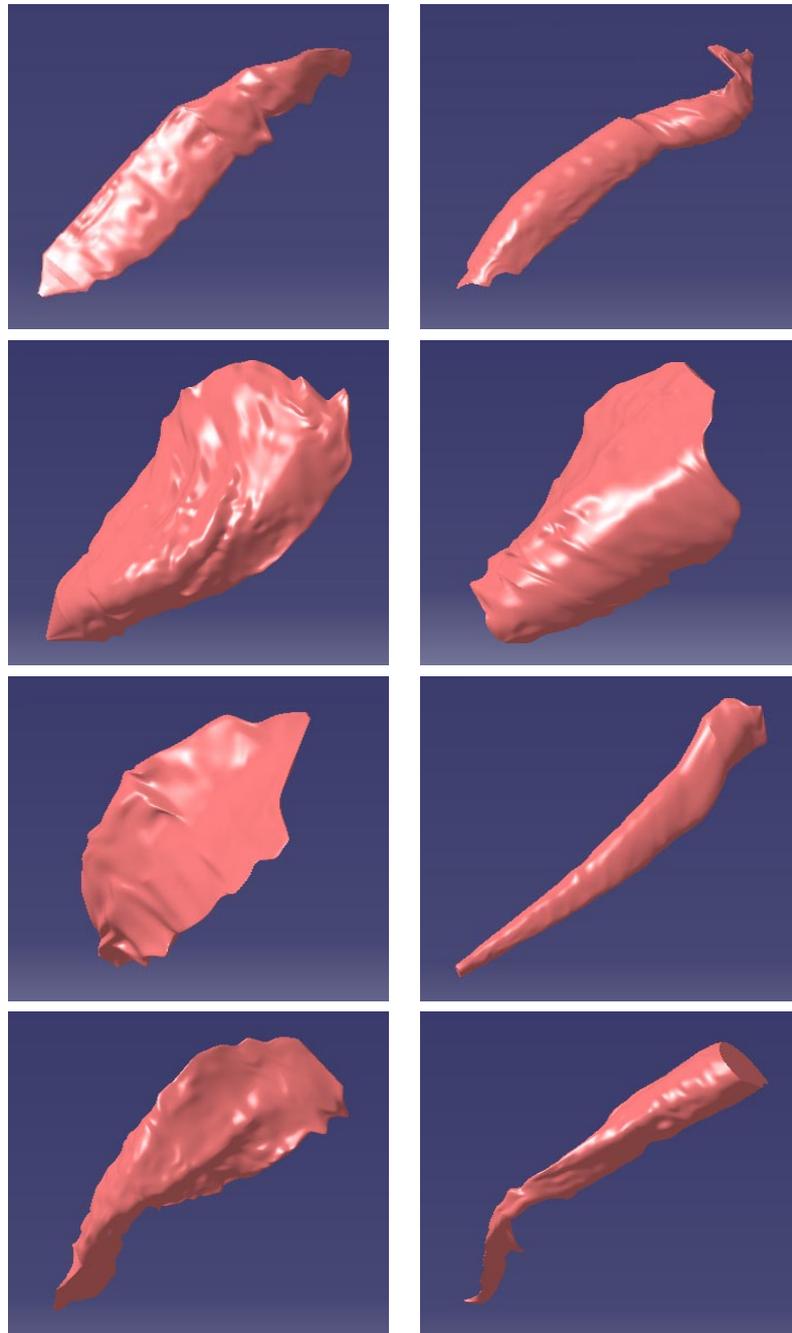


Abbildung 3.6: Modelle der Muskeln , jeweils von links nach rechts: erste Reihe: *gastrocnemius caput laterale*, *gastrocnemius caput mediale*; zweite Reihe: *gluteus maximus*, *gluteus medius*; dritte Reihe: *gluteus minimus*, *gracilis*; vierte Reihe: *iliacus*, *psaos major*

Serie gehören und dass ihre Sehnen nicht erkennbar waren bzw. zusammen mit dem entsprechenden Muskeln konstruiert wurden.

Das Modell des *gracilis* (Abbildung 3.6) befindet sich in der zweiten und dritten Serie und seine Sehne ist in Abbildung 3.11 zu sehen.

Das Modell vom Muskel *psaos major* (Abbildung 3.6), das eigentlich nur den unteren Teil des Muskels darstellt, weil sich der obere Teil weit über das Hüftbein bis zum Lendenwirbel streckt und deshalb mit dem Scanner nicht aufgenommen war, wurde aus den Aufnahmen der ersten Serie zusammen mit zu ihm gehöriger Sehne erstellt.

Die Gemeinsamkeit der Modelle der Muskeln *oburatorius externus* und *oburatorius internus* (Abbildung 3.7) ist, dass sie zur ersten Serie gehören und dass ihre Sehnen nicht erkennbar waren. Deshalb wurden die Sehnen zusammen mit entsprechenden Muskeln konstruiert. Gemeinsam ist diesen Modellen auch, dass sie wegen der Abzweigung aus mehreren Umhüllungen erstellt wurden. Da die Grenzen zwischen den zueinander parallel verlaufenden Muskeln *oburatorius internus*, *gemellus superior* und *gemellus inferior* nicht erkennbar waren, sind alle drei Muskeln im Modell *oburatorius internus* enthalten.

Die zwei Modelle der Muskeln *pectineus* und *piriformis* (Abbildung 3.7) gehören auch zur dritten Serie und ihre Sehnen wurden zusammen mit den entsprechenden Muskeln erstellt.

Bei den Modellen von *popliteus* und *soleus* (Abbildung 3.7) ist eine Verzerrung im oberen Teil sichtbar, weil diese zum Ende der zweiten und zur dritten Serie gehören. Es wird angenommen, dass der Muskel *plantaris*, dessen Modell in dieser Arbeit nicht konstruiert wurde, zusammen mit dem Muskel *soleus* erstellt wurde, weil die Grenze zwischen den beiden überhaupt nicht zu sehen war. Die Sehne vom Muskel *soleus* und *tendo calcaneus* sind zusammen mit der *gastrocnemius* Sehne gezeichnet und als *gastrocnemius tendo* benannt (Abbildung 3.10).

Das Modell vom Muskel *quadratus femoris* (Abbildung 3.5) wurde aus den Aufnahmen der ersten Serie erstellt.

Bei solchen Muskeln, die sich waagrecht strecken, wie z.B.: *quadratus femoris*, *piriformis*, *oburatorius externus*, *oburatorius internus* und *popliteus*, gab es Schwierigkeiten bei der Konturerkennung und -zeichnung. Deswegen sehen diese Muskeln weniger wirklichkeitsgetreu als die anderen, die meistens senkrecht verlaufen, aus. Aus dem gleichen Grund wurden ihre Sehnen nicht erstellt.

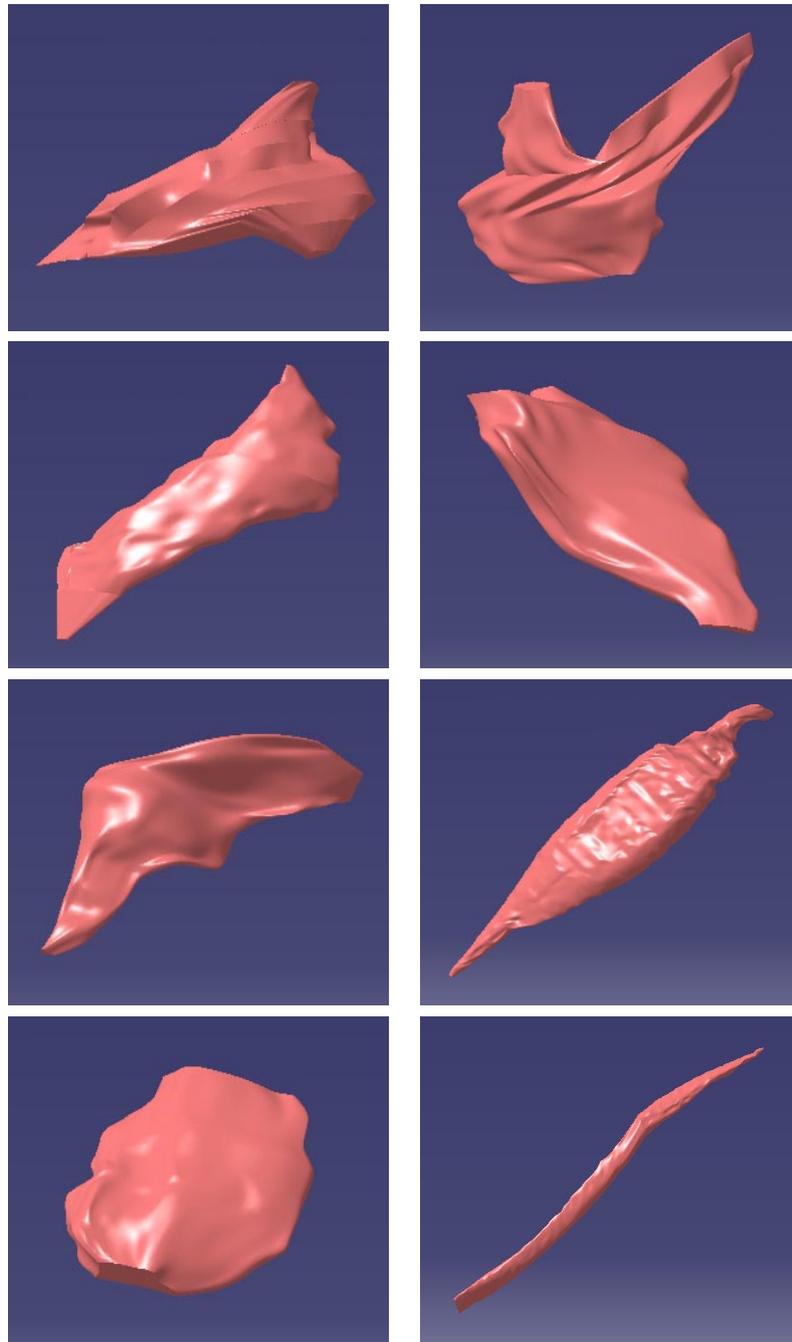


Abbildung 3.7: Modelle der Muskeln, jeweils von links nach rechts: erste Reihe: *oburatorius externus*, *oburatorius internus*; zweite Reihe: *pectineus*, *piriformis*; dritte Reihe: *popliteus*, *soleus*; vierte Reihe: *quadratus femoris*, *sartorius*



Abbildung 3.8: Modelle der Muskeln, jeweils von links nach rechts: erste Reihe: *semimembranosus*, *semitendinosus*; zweite Reihe: *tibialis anterior*, *tibialis posterior*; dritte Reihe: *tensor fasciae latae*, *vastus intermedius*; vierte Reihe: *vastus lateralis*, *vastus medialis*

Das Modell vom Muskel *sartorius* (Abbildung 3.7) wurde aus den Aufnahmen der ersten und zweiten Serie erstellt, wobei seine Sehne getrennt konstruiert wurde (Abbildung 3.11).

Im Fall der Muskelmodelle *semimembranosus* und *semitendinosus* (Abbildung 3.8), die aus den Aufnahmen der ersten und zweiten Serie erstellt wurden, gibt es die Gemeinsamkeit, dass es im oberen Teil bei beiden, wegen der fehlenden Aufnahmen zwischen der ersten und zweiten Serie, eine starke Formveränderung gibt. Ihre Sehnen sind in Abbildung 3.11 dargestellt.

Für die Modelle der beiden Muskeln *tibialis anterior* und *tibialis posterior* (Abbildung 3.8) ist es charakteristisch, dass sie zur zweiten und dritten Serie gehören und dass ihre Sehnen getrennt erstellt wurden (Abbildung 3.11).

Das Muskelmodell *tensor fasciae latae* (Abbildung 3.8) wurde aus den Aufnahmen der ersten Serie konstruiert.

Die Modelle der drei Muskeln *vastus intermedius*, *vastus lateralis* und *vastus medialis* (Abbildung 3.8) wurden aus der ersten und zweiten Serie erstellt. Die Sehnen von diesen drei Muskeln wurden zusammen mit den entsprechenden Muskeln gezeichnet (3.11).

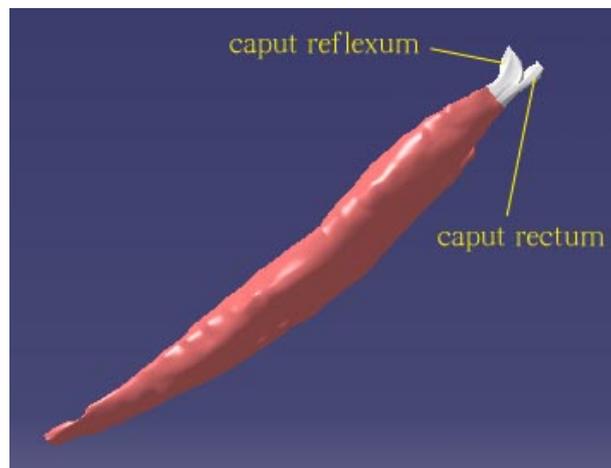


Abbildung 3.9: Modell des Muskels *rectus femoris* zusammen mit *caput rectum tendo* und *caput reflexum tendo*

In Abbildung 3.9 ist das Modell vom *rectus femoris* zusammen mit *rectus femoris caput rectum tendo* und *rectus femoris caput reflexum tendo* dargestellt. Dieser Muskel gehört zur ersten und zweiten Serie, wobei die Sehne *rectus femoris tendo* getrennt in Abbildung 3.11 konstruiert wurde.

### 3.3 Sehnenmodell

Die Sehnenmodelle, die im vorherigen Abschnitt bei den Muskelmodellbeschreibungen schon erwähnt worden waren, werden im folgenden einzeln erklärt. Dabei soll angemerkt werden, dass nur einige Sehnen, die bei der Konturerkennung sichtbar waren, modelliert sind, wobei die anderen im zugehörigen Muskel enthalten sind.

Das Modell von der Sehne *adductor magnus tendo* (Abbildung 3.10) wurde



Abbildung 3.10: Modelle der Sehnen, jeweils von links nach rechts: erste Reihe: *adductor magnus tendo*, *biceps femoris caput breve tendo*; zweite Reihe: *extensor longus tendo*, *fibularis tendo*; dritte Reihe: *flexor digitorum longus tendo*, *gastrocnemius tendo*



Abbildung 3.11: Modelle der Sehnen, jeweils von links nach rechts: erste Reihe: *gracilis tendo*, *sartorius tendo*; zweite Reihe: *rectus femoris tendo*, *ligamentum patellae*; dritte Reihe: *semimembranosus tendo*, *semitendinosus tendo*; vierte Reihe: *tibialis anterior tendo*, *tibialis posterior tendo*

mit Hilfe der Aufnahmen der zweiten Serie erstellt. Dieses Modell stellt, wie im Fall des Muskels *psoas major*, nur einen mit dem Scanner aufgenommenen Teil der exakten Sehne dar. In Abbildung 3.12 ist diese Sehne zusammen mit dem entsprechenden Muskel gezeigt.

Das Modell der Sehne *biceps femoris caput breve tendo* (Abbildung 3.10)



Abbildung 3.12: Sehnemuskelmodelle, jeweils von links nach rechts: erste Reihe: *adductor magnus + tendo*, *biceps femoris caput breve + tendo*; zweite Reihe: *extensor longus + tendo*, *fibularis + tendo*; dritte Reihe: *flexor digitorum longus + tendo*, *gastrocnemius caput laterale + gastrocnemius caput mediale + soleus + tendo*

ist in den Aufnahmen der zweiten Serie enthalten. In Abbildung 3.12 sieht man, dass sich diese Sehne und der Muskel *biceps femoris caput breve* grösstenteils überlappen. Die gleiche Situation hat man im Fall von den



Abbildung 3.13: Sehnemuskelmodelle, jeweils von links nach rechts: erste Reihe: *gracilis + tendo*, *sartorius + tendo*; zweite Reihe: *rectus femoris + tendo + caput rectum tendo + caput reflexum tendo*, *ligamentum patellae + patella + tibia* ; dritte Reihe: *semimembranosus + tendo*, *semitendinosus + tendo*; vierte Reihe: *tibialis anterior + tendo*, *tibialis anterior + tendo*

Sehnen *extensor longus tendo*, *fibularis tendo* und *flexor digitorum longus tendo*, die alle in der dritten Serie enthalten sind und in Abbildung 3.10 getrennt und in 3.12 zusammen mit dem zugehörigen Muskel dargestellt sind.

Das Modell von der Sehne *gastrocnemius tendo*, das in Abbildung 3.10 zu sehen ist, steht für eine Kombination folgender Sehnen: *gastrocnemius tendo* und *soleus tendo*, bzw. *tendo calcaneus*, wobei dieses Modell nicht der ganzen *tendo calcaneus* entspricht, weil diese Sehne sich ausserhalb von aufgenommenem Bereich (dritte Serie) befindet. Das besagte Sehnenmodell ist in Abbildung 3.12 zusammen mit den Muskeln *gastrocnemius caput laterale*, *gastrocnemius caput mediale* und *soleus* dargestellt.

In Abbildung 3.11 sind *gracilis tendo*, *sartorius tendo*, *rectus femoris tendo*, *semimembranosus tendo* und *semitendinosus tendo*, die alle aus Aufnahmen der zweiten Serie konstruiert wurden, gezeigt. Ihre Sehnenmuskellmodelle sind in Abbildung 3.13 gezeigt, wobei sich nur die Sehne *semitendinosus tendo* mit ihrem Muskel überlappt.

Im Fall von *tibialis anterior tendo* und *tibialis posterior tendo* (Abbildung 3.11), die sich beide in der dritten Serie befinden und mit entsprechenden Muskeln überlappen (Abbildung 3.13), zeigt das Modell aus dem gleichen Grund wie beim *gastrocnemius tendo* die Sehnen nicht vollständig.

Neben den zahlreichen Sehnenmodellen die wir in diesem Abschnitt beschrieben haben, hat man auch ein Modell der *ligamentum patellae* (Abbildung 3.11) zusammen mit der Kniescheibe *patella* und dem Schienbein *tibia* in Abbildung 3.13 dargestellt. Dieses Modell wurde aus den Aufnahmen der zweiten Serie erstellt.

### 3.4 Skelettmuskelmodell

In diesem Abschnitt sind die Zusammenbauzeichnungen von allen Modellen (Knochen, Sehne, Muskeln) dargestellt.

Zuerst wird das Skelettmodell zusammen mit den inneren Muskeln in vier Ansichten in Abbildungen 3.14 und 3.15 gezeigt.

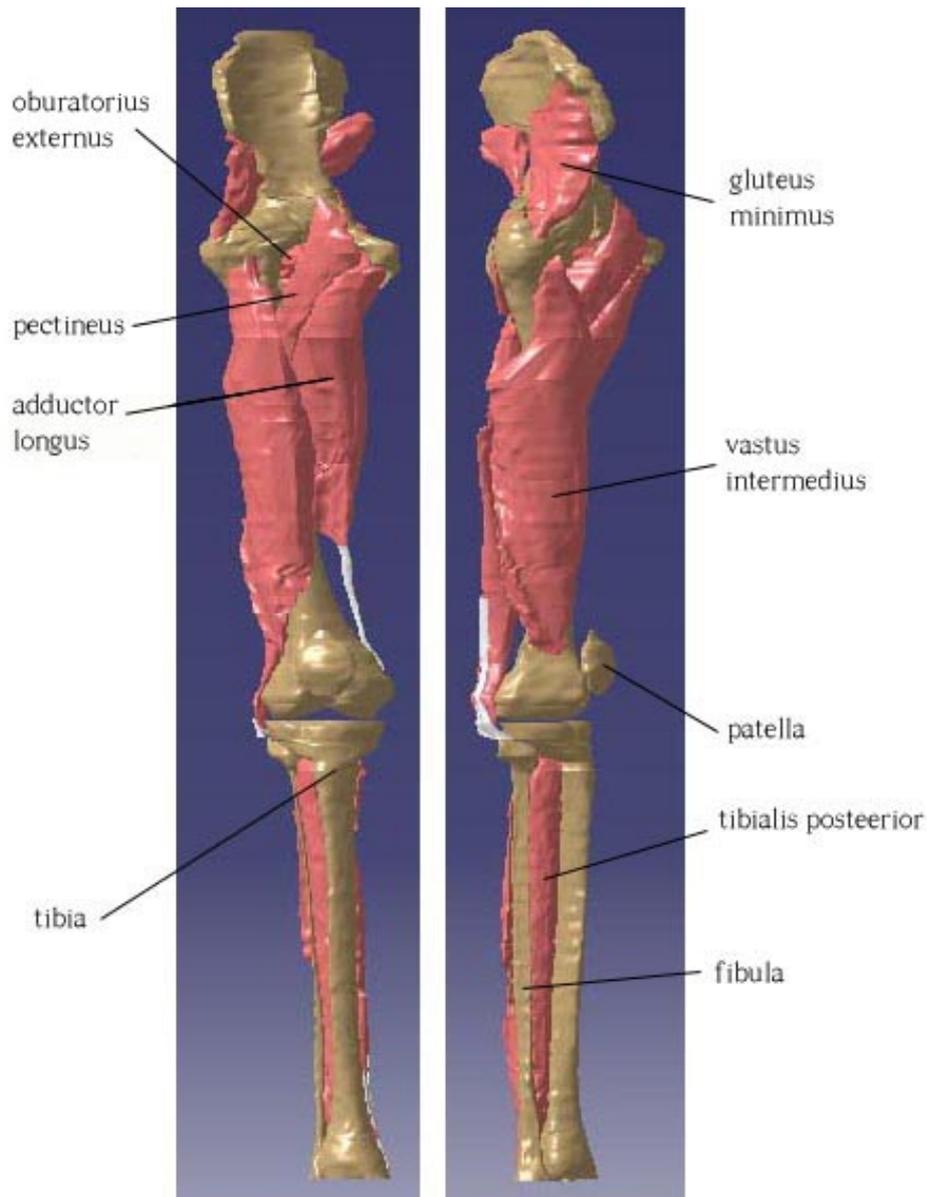


Abbildung 3.14: Skelettmuskelmodell mit inneren Muskel- und Sehnenmodellen in zwei Ansichten: von vorne (links) und von lateral (rechts)

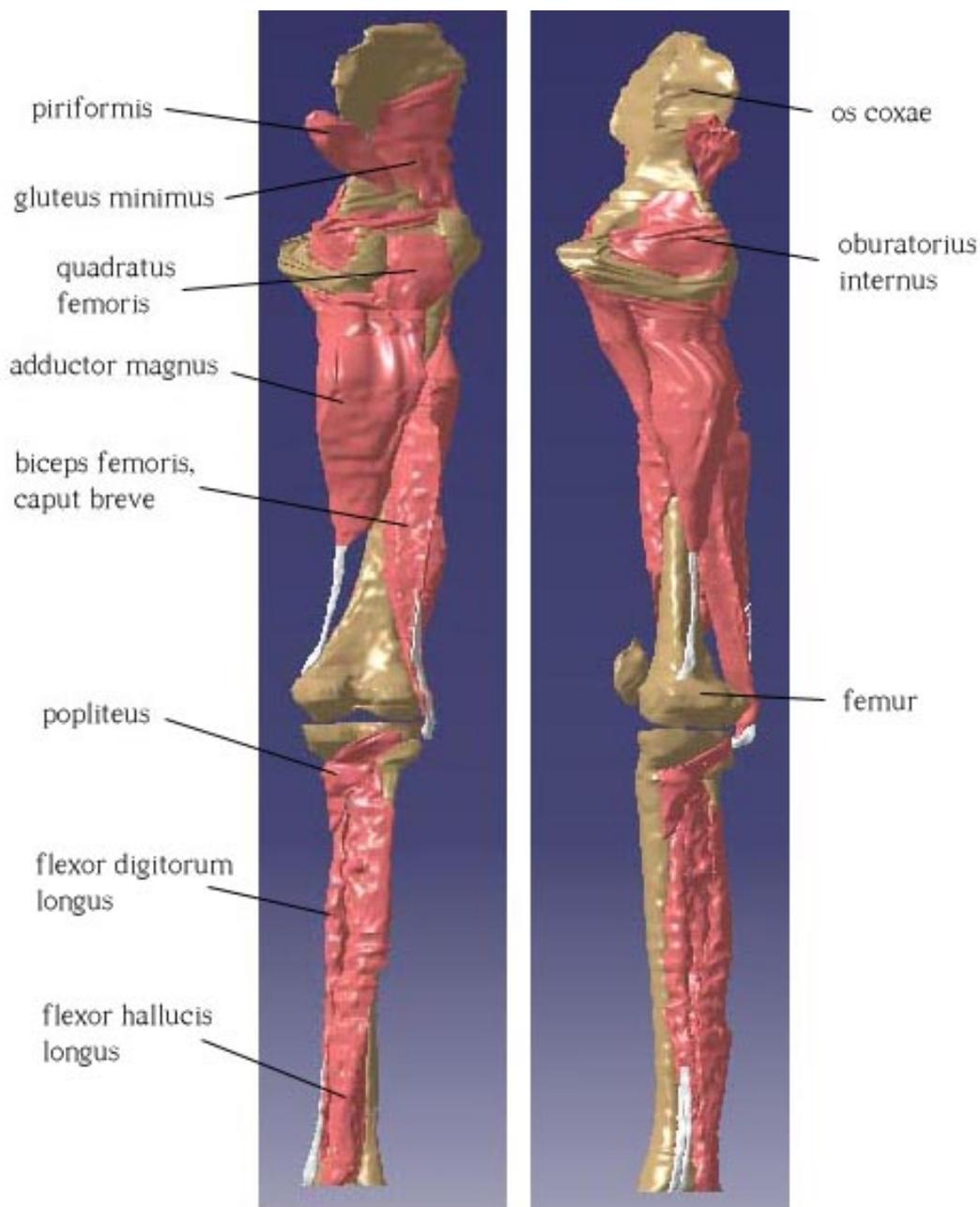


Abbildung 3.15: Skelettmuskelmodell mit inneren Muskel- und Sehnenmodellen in zwei Ansichten: von hinten (links) und von medial (rechts)

In Abbildungen 3.16 und 3.17 ist das komplette Skelettmuskelmodell in vier Ansichten dargestellt.

Alle Muskelmodelle, die in dieser Arbeit konstruiert wurden, sind in Abbildungen 3.14, 3.15, 3.16 und 3.17 bezeichnet.

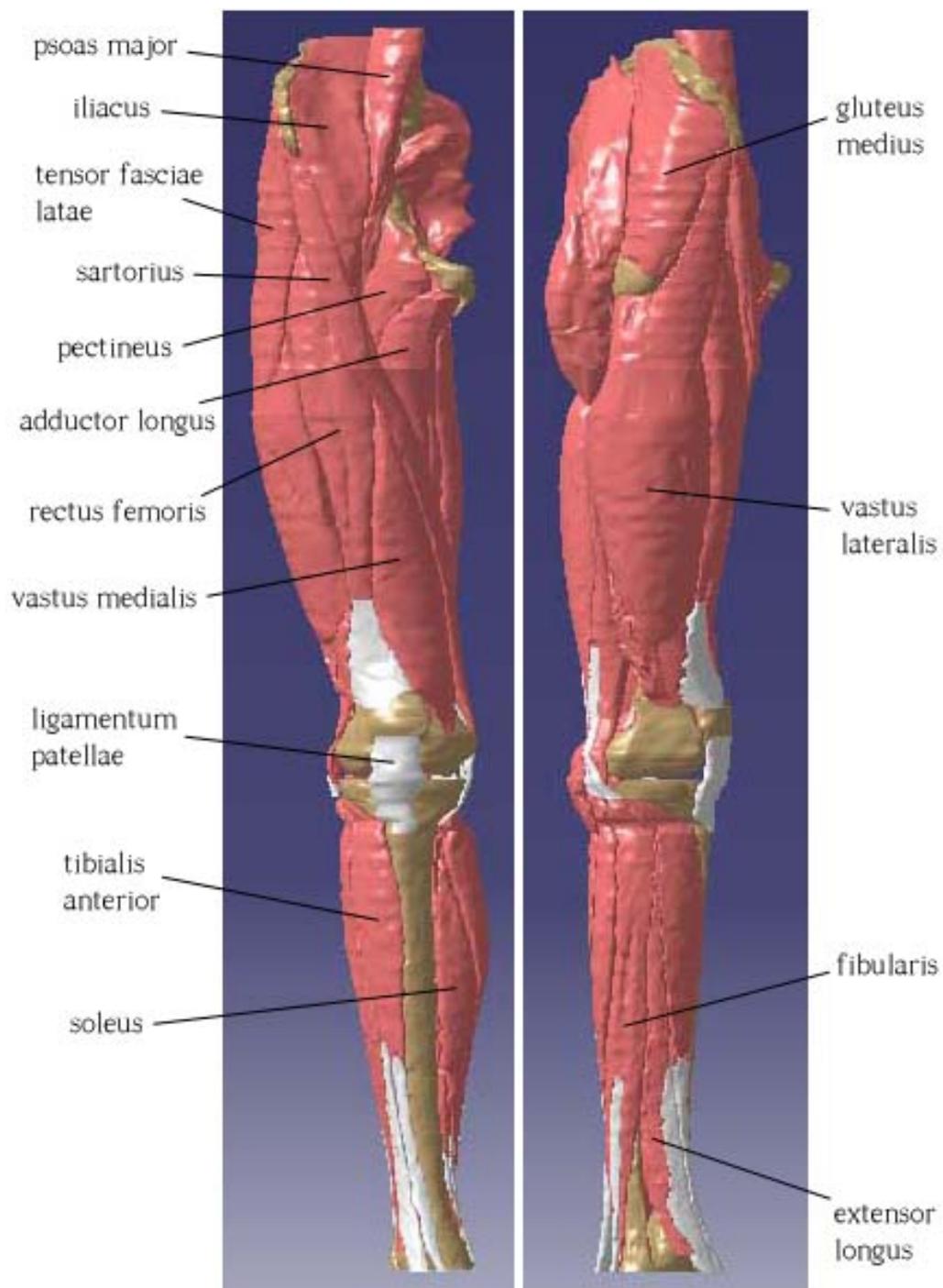


Abbildung 3.16: Skelettmuskelmodell mit allen Muskel- und Sehnenmodellen, in zwei Ansichten: von vorne (links) und von lateral (rechts)

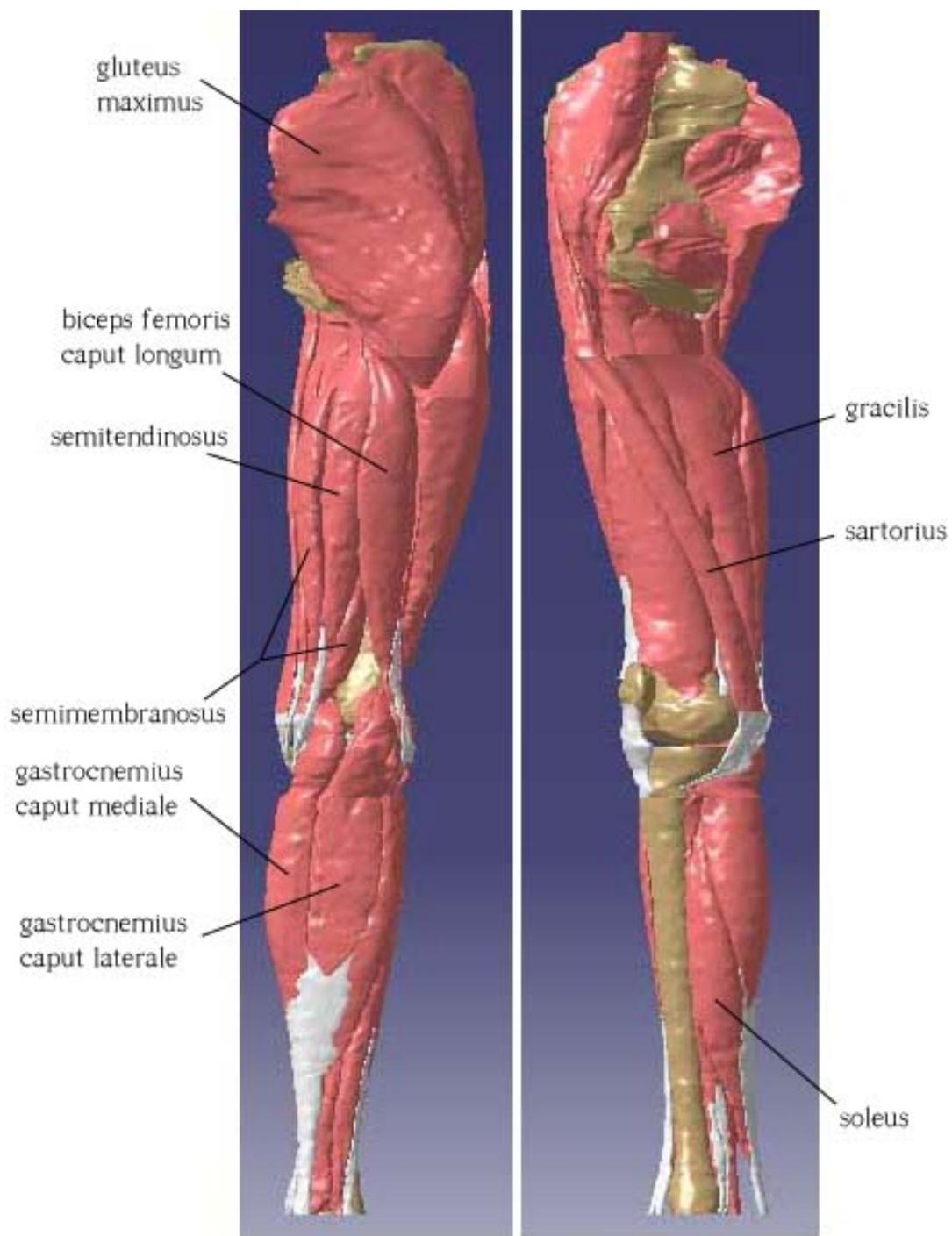


Abbildung 3.17: Skelettmuskelmodell mit allen Muskel- und Sehnenmodellen, in vier Ansichten: von hinten (links) und von medial (rechts)

Einige Skelettmuskelteile sind in dieser Arbeit nicht erstellt worden, weil man diese in den Aufnahmen nicht erkennen konnte. Beispiele dafür sind der Muskel *ischiococcygeus*, dann *tractus iliotibialis*, *ligamentum collaterale tibiale* und *ligamentum sacrotuberale*.

### 3.5 Muskel- und Sehnenparameter

In diesem Abschnitt werden die Muskel- und Sehnenparameter, wie Muskel- und Sehnenlänge, Hebelarme im Knie- und Hüftgelenk und Muskelvolumina, die direkt vom 3D-Skelettmuskelmodell ermittelt wurden, dargestellt.

Die Muskel- bzw. Sehnenlänge ist durch die Länge ihrer Mittellinie bezeichnet. Um die Mittellinie in CAD-Programm *Catia* zu ermitteln, wurde der Mittelpunkt jeder Kontur des entsprechenden Muskels (Sehne) gezeichnet. Danach wurde aus allen diesen Mittelpunkten eine Kurve gebildet, die die Mittellinie darstellt.

In Tabelle 3.1 findet man die Gesamtlänge der Mittellinien ( $L$ ) von fünf Muskeln bzw. Muskelgruppen zusammen mit zugehörigen Sehnen. Die entsprechenden Mittellinien sind in Abbildung 3.18 bezeichnet.

Dabei sind die Muskeln mit gleicher Funktion und ähnlichen Muskelparametern in Muskelgruppen zusammengefasst, weil diese für einen Vergleich mit den Daten aus der Literatur geeignet sind.

<b>Muskel + Sehne</b>	$L$ [mm]	$V$ [cm <sup>3</sup> ]	$R_{Knie}$ [mm]	$R_{Hüfte}$ [mm]
<i>gluteus maximus</i>	218,1	310,62		43,1
<i>hamstrings</i>	356,8	231,70	30,0	55,5
<i>ligamentum patellae</i>	62,3	5,66	34,8	
<i>rectus femoris</i>	306,8	85,39	42,9	32,8
<i>vastii</i>	263,6	519,06	33,8	

Tabelle 3.1: Exakte Gesamtlänge der Mittellinie der Sehnemuskelmodelle, Muskelvolumen, Hebelarme im Knie- und Hüftgelenk

In der Muskelgruppe namens *vastii* finden sich die eingelenkigen Äste vom Quadriceps femoris, *vastus intermedius*, *vastus lateralis* und *vastus medialis*. Zu den Hamstrings werden *biceps femoris caput longum*, *semimembranosus* und *semitendinosus* verschmolzen.

In Tabelle 3.1 sind noch das Muskelvolumen ( $V$ ), das direkt im *Catia* gemessen wurde und die Hebelarme im Knie- und Hüftgelenk ( $R_{Knie}$ ,  $R_{Hüfte}$ ) (Abbildung 3.19), gemessen von dem Gelenkmittelpunkt bis zur Muskelmittellinie, angeführt. Für den Gelenkmittelpunkt des Hüftgelenkes, wurde der Schwerpunkt der Gelenkkugel des Oberschenkelknochens genommen.

Die Mittellinie kann auch einfacher (näherungsweise) ermittelt werden, indem man den Mittelwert der kleinsten Entfernung zwischen zwei Punkten in erster

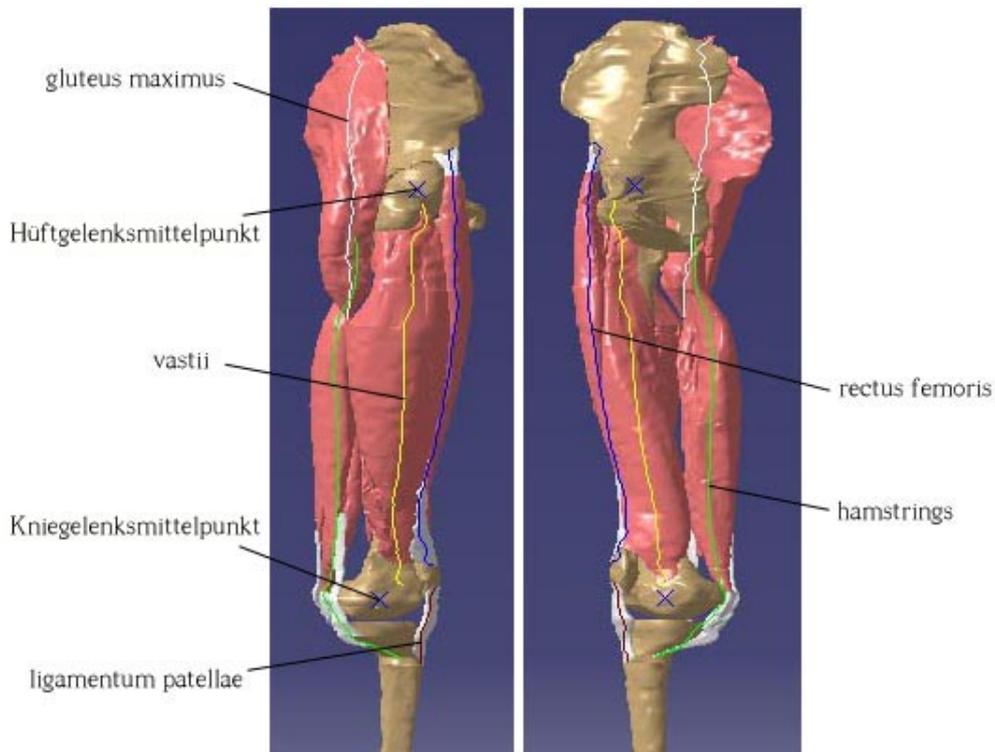


Abbildung 3.18: Muskelmittellinien mit Gelenksmittelpunkten in zwei Ansichten: von lateral (links) und von medial (rechts)

bzw. letzter Aufnahmeebene und der Verbindungslinie der Endpunkte der Splines, berechnet. In Tabellen 3.3 und 3.2 sind die annähernden Längen der Sehnen- und der Muskelmodelle angeführt.

Ein Vergleich zwischen angenäherten (Tabelle 3.2) und exakten (Tabelle 3.1) Muskel- und Sehnenlängen, zeigt, dass der gemittelte Fehler unter 6% liegt. In Tabelle 3.2 ist neben den Muskellängen, das exakte Muskelvolumen für entsprechende Muskelmodelle eingetragen.

Dadurch, dass im Rahmen dieser Arbeit der Bereich vom Knöchel bis über das Becken aufgenommen wurde, soll erwähnt werden, dass manche Muskeln und Sehnen über den Aufnahmebereich hinausgehen wodurch ihre Teile nicht in den Aufnahmen enthalten sind. Diese Muskel- und Sehneteile werden bei den Längenangaben nicht berücksichtigt. Solche Muskeln und Sehnen sind *psoas major*, *extensor longus tendo*, *fibularis tendo*, *tibialis anterior tendo* usw.

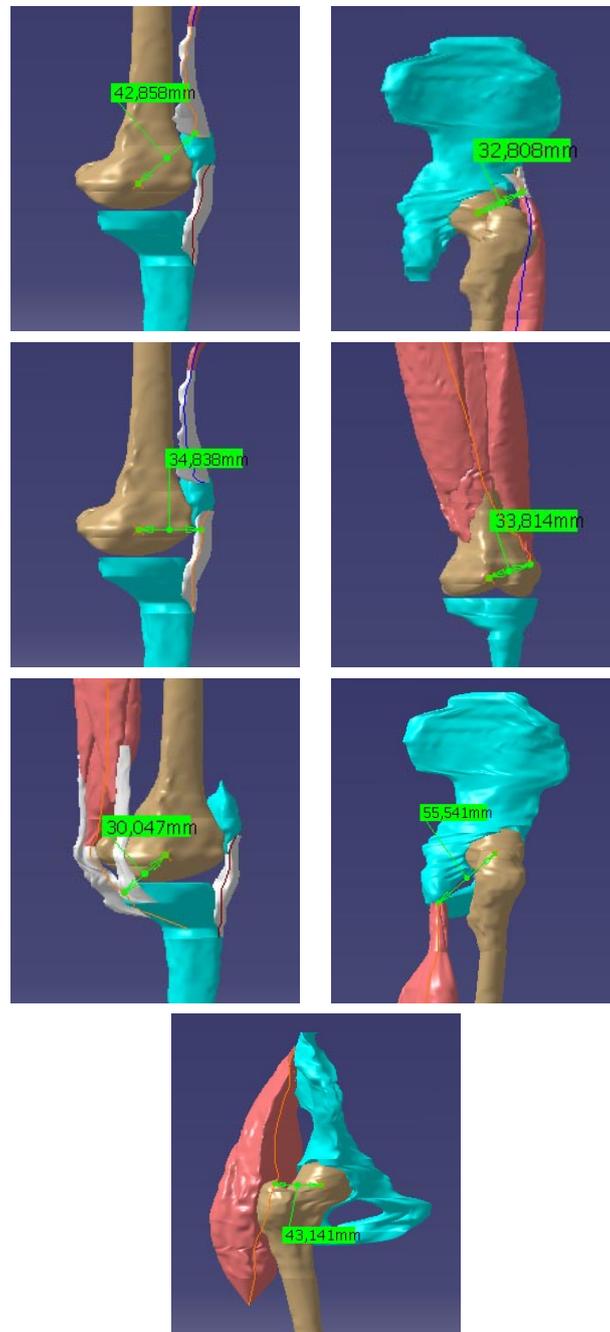


Abbildung 3.19: Hebelarme jeweils von links nach rechts: erste Reihe: von *rectus femoris* im Knie- und Hüftgelenk; zweite Reihe: von *ligamentum patellae* und von *vastii*; dritte Reihe: von *hamstrings* im Knie- und Hüftgelenk; vierte Reihe: von *gluteus maximus*

<b>Muskel</b>	<b>Länge</b> [mm]	<b>Volumen</b> [cm <sup>3</sup> ]
<i>adductor longus</i>	155	69,3
<i>adductor magnus</i>	196	164,4
<i>biceps femoris caput breve</i>	205	32,1
<i>biceps femoris caput longum</i>	227	74,1
<i>extensor longus</i>	263	36,8
<i>fibularis</i>	274	53,0
<i>flexor digitorum longus</i>	217	15,1
<i>flexor hallucis longus</i>	238	33,8
<i>gastrocnemius caput laterale</i>	194	33,1
<i>gastrocnemius caput mediale</i>	218	73,6
<i>gluteus maximus</i>	215	310,7
<i>gluteus medius</i>	150	119,2
<i>gluteus minimus</i>	114	33,4
<i>gracilis</i>	228	35,9
<i>iliacus</i>	191	90,6
<i>oburatorius externus</i>	100	25,6
<i>oburatorius internus</i>	134	20,9
<i>pectineus</i>	115	27,4
<i>piriformis</i>	71	18,0
<i>popliteus</i>	301	7,2
<i>psoas major</i>	196	43,3
<i>quadratus femoris</i>	48	10,5
<i>rectus femoris</i>	217	77,6
<i>sartorius</i>	367	52,9
<i>semimembranosus</i>	263	93,6
<i>semitendinosus</i>	218	57,2
<i>soleus</i>	301	174,1
<i>tensor fasciae latae</i>	147	22,9
<i>tibialis anterior</i>	218	39,6
<i>tibialis posterior</i>	254	51,9
<i>vastus intermedius</i>	250	179,8
<i>vastus lateralis</i>	247	199,7
<i>vastus medialis</i>	258	139,8

Tabelle 3.2: Muskellängen

<b>Sehne</b>	<b>Länge [mm]</b>
<i>adductor magnus tendo</i>	81
<i>biceps femoris caput breve tendo</i>	91
<i>extensor longus tendo</i>	135
<i>fibularis tendo</i>	113
<i>flexor digitorum longus tendo</i>	77
<i>gastrocnemius tendo</i>	159
<i>gracilis tendo</i>	61
<i>rectus femoris caput rectum tendo</i>	21
<i>rectus femoris caput reflexum tendo</i>	20
<i>rectus femoris tendo</i>	66
<i>sartorius tendo</i>	58
<i>semimembranosus tendo</i>	78
<i>semitendinosus tendo</i>	51
<i>tibialis anterior tendo</i>	126
<i>tibialis posterior tendo</i>	68
<i>ligamentum patellae</i>	59

Tabelle 3.3: Sehnenlängen

Ein Vergleich von Modellgrößen mit den Literaturdaten folgt im nächsten Abschnitt.

### 3.6 Vergleich mit Literaturdaten

Um den Vergleich von aus dem Modell gewonnenen Grössen mit schon in der Literatur vorhandenen zu ermöglichen, muss man die Literaturdaten mit einem konstanten Faktor skalieren bzw. verkleinern. Dies wird nötig, weil die Literaturdaten den Daten eines Menschen durchschnittlicher Grösse (1.8 m) entsprechen, in dieser Arbeit hingegen die Daten eines Kindes Grösse 1.4 m benutzt werden.

Daraus folgt, dass man die Literaturdaten mit einem Skalierungsfaktor von  $1.4/1.8 = 0,7778$  multiplizieren muss.

In der Literatur ist die Muskellänge als optimale Muskelfaserlänge bzw. die Sehnelänge als gesamte Sehnelänge (innere + äussere Sehne) bezeichnet (Abbildung 3.20).

In dieser Arbeit hat man bei einigen Sehnenmuskelmodellen nur die äussere

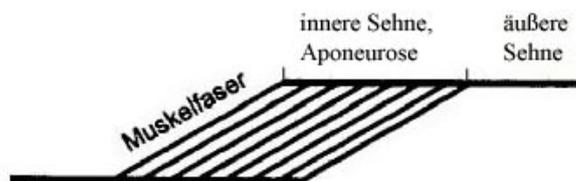


Abbildung 3.20: Schematische Darstellung eines Muskels

Sehne konstruiert, wobei die innere im entsprechenden Muskelmodell enthalten ist. Bei anderen Modellen, wo die Grenze zwischen der Sehne und dem Muskel schwer zu erkennen war, hat man nur das Muskelmodell erstellt, wobei angenommen wurde, dass die ganze Sehne zusammen mit entsprechendem Muskel konstruiert wurde. Deswegen muss man beim Vergleich von Literatur- mit Modelldaten die gesamte Modelllänge von Muskeln und Sehnen berücksichtigen.

Für die Literaturquellen hat man die folgende Studien gewählt: Anderson 1990, Pawlik 1992, van Soest 2000, Pandy 2003, Delp 1990 und Scott 1993.

In Tabelle 3.4 sind die Daten der Hebelarme im Kniegelenk aus dem

Muskel + Sehne	Modell	Anderson	Pawlik	van Soest	Pandy
<i>hamstrings</i>	30,0	24,1	26,2	20,2	
<i>ligamentum patellae</i>	34,8				39,5
<i>rectus femoris</i>	42,9	32,7	20,1	32,7	
<i>vastii</i>	33,8	32,7	20,1	32,7	

Tabelle 3.4: Vergleich von Hebelarmen [mm] im Kniegelenk

Modell und anderen Literaturquellen angeführt. In unserer Studie wird das Modell mit einem Gelenkwinkel vom  $180^\circ$  analysiert. Für die Daten aus der Literatur, hat man auch die skalierten Daten die einem Gelenkwinkel vom  $180^\circ$  entsprechen, betrachtet. Man merkt, dass im Fall von *hamstrings* das Modell einen grösseren Wert bietet. Diesen Sachverhalt hat man vermutlich wegen der Verzerrung im hinteren Kniebereich des Modells, was im rechten Bild in Abbildung 3.16 schon gezeigt wurde. Das gleiche gilt auch für *rectus femoris*.

In Tabelle 3.5 sind die Daten für die Hebelarme im Hüftgelenk angeführt. Der Gelenkwinkel ist in diesem Fall auch  $180^\circ$ . Es ist offensichtlich, dass die Modellgrößen den Daten vom van Soest ziemlich genau entsprechen.

Muskel + Sehne	Modell	Anderson	Pawlik	van Soest
<i>gluteus maximus</i>	43,1	54,6	26,8	48,2
<i>hamstrings</i>	55,5	38,9	33,1	59,9
<i>rectus femoris</i>	32,8	31,1	24,0	27,2

Tabelle 3.5: Vergleich von Hebelarmen [*mm*] im Hüftgelenk

In Tabelle 3.6 sind die Gesamtlängen von Muskeln und Muskelgruppen nach dem Modell und nach verschiedenen Literaturquellen angeführt. Diese Literaturdaten entsprechen den Daten für die optimale Muskelfaserlänge. Um die Modelldaten auf den entsprechenden optimalen Gelenkwinkel (Tabelle 3.7) umrechnen zu können, soll man folgende Formel verwenden:

$$\text{optimale Muskellänge} = \text{Muskellänge} + \text{Hebelarme} \cdot \frac{(180^\circ - \text{Gelenkwinkel}) \cdot \pi}{180^\circ}$$

Man merkt, dass sich im Fall von *vastii* die modellbezogene Gesamtlänge

Muskel + Sehne	Modell	Anderson	Delp	van Soest
<i>gluteus maximus</i>	242,2	213,1	214,8	272,2
<i>hamstrings</i>	387,8	349,2	347,3	368,7
<i>rectus femoris</i>	307,5	337,6	334,4	327,5
<i>vastii</i>	292,5	176,6	177,4	196,8

Tabelle 3.6: Vergleich der Gesamtlänge [*mm*] der Muskeln und Muskelgruppen

im Vergleich zu den anderen Werten ziemlich stark unterscheidet.

Muskel	Kniegelenkwinkel	Hüftgelenkwinkel
<i>gluteus maximus</i>		148°
<i>hamstrings</i>	180°	148°
<i>rectus femoris</i>	179°	180°
<i>vastii</i>	131°	

Tabelle 3.7: Gelenkwinkel bei dem optimale Muskelfaserlänge ohne Aktivierung auftritt, nach Pawlik

In Tabelle 3.8 findet man die Daten für das Muskelvolumen vom CAD-Modell und verschiedenen Literaturquellen. Die skalierten Daten für Muskelvolumen, die von Anderson (1999) stammen entsprechen der Muskelmasse die durch die Dichte des Skelettmuskels (1,06 g/ml nach Mendez & Keys, 1960) dividiert wurde. Beim Anderson wurden maximale isometrische Muskelkräfte auf die gemessenen Gelenkmomente bei jungen Männern (26 Jahre, 70-76 kg) skaliert. Dadurch sind vermutlich die Daten von Anderson etwas grösser als die von Scott und jene des Modells geworden.

Die Volumenparameter nach Scott (1993), die man durch direkte Messungen auf einem Kadaver (79 Jahre, 95 kg) gewonnen hat, sind mit dem gleichen Skalierungsparameter angepasst. Es ist offensichtlich, dass das Modellvolumen den skalierten Daten vom Scott ziemlich genau entsprechen.

<b>Muskelvolumen</b>	<b>Modell</b>	<b>Anderson</b>	<b>Scott</b>
<i>adductor longus + brevis</i>	69,3	200,2	79,5
<i>adductor magnus</i>	164,4	236,6	247,0
<i>biceps femoris caput breve</i>	32,1	185,1	37,2
<i>biceps femoris caput longum</i>	74,1	72,0	
<i>extensor longus</i>	36,8	131,4	
<i>flexor digitorum longus + hallucis longus</i>	48,9	74,6	
<i>gastrocnemius caput laterale</i>	106,7	155,8	
<i>gluteus maximus</i>	310,7	560,2	
<i>gluteus medius + gluteus minimus</i>	152,6	259,7	
<i>gracilis</i>	35,9	101,2	39,1
<i>hamstrings</i>	224,9	482,1	
<i>iliacus + psoas major</i>	133,9	320,9	
<i>oburatorius externus</i>	25,6	170,0	
<i>oburatorius internus</i>	20,9	139,8	
<i>pectineus</i>	27,4	63,0	
<i>piriformis</i>	18,0	23,5	
<i>rectus femoris</i>	77,6	236,6	66,3
<i>sartorius</i>	52,9	160,3	74,3
<i>semimembranosus</i>	93,6		83,3
<i>semitendinosus</i>	57,2		49,4
<i>soleus</i>	174,1	237,0	
<i>tensor fasciae latae</i>	22,9	39,1	25,4
<i>vastus intermedius</i>	179,8		149,2
<i>vastus lateralis</i>	199,7		220,2
<i>vastus medialis</i>	139,8		168,5
<i>vastii</i>	519,3	938,5	537,9

Tabelle 3.8: Vergleich von Muskelvolumina [ $cm^3$ ]

# Kapitel 4

## Diskussion

In diesem Kapitel wird die Zuverlässigkeit des konstruierten CAD-Modells diskutiert, wodurch auch einige Verbesserungsmöglichkeiten angemerkt werden.

Das Modell, das im Rahmen dieser Arbeit konstruiert wurde stellt eine vertrauenswürdige detaillierte Repräsentation der unteren Extremitäten eines neunjährigen Kindes dar. Man kann auch behaupten, dass die Methoden die dabei benutzt wurden, geeignet für solche Konstruktionen sind, was sich aus dem Vergleich von Resultaten mit Literaturdaten ersehen lässt. Dabei hat sich auch herausgestellt, dass einige Vorgänge besser ausgeführt sein könnten, was im Folgenden genauer erklärt ist.

Im Rahmen dieser Arbeit sind drei Aufnahmeserien gemacht worden, wobei der Bereich vom Knöchel bis über das Becken aufgenommen wurde. Dabei hat man zwischen der ersten und zweiten Serie eine nichtaufgenommene Zone. In zweiter und dritter Serie gab es einige Aufnahmen die unbrauchbar waren. Um das zu vermeiden, könnte man vier oder mehr Serien machen, wodurch die nichtaufgenommenen Bereiche abgedeckt wären und die Genauigkeit im Fall von Bereichen wo einige Aufnahmen unsichtbar waren durch den grösseren Überlappungsbereich eine Verbesserung erfahren würden. Dadurch lässt sich auch die Verzerrung und Verkleinerung, die in einigen Aufnahmen auftritt, vermeiden.

Es wurde auch empfohlen, dass das Bein, bzw. die Ferse während der Aufnahme-prozedur fix auf ungefähr 10 *cm* Höhe gehalten wird, damit es nicht zur Deformation von Muskelgruppen im hinteren Bereich des Beines kommt, was normalerweise geschieht wenn das ganze Bein die Liegefläche vom Scanner berührt. Dies wird in Abbildung 3.16 (rechtes Bild) merkbar.

Um die optimale Muskelfaserlänge des Modells zu berechnen, könnte man die Methode nach Scott, 1993 und die Methode nach Wickiewicz, 1983 verwenden.

Für die Methode nach Scott, 1993 braucht man aber neben den axialen und sagittalen auch die frontalen Aufnahmen, die im Rahmen von dieser Arbeit nicht gemacht wurden. Die Methode besteht darin, dass man zuerst aus den frontalen und sagittalen Aufnahmen die projizierte Muskelfaserlänge ermittelt und danach mit Hilfe des Satzes vom Pythagoras die optimale Muskelfaserlänge berechnet.

Die Methode nach Wickiewicz bietet eine Möglichkeit die optimale Muskelfaserlänge mit Hilfe von Muskelbauchlänge zu ermitteln, indem man die optimale Muskelfaserlänge aus dem schon vorhandenen Verhältnis zwischen Muskelfaserlänge und Muskelbauchlänge berechnet. Die Sehnenlänge lässt sich danach durch Subtrahieren der Muskelfaserlänge von gemessener Gesamtlänge des Sehnenmuskelmodells berechnen.

# Kapitel 5

## Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Methode für die Erstellung des 3D-CAD Modells basierend auf Magnetresonanzaufnahmen, die in dieser Diplomarbeit verwendet wurde, für die Modellierung der unteren Extremitäten eines Kindes geeignet ist.

Die MR Aufnahmen die vom Knöchel bis über das Becken alle 5 *mm* gemacht wurden, wurden als Grundlage für die Erstellung von Skelettmuskelkonturen in 2D benutzt. Darauf basiert die 3D-Konstruktion.

Die Modelle die dabei entstanden sind, haben sich als sehr zuverlässig gezeigt was durch den Vergleich von Parametern wie Muskellänge und Hebelarme, die man direkt vom Modell ablesen kann, mit aus Literatur gewonnenen Daten, gezeigt wurde.

Von besonderem Interesse für zukünftige Studien könnte die Frage sein, wie man diese Modelle für die Ganganalyse im Fall von Kindern die an Zerebralparese leiden am besten nutzen kann. Die gleiche Methode könnte auch für die Modellierung von anderen Körperteilen, wie z.B. der oberen Extremitäten bei Menschen unterschiedlicher Altersgruppen und Körpergrößen eingesetzt werden.

# Literaturverzeichnis

- [1] Anderson F.C., *A dynamic optimization solution for a complete cycle of normal gait* Ph.D. Thesis, University of Texas at Austin, 1999.
- [2] Arnold A.S., Salinas S., Askawa D.J., Delp S.L., *Accuracy of Muscle Moment Arms Estimated from MRI-Based Musculoskeletal Models of the Lower Extremity*, *Computer Aided Surgery* 5, 108-119, 2000.
- [3] Delp S.L., *A computer-graphics system to analyse and design musculoskeletal reconstructions of the lower limb*, Ph.D. Thesis, Dept. of Mechanical Engineering, Stanford University, 1990.
- [4] Gföhler M., *Trainingsfahrrad für querschnittgelähmte*, Dissertation, TU Wien, 1995.
- [5] Mendez J., Keys A., *Density and composition of mammalian muscle*, *Metabolism* 9, 184-188, 1960.
- [6] Murray W.M., Arnold A.S., Salinas S., Durbhakula M.M., Buchanan T.S. and Delp S.L., *Building Biomechanical Models Based on Medical Image Data: An Assessment of Model Accuracy*, W.M. Walles et al. (Eds.): MICCAI'98, LNCS 1496, pp. 539-549, 1998.
- [7] Pandy M.G., Pearce J.C., Krevolin J.L. *Moment arm of the patellar tendon in the human knee*, *Journal of Biomechanics*, in press, 2003.
- [8] Pawlik R., *Biomechanik des Radfahrens - Untersuchung der maximalen menschlichen Leistungsabgabe*, Dissertation, TU Wien, 1992.
- [9] Putz R., Pabst R., *Sobotta - Atlas der Anatomie des Menschen, Band 2: Rumpf, Eingeweide, untere Extremität*, URBAN & FISCHER, München . Jena, 2000.
- [10] Scott S.H., Engstrom C.M. and Leob G.E., *Morphometry of human thigh muscles. Determination of fascicle architecture by magnetic resonance imaging*, *Journal of Anatomy* 182, 249-257, 1993.

- [11] Soest A.J. van and Casius L.J.R., *Which factors determine the optimal pedaling rate in sprint cycling?* Med. Sci. Sports Exerc. 32, 1927-1934, 2000.
- [12] Wickiewicz T.L., Roy R.R., Powell P.L., Edgerton V.R., *Muscle architecture of the human lower limb* Clinical Orthopaedics and Related Research 179, 275-283, 1983.