

**Diplomarbeit**

**Bewegung des Talus in der Sprunggelenksgabel**

eingereicht von

**Philip Kaller**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor(in) der gesamten Heilkunde**

**(Dr. med. univ.)**

an der

**Medizinischen Universität Graz**

ausgeführt am

**Universitätsklinik für Orthopädie und Traumatologie**

unter der Anleitung von

Herrn Priv.- Doz. Dr.med.univ. Hans Gunther Clement

Herrn. Ao. Univ.-Prof. Dr. Wolfgang Grechenig

*Eidesstattliche Erklärung*

*Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe, andere als die angegebenen Quellen nicht verwendet habe und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.*

*Graz, am 13.08.2017*

*Philip Kaller eh*

## Danksagungen

Ich möchte mich hier bei all jenen Menschen bedanken, die mir während meines gesamten Studiums zur Seite gestanden sind und mich auf meinem Weg begleitet haben.

Allen voran bedanke ich mich bei meinem Betreuer dieser Arbeit, Herrn Priv.- Doz. Dr.med.univ. Hans Gunther Clement, der die Idee zu dieser Arbeit geboren hatte. Er stand mir immer mit Rat und Tat zur Seite und kümmerte sich um einen möglichst effizienten Ablauf der Dinge.

In weiter Folge bedanke ich mich bei meiner Familie, vor allem bei meiner Mutter Karin, die mich in allen Lebenslagen unterstützt hat und mir es ermöglichte diese Studium zu absolvieren.

Ein besonderer Dank gilt auch meinen beiden Studienkollegen und langjährigen engsten Freunden Bernhard und Max. Ihr seid aus dieser Zeit nicht wegzudenken und ohne euch wäre ich vermutlich noch nicht so weit diese Zeilen hier zu schreiben.

# Zusammenfassung

**EINLEITUNG:** Die Bewegung des Talus in der Sprunggelenksgabel in allen drei Raumebenen ist ein komplexes Geschehen. Vor allem in Transversal- und Frontalebene während Plantar- und Dorsalflexion sind die Bewegungen des Talus in der Literatur spärlich beschrieben. Ziel dieser Arbeit ist es, genau diese Bewegungen zu beschreiben und miteinander in Bezug zu bringen.

**MATERIAL UND METHODEN:** Untersucht wurden 26 suffizient präparierte Kadaver-Präparate, konserviert nach der Methode nach Thiel. Die Präparate waren distal des Kniegelenks abgetrennt und sämtliche Weichteile, bis auf die Membrana Interossea und den Bandapparat, waren entfernt.

Es wurden die äußeren Anteile des OSG vermessen.

Im Anschluss wurden die Bewegungsumfänge der Präparate in einem eigens dafür angefertigten Messapparat untersucht. Über, an exakt definierten Stellen angebrachte Kirschner-Drähte, wurden die Bewegungsumfänge des Talus während Plantar- und Dorsalflexion, in allen 3 Raumebenen über Messskalen ermittelt.

**ERGEBNISSE:** Die erhobenen Messwerte in den jeweiligen Raumrichtungen wurden addiert, um die Gesamtbewegung in den jeweiligen Ebenen wiedergeben zu können. In der Sagittalebene (Plantar-/Dorsalflexion) ergab sich eine Range of Motion (ROM) von  $47,62^{\circ} \pm 9,17^{\circ}$  (max  $64,4^{\circ}$ /min  $27,9^{\circ}$ ). In der Frontalebene (Außen-/Innenrotation)  $23,73^{\circ} \pm 10,1^{\circ}$  (max  $51,4^{\circ}$ /min  $4,1^{\circ}$ ). In der Transversalebene (mediale/laterale Seitabweichung)  $22,17^{\circ} \pm 13,42^{\circ}$  (max  $49^{\circ}$ /min  $3^{\circ}$ ). Die Plantarflexion war stets mit Außenrotation des Talus verbunden, die Dorsalflexion mit Innenrotation. Bei der Bewegung in der Transversalebene konnte keine vergleichbare Regelmäßigkeit gefunden werden. Der Vergleich der Messwerte untereinander ergab einen gegensinnigen Zusammenhang zwischen den äußeren Abmessungen des OSG und dem Ausmaß der Plantarflexion und einen gleichsinnigen Zusammenhang zwischen der Breite des OSG und der Seitabweichung des Talus in Dorsalflexion. Bei dem Vergleich der Bewegungen in den Ebenen untereinander konnte ein gleichsinniger Zusammenhang zwischen Plantarflexion und Außenrotation des Talus gefunden werden.

**DISKUSSION:** Vergleicht man die erhobenen Messergebnisse mit der Literatur, finden sich für die Plantar- und Dorsalflexion in dieser Arbeit Werte, die eher In-vivo-Studien ähneln. Sowohl in der Frontal- als auch in der Transversalebene waren die hier ermittelten Messwerte in absoluten Zahlen deutlich größer als in von der Thematik her vergleichbaren

Arbeiten. Das Verhältnis der einzelnen Messwerte zueinander war allerdings vergleichbar. In der Beziehung der Bewegungen zueinander konnten in der vorliegenden Arbeit im Vergleich zu den bestehenden neue Erkenntnisse gewonnen werden.

## Abstract

**INTRODUCTION:** The movement of the talus between the distal tibia and fibula in all three planes is complex. Literature about the movement of the talus in the transversal and frontal plane during plantar- and dorsiflexion, is rare. The aim of this study is to describe these movements and to interrelate them.

**MATERIAL AND METHODS:** We examined 26 sufficient dissected cadaveric preparations, preserved according to Thiel's method. The preparations have been detached distal to the knee joint. All soft tissue, except the interosseous membrane and the ligaments were dissected. The outer parts of the upper ankle joint have been measured. After that the range of motion of the specimen was examined in a custom made measuring apparatus. Through, K-Wires placed in exactly defined location, the range of motion in all 3 planes of the talus during plantar- and dorsiflexion was determined through scales.

**RESULTS:** The measured values have been added to describe the whole range of motion in every plane. In the sagittal plane (plantar- and dorsiflexion) the range of motion (ROM) was  $47,62^{\circ} \pm 9,17^{\circ}$  (max  $64,4^{\circ}$ /min  $27,9^{\circ}$ ). In frontal plane (outer-/inner-rotation) )  $23,73^{\circ} \pm 10,1^{\circ}$  (max  $51,4^{\circ}$ /min  $4,1^{\circ}$ ). In transversal plane (medial/lateral deviation) )  $22,17^{\circ} \pm 13,42^{\circ}$  (max  $49^{\circ}$ /min  $3^{\circ}$ ). In plantarflexion there was always outer-rotation, in dorsiflexion inner-rotation. There was no such pattern in the transversal plane. The comparison of the data showed that the dimensions of the outer part of the ankle joint correlate inversely with the plantarflexion. The width of the mortice correlated directly with the lateral division of the talus in dorsiflexion, so does the plantarflexion with the outer rotation of the talus.

**DISCUSSION:** Compared to other studies the measurements taken in plantar- and dorsiflexion in in context of this thesis are more similar to in-vivo studies. The data collected in both the frontal and transversal plane showed remarkably high readings when it comes to absolute numbers in comparison to similar studies, but the relation was comparable. In contrast to former studies new degrees of relationship between the movements of the talus have been found.

# Inhaltsverzeichnis

<b>DANKSAGUNGEN</b>	<b>II</b>
<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>V</b>
<b>INHALTSVERZEICHNIS</b>	<b>VI</b>
<b>GLOSSAR UND ABKÜRZUNGEN</b>	<b>VIII</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b>	<b>IX</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS</b>	<b>X</b>
<b>1 EINLEITUNG</b>	<b>11</b>
1.1 HINTERGRUND UND ZIELSETZUNG	11
1.2 ANATOMISCHE GRUNDLAGEN	11
1.2.1 DIE KNÖCHERNEN BESTANDTEILE DES OBEREN SPRUNGGELENKS - TIBIA, FIBULA UND TALUS	12
1.2.2 DIE ARTICULATIO TALOCRURALIS	15
1.2.3 DER BANDAPPARAT	16
1.2.4 MUSKULATUR UND SEHNEN IM BEREICH DES OBEREN SPRUNGGELENKS	19
1.3 BEWEGUNG IM OBEREN SPRUNGGELENK UND RELEVANTE BIOMECHANIK	20
<b>2 MATERIAL UND METHODEN</b>	<b>24</b>
2.1 DER MESSAPPARAT	24
2.2 ABLAUF DER VERSUCHE	29
2.2.1 VERMESSUNG DER ÄUßEREN ANTEILE DES SPRUNGGELENKS	29
2.2.2 VORBEREITUNG	30
2.2.3 MESSUNGEN IN PLANTARFLEXION	34
2.2.4 MESSUNGEN IN DORSALFLEXION	36
<b>3 ERGEBNISSE UND RESULTATE</b>	<b>37</b>
3.1 AUSWERTUNG DER MESSERGEBNISSE	37
3.1.1 MESSERGEBNISSE DER ÄUßEREN ANTEILE DES SPRUNGGELENKS	37
3.1.2 MESSERGEBNISSE IN PLANTARFLEXION	38
3.1.3 MESSERGEBNISSE IN DORSALFLEXION	39
3.1.4 GESAMTER BEWEGUNGSUMFANG BEZOGEN AUF DIE RAUMBEBENEN	41
3.2 VERGLEICH UND ZUSAMMENHÄNGE DER MESSERGEBNISSE	43
3.2.1 VERGLEICH DER MESSWERTE DER ÄUßEREN ANTEILE DES SPRUNGGELENKS MIT DEN BEWEGUNGEN DES TALUS	43
3.2.2 VERGLEICH DER MESSWERTE DER BEWEGUNGEN DES TALUS UNTEREINANDER	47
<b>4 DISKUSSION</b>	<b>49</b>



## **Glossar und Abkürzungen**

*Abb.* Abbildung

*Art.* Articulatio

*Bzw.* Beziehungsweise

*Lig.* Ligamentum

*M.* Musculus

*Mm.* Musculi

*Max.* Maximal

*Min.* Minimal

*OSG* Oberes Sprunggelenk

*ROM* Range of motion

*Tab.* Tabelle

# Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: DIE KNÖCHERNEN BESTANDTEILE DES OBEREN SPRUNGGELENKS .....	14
ABBILDUNG 2: DER TALUS.....	15
ABBILDUNG 3: DER BANDAPPARAT VON LATERAL .....	18
ABBILDUNG 4: DER BANDAPPARAT VON DORSAL .....	18
ABBILDUNG 5: DER MESSAPPARAT: A...METALLSTANGE, B...HOLZARM, C...BEFESTIGUNG FÜR ZUGMECHANISMUS, D...HOLZSCHEMEL, E...WINKELMAß .....	26
ABBILDUNG 6: POSITIONIERTES PRÄPARAT IN MESSAPPARAT VON LATERAL .....	27
ABBILDUNG 7: 3KG ZUG PRO GUMMIBAND, GEMESSEN MIT FEDERWAAGE	27
ABBILDUNG 8: LASERPOINTER-KONSTRUKTION .....	28
ABBILDUNG 9: VERMESSUNG DER ÄUßEREN ANTEILE DES SPRUNGGELENKS MITTELS SCHIEBLEHRE .....	29
ABBILDUNG 10: SETZEN DER DRÄHTE .....	31
ABBILDUNG 11: GESETZTE DRÄHTE, ANSICHT VON FRONTAL. DRAHT ZUR BESTIMMUNG VON INNEN- BZW. AUßENROTATION .....	31
ABBILDUNG 12: AUFSPANNEN DER MEMBRANA INTEROSSEA MITTELS FEDER .....	32
ABBILDUNG 13: EINRICHTEN DER SKALA IN SAGITTALEBENE.....	33
ABBILDUNG 14: EINRICHTEN DER SKALEN IN TRANSVERSALEBENE .....	34
ABBILDUNG 15: MESSUNG MIT DIGITALER WASSERWAAGE IN PLANTARFLEXION.....	35
ABBILDUNG 16: PRÄPARAT IN DORSALFLEXION .....	36
ABBILDUNG 17: DIAGRAMM ROM.....	43
ABBILDUNG 18: PUNKTWOLKE FIBULA .....	45

## Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: MESSERGEBNISSE DER ÄUßEREN ANTEILE DES SPRUNGGELENKS .....	38
TABELLE 2:MESSERGEBNISSE IN PLANTARFLEXION .....	39
TABELLE 3:MESSERGEBNISSE IN DORSALFLEXION .....	40
TABELLE 4:GESAMTER BEWEGUNGSUMFANG, „ROM“ .....	42
TABELLE 5: KORRELATION DER TIEFE DER FIBULA MIT BEWEGUNGEN DES TALUS. KORRELIERENDE WERTE SIND FARBLICH HINTERLEGT. ....	44
TABELLE 6:KORRELATION DER BREITE DES OSG MIT BEWEGUNGEN DES TALUS. KORRELIERENDE WERTE SIND FARBLICH HINTERLEGT. ....	46
TABELLE 7:KORRELATION DER TIEFE DER TIBIA MIT BEWEGUNGEN DES TALUS. KORRELEIRENDE WERTE SIND FARBLICH HINTERLEGT. ....	47
TABELLE 8:KORRELATION DER ÄUßEREN ANTEILE DES SPRUNGGELENKS MIT BEWEGUNGEN DES TALUS .....	47
TABELLE 9:KORRELATION DER BEWEGUNGEN DES TALUS UNTEREINANDER. KORRELIERENDE WERTE SIND FARBLICH HINTERLEGT. ....	48
TABELLE 10: KORRELATIONEN DER MESSWERTE GESAMT .....	49

# 1 Einleitung

## 1.1 Hintergrund und Zielsetzung

Das obere Sprunggelenk ist für den aufrechten Gang auf zwei Beinen unentbehrlich, es überträgt die gesamte Last des Körpers auf die übrigen Teile des Fußes. Die Bewegung des Talus in der Sprunggelenksgabel in allen drei Raumebenen ist ein komplexes und bis heute nicht sehr exakt erforschtes Themengebiet. Vor allem jene Bewegungen, die der Talus während der Plantar- und Dorsalflexion in Transversal- und Frontalebene vollführt, sind in der Literatur kaum vakant.

In der Literatur finden sich zahlreiche Hinweise, dass die speziellen Verhältnisse der Achsenlage im oberen Sprunggelenk sowie die besonderen anatomischen Verhältnisse der Form der Talusrolle, in frontaler- und transversaler Raumebene, respektive Innen-/Außenrotation und Seitabweichung des Talus, größere Bewegungen mit sich bringen als bisher vermutet.

Ziel dieser Arbeit ist es, genau diese wenig beleuchteten Bewegungen des Talus zu messen, neue Bewegungsumfänge zu finden und diese miteinander in Verhältnis zu bringen. Um die Messwerte für diese Aussagen ermitteln zu können, wurde eine eigene Messapparatur konstruiert, in der die anatomischen Präparate vermessen wurden.

Im Folgenden wird nun ein Überblick über anatomisches Grundwissen und relevante Biomechanik im Bereich des oberen Sprunggelenks gegeben, welches für das Verständnis dieser Arbeit wesentlich sind. Im Anschluss daran wird der Vorgang der Messungen exakt erklärt, die Ergebnisse und Resultate werden übersichtlich dargestellt und abschließend zu den bisherigen Arbeiten, die mit dieser Zielsetzung vergleichbar sind, in Bezug gebracht.

## 1.2 Anatomische Grundlagen

Die Kenntnis der Anatomie des Oberen Sprunggelenkes, welches aus der Malleolengabel (bestehend aus dem distalen Ende der Tibia (Schienbein) und der Fibula (Wadenbein)) und dem Talus gebildet wird, ist wesentlich, um die Bewegungen des Gelenkes zu verstehen und korrekt beschreiben zu können. Es werden in diesem Kapitel die dafür relevanten anatomischen Grundlagen und die Biomechanik beschrieben.

### 1.2.1 Die knöchernen Bestandteile des oberen Sprunggelenks - Tibia, Fibula und Talus

Die Tibia, zu deutsch: Schienbein, gehört zu den langen Röhrenknochen, mit außenliegender kompakter Corticalis und innenliegender, schwammartiger Substantia spongiosa. Der tragende, 30-40 cm lange, prismoid geformte Knochen kann in 3 Teile gegliedert werden. In das Corpus, ein proximales und ein distales Ende.

- Das Corpus ist 3 kantig mit Margo anterior, Margo medialis und Margo interosseus, der der Anheftung der Membrana interossea als Verbindung zur Fibula dient. Zwischen den Kanten befinden sich die Flächen: Facies medialis, lateralis und posterior.
- Das proximale Ende, Caput tibiae, welches seitlich als Condylus medialis und lateralis ausläuft, bildet mit seinen kopfwärts gerichteten Gelenkflächen die Verbindung zum Oberschenkel. Auf dem Condylus lateralis befindet sich die ovale, nach lateral hinten unten gerichtete Facies articularis fibularis und stellt die gelenkige Verbindung zum Kopf der Fibula dar.
- Das distale Ende bildet nach medial und distal den Malleolus medialis. Außen mit Rauigkeiten für den Ansatz des Lig. deltoideum, innen mit der leicht konkaven Facies articularis malleoli medialis. Dazu steht in einem Winkel von fast 90 Grad, die sich am unteren distalen Ende der Tibia befindliche Facies articularis inferior. Diese ist von vorne nach hinten konkav geformt, mit meistens einer in der Mitte befindlichen Knorpelerhebung. Beide beschriebenen Gelenksflächen artikulieren mit dem Talus. Lateral, in der Sagittalebene, befindet sich die Incisura fibularis an der Extremitas distalis der Tibia und ist durch eine Kante, die zugleich die laterale Begrenzung der Facies articularis inferior bildet, von dieser rechtwinklig getrennt. Hier sind Schienbein und Wadenbein syndesmotisch miteinander verbunden und bilden mit dem distalen Ende der Fibula die Malleolengabel[1–3].

Die Fibula: Das Wadenbein, gehört ebenso zu den langen Röhrenknochen.

Der Aufbau gliedert sich in Corpus, proximales und distales Ende.

- Das proximale Ende, Caput fibulae, korrespondiert im Sinne einer Amphiarthrose über die Facies articularis capitis fibulae mit der Facies articularis fibularis der Tibia, ohne dabei selbst mit dem Kniegelenk verbunden zu sein.

- Das Corpus besteht aus drei Flächen, den Facies medialis, anterior et posterior. Diese laufen an drei Kanten, den Margines anterior et posterior sowie dem Margo interosseus, von dem das Wadenbein über die Membrana interossea mit dem Schienbein verbunden ist, zusammen.
- Das pyramidenförmige, abgeflachte distale Ende der Fibula stellt den Malleolus lateralis dar, der weiter nach distal reicht als der Malleolus medialis. Lateral findet man Rauigkeiten für den Ansatz verschiedener Bänder des Sprunggelenkes. Nach medial beinhaltet er die Facies articularis malleoli lateralis, diese ist von proximal nach distal konvex und führt den Talus an der lateralen Seite. Somit bildet das distale Ende der Fibula den lateralen Teil der Malleolengabel[1–4].

Der Talus: Das Sprungbein gehört zu der Familie der kurzen Knochen. Seine Spongiosa ist spitzbogenartig traktionell geformt, resultierend den von 3 Richtungen auf ihn wirkenden Seitenkräften. Er ist das lastübertragende Glied zwischen Unterschenkel und der darunterliegenden subtalaren Platte. Klinisch bildet er, zusammen mit dem Calcaneus den Rückfuß[1,5,6].

Der Talus besteht aus 3 Teilen: Caput, Collum und Corpus tali. Seine Achse verläuft von schräg hinten durch das Corpus nach medial vorne und durch das Caput.

- Dem Caput tali ist die Facies articularis navicularis aufgelagert, diese verbindet ihn über das Os naviculare und die Ossa cuneiformia mit dem Mittelfuß.
- Das Collum tali ist frei von Gelenksflächen[1,3].
- Das Corpus tali ist Träger der Trochlea tali. Diese besitzt eine Facies superior nach cranial und seitlich die Facies malleolaris medialis et lateralis.

Die Facies superior stellt geometrisch einen Zylinder dar, der mit dem Dach der Malleolengabel artikuliert. Von anterior nach posterior verjüngt sie sich mit einer konvexen Krümmung von etwa 120 Grad in der sagittalen Ebene, von lateral nach medial ist eine leicht konkave Krümmung zu finden.

Die Facies malleolaris medialis gleicht in ihrer Form einer liegenden Birne, vorne breit, nach hinten schmaler werdend, auch die Krümmung nimmt von vorne nach hinten ab und stellt so von oben betrachtet einen schiefen Kegel dar.

Die Facies malleolaris lateralis ist ein auf dem Kopf stehendes Dreieck, dass von oben nach unten sowohl einen konkaven als auch einen schraubenartigen Verlauf, mit Windung um eine konzentrische Achse bildet und bis zum Processus lateralis

des Talus reicht. Diese Schraubenform stellt sich in linken Tali als rechts gewendete Schraube dar und umgekehrt [1,2,7].

An der Unterseite des Talus befinden sich, von vorne nach hinten aufgezählt, die Facies articulares calcanea anterior, media et posterior, wobei die letzte durch den Sulcus tali in der Regel von den beiden erstgenannten getrennt ist. Über diese Gelenkflächen steht der Talus mit dem Calcaneus in Verbindung[3,4].

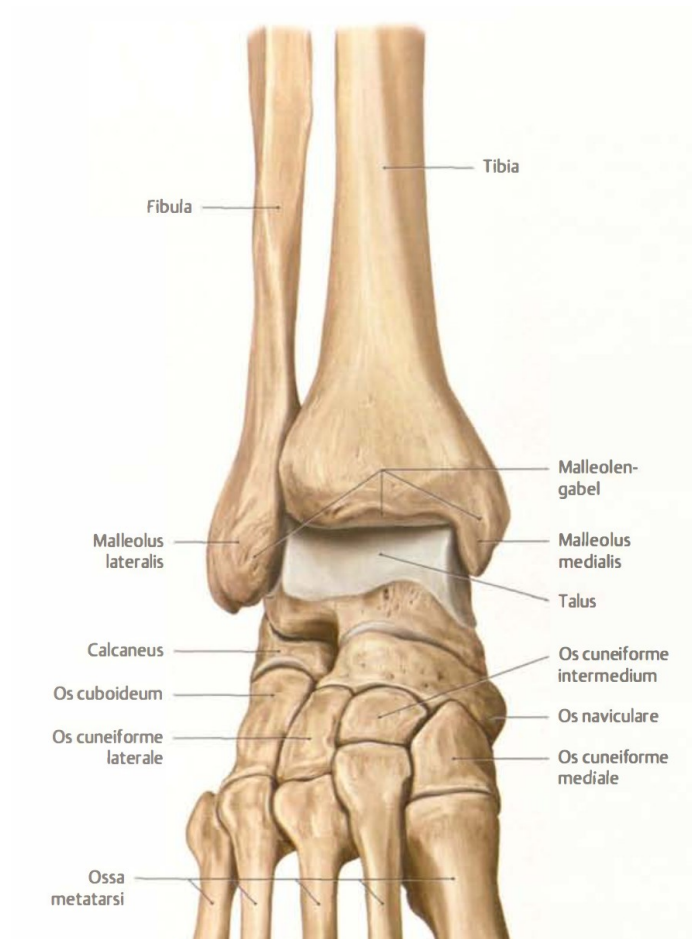


Abbildung 1: Die knöchernen Bestandteile des oberen Sprunggelenks [4]

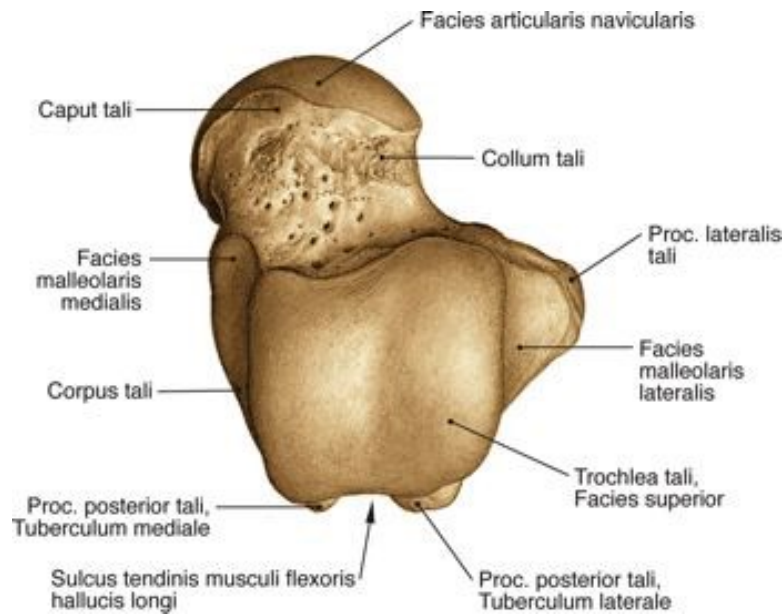


Abbildung 2: Der Talus [8]

### 1.2.2 Die Articulatio talocruralis

Die Articulatio talocruralis, zu Deutsch: oberes Sprunggelenk, gehört zu der Gruppe der Scharniergelenke (Ginglymus) und besteht somit aus einem konvexen und einem konkaven Gelenkspartner. Der konkave Teil wird von der Malleolengabel (Innenknöchel als Teil der Tibia, deren Facies articularis inferior tibiae und Außenknöchel als Teil der Fibula), der konvexe Teil durch die Trochlea tali des Sprungbeines gebildet[1,3,9].

Der obere Teil wird von der Malleolengabel, bestehend aus Malleolus medialis, Facies articularis inferior tibiae der Tibia und dem Malleolus lateralis der Fibula, gestellt. Diese sind durch die Syndesmosis tibiofibularis, zusammengesetzt aus Lig. tibiofibulare anterius et posterius und dem Lig. tibiofibulare interosseum, miteinander verbunden. In dieser Verbindung weicht die Fibula, im Vergleich zu dem Malleolus medialis der Tibia nach

ventral, lateral ab. Auch wenn bei Dorsalflexion des Fußes eine Bewegung in diesem Bereich zu beobachten ist, ist diese Verbindung nicht als Gelenk zu betrachten. Weiter kranial findet man die Membrana interossea, mit ihren größtenteils von der Tibia nach lateral distal, in Richtung Fibula verlaufenden aponeurotischen Fasern. Sie ist bedeutend für die Kraftübertragung zwischen Tibia und Fibula.

Die Trochlea tali, die den unteren Teil der Art. talocruralis bildet, artikuliert mit der Malleolengabel an 3 Flächen: Lateral am Wadenbein trifft die Facies malleolaris lateralis des Talus mit der Facies articularis malleoli lateralis der Fibula zusammen. Medial und kranial trifft der Talus auf die Gelenksflächen der Tibia. So artikuliert die Facies malleolaris medialis mit der Facies articularis malleoli medialis und die Facies articularis superior mit der Facies articularis inferior der Tibia. Die Facies superior der Trochlea tali besitzt in der Sagittalebene eine Krümmung von 120 Grad, damit eine um 60-80 Grad größere Krümmung als die Facies articularis inferior tibiae [1,2,7,9]. So ergibt sich die Möglichkeit der Plantar-Dorsal-Flexion aus den unterschiedlichen Krümmungswinkeln der genannten Gelenkflächen. Von vorne nach hinten nimmt die Breite der Talusrolle um 4-5mm ab. Man findet auf der Facies superior der Trochlea tali eine leicht konkave Rinne im medialen Drittel. Diese entspricht einer leicht konvex geformten, bogenartigen Erhebung in der Facies articularis inferior der Tibia [6,10,11]. Auf die unterschiedlichen Krümmungsradien der Trochlea tali wird später, in dem Kapitel 1.3 „Bewegung und relevante Biomechanik im Oberen Sprunggelenk“, gemeinsam mit den Achsenverhältnissen eingegangen.

Die Gelenkkapsel setzt proximal um die überknorpelte Gelenkfläche der Tibia und Fibula an. Distal liegt sie etwas proximal der Facies articularis navicularis, am Hals des Talus an [2,9]. An der Vorderseite wird die dünne Kapsel durch Anheftungen mit den Sehenscheiden der Musculi extensores digitorum und hallucis verstärkt, um ein Einklemmen der Kapsel zu verhindern [1].

### **1.2.3 Der Bandapparat**

Der Bandapparat, der sich zwischen Unterschenkel und Tarsal-Knochen befindet, verbindet, sichert und führt das Gelenk.

Medial findet sich das Lig. collaterale mediale (deltoideum). Es ist flach, dreieckig geformt und kann in oberflächliche und tiefe Züge unterteilt werden. Tief liegt die Pars tibiotalaris anterior, die von der Spitze des Malleolus medialis Richtung medialer Seite des Talus verläuft. Darüber befindet sich, als Teil der oberflächlichen Zügel, die Pars tibiotalaris posterior, die vom Malleolus medialis nach hinten, seitlich zum Talus zieht. Darüber erstreckt sich, nahezu vertikal die Pars tibiocalcanea, von der Tiba zum Sustentaculum tali des Calcaneus. Nach vorne richtet sich die Pars tibionavicularis von der Tibia aus an das Os Naviculare, wo sie sich mit weiteren Bandzügen vermischt[1,2]. Es sind in der Literatur aber viele weitere Arten der Benennung bzw. Aufteilung der Zügel des Innenbandes beschrieben, auf die hier nicht gesondert eingegangen wird.

Alle nach vorne ziehenden Fasern spannen sich bei Plantarflexion an, alle hinteren in Dorsalflexion. Durch die horizontalen Faserzüge wird ein seitliches Kippen verhindert. Dies gilt auch für die lateralen Bänder[1].

Lateral befindet sich das aus mehreren Teilen bestehende Lig. collaterale laterale. Vom Malleolus lateralis der Fibula spannt sich nach vorne und hinten ein intraartikulär liegendes Lig. talofibulare anterius bzw. posterius aus. Das vordere hat eine Länge von etwa 13mm, setzt im dorsalen Bereich des Collum tali an und ist wesentlich für die Stabilität des oberen Sprunggelenkes. Es ist das weitaus schwächste und phylogenetisch jüngste Band des lateralen Komplexes und relevant vor allem für Subluxation nach ventral bzw. als Brace bei nicht muskulär geführtem/stabilisiertem Gelenk in Plantarflexion mit einer Länge von ca. 13mm; es hält einer Zugkraft von rund 180Nm stand[12]. Das kräftige und am tiefsten liegende hintere Band zieht von der Innenseite des Malleolus lateralis zum Processus posterius des Sprungbeines. Ein Teil dieses Bands verbindet sich mit dem darüber gelegenen Tibiofibularband und bildet so eine Verstärkung der Gelenkkapsel in diesem Bereich. Diese Bandformation wird auch als „tibial slip“ bezeichnet[1–3]. Außerhalb der Gelenkkapsel befindet sich das runde, von der Spitze der Fibula nach unten hinten zum Calcaneus verlaufende Lig. calcaneofibulare und stellt den wichtigsten passiven Stabilisator außenseitig des oberen und unteren Sprunggelenkes dar, es besitzt eine mittlere Länge von rund 20mm, ist bei Dorsalflexion maximal angespannt und hält einer Zugbelastung von bis zu 316Nm stand [1,2,12]

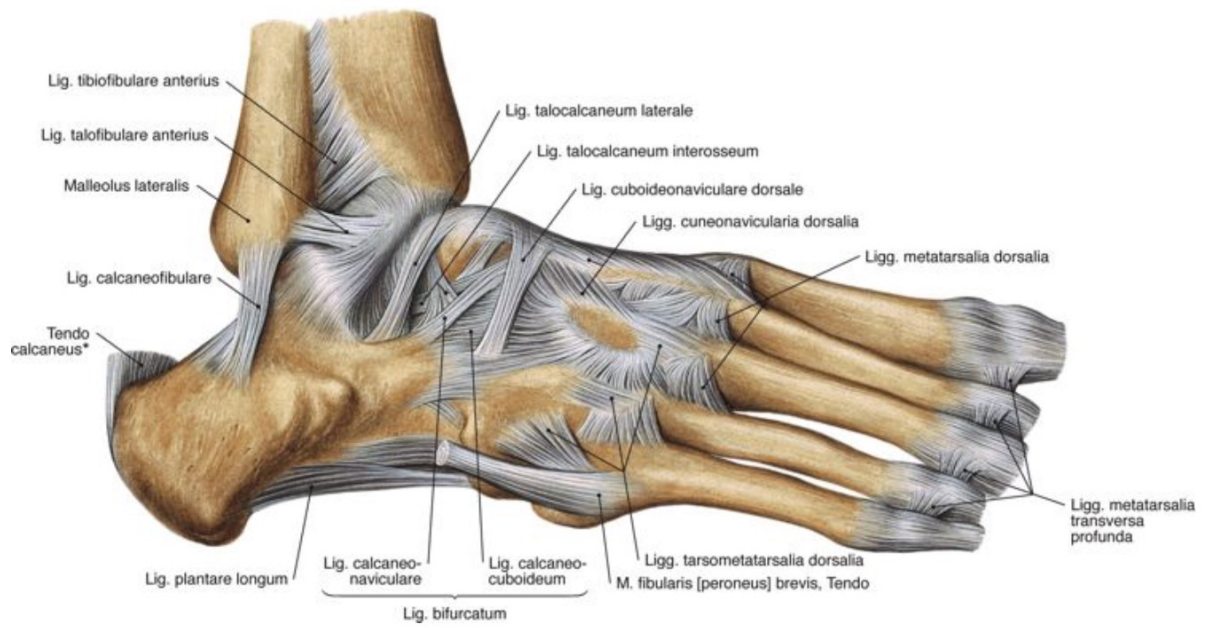


Abbildung 3: Der Bandapparat von lateral [8]

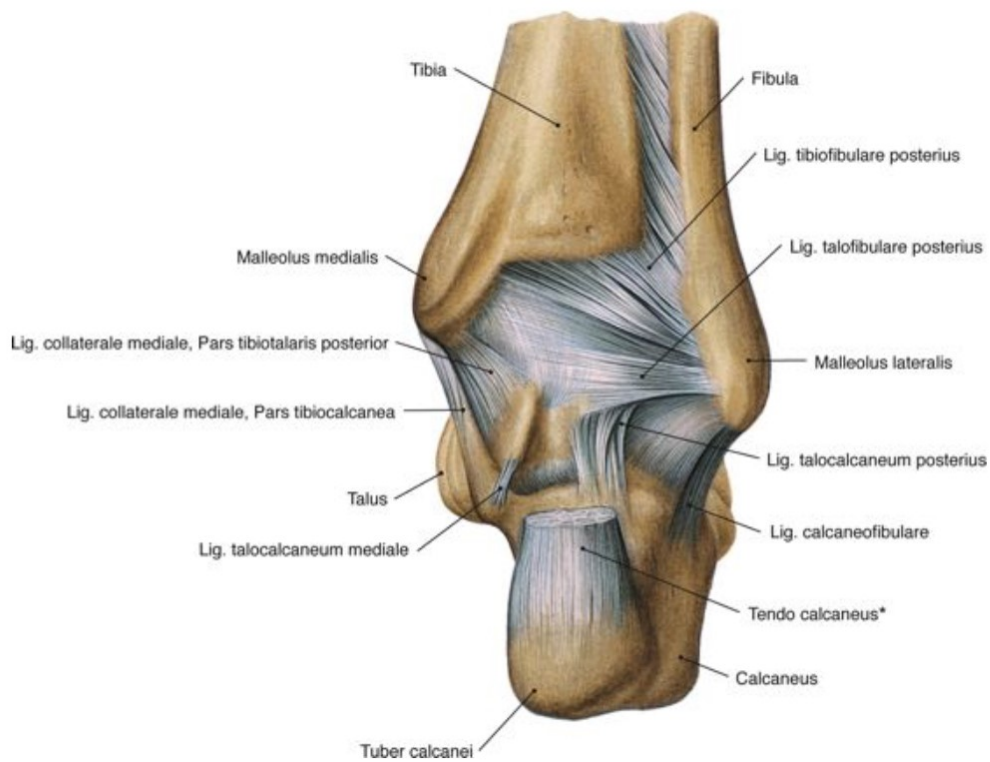


Abbildung 4: Der Bandapparat von dorsal [8]

#### 1.2.4 Muskulatur und Sehnen im Bereich des Oberen Sprunggelenks

Die Muskeln und Sehnen im Bereich des Oberen Sprunggelenkes sind sowohl für dessen Bewegungen als auch für die Stabilität zuständig. So werden hier die relevanten Muskeln für die im nächsten Kapitel 1.3 „Bewegungen im oberen Sprunggelenk und relevante Biomechanik“ beschriebenen Bewegungen und biomechanischen Verhältnisse beleuchtet. Keiner der Muskeln setzt am Talus an, sondern sie überspannen ihn allesamt[6], nahezu alle wirken auf mehrerer Gelenke. Hier wird nur auf ihre Funktion im Oberen Sprunggelenk eingegangen.

Im Bereich des Fußrückens (Dorsum pedis) finden sich, die unter dem Retinaculum mm. extensorum superficialis et inferius verlaufenden, für die Dorsalflexion zuständigen M. tibialis anterior, der M. extensor hallucis longus und der durch das Retinakulum nach lateral abgedrängte M. extensor digitorum longus.

An der medialen Seite verlaufen die Sehnen der Beugemuskeln in einer durch das Retinaculum musculorum flexorum abgeschlossenen Furche hinter dem Malleolus medialis. In dieser befinden sich die für die Plantarflexion zuständigen Sehnen des M. tibialis posterior, M. flexor digitorum longus, sowie des M. flexor hallucis longus.

Lateral finden sich hinter dem Malleolus lateralis verlaufend die Sehnen der Mm. fibulares (peronei) longus et brevis. Diese verlaufen in Sehnenscheiden durch einen, durch das Retinaculum musculorum fibularis (peroneaorum) superius et inferius abgeschlossenen Kanal zwischen Malleolus laterlis und Calcaneus nach distal[3,9].

An der Rückseite befindet sich die Achillessehne (Tendo calcaneus), sie ist die Sehne des M. triceps surae, dem stärksten Plantarflektor, - bestehend aus M. soleus und M. gastrocnemius - streckt sich mit Ansatz am Calcaneus über den Talus hinweg [3]. Ihr angeschlossen ist die Sehne des M. plantaris.

### **1.3 Bewegung im Oberen Sprunggelenk und relevante Biomechanik**

Um die im Oberen Sprunggelenk stattfindenden Bewegungen zu verstehen ist es wesentlich, sich genauer mit dessen Biomechanik zu beschäftigen. Hierfür werden in diesem Kapitel die Bewegungsumfänge, Achsenverhältnisse, Form der relevanten Gelenkflächen und deren Einfluss, sowie der Effekt verschiedener Strukturen auf dessen Bewegung eingegangen.

Das Obere Sprunggelenk ist Teil einer in sich verdrehten Bogenkonstruktion, die das Gewölbe des Fußes darstellt – seine Aufgabe ist es, das Gewicht und die Bewegungen des Körpers über den Unterschenkel kommend aufzunehmen und zu verteilen; dies entspricht einer Last von bis zu 200-300Nm pro cm<sup>2</sup>. Seine Funktion ist für den aufrechten Gang auf zwei Beinen unentbehrlich[5,9,12].

In seiner Form stellt das Talocruralgelenk ein Scharniergelenk (Ginglymus) dar und besitzt somit per definitionem nur eine einzige Achse, um die Bewegungen möglich sind. Bei genauerer Betrachtung wird aber klar, dass es sich hier allerdings um kein ideales Scharniergelenk handelt und somit die oft angegebene Einfachheit des Gelenkes und seiner Bewegungen in Frage zu stellen ist[1,7,14,15].

Die möglichen Bewegungen um die Transversalachse sind das Wegführen des Fußrückens von der ventralen Tibiakante, dies wird als Plantarflexion bezeichnet, und das Heranziehen von diesem an die Schienbeinkante, die Dorsalflexion.

Der Bewegungsumfang von diesen beiden wird meist mittels Neutral-Null-Methode angegeben. Per Definition ist die Nullstellung des Fußes dann erreicht, wenn die Fußsohle im 90 Grad Winkel zu der Achse der Tibia steht. Von dieser Neutralstellung aus lässt sich der Fuß 40-50 Grad plantar flektieren und 20-30 Grad dorsalextendieren. Der Bewegungsumfang ist in der Literatur als sehr variabel beschrieben. [10,12,15,16].

Auf die Anatomie der Gelenkflächen wurde bereits in den Kapiteln 1.2.1 „Die knöchernen Bestandteile des oberen Sprunggelenks - Tibia, Fibula und Talus“ und 1.2.2 „Articulatio Talocruralis“ eingegangen.

Nun werden die Einflüsse dieser anatomischen Gegebenheiten auf die Achsen-Verhältnisse und Bewegungen des Talus im Oberen Sprunggelenk beleuchtet.

Im Gegensatz zu früheren Studien, die eine einzige, einfache, als finit zu bezeichnende, transversale, näherungsweise horizontal verlaufende Gelenkachse annahmen[18], sind diese laut neueren Erkenntnissen deutlich komplexer. Wird die Bewegungsachse des Oberen Sprunggelenks meist als durch die Spitze des Malleolus medialis und lateralis gehend bezeichnet[1,3,4,9,16], wird bei genauerer Betrachtung der Form des Talus klar, dass es zwei Achsen geben muss. Diese Achsen werden als biphasisch, also aus 2 finiten Achsen für zwei Bewegungen angenommen. Oder als infinite Achse, die aus einer, sich mit der Bewegung verändernden Achse besteht[12].

Betrachtet man die laterale Seite des Talus, so stellt die nahezu vertikal zur Achse stehende Gelenksfläche einen Teil eines einzigen Kreises dar. Die Gelenksachse verläuft immer durch den Mittelpunkt eines Kreises. In diesem Fall liegt die Richtung Processus lateralis tali auf der Gelenkfläche, so gibt es auf der lateralen Seite nur einen Achsenpunkt[7,15]. Auf der medialen Seite des Talus stellt die Gelenksfläche allerdings zwei Bögen dar, also ergeben sich zwei Kreise, die zwei Mittelpunkte besitzen und somit zwei Achsen auf dieser Seite verlangen. Der Kreis mit dem kleineren Radius bestimmt über seinen Mittelpunkt die Achse im vorderen Drittel und liegt knapp unter dem Krümmungsumschlag der medialen Gelenksfläche. Jener Mittelpunkt des Kreises mit dem größeren Radius, darstellend die im hinteren Drittel gelegene Achse, liegt zwischen den Facies articulares calcanei media et anterior des Talus[7,15]. Dies bildet, von oben betrachtet, eine mit der Bewegung wandernde Achse [7].

Diese beiden Achsen sind abhängig von der Bewegung.

So wandert die „vordere Achse“ bei Dorsalflexion konsequent nach oben, damit verbindet sie die Mittelpunkte der Kreise.

Bei der Bewegung der Plantarflexion verkippt sie hingegen nach unten.

Der Übergang von einer Achse in die andere scheint nahe der Neutralposition des Talus statt zu finden.

In den Achsenlagen gibt es deutliche Abweichungen. Teilweise ist die der Dorsalflexion nahezu horizontal, jedoch öfter die der Plantarflexion. So sind eindeutig zwei verschiedene Achsen zu beobachten mit einer mittleren Abweichung von nahezu 40 Grad. In seltenen

Fällen werden die Gelenksflächen lateral und medial von gleich großen Kreisen beschrieben, in diesem Fall findet man keinen Unterschied zwischen beiden Achsen[15,19,20].

Bei der Dorsalflexion wird der Talus von der Tibia mit dem fest verbundenen Malleolus medialis geführt. Durch die vorhin beschriebene schraubige Form der lateralen Gelenksfläche des Talus wird die Syndesmose auseinandergedrückt und damit die seitlichen Gelenksflächen des Talus fest von den Malleolen umschlossen, auch die Fasern der Membrana interossea stellen sich so horizontaler ein. Nach kranial medial zeigt sich ein bei dieser Bewegung deutlicher Spalt zwischen Facies articularis superior der Trochlea tali und dem Gelenksplafond von dorsal. Dieser stellt mit bis zu 1,6mm den größten Abstand der Flächen in diesem Gelenk dar. Im letzten Drittel der Bewegung kommt es durch die zunehmende Verdrängung des Malleolus lateralis zu einer Bewegung in der gesamten Fibula, entsprechend der Form des Talus - teilweise in allen drei Raumebenen [7,13,21,22].

Bei der Plantarflexion wird der Talus von der Fibula geführt. Bei dieser Bewegung, bis 5 Grad Plantarflexion aus der Nullstellung, ist der Kontakt zwischen Facies superior der Trochlea tali und Facies articularis inferior der Tibia mit bis knapp 85% am größten. In weiterer Plantarflexion lockert sich die Führung der Articulatio talocruralis durch die nach dorsal schmaler werdende Trochlea tali. An den Seiten wird der Kontakt, mit fortschreitendem Verkippen der Achse nach medial unten, geringer. Zu der Innenseite hin entfernt sich der Talus vom Malleolus medialis durch die nach hinten schmaler werdende Talusrolle und das schräg verlaufende Lig. tibiofibulare anterius, das mit zunehmender Plantarflexion den Talus immer weiter nach lateral zieht – so besteht lateral weiterhin guter Kontakt.

Im vorderen Teil der Sprungbeinrolle besitzt die mediale Rollenkante einen kleineren Radius als die laterale Rollenkante. Daher findet sich bei der Plantarflexion durch die bestehenden Achsen- und Bandverhältnisse am OSG am lateralen Teil der Talusrolle ein größerer zurückgelegter Weg.

Die Fibula bewegt sich hierbei leicht nach distal und innen, dadurch stellen sich die Fasern der Membrana interossea steiler[7,9,10,12,14,20,21].

Eine weitere, in der Literatur weniger ausführlich beschriebene Bewegungen des Talus, ist

dessen Rotation in Plantar- und Dorsalflexion um die vertikale Achse, zurückzuführen auf die Form der Talusrolle und den Spannungsverhältnissen von Lig. tibiofibulare anterius et posterius. Diese wird mit ca. 24 Grad beschrieben. Durch Gewichtszuladung, wie beispielsweise im Stand, verringert sich der Umfang dieser Rotation um ca. 7,5 Grad. Andere Autoren beziehen sich rein auf die Schraubenform der Talusrolle und geben so einen Versatz dieser um ca. 2,6mm nach lateral an [11,16,22].

Eine jüngere, In-vivo durchgeführte Studie bezeichnet eine Rotation des Talus um die Vertikalachse, also in der Transversalebene, mit einem Gesamtumfang von  $8,7^\circ \pm 3,9^\circ$ , sowie eine Bewegung von  $12,2^\circ$  in der Frontalebene. Bei beiden Bewegungen wird eine sehr große individuelle Schwankungsbreite zwischen den ermittelten Messwerten der einzelnen Präparate beschrieben[24].

Eine weitere, mit frisch gekühlten Amputaten durchgeführte Arbeit beschreibt eine ähnliche ROM in der Transversalebene von  $5^\circ$ - $10^\circ$ [25].

In weiteren Arbeiten finden sich Hinweise auf eine 5-6 gradige Rotation des Talus in der Horizontalebene, sowie einer Außen-/Innenrotation des Talus in der Frontalebene von ca.  $5,6^\circ$ [26,27].

Sämtliche Achsen, die im Talus auftreten, kreuzen sich nahe dem Zentrum der Trochlea tali[20].

All die beschriebenen Bewegungen im OSG werden von mehreren, aktiven und passiven Strukturen geführt und/oder gehemmt und damit stabilisiert. Eine wesentliche Rolle spielen dabei die Bänder, die alle nahe der Plantar- und Dorsalflexionsachse an den Malleolen entspringen. Deren Anatomie wurde bereits im Kapitel 1.2.3 „Der Bandapparat“ behandelt.

Der Syndesmosen-Komplex zwischen Tibia und Fibula, der als Fortsetzung der für die federnde Festigkeit der Malleolengabel entscheidenden Membrana interossea gilt, führt den Talus und sichert ihn vor Verkippung, also Rotation um die Längsachse.

In der Plantarflexion wird das Lig. talofibulare anterius angespannt und hat so eine bremsende Wirkung. Des Weiteren verhindert es den anterioren Talusvorschub und die laterale Aufklappbarkeit. Ähnliche Funktionen erfüllt das Lig. calcaneofibulare bei Dorsalflexion.

An der medialen Seite üben die vorderen Anteile des Lig. deltoideum, während der Plantarflexion, eine bremsende Wirkung aus, indem sich dessen vordere Anteile verdrehen.

Weiter hemmende Faktoren der Plantarflexion sind Spannung der vorderen Kapselwand, der Tonus der Extensoren am Unterschenkel sowie knöcherne Faktoren (hintere Kante der Tibia und Processus posterior tali).

In der Dorsalflexion zeigt vor allem das starke Lig. talofibulare posterius seine Wirkung, indem es sich bei dieser Bewegung anspannt. Neben diesem hemmen auch die Gelenkkapsel, der M. triceps surae sowie knöcherne Faktoren (Vorderkante Tibia und Collum tali) diese Bewegung[13,28,29].

Vor seitlicher Aufklappbarkeit des Talocruralgelenks schützen die medialen und lateralen Bandzüge.

Während in der Literatur Hinweise darauf zu finden sind, dass das Weichteilgewebe für rund 70% der rotarischen Knöchelstabilität verantwortlich ist[30], so spielt auch die Last des Körpergewichts, die die Gelenksflächen aneinander drückt, eine entscheidende Rolle in der Stabilität[13,23]. So kann zwischen aktiven, neuromuskulären und passiven, obig erwähnten Stabilisatoren unterscheiden werden[12].

## **2 Material und Methoden**

Bei dieser Arbeit wurden insgesamt 26 Fuß-Nass-Präparate, konserviert nach der Methode nach Thiel, in einer eigens dafür angefertigten Messapparatur untersucht. Die Präparate wurden von dem Anatomischen Institut Graz zur Verfügung gestellt und bereits vorpräpariert. So wurden von den distal vom Kniegelenk abgetrennten Präparaten sämtliche Weichteile, bis auf die Membrana interossea und den Bandapparat, entfernt. Es wurden 20 linke und 6 rechte Sprunggelenke untersucht. Eine Unterscheidung zwischen weiblichen und männlichen Präparaten sowie die Bestimmung deren Alters wurde nicht vorgenommen. Offensichtlich vorbestehend deformierte oder insuffizient präparierte Gelenke wurden von der Studie ausgeschlossen.

### **2.1 Der Messapparat**

Um die Umfänge der Bewegungen im oberen Sprunggelenk messen zu können, wurde eigens dafür eine Apparatur konstruiert, in der die Präparate eingespannt wurden.

Diese bestand aus einem fixen Holzrahmen mit einer, an der Seite angebrachten Metallstange (Abb. 5a). An dieser ist ein Holzarm zur Mitte hin durch eine Rändelschraube befestigt (Abb. 5b). Der Holzarm trägt an seinem Ende einen vertikal gerichteten

10mm/12mm im Durchmesser haltenden Metallstift, auf dem der davor aufgebohrte Tibiaschaft des Versuchsobjekts aufgesteckt wurde (Abb. 6). Sowohl der Metallstift als auch die Tibia wurden mit Rändelschrauben fixiert. Dadurch waren Adjustierungen im Sinne einer Rotation um die Vertikalachse und eine Höhenverstellung in der Frontalebene möglich. So konnte für jedes Präparat eine optimale Ausgangsposition eingestellt werden. Von oben herab wurden über eine aufgelegte Stange zwei Gummizüge, mit an ihnen befestigten Ketten, gehängt. Jeder dieser Gummizüge wurde so angespannt, dass mit einer Zugkraft von je 3 Kilogramm auf der Innen- und Außenseite der Fuß (wie folgend beschrieben), respektive indirekt der Talus in die Malleolengabel gepresst wurde (Abb. 7). Die Ketten der Züge wurden an zwei mit Haken versehenen Holzklötzen befestigt (Abb. 5c).

Die genannten Holzklötze waren auf die Enden eines durch den Calcaneus gebohrten Steinmann-Pins aufgesteckt. So wurde der Talus in die Sprunggelenkgabel gepresst und eine Gewichtsbelastung konnte simuliert werden.

Mittig befand sich auf dem Boden des Apparates ein entfernbarer Holzschemel, auf diesem wurde mit Hilfe eines ebenso losen Holzkeiles der Fuß in einer Neutralposition ausgerichtet (zur Orientierung dazu diente v.a. die Stellung des Fersenbeines im Vergleich zur Vertikalen) (Abb. 5d).

Auf dem Boden des Apparates war eine Messscheibe mit aufgedrucktem Winkelmaß aufgelegt, mit dieser wurde die Seitabweichung des Talus bestimmt (Abb. 5e). An der Seite des Rahmens wurde eine weitere Messplatte mit Winkelmaß mit Klemmen befestigt, um die Bewegungen in Plantar- und Dorsalflexion zu messen (Abb. 6). Die beiden Winkelmaße waren somit frei beweglich und konnten für jedes Präparat in einer individuellen Null-Position ausgerichtet werden.

Als spezielle Messvorrichtung wurde eine Laserpointer-Konstruktion gebaut: Ein Laserpointer ist auf zwei, im rechten Winkel zueinanderstehenden Wasserwaagen fixiert. Dadurch kann mit Hilfe der Anzeigen (horizontal und sagittal) der Strahl des Laserpointers exakt vertikal nach unten eingerichtet werden (Abb. 8).

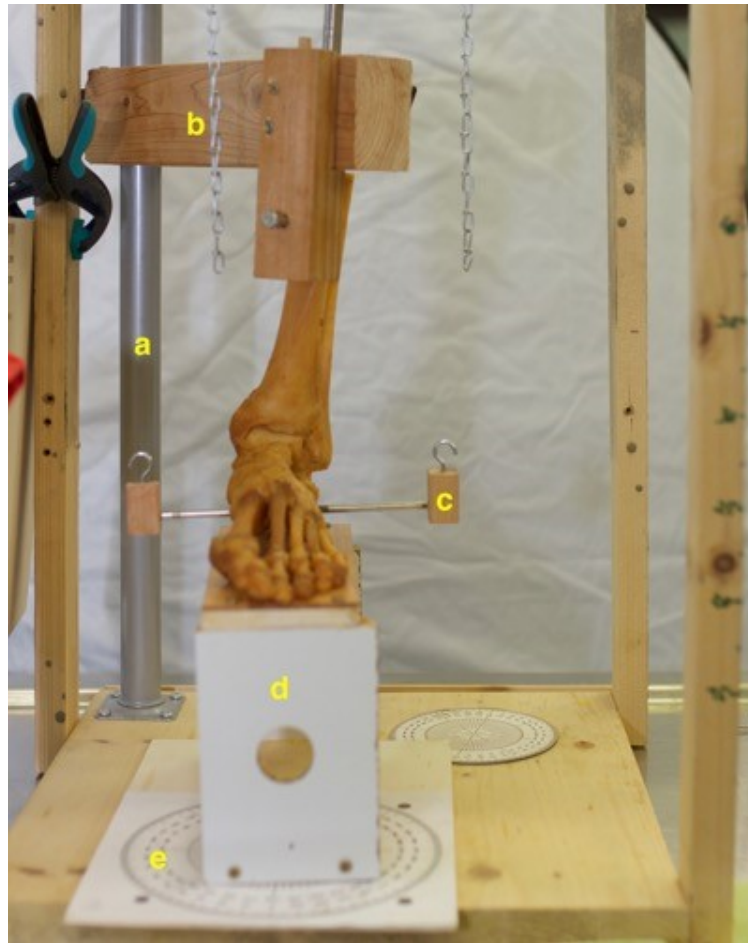
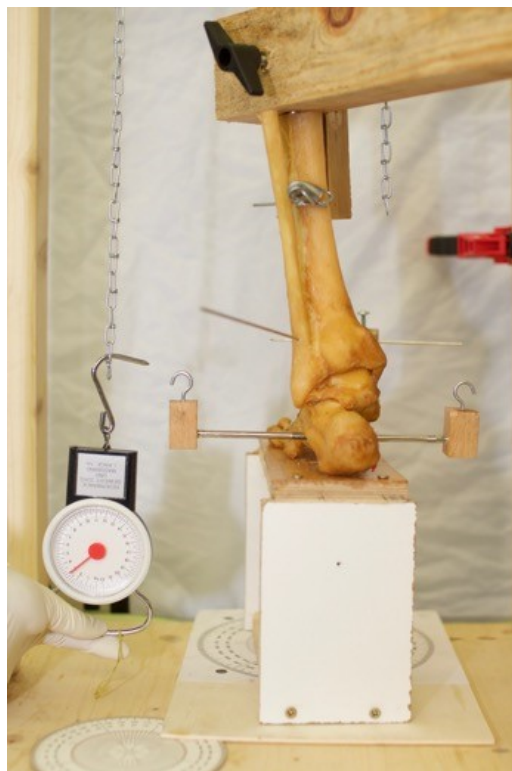


Abbildung 5: Der Messapparat a...Metallstange, b...Holzarm, c...Befestigung für Zugmechanismus, d...Holzschemel, e...Winkelmaß



*Abbildung 6: Positioniertes Präparat in Messapparat von lateral*



*Abbildung 7: 3kg Zug pro Gummiband, gemessen mit Federwaage*



*Abbildung 8: Laserpointer-Konstruktion*

## 2.2 Ablauf der Versuche

### 2.2.1 Vermessung der Äußeren Anteile des Sprunggelenks

Mittels digitaler Schieblehre wurden die äußeren Anteile des oberen Sprunggelenks wie folgt gemessen:

- Breite des OSG: Die Schieblehre wurde an der breitesten Stelle des Malleolus medialis angesetzt und horizontal Richtung Fibula ausgerichtet.
- Sagittaler Durchmesser der Extremitas distalis tibiae, wird als „Tiefe der Tibia“ bezeichnet: Der Messpunkt wurde an der dicksten Stelle der Extremitas distalis tibiae, horizontal/parallel zum Grund gewählt.
- Sagittaler Durchmesser der Extremitas distalis fibulae, wird als „Tiefe der Fibula“ bezeichnet: Gemessen wurde an der dicksten Stelle der Fibula entsprechend dem Malleolus lateralis.



*Abbildung 9: Vermessung der Äußeren Anteile des Sprunggelenks mittels Schieblehre*

## **2.2.2 Vorbereitung**

### **2.2.2.1 Einspannen des Präparates in den Messapparat**

Der Markraum des Tibiaschaftes wurde entsprechend seiner Dicke mit einem 10mm oder 12mm Bohrer aufgebort. So wurde das Präparat auf den vorhin beschriebenen Metallstift aufgeschoben und mit einer Schraube fixiert. Dabei wurden die Mess-Arme so eingestellt, dass die Fußsohle horizontal auf dem mittig auf der Grundplatte stehenden Schemel zu stehen kam. Mit Hilfe eines Keils wurde der Calcaneus so ausgerichtet, dass er – von hinten betrachtet - senkrecht zur ebenen Aufsetzplatte des Schemels ausgerichtet war. So befand sich nun das Präparat in Nullstellung.

### **2.2.2.2 Setzen der Drähte**

Ein Steinmann-Pin wurde transversal durch den Calcaneus, in Verlängerung des Margo anterior der Tibia, gebohrt. Diese Stelle in der Verlängerung der ventralen Tibiakante wurde experimentell ermittelt, da in dieser Position und unter Zug der lotrecht ausgerichteten Gummizüge eine stabile Stellung des Fußes nach dem Entfernen des Ausrichtschemels in der Neutralposition gegeben war, bei bewegen des Fußes in Plantarflexion oder Dorsalflexion durch das Verschieben des Kraftvektors nach hinten oder vorne eine durch Feder-/Gummizug geführte maximale Bewegung in Beugung und Streckung eingeleitet werden konnte.

Um die Bewegungen des Talus messen zu können, wurde ein Kirschner-Draht (K-Draht) in das Caput tali, in der Verlängerung der medialen Kante des Os metatarsale 1, gebohrt (Abb. 10). Auf diesen K-Draht wurde ein kleiner Holzblock mit einem weiteren, horizontal ausgerichteten Draht mindestens 1cm aufgeschoben. Mit diesem konnte die Innen- bzw. Außenrotation des Talus um seine Längsachse bestimmt werden (Abb. 11).

Mit einer Feder, an der 2 Drähte (für das sichere Spreizen zwischen Tibia und Fibula) befestigt waren, wurde die Membrana Interossea mit einem Druck von rund 3 kg (abhängig vom Abstand zwischen den beiden Knochen) aufgespannt (Abb. 12).

Im Anschluss wurden an die beiden Enden des Steinmann-Pins die Holzklötze mit den kleinen Haken aufgeschoben und die Ketten der Gummizüge unter vorgenanntem Zug von jeweils 3 kg daran befestigt.



*Abbildung 10: Setzen der Drähte*



*Abbildung 11: Gesetzte Drähte, Ansicht von frontal. Draht zur Bestimmung von Innen- bzw. Außenrotation*



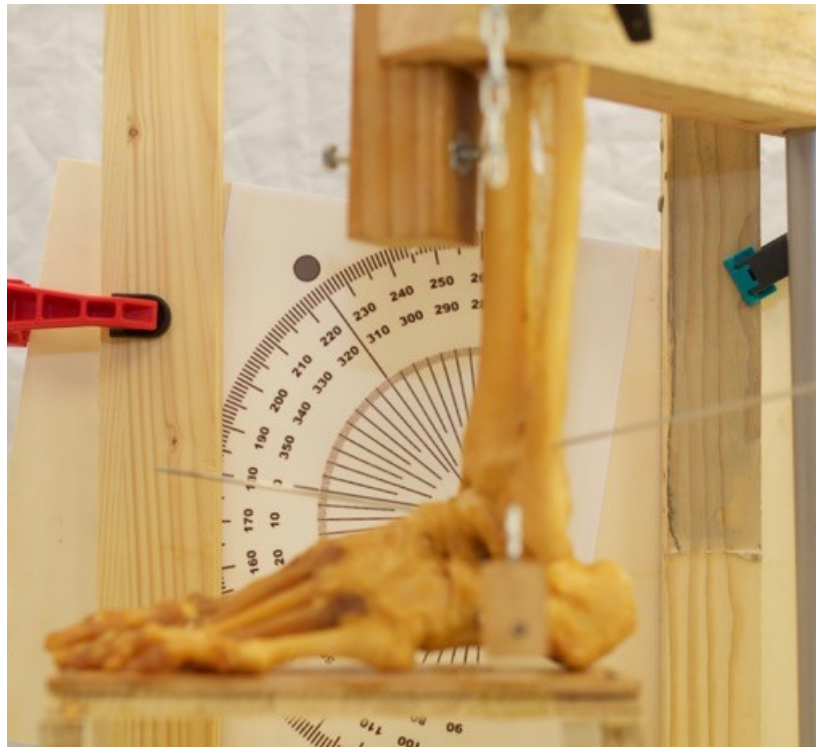
*Abbildung 12: Aufspannen der Membrana Interossea mittels Feder*

### **2.2.2.3 Einrichten der Skalen**

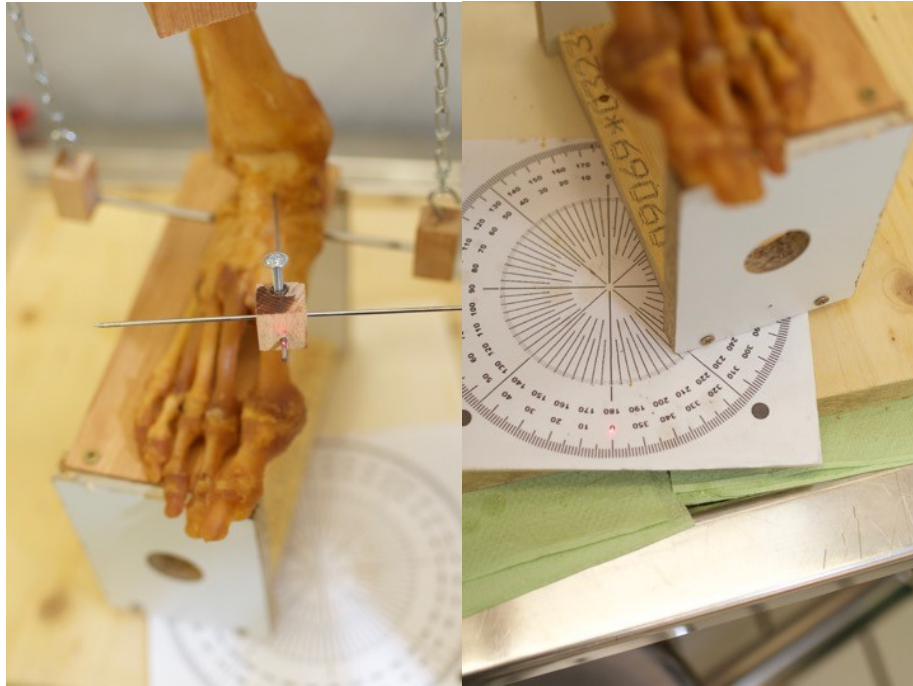
1.) Die an der Seite des Apparates angeklebte Messskala wurde so eingestellt, dass deren Nulllinie mit dem im Talus befindlichen Draht übereinstimmte (Abb. 13). Mit einer digitalen Wasserwaage wurde der Winkel des so bestimmten Nullwertes ermittelt.

2.) Das auf dem Boden der Konstruktion, also in Horizontalebene, liegende Winkelmaß wurde von oben mit der Laserpointer-Konstruktion ausgerichtet. Dazu wurde diese auf einem Brett, das oben auf den Rahmen aufgelegt wurde, mit Hilfe der Libellen der Wasserwaagen gerade platziert und der Lichtstrahl wurde über die Spitze des im Talus befindlichen K-Drahtes auf die untenliegende Skala projiziert (Abb. 14). Durch die Welleneigenschaften eines Laserstrahles bündeln sich die Strahlen, nachdem sie auf den im Talus eingebahten Draht als Hindernis aufgetroffen sind, erneut punktförmig hinter dem Draht und bilden so einen gut sichtbaren Punkt auf der Messskala. Die Skala wurde so ausgerichtet, dass sie in dieser Stellung des Fußes Null entspricht.

3.) Der auf dem K-Draht des Talus befestigte Draht in dem Holzblock wurde horizontal ausgerichtet mittels einer digitalen Wasserwaage und mit einer an der Rückseite der Messapparatur befestigten weiteren Winkelschablone/Platte mit Messskala abgeglichen. Nun wurde der Schemel, welcher bis jetzt die Neutralposition des Fußes gewährleistete, entfernt, um die Versuche in Plantar- und Dorsalflexion durchführen zu können.



*Abbildung 13: Einrichten der Skala in Sagittalebene*



*Abbildung 14: Einrichten der Skalen in Transversalebene*

### **2.2.3 Messungen in Plantarflexion**

Der Fuß wurde einige Male im Sprunggelenk gebeugt und gestreckt, um anschließend eine endgradige Plantarflexion erreichen zu können. Durch den im Calcaneus platzierten Steinmann-Pin war es über die Gummizüge möglich, den Fuß mit einem Impuls in die maximale Plantarflexion zu bringen und er verblieb von selbst in dieser Position. Selbiges gilt auch für die Dorsalflexion.

- Die Plantarflexion: Das Ausmaß der Bewegung des Talus in der Sagittalebene, also um die Transversalachse, wurde mittels digitaler Wasserwaage über den im Talus befindlichen K-Draht von der Seite aus bestimmt. Der ermittelte Wert wurde zu dem davor bestimmten Nullwert addiert.



*Abbildung 15: Messung mit digitaler Wasserwaage in Plantarflexion*

- Die Rotation des Talus in der Plantarflexion: Von vorne wird die Rotation des Talus mit der digitalen Wasserwaage über den auf dem K-Draht des Talus befindlichen, ursprünglich horizontal ausgerichteten Draht bestimmt. Bei Plantarflexion handelte es sich stets um eine Außenrotation in der Frontalebene.
- Die Bewegung des Talus in der Transversalebene, also um die Vertikalachse, die Seitabweichung: Mit der Laserpointer-Konstruktion wurde, wie vorhin beschrieben, von oben der Laserstrahl über den Draht im Talus auf die Messplatte projiziert und der Wert abgelesen. Positive Werte bedeuteten, dass sich der Bohrdraht auf der Skala medial des Nullwertes befand, so kann diese Bewegung als mediale Seitabweichung beschrieben werden. Negative Werte bedeuten, dass sich der Bohrdraht auf der Skala lateral vom Nullwert befunden hat, so wird diese Bewegung als laterale Seitabweichung bezeichnet.

## 2.2.4 Messungen in Dorsalflexion

Die Messwerte in der Dorsalflexion wurden analog zu denen der Plantarflexion erhoben. Unterschiede waren, dass der Nullwert stets von dem erhobenen Wert für die Dorsalflexion subtrahiert wurde, so wie es sich bei der Rotation des Talus in Dorsalflexion immer um eine Innenrotation handelte.



*Abbildung 16: Präparat in Dorsalflexion*

## 3 Ergebnisse und Resultate

### 3.1 Auswertung der Messergebnisse

Es werden die Messwerte, die wie in Kapitel 2 „Material und Methodik“ beschrieben bestimmt wurden, nun ausgewertet und statistisch, mit Hilfe von Mittelwert, Standardabweichung, sowie Maximal- und Minimalwert dargestellt.

Auf Grund der deutlichen Unterschiede der Gruppengrößen von linken und rechten Sprunggelenken (links: n=20 / rechts: n=6) wurde bei dieser Arbeit keine Trennung der beiden Gruppen vollzogen.

#### 3.1.1 Messergebnisse der äußeren Anteile des Sprunggelenks

- Die breite des oberen Sprunggelenks: Gemessen von der breitesten Stelle des Malleolus medialis horizontal in Richtung Fibula ergab einen Mittelwert von 64,27mm  $\pm$  5,58mm Standardabweichung. Es wurde ein Maximalwert von 76mm gemessen, sowie ein Minimalwert von 54mm.
- Die Tiefe der Tibia: Die an der dicksten Stelle, von anterior nach posterior, der distalen Tibia ermittelten Messwerte hatten einen Mittelwert von 39,91mm  $\pm$  3,65mm Standardabweichung. Es wurde eine maximale Tiefe von 47mm und eine minimale Tiefe von 33,1mm gemessen.
- Tiefe der Fibula: Nach dem Schema der Tibia wurde auch die Fibula an der dicksten Stelle, entsprechend dem Malleolus lateralis vermessen. Es ergab sich ein Mittelwert von 26,27mm  $\pm$  2,35mm Standardabweichung. Ein Maximalwert von 31,7mm und ein Minimalwert von 22,9mm (Tab. 1).

<b>Messergebnisse der äußeren Anteile des Sprunggelenks (Angaben in mm)</b>				
<b>Messpunkte</b>	<i>Mittelwert</i>	<i>Standartabw.</i>	<i>Max.</i>	<i>Min.</i>
<b>Breite OSG</b>	64,27	5,58	76	54
<b>Tiefe Tibia</b>	39,91	3,65	47	33,1
<b>Tiefe Fibula</b>	26,27	2,35	31,7	22,9

*Tabelle 1: Messergebnisse der äußeren Anteile des Sprunggelenks*

### **3.1.2 Messergebnisse in Plantarflexion**

Um die Plantarflexion korrekt wiederzugeben wurde der als erstes ermittelte Nullwert zu den Messergebnissen in Plantarflexion addiert (siehe Kapitel 2.2.3 „Messungen in Plantarflexion“) und wird von nun an als „Plantarflexion real“ bezeichnet.

- Die Auswertung der Messwerte ergab für die Plantarflexion real einen Mittelwert von  $27,42^\circ \pm 8,26^\circ$  Standardabweichung. Es wurde eine maximale Plantarflexion von  $49,5^\circ$  und eine minimale Plantarflexion von  $11,2^\circ$  gemessen.

Die Bewegung des Talus, welche in der Frontalebene beschrieben werden kann, brachte folgende Messergebnisse:

- Es fand in allen untersuchten Sprunggelenken eine Außenrotation bei Plantarflexion statt. Diese hatte einen Mittelwert von  $16,16^\circ \pm 7,88^\circ$  Standardabweichung. Maximal rotierte der Talus  $28,7^\circ$  nach außen, während die kleinste Außenrotation lediglich  $3,2^\circ$  betrug.
- In allen 26 untersuchten Sprunggelenken konnte keine Innenrotation des Talus bei Plantarflexion beobachtet werden.

Die Seitabweichung in der Transversalebene wurde, wie in dem Kapitel 2.2.3 „Messungen in Plantarflexion“ beschrieben, erhoben. Es wurde eine absolute Häufigkeit von 24 medialen Seitabweichungen bei 26 untersuchten Präparaten festgestellt. Nur 2 von 26

wichen nach lateral ab. Dies ergibt eine relative Häufigkeit von 92,31% medialen zu 7,69% lateralen Abweichungen des Talus um die Vertikalachse.

- Die mediale Seitabweichung fand ihren Mittelwert bei 17,92° bei  $\pm 11,90^\circ$  Standardabweichung. Das Maximum der Seitabweichung betrug 50°, das Minimum 4°.
- Bei der lateralen Seitabweichung, die bei lediglich 2 der untersuchten Sprunggelenke in Plantarflexion auftrat, hat es natürlich keinen Sinn, eine statistische Auswertung der Messergebnisse durchzuführen. Hier wurde es rein der Vollständigkeit halber gemacht: Mittelwert  $11,5^\circ \pm 4,5^\circ$  Standardabweichung, Maximalwert: 16°, Minimalwert: 7° (Tab. 2).

<b><i>Messergebnisse in Plantarflexion (Angaben in Grad)</i></b>				
<b><i>Messung</i></b>	<b><i>Mittelwert</i></b>	<b><i>Standartabw.</i></b>	<b><i>Max.</i></b>	<b><i>Min.</i></b>
<b>Plantarflexion real</b>	27,42	8,26	49,5	11,2
<b>Außenrotation</b>	16,16	7,88	28,7	3,2
<b>Innenrotation</b>	-	-	-	-
<b>Med. Seitabweichung (24/26)</b>	17,92	11,90	50	4
<b>Lat. Seitabweichung (2/26)</b>	11,5	4,5	16	7

*Tabelle 2: Messergebnisse in Plantarflexion*

### **3.1.3 Messergebnisse in Dorsalflexion**

Zu der Bestimmung der tatsächlichen Dorsalflexion wurde der Nullwert von den, in der Dorsalflexion erhaltenen Messwerten subtrahiert (siehe Kapitel 2.2.4 „Messungen in Dorsalflexion“), dieser errechnete Wert wird ab jetzt als „Dorsalflexion real“ bezeichnet.

- Für die Dorsalflexion wurden Messwerte erhoben, die einen Mittelwert von  $20,2^\circ \pm 9,2^\circ$  Standardabweichung ergeben. Die maximale Dorsalflexion betrug 37,6° bei einer minimalen Bewegung von 0,9°.

Um die sagittale Achse konnten folgende Bewegungen des Talus in Dorsalflexion beobachtet werden:

- Bei dieser Bewegung fand in allen untersuchten Sprunggelenken eine Innenrotation des Talus statt. Diese hatte einen Mittelwert von  $7,57^\circ \pm 6,60^\circ$  Standardabweichung. Die maximale Innenrotation lag bei  $28^\circ$  die kleinste bei  $0,9^\circ$ .
- Hier konnte in keinem der 26 untersuchten Präparaten eine Außenrotation beobachtet werden.

Die Seitabweichung des Talus in der Transversalebene wurde in der Dorsalflexion äquivalent zur Plantarflexion bestimmt. Bei den Ergebnissen fand sich hier eine absolute Häufigkeit von 9 medialen Seitabweichungen zu 17 lateralen Seitabweichungen. Dies ergibt eine relative Häufigkeit von 34,61% medialen zu 65,38% lateralen Seitabweichungen.

- Bei der medialen Seitabweichung wurde ein Mittelwert von  $9,39^\circ \pm 4,48^\circ$  Standardabweichung ermittelt. Der Maximalwert lag bei  $15^\circ$  der Minimalwert bei  $2^\circ$
- Die laterale Seitabweichung in Dorsalflexion hatte einen Mittelwert von  $13,76^\circ$  bei  $\pm 10,54^\circ$  Standardabweichung. Die größte Seitabweichung nach lateral lag bei  $38^\circ$ , die geringste bei lediglich  $1^\circ$  (Tab 3).

<b>Messergebnisse in Dorsalflexion (Angaben in Grad)</b>				
<b>Messung</b>	<i>Mittelwert</i>	<i>Standartabw.</i>	<i>Max.</i>	<i>Min.</i>
<b>Dorsalflexion real</b>	20,2	9,2	37,6	0,9
<b>Außenrotation</b>	-	-	-	-
<b>Innenrotation</b>	7,57	6,60	28	0,9
<b>Med. Seitabweichung (9/26)</b>	9,39	4,48	15	2
<b>Lat. Seitabweichung (17/26)</b>	13,76	10,54	38	1

*Tabelle 3: Messergebnisse in Dorsalflexion*

### 3.1.4 Gesamter Bewegungsumfang bezogen auf die Raumebenen

Die soeben beschriebenen Messwerte wurden nun auf die 3 Raumebenen: Sagittal-, Transversal- und Horizontalebene - bezogen. Dafür wird jeweils der Gesamtumfang einer Bewegung in einer Ebene beschrieben. Dieser Wert wird von nun an mit „ROM“ (Range of motion) bezeichnet. Damit wird der Gesamtumfang der Bewegung des Talus um die Nullstellung in einer Ebene beschrieben. Die so in Verhältnis gesetzten Werte liefern folgende Ergebnisse.

- In der Sagittalebene findet die Bewegung der Plantar-/Dorsalflexion statt. Hierzu wurden die davor erhobenen Einzelwerte der Präparate von Plantar- und Dorsalflexion addiert. Die neuen Werte für die ROM in der Sagittalebene ergaben einen Mittelwert von  $47,62^\circ \pm 9,17^\circ$  Standardabweichung. Es konnte ein maximaler Bewegungsumfang von  $64,4^\circ$  beobachtet werden und eine minimale Bewegung von  $27,9^\circ$ .
- Die Bewegung in der Frontalebene entspricht der Innen- bzw. Außenrotation des Talus. Auch hier wurde die ROM durch Addition der Werte der beiden verschiedenen Bewegungen in derselben Ebene, erhoben. In der Frontalebene rotiert der Talus mit einem Mittelwert von  $23,73^\circ \pm 10,1^\circ$  Standardabweichung. Die maximale Ausprägung der Rotationsbewegung lag bei  $51,4^\circ$  während die geringste lediglich  $4,1^\circ$  betrug.
- In der Transversalebene fand die Seitabweichung des Talus statt. Bei dieser Bewegung konnten nicht alle in Plantar- und Dorsalflexion unterschiedlichen Messwerte einfach addiert werden, da hier bei den Messungen zwischen medialer und lateraler Seitabweichung unterschieden wurde. So blieben einige Tali der Präparate während beiden Bewegungen in medialer Seitabweichung und überschritten nicht die Nullstellung Richtung lateraler Abweichung. Um die ROM dieser Gruppe beschreiben zu können, wurden die vorhin erhobenen Werte voneinander subtrahiert. Dies gilt vice versa für Tali, die in lateraler Seitabweichung blieben. In den Fällen, in denen die Nullstellung überschritten wurde, sich also eine mediale in eine laterale Seitabweichung änderte, wurden die Messwerte wie gewohnt addiert. So errechnete sich ein Mittelwert von  $22,17^\circ \pm 13,42^\circ$  Standardabweichung. Es wurden ein Maximalwert von  $49^\circ$  und ein Minimalwert von 3 Grad gefunden (Tab. 4).

<b><i>Gesamter Bewegungsumfang, „ROM“ (Angaben in Grad)</i></b>				
<b><i>Ebene</i></b>	<b><i>Mittelwert</i></b>	<b><i>Standartabw.</i></b>	<b><i>Max.</i></b>	<b><i>Min.</i></b>
<b>Sagittal</b>	47,62	9,17	64,4	27,9
<b>Frontal</b>	23,73	10,1	51,4	4,1
<b>Transversal</b>	22,17	13,42	49	3

*Tabelle 4: Gesamter Bewegungsumfang, „ROM“*

Die größte durchschnittliche ROM wurde in der Sagittalebene, also bei Plantar-/Dorsalflexion, mit einem Mittelwert von 47,62° beobachtet. Die ROM-Werte in der Transversal- (Mittelwert 22,17°) und Frontalebene (Mittelwert 23,73°) liegen sehr nahe beieinander und entsprechen rund der Hälfte jener der Sagittalebene.

Allerdings ist der individuelle Unterschied der Einzel-Messergebnisse der Präparate in diesen Ebenen groß und spiegelt sich in deren Maximal- und Minimalwerten wieder.

In der Transversalebene finden sich Werte von 3° bis zu 49° und in der Frontalebene von 4,1° bis zu 51,4°. Diese sind damit deutlich größer als die der Plantar-/Dorsalflexion ROM, die sich in einem Bereich von 27,9° bis 64,4° bewegt (Abb. 17).

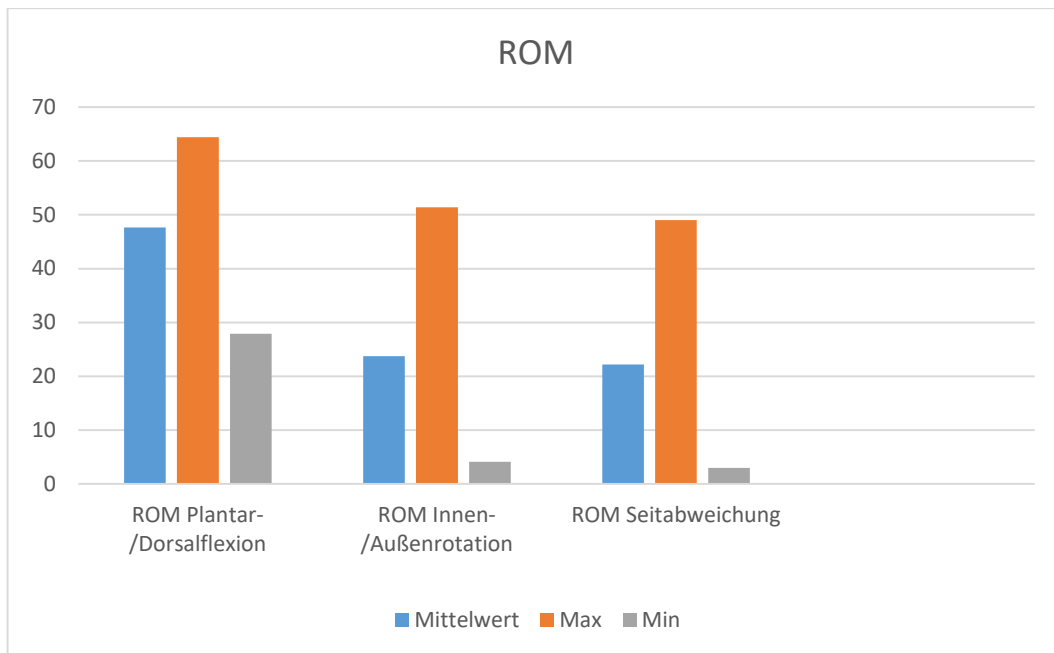


Abbildung 17: Diagramm ROM

### 3.2 Vergleich und Zusammenhänge der Messergebnisse

Die ermittelten Messwerte wurden nun in Zusammenhang gebracht um mögliche Korrelationen zwischen ihnen aufzudecken.

Zuerst wurde ein Shapiro-Wilk Test durchgeführt um die Messwerte auf Normalverteilung zu überprüfen. Alle Werte bis auf die der Innenrotation und der Seitabweichungen waren normal verteilt. So wurde der Korrelationskoeffizient der normalverteilten Werte nach Pearson ermittelt, der der nicht normalverteilten Werte nach Spearman.

#### 3.2.1 Vergleich der Messwerte der äußeren Anteile des Sprunggelenks mit den Bewegungen des Talus

Im ersten Schritt wurden die Messergebnisse des äußeren Sprunggelenks mit den übrigen Messwerten der Bewegung des Talus verglichen.

Vergleich der Messwerte mit Tiefe der Fibula

- Bei dem Vergleich der Messwerte mit der Tiefe der Fibula konnte ein Zusammenhang mit der Plantarflexion festgestellt werden. Hier betrug der Koeffizient -0,54 mit einem p-Wert von 0,004122. Der negative Koeffizient sagt

aus, dass es sich hierbei um einen ungleichsinnigen Zusammenhang handelt. So lässt eine Fibula mit einer geringen Tiefe auf eine ausgeprägte Plantarflexion schließen.

- Vergleicht man die Tiefe der Fibula mit den übrigen Messwerten, in Außenrotation, Seitabweichung in Plantarflexion, Dorsalflexion, Innenrotation sowie Seitabweichung in Dorsalflexion, lässt sich hier kein signifikanter Zusammenhang der Messwerte finden (Tab. 5)

<b><i>Korrelation der Tiefe der Fibula mit Bewegungen des Talus</i></b>			
Messungen		Koeffizient	p-Wert
Tiefe Fibula	Plantarflexion	-0,54	0,004122
Tiefe Fibula	Außenrotation	-0,14	0,496
Tiefe Fibula	Seitabweichung Plantar	-0,14	0,4818
Tiefe Fibula	Dorsalflexion	-0,06	0,7627
Tiefe Fibula	Innenrotation	-0,12	0,5748
Tiefe Fibula	Seitabweichung Dorsal	0,39	0,05017

*Tabelle 5: Korrelation der Tiefe der Fibula mit Bewegungen des Talus. Korrelierende Werte sind farblich hinterlegt.*

In der Abb. 18 wurden die Messwerte in Form von Punktwolken dargestellt um zu veranschaulichen, ob ein Zusammenhang besteht oder nicht. Hier lässt sich gut erkennen, dass in der Abbildung, die die Werte der Tiefe der Fibula im Vergleich zu denen der Plantarflexion darstellt, ein Zusammenhang besteht, da man hier eine absteigende Gerade durch die Punktwolke legen könnte. In den restlichen Abbildungen ist gut sichtbar, dass kein Zusammenhang zwischen den Messwerten besteht. Die Punkte in ihnen sind sehr unterschiedlich und willkürlich verteilt; somit ist das Legen einer auf- oder absteigenden Gerade durch sie nicht möglich.

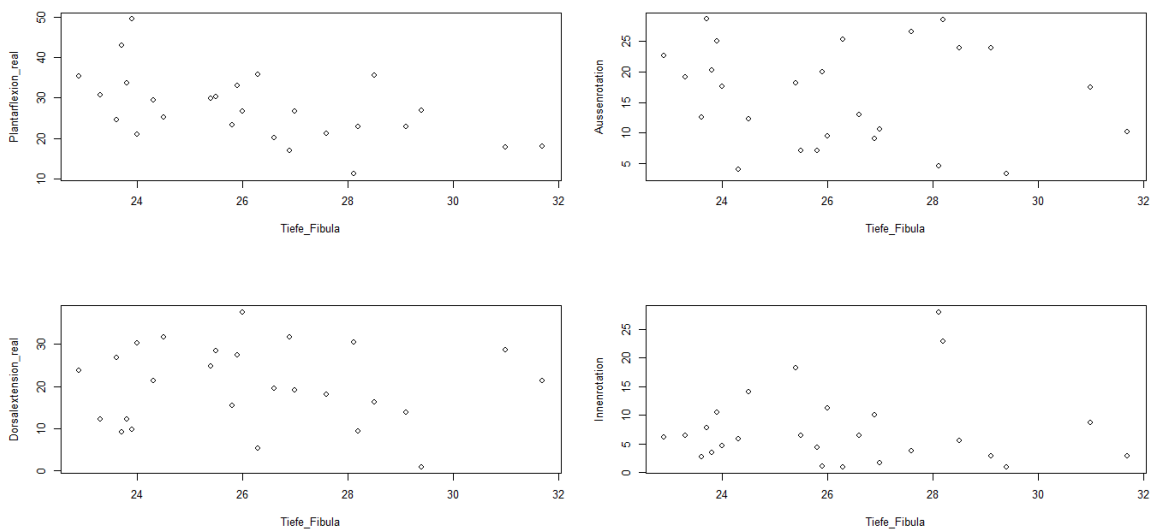


Abbildung 18: Punktwolke Fibula

Vergleich der Messwerte mit der Breite des OSG:

- Bei dem Vergleich der Breite des OSG mit der Plantarflexion konnte eine Korrelation gefunden werden. Mit einem Koeffizienten von  $-0,44$  und einem p-Wert von  $0,02289$ . Der negative Wert des Koeffizienten sagt aus, dass der Zusammenhang gegensinnig ist. Dies bedeutet, dass ein schmales oberes Sprunggelenk eine stark ausgeprägte Plantarflexion mit sich bringt.
- Vergleicht man die Breite des OSG mit der Seitabweichung des Talus in der Dorsalflexion, kann ein signifikanter Zusammenhang zwischen diesen beiden Werten erkannt werden. Mit einem Koeffizienten von  $0,44$  und einem p-Wert von  $0,02546$ . In diesem Fall ist der Zusammenhang ein gleichsinniger. Dies bedeutet, dass ein breites OSG eine große Seitabweichung des Talus in der Transversalebene mit sich bringt.
- Bei dem Vergleich der Breite des oberen Sprunggelenks mit den gemessenen Werten für Außenrotation, Seitabweichung in Plantarflexion, Dorsalflexion sowie Innenrotation konnte kein Zusammenhang nachgewiesen werden (Tab. 6)

<b><i>Korrelation der Breite des OSG mit Bewegungen des Talus</i></b>			
Messungen		Koeffizient	p-Wert
Breite OSG	Plantarflexion	-0,44	0,02289
Breite OSG	Außenrotation	-0,31	0,1188
Breite OSG	Seitabweichung Plantar	0,15	0,4787
Breite OSG	Dorsalflexion	-0,09	0,6667
Breite OSG	Innenrotation	0,11	0,6068
Breite OSG	Seitabweichung Dorsal	0,44	0,02546

*Tabelle 6: Korrelation der Breite des OSG mit Bewegungen des Talus. Korrelierende Werte sind farblich hinterlegt.*

Vergleich der Messwerte mit der Tiefe der Tibia:

- Auch bei dem Vergleich der Messwerte der Tiefe der Tibia mit dem Bewegungsausmaß der Plantarflexion konnte ein Zusammenhang gefunden werden. Mit einem Koeffizienten von -0,51 und einem p-Wert von 0,007142. Auch dieser Zusammenhang ist gegenseitig. Dies bedeutet, dass eine Tibia mit geringer Tiefe eine große Auslenkung des Talus um die Transversalachse im Sinne einer Plantarflexion bedingt.
- Vergleicht man die Tiefe der Tibia mit den übrigen Messwerten, in Außenrotation, Seitabweichung in Plantarflexion, Dorsalflexion, Innenrotation sowie Seitabweichung in Dorsalflexion, ist hier kein signifikanter Zusammenhang der Messwerte zu finden (Tab. 7).

<b><i>Korrelation der Tiefe der Tibia mit Bewegungen des Talus</i></b>			
Messungen		Koeffizient	p-Wert
Tiefe Tibia	Plantarflexion	-0,51	0,007142
Tiefe Tibia	Außenrotation	-0,27	0,1854
Tiefe Tibia	Seitabweichung Plantar	0,18	0,3662
Tiefe Tibia	Dorsalflexion	-0,12	0,5647
Tiefe Tibia	Innenrotation	-0,12	0,5608
Tiefe Tibia	Seitabweichung Dorsal	0,23	0,2648

*Tabelle 7: Korrelation der Tiefe der Tibia mit Bewegungen des Talus. Korreleirende Werte sind farblich hinterlegt.*

So lässt sich erkennen, dass die Ausdehnungen der äußeren Anteile des Sprunggelenks maßgeblich die Plantarflexion beeinflussen. Je schmaler das OSG und je geringer die Tiefe der Tibia bzw. Fibula, desto größer ist die Ausprägung der Plantarflexion.

Des Weiteren lässt sich ein direkter Zusammenhang zwischen Breite des oberen Sprunggelenks und Seitabweichung des Talus in der Dorsalflexion nachweisen.

<b><i>Korrelation der äußeren Anteile des Sprunggelenks mit Bewegungen des Talus</i></b>			
Messungen		Koeffizient	p-Wert
Breite OSG	Plantarflexion	-0,44	0,02289
Tiefe Tibia	Plantarflexion	-0,51	0,007142
Tiefe Fibula	Plantarflexion	-0,54	0,004122
Breite OSG	Seitabweichung Dorsal	0,44	0,02546

*Tabelle 8: Korrelation der äußeren Anteile des Sprunggelenks mit Bewegungen des Talus*

### **3.2.2 Vergleich der Messwerte der Bewegungen des Talus untereinander**

Es werden die ermittelten Werte der Bewegungen des oberen Sprunggelenks untereinander verglichen und auf mögliche Korrelation untersucht.

- Die Plantarflexion steht mit Außenrotation des Talus im gleichsinnigen Zusammenhang. Der Koeffizient beträgt 0,49, der p-Wert 0,01097. So lässt sich schlussfolgern, dass ein Sprunggelenk mit einer ausgeprägten Plantarflexion auch eine große Außenrotation aufweist.
- Die Vergleiche zwischen Dorsalflexion mit der Innenrotation, sowie Plantarflexion und Dorsalflexion mit der jeweilig zugehörigen Seitabweichung, brachten keinen Hinweis auf einen Zusammenhang der Bewegungen (Tab. 9).

<b><i>Korrelation der Bewegungen des Talus untereinander</i></b>			
Messungen		Koeffizient	p-Wert
Plantarflexion	Außenrotation	0,49	0,01097
Dorsalflexion	Innenrotation	0,38	0,05847
Plantarflexion	Seitabweichung Plantar	0,21	0,3055
Dorsalflexion	Seitabweichung Dorsal	0,38	0,05493

*Tabelle 9: Korrelation der Bewegungen des Talus untereinander. Korrelierende Werte sind farblich hinterlegt.*

Zusammenfassend lässt sich aus den ausgewerteten Daten ableiten, dass das Ausmaß der Plantarflexion gegensinnig mit den äußeren Abmessungen des oberen Sprunggelenks in Zusammenhang steht. Ebenso wird die Seitabweichung in Plantarflexion von der Breite des Oberen Sprunggelenks gleichsinnig beeinflusst.

Vergleicht man die Bewegungen untereinander, korreliert lediglich die Außenrotation des Talus mit dem Ausmaß der Plantarflexion. Alle übrigen Bewegungswerte üben keinen Einfluss aufeinander aus (Tab. 10).

<b><i>Korrelationen der Messwerte gesamt</i></b>			
Messungen		Koeffizient	p-Wert
Breite OSG	Plantarflexion	-0,44	0,02289
Tiefe Tibia	Plantarflexion	-0,51	0,007142
Tiefe Fibula	Plantarflexion	-0,54	0,004122
Breite OSG	Seitabweichung Dorsal	0,44	0,02546
Plantarflexion	Außenrotation	0,49	0,01097

*Tabelle 10: Korrelationen der Messwerte gesamt*

So lässt sich schlussfolgern, dass das Ausmaß der Bewegung des oberen Sprunggelenkes um seine transversale Hauptachse keinen Einfluss auf alle übrigen Bewegungen in Transversal- und Frontalebene hat. Ein Sprunggelenk mit einer großen ROM in Plantar- und Dorsalflexion lässt also nicht auf große Bewegungen des Talus in allen übrigen Ebenen schließen.

## **4 Diskussion**

Ziel der Arbeit war es, die Bewegungen des Talus in der oberen Sprunggelenksgabel in allen 3 Raumebenen (Sagittal-, Frontal- und Transversalebene) zu ermitteln. Dazu wurden insgesamt 26 Nass-Präparate, 20 linke und 6 rechte, in der eigens dafür angefertigten Apparatur, wie im Teil 2 „Material und Methodik“ beschrieben, vermessen.

So wurden zahlreiche Messergebnisse ermittelt. Es wurden die äußeren Abmessungen der untersuchten Präparate festgehalten. Die Breite des OSG, Mittelwert von 64,27mm ± 5,58mm Standardabweichung, die Tiefe der Tibia mit einem Mittelwert von 39,91mm ± 3,65mm Standardabweichung und die Tiefe der Fibula im Mittel 26,27mm ± 2,35mm Standardabweichung. Es wurden die Ergebnisse dieser Abmessungen mit den übrigen Messwerten in den drei beschriebenen Ebenen verglichen um so Rückschlüsse auf Einflüsse äußerer Abmessungen auf die Bewegungsauslässe zu finden. Wie zu erwarten, hatten Sprunggelenke mit besonders geringen äußeren Abmessungen von OSG-Breite, Tiefe der Tibia und Fibula einen hohen Bewegungsumfang von der Nullstellung in die

Plantarflexion. Bei sehr breiten oberen Sprunggelenken konnte eine gleichsinnige große Seitabweichung des Talus in Dorsalflexion beobachtet werden.

Nun werden die übrigen ermittelten Messwerte mit in der Literatur spärlich gefundenen vergleichbaren Arbeiten in Bezug gebracht. Für die Diskussion wurden sowohl In-vivo- als auch In-vitro-Studien herangezogen. In-vivo-Studien, bei denen rein auf der Haut angebrachte Messeinheiten verwendet wurden, wurden nicht berücksichtigt, da, wie von Reinschmidt et al. 1997 beschrieben, derart ermittelte Messwerte stark von denen am Knochen direkt ermittelten, abweichen[31].

Die in dieser Arbeit erhobenen Messwerte für Plantar- und Dorsalflexion, also Bewegung in der Sagittalebene, wurden wie vorhin beschrieben mit einem in das Caput des Talus, in Verlängerung der medialen Kante des Os metatarsale 1, gebohrten Kirschner-Drahtes ermittelt. Diese betragen für die Plantarflexion im Mittel  $27,42^\circ \pm 8,26^\circ$

Standardabweichung, für die Dorsalflexion einen Mittelwert von  $20,2^\circ \pm 9,2^\circ$

Standardabweichung. Der gesamte Bewegungsumfang in dieser Ebene ergab eine ROM von  $47,62^\circ \pm 9,17^\circ$ . Vergleicht man diese Ergebnisse mit In-vitro ermittelten

Bewegungsumfängen des OSG in der Literatur, wird dort ein größerer Bewegungsumfang von rund  $40^\circ$ - $50^\circ$  Plantarflexion und  $20^\circ$ - $30^\circ$  Dorsalflexion angegeben[1-3,9,16].

Lediglich Rauber A., Kopsch F. geben eine gesamte ROM in der Sagittalebene von  $40^\circ$ - $50^\circ$  an, welche sich mit den in dieser Arbeit ermittelten Werten deckt[11].

Frisch gekühlte Amputate, die von Valderrabano V. untersucht wurden, brachten einen geringeren Bewegungsumfang mit sich. Mit einer Plantarflexion von  $28,2^\circ \pm 0,8^\circ$  und einer Dorsalflexion von  $14,7^\circ \pm 0,9^\circ$ [32].

Vergleicht man die in der Messapparatur ermittelten Ergebnisse mit In-vivo-Studien, so ist eine weitgehende Übereinstimmung der Werte zu finden. Lediglich Wolf et al. beschreiben eine geringere ROM von  $24,7^\circ \pm 3,9^\circ$ [24]. Wobei zu erwähnen ist, dass hier die Bewegung im Gang ermittelt wurde und nicht die endgradige Bewegung; so wird auch in der Literatur auf die geringe Auslenkung im Gang hingewiesen[33]. Die restlichen In-vivo-Ergebnisse von de Asla (ROM  $47,5^\circ \pm 2,2^\circ$ )[34], Sammarco ( $23^\circ$  Plantarflexion und  $21^\circ$

Dorsalflexion)[33], sowie die von Alt W.W. zusammengefassten Arbeiten von Siegler (Plantarflexion  $31^\circ \pm 4,4^\circ$  / Dorsalflexion  $12,7^\circ \pm 5,1^\circ$ ) sowie Allinger und Eselberger (Plantarflexion  $28^\circ$  / Dorsalflexion  $22^\circ$ ) ergaben sehr ähnliche Bewegungsumfänge.

Letztere wiesen auch auf eine signifikante Bewegungsabnahme der Plantarflexion im Alter hin[12].

Die Bewegungen in der Frontalebene - Außenrotation des Talus bei Plantarflexion sowie Innenrotation dessen bei Dorsalflexion - ergaben in dieser Arbeit folgende Messwerte: Bei der Außenrotation fand sich ein Mittelwert von  $16,16^\circ \pm 7,88^\circ$  Standardabweichung. Maximal rotierte der Talus  $28,7^\circ$  nach außen, während die kleinste Außenrotation lediglich  $3,2^\circ$  betrug. Bei der, mit der Dorsalflexion verbundenen Innenrotation ergab sich ein Mittelwert von  $7,57^\circ \pm 6,60^\circ$  Standardabweichung. Die maximale Innenrotation lag bei  $28^\circ$ , die kleinste bei  $0,9^\circ$ . In dieser Ebene konnte so eine gesamte ROM von  $23,73^\circ \pm 10,1^\circ$  ermittelt werden, wobei die maximale Ausprägung der Rotationsbewegung bei  $51,4^\circ$  lag, während die geringste lediglich  $4,1^\circ$  betrug.

Die wenigen in der Literatur zu findenden Abhandlungen zu der Bewegung in dieser Ebene beschreibt Valderrabano V. mit  $5^\circ$ - $10^\circ$  Bewegung des Talus um eine nicht weiter beschriebene anterior/posterior Achse[25]. Genauer wird die Bewegung in dieser Ebene von Wolf et al. in einer In-vivo-Studie beschrieben. Hier wird eine ROM mit  $12,2^\circ$  in der Frontalebene beschrieben. Auch hier finden sich nach dem Autor sehr große Schwankungen im Ausmaß der Bewegungen der verschiedenen Versuchsobjekte (eine minimale Rotation von  $2,9^\circ$  und eine maximale von  $18,9^\circ$ )[24]. So fand sich in dieser Studie zwar ein beinahe nur halb so großer Bewegungsumfang, die beschriebenen großen individuellen Unterschiede der einzelnen Präparate decken sich allerdings. Auch ist zu erwähnen, dass in der Arbeit von Wolf et al. im Vergleich zu dieser Arbeit mit einer geringen Probandenzahl von  $n=4$  gearbeitet wurde.

Sasse M. beschreibt in einer In-vitro-Studie eine  $4,2^\circ$  Außenrotation des Talus in Verbindung mit Dorsalflexion und eine  $1,4^\circ$  Innenrotation des Talus bei der Plantarflexion[27].

Ein ähnliches Rotationsverhalten des Talus wird auch bei Valderrabano V. beschrieben[25]. Ein solches Rotationsverhalten des Talus konnte in den Versuchen dieser Arbeit nie beobachtet werden, da es sich hier stets um eine Innenrotation in Kombination mit Plantarflexion, sowie einer Außenrotation bei Dorsalflexion handelte.

Die Bewegungen des Talus in der Transversalebene, die als mediale und laterale Seitabweichung bezeichnet wurden, wie in den Kapiteln 2.2.3 „Messungen in Plantarflexion“ und 2.2.4 „Messungen in Dorsalflexion“ beschrieben, erhoben. Sie lieferten folgende Resultate: Sowohl in Plantar- als auch in Dorsalflexion konnten jeweils mediale als auch laterale Seitabweichungen festgestellt werden. In Plantarflexion wurde eine absolute Häufigkeit von 24 medialen zu 2 lateralen Seitabweichungen (relativ:

92,31% / 7,69%) festgestellt. Bei der Dorsalflexion fand sich eine Verteilung von 9 medialen zu 17 lateralen Seitabweichungen (relativ: 34,61% / 65,38%).

Die gesamte ROM der Bewegung in dieser Ebene wurde, wie in Kapitel 3.1.4 „Gesamter Bewegungsumfang bezogen auf die Raumebenen“, errechnet und betrug im Mittelwert  $22,17^\circ \pm 13,42^\circ$ , sowie im Maximalwert  $49^\circ$  und im Minimalwert  $3^\circ$ .

Vergleicht man diese Ergebnisse mit der Arbeit von Wolf et al., fällt der Mittelwert der Bewegungen in der Transversalebene mit  $8,7^\circ \pm 3,9^\circ$  erneut rund um die Hälfte kleiner aus. Allerdings ist auch hier erneut der Konsens zu finden, dass die Werte der einzelnen Präparate hier deutlich voneinander abweichen. Bei Wolf et al. wurden Messergebnisse von  $5,5^\circ$  bis  $14,4^\circ$  angegeben[24].

Close wies in seiner Studie auf eine Rotation des Talus von  $5^\circ$ - $6^\circ$  beim aufrechten Gang, um die Vertikalachse hin. Auch Lundberg et al. gaben einen ähnlichen Umfang der Rotation um die Vertikalachse an. Somit fallen auch hier die Bewegungsumfänge deutlich kleiner aus[26,35].

Eine In-vitro-Studie von McCullough C.J. und Burge P.D. ergab Messwerte, die mit einem Mittelwert von  $24,1^\circ \pm 1,45^\circ$  ROM in der Transversalebene eher den absoluten, in dieser Arbeit ermittelten Werten entsprechen. Dieser Wert wurde mit einer Zuladung von 1kg erlangt. Im Zuge ihrer Arbeit luden sie bis zu 50kg zu, mit denen der Talus in die Malleolengabel gedrückt wurde. Dies führte zu einer Abnahme der ROM um  $7,5^\circ \pm 1,5^\circ$ . Auch wird in dieser Studie beschrieben, dass der Talus bei einer Plantarflexion stets nach lateral abweiche, bei einer Dorsalflexion stets nach medial. Dem muss mit den Ergebnissen dieser Arbeit widersprochen werden, da sowohl in Plantar- als auch in Dorsalflexion mediale und laterale Seitabweichungen des Talus beobachtet wurden[23].

Der Unterschied der ROM der hier miteinander verglichenen In-vitro- und In-vivo-Arbeiten ist höchst wahrscheinlich auf die unterschiedliche Gelenksstabilisierung - im Kapitel 1.3 „Bewegung im Sprunggelenk und relevante Biomechanik“ beschrieben - zurückzuführen. Bei anatomischen Präparaten fehlt das dynamische Zusammenspiel von aktiven und passiven gelenksstabilisierenden Faktoren, wie es im Lebenden zu finden ist. An dieser Stelle ist auf die Schwierigkeit hinzuweisen, Arbeiten von verschiedenen Autoren zu diesem Themenbereich exakt zu vergleichen, da es keine standardisierte Form gibt, biomechanische Bewegungen in einem Gelenk zu beschreiben. Auf dieses Problem wird in der Literatur des Öfteren hingewiesen. Wu et al. erarbeiteten auf Grund dieser Problematik ein standardisiertes Gelenk-Koordinatensystem[36].

Wolf et al. weist in seiner Studie darauf hin, dass untersuchte Sprunggelenke generell eine kleine oder große ROM in allen 3 Bewegungsebenen aufweisen[24]. Dieser Aussage muss hier widersprochen werden. Es fand sich bei der Suche nach Korrelationen zwischen den Bewegungen untereinander lediglich ein gleichsinniger Zusammenhang zwischen Ausmaß der Plantarflexion und der Außenrotation des Talus. Alle übrigen Bewegungen üben keinen Einfluss aufeinander aus.

Wie in mehreren Arbeiten beschrieben, ist die komplexe und individuell unterschiedliche Form der Talusrolle mit höchster Wahrscheinlichkeit für die Bewegungen des Talus in allen 3 Raumebenen verantwortlich[7,12,15,21,24,25]. Auch für das Seitabweichen des Talus nach medial oder lateral in der Transversalebene dürfte sie verantwortlich sein.

Conclusio:

Die Bewegung des Talus in der Sprunggelenksgabel ist eine komplexe, in allen 3 Raumebenen stattfindende Bewegung.

Während in der Literatur die Hauptbewegungen der Plantar- und Dorsalflexion in der Sagittalebene bereits ausführlichst beschrieben sind, wird auf die hier erhobenen Werte, die währenddessen in der Transversal- und Frontalebene stattfinden, sowie deren Zusammenhänge, sehr wenig eingegangen.

Wie die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, ist die Bewegung im oberen Sprunggelenk sehr variabel und deutlich größer als bisher beschrieben.

## 5 Literaturverzeichnis

- [1] Anderhuber F, Pera F, Streicher J, Waldeyer A. Waldeyer - Anatomie des Menschen: Lehrbuch und Atlas in einem Band. 19th ed. Berlin: De Gruyter; 2012.
- [2] Gray H, Lewis WH. Anatomy of the human body. Philadelphia : Lea & Febiger; 1918.
- [3] Platzer W. Taschenatlas Anatomie, Band 1: Bewegungsapparat. 10., überarbeitete und ergänzte Auflage. Stuttgart: Thieme; 2009.
- [4] Schulte E, Schumacher U, Schünke M. PROMETHEUS LernAtlas der Anatomie: Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem. 3rd ed. Stuttgart: Thieme; 2011.
- [5] Putz R, Müller-Gerbl M. [Functional anatomy of the foot]. Orthopade 1991;20:2–10.
- [6] Kummer B. Biomechanik: Form und Funktion des Bewegungsapparates. 1st ed. Köln: Deutscher Ärzte-Verlag; 2005.
- [7] Reimann R, Anderhuber F, Gerold J. Über die Geometrie der menschlichen Sprungbeinrolle. Cells Tissues Organs 1986;127:271–8. doi:10.1159/000146305.
- [8] Paulsen F, Waschke J, Sobotta, Atlas der Anatomie des Menschen 3 Bände und Tabellenheft im Schubert, inklusive Zugang zur Sobotta-Website: Allgemeine Anatomie, ... Kopf, Hals, Neuroanatomie Tabellenheft, 23e (Set of 3). 23rd ed. München: Urban & Fischer Verlag/Elsevier GmbH; 2010.
- [9] Hafferl A, Thiel W. Lehrbuch der topographischen Anatomie. 3. Aufl. Neu bearb. von Walter Thiel. Springer; 1969.
- [10] Debrunner HU, Jacob HAC. Biomechanik des Fusses. Stuttgart: Thieme, Stuttgart; 1998.
- [11] Rauber A, Kopsch F. Anatomie des Menschen. Band I, Bewegungsapparat. 3. Vollständ. überarb. Stuttgart: Thieme, Stuttgart; 2003.
- [12] Alt WW. Biomechanische Aspekte der Gelenkstabilisierung: Dargestellt am Beispiel des Sprunggelenks. Geislingen (Steige): C. Maurer Fachmedien GmbH & Co. KG; 2001.
- [13] Funktionelle Anatomie der Gelenke - Thieme.de - Thieme Webshop - Adalbert I. Kapandji, Stefan Rehart. Thieme Webshop n.d. <http://www.thieme.de/shop/Anatomie-Physiologie-Biomechanik/Kapandji-Rehart-Funktionelle-Anatomie-der-Gelenke-9783131422163/p/000000000195070206> (accessed May 22, 2017).
- [14] Inmann V. The joints of the ankle 1976 Baltimore: Williams and Wilkins n.d.
- [15] Barnett CH, Napier JR. The axis of rotation at the ankle joint in man. Its influence upon the form of the talus and the mobility of the fibula. J Anat 1952;86:1–9.
- [16] Checkliste Orthopädie - Thieme.de - Thieme Webshop - Andreas B. Imhoff, Ralf Linke, René Baumgartner. Thieme Webshop n.d. <http://www.thieme.de/shop/Allgemeine-Orthopaedie-und-Unfallchirurgie/Imhoff-Linke-Baumgartner-Checkliste-Orthopaedie-9783131422835/p/000000000244270103> (accessed May 3, 2017).
- [17] Lundberg A. Kinematics of the ankle and foot: In vivo roentgen stereophotogrammetry. Acta Orthop Scand 1989;60:1–26. doi:10.3109/17453678909154185.
- [18] Fick R. Handbuch der Anatomie und Mechanik der Gelenke / 3 : Spezielle Gelenk- und Muskelmechanik. Fischer; 1911.
- [19] Hicks JH. The mechanics of the foot. J Anat 1953;87:345–57.
- [20] Lundberg A, Svensson OK, Németh G, Selvik G. The axis of rotation of the ankle joint. J Bone Joint Surg Br 1989;71:94–9.
- [21] Reimann R, Anderhuber F. Kompensationsbewegungen der Fibula, die durch die Keilform der Trochlea tali erzwungen werden. Cells Tissues Organs 1980;108:60–7. doi:10.1159/000145282.

- [22] Windisch G, Odehnal B, Reimann R, Anderhuber F, Stachel H. Contact areas of the tibiotalar joint. *J Orthop Res Off Publ Orthop Res Soc* 2007;25:1481–7. doi:10.1002/jor.20429.
- [23] McCullough CJ, Burge PD. Rotatory stability of the load-bearing ankle. An experimental study. *Bone Jt J* 1980;62–B:460–4.
- [24] Arndt A, Wolf P, Liu A, Nester C, Stacoff A, Jones R, et al. Intrinsic foot kinematics measured in vivo during the stance phase of slow running. *J Biomech* 2007;40:2672–8. doi:10.1016/j.jbiomech.2006.12.009.
- [25] Valderrabano V, Hintermann B, Nigg BM, Stefanyshyn D, Stergiou P. Kinematic Changes After Fusion and Total Replacement of the Ankle Part 3: Talar Movement. *Foot Ankle Int* 2003;24:897–900. doi:10.1177/107110070302401204.
- [26] Close JR. Some Applications of the Functional Anatomy of the Ankle Joint. *J Bone Jt Surg* 1956;38:761–81.
- [27] Tibiotalar Motion -- Effect of Fibular Displacement and Deltoid Ligament Transection: In Vitro Study. ResearchGate n.d. [https://www.researchgate.net/publication/12718149\\_Tibiotalar\\_Motion\\_--\\_Effect\\_of\\_Fibular\\_Displacement\\_and\\_Deltoid\\_Ligament\\_Transection\\_In\\_Vitro\\_Study](https://www.researchgate.net/publication/12718149_Tibiotalar_Motion_--_Effect_of_Fibular_Displacement_and_Deltoid_Ligament_Transection_In_Vitro_Study) (accessed June 15, 2017).
- [28] Fuhrmann RA, Glaser C, Leumann A, Ochman S, Widekamm S. Sprunggelenksinstabilität - Verletzungsmechanismus und Epidemiologie des Kapsel-Band-Apparats am Rückfuss. *Ges Für Orthop-Traumatol Sportmed GOTS n.d.:GOTS Expertenmeeting Burg/Spreewald* 2012.
- [29] Bauer R., Gschwend N., Hohmann D., Morscher E., Schweiberer L., Tscherne H., et al. *Der Orthopäde*. vol. 20. Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo Hong Kong Barcelona Budapest: Springer Verlag; 1991.
- [30] Stormont DM, Morrey BF, An KN, Cass JR. Stability of the loaded ankle. Relation between articular restraint and primary and secondary static restraints. *Am J Sports Med* 1985;13:295–300. doi:10.1177/036354658501300502.
- [31] Reinschmidt C, van Den Bogert AJ, Murphy N, Lundberg A, Nigg BM. Tibiocalcaneal motion during running, measured with external and bone markers. *Clin Biomech Bristol Avon* 1997;12:8–16.
- [32] Valderrabano V, Hintermann B, Nigg BM, Stefanyshyn D, Stergiou P. Kinematic Changes After Fusion and Total Replacement of the Ankle Part 1: Range of Motion. *Foot Ankle Int* 2003;24:881–7. doi:10.1177/107110070302401202.
- [33] Sammarco J. Biomechanics of the ankle: I. Surface velocity and instant center of rotation in the sagittal plane. *Am J Sports Med* 1977;5:231–4. doi:10.1177/036354657700500603.
- [34] Six DOF in vivo kinematics of the ankle joint complex: Application of a combined dual-orthogonal fluoroscopic and magnetic resonance imaging technique. ResearchGate n.d. [https://www.researchgate.net/publication/7170142\\_Six\\_DOF\\_in\\_vivo\\_kinematics\\_of\\_the\\_ankle\\_joint\\_complex\\_Application\\_of\\_a\\_combined\\_dual-orthogonal\\_fluoroscopic\\_and\\_magnetic\\_resonance\\_imaging\\_technique](https://www.researchgate.net/publication/7170142_Six_DOF_in_vivo_kinematics_of_the_ankle_joint_complex_Application_of_a_combined_dual-orthogonal_fluoroscopic_and_magnetic_resonance_imaging_technique) (accessed June 15, 2017).
- [35] Lundberg A, Goldie I, Kalin B, Selvik G. Kinematics of the Ankle/Foot Complex: Plantarflexion and Dorsiflexion. *Foot Ankle* 1989;9:194–200. doi:10.1177/107110078900900409.
- [36] ISB recommendation on definitions of joint coordinate system of various joints for the reporting of human joint motion - Part I: Ankle, hip, and spine (PDF Download Available). ResearchGate n.d. [https://www.researchgate.net/publication/240060957\\_ISB\\_recommendation\\_on\\_definition](https://www.researchgate.net/publication/240060957_ISB_recommendation_on_definition)

s\_of\_joint\_coordinate\_system\_of\_various\_joints\_for\_the\_reporting\_of\_human\_joint\_motion - Part I Ankle hip and spine (accessed June 15, 2017).