

Berufsgenossenschaftliche Unfallklinik Ludwigshafen

Ärztlicher Direktor: Prof. Dr. med. Paul A. Grützner

Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie

**Validierung von Repositionskriterien der operativen Versorgung von  
akuten instabilen Syndesmoseverletzungen mittels  
instrumenteller dreidimensionaler Bewegungsanalyse**

Inauguraldissertation

zur Erlangung des medizinischen Doktorgrades

an der

Medizinischen Fakultät Heidelberg

der

Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg

vorgelegt von

Laura Magdalena Blaschke, geboren in Heidelberg

2022

Dekan

Prof. Dr. med. Dr. h.c. Hans-Georg Kräusslich

Doktorvater

Prof. Dr. med. Paul A. Grützner

*für*  
*Mama & Papa*  
*und*  
*Oma & Opa*

# 1 INHALT

1	INHALT .....	4
2	ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....	7
3	TABELLENVERZEICHNIS .....	8
4	ANHANGSVERZEICHNIS .....	9
5	EINLEITUNG .....	10
5.1	Anatomie des Sprunggelenks .....	10
5.2	Epidemiologie der Sprunggelenkverletzungen .....	12
5.3	Klassifikation der Sprunggelenkfrakturen .....	12
5.4	Konservative Therapie der Sprunggelenkfrakturen .....	12
5.5	Operative Therapie der Sprunggelenkfrakturen .....	13
5.5.1	Operativer Standard .....	13
5.5.2	Bildgebende Verfahren.....	13
5.5.3	Postoperatives Ergebnis der Syndesmoseverletzung.....	15
5.5.4	Leitliniengerechte Nachsorge der Syndesmoseverletzung .....	15
5.6	Ansätze zur Verbesserung des funktionellen Ergebnisses .....	16
5.7	Studien der Arbeitsgruppe MINTOS .....	17
5.8	Instrumentelle 3D-Bewegungsanalyse.....	18
5.8.1	Einführung in die Bewegungsanalyse.....	18
5.8.2	Biomechanische Grundlagen.....	18
5.8.3	Instrumentelle 3D-Bewegungsanalyse.....	19
5.8.4	Pedobarographie .....	20
5.8.5	Ganganalyse .....	21
5.9	Funktionstests .....	25
5.9.1	Beidbeiniger Squat .....	25
5.9.2	Einbeiniger Squat.....	26
5.9.3	Y-Balance-Test .....	27
5.9.4	Side-Hop-Test .....	27
5.10	Aktuelles Forschungsvorhaben .....	28
5.10.1	Ziel der Arbeit .....	28
5.10.2	Aufstellung der Hypothese.....	30
6	MATERIAL UND METHODIK.....	31
6.1	Studienaufbau .....	31
6.2	Patientenkollektiv.....	31
6.2.1	Einschlusskriterien.....	31
6.2.2	Ausschlusskriterien.....	31

6.3	Anamnese, Fragebögen und körperliche Untersuchung.....	32
6.3.1	Anamnese.....	32
6.3.2	Der Trauma-Score nach Olerud und Molander.....	32
6.3.3	Der Ankle Activity Score nach Halasi.....	32
6.3.4	Range of Motion & Kraftgrade nach Janda.....	32
6.4	Instrumentelle Bewegungsanalyse.....	33
6.4.1	Pedobarographie.....	33
6.4.2	Kinematische Datenerhebung.....	35
6.4.3	Kinetische Datenerhebung.....	38
6.4.4	Ablauf der Messung.....	38
6.4.5	Gehen in der Ebene.....	39
6.4.6	Funktionstests.....	40
6.5	Weitere Untersuchungen.....	42
6.5.1	Röntgenaufnahme.....	42
6.6	Auswertung.....	43
6.6.1	Statistik.....	43
6.7	Ethikvotum.....	43
7	ERGEBNISSE.....	44
7.1	Anamnese und Fragebögen.....	45
7.2	Klinische Untersuchung.....	45
7.3	Instrumentelle 3D-Bewegungsanalyse.....	46
7.3.1	Pedobarographie.....	46
7.3.2	Gehen in der Ebene.....	48
7.3.3	Beidbeiniger Squat.....	53
7.3.4	Einbeiniger Squat.....	55
7.3.5	Y-Balance-Test.....	58
7.3.6	Side-Hop-Test.....	61
8	DISKUSSION.....	62
8.1.1	Anamnese.....	62
8.1.2	Klinische Untersuchung.....	63
8.1.3	Pedobarographie.....	63
8.1.4	Gehen in der Ebene.....	66
8.1.5	Beidbeiniger Squat.....	68
8.1.6	Einbeiniger Squat.....	70
8.1.7	Y-Balance-Test.....	72
8.1.8	Side-Hop-Test.....	74

8.2	Überprüfung der Hypothesen und Studienziel .....	75
8.3	Limitationen .....	75
8.3.1	Messmethodik .....	75
8.3.2	Messdurchführung .....	76
8.3.3	Zusätzliche aussagekräftige Parameter .....	77
8.3.4	Auswahl der Funktionstests .....	77
8.3.5	Auswahl des Patientenkollektivs .....	78
8.3.6	Repositions-kriterien .....	78
8.4	Schlussfolgerung und Ausblick .....	79
9	ZUSAMMENFASSUNG .....	82
10	LITERATURVERZEICHNIS .....	84
11	ANHANG .....	96
12	LEBENS-LAUF .....	105
13	DANKSAGUNG .....	107
14	EIDESSTÄTLICHE VERSICHERUNG .....	108

## 2 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

<i>Abbildung 1. Artikulierende Skelettelemente des oberen Sprunggelenks</i> .....	11
<i>Abbildung 2. Bandapparat eines rechten Fußes in der Ansicht von lateral</i> .....	11
<i>Abbildung 3. Bewegungslabor</i> .....	20
<i>Abbildung 4. Beispiel einer farbig visualisierten Fußdruckdarstellung</i> .....	21
<i>Abbildung 5. Einteilung des Schrittes in acht Phasen</i> .....	22
<i>Abbildung 6. Beispiel einer visuellen Darstellung der kinematischen Analyse eines Gangzyklus eines 39-jährigen Patienten nach instabiler Syndesmoseverletzung</i> .....	23
<i>Abbildung 7. Beispiel einer visuellen Darstellung der kinetischen Analyse eines Gangzyklus eines 39-jährigen Patienten nach instabiler Syndesmoseverletzung</i> .....	24
<i>Abbildung 8. Squat mit Fersen auf dem Boden (A), Squat mit angehobener Ferse (B)</i> .....	26
<i>Abbildung 9. Ausführung des einbeinigen Squats mit gerade ausgestrecktem Schwungbein</i> .....	26
<i>Abbildung 10. Ausführung des Y-Balance-Tests</i> .....	27
<i>Abbildung 11. Ausführung des Side-Hop-Tests mit Sprung zu beiden Seiten, abgewandelt</i> .....	28
<i>Abbildung 12. Druckmessplatte des Herstellers zebris</i> .....	33
<i>Abbildung 13. Markerpositionen nach dem Salford Lower Body Gait Model (inkludiert Oxford Foot Model)</i> .....	37
<i>Abbildung 14. Untere Extremität mit reflektierenden Markern</i> .....	38
<i>Abbildung 15. Graphische Darstellung ausgewählter Parameter der 3D-Analyse des Gehens in der Ebene der Gruppen I und II über einen Gangzyklus von 0-100%</i> .....	48

### 3 TABELLENVERZEICHNIS

<i>Tabelle 1. Klassifikation der Sprunggelenkfrakturen nach Weber/Danis.</i>	12
<i>Tabelle 2. Repositonskriterien der operativen Versorgung von instabilen Syndesmoseverletzungen.</i>	18
<i>Tabelle 3. Messparameter Pedobarographie.</i>	34
<i>Tabelle 4. Markerpositionen nach dem Salford Lower Body Gait Model inkl. Oxford Foot Model.</i>	36
<i>Tabelle 5. Messparameter 3D: Gehen in der Ebene.</i>	39
<i>Tabelle 6. Messparameter 3D: Beidbeiniger Squat.</i>	40
<i>Tabelle 7. Messparameter 3D: Einbeinsquat.</i>	41
<i>Tabelle 8. Messparameter 3D: Y-Balance-Test.</i>	42
<i>Tabelle 9. Qualitätsmerkmale 3D: Side-Hop-Test.</i>	42
<i>Tabelle 10. Charakteristika der Probanden beider Gruppen hinsichtlich Alter, Sex, Größe und Gewicht.</i>	44
<i>Tabelle 11. Ergebnisse des Olerud/Molander-Scores (OM) und des Ankle Activity Index (AAI)</i>	45
<i>Tabelle 12. Ergebnisse der klinischen Untersuchung der RoM des oberen Sprunggelenks.</i>	45
<i>Tabelle 13. Deskriptive und Interferenzstatistik der Pedobarographie von Gruppe I und II mit Angabe der p-Werte</i>	47
<i>Tabelle 14. Auswertung der pedobarographischen Messung im Seitenvergleich innerhalb einer Gruppe mit Angabe der mittleren Differenz von betroffenem und kontralateralem Sprunggelenk.</i>	48
<i>Tabelle 15. Deskriptive und Interferenzstatistik der 3D-Analyse des Gehens in der Ebene von Gruppe I und II mit Angabe der p-Werte.</i>	50
<i>Tabelle 16. Auswertung der 3D-Analyse des Gehens in der Ebene im Seitenvergleich innerhalb einer Gruppe mit Angabe</i>	52
<i>Tabelle 17. Deskriptive und Interferenzstatistik der 3D-Analyse des beidbeinigen Squats von Gruppe I und II mit Angabe der p-Werte.</i>	54
<i>Tabelle 18. Auswertung der 3D-Analyse des beidbeinigen Squats im Seitenvergleich innerhalb einer Gruppe mit Angabe der Differenz von betroffenem Sprunggelenk und kontralateralem Sprunggelenk.</i>	55
<i>Tabelle 19. Deskriptive und Interferenzstatistik der 3D-Analyse des einbeinigen Squats von Gruppe I und II mit Angabe der p-Werte.</i>	56
<i>Tabelle 20. Auswertung der 3D-Analyse des einbeinigen Squats im Seitenvergleich innerhalb einer Gruppe mit Angabe der Differenz von betroffenem und kontralateralem Sprunggelenk.</i>	57
<i>Tabelle 21. Deskriptive und Interferenzstatistik der 3D-Analyse des Y-Balance-Tests von Gruppe I und II.</i>	59
<i>Tabelle 22. Auswertung der 3D-Analyse des Y-Balance-Tests im Seitenvergleich innerhalb einer Gruppe mit Angabe der Differenz von betroffenem und kontralateralem Sprunggelenk.</i>	60
<i>Tabelle 23. Qualitative Auswertung des Side-Hop-Tests der Gruppe I und II.</i>	61



## 4 ANHANGSVERZEICHNIS

A. Trauma-Score nach Olerud/Molander .....	96
B. Ankle Activity Score nach Halasi.....	97
C. Einwilligungserklärung .....	98
D. Ethikvotum .....	99
E. Studienprotokoll.....	102
F. Anamnesebogen.....	104

## 5 EINLEITUNG

*In dieser Arbeit wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit das generische Maskulinum verwendet. Weibliche und anderweitige Geschlechteridentitäten werden dabei ausdrücklich impliziert, soweit es für die Aussage erforderlich ist.*

### 5.1 Anatomie des Sprunggelenks

Das Sprunggelenk setzt sich aus dem oberen Sprunggelenk (OSG), auch *Articulatio talocruralis* genannt, zwischen Talus (Sprungbein), Tibia (Schienbein) und Fibula (Wadenbein) sowie dem unteren Sprunggelenk (USG), auch *Articulatio talotarsalis* genannt, zwischen dem Talus, dem Calcaneus und dem Os naviculare zusammen. Die Tibia endet mit dem Malleolus medialis (Innenknöchel), die Fibula endet mit dem Malleolus lateralis (Außenknöchel). Das Sprunggelenk ist funktionell ein Zylindergelenk und ermöglicht die Bewegung des Fußes in mehreren Ebenen: Dorsalextension/Plantarflexion, Inversion/Eversion und Außenrotation/Innenrotation.

Es wird über Knochen und Bänder geführt und hilft bei der Sicherung einer aufrechten Körperhaltung. Durch die Form der Trochlea tali (Sprunggelenkrolle) – der vordere Anteil ist ca. 5–6 mm breiter als der hintere Anteil – ist die knöcherne Führung des oberen Sprunggelenks in Streck- (Extensions-) und Beugstellung (Flexionsstellung) jedoch unterschiedlich groß. In Dorsalextensionsstellung interagiert der breitere Teil der Trochlea tali mit der Malleolengabel. Somit sind die Bänder straff gespannt und die knöcherne Sicherung ist in dieser Stellung besonders groß (Schulte et al. 2018) (s. Abbildung 1). Steht hingegen in Plantarflexion, z.B. beim Zehenstand, der schmalere Trochleabereich in Kontakt mit der Malleolengabel, fehlt die knöcherne Führung des Sprungbeins in der Knöchelgabel und es liegt kein vollständiges Scharniergelenk vor. Dadurch kann in Plantarflexion ebenfalls eine leichte Bewegung in der Rotationsebene erzeugt werden.

Die Stabilisierung des Sprunggelenks erfolgt über einige Bänder (Ligamenta). Vor allem die Syndesmosebänder tragen maßgeblich zum Halt von Tibia und Fibula in der Sprunggelenkgabel bei und erlauben eine gewisse Flexibilität, die für die regelrechte Bewegung in alle Ebenen vonnöten ist. Die Syndesmose setzt sich in Höhe der *Incisura tibiae* aus dem anterior-inferioren tibiofibularen Ligament (AIFTL), dem posterior-inferioren tibiofibularen Ligament (PIFTL), dem transversen tibiofibularen Ligament (TTFL) und dem interossären Ligament (IOL) zusammen (s. Abbildung 2). Tibia und Fibula werden über eine bindegewebige Struktur, die *Membrana interossea*, verbunden. Die distale Fortführung der *Membrana interossea* ist die tibiofibuläre Syndesmose.

Das Sprunggelenk ist eines der am stärksten belasteten Gelenke des Körpers, da es bei jedem Schritt das gesamte Körpergewicht tragen und auf den Boden umsetzen muss. Durch die hohe Belastung sind Verletzungen am Sprunggelenk häufig. Sie können sowohl knöcherner als auch ligamentärer Art sein oder das Weichteilgewebe betreffen.

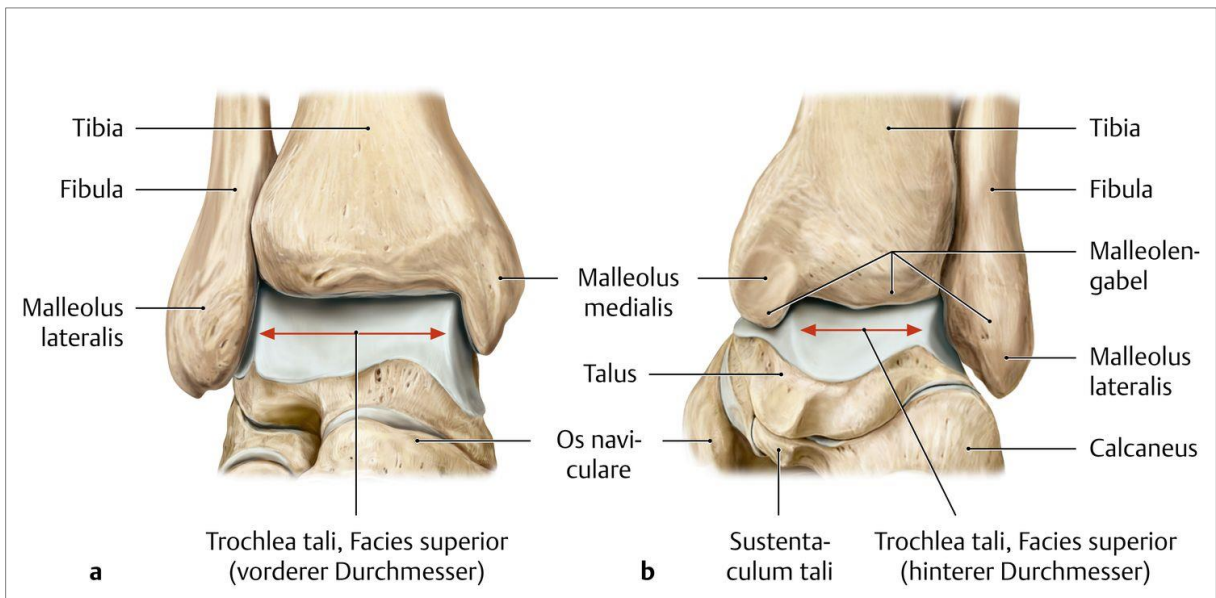


Abbildung 1. Artikulierende Skelettelemente des oberen Sprunggelenks (Art. talocruralis).  
a) rechter Fuß, Ansicht von vorne, b) rechter Fuß, Ansicht von hinten aus (Schulte et al. 2018).

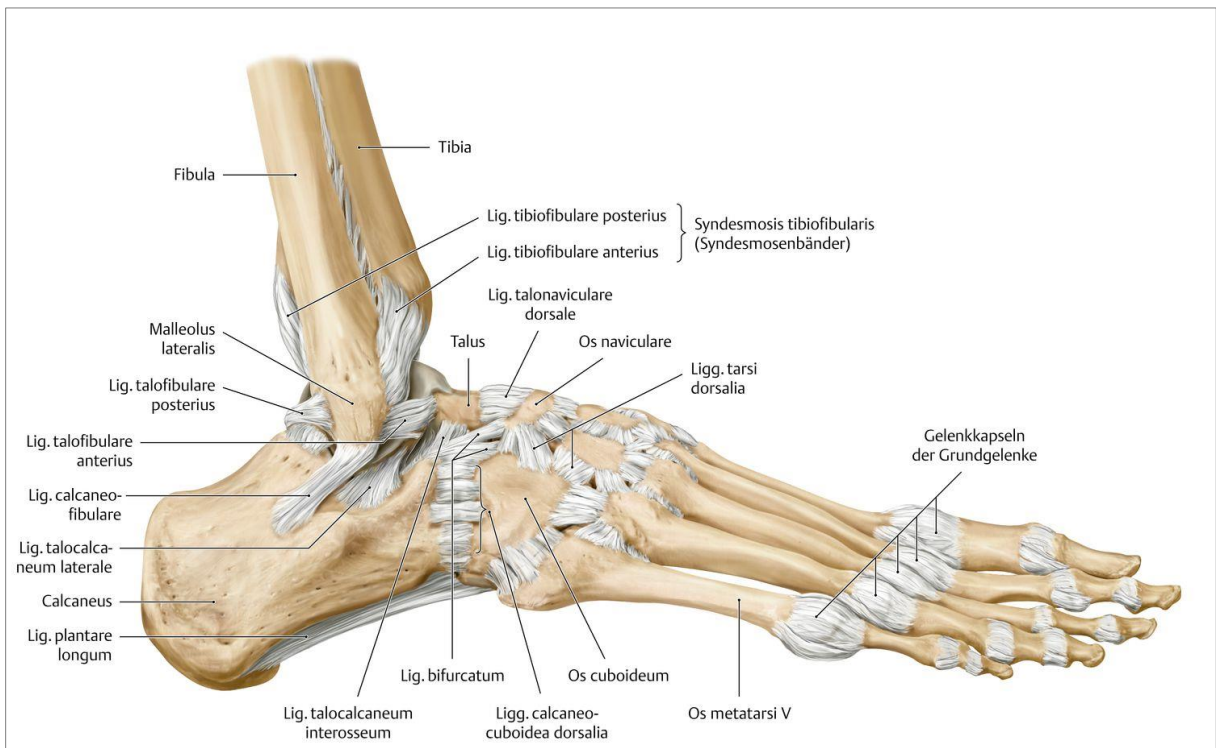


Abbildung 2. Bandapparat eines rechten Fußes in der Ansicht von lateral, aus (Schulte et al. 2018).

## 5.2 Epidemiologie der Sprunggelenkverletzungen

Sprunggelenkverletzungen sind die häufigsten Verletzungen der unteren Extremität (Frank et al. 2009). 50% der Sportverletzungen betreffen das Sprunggelenk, wovon bis zu 10% mit einer Beteiligung der Syndesmose einhergehen (Tunturi et al. 1983). Der häufigste Unfallmechanismus einer Sprunggelenkfraktur ist das Supinations-/Eversionstrauma mit 64%. Ihm folgt das Pronationstrauma mit 24% und das Supinations-/Adduktionstrauma mit 12% (Bonnaire und Bula 2010). In acht von zehn Fällen ist ein Luxationsmechanismus bei Fehltritt oder Sturz Ursache der Sprunggelenkfraktur, seltener ist sie Folge eines Hochrasanztraumas im Rahmen von direkter Gewalteinwirkung auf den Malleolus lateralis oder medialis. Frakturen des Pilon tibiale der distalen Tibia sind wesentlich seltener und haben in der Regel eine axiale Gewalteinwirkung bei einem Hochrasanztrauma als Ursache (Rammelt et al. 2008). Auffällig ist ein Häufigkeitsgipfel der Sprunggelenkfrakturen bei jungen Männern zwischen fünfzehn und 24 Jahren und älteren Frauen über siebzig Jahren (Jensen et al. 1998). Die Inzidenz der Sprunggelenkfraktur korreliert außerdem mit der Zunahme des BMI (Jensen et al. 1998, Rammelt et al. 2008). Zu einer Verletzung der Syndesmosebänder kommt es meist durch Außenrotation und Abduktion (Rammelt et al. 2008, Rammelt 2004). Daher kommt die Verletzung oft im Sport, allerdings auch nach einfachen Umknicktraumata vor (Lin et al. 2006). Verletzungen der Syndesmose sind aufgrund des fehlenden Zusammenhalts von Tibia und Fibula durch die Syndesmosebänder instabile Verletzungen.

## 5.3 Klassifikation der Sprunggelenkfrakturen

Die Sprunggelenkfrakturen werden nach der Klassifikation nach Weber eingeteilt (s.

Tabelle 1) (Rammelt 2004).

*Tabelle 1. Klassifikation der Sprunggelenkfrakturen nach Weber/Danis.*

<b>Klassifikation</b>	<b>Fraktur des Malleolus lateralis</b>	<b>Syndesmose</b>
<b>Weber A</b>	unterhalb der Syndesmose	intakt
<b>Weber B</b>	auf Höhe der Syndesmose	mögliche Läsion
<b>Weber C</b>	oberhalb der Syndesmose	rupturiert + Ruptur der Membrana interossea
<b>Maisonneuve-Fraktur</b>	oberhalb der Syndesmose	rupturiert + Ruptur der Membrana interossea möglich: Fraktur des Malleolus medialis oder Riss des Ligamentum deltoideum

## 5.4 Konservative Therapie der Sprunggelenkfrakturen

Eine knöcherne Verletzung kann, solange sie stabil und nicht disloziert ist, konservativ durch Ruhigstellung mit Unterschenkelschiene oder -gips für sechs Wochen in Neutral-Null-Stellung therapiert werden. Dies trifft vor allem für Frakturen vom Typ Weber A oder B ohne Verletzung des Syndesmosebandkomplexes zu.

## 5.5 Operative Therapie der Sprunggelenkfrakturen

Eine dislozierte Fraktur führt ebenso wie eine Ruptur der vorderen und hinteren Syndesmoseanteile zu einer Instabilität des oberen Sprunggelenks (Teramoto et al. 2008). In 20% der Fälle geht eine Fraktur vom Typ Weber B mit einer Verletzung der Syndesmose einher (Zalavras und Thordarson 2007). Hier ist eine Operation erforderlich.

### 5.5.1 Operativer Standard

Als Standardversorgung erfolgt bei akuter instabiler Syndesmoseverletzung eine offene Reposition und innere Stabilisierung der Fraktur – ORIF: Open Reduction Internal Fixation – und die Transfixation mittels Stellschraube oder Nahtknopf (Miller und Skalak 2014). Eine Fixation der Syndesmose mittels Stellschrauben reduziert die Instabilität des Gelenks, kann das Bewegungsausmaß aber deutlich einschränken. Daher wird empfohlen, die Stellschrauben nach sechs bis acht Wochen zu entfernen, um die Normalfunktion so bald wie möglich wiederherzustellen (Liu et al. 2016).

Intraoperativ kann die Syndesmosestabilität durch Tests überprüft werden. Beim Frick-Test wird das Sprunggelenk in leichter Dorsalextension nach außen rotiert. Bei gerissener Syndesmose zeigt sich eine Erweiterung des tibiofibularen Gelenkspaltes. Auch der Haken-Test zeigt bei rupturierter Syndesmose eine Erweiterung des tibiofibularen Gelenkspaltes, wenn mit einem Haken an der osteosynthetisch versorgten Fibula gezogen wird. Jedoch kann er keine hundertprozentige Sicherheit über eine Instabilität der Syndesmose liefern (Bonnaire und Bula 2010).

### 5.5.2 Bildgebende Verfahren

Die bildgebenden Verfahren – vor allem der intraoperative Standard – werden in der Literatur kontrovers diskutiert und im Verlauf dieses Kapitels erörtert.

#### 5.5.2.1 Präoperative Bildgebung

Die präoperative Diagnostik der knöchernen Strukturen umfasst standardmäßig eine anterior-posterior-Röntgen-Aufnahme mit 20° Innenrotation („mortise view“) sowie eine exakt laterale Aufnahme des Sprunggelenks. Der „mortise view“ wird für die Darstellung von Frakturen des Malleolus lateralis, medialis und des Volkmannndreiecks an der Hinterkante der Tibia verwendet (Bonnaire und Bula 2010, von Recum 2006).

#### 5.5.2.2 Ein Vergleich: Intraoperative 2D- oder 3D-Bildgebung

Die intraoperative Beurteilung erfolgt derzeit mittels konventioneller zweidimensionaler Durchleuchtung der lateralen Ebene und des „mortise views“ durch ein mobiles C-Bogen Röntgengerät. Trotz gewissenhafter Reposition unter zweidimensionaler Röntgenkontrolle wurde bei der operativen Versorgung von Sprunggelenkfrakturen in der Literatur schon oft von Malrepositionen und Revisionen berichtet (Kendoff et al. 2009, Richter und Zech 2009). Zuletzt wurden Malrepositionsraten von 16% bis zu 40% beobachtet, womit statistisch jedes dritte bis jedes sechste operierte Gelenk betroffen war (Franke et al. 2012, Franke, von Recum, et al. 2014, Franke et al. 2013, Sagi et al. 2012, von Recum 2006). Ein erhöhtes Risiko für Komplikationen nach einer Revision ist bekannt (Walsh et al. 2018). Einige Autoren gaben zusätzlich an, dass sowohl eine inadäquate radiologische Beurteilung der Syndesmoseposition durch die Operateure als auch eine mangelhafte röntgenologische Aufnahmetechnik Ursache der Malrepositionsquote sein könnte, und dadurch das klinische Resultat negativ beeinflusst werden könnte (Davidovitch et al. 2013). Die konventionelle zweidimensionale Röntgendurchleuchtung wird als Standard bei der Beurteilung des Sprunggelenks eingesetzt. Da die operative Sprunggelenkfrakturversorgung nachgewiesenermaßen mit einem hohen

Risiko der Malreposition einhergeht, wird intraoperativ deswegen eine erhöhte Vigilanz bei der Reposition empfohlen (Gardner et al. 2006).

Seit über fünfzehn Jahren steht einigen Kliniken neben der derzeit standardmäßig durchgeführten intraoperativen zweidimensionalen Durchleuchtung die intraoperative dreidimensionale Bildgebung zur Beurteilung der Sprunggelenkreposition zur Verfügung. Es stellte sich heraus, dass nach konventioneller zweidimensionaler Bildgebung mit zufriedenstellenden Ergebnissen in einer intraoperativen dreidimensionalen Bildgebung in 20-40% der Fälle dennoch ein korrekturwürdiges Ergebnis aufgezeigt werden konnte (Atesok et al. 2007, Luxenhofer et al. 2020). Daher empfehlen die Leitlinien der Sprunggelenkfrakturen der Deutschen Gesellschaft für Unfallchirurgie seit 2015 eine intraoperative 3D-Bildgebung nach Positionierung der stabilisierenden Stellschraube, um eine Fehlstellung der Fibula zu vermeiden (Schmidmaier et al. 2015, Hinweis: aktuell in Überarbeitung). Durch die intraoperative 3D-Bildgebung wird der Patient im Vergleich zur konventionellen Durchleuchtung allerdings einer erhöhten Strahlenbelastung ausgesetzt, deren Anwendung gerechtfertigt sein sollte (Luxenhofer et al. 2020).

#### 5.5.2.3 Vorteile der intraoperativen 3D-Bildgebung gegenüber der Computertomographie

In der Literatur berichten einige Autoren, dass die 3D-Bildgebung in vielen Fällen zu einer verbesserten Sprunggelenkreposition beiträgt, da durch sie eine exaktere Einsicht in den Gelenkspalt ermöglicht wird, deren Information bei Betrachtung des zweidimensionalen Bildes fehlt (Kendoff et al. 2009, Luxenhofer et al. 2020, Richter und Zech 2009). Ein Vergleich mit der kontralateralen Seite ist ebenfalls möglich. Einige Autoren empfehlen zudem mindestens eine postoperative Computertomographie (CT) zur Nachkontrolle, falls intraoperativ keine dreidimensionale Betrachtung des Gelenks durchführbar ist. Die CT soll die Indikation einer anschließenden Sprunggelenkrevision ermöglichen, wenn die Reposition nicht zufriedenstellend verlief (Barbosa 2006, Schnetzke et al. 2016). Dennoch muss beim postoperativen CT der Kosten-Nutzen-Faktor betrachtet werden. Der Vorteil einer Revision des Gelenks und die Gefährdung durch eine erneute Narkose und Zweitoperation muss abgewogen werden (Yarboro et al. 2017). Bonnaire et al. nannten zudem wirtschaftliche Vorteile für den Patienten und den Chirurgen, wenn durch die 3D-Bildgebung eine Revision vermieden werden kann. Steht eine 3D-Bildgebung nicht zur Verfügung, empfehlen die Autoren daher neben der postoperativen sogar eine präoperative Computertomographie der betroffenen Seite (OP-Seite) und der kontralateralen Seite (Non-OP-Seite), um den intraoperativen Situs besser einschätzen zu können (Bonnaire und Bula 2010).

Andere Autoren stehen der Verbesserung des klinischen Resultates durch eine intraoperative 3D-Bildgebung kritisch gegenüber. So konnten Davidovitch et al. eine effektive Verbesserung der Malrepositionsrate bei Syndesmoseverletzungen durch eine intraoperative 3D-Bildgebung nicht bestätigen. Jedoch war der Anteil der posterioren Syndesmosekompression bei den hierbei untersuchten Patienten dennoch geringer (Davidovitch et al. 2013).

Weiter ist zu berücksichtigen, dass nicht jede Klinik über die Möglichkeit einer dreidimensionalen Bildgebung verfügt. Betrachtet man die wirtschaftlichen Aspekte einer 3D-Bildgebung, sind die initialen Investitionskosten gegenüber der konventionellen Bildgebung definitiv höher. Durch eine verbesserte Prozessqualität im OP und eine potenzielle Vermeidung von Revisionseingriffen und postoperativen CT-Bildern hat die 3D-Bildgebung langfristig ein deutliches Kosteneinsparpotential (Reinbolt et al. 2005, Schmidmaier et al. 2015).

### 5.5.3 Postoperatives Ergebnis der Syndesmoseverletzung

Ein optimales postoperatives Ergebnis nach instabiler Syndesmoseverletzung impliziert Beschwerde- und Schmerzfreiheit, eine uneingeschränkte aktive und passive Bewegung bei einfachen und komplexen Bewegungsabläufen und zusätzlich die volle Kraft aller auf das Gelenk wirkenden Muskelgruppen. Ein zusätzliches Mittel zur Beurteilung des postoperativen Ergebnisses ist die subjektive Zufriedenheit des Patienten. Die optimale Versorgung einer instabilen Syndesmoseverletzung bei der Erstoperation verkürzt die Heilverfahrensdauer, vermindert Sekundärschäden und kann eine operative Revision vermeiden.

Als Schlüssel zu einem guten funktionellen Ergebnis gilt die anatomische Reposition des Gelenks. Durch sie wird der weitere postoperative Verlauf grundlegend beeinflusst und sie erfordert deshalb besondere Achtsamkeit (Gardner et al. 2006). Aus der Literatur geht außerdem hervor, dass postoperativ das klinische funktionelle Ergebnis von Patienten nach Sprunggelenkfraktur mit zusätzlicher Syndesmoseverletzung schlechter ist als das der Patienten, bei denen die Syndesmose intakt geblieben ist (Grass 2000). Ausschlaggebend für den klinischen Verlauf einer instabilen Syndesmoseverletzung ist die anatomische Reposition der gesamten Sprunggelenkgabel, die eine korrekte Länge und Rotation der Fibula sowie die korrekte Stellung im distalen Tibiofibulargelenk ohne Gelenkstufenbildung beinhaltet. Beispielsweise resultiert schon eine laterale Verschiebung des Talus um nur 1mm in einem Verlust der tibiofibulären Kontaktfläche im Sprunggelenk von 42% und erhöht somit dessen Instabilität deutlich (Zalavras und Thordarson 2007). Eine Inkongruenz der Gelenkflächen erhöht den Gelenkverschleiß und kann zu einer frühzeitigen posttraumatischen Arthrose führen (Franke et al. 2012, Franke, von Recum, et al. 2014, Gardner et al. 2006, Hancock et al. 2005, Losch et al. 2002).

### 5.5.4 Leitliniengerechte Nachsorge der Syndesmoseverletzung

Entsprechend den Leitlinien ist die klinische Untersuchung zur Kontrolle von Durchblutung, Schwellung, Entzündungszeichen, Thrombosezeichen und motorischer und sensibler Nervenfunktion von Beginn der Therapie an angezeigt (Schmidmaier et al. 2015, Hinweis: aktuell in Überarbeitung). Die frühe postoperative Mobilisation wird weitgehend empfohlen. Sie führt zu kürzeren Krankenhausaufenthalten, einem besseren subjektiven Empfinden von Schmerz und Bewegung, schnellerer Arbeitswiederaufnahme und einem symmetrischeren Gangbild, wenn auch nicht zu einem besseren funktionellen Ergebnis bezogen auf Kraft, Gelenkschwellung oder passivem Bewegungsausmaß, der Range of Motion (RoM) (Egol et al. 2000, Kimmel et al. 2012, Vioreanu et al. 2007). Das Tragen einer Orthese kann zudem langfristig zu einer besseren Dorsalextension führen (Egol et al. 2000). Dem Großteil der Patienten wird eine postoperative Physiotherapie verordnet, um die Gelenkfunktion, Propriozeption und den Lymphabfluss zu verbessern sowie einer Gelenkinstabilität entgegenzuwirken. In den ersten sechs Wochen soll mit einer Teilbelastung des Gelenks mit 10-20 Kilogramm begonnen werden. Nach einer Röntgenkontrolle in zwei Ebenen kann anschließend eine Vollbelastung des Gelenks mit einer Steigerung von je etwa 10 Kilogramm pro Woche angestrebt werden. Diese wird im Regelfall nach zwölf bis sechzehn Wochen nach Trauma erreicht (Goost et al. 2014, Schmidmaier et al. 2015, Hinweis: aktuell in Überarbeitung).

#### 5.5.4.1 Funktionelle Nachuntersuchung

Eine klinische Untersuchung der Sprunggelenksfunktion erfolgt standardmäßig durch Überprüfung der RoM, der Maximalkraft und der klinischen pDMS-Kontrolle. Die RoM bewertet die Bewegung im Sprunggelenk, nämlich die Dorsalextension/Plantarflexion, die Eversion/Inversion und die Innenrotation/Außenrotation. Die Testung der Kraftgrade nach Janda erfolgt an den auf das Gelenk wirkenden Muskeln und wird auf einer Skala von 0-5 angegeben (0 = Keine Muskelkontraktion; 1 = schwache Kontraktion ohne Bewegungseffekt (10%); 2 = aktive Bewegung in vollem Ausmaß möglich, jedoch nicht gegen die Schwerkraft (25%); 3 = aktive Bewegung in vollem Ausmaß gegen die

Schwerkraft möglich (50%); 4 = aktive Bewegung gegen die Schwerkraft und gegen mittelgroßen Widerstand (75%); 5 = volle, normale Muskelkraft (100%)) (s. 104F) (Janda 2009, Wülker 2015 S.142-145). Die Kontrollen der peripheren Durchblutung, Motorik und Sensorik (pDMS) werden ab dem Beginn der Versorgung einer Syndesmoseverletzung wiederholt durchgeführt. Funktionelle Ergebnisse sollten frühestens nach einem postoperativen Zeitraum von vier Monaten beurteilt werden, weil eine adäquate Abheilung der Verletzungen im Gelenk einige Zeit benötigt (Obremskey et al. 2002, Schmidmaier et al. 2015, Hinweis: aktuell in Überarbeitung). Eine Metaanalyse von 31 Studien zeigte, dass eine Sprunggelenkverletzung bei Erwachsenen in den ersten sechs Monaten zwar gut verheilte, die Sprunggelenkfunktion allerdings auch nach 24 Monaten noch nicht vollständig wiederhergestellt war (Nilsson et al. 2007). Nilsson et al. untersuchten Patienten jeweils nach sechs Monaten und nach einem Jahr, wobei ein Großteil der Patienten auch ein Jahr postoperativ noch Symptome wie Schmerzen, Gelenksteifigkeit, Schwellung und eine funktionelle Einschränkung angab (Nilsson et al. 2007).

#### 5.5.4.2 Komplikationen

Neben akuten Traumafolgen wie dem Kompartmentsyndrom oder Nervenschädigungen z.B. des Nervus peroneus communis oder des Nervus saphenus kann eine nicht-anatomische Reposition langfristig zu posttraumatischen Veränderungen, funktionellen Bewegungseinschränkungen und Schmerzen führen (Gardner et al. 2006, Lin et al. 2006). Klinisch fallen bei Patienten nach instabiler Syndesmoseverletzung häufig Einschränkungen der Dorsalextension, der Plantarflexion sowie geringe Rotationsdefizite im Sprunggelenk auf. Schlimmstenfalls können degenerative Veränderungen und Arthrose bis zum vollen Funktionsverlust des Gelenks auftreten. Eine Arthrose im oberen Sprunggelenk ist in 80 von 100 Fällen posttraumatischer Genese. Sie zeigt sich klinisch mit Anlauf- und Belastungsschmerzen, Bewegungseinschränkungen und einer Schwellneigung bei Belastung. Röntgenologisch zeigen sich in der Röntgenaufnahme in zwei Ebenen die typischen Arthrosezeichen: Gelenkspaltverschmälerung, Osteophyten und Geröllzysten (Breusch 2017). Mindestens einer von zehn Patienten entwickelt nach einer Sprunggelenkverletzung mittel- oder langfristig eine symptomatische Arthrose. Im Anfangsstadium wird diese mit medikamentösen und physikalischen Maßnahmen behandelt. Als ultima ratio kann eine Arthrodesis oder ein künstlicher Gelenkersatz erfolgen (Goost et al. 2014). Darüber hinaus können Anschlussarthrosen benachbarter Gelenke entstehen (Gardner et al. 2006, Ramsey und Hamilton 1976). Bei Sprunggelenkverletzungen sind vor allem das Kniegelenk und die kleinen Gelenke am Fuß betroffen.

### 5.6 Ansätze zur Verbesserung des funktionellen Ergebnisses

Das langfristige klinische Resultat von instabilen Syndesmoseverletzungen wird von einer korrekten Diagnose sowie ihrer unverzüglichen Behandlung beeinflusst und geht mit einer geringeren Invalidität einher (Magan et al. 2014). Eine niedrige postoperative Malrepositionsquote geht mit einem besseren langfristigen funktionellen Ergebnis einher als eine hohe Malrepositionsquote.

Die Arbeitsgruppe MINTOS der BG Klinik Ludwigshafen arbeitet daran, das funktionelle Ergebnis dieser Patienten mittels einer intraoperativen 3D-Bildgebung zu verbessern und stellte zudem radiologische Repositionskriterien der operativen Versorgung auf (s. 5.7). Weiterhin bieten innovative 3D-Bewegungsanalysen die Möglichkeit, eine detaillierte biomechanische Nachuntersuchung der Patienten vorzunehmen. So können auch minimale funktionelle Defizite in statischen und dynamischen Untersuchungen aufgedeckt und quantifiziert werden (s. 5.8).

Für ein Verständnis der Biomechanik eines Gelenks über das Gehen in der Ebene hinaus, können Funktionstests Hinweise über Kraft und Beweglichkeit eines Patienten bei höherer Belastung liefern. Diese Tests werden zudem zur Bewertung von Koordination und Stabilität verwendet. Unter den Begriff „Funktionstests“ fallen in der klinischen orthopädischen Untersuchung die Messung des Finger-



Boden-Abstandes oder das Trendelenburg-Zeichen. Funktionstests wie der Squat (Kniebeuge) oder Sprungtests werden, wenn auch weniger häufig im klinischen Alltag als im Sport, ebenfalls angewendet (Breusch 2017) (s. 5.9). In der aktuellen Arbeit werden die genannten Ansätze zur Verbesserung des funktionellen Ausgangs der Patienten nach akuter instabiler Syndesmoseverletzung erforscht (s. auch 5.10.1).

## 5.7 Studien der Arbeitsgruppe MINTOS

Das stetige Ziel der Arbeitsgruppe MINTOS der BG Klinik Ludwigshafen ist es, die (operative) Versorgung von Patienten mit akuten instabilen Syndesmoseverletzungen zu optimieren (Franke et al. 2012, Franke, von Recum, et al. 2014, Franke et al. 2013, Franke, Wendl, et al. 2014, Vetter et al. 2021). Ein wichtiger Teil der Versorgung ist die operative Reposition des Sprunggelenks. Zur radiologischen Kontrolle der Reposition wird in der BG Klinik Ludwigshafen die intraoperative 3D-Bildgebung verwendet. Seit 2001 steht dort ein SIREMOBIL Iso C 3D zur Verfügung, seit 2005 zudem ein Arcadis Orbic 3D (beide Siemens, Erlangen, Deutschland) (Franke et al. 2012, Vetter et al. 2021). Um die intraoperative Beurteilung der 3D-Bildgebung zu objektivieren, stellte die Arbeitsgruppe MINTOS radiologische Repositionskriterien auf (s. Tabelle 2) (Franke et al. 2012, Vetter et al. 2021). Diese wurden an gängige Kriterien der Radiologie zur CT-Diagnostik des Sprunggelenks angelehnt.

Die Arbeitsgruppe MINTOS postulierte diesbezüglich, dass ein Patient mit einer akuten instabilen Syndesmoseverletzung ein mittel- und langfristig besseres klinisches Resultat aufweist, wenn jene Repositionskriterien der intraoperativen Beurteilung des 3D-Gelenkbildes erfüllt sind (Franke et al. 2012).

In eine Folgestudie des Jahres 2020 wurden Patienten eingeschlossen, die zwischen 2001 und Dezember 2010 in der BG Klinik Ludwigshafen aufgrund einer instabilen Syndesmoseverletzung mittels 3D-Bildgebung operativ reponiert worden waren. Die Patienten wurden retrospektiv anhand der definierten Repositionskriterien von einem erfahrenen Unfallchirurgen in zwei Gruppen eingeteilt. Bei Gruppe I (N=41) waren die Repositionskriterien erfüllt, bei Gruppe II (N=32) waren die Repositionskriterien nicht erfüllt. Die Patienten wurden mittels Fragebögen und klinisch mit einer RoM-Testung nachuntersucht. Außerdem wurde die Ausprägung einer posttraumatischen Arthrose des betroffenen Sprunggelenks anhand einer Röntgenkontrolle des Sprunggelenks in zwei Ebenen bewertet. Das Ergebnis deren Studie war, dass die Patienten der Gruppe I, bei der die Repositionskriterien erfüllt waren, ein signifikant besseres funktionelles Ergebnis aufwiesen als die Patienten der Gruppe II, bei der die Repositionskriterien nicht erfüllt waren. Neben dem Score nach Olerud und Molander zur Bewertung der OSG-Funktionalität fiel auch der Kellgren/Lawrence-Score zur Einschätzung des Arthrosegrades im betroffenen Sprunggelenk signifikant besser aus (Gruppe I 1,24 Punkte vs. Gruppe II 1,79 Punkte). Klinisch war das Dorsalextensionsdefizit des betroffenen Sprunggelenks im Vergleich zur kontralateralen Seite bei Gruppe I kleiner als bei Gruppe II.

<ul style="list-style-type: none"><li>• Betrachtung der axialen multiplanaren Rekonstruktion (MPR) in Bezug auf:<ul style="list-style-type: none"><li>- Abschluss des Vorderrandes der Fibula in einer harmonisch elliptischen Linie mit dem Pilon tibiale.</li><li>- Korrekte Einstellung der Fibula in der Inzisur in Bezug auf Topographie und Weite der Syndesmose unter Beachtung der bekannten Schwierigkeiten durch interindividuelle Unterschiede.</li><li>- Gleiche Weite der Gelenkspalten zwischen Talus und den Malleolen.</li><li>- Korrekte Rotation des Außenknöchels ausgedrückt durch kongruente Stellung der Malleolen in Bezug auf den Talus.</li></ul></li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Betrachtung der koronaren MPRs in Bezug auf:<ul style="list-style-type: none"><li>- Gleiche Weite der Gelenkspalten zwischen Talus und Malleolen und der Syndesmose.</li><li>- Korrekte Länge der Fibula.</li></ul></li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Betrachtung der sagittalen MPRs in Bezug auf:<ul style="list-style-type: none"><li>- Korrekte Lage der Implantate.</li></ul></li></ul>

## 5.8 Instrumentelle 3D-Bewegungsanalyse

### 5.8.1 Einführung in die Bewegungsanalyse

Mit den technischen Mitteln der Bewegungsanalyse wird der Bewegungsapparat eines Organismus untersucht. Man unterscheidet die visuelle 2D-Abbildung der Bewegung über Videokameras von der instrumentellen 3D-Abbildung durch LED-Lichtmarker oder reflektierende Marker, die von technischen Hilfsmitteln erfasst werden. Die Bewegungsanalyse dient der genauen biomechanischen Berechnung und Darstellung von Kinematik und Dynamik (Ludwig 2015, S.141-153, Roth und Willimczik 1999, Schmidt et al. 1999).

### 5.8.2 Biomechanische Grundlagen

In der Kinematik wird die Bewegung von Körpern und Punkten im Raum untersucht, ohne die dazugehörigen Kräfte zu beachten. Mit ihr werden Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung beschrieben. Der Kinematik gegenüber steht die Dynamik. In der Dynamik wird der Zusammenhang von Bewegungen und den Bewegungen zugrunde liegenden Kräften untersucht. Sie ist in Statik und Kinetik unterteilt (Roth und Willimczik 1999).

Bei der Statik stehen die zugrunde liegenden Kräfte im Gleichgewicht, sodass es zu keiner Bewegung des Körpers kommt. Die Kinetik betrachtet die Bewegung eines Körpers, z.B. Rotation oder Ortsveränderung, durch den Einfluss innerer oder äußerer Kräfte. Hierbei wird zwischen Translations- und Rotationsbewegungen unterschieden.

Interne Kräfte, die in Gelenken wirken, können klinisch nur über invasive Methoden gemessen werden. Über die Kenntnis der externen Kräfte kann jedoch mittels inverser Dynamik unter Beachtung des 1. und 2. Newtonschen Gesetzes auf die internen Kräfte geschlossen werden (Roth und Willimczik 1999). Zudem können Gelenkmomente und -leistungen durch Gelenkwinkel und externe Kräfte berechnet werden (Klöpfer-Krämer und Augat 2015).

Ein Gelenkmoment gleicht der körperlichen Antwort auf äußerlich einwirkende Momente durch Schwerkraft, Bodenreaktionskraft sowie Segmentgewicht und -trägheit. Das Gesamtmoment errechnet sich aus der Summe der Extensions- und Flexionsmomente. Die Gelenkleistung, auch „power“ genannt, wird aus der Winkelgeschwindigkeit berechnet, mit der das Gelenkmoment wirksam ist (Wirth 2002). Gelenkmoment und -leistung beschreiben die Belastung, die auf das Gelenk einwirkt.

### 5.8.3 Instrumentelle 3D-Bewegungsanalyse

Eine 3D-Bewegungsanalyse kann prinzipiell bei allen Körperteilen und größeren Gelenken angewandt werden. Durch sie wird die quantitative Datenerhebung von kinematischen und kinetischen Parametern wie die im vorhergehenden Kapitel beschriebenen Gelenkwinkel und Gelenkmomente im dreidimensionalen Raum und die räumlich-zeitlichen Parameter wie Schrittlänge und Ganggeschwindigkeit realisiert (Baker und Robb 2006). Diese Parameter ermöglichen die Beurteilung der Beanspruchung von Gelenkknorpel, Gelenk, Knochen, Sehnen und Bändern in dynamischen Belastungsszenarien im Alltag und im Sport. Bewegungsanalytische Untersuchungen finden üblicherweise in sogenannten Bewegungs- oder Ganglaboren statt (s. Abbildung 3). Für die Untersuchung des Gehens oder Laufens wird dort eine etwa 10-20 Meter lange Gehstrecke verwendet. Falls funktionelle Bewegungen außerhalb von Alltag und Sport untersucht werden wollen, können zudem instrumentierte Hilfsmittel z.B. Treppenstufen benutzt werden. Während der Patient Bewegungen ausführt, erfassen Infrarotkameras reflektierende Marker, die auf dem Körper angebracht wurden. Diese können von den Kameras mit einer räumlichen Genauigkeit von weniger als einem halben Millimeter erkannt und im Computer rekonstruiert werden, um anschließend Gelenkwinkel zu berechnen. Hochgeschwindigkeitsvideokameras filmen die Bewegungen zusätzlich. Messungen von äußeren Kräften können über in den Boden integrierte Kraftmessplatten erfolgen, die mit Dehnmessstreifen oder piezoelektrischen Transducern ausgestattet sind. So können interne Gelenkmomente und -leistungen zur gezielten Bewertung funktioneller Defizite in Sprung-, Knie-, Hüftgelenk sowie an der Wirbelsäule bei unterschiedlichen Bewegungen dargestellt werden. Zur Orientierung bei der Planung und Durchführung einer solchen 3D-Bewegungsanalyse der unteren Extremität dient die Theorie etablierter Ganzkörper- und Fußmarkermodelle wie dem Oxford Foot Model und dem Salford Lower Body Gait Model (abgeleitet vom Modell von Cappozzo et al., 1995) (Carson et al. 2001). Carsons Oxford-Fußmodell ist ein viersegmentales Modell, welches den Rückfuß, Vorfuß, Hallux und die Tibia einschließt. Analysiert werden hierbei vier intersegmentale Winkel zwischen Tibia und Untergrund, Tibia und Rückfuß, Vorfuß und Rückfuß und Hallux und Vorfuß. Bisher wurden unterschiedliche Modelle zur Bewegungs- bzw. Ganganalyse und Betrachtung der Beweglichkeit im Sprunggelenk veröffentlicht, darunter sowohl ein- als auch mehrsegmentale Varianten, die an ein bestimmtes Forschungsvorhaben angepasst werden können (s. Abbildung 13. Markerpositionen nach dem Salford Lower Body Gait Model (inkludiert Oxford Foot Model), © Qualisys Software. und Tabelle 4) (Reinbolt et al. 2005).

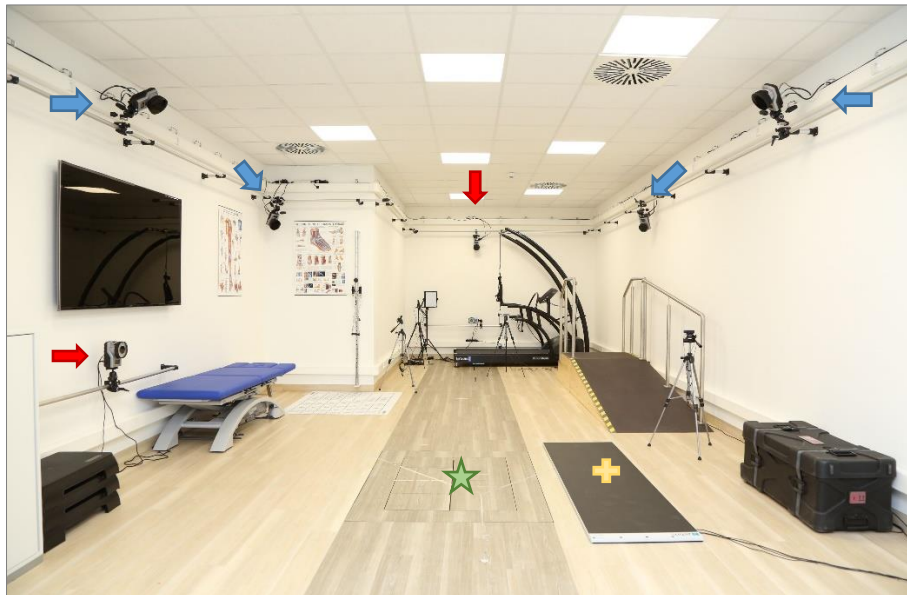


Abbildung 3. Bewegungslabor. Blaue Pfeile: Infrarotkameras, rote Pfeile: Videokameras, grüner Stern: Kraftmessplatte, gelbes Kreuz: Druckmessplatte.

#### 5.8.4 Pedobarographie

Die Pedobarographie ist ein diagnostisches Instrument zur Druckmessung zwischen Fuß und Boden im Stand oder während einer dynamischen Belastung (Skopljak et al. 2014). Als Zusatz zur klinischen Untersuchung ermöglicht die Pedobarographie neben der objektiven Bewertung der Konstitution des Fußes und auch das Erkennen von Deformitäten und Stand- und Gangunsicherheiten. Postoperative Veränderungen im Gangzyklus wie Störungen des Abrollvorgangs oder Fehlbelastungen, z.B. nach einer Hüft-, Knie- oder Sprunggelenkoperation, können so auffallen. Diese Untersuchung dient in der Orthopädie zudem oft der Fertigung von Einlegesohlen.

Die Pedobarographie wird mittels einer Platte durchgeführt, die elektronische Sensoren enthält (s. Abbildung 12). Die sensorische Platte liegt auf dem Boden und die Probanden stehen barfuß auf ihr oder gehen über sie hinweg. Die Sensoren sind direkt mit einem Softwareprogramm zur Datenanalyse verbunden. Die Software präsentiert die Ergebnisse anschließend als Bild eines Fußes, das die Verteilung des Drucks auf der Fußsohle zeigt und Druckspitzen farblich hervorhebt. Areale mit derselben Druckbelastung sind farblich identisch. Als Beispiel steigt in Abbildung 4. Beispiel einer farblich visualisierten Fußdruckdarstellung. Links: im Durchschnitt über einen Gangzyklus, rechts: Maximalwerte. Die Linie beschreibt die Ganglinie während des Gangzyklus die Druckbelastung von grün über gelb nach rot. So ist eine zügige Interpretation der Ergebnisse möglich und macht die Pedobarographie praxistauglich. Alternativen zur Druckmessplatte sind Einlagemesssohlen, die die Druckverteilung im Schuh erfassen können (Rosenbaum 1999, S. 23-29).

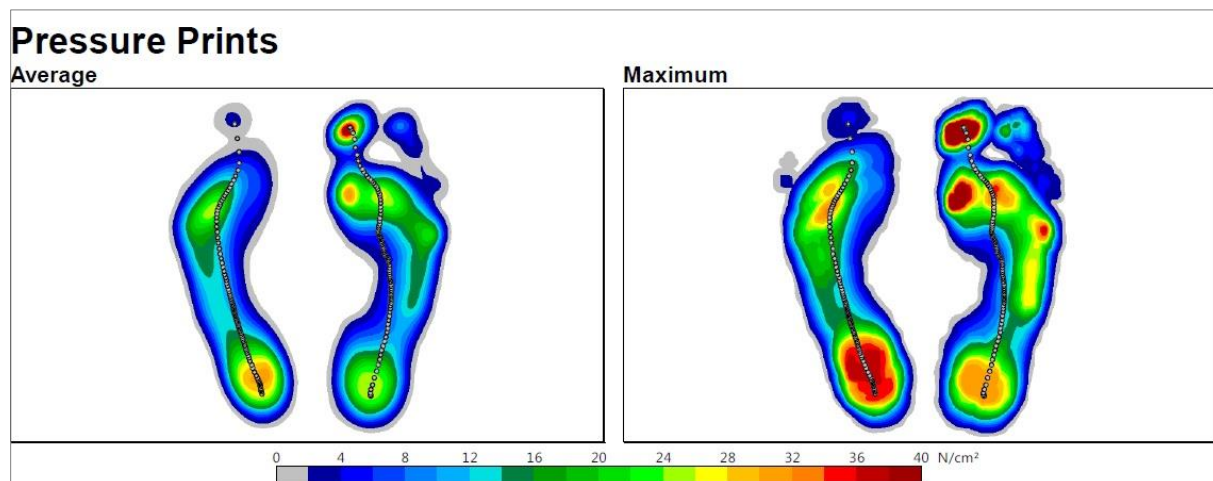


Abbildung 4. Beispiel einer farbig visualisierten Fußdruckdarstellung. Links: im Durchschnitt über einen Gangzyklus, rechts: Maximalwerte. Die Linie beschreibt die Ganglinie während des Gangzyklus.

Die pedobarographischen Daten können sowohl als quantitative Ergebnisse als auch durch Visualisierung als semiquantitative Ergebnisse ausgewertet werden. Qualitativ können im Seitenvergleich Druckspitzen oder Asymmetrien dargestellt werden. Quantitativ werden kinetische Daten wie die Körpergewichtsverteilung beider Füße und das Druckzentrum – das Center of Pressure (CoP) – unter dem Fuß sowie dessen Verlagerung analysiert.

#### 5.8.5 Ganganalyse

Die Beobachtung, Beschreibung und Dokumentation des menschlichen Gehens in der Ebene nennt sich Ganganalyse. Zur systematischen Analyse wird der Bewegungsablauf in zwei Phasen unterteilt: Standphase und Schwungphase. Ein Gangzyklus beschreibt den Zeitraum, in dem ein Bein die komplette Stand- und Schwungphase durchläuft, d.h. der Zyklus beginnt mit dem Aufsetzen des Fußes und durchläuft die Standphase bis zum Abheben des Fußes, woraufhin die Schwungphase folgt. Sie endet mit dem erneuten Aufsetzen des Fußes. Der gleiche Bewegungsablauf wird mit dem anderen Bein einen halben Zyklus versetzt durchgeführt. Beiden Phasen werden wiederum in weitere Unterphasen eingeteilt (s. Abbildung 5). (Ludwig 2015, S.141-153) Die Beschreibung des Gangzyklus dient vor allem der Analyse der räumlichen und zeitlichen Komponente im Seitenvergleich beider Beine. Bei einseitigen Defiziten wird in der Regel das betroffene Bein im Vergleich zur kontralateralen Seite beurteilt (Baker 2013, S. 16, <https://medlexi.de/Gangzyklus> [Stand:17.08.2020]).

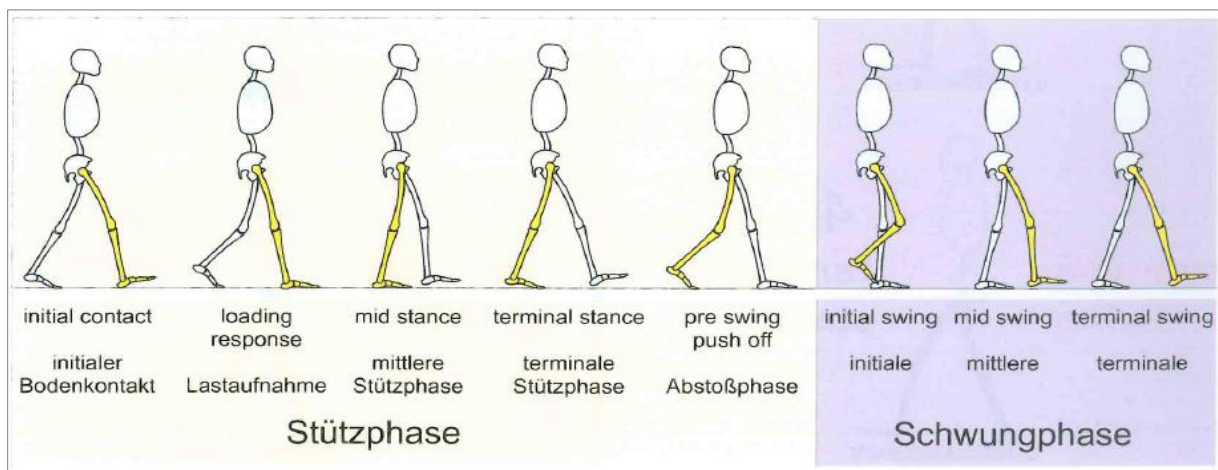


Abbildung 5. Einteilung des Schrittes in acht Phasen nach Perry (2003), aus (Ludwig 2015, S. 141-153).

In der Literatur gibt es bereits eine große Anzahl dreidimensionaler Analysen des Gehens in der Ebene sowohl bei Patienten nach einem Trauma als auch bei gesunden Probanden, z.B. für die Erhebung von Normwerten. Die Auswertung der Ganganalyse stützt sich auf unterschiedliche Parameter, die in der Regel in Zahlenwerten quantifiziert und visuell in Graphen veranschaulicht werden (s. Abbildung 6 und Abbildung 7). Es handelt sich hier um kinematische Parameter, also Gelenkwinkel der unteren Extremität und des Rumpfes, und um kinetische Parameter, also Gelenkmomente und -kräfte. Für das Gehen sind vor allem die Bewegungen im Hüft-, Knie- und Sprunggelenk relevant. Je nach klinischer Fragestellung kann man die Kinematik der Hüftflexion/-extension, Hüftrotation und -adduktion, Knieflexion/-extension, Knierotation und -adduktion, sowie der Dorsalextension/Plantarflexion und Eversion/Inversion des Sprunggelenks betrachten. Die Kinetik des Gehens umfasst neben dem Hüftextensions-, Knieextensions- und Plantarflexionsmoment auch die horizontale und vertikale Bodenreaktionskraft (s. Abbildung 6 und Abbildung 7) (Wirth 2002).

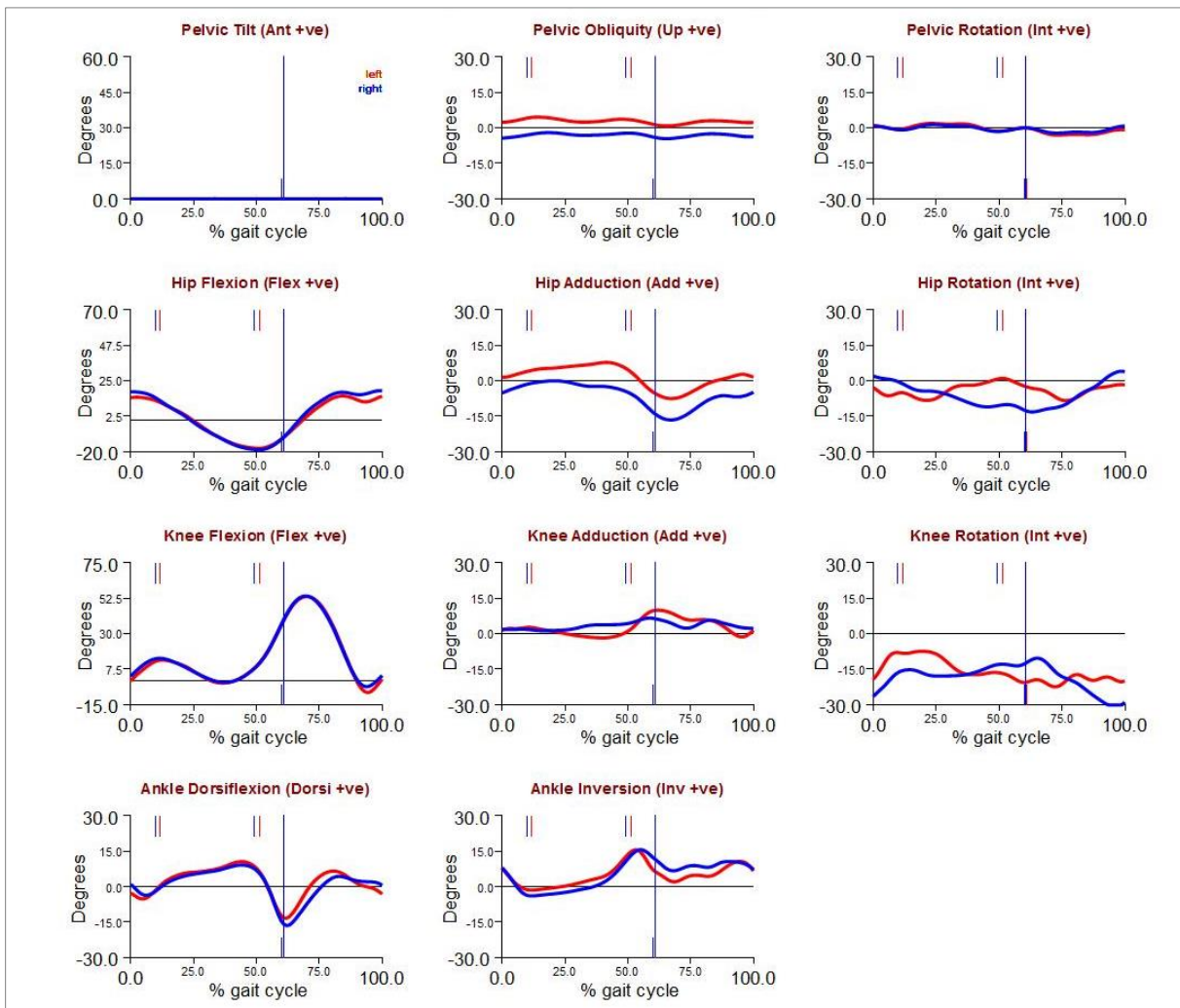


Abbildung 6. Beispiel einer visuellen Darstellung der kinematischen Analyse eines Gangzyklus eines 39-jährigen Patienten nach instabiler Syndesmoseverletzung.



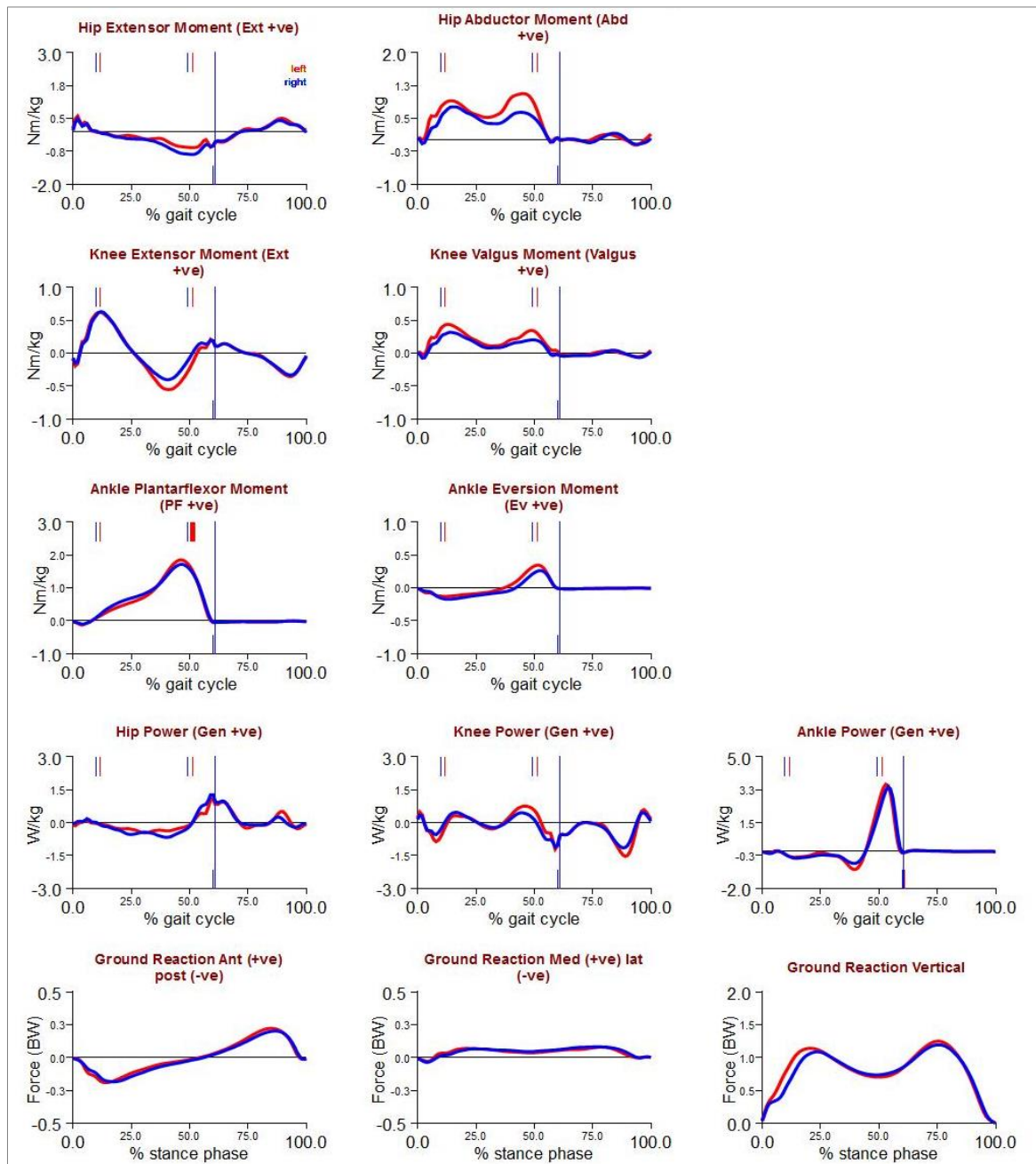


Abbildung 7. Beispiel einer visuellen Darstellung der kinetischen Analyse eines Gangzyklus eines 39-jährigen Patienten nach instabiler Syndesmoseverletzung.



## 5.9 Funktionstests

Funktionstests werden im klinischen Alltag meist ohne eine 3D-Analyse der Bewegung durchgeführt. Stellt sich ein Patient mit definierten Beschwerden in einer Sprechstunde vor, kann er eine gewünschte Übung z.B. einen Squat ausführen, um dem Arzt einen qualitativen, orientierenden Eindruck seiner funktionellen Leistungsfähigkeit zu vermitteln. Eine objektive Messung und quantitative Bewertung ist für die Regelsprechstunde meist zu zeit- und kostenaufwändig. Allein eine zweistündige Ganganalyse ist mit den Kosten einer Kranio-Magnetresonanztomographie von mehreren hundert Euro vergleichbar (Patrick 2003). Daher wird die 3D-Bewegungsanalyse inklusive 3D-Analyse von Funktionstests meist nur bei komplexen Patientenfällen, z.B. durch prolongierte Heilverläufe oder Amputationen, bei (Leistungs-)Sportlern oder für wissenschaftliche Arbeiten durchgeführt (Cvetanovich et al. 2020, Escamilla 2001, Fong et al. 2011).

### 5.9.1 Beidbeiniger Squat

Der (beidbeinige) Squat, auch Kniebeuge genannt, zählt zu den komplexen Funktionstests. Dadurch, dass er biomechanisch einer breiten Spanne an Bewegungen im Alltag und Sport ähnelt, wird er oft detailliert analysiert (Panero et al. 2017). Außerdem ahmt der Squat eine Belastung der unteren Extremität beim Hochstemmen eines Gegenstandes nach. Beim Squat beugt der Patient seine Knie maximal und führt den Rumpf in Richtung Boden, ohne das Gleichgewicht zu verlieren oder die Fersen vom Boden abzuheben (s. Abbildung 8). Anschließend führt er den Rumpf in die Ausgangsposition zurück und streckt seine Knie. Der Squat kann beid- und einbeinig ausgeführt werden.

Die Biomechanik des beidbeinigen Squats wurde in der Literatur bereits im 3D-Format analysiert. In der Literatur sind der maximale Knieflexionswinkel, der maximale Plantarflexions- und Dorsalextensionswinkel und das maximale Plantarflexionsmoment aussagekräftige Parameter (Gomes et al. 2020, Kim et al. 2015, Lamontagne et al. 2011).

In der Ausgangsposition des Squats steht das Sprunggelenk in leichter Plantarflexion, welche beim Ausführen der Übung in eine Dorsalextension übergeht. Der maximale Knieflexionswinkel und somit der tiefste Punkt des Squats wird maßgeblich von der maximal möglichen Dorsalextension im Sprunggelenk mitbestimmt (Gomes et al. 2020, Kim et al. 2015, Lamontagne et al. 2011). Endo et al. wiesen darauf hin, dass die RoM des betroffenen Sprunggelenks beim beidbeinigen Squat die RoM des kontralateralen Sprunggelenks beeinflusst und umgekehrt (Endo et al. 2020). Daraus erschließt sich, dass die maximale Tiefe des beidbeinigen Squats bereits durch ein Dorsalextensionsdefizit einer Seite beeinträchtigt werden kann (Endo et al. 2020). Zudem können durch den Squat Veränderungen der Kraftverteilung bei neuromuskulären Defiziten oder anatomischen Fehlstellungen des Sprunggelenks erfasst werden, indem man die Bodenreaktionskräfte auf beiden Seiten über einen gesamten Squatzyklus oder am tiefsten Punkt des Squats vergleicht (s 6.4.6.1).

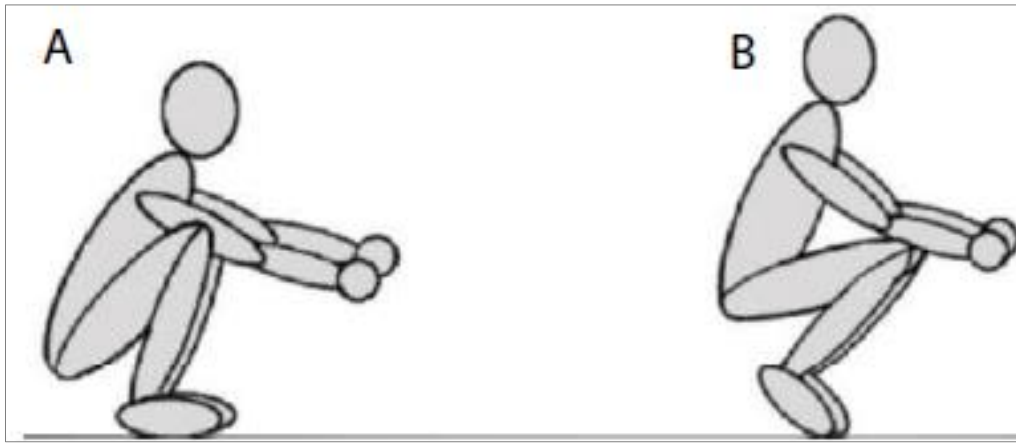


Abbildung 8. Squat mit Fersen auf dem Boden (A), Squat mit angehobener Ferse (B), aus (Wirth 2002).

### 5.9.2 Einbeiniger Squat

Die Ausführung des einbeinigen Squats, auch single-leg squat genannt, ähnelt der Ausführung des beidbeinigen Squats (Gomes et al. 2020, Kim et al. 2015, Lamontagne et al. 2011). Der Patient steht allerdings nur auf einem Bein und streckt das andere Bein als Schwungbein gerade nach vorne aus (s. Abbildung 9). Während der Übung beugt er das Knie seines Standbeins maximal und führt den Rumpf in Richtung Boden, ohne das Gleichgewicht zu verlieren, die Ferse anzuheben oder dem Schwungbein Bodenkontakt zu erlauben. Anschließend führt er den Rumpf in die Ausgangsposition zurück und streckt das Knie des Standbeins. Die biomechanische Analyse des einbeinigen Squats orientiert sich an der des beidbeinigen Squats. Aussagekräftige Parameter sind in der Forschungsliteratur der maximale Knieflexionswinkel, der Dorsalextensionswinkel und das Plantarflexionsmoment. Der einbeinige Squat liefert zudem Rückschlüsse über das Verletzungsrisiko, bei dem eine größere maximale Knieflexion als protektiver Faktor vor Verletzungen gilt (Gianola et al. 2017).

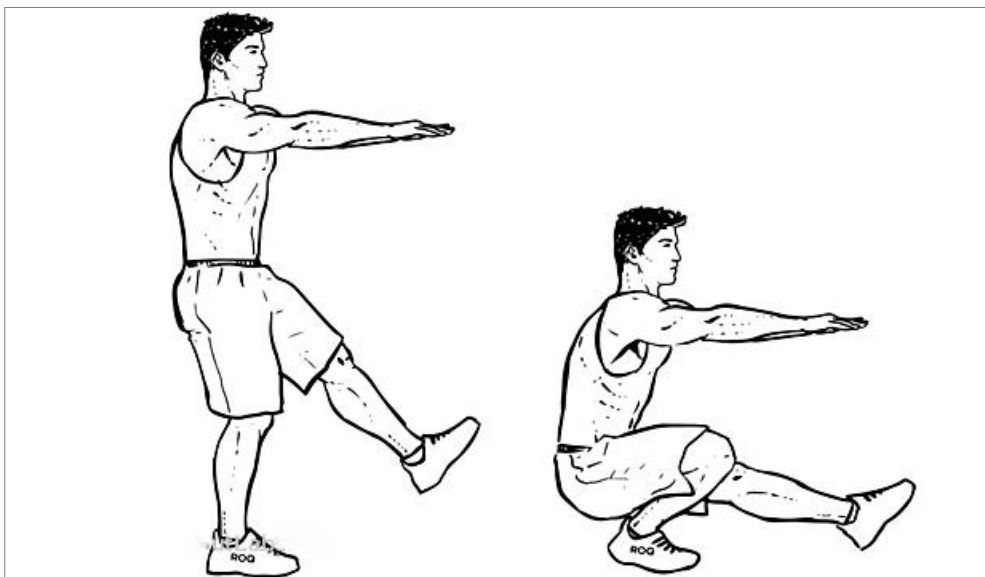


Abbildung 9. Ausführung des einbeinigen Squats mit gerade ausgestrecktem Schwungbein, aus (The New Potato 2021).

### 5.9.3 Y-Balance-Test

Der Y-Balance-Test leitet sich vom Star-Excursion-Balance-Test (SEBT) ab. Er wird zur Analyse der dynamischen Gleichgewichtskontrolle und der Haltungsstabilität herangezogen. Defizite der posturalen Stabilität können auf Verletzungen der unteren Extremitäten oder muskuläre Dysbalancen, u.a. Glutealinsuffizienz, Quadrizepsinsuffizienz und zusätzlich auf ein potenzielles Verletzungsrisiko der unteren Extremitäten schließen lassen (Alnahdi et al. 2015, Gribble et al. 2012, Hegedus et al. 2015). Beim Y-Balance-Test wird im Einbeinstand mit dem angehobenen Bein ein auf dem Boden abgebildetes Y imitiert (s. Abbildung 10 und 6.4.6.3). Das Schwungbein wird möglichst nah am Boden und maximal weit ausgestreckt, während die Ferse des Standbeins stetig Bodenkontakt halten soll. In der Literatur wurden bei Patienten mit chronisch instabilen Sprunggelenksverletzungen (CAI) Defizite der maximal erreichbaren Weiten beschrieben (Hertel et al. 2006, McCann et al. 2017).

Bislang wurden der Y-Balance-Test und der Star-Excursion-Balance-Test in der Literatur meist zur Untersuchung von Sportlern im Sinne einer Return-to-Sports Evaluation oder mit weiteren anspruchsvollen Funktionstests zur Leistungsdiagnostik von Profisportlern verwendet (Sman, Hiller, Rae, Linklater, Black, et al. 2014, Sman, Hiller, Rae, Linklater, Morellato, et al. 2014). Die Anwendung des Y-Balance-Tests zur Untersuchung von Patienten mit operativ versorgter Syndesmoseverletzung wird in der Forschungsliteratur bis dato nicht beschrieben.



Abbildung 10. Ausführung des Y-Balance-Tests, A nach anterior, B nach posterolateral, C nach posteromedial, aus (Gribble et al. 2012).

### 5.9.4 Side-Hop-Test

Der Side-Hop-Test ist ein einbeiniger Sprungtest, bei dem eine Weite von 30cm in seitlicher Richtung von beiden Seiten übersprungen werden muss (s. Abbildung 11). Hier wird die Zeit zur Vollendung von fünf Wiederholungen gemessen. In der Literatur wird bei dieser Übung vor allem die Kinetik und Kinematik von Hüftgelenk und Kniegelenk analysiert (Markstrom et al. 2018). Die Analyse des Sprunggelenks umfasst die Kinematik von Dorsalexension/Plantarflexion und Inversion/Eversion (Yoshida 2018). Der Side-Hop-Test wurde in der Forschungsliteratur bereits bei Patienten mit Sprunggelenkdistorionen angewendet. Bei diesen Patienten ist die RoM des betroffenen Sprunggelenks vermutlich aufgrund einer Bandinstabilität vergrößert (Yoshida 2018, Yoshida et al.

2011). Eine Empfehlung zur Anwendung dieses Tests in der Nachuntersuchung von Patienten mit operativ versorgter Syndesmoseverletzung gibt es in der Forschungsliteratur bis heute nicht.

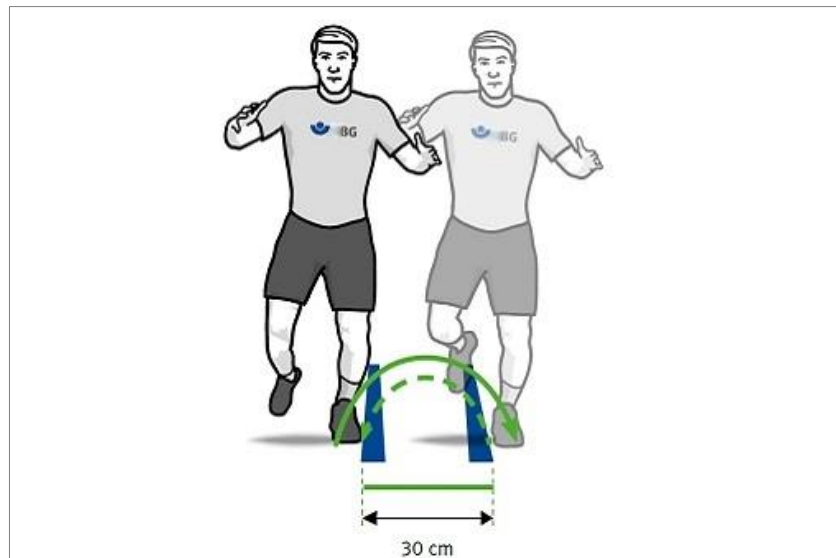


Abbildung 11. Ausführung des Side-Hop-Tests mit Sprung zu beiden Seiten, abgewandelt nach (Verwaltungs-Berufsgenossenschaft 2021).

## 5.10 Aktuelles Forschungsvorhaben

### 5.10.1 Ziel der Arbeit

Das primäre Ziel der vorliegenden Studie ist es, eine quantitative Nachuntersuchung der Sprunggelenkfunktion von Patienten nach der operativen Versorgung einer instabilen Syndesmoseverletzung mittels einer 3D-Bewegungsanalyse unter statischen und dynamischen Bedingungen durchzuführen. Dadurch soll überprüft werden, ob die Erfüllung der in einer Vorgängerstudie postulierten intraoperativen Repositionskriterien zu einem besseren klinischen Ergebnis führt oder nicht (s. 5.7). Diese Repositionskriterien wurden durch Franke et al. aufgestellt. Sie postulierten, dass Patienten, bei denen die Repositionskriterien erfüllt sind, ein besseres postoperatives Ergebnis erreichen als Patienten, bei denen die Repositionskriterien nicht erfüllt sind (Franke et al. 2012)

Durch eine Folgestudie derselben Klinik wurden Patienten nach der operativen Versorgung einer instabilen Syndesmoseverletzung klinisch nachuntersucht (Vetter et al. 2021). In dieser Nachuntersuchung wurden die Patienten, die eine operative Versorgung einer akuten instabilen Syndesmoseverletzung auf der Grundlage der aufgestellten Repositionskriterien in zwei Gruppen eingeteilt. Bei den Patienten der Gruppe I waren die Repositionskriterien in der 3D-Bildgebung erfüllt, bei Gruppe II waren sie nicht erfüllt (s. Tabelle 2). Alle Patienten wurden zwischen 2001 und 2010 operiert. Zwischen der Operation und der ersten Nachuntersuchung lagen mindestens zwei Jahre. Beide Gruppen wurden klinisch durch die RoM-Testung und einen Fragebogen zur Evaluation der Sprunggelenkfunktion (Olerud/Molander Score) nachuntersucht (Olerud und Molander 1984). Dabei wurde ein statistisch signifikanter Unterschied des Dorsalextensionsdefizits des betroffenen Sprunggelenks im Vergleich zur kontralateralen Seite zwischen Gruppe I und Gruppe II gemessen. Bei Gruppe II war das Dorsalextensionsdefizit größer. Überdies ergab die Studie einen signifikanten Unterschied des Olerud/Molander-Scores zur Sprunggelenkfunktionalität (Gruppe II < Gruppe I).

Die in jener Studie teils quantitativ durch die RoM-Messung, teils qualitativ durch die Beantwortung der Fragebögen vorliegenden Ergebnisse sollen nun durch die Untersuchung der Sprunggelenkfunktion mittels dreidimensionaler Bewegungsanalyse weiter quantifiziert werden.

Funktionelle Testungen mittels dreidimensionaler Bewegungsanalyse wurden zwar in den letzten Jahren immer häufiger durchgeführt (s. 5.8.3), allerdings wurden in der Forschungsliteratur bisher meist Patienten mit konservativ therapierbaren Sprunggelenkverletzungen (OSG-Distorsionen und chronischen Sprunggelenkinstabilitäten) oder (Leistungs-)Sportler untersucht. Von Patienten mit operativ versorgten instabilen Syndesmoseverletzungen liegen bis heute nur wenige Daten einer 3D-Bewegungsanalyse vor.

In der aktuellen Arbeit wird angenommen, dass in einer 3D-Bewegungsanalyse schon geringe, jedoch klinisch relevante Einschränkungen der statischen und dynamischen Sprunggelenksfunktion und zusätzlich im Seitenvergleich auch Belastungsasymmetrien erfasst werden können (Losch et al. 2002, Mittlmeier und Rosenbaum 2005). Außerdem soll im Sinne einer Kosten-Nutzen-Analyse bzw. einer Risiko-Nutzen-Analyse evaluiert werden, ob die zusätzliche OP-Dauer und Strahlenbelastung der intraoperativen 3D-Bildgebung zur Sicherstellung der Repositionskriterien für alle Patientengruppen gerechtfertigt ist oder nicht. Zudem wird die hier aufgestellte Methodik der 3D-Bewegungsanalyse als sekundäres Ziel einer Machbarkeitsprüfung unterzogen. In der Forschungsliteratur liegen bislang noch keine Daten von 3D-Bewegungsanalysen mittels Funktionstests von Patienten vor, die eine operative Versorgung einer Syndesmoseverletzung erhalten haben. Diese Arbeit soll Hinweise darauf geben, welche Funktionstests für die vorliegende Patientenklientel geeignet sind.

### 5.10.2 Aufstellung der Hypothese

Die Hypothesen der vorliegenden Studie lehnen sich an die Hypothese der Vorgängerstudien an (s. 5.7). Somit ergibt sich zum einen folgende **Haupthypothese**:

Die Patienten, bei denen die in der Vorläuferstudie postulierten Repositionskriterien erfüllt sind, erzielen in einer dynamischen Funktionsuntersuchung bessere klinische Resultate als diejenigen Patienten, bei denen die Repositionskriterien nicht erfüllt sind. Somit werden die Repositionskriterien als Korrelat für ein besseres funktionelles Ergebnis validiert.

Hieraus leiten sich weitere untergeordnete Hypothesen ab, die nachfolgend „Teilhypothesen“ genannt werden:

**Teilhypothese 1:** Die Patienten, bei denen die in der Vorläuferstudie postulierten Repositionskriterien erfüllt sind, weisen in der 3D-Bewegungsanalyse des Gehens in der Ebene ein geringeres Dorsalextensionsdefizit des betroffenen Sprunggelenks im Vergleich zur kontralateralen Seite auf als die Patienten, bei denen die Repositionskriterien nicht erfüllt sind.

**Teilhypothese 2:** Die Patienten, bei denen die in der Vorläuferstudie postulierten Repositionskriterien nicht erfüllt sind, zeigen beim Gehen in der Ebene eine geringere Belastung sowie eine Reduktion der Ankle Power und des Plantarflexionsmoments des betroffenen Sprunggelenks im Vergleich zur kontralateralen Seite als die Patienten, bei denen die Repositionskriterien erfüllt sind.

**Teilhypothese 3:** Die Patienten, bei denen die in der Vorläuferstudie postulierten Repositionskriterien erfüllt sind, weisen in der 3D-Analyse der Funktionstests (Squat, Einbeinsquat) ein geringeres Dorsalextensionsdefizit des betroffenen Sprunggelenks im Vergleich zur kontralateralen Seite auf als die Patienten, bei denen die Repositionskriterien nicht erfüllt sind.

**Teilhypothese 4:** Die Patienten, bei denen die in der Vorläuferstudie postulierten Repositionskriterien erfüllt sind, zeigen in den Funktionstests „Y-Balance-Test“ und „Side-Hop-Test“ geringere Koordinationsdefizite des betroffenen Beins im Vergleich zur kontralateralen Seite als die Patienten, bei denen die Repositionskriterien nicht erfüllt sind.

Folgende **sekundäre Hypothese** wird außerdem aufgestellt:

Je höher die dynamische Belastung des Sprunggelenks ist, umso deutlicher wirkt sich das Dorsalextensionsdefizit auf die Beweglichkeit angrenzender und kontralateraler Gelenke der unteren Extremitäten aus. Die Indikation zur Einhaltung der in der Vorläuferstudie postulierten Repositionskriterien sollte sich folglich am individuellen Belastungsprofil des Patienten orientieren.

## 6 MATERIAL UND METHODIK

### 6.1 Studienaufbau

Die vorliegende retrospektive monozentrische Kohortenstudie basiert auf Arbeiten der Forschungsgruppe MINTOS (Franke et al. 2012, Vetter et al. 2021). In der Vorbereitungsphase wurde die Studie von der Ethikkommission der Landesärztekammer Rheinland-Pfalz am 26.09.2017 bewilligt (s. D). Im Zeitraum von Juli 2018 bis Dezember 2018 wurde das Patientenkollektiv der Vorgängerstudien von der Forschenden erneut telefonisch und postalisch rekrutiert und nachuntersucht. Die Nachuntersuchung umfasste Anamnese, zwei standardisierte Scores zur Einschätzung der Sprunggelenkfunktion (Olerud/Molander-Score und Ankle Activity Index), die körperliche Untersuchung (RoM), die Pedobarographie sowie die instrumentelle 3D-Bewegungsanalyse des Gehens in der Ebene und verschiedener Funktionstests (s. A, B und F). Die Untersuchung wurde einmalig durchgeführt und dauerte ca. zwei Stunden. Vor der Messung wurde der Patient über das Vorhaben aufgeklärt und die Einwilligung des Patienten schriftlich dokumentiert (s. C). Abschließend wurden Parameter ausgewählt und statistisch ausgewertet, die in der Literatur bei ähnlichen Fragestellungen aussagekräftig sind. Die Parameter werden in den folgenden Kapiteln erläutert. Die Studie basiert auf den ethischen und wissenschaftlichen Grundsätzen der Good Clinical Practice (GCP).

### 6.2 Patientenkollektiv

Das Patientenkollektiv einschließlich der Gruppeneinteilung sowie die Ein- und Ausschlusskriterien wurden aus der Vorgängerstudie übernommen und erweitert, um die Ergebnisse mit deren Resultat vergleichbar zu machen. Bei den Patienten der Gruppe I sind die Repositionskriterien, die durch die Arbeitsgruppe MINTOS aufgestellt wurden, erfüllt worden, bei den Patienten der Gruppe II sind jene Repositionskriterien nicht erfüllt worden. Insgesamt wurden 73 Patienten, die im Zeitraum von Juni 2002 bis Dezember 2010 aufgrund einer akuten instabilen Syndesmoseverletzung in der BG Klinik Ludwigshafen unter Zuhilfenahme der intraoperativen 3D-Bildgebung operativ versorgt wurden, für die vorliegende Studie kontaktiert und um die Studienteilnahme gebeten. Davon gehörten 42 Patienten zu Gruppe I und 31 Patienten zu Gruppe II.

#### 6.2.1 Einschlusskriterien

Patienten beider Geschlechter ab einem Alter über achtzehn Jahren mit Sprunggelenkfrakturen vom Typ Weber B oder C, mit Maisonneuve-Frakturen oder mit isolierten Syndesmoseverletzungen wurden eingeschlossen.

#### 6.2.2 Ausschlusskriterien

Patienten mit Begleitverletzungen derselben Extremität wurden ausgeschlossen. Ebenso wurden Patienten mit Wirbelsäulenbegleitverletzungen und begleitender neurologischer Symptomatik sowie Patienten nach einem Polytrauma mit Schädelhirntrauma größer ersten Grades ausgeschlossen. Ein zusätzliches Ausschlusskriterium bildete eine zum Unfallzeitpunkt vorbestehende primäre oder sekundäre Arthrose des oberen Sprunggelenkes sowie frühere Verletzungen derselben Region. Außerdem wurden Patienten mit einem BMI  $> 30\text{kg/m}^2$  und diejenigen, die altersbedingt nicht erneut anreisen oder die Übungen nach eigener Einschätzung nicht adäquat ausführen konnten, von der Studie ausgeschlossen.

## 6.3 Anamnese, Fragebögen und körperliche Untersuchung

### 6.3.1 Anamnese

In der Anamnese wurden alltags- und berufsspezifische Belastungen, Schmerzen, Medikamenteneinnahmen sowie postoperative (physio-)therapeutische Behandlungen abgefragt und dokumentiert (s. F). Der Anamnesebogen wurde durch das Abfragen des Trauma-Scores nach Olerud und Molander und dem abgewandelten Ankle Activity Score nach Halasi vervollständigt (s. A und B).

### 6.3.2 Der Trauma-Score nach Olerud und Molander

Der Trauma-Score nach Olerud und Molander wird zur subjektiven Funktionsbestimmung des oberen Sprunggelenks verwendet (Olerud und Molander 1984). Er basiert auf neun verschiedenen Elementen: Schmerz, Steifigkeit und Schwellung des betroffenen Sprunggelenks, mögliches Durchführen von Springen, Rennen, Treppensteigen, Kniebeugen sowie Aktivitäten des täglichen Lebens und die Verwendung von Hilfsmitteln. Der Score konnte selbstständig durch den Patienten ausgefüllt und auf Skalenniveau bewertet werden. Punkte von 0 (vollständig beeinträchtigt) bis 100 (nicht beeinträchtigt) wurden vergeben. Der Trauma-Score nach Olerud und Molander wurde in Fünfer-Schritten dokumentiert und in vier Kategorien (schlecht 0-30 Punkte, mittelmäßig 31-60 Punkte, gut 61-90 Punkte, ausgezeichnet 91-100 Punkte) eingeteilt (s. A) (Olerud und Molander 1984).

### 6.3.3 Der Ankle Activity Score nach Halasi

Der Ankle Activity Score (AAS) wurde von Tegner et al. ursprünglich für die funktionelle Einschätzung bei Verletzungen der Bänder am Knie entwickelt und später von Halasi et al. für das Sprunggelenk abgewandelt (Halasi et al. 2004, Tegner und Lysholm 1985). Dieser Score bewertet die tatsächliche Belastung des Sprunggelenks anhand von unterschiedlich anspruchsvollen Sportarten und vom Leistungsniveau des Patienten auf einer Skala von 0-10 (s. B). Trotz der Tatsache, dass der Score erstmals bei Sportlern auf Leistungsniveau oder hohem Freizeitniveau herangezogen wurde, ist der AAS inzwischen auch in weiteren orthopädischen Studien etabliert (Schuh et al. 2012, Tang Qian Ying et al. 2016). Der Ankle Activity Score wurde in dieses Vorhaben aufgenommen, um einen Eindruck über das Aktivitätsniveau der Patienten in ihrem Alltag und deren Anspruch an das Sprunggelenk zu gewinnen.

### 6.3.4 Range of Motion & Kraftgrade nach Janda

Der Patient lag für die klinische Untersuchung des Sprunggelenks mit dem Rücken auf einer Liege. Die Beweglichkeit der Dorsalextension/Plantarflexion und Eversion/Inversion wurde durch die Range of Motion-Messung (RoM) mittels Neutral-Null-Methode gemessen (Wülker 2015, S.142-145). Die Maximalkraft einzelner Muskelgruppen wurde anhand der Kraftgrade nach Janda im Seitenvergleich eingeschätzt. Hier wurde der Musculus tibialis anterior, der für die Dorsalextension und Supination zuständig ist, der Musculus tibialis posterior für die Plantarflexion und Supination und die Mm. peronei für die Plantarflexion und Pronation untersucht (s. 5.5.4.1 und F).



## 6.4 Instrumentelle Bewegungsanalyse

### 6.4.1 Pedobarographie

Über die Pedobarographie (Druckmessung) kann die Verteilung des plantaren Fußdrucks im Stehen und während einer dynamischen Belastung, z.B. dem Gehen in der Ebene, analysiert werden. Über die Druckverteilung unter dem Fuß kann die Verteilung des Körpergewichts auf beide Füße im beidbeinigen Stand und der Verlauf des Druckmittelpunktes im Beid- und Einbeinstand berechnet werden.

#### Durchführung:

Die Pedobarographie wurde mittels einer 2 Meter langen sensorischen Platte durchgeführt (Hersteller Zebris, FDM-2 mit Messfrequenz 100Hz) (s. Abbildung 12). Zuerst wurde eine zehn Sekunden andauernde statische Aufnahme des Patienten barfuß im beidbeinigen Stand auf der Platte gemacht. Anschließend erfolgte eine statische Aufnahme im einbeinigen Stand auf beiden Seiten, um die Einbeinstandstabilität des Patienten zu bewerten. Daraufhin folgte das Gehen in der Ebene über die Druckmessplatte in selbst gewähltem Komforttempo. Je drei Gangzyklen links und rechts werden aufgezeichnet (s. 5.8.5). Der Patient startete das Gehen ca. drei Meter vor der Messplatte, um auf der Messplatte seine normale Ganggeschwindigkeit zu erreichen.

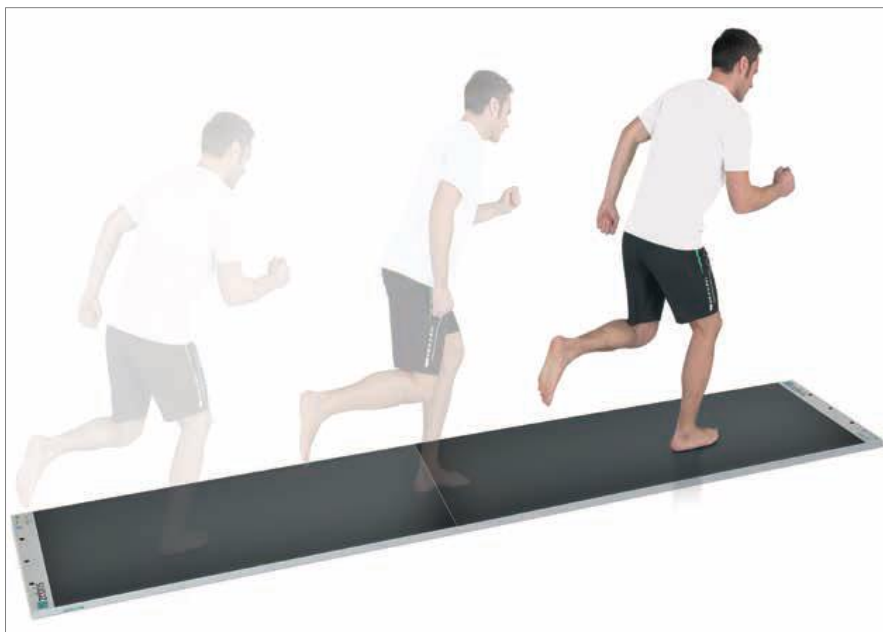


Abbildung 12. Druckmessplatte des Herstellers zebris (Velamed GmbH 2020).

In der Pedobarographie ist der Druckmittelpunkt, das Center of Pressure (CoP), ein wichtiger Parameter (s. 5.8.4) (Skopljak et al. 2014). Seine Variabilität wird durch die Größe der Ellipsenfläche angegeben, mit der ein 95%-Konfidenzintervall der CoP-Bewegung unter dem Fuß eingeschlossen wird. Auch die Geschwindigkeit seiner Schwankung (CoP Geschwindigkeit) wird in der Forschungsliteratur häufig angegeben, denn eine starke und schnelle Schwankung des Druckmittelpunktes unter dem Fuß kann auf eine Instabilität des Sprunggelenks im Stand oder auf Koordinationsschwierigkeiten hinweisen (Maki et al. 1994, Prieto et al. 1996). Durch Summierung der Messwerte einzelner Sensoren in der Druckmessplatte kann die Gesamtkraft unter dem Fuß berechnet und in Vor-, Mittel- und Rückfußkraft aufgeteilt werden. Die Impulsänderung, die durch das Integral

der Kraft über die Zeit berechnet werden kann, gibt den Kraftstoß an, der über einen Gangzyklus von Vorfuß, Mittelfuß oder Rückfuß verrichtet wird. Dadurch können Defizite der Dorsalextension aufgedeckt werden, die das Abrollverhalten beeinträchtigen und die Belastung des Fußes z.B. Richtung einer Mehrbelastung des Mittelfußes verändern können.

Im Folgenden wird in allen Tabellen für die betroffene Seite die Bezeichnung OP-Seite und für die kontralaterale Seite die Bezeichnung Non-OP-Seite als Kurzform verwendet.

Tabelle 3 gibt eine Übersicht aller Parameter, die in der Pedobarographie erhoben wurden. Im Folgenden wird in allen Tabellen für die betroffene Seite die Bezeichnung OP-Seite und für die kontralaterale Seite die Bezeichnung Non-OP-Seite als Kurzform verwendet.

Tabelle 3. Messparameter Pedobarographie.

CoP = Center of Pressure, OP-Seite = betroffene Seite, Non-OP-Seite = kontralaterale Seite.

	Parameter	Gesamteindruck des Gangbildes	Vergleich OP-/ Non- OP-Seite	Einheit
Beidbeiniger Stand	Körpergewichtsverteilung Verhältnis OP-Seite/Non-OP-Seite	x		[%]
	CoP Ellipsenfläche des 95% Konfidenzintervalls	x		[mm <sup>2</sup> ]
	CoP Geschwindigkeit ( $\emptyset$ )	x		[mm/s]
Einbeiniger Stand	CoP Ellipsenfläche des 95% Konfidenzintervalls		x	[mm <sup>2</sup> ]
	CoP Geschwindigkeit ( $\emptyset$ )		x	[mm/s]
Gehen	Impulsänderung Vorfuß		x	[%]
	Impulsänderung Mittelfuß		x	[%]
	Impulsänderung Rückfuß		x	[%]

#### 6.4.2 Kinematische Datenerhebung

Zu Beginn der 3D-Bewegungsanalyse wurden dem Patienten reflektorische Marker auf durch ein Markermodell festgelegte anatomische Landmarken auf der Haut geklebt (s. Tabelle 4 und Abbildung 13). Die Bewegungen dieser reflektorischen Marker wurden durch acht Infrarotkameras (Oqus 500+ mit Messfrequenz 150Hz) aufgenommen und über eine Software (Qualisys, Version 2020.2) dreidimensional rekonstruiert. Zudem nahmen zwei Videokameras (Oqus 210c mit Messfrequenz 150Hz) die Bewegungen des Patienten in der Frontal- und der Sagittalebene auf, um die Bewegungen qualitativ einschätzen und mögliche Unstimmigkeiten in der Auswertung einer Bewegung nachträglich nachvollziehen zu können z.B. ein ungewolltes Absetzen des Schwungbeins.

Die Positionierung der Marker auf der unteren Extremität orientierte sich an den Veröffentlichungen zu bekannten Bein- und Fußmodellen der Bewegungsanalyse. In dieser Forschungsarbeit wurde das „Salford Lower Body Gait Model“ und das „Oxford Foot Model“ verwendet und die Marker wurden gemäß Tabelle 4 platziert (s. Abbildung 14) (Carson et al. 2001, Sint Jan 2007, Stebbins et al. 2006). Weitere Marker wurden auf der oberen Extremität angebracht, um pathologische Verlagerungen des Oberkörpers während der Übungen erkennen zu können. Diese wurden auf dem linken und rechten Acromion, dem linken und rechten Angulus scapulae inferior sowie den Processi spinosi der Wirbelkörper von C7 und TH1 platziert. Die Markerpositionierung erfolgte bei jeder Messung durch die Forschende. Vor jeder Messung wurde das Messsystem kalibriert. Das bedeutet, dass die Positionen der Kameras zueinander und zum Nullpunkt des globalen Messsystems, das die Position der Kraftmessplatten bestimmt, geeicht wurden. So hatten die Kameras und Kraftmessplatten denselben Nullpunkt und arbeiteten räumlich synchronisiert.

Tabelle 4. Markerpositionen nach dem Salford Lower Body Gait Model inkl. Oxford Foot Model.

Markername	Lokalisation	Statischer Trial	Dynamischer Trial
LASIS	Spina iliaca anterior superior links	x	x
L_IC	Beckenkammhöcker links		
LPSIS	Spina iliaca posterior superior links	x	x
RPSIS	Spina iliaca posterior superior rechts	x	x
RASIS	Spina iliaca anterior superior rechts	x	x
R_IC	Beckenkammhöcker rechts		
L_GTROC	Prominentester Punkt des Trochanter major links		
L_THI1-4	Cluster am Oberschenkel links	x	x
L_LKNEE	Lateraler Epicondylus links	x	x
L_MKNEE	Medialer Epicondylus links	x	
L_LEG1-4	Cluster am Unterschenkel links	x	x
L_LMAL	Lateraler Vorsprung des Malleolus lateralis links	x	x
L_MMAL	Medialer Vorsprung des Malleolus lateralis links	x	
R_GTROC	Prominentester Punkt des Trochanter major rechts		
R_THI1-4	Cluster am Oberschenkel rechts	x	x
R_LKNEE	Lateraler Epicondylus rechts	x	x
R_MKNEE	Medialer Epicondylus rechts	x	
R_LEG1-4	Cluster am Unterschenkel rechts	x	x
R_LMAL	Lateraler Vorsprung des Malleolus lateralis rechts	x	x
R_MMAL	Medialer Vorsprung des Malleolus lateralis rechts	x	
L_HEEL_CALC 2	Proximales Ende des posterioren Anteils des Calcaneus links	x	x
L_HEEL_CALC	Distales Ende des posterioren Anteils des Calcaneus links	x	x
L_LCAL	Lateraler Calcaneus links (auf den lateralen Anteil des Calcaneus, auf derselben Höhe und Abstand wie L_MCAL)	x	x
L_FMT	Tuberositas des Os metatarsale V links	x	x
L_TOE_5_MET	Basis des Os metatarsale V links (entlang der Linie durch den distalen Kopf des Os metatarsale I und V)	x	x
L_TOE_2_MET	Dorsaler Rand des Kopfes des Os metatarsale II links	x	x
L_PM6	Proximaler medialer Phalanx der Großzehe links	x	x
L_TOE_1_MET	Basis des Os metatarsale I links (entlang der Linie durch den distalen Kopf des Os metatarsale I und V)	x	
L_P1MT	Basis des Os metatarsale V links	x	x
L_MCAL	Medialer Calcaneus links (auf den lateralen Anteil des Calcaneus, auf derselben Höhe und Abstand wie L_LCAL)	x	
R_HEEL_CALC 2	Proximales Ende des posterioren Anteils des Calcaneus rechts	x	x
R_HEEL_CALC	Distales Ende des posterioren Anteils des Calcaneus rechts	x	x

R_LCAL	Lateraler Calcaneus rechts (auf den lateralen Anteil des Calcaneus, auf derselben Höhe und Abstand wie L_MCAL)	x	x
R_FMT	Tuberositas des Os metatarsale V rechts	x	x
R_TOE_5_MET	Basis des Os metatarsale V rechts (entlang der Linie durch den distalen Kopf des Os metatarsale I und V)	x	x
R_TOE_2_MET	Dorsaler Rand des Kopfes des Os metatarsale II rechts	x	x
R_PM6	Proximaler medialer Phalanx der Großzehe rechts	x	x
R_TOE_1_MET	Basis des Os metatarsale I rechts (entlang der Linie durch den distalen Kopf des Os metatarsale I und V)	x	
R_P1MT	Basis des Os metatarsale V rechts	x	x
R_MCAL	Medialer Calcaneus rechts (auf den lateralen Anteil des Calcaneus, auf derselben Höhe und Abstand wie L_LCAL)	x	

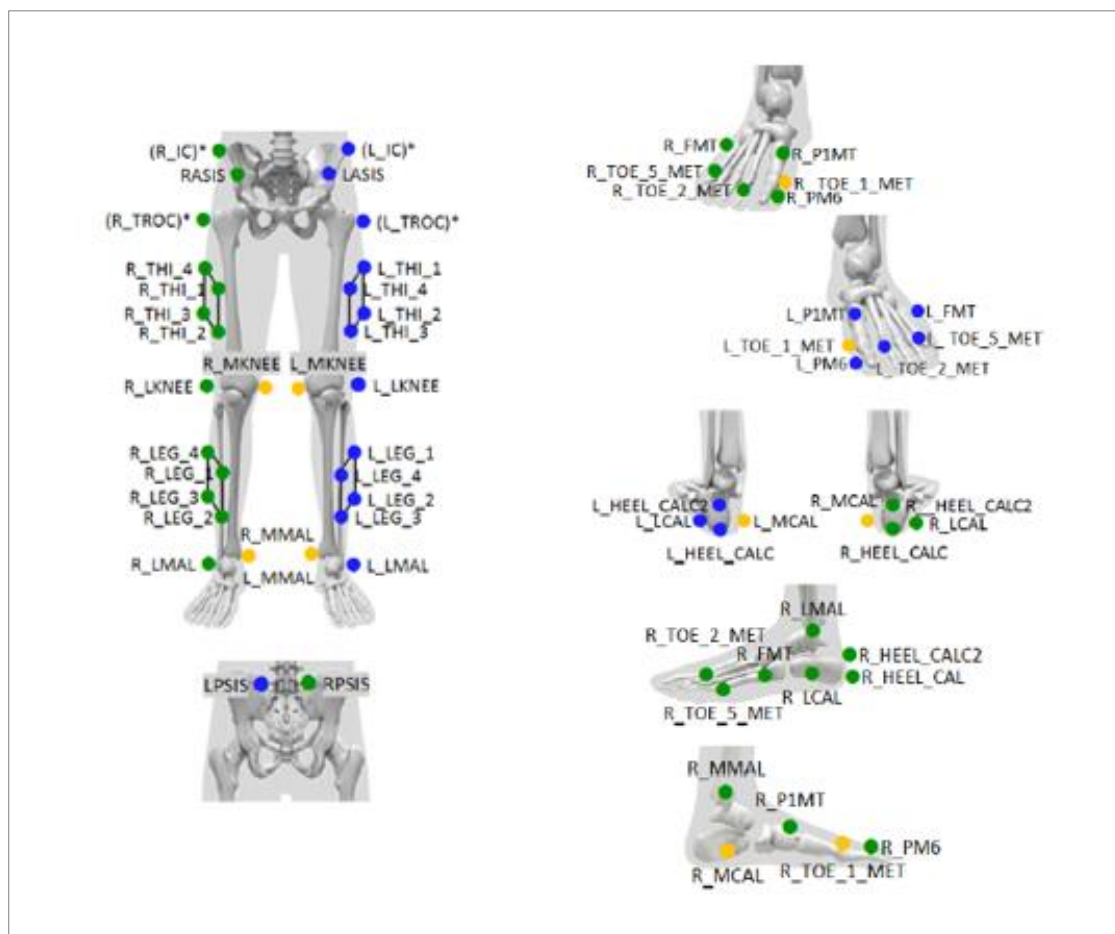


Abbildung 13. Markerpositionen nach dem Salford Lower Body Gait Model (inkludiert Oxford Foot Model), © Qualisys Software.



Abbildung 14. Untere Extremität mit reflektierenden Markern.

### 6.4.3 Kinetische Datenerhebung

Die kinetische Datenerhebung erfolgte mittels zweier Kraftmessplatten (Hersteller Bertec, FP 4060-08-2000 mit Messfrequenz 750Hz). Die Platten waren in den Boden integriert. Die Platten enthielten Dehnmessstreifen, die horizontale und vertikale Kräfte in drei Ebenen sowie den Druckmittelpunkt auf der jeweiligen Platte erfassen und dadurch Gelenkmomente berechnen konnten. Die Platten wurden mit einer Software verbunden, mit der die Daten quantifiziert und visualisiert werden konnten. Die Kraftmessplatten eignen sich im Allgemeinen für Gang-, Sprung- und Gleichgewichtsanalysen (s. 5.8.3).

### 6.4.4 Ablauf der Messung

Zu Beginn der Messung wurde ein statischer Testlauf aufgenommen. Damit wurde anhand der Software überprüft, ob alle Marker durch die Kameras erkannt worden sind. Außerdem wurde das Modell durch den Testlauf am Patienten skaliert, um definierte anatomische Punkte zu berechnen (z.B. Gelenkzentren). Im Anschluss wurden die dynamischen Testläufe aufgenommen. Neben räumlich-zeitlichen Parametern wie Schrittlänge und Ganggeschwindigkeit wurden über die Marker und Infrarotkameras kinematische und über die Kraftmessplatten kinetische Daten erhoben.

Die 3D-Bewegungsanalyse umfasste neben dem Gehen in der Ebene auch funktionelle Tests. Im Anschluss an die Ganganalyse wurden der beidbeinige und der einbeinige Squat (Kniebeuge), der Y-Balance-Test und der Side-Hop-Test durchgeführt (s. 5.9 und ab 6.4.6). Die Funktionstests wurden dem Patienten erklärt und visuell demonstriert. Vor dem Messstart erhielt der Patient eine

Eingewöhnungsphase, in der die Übung einmal geprobt und die Ausführung durch die Forschende anhand des Studienprotokolls korrigiert werden konnte (s. E).

#### 6.4.5 Gehen in der Ebene

Das Gehen in der Ebene ist für den Menschen eine alltägliche Bewegung. Bereits während des Gehens können Bewegungsdefizite und Dysbalancen zwischen betroffenem Sprunggelenk und kontralateraler Seite auffallen. Auch eine Minderung der Gelenkmomente und -kräfte auf der betroffenen Seite bzw. eine Erhöhung dieser auf der kontralateralen Seite können während des Gehens auf einer Kraftmessplatte ermittelt werden (s. 5.8.5). Ganggeschwindigkeit und Schrittlänge geben zudem Hinweise auf pathologische Gangmuster.

##### Durchführung:

Das Gehen in der Ebene wurde auf einer etwa zehn Meter langen Gehstrecke durchgeführt. Der Patient ging barfuß in eigenem Schrittempo über die zentral integrierten Kraftmessplatten hinweg (s. Abbildung 3). Es wurden je fünf gültige Versuche für den rechten und linken Gangzyklus benötigt. Ein Versuch war gültig, wenn eine Schrittabfolge entweder des rechten, linken und wieder des rechten Fußes oder umgekehrt mit vollem Fußkontakt auf der Druckmessplatte aufgenommen wurde. Bei der Messung wurden räumlich-zeitliche, kinematische und kinetische Parameter erhoben (s. Tabelle 5).

Tabelle 5. Messparameter 3D: Gehen in der Ebene.  
OP-Seite = betroffene Seite, Non-OP-Seite = kontralaterale Seite.

	Parameter	Gesamteindruck des Gangbildes	Vergleich OP-/ Non-OP-Seite	Einheit
Räumlich- zeitlich	Ganggeschwindigkeit	x		[m/s]
	Schrittlänge		x	[cm]
Kinematik	Max. Dorsalextension		x	[°]
	Max. Plantarflexion		x	[-°]
	Spanne Dorsalextension/Plantarflexion		x	[°]
	Max. Inversion		x	[°]
	Max. Eversion		x	[-°]
	Spanne Inversion/Eversion		x	[°]
	Mittlere Fußprogression		x	[°]
	Gait Profile Score	x		[°]
Kinetik	Max. Bodenreaktionskraft Standphase		x	[N/kg]
	Max. Bodenreaktionskraft Schwungphase		x	[N/kg]
	Max. Plantarflexionsmoment		x	[Nm/kg]
	Max. Ankle Power		x	[W/kg]

## 6.4.6 Funktionstests

Ziel der Funktionstests ist es, Bewegungen mit höherer Belastung des Sprunggelenks als das Gehen in der Ebene zu untersuchen. Bewegungseinschränkungen während dieser Tests können Defizite demaskieren, die erst bei höherer Belastung oder koordinativem Anspruch auftreten.

### 6.4.6.1 Beidbeiniger Squat

Ein Dorsalextensionsdefizit des Sprunggelenks während des beidbeinigen Squats geht mit einer veränderten Kinematik von Sprung- und zusätzlich Kniegelenk einher (Gomes et al. 2020, Kim et al. 2015, Lamontagne et al. 2011). Der Squat ist eine Übung, die jeder Patient kennt und dessen Ausführung standardisiert werden kann.

#### Durchführung:

Beim beidbeinigen Squat hatten beide Füße inklusive der Ferse dauerhaft Kontakt mit den in den Boden integrierten Kraftmessplatten. Die Füße wurden etwa schulterbreit im parallelen Stand positioniert, die Arme vor der Brust verschränkt und mit dem Blick des Patienten die frontal ausgerichtete Kamera fokussiert (s. Abbildung 8). Zehn Wiederholungen wurden bis zum tiefsten zu erreichenden Punkt des Squats durchgeführt und sowohl kinematische als auch kinetische Parameter beider Extremitäten erhoben (s. Tabelle 6).

*Tabelle 6. Messparameter 3D: Beidbeiniger Squat.  
OP-Seite = betroffene Seite, Non-OP-Seite = kontralaterale Seite.*

	<b>Parameter</b>	<b>Vergleich OP-/Non-OP-Seite</b>	<b>Einheit</b>
<b>Kinematisch</b>	Max. Dorsalextension	x	[°]
	Außenrotation bei max. Squat	x	[-°]
	Knieflexion bei max. Squat	x	[°]
<b>Kinetisch</b>	Plantarflexionsmoment	x	[Nm/kg]
	Vertikale Bodenreaktionskraft im Verhältnis OP-Seite/Non-OP-Seite	x	[%]

### 6.4.6.2 Einbeiniger Squat

Ein Dorsalextensionsdefizit geht auch beim einbeinigen Squat mit einer veränderten Kinematik von Knie- und Sprunggelenk und einer verminderten maximalen Tiefe des Squats einher (Gomes et al. 2020, Kim et al. 2015, Lamontagne et al. 2011). Die einbeinige Ausführung lässt außerdem einen Vergleich des betroffenen Gelenks mit der kontralateralen Seite zu und kann so eine Instabilität von Hüft-, Knie- oder Sprunggelenk aufdecken. Mit der einbeinigen Balance des Einbeinsquats können Koordinationsfähigkeit und Gleichgewicht des Patienten geprüft werden.

#### Durchführung:

Beim einbeinigen Squat hatte das Standbein inklusive der Ferse dauerhaft Kontakt mit einer der in den Boden integrierten Kraftmessplatten. Das Schwungbein wurde gerade nach vorne ausgestreckt (s. Abbildung 9). Zehn Wiederholungen wurden bis zum tiefsten zu erreichenden Punkt des Einbeinsquats



durchgeführt und definierte kinematische und kinetische Parameter beider Extremitäten erhoben (s. Tabelle 7).

Tabelle 7. Messparameter 3D: Einbeinsquat.  
OP-Seite = betroffene Seite, Non-OP-Seite = kontralaterale Seite.

	Parameter	Vergleich OP-/ Non-OP-Seite	Einheit
Kinematisch	Max. Dorsalextension	x	[°]
	Inversion	x	[-°]
	Außenrotation bei max. Squat	x	[-°]
	Knieflexion bei max. Squat	x	[°]
Kinetisch	Plantarflexionsmoment	x	[Nm/kg]

#### 6.4.6.3 Der Y-Balance-Test

Der Y-Balance-Test ist ein anspruchsvoller Koordinationstest. Er ermöglicht erweiterte Einblicke in die posturale Stabilität, die Haltungsstabilität sowie die Koordinationsfähigkeit des Patienten. Zur Differenzierung eines posturalen Stabilitätsdefizits z.B. aufgrund einer akuten oder chronischen Instabilität des Sprunggelenks (AAI oder CAI) oder nach Kreuzbandrekonstruktion wird dieser Test sehr häufig angewendet. Er leitet sich vom Star Excursion Balance Test ab und wird in der Forschungsliteratur als zuverlässiger valider Test der dynamischen Balance beschrieben. Das Testergebnis eignet sich ebenfalls als Prädiktor für Verletzungen (Alnahdi et al. 2015, Gribble et al. 2012).

#### Durchführung:

Der Patient stand einbeinig in der Mitte eines auf dem Boden aufgezeichneten Y. Das Schwungbein sollte nun so weit wie möglich nach vorne (anterior), nach hinten-mittig (posteromedial) und nach hinten-seitlich (posterolateral) gestreckt werden (s. Abbildung 10). Dabei sollte weder die Stabilität des Standbeins verloren gehen noch ein Teil des Körpergewichts auf das Schwungbein verlagert werden, indem der Patient diesen auf den Boden abstellt. Drei Wiederholungen in alle Richtungen wurden mit beiden Extremitäten durchgeführt. Die maximal erreichten Weiten wurden zwischen der betroffenen und der kontralateralen Seite verglichen. Dafür wurde die Entfernung des D1MT-Markers zum PM6-Marker der Großzehe bestimmt. Der Mittelwert der drei Wiederholungen je Richtung wurde auf die funktionelle Beinlänge (Spanne Spina iliaca anterior superior bis Malleolus medialis in cm) normiert. Darüber hinaus wurde der Composite Score erhoben, mit dem die maximal erreichten Weiten in alle drei Richtungen ins Verhältnis zur funktionellen Beinlänge gesetzt werden (Hertel et al. 2006).

Tabelle 8 liefert eine Übersicht über die ausgewählten Parameter.

$$\text{Composite Score} = \frac{\text{anterior (cm)} + \text{posteromedial (cm)} + \text{posterolateral (cm)}}{(\text{Beinlänge (cm)} * 3)} * 100$$

Tabelle 8. Messparameter 3D: Y-Balance-Test.  
 OP-Seite = betroffene Seite, Non-OP-Seite = kontralaterale Seite.

Parameter	Vergleich OP-/Non-OP-Seite	Einheit
Max. Weite anterior/Beinlänge	x	[%]
Max. Weite posteromedial/Beinlänge	x	[%]
Max. Weite posterolateral/Beinlänge	x	[%]
Composite Score	x	[%]

#### 6.4.6.4 Side-Hop-Test

Der Side-Hop-Test prüft die posturale Stabilität während des Einbeinstands und des Einbeinsprungs und ist der anspruchsvollste ausgewählte Koordinationstest. Er schließt durch die Seitwärtsbewegung vermehrt Scherkräfte ein. In der Forschungsliteratur wird der Side-Hop-Test häufig im Sport bzw. an Sportlern angewendet. Im Sport wird dann die Zeit ausgewertet, die der Proband benötigt, um fünf Wiederholungen auszuführen.

##### Durchführung:

Beim Side-Hop-Test sprang der Patient einbeinig 30cm seitwärts und anschließend zurück auf die Startposition. Dieser Sprung wurde fünf Mal mit beiden Beinen ohne Absetzen des Standbeins wiederholt. Auf eine stabile Standphase nach jedem Sprung wurde geachtet. Das Schwungbein durfte zwischen den Sprüngen nicht abgesetzt werden. Die Ausführung des Tests wurde nach der Messung qualitativ mithilfe von drei Kriterien bewertet und in vier Kategorien eingeteilt, da eine quantitative Auswertung nicht möglich war (s. Tabelle 9 und 7.3.6).

Tabelle 9. Qualitätsmerkmale 3D: Side-Hop-Test.

Kriterien	Kategorien
Übersprungene Weite von 30cm	Eins - Optimale Ausführung
Kein Absetzen des Schwungbeins	Zwei - Ausführung in Ordnung
Stabiler Stand nach der Landephase	Drei - Unzureichende Ausführung
	Vier - Keine Ausführung

## 6.5 Weitere Untersuchungen

### 6.5.1 Röntgenaufnahme

Das Vorliegen einer Arthrose des untersuchten Patientenkollektivs war bereits in einer Vorgängerstudie radiologisch durch den Kellgren/Lawrence-Score des Sprunggelenks bewertet und dokumentiert worden. Da die Strahlenbelastung nicht ohne therapeutische Konsequenzen erhöht

werden sollte, wurde auf das erneute Anfertigen einer Röntgenaufnahme zur Bestimmung des Arthrogrades verzichtet.

## 6.6 Auswertung

Die Daten der 3D-Bewegungsanalyse wurden mit dem Programm QTM Manager von Qualisys aufgenommen und anschließend durch die Software Visual 3D, c-motion weiterverarbeitet. Die statistische Auswertung aller Daten erfolgte mit der Beratung des Instituts für Medizinische Biometrie und Informatik der Universität Heidelberg und der Abteilung für Medizinische Statistik, Biomathematik und Informationsverarbeitung des Universitätsklinikums Mannheim mit den Programmen Microsoft Excel 2016 der Firma Microsoft Corporation (Seattle, USA) und dem Statistikprogramm SAS, Release 9.4 (SAS Institute Inc., Cary, North Carolina, USA).

### 6.6.1 Statistik

Für die Gewährleistung der Homogenität der Patientengruppen I und II wurde ein Matching beider Gruppen hinsichtlich bestimmter unabhängiger Variablen (Alter, Geschlecht, Gewicht) durchgeführt und somit eine gleiche Fallzahl in beiden Gruppen erreicht. Für intervall- und verhältnisskalierte Daten wurden Mittelwert, Standardabweichung, Minimum und Maximum errechnet. Für ordinalskalierte Daten wurden Mittelwert, Median, Minimum und Maximum ausgewertet.

#### 6.6.1.1 Interferenzstatistik

Ein 95%-Konfidenzintervall von ( $\alpha < 0,05$ ) wurde als Signifikanzniveau angenommen. Für den Vergleich von Gruppe I und Gruppe II wurde für normalverteilte Daten ein unverbundener t-Test angewandt. Für nicht normal- oder ordinalskalierte Merkmale eignete sich der Mann-Whitney-U-Test (Wilcoxon Two Sample Test). Der Vergleich von relativen Häufigkeiten erfolgte mittels Chi<sup>2</sup>-Test. Waren die Kriterien für diesen Test nicht erfüllt, wurde der Fisher's exakte Test angewandt.

Die Daten der betroffenen Seite der Gruppe I wurden mit den Daten der betroffenen Seite von Gruppe II verglichen. Genauso erfolgte der Vergleich der kontralateralen Seite von Gruppe I mit der kontralateralen Seite von Gruppe II. Für den Vergleich der Mittelwerte der betroffenen Seite mit der kontralateralen Seite wurde für annähernd normalverteilte Daten ein verbundener t-Test angewandt. Bei nicht normal- oder ordinalskalierten Daten wurde alternativ der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test eingesetzt.

## 6.7 Ethikvotum

Für die vorliegende Arbeit liegt seit dem 26.09.2017 ein positives Ethikvotum der Ethik-Kommission der Landesärztekammer Rheinland-Pfalz mit der Bearbeitungs-Nummer 837.304.17 (11138) vor (s. D).

## 7 ERGEBNISSE

Für die vorliegende Studie konnten 35 der 73 Patienten für eine bewegungsanalytische Nachuntersuchung akquiriert werden. Unter Berücksichtigung der festgesetzten Ein- und Ausschlusskriterien wurden schließlich jeweils dreizehn Patienten in Gruppe I und dreizehn Patienten in Gruppe II eingeschlossen (s. Tabelle 10) (s. 6.2.1 und 6.2.2). Die übrigen neun Probanden mussten rückwirkend ausgeschlossen werden, weil sie entweder keinen passenden Matchingpartner in der anderen Gruppe hatten oder einige der Übungen, z.B. wegen anderer Begleiterkrankungen wie zwischenzeitlich erfolgter Hüft-TEP oder Adipositas nicht ausführen konnten. Im Folgenden wird in Tabellen und Ergänzungen in Klammern für die betroffene Seite die Bezeichnung OP-Seite und für die kontralaterale Seite die Bezeichnung Non-OP-Seite als Kurzform verwendet.

Tabelle 10. Charakteristika der Probanden beider Gruppen hinsichtlich Alter, Sex, Größe und Gewicht. Die Matching Paare stehen sich in der Tabelle gegenüber. m = männlich, w = weiblich.

Gruppe I Repositions-kriterien erfüllt					Gruppe II Repositions-kriterien nicht erfüllt				
Proband	Alter [Jahre]	Sex	Größe [m]	Gewicht [kg]	Proband	Alter [Jahre]	Sex	Größe [m]	Gewicht [kg]
LB_01	74,0	m	1,82	108,0	LB_31	71,0	m	1,82	84,0
LB_06	52,0	w	1,61	90,0	LB_22	51,0	w	1,63	55,0
LB_08	76,0	m	1,82	66,0	LB_10	67,0	m	1,72	81,0
LB_09	72,0	w	1,60	69,0	LB_07	68,0	w	1,65	82,0
LB_13	60,0	m	1,70	95,0	LB_12	64,0	m	1,73	95,6
LB_18	46,0	w	1,62	100,0	LB_21	39,0	w	1,68	65,0
LB_19	69,0	m	1,75	91,0	LB_30	63,0	m	1,72	73,5
LB_20	47,0	m	1,89	110,0	LB_11	58,0	m	1,76	133,0
LB_23	49,0	w	1,68	96,0	LB_34	53,0	w	1,62	79,0
LB_24	71,0	m	1,75	78,0	LB_16	62,0	m	1,79	95,0
LB_28	68,0	w	1,69	94,0	LB_25	69,0	w	1,62	51,0
LB_29	58,0	m	1,74	69,0	LB_03	58,0	m	1,65	94,0
LB_33	39,0	m	1,90	108,0	LB_15	36,0	m	1,82	98,0
∅	60,1	8m/5f	1,74	90,3	∅	58,4	8m/5f	1,71	83,5

## 7.1 Anamnese und Fragebögen

Anamnestisch gaben 15% der Patienten der Gruppe I eine Bewegungseinschränkung der Dorsalextension des betroffenen Sprunggelenks an. In Gruppe II beschrieben 54% der Patienten eine Einschränkung der Dorsalextension. Der Olerud/Molander-Score zur Überprüfung der Sprunggelenkfunktion der betroffenen Seite lieferte einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen beiden Gruppen, da Gruppe I im Mittel 98,50 Punkte und Gruppe II nur 89,20 Punkte erzielte ( $p=0,017$ ) (s. 6.3.2). Der Ankle Activity Index des betroffenen Sprunggelenks offenbarte keinen signifikanten Unterschied im Vergleich beider Gruppen miteinander (s. Tabelle 11).

Tabelle 11. Ergebnisse des Olerud/Molander-Scores (OM) und des Ankle Activity Index (AAI) in Punkten.

MW= Mittelwert, Min = Minimum, Max = Maximum, SD = Standardabweichung. Signifikanzniveau  $\alpha = 0,05$ , \* = signifikant mit  $p < 0,05$ .

	Gruppe I					Gruppe II				
	MW	Median	Min	Max	SD	MW	Median	Min	Max	SD
<b>OM</b>	98,50*	100,00	90,00	100,00	3,20	89,20	95,00	50,00	100,00	15,50
<b>AAI</b>	4,20	3,00	3,00	9,00	1,90	3,50	3,00	3,00	6,00	1,00

## 7.2 Klinische Untersuchung

Mit der klinischen Untersuchung wurde die passive RoM des betroffenen Sprunggelenks überprüft. Die Ergebnisse der deskriptiven Statistik finden sich in der Tabelle 12. Die Mittelwerte der Dorsalextension von Gruppe I waren um beinahe  $1,4^\circ$  höher als die der Gruppe II ( $14,1^\circ$  vs.  $12,69^\circ$ ). Die Plantarflexion der betroffenen Seite unterschied sich um ca.  $8^\circ$  (Gruppe I  $34,70^\circ$  vs. Gruppe II  $26,54^\circ$ ). Insgesamt war bei Gruppe II ein größeres Dorsalextensionsdefizit der betroffenen Seite im Seitenvergleich zur kontralateralen Seite zu beobachten als bei Gruppe I. Ein Dorsalextensionsdefizit des betroffenen Sprunggelenks im Vergleich zur kontralateralen Seite wurde bei 15% der Patienten der Gruppe I erhoben. Bei Gruppe II fiel bei 77% der Patienten das Dorsalextensionsdefizit des betroffenen Sprunggelenks im Vergleich zur kontralateralen Seite somit deutlich häufiger auf (Gruppe II: zehn von dreizehn Patienten vs. Gruppe I: zwei von dreizehn Patienten).

Tabelle 12. Ergebnisse der klinischen Untersuchung der RoM des oberen Sprunggelenks in Winkelgraden ( $^\circ$ ).

OPEX = Extension auf der OP-Seite. OPFL = Flexion auf der OP-Seite. NOPE = Extension auf der Non-OP-Seite. NOPFL = Flexion auf der Non-OP-Seite.

MW= Mittelwert, Min = Minimum, Max = Maximum, SD = Standardabweichung.

	Gruppe I					Gruppe II				
	MW	Median	Min	Max	SD	MW	Median	Min	Max	SD
<b>OPEX</b>	14,10	15,00	0,00	20,00	5,23	12,69	15,00	0,00	15,00	4,84
<b>OPFL</b>	37,40	37,50	20,00	40,00	6,18	26,54	30,00	15,00	40,00	6,89
<b>NOPE</b>	15,00	15,00	0,00	20,00	5,16	18,46	20,00	15,00	25,00	3,76
<b>NOPFL</b>	35,60	40,00	25,00	45,00	6,02	33,85	35,00	20,00	40,00	6,82

## 7.3 Instrumentelle 3D-Bewegungsanalyse

### 7.3.1 Pedobarographie

Die Patienten wurden pedobarographisch sowohl im beidbeinigen und einbeinigen Stand als auch beim Gehen in der Ebene untersucht. In Tabelle 13 ist die deskriptive Statistik der Gruppen I und II dargestellt. Der Vergleich beider Gruppen, die interferenzstatistische Auswertung, wurde mit Angabe der  $p$ -Werte komplementiert. Pedobarographisch fielen im Gruppenvergleich keine signifikanten Unterschiede der Verteilung des Körpergewichts auf beide Füße, der Fläche und der Geschwindigkeit des Centers of Pressure (CoP) im Stand sowie keine signifikanten Unterschiede der Impulsänderung des Vor-, Mittel- und Rückfußes beim Gehen in der Ebene auf. Eine nähere Erläuterung der einzelnen Parameter findet sich in Kapitel 6.4.1.

Die pedobarographischen Ergebnisse des betroffenen Sprunggelenks im Vergleich zur kontralateralen Seite werden in Tabelle 14 dargestellt. Hier wurde die Differenz der erhobenen Parameter von betroffenem und kontralateralem Sprunggelenk ermittelt. Beim einbeinigen Stand zeigten sich im Seitenvergleich weder innerhalb der Gruppe I noch innerhalb der Gruppe II statistisch signifikante Unterschiede der CoP Fläche. Zudem fiel bei Gruppe I während des Gehens kein signifikanter Unterschied des betroffenen Sprunggelenks mit der kontralateralen Seite auf. Dagegen wurde bei Gruppe II ein signifikanter Unterschied der Impulsänderung im Mittelfuß während des Gehens deutlich (Non-OP-Seite: 15,57+/- 9,54% vs. OP-Seite: 20,13+/- 6,82%,  $p=0,0413$ ).

Tabelle 13. Deskriptive und Interferenzstatistik der Pedobarographie von Gruppe I und II mit Angabe der p-Werte. OP-Seite = betroffene Seite, Non-OP-Seite = kontralaterale Seite, CoP = Center of Pressure, MW = Mittelwert, Min = Minimum, Max = Maximum, SD = Standardabweichung. Signifikanzniveau  $\alpha=0,05$ , \* = signifikant mit  $p < 0,05$ .

Pedobarographie												
		Gruppe I					Gruppe II					Gr. I vs. II
Parameter		MW	Median	Min	Max	SD	MW	Median	Min	Max	SD	p-Wert
Beidbeiniger Stand	Körpergewichtsverteilung OP-Seite/Non OP-Seite [%]	0,92		0,61	1,44	0,21	0,94		0,43	1,22	0,21	0,86
	CoP Ellipsenfläche des 95% Konfidenzintervalls [mm <sup>2</sup> ]	286,62	236,00	29,00	1252,00	321,49	67,62	234,00	96,00	3388,00	933,59	0,36
	CoP Geschwindigkeit (Ø) [mm/s]	11,69	10,00	3,00	25,00	6,80	14,15	8,00	5,00	51,00	13,29	0,82
Einbeinstand OP-Seite	CoP Ellipsenfläche des 95% Konfidenzintervalls [mm/s]	1157,69	869,00	544,00	2865,00	714,82	1529,15	1312,00	314,00	3118,00	763,55	0,12
	CoP Geschwindigkeit (Ø) [mm/s]	54,38	48,00	24,00	102,00	24,43	50,46	55,00	21,00	75,00	18,16	1,00
Einbeinstand Non-OP-Seite	CoP Ellipsenfläche des 95% Konfidenzintervalls [mm/s]	1020,08	1022,00	460,00	1769,00	370,15	1225,38	964,00	404,00	2682,00	722,03	0,72
	CoP Geschwindigkeit (Ø)[mm/s]	50,23	48,00	28,00	93,00	16,99	46,77	48,00	21,00	85,00	20,89	0,68
Gehen OP-Seite	Impulsänderung Vorfuß [%]	54,34	53,34	33,33	68,37	9,62	57,36	56,91	44,45	74,37	8,78	0,72
	Impulsänderung Mittelfuß [%]	15,57	12,17	4,07	34,31	9,54	11,15	10,81	0,38	22,55	5,59	0,38
	Impulsänderung Rückfuß [%]	30,08	28,87	24,06	39,56	4,60	31,50	29,99	23,56	45,33	6,10	0,61
Gehen Non-OP-Seite	Impulsänderung Vorfuß [%]	50,36	49,84	3,69	71,34	8,18	55,69	55,33	43,46	74,39	8,18	0,31
	Impulsänderung Mittelfuß [%]	20,13	18,34	2,74	61,77	6,82	13,47	12,76	0,39	23,32	6,82	0,18
	Impulsänderung Rückfuß [%]	29,51	28,38	19,17	41,30	4,90	30,84	32,09	18,17	34,79	4,90	0,53

Tabelle 14. Auswertung der pedobarographischen Messung im Seitenvergleich innerhalb einer Gruppe mit Angabe der mittleren Differenz von betroffenem und kontralateralem Sprunggelenk.

CoP = Center of Pressure, MW= Mittelwert, SD = Standardabweichung. Signifikanzniveau  $\alpha = 0,05$ , \* = signifikant mit  $p < 0,05$ .

Einbeinstand	Parameter	Gruppe I			Gruppe II		
		MW	SD	p-Wert	MW	SD	p-Wert
Einbeinstand	CoP 95% Konfidenz Ellipsenfläche [mm <sup>2</sup> ]	137,62	870,55	0,7869	303,77	729,60	0,11
	CoP Geschwindigkeit ( $\emptyset$ ) [mm/s]	4,15	169,85	0,5830	3,69	10,01	0,21
Gehen in der Ebene	Impulsänderung Vorfuß [%]	3,98	16,86	0,4113	1,67	4,27	0,18
	Impulsänderung Mittelfuß [%]	-4,56	16,54	0,3401	-2,32*	3,66*	0,0413*
	Impulsänderung Rückfuß [%]	0,58	0,20	0,6383	0,66	5,49	0,67

### 7.3.2 Gehen in der Ebene

Die Ergebnisse der 3D-Analyse des Gehens in der Ebene beider Gruppen können Tabelle 15 entnommen werden. Im Vergleich von Gruppe I mit Gruppe II zeigte sich ein statistisch signifikanter Unterschied nur in der maximalen Inversion des kontralateralen Sprunggelenks (Gruppe I: 17.5+/- 2.9° vs. Gruppe II: 14.1+/- 4.7°,  $p=0,0378$ ). Darüber hinaus fielen im Vergleich beider Gruppen keine signifikanten Unterschiede auf. Im Vergleich der betroffenen Seite mit der kontralateralen Seite wurden bei beiden Gruppen keine statistisch signifikanten Unterschiede gemessen (s. Tabelle 16). Eine unterschiedliche Tendenz war bei Gruppe II bei der maximalen Ankle Power zu sehen, die im betroffenen Sprunggelenk im Mittel kleiner war als auf der kontralateralen Seite (Non OP-Seite: 3,37 W/kg vs. OP-Seite: 2,97 W/kg,  $p=0,0553$ ).

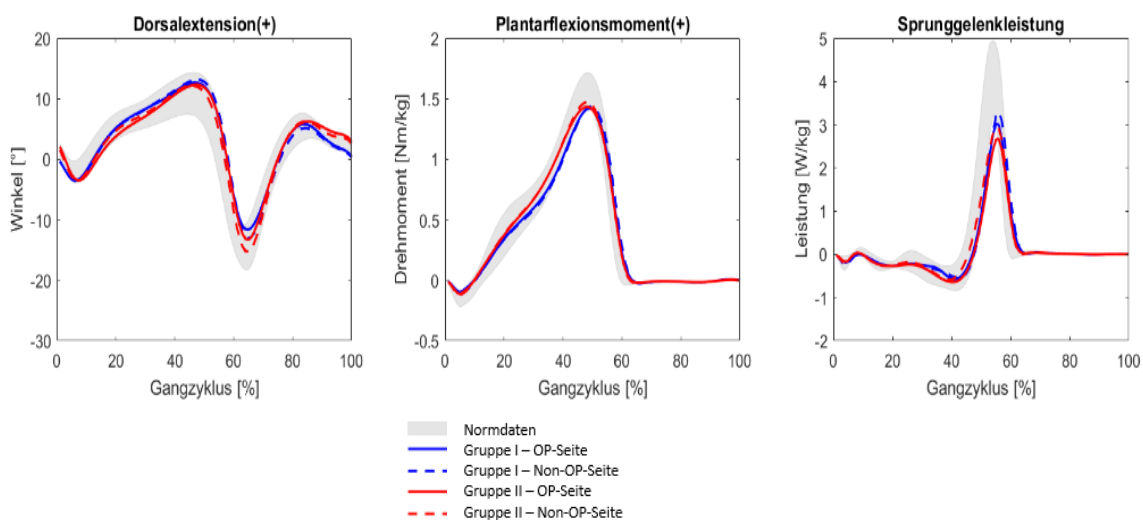


Abbildung 15. Graphische Darstellung ausgewählter Parameter der 3D-Analyse des Gehens in der Ebene der Gruppen I und II über einen Gangzyklus von 0-100%. OP-Seite = betroffene Seite, Non-OP-Seite = kontralaterale Seite.



Abbildung 15 zeigt beispielhaft die Visualisierung von drei Parametern der 3D-Analyse des Gehens in der Ebene (Dorsalextension, Plantarflexion, Sprunggelenkleistung). Der ausgewählte Parameter ist auf der Ordinate über einen vollständigen Gangzyklus von 0 bis 100% (Abszisse) dargestellt. In den abgebildeten Graphen ist der Mittelwert aller Patienten der Gruppe I in blau, daneben das Äquivalent der Gruppe II in Rot dargestellt. Die jeweils durchgezogene Linie beschreibt den Gangzyklus auf der betroffenen Seite. Die gestrichelte Linie steht für die kontralateralen Seite. Die graue Schattierung zeigt Werte einer Normdatenbank der BG Klinik Ludwigshafen zum Vergleich.

Tabelle 15. Deskriptive und Interferenzstatistik der 3D-Analyse des Gehens in der Ebene von Gruppe I und II mit Angabe der p-Werte.

OP-Seite = betroffene Seite, Non-OP-Seite = kontralaterale Seite, MW = Mittelwert, Min = Minimum, Max = Maximum, SD = Standardabweichung.

Signifikanzniveau  $\alpha = 0,05$ , \* = signifikant mit  $p < 0,05$ .

Gehen in der Ebene											
Parameter	Gruppe I					Gruppe II					Gr. I vs. II
	MW	Median	Min	Max	SD	MW	Median	Min	Max	SD	p-Wert
Ganggeschwindigkeit [m/s]	1,26	1,25	1,06	1,64	0,14	1,18	1,17	0,97	1,47	0,18	0,26
Schrittlänge OP-Seite [cm]	64,15	63,70	54,00	75,70	6,51	63,68	64,50	52,90	74,10	7,13	0,87
Schrittlänge Non-OP-Seite [cm]	64,21	62,30	53,70	80,00	7,73	62,09	62,20	52,10	67,90	5,00	0,43
Max. Dorsalextension OP-Seite [°]	13,44	13,46	9,46	16,42	3,05	12,42	12,80	8,24	18,58	2,05	0,33
Max. Dorsalextension Non-OP-Seite [°]	13,26	13,22	8,62	16,41	2,63	13,63	13,55	7,37	21,74	3,51	0,76
Max. Plantarflexion OP-Seite [°]	-12,75	-14,84	-22,18	-2,56	6,57	-14,78	-12,89	-27,56	-6,09	6,35	0,44
Max. Plantarflexion Non-OP-Seite [°]	-13,73	-13,27	-25,01	-2,27	5,72	-15,07	-16,04	-29,52	-3,67	6,87	0,60
Spanne von Dorsalextension bis Plantarflexion OP-Seite [°]	26,18	26,28	18,29	32,78	5,74	27,20	27,19	17,09	36,28	5,36	0,65
Spanne von Dorsalextension bis Plantarflexion Non-OP-Seite [°]	26,99	26,49	17,07	33,63	5,19	28,70	29,93	18,33	36,88	5,80	0,44
Max. Inversion OP-Seite [°]	17,45	18,42	8,32	22,21	3,57	15,37	15,64	9,60	21,69	3,62	0,16
Max. Inversion Non-OP-Seite [°]	17,50	17,83	12,80	24,13	2,86	14,13	13,91	7,55	23,37	4,65	0,0378*
Max. Eversion OP-Seite [°]	-3,37	-2,72	-7,25	0,57	2,38	-3,64	-2,60	-8,47	-1,53	2,57	0,79
Max. Eversion Non-OP-Seite [°]	-2,96	-2,64	-8,57	1,49	2,86	-4,43	-3,24	-12,30	-0,43	3,62	0,27

Spanne von Inversion bis Eversion OP-Seite [°]	20,82	20,22	14,51	29,46	3,66	19,02	19,05	12,10	24,34	3,80	0,2403
Spanne von Inversion bis Eversion Non-OP-Seite [°]	20,46	19,87	15,97	32,70	4,43	18,56	16,96	15,14	24,38	3,46	0,2461
Mittlere Fußprogression OP-Seite [°]	-15,96	-15,32	-24,47	-5,51	5,78	-12,95	-12,94	-20,23	-4,10	6,24	0,2250
Mittlere Fußprogression Non-OP-Seite [°]	-14,21	-14,10	-25,25	-5,00	4,55	-13,30	-12,39	-22,34	-4,10	5,79	0,6626
Gait Profile Score [°]	6,80	6,40	4,60	9,70	1,53	6,92	6,65	4,60	9,30	1,55	0,8517
Max. Bodenreaktionskraft Standphase OP-Seite [N/kg]	1,08	1,08	0,95	1,34	0,08	1,08	1,09	0,97	1,24	0,10	0,8916
Max. Bodenreaktionskraft Standphase Non-OP-Seite [N/kg]	1,03	1,10	0,01	1,38	0,32	1,10	1,10	1,00	1,22	0,06	0,3985
Max. Bodenreaktionskraft Schwungphase OP-Seite [N/kg]	1,08	1,07	0,99	1,20	0,06	1,09	1,09	0,97	1,21	0,08	0,8486
Max. Bodenreaktionskraft Schwungphase Non-OP-Seite [N/kg]	1,10	1,07	1,01	1,26	0,07	1,11	1,09	1,03	1,25	0,07	0,6044
Max. Plantarflexionsmoment OP-Seite [Nm/kg]	1,44	1,43	1,13	1,73	0,14	1,45	1,48	1,13	1,61	0,15	0,7839
Max. Plantarflexionsmoment Non-OP-Seite [Nm/kg]	1,46	1,44	1,19	1,87	0,17	1,50	1,49	1,29	1,71	0,15	0,4777
Max. Ankle Power OP-Seite [W/kg]	3,43	3,43	2,24	5,21	0,48	2,97	3,17	2,23	3,53	0,85	0,1199
Max. Ankle Power Non-OP-Seite [W/kg]	3,58	3,63	2,51	4,85	0,75	3,37	3,27	2,18	4,85	0,82	0,5188

Tabelle 16. Auswertung der 3D-Analyse des Gehens in der Ebene im Seitenvergleich innerhalb einer Gruppe mit Angabe der Differenz von betroffenem und kontralateralem Sprunggelenk.  
 MW = Mittelwert, SD = Standardabweichung.

Gehen in der Ebene						
Parameter	Gruppe I			Gruppe II		
	MW	SD	p-Wert	MW	SD	p-Wert
Schrittlänge [cm]	-0,05	23,62	0,9359	1,59	39,72	0,19
Max. Dorsalextension [°]	0,18	19,27	0,7463	-1,21	34,17	0,24
Max. Plantarflexion [°]	0,98	45,07	0,4472	0,29	49,56	0,84
Spanne von Dorsalextension bis Plantarflexion [°]	-0,81	37,14	0,4482	-1,50	53,69	0,35
Max. Inversion [°]	-0,05	29,50	0,9486	1,24	35,28	0,25
Max. Eversion [°]	-0,41	17,44	0,4133	0,79	42,12	0,53
Spanne von Inversion bis Eversion [°]	0,36	29,69	0,6737	0,46	37,13	0,67
Mittlere Fußprogression [°]	-1,75	38,78	0,1306	0,35	37,70	0,76
Max. Bodenreaktionskraft in der Standphase [N/kg]	0,05	0,30	0,0981	-0,01	0,05	0,43
Max. Bodenreaktionskraft in der Schwungphase [N/kg]	-0,02	0,04	0,1289	-0,01	0,06	0,47
Max. Plantarflexionsmoment [Nm/kg]	-0,02	0,08	0,3670	-0,05	0,13	0,21
Max. Ankle Power [W/kg]	-0,15	0,44	0,2361	-0,40	0,64	0,06

### 7.3.3 Beidbeiniger Squat

Tabelle 17 gibt eine Übersicht der Ergebnisse der 3D-Analyse des beidbeinigen Squats von Gruppe I und Gruppe II und einen Gruppenvergleich der Parameter. Es zeigte sich ein signifikanter Unterschied der Außenrotation sowohl des betroffenen Sprunggelenks ( $p=0,0236$ ) als auch der kontralateralen Seite ( $p=0,0272$ ) bei maximaler Squattiefe. Auf beiden Seiten war die mittlere Außenrotation bei Gruppe I größer als bei Gruppe II (OP-Seite: Gr. I:  $24,64^\circ \pm 6,39^\circ$  vs. Gr. II:  $18,17^\circ \pm 6,95^\circ$ , Non-OP-Seite: Gr. I  $20,27^\circ \pm 6,02^\circ$  vs. Gr. II  $14,94^\circ \pm 5,23^\circ$ ). Neben diesen statistisch signifikanten Unterschieden fielen zudem unterschiedliche Tendenzen der Knieflexion bei maximaler Squattiefe auf. Gruppe I flektierte das Knie auf der betroffenen Seite im Mittel  $93,5^\circ$ , Gruppe II konnte das Knie im Mittel  $80^\circ$  flektieren. Dem gegenüber war die Knieflexion der kontralateralen Seite bei maximaler Squattiefe bei  $95,7^\circ$  bei Gruppe I und bei  $82,9^\circ$  bei Gruppe II.

Die Auswertung der betroffenen Seite im Vergleich zur kontralateralen Seite innerhalb einer Gruppe wird in Tabelle 18 dargestellt. Gruppe I wies mit  $2,3^\circ$  einen signifikanten Unterschied der maximalen Dorsalextension der betroffenen Seite im Vergleich zur kontralateralen Seite auf (OP-Seite  $24,64^\circ \pm 6,04^\circ$  vs. Non-OP-Seite  $26,94^\circ \pm 5,59^\circ$ ,  $p=0,0216$ ). Außerdem gab es bei Gruppe I einen signifikanten Unterschied von  $4,4^\circ$  der maximalen Außenrotation von betroffenem und kontralateralem Sprunggelenk (OP-Seite  $24,64^\circ \pm 6,39^\circ$  vs. Non-OP-Seite  $20,27^\circ \pm 6,02^\circ$ ,  $p=0,0075$ ). Zudem fiel ein signifikanter Unterschied des Plantarflexionsmoments bei maximaler Squattiefe mit einer mittleren Differenz von  $0,11\text{Nm/kg}$  zwischen betroffener und kontralateraler Seite auf (OP-Seite  $0,50 \pm 0,10\text{Nm/kg}$  vs. Non-OP-Seite  $0,39 \pm 0,11\text{Nm/kg}$ ,  $p=0,0029$ ).

Bei Gruppe II wurde während des beidbeinigen Squats ein statistisch signifikanter Unterschied der maximalen Dorsalextension von  $4,8^\circ$  zwischen betroffener und kontralateraler Seite gemessen (OP-Seite  $21,56^\circ \pm 6,42^\circ$  vs. Non-OP-Seite  $26,37^\circ \pm 4,82^\circ$ ,  $p=0,0017$ ). Darüber hinaus lag bei Gruppe II bei maximaler Squattiefe eine Differenz von  $2,9^\circ$  in der Knieflexion der betroffenen und der kontralateralen Seite vor (OP-Seite  $79,97^\circ \pm 18,28^\circ$  vs. Non-OP-Seite  $82,89^\circ \pm 16,98^\circ$ ,  $p=0,0443$ ). Mit  $0,17\text{Nm/kg}$  lag bei Gruppe II außerdem ein statistisch signifikanter Unterschied des Plantarflexionsmoments des betroffenen Sprunggelenks im Vergleich zur kontralateralen Seite vor (OP-Seite  $0,53 \pm 0,11\text{Nm/kg}$  vs. Non-OP-Seite  $0,36 \pm 0,22\text{Nm/kg}$ ,  $p=0,0136$ ).

Tabelle 17. Deskriptive und Interferenzstatistik der 3D-Analyse des beidbeinigen Squats von Gruppe I und II mit Angabe der p-Werte.

OP-Seite = betroffene Seite, Non-OP-Seite = kontralaterale Seite, MW = Mittelwert, Med = Median, Min = Minimum, Max = Maximum, SD = Standardabweichung.

Signifikanzniveau  $\alpha = 0,05$ , \* = signifikant mit  $p < 0,05$ .

Beidbeiniger Squat											
Parameter	Gruppe I					Gruppe II					Gr. I vs. II
	MW	Med	Min	Max	SD	MW	Med	Min	Max	SD	p-Wert
Max. Dorsalextension OP-Seite [°]	24,64	25,32	14,77	37,23	6,04	21,56	22,06	7,26	30,32	6,42	0,2301
Max. Dorsalextension Non-OP-Seite [°]	26,94	28,77	17,98	35,28	5,59	26,37	25,74	18,99	34,53	4,82	0,7895
Max. Außenrotation OP-Seite [°]	24,64	23,98	37,53	13,51	6,39	18,17	20,015	29,47	7,28	6,95	0,0236*
Max. Außenrotation Non-OP-Seite [°]	20,27	19,95	32,24	11,83	6,02	14,94	15,62	23,73	3,63	5,23	0,0272*
Max. Knieflexion OP-Seite [°]	93,50	96,06	62,30	116,82	17,00	79,97	80,28	50,23	112,65	18,28	0,0675
Max. Knieflexion Non-OP-Seite [°]	95,74	95,52	62,79	123,22	14,14	82,89	80,51	56,61	117,15	16,98	0,0727
Max. Plantarflexionsmoment OP-Seite [Nm/kg]	0,50	0,49	0,36	0,70	0,10	0,53	0,555	0,29	0,66	0,11	0,4976
Max. Plantarflexionsmoment Non-OP-Seite [Nm/kg]	0,39	0,37	0,20	0,56	0,11	0,36	0,31	-0,06	0,76	0,22	0,7176
Vertikale Bodenreaktionskraft im Verhältnis OP-Seite/Non-OP-Seite	1,02	1,02	0,88	1,10	0,07	0,99	0,93	0,63	1,69	0,26	0,6811

Tabelle 18. Auswertung der 3D-Analyse des beidbeinigen Squats im Seitenvergleich innerhalb einer Gruppe mit Angabe der Differenz von betroffenem Sprunggelenk und kontralateralem Sprunggelenk.  
 MW = Mittelwert, SD = Standardabweichung. Signifikanzniveau  $\alpha = 0,05$ , \* = signifikant mit  $p < 0,05$ .

Beidbeiniger Squat						
Parameter	Gruppe I			Gruppe II		
	MW	SD	p-Wert	MW	SD	p-Wert
Max. Dorsalextension [°]	-2,30*	3,15*	0,0216*	-4,81*	4,04*	0,0017*
Max. Außenrotation [°]	-4,36*	4,90*	0,0075*	-3,24	6,39	0,11
Max. Knieflexion [°]	-2,24	4,30	0,08	-2,93*	4,47*	0,0443*
Max. Plantarflexionsmoment [Nm/kg]	0,11*	0,11*	0,0029*	0,17*	0,20*	0,0136*

#### 7.3.4 Einbeiniger Squat

Die Ergebnisse der 3D-Analyse des einbeinigen Squats von Gruppe I und Gruppe II können Tabelle 19 entnommen werden. Im Vergleich beider Gruppen miteinander fielen beim einbeinigen Squat keine signifikanten Unterschiede auf. Einzig in der maximalen Knieflexion des betroffenen Beins in der Funktion als Standbein fiel eine unterschiedliche Tendenz auf, denn Gruppe I konnte das Knie im Mittel 62,5° flektieren, Gruppe II jedoch nur 53°.

Der Vergleich von betroffener und kontralateraler Seite innerhalb einer Gruppe wird in Tabelle 20 dargestellt und die jeweilige Seitendifferenz von betroffener zu kontralateraler Seite angegeben. Bei Gruppe I fiel während des einbeinigen Squats ein signifikanter Unterschied der maximalen Dorsalextension auf. Die maximale Dorsalextension der betroffenen Seite war 3,9° geringer als die der kontralateralen Seite (OP-Seite 24,06° +/- 4,86° vs. Non-OP-Seite 27,95° +/- 4,68°,  $p=0,0005$ ).

Auch bei Gruppe II lag ein signifikanter Unterschied der maximalen Dorsalextension mit einer Seitendifferenz von 5,5° vor (OP-Seite 20,60° +/- 6,02° vs. Non-OP-Seite 26,07° +/- 5,32,  $p=0,0269$ ). Ebenso fiel bei Gruppe II im Seitenvergleich der Knieflexion bei maximaler Squattiefe ein signifikanter Unterschied von 10,5° auf (OP-Seite 52,99° +/- 15,29° vs. Non-OP-Seite 63,51° +/- 10,51,  $p=0,0144$ ). Die übrigen Parameter des einbeinigen Squats zeigten bei beiden Gruppen keine signifikanten Unterschiede.

Tabelle 19. Deskriptive und Interferenzstatistik der 3D-Analyse des einbeinigen Squats von Gruppe I und II mit Angabe der p-Werte.

OP-Seite = betroffene Seite, Non-OP-Seite = kontralaterale Seite, MW = Mittelwert, Med = Median, Min = Minimum, Max = Maximum, SD = Standardabweichung.

Signifikanzniveau  $\alpha = 0,05$ , \* = signifikant mit  $p < 0,05$ .

Einbeiniger Squat											
Parameter	Gruppe I					Gruppe II					Gr. I vs. II
	MW	Med	Min	Max	SD	MW	Med	Min	Max	SD	p-Wert
Max. Dorsalextension OP-Seite [°]	24,06	23,72	15,52	30,54	4,86	20,60	19,51	9,27	29,83	6,02	0,14
Max. Dorsalextension Non-OP-Seite [°]	27,95	29,74	19,93	35,35	4,68	26,07	25,91	18,42	34,87	5,32	0,38
Inversion bei max. Squat OP-Seite [°]	-4,98	-4,37	-15,34	-0,29	3,83	-6,88	-6,29	-10,74	-2,85	2,68	0,19
Inversion bei max. Squat Non-OP-Seite [°]	-4,69	-4,50	-11,70	1,13	3,85	-7,13	-7,63	-14,96	0,73	5,00	0,20
Max. Außenrotation OP-Seite [°]	-13,81	-13,76	-23,19	-1,90	6,05	-11,10	-8,90	-20,22	-3,35	5,34	0,27
Max. Außenrotation Non-OP-Seite [°]	-12,00	-10,86	-21,42	-3,59	5,21	-9,59	-8,31	-21,19	-3,92	5,77	0,30
Max. Knieflexion OP-Seite [°]	62,54	61,50	51,83	79,42	8,79	52,99	50,16	33,63	80,13	15,29	0,08
Max. Knieflexion Non-OP-Seite [°]	65,24	64,85	49,76	83,32	11,31	63,51	63,70	47,93	78,32	10,51	0,71
Max. Plantarflexionsmoment OP-Seite [Nm/kg]	0,87	0,84	0,62	1,22	0,20	0,94	0,98	0,65	1,28	0,20	0,42
Max. Plantarflexionsmoment Non-OP-Seite [Nm/kg]	0,90	0,90	0,46	1,23	0,21	0,99	0,99	0,66	1,39	0,23	0,34



Tabelle 20. Auswertung der 3D-Analyse des einbeinigen Squats im Seitenvergleich innerhalb einer Gruppe mit Angabe der Differenz von betroffenem und kontralateralem Sprunggelenk.  
Mittel = Mittelwert, SD = Standardabweichung. Signifikanzniveau  $\alpha = 0,05$ , \* = signifikant mit  $p < 0,05$ .

Einbeiniger Squat						
Parameter	Gruppe I			Gruppe II		
	Mittel	SD	p-Wert	Mittel	SD	p-Wert
Max. Dorsalextension [°]	-3,89*	2,73*	0,0005*	-5,47*	7,00*	0,0269*
Inversion bei max. Squat [°]	-0,29	3,29	0,7635	0,25	5,10	0,87
Max. Außenrotation [°]	-1,81	7,76	0,4377	-1,51	6,14	0,43
Max. Knieflexion [°]	-2,70	4,99	0,0873	-10,53*	11,81*	0,0144*
Max. Plantarflexionsmoment [Nm/kg]	-0,04	0,14	0,3920	-0,06	0,13	0,17

### 7.3.5 Y-Balance-Test

Die Ergebnisse der 3D-Analyse des Y-Balance-Tests von beiden Gruppen werden in Tabelle 21 dargestellt. Im Gruppenvergleich der Parameter fiel nur bei der Ausführung der Übung mit dem betroffenen Bein in die posteromedialen Richtung eine unterschiedliche Tendenz auf ( $p=0,0674$ ). Gruppe I erreichte hier im Mittel 81,5% und Gruppe II 72,7%, wobei die maximal erreichte Weite in die vorgegebene Richtung ins Verhältnis zur Beinlänge (100%) gesetzt wurde. Zudem wurde bei der Auswertung aller Parameter deutlich, dass die maximal erreichten Weiten in allen Richtungen (im Verhältnis zur Beinlänge) bei Gruppe II im Mittel ca. 4% geringer waren als bei Gruppe I.

Die Ergebnisse des Vergleichs von betroffener und kontralateraler Seite innerhalb einer Gruppe können für beide Gruppen der Tabelle 22 entnommen werden. Bei Gruppe I wurde ein signifikanter Unterschied des Composite Scores, der einen Gesamteindruck des Y-Balance-Tests unter Einbezug aller Richtungen vermittelt, festgestellt. Hier fiel eine mittlere Seitendifferenz von 2,2% auf, bei der die kontralaterale Seite einen höheren Composite Score erzielte (OP-Seite 75,45% +/- 8,26% vs. Non-OP-Seite 77,68% +/- 9,59%,  $p=0,0412$ ) (s. 6.4.6.3).

Bei Gruppe II offenbarte sich ebenfalls ein statistisch signifikanter Unterschied des Composite Scores von 4% im Vergleich der betroffenen Seite mit der kontralateralen Seite (OP-Seite 70,04% +/- 7,33% vs. Non-OP-Seite 74,00% +/- 7,69%,  $p=0,0273$ ). Außerdem wurde bei Gruppe II ein signifikanter Unterschied der maximal erreichten Weiten der betroffenen Seite im Vergleich zur kontralateralen Seite in die posteromediale Richtung von 5,5% deutlich (OP-Seite 72,70% +/- 11,47% vs. Non-OP-Seite 78,21% +/- 11,59%,  $p=0,322$ ).

Tabelle 21. Deskriptive und Interferenzstatistik der 3D-Analyse des Y-Balance-Tests von Gruppe I und II.

OP-Seite = betroffene Seite, Non-OP-Seite = kontralaterale Seite, MW = Mittelwert, Med = Median, Min = Minimum, Max = Maximum, SD = Standardabweichung.

Signifikanzniveau  $\alpha = 0,05$ , \* = signifikant mit  $p < 0,05$ .

Y-Balance-Test											
Parameter	Gruppe I					Gruppe II					Gr. I vs. II
	MW	Med	Min	Max	SD	MW	Med	Min	Max	SD	p-Wert
Max. Weite anterior/Beinlänge OP-Seite [%]	61,71	65,45	41,51	73,57	9,23	58,96	60,48	49,08	70,50	6,25	0,42
Max. Weite anterior/Beinlänge Non-OP-Seite [%]	62,86	64,63	41,47	75,57	9,42	62,27	62,42	52,88	73,23	6,69	0,42
Max. Weite posteromedial/Beinlänge OP-Seite [%]	81,53	83,02	62,97	94,76	10,49	72,70	70,93	49,49	86,17	11,47	0,07
Max. Weite posteromedial/Beinlänge Non-OP-Seite [%]	84,56	90,53	61,78	101,51	12,82	78,21	79,63	51,20	97,41	11,59	0,23
Max. Weite posterolateral/Beinlänge OP-Seite [%]	83,13	86,79	67,00	97,35	10,37	78,47	79,87	59,65	87,48	7,63	0,24
Max. Weite posterolateral/Beinlänge Non-OP-Seite [%]	85,62	89,89	66,60	99,23	10,62	81,84	82,76	65,61	99,15	8,96	0,37
Composite Score OP-Seite [%]	75,45	79,04	59,93	86,59	8,26	70,04	70,61	53,90	79,01	7,33	0,11
Composite Score Non-OP-Seite [%]	77,68	82,95	56,62	86,96	9,59	74,11	74,00	58,03	89,38	7,69	0,34

Tabelle 22. Auswertung der 3D-Analyse des Y-Balance-Tests im Seitenvergleich innerhalb einer Gruppe mit Angabe der Differenz von betroffenem und kontralateralem Sprunggelenk.  
 MW = Mittelwert, SD = Standardabweichung. Signifikanzniveau  $\alpha = 0,05$ , \* = signifikant mit  $p < 0,05$ .

Y-Balance-Test						
Parameter	Gruppe I			Gruppe II		
	MW	SD	p-Wert	MW	SD	p-Wert
Max. Weite anterior/ Beinlänge [%]	-1,15	4,10	0,3515	-3,31	6,11	0,10
Max. Weite posteromedial/ Beinlänge [%]	-3,04	8,30	0,2311	-5,51*	7,36*	0,0322*
Max. Weite posterolateral/ Beinlänge [%]	-2,49	6,25	0,1948	-3,37	7,46	0,16
Composite Score [%]	-2,22*	3,33*	0,0412*	-4,07*	5,22*	0,0273*

### 7.3.6 Side-Hop-Test

Der Side-Hop-Test konnte nicht von allen Patienten gemäß dem Studienprotokoll durchgeführt werden. Dies könnte unter anderem durch eine ungenügende Balance- und Koordinationsfähigkeit sowie durch das hohe Alter einiger Patienten bedingt worden sein. Daher wurde der Side-Hop-Test in der aktuellen Studie nicht quantitativ, sondern unter Berücksichtigung bestimmter Qualitätsmerkmale nur qualitativ ausgewertet. Die Qualitätsmerkmale prüften, ob eine Weite von 30cm übersprungen wurde, das Schwungbein nicht abgesetzt wurde und ob der Stand nach der Landephase stabil war. Die Patienten wurden entsprechend den Merkmalen in vier Kategorien eingeteilt. Tabelle 23 zeigte die Ergebnisse des Side-Hop-Tests. Sowohl die Patienten der Gruppe I als auch der Gruppe II wiesen hohe Defizite in der Ausführung dieses Funktionstests auf. Die Verteilung der Patienten in die festgelegten vier Kategorien verhielt sich unabhängig von der Gruppenzuteilung recht homogen.

*Tabelle 23. Qualitative Auswertung des Side-Hop-Tests der Gruppe I und II.  
OP-Seite = betroffene Seite, Non-OP-Seite = kontralaterale Seite.*

Side-Hop-Test					
Kategorie	Ausführung	Gruppe I		Gruppe II	
		OP-Seite	Non-OP-Seite	OP-Seite	Non-OP-Seite
1	optimal	3	3	2	3
2	in Ordnung	3	4	3	5
3	unzureichend	3	2	4	1
4	nicht möglich	4	4	4	4

## 8 DISKUSSION

Unfallchirurgische Operationen, vor allem Eingriffe am Sprunggelenk, haben einen großen sozioökonomischen Einfluss auf den Patienten, denn viele der Patienten sind noch ein Jahr postoperativ in ihrer Arbeitsfähigkeit und somit in der sozialen Teilhabe eingeschränkt (O'Hara et al. 2020). Zur Beschleunigung des Genesungsprozesses und Vermeidung einer posttraumatischen Gelenkdegeneration mit Folgeoperationen ist es daher entscheidend, ein Gelenk möglichst anatomisch zu rekonstruieren. Das Ziel dieser Forschungsarbeit umfasst die Optimierung des postoperativen Ergebnisses dieser Patienten.

Wie einleitend in Kapitel 5.7 erläutert wurde, sind die postulierten Repositionskriterien in einer Vorgängerstudie als besonders günstig für den funktionellen Ausgang der instabilen Syndesmoseverletzung definiert worden. In der aktuellen Arbeit soll überprüft werden, ob Patienten, bei denen die Repositionskriterien erfüllt sind, in einer dynamischen Funktionsuntersuchung bessere klinische Resultate erzielen als Patienten, bei denen diese Kriterien nicht erfüllt sind.

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit in einen größeren Forschungskontext eingebettet. Die Ergebnisse werden interpretiert, die zuvor aufgestellten Hypothesen kritisch beleuchtet und mit den Ergebnissen der bisherigen Forschung verglichen. In diesem Abschnitt wird für Ergänzungen in Klammern für die betroffene Seite die Bezeichnung OP-Seite und für die kontralaterale Seite die Bezeichnung Non-OP-Seite als Kurzform verwendet.

### 8.1.1 Anamnese

Die häufigsten langfristigen Komplikationen einer nicht-anatomischen Sprunggelenkreposition sind Schmerzen im Bereich des Gelenks, Bewegungseinschränkungen und posttraumatische Veränderungen bis hin zur Sprunggelenkarthrose (Braun et al. 2018, Gardner et al. 2006, Lin et al. 2006, Smeeing et al. 2015). Alle Patienten der vorliegenden Studie wurden nach einer Zeitspanne von mindestens acht Jahren postoperativ nachuntersucht. In der Patientengruppe I gaben vier von dreizehn Patienten an, zumindest noch leichte Schmerzen oder Bewegungsdefizite zu bemerken. In der gegenübergestellten Gruppe II berichteten zehn von dreizehn Patienten von subjektiven mindestens leichten Bewegungseinschränkungen oder einer Gelenkschwellung. Die S2-e-Leitlinien der Therapie von Sprunggelenkfrakturen empfehlen zur Nachsorge die frühzeitige Mobilisation des Sprunggelenks mit angepasster Physiotherapie (Schmidmaier et al. 2015, Hinweis: aktuell in Überarbeitung). Anamnestisch gaben nur zwei Patienten von Gruppe I und ein Patient von Gruppe II des vorliegenden Patientenkollektivs an, keine postoperative Physiotherapie erhalten zu haben. Die anderen Patienten führten nach der Operation eine Physiotherapie durch.

In den S2-e-Leitlinien zu Sprunggelenkfrakturen und in der Forschungsliteratur wird die Nachuntersuchung von Patienten mit Sprunggelenkverletzungen meist in Anamnese, klinische Untersuchung und bildgebende Diagnostik durch eine Röntgenaufnahme des Sprunggelenks in zwei Ebenen gegliedert (Schmidmaier et al. 2015, Hinweis: aktuell in Überarbeitung). Eine Metaanalyse von Beckenkamp et al. von 37 Studien erfasste bei Patienten mit Sprunggelenkfrakturen nach sechs Monaten eine im Mittel 80%ige Erholung der Sprunggelenkfunktion. Ein Jahr postoperativ erzielten die Patienten meist gute funktionelle Ergebnisse mit nur noch milden Beschwerden. Dennoch war zwei Jahre postoperativ die Sprunggelenkfunktion noch nicht zu 100% wiederhergestellt. Die Sprunggelenkfunktion wurde in dieser Metaanalyse anhand von Fragebögen, z.B. dem Olerud/Molander Score bewertet (Beckenkamp et al. 2014).

In der vorliegenden Studie gaben vier von dreizehn Patienten der Gruppe I (31%) an, mindestens acht Jahre postoperativ nach wie vor unter Beschwerden wie Schmerzen, Gelenkschwellung oder Bewegungseinschränkungen zu leiden. Bei Gruppe II gaben dies zehn von dreizehn Patienten (77%) an. Diese Ergebnisse suggerieren eine unvollständige Wiederherstellung der Sprunggelenkfunktion sogar

nach acht bis achtzehn Jahren bei den meisten Patienten der Gruppe II und bei wenigen Patienten der Gruppe I (77% vs. 31%).

### 8.1.2 Klinische Untersuchung

In der klinischen Untersuchung fiel entsprechend der Hypothese der Vorgängerstudie in beiden Gruppen ein signifikanter qualitativer Unterschied der passiven RoM zwischen betroffenem und kontralateralem Sprunggelenk auf (s. 5.7) (Vetter et al. 2016, Vetter et al. 2021). Bei Gruppe II war ein Dorsalextensionsdefizit der betroffenen Seite im Seitenvergleich zur kontralateralen Seite häufiger zu beobachten als bei Gruppe I (Gruppe II: zehn von dreizehn Patienten vs. Gruppe I: zwei von dreizehn Patienten). Die Mittelwerte der Dorsalextension von Gruppe I war um beinahe  $1,4^\circ$  höher als die der Gruppe II ( $14,1^\circ$  vs.  $12,69^\circ$ ). Die Plantarflexion der betroffenen Seite unterschied sich um ca.  $8^\circ$  (Gruppe I  $34,70^\circ$  vs. Gruppe II  $26,54^\circ$ ). Insgesamt war bei Gruppe II ein größeres Dorsalextensionsdefizit und Plantarflexionsdefizit der betroffenen Seite im Seitenvergleich zur kontralateralen Seite zu beobachten als bei Gruppe I. Diese Ergebnisse zeigen eine nur teilweise Redundanz mit der subjektiven Einschätzung der Sprunggelenkfunktion durch die Patienten anhand des Olerud/Molander-Scores bei Gruppe II und keine Redundanz bei Gruppe I. Ein quantitativer Vergleich der RoM der betroffenen Seite im Vergleich von Gruppe I und Gruppe II wurde bereits zuvor im Jahr 2021 veröffentlicht. Die Ergebnisse zeigten einen signifikanten Unterschied der RoM von  $53,44^\circ$  (Gruppe I) vs.  $24,17^\circ$  (Gruppe II) (Vetter et al. 2021).

In der Anamnese und der klinischen Nachuntersuchung von Patienten mit Sprunggelenkverletzungen ein Jahr postoperativ werden in der Forschungsliteratur meist gute Ergebnisse und nur milde Einschränkungen beschrieben (Beckenkamp et al. 2014). Eine mögliche Assoziation der Frakturschwere mit dem funktionellen Ergebnis wird kontrovers diskutiert. Manche Autoren sprachen von einem Zusammenhang zwischen Frakturklassifikation und Resultat (Becker et al. 1995, Segal et al. 2014, van Hove et al. 2019). Andere Autoren wie Broos et al. kamen zu dem Schluss, dass die Frakturart keinen Einfluss auf das postoperative funktionelle Ergebnis hat (Broos und Bisschop 1991, Hancock et al. 2005). In der vorliegenden Arbeit wurde die Frakturart jedes Patienten nicht in die Auswertung miteinbezogen. Allerdings wurden nur Patienten mit Weber B/C Frakturen oder isolierten Syndesmose-rupturen in die Studie eingeschlossen. Prospektiv könnte die Frakturklassifikation in Folgestudien als Einflussfaktor auf die postoperative Sprunggelenkfunktion untersucht werden (s. 8.3).

### 8.1.3 Pedobarographie

Mit der Pedobarographie kann die Sprunggelenkbelastung und -stabilität sowie die Koordinationsfähigkeit der Patienten im Stand und beim Gehen in der Ebene untersucht werden. Pedobarographisch waren nicht nur im beid- und einbeinigen Stand im Vergleich beider Gruppen miteinander, sondern auch innerhalb der Patientengruppe I im Vergleich der betroffenen mit der kontralateralen Seite keine signifikant unterschiedlichen Ergebnisse messbar.

Ein wichtiger Parameter in der Pedobarographie ist das „Center of Pressure“ (CoP). Das CoP gibt die Gewichtsverteilung unter dem Fuß in zahlreichen Einzelpunkten an, die gemeinsam die Variabilität des maximalen Druckverteilungsmittelpunktes an der Fußsohle beschreiben. Eine starke und schnelle Bewegung des CoP (auch: CoP Geschwindigkeit) im Stand oder beim Gehen in der Ebene kann Hinweise auf eine Instabilität des Sprunggelenks oder auf Koordinationsschwierigkeiten liefern (Koldenhoven et al. 2018, Linens et al. 2014, Maki et al. 1994, Prieto et al. 1996). Ebenso gibt die Größe der Fläche des CoP Hinweise zur Schwankung des Körperschwerpunktes unter dem Fuß. Eine größere Fläche des CoP deutet beispielsweise auf einen instabilen Stand hin (auch: CoP Flächengröße). Außerdem wurde bei einer chronischen Instabilität des Sprunggelenks von einigen Autoren eine vermehrte Verschiebung des CoP nach anterolateral beobachtet (Kros et al. 2016, Mettler et al. 2015, Pope et al. 2011). Die

Größe der 95% Konfidenz-Ellipsenfläche des CoP wird daher in der Fachliteratur häufig als wichtiger Parameter erwähnt (Linens et al. 2014). In der vorliegenden Arbeit fielen im Vergleich beider Gruppen miteinander und im Vergleich der betroffenen Seite mit der kontralateralen Seite innerhalb einer Gruppe keine signifikanten Unterschiede der CoP Geschwindigkeit und der CoP Flächengröße im beid- und einbeinigen Stand auf.

Erste Daten von Messungen der Bewegung des CoPs lieferten Prieto et al. im Jahr 1996 bei älteren gesunden Probanden ( $N=20$ , 66-70 Jahre). Sie gaben eine durchschnittliche Geschwindigkeit des CoP im beidbeinigen Stand von  $12,2 \pm 4,49$  mm/s an (Prieto et al. 1996). In dieser Spannweite lagen auch die Daten beider Gruppen der vorliegenden Studie (Gruppe I: MW  $11,69 \pm 6,80$  mm/s, Durchschnittsalter 58J., Gruppe II: MW  $8,00 \pm 13,29$  mm/s, Durchschnittsalter 60J.). Gruppe I und Gruppe II unterschieden sich in der Untersuchung der Sprunggelenkstabilität somit weder zwischen einander noch von einer Stichprobe der altersentsprechenden Normalbevölkerung.

Durch den Vergleich der Ergebnisse mit einer stabilometrischen Untersuchung von Patienten mit operativ versorgten Sprunggelenkverletzungen von Nilsson et al. konnten die Ergebnisse der aktuellen Arbeit bestätigt werden. In deren Studie wurde die Sprunggelenkstabilität ebenfalls evaluiert. Vierzehn Monate postoperativ zeigte sich kein statistisch signifikanter Unterschied der CoP Bewegung zwischen betroffenem und kontralateralem Sprunggelenk im 20-sekündigen Einbeinstand, jedoch eine im Vergleich zu einer gesunden Kontrollgruppe reduzierte Gelenkstabilität. Die Autoren maßen außerdem eine signifikante Korrelation des Dorsalextensions- und Plantarflexionsdefizits, des Patientenalters über 45 Jahre und der verminderten Maximalkraft der Plantarflexoren und Dorsalextensoren mit einer reduzierten Einbeinstandstabilität (Del Buono et al. 2013, Nilsson et al. 2006).

In der vorliegenden Studie manifestierte sich pedobarographisch nur ein signifikanter Unterschied der Impulsänderung des Mittelfußes während des Gehens in der Ebene im Seitenvergleich der betroffenen Seite mit der kontralateralen Seite innerhalb der Gruppe II (s. 6.4.1). Die Impulsänderung beim Gehen in der Ebene beschreibt den Kraftstoß, der während eines gesamten Gangzyklus von Vorfuß, Mittelfuß oder Rückfuß verrichtet wird. Eine höhere Impulsänderung des Mittelfußes im Seitenvergleich deutet also auf eine höhere Mittelfußbelastung und somit ein verändertes Abrollverhalten hin. Eine Ursache hierfür könnte ein Dorsalextensionsdefizit sein, das schließlich zu einer Mittelfußmehrbelastung (oder ggf. auch einer Vorfußmehrbelastung) führen kann. Vor- und Mittelfuß können durch die eingeschränkte Dorsalextension oder durch einen geschwächten Fußhebemuskelapparat beim Gehen in der Ebene möglicherweise schneller Bodenkontakt herstellen und das Körpergewicht wird daraufhin frühzeitig auf Vor- und Mittelfuß verlagert (s. 7.3.1.). Die Daten der vorliegenden Studie wiesen bei Gruppe II auf eine signifikante Mittelfußmehrbelastung hin, die bei Gruppe I nicht zu sehen war (s. Tabelle 14).

In der Forschungsliteratur liegen allerdings bis dato keine Daten der Impulsänderung bei einer 3D-bewegungsanalytischen Untersuchung von Patienten mit operativ versorgten instabilen Sprunggelenkverletzungen vor. Darüber hinaus liegen keine Daten der CoP Bewegung im beid- und einbeinigen Stand von Patienten mit instabiler Sprunggelenkverletzung oder einer gesunden Vergleichsgruppe vor, die ein Literaturvergleich ermöglichen.

Insgesamt wurden dynamische Funktionstestungen mittels Pedobarographie bisher nachweislich am häufigsten an (jungen sportlichen) Patienten mit chronischer Sprunggelenkinstabilität (CAI) oder Normprobanden ohne Verletzungen durchgeführt (Hertel 2002, Kunugi et al. 2018). Ein Beispiel dafür sind Yousefi et al., die pedobarographisch eine vergrößerte CoP Variabilität und eine veränderte Ganginitiation bei Patienten mit CAI angaben (Yousefi et al. 2020).

Die Studienlage zur postoperativen Pedobarographie bei Patienten mit instabiler Sprunggelenkverletzung bleibt dennoch unbefriedigend (Huang et al. 2011, Koldenhoven et al. 2018, Kros et al. 2016, Linens et al. 2014, Mettler et al. 2015, Pope et al. 2011). Hier sind zukünftig weitere Studien erforderlich, die zum einen Patienten im Stand und beim Gehen in der Ebene



untersuchen und weitere Parameter, z.B. den Impuls und die Impulsänderung, erheben könnten (s. 8.3). Außerdem gibt es eine Datenlücke in der vergleichbaren Normdatenbank, die aufgefüllt werden sollte.

#### 8.1.4 Gehen in der Ebene

Die 3D-Bewegungsanalyse dient als Instrument zur Erhebung kinetischer und kinematischer Daten unterschiedlicher Bewegungen. In der Forschungsliteratur ist der Bestand an Studien mit einer 3D-Ganganalyse von Patienten mit instabiler Sprunggelenkverletzung begrenzt, wodurch bis dato nur wenige vergleichbare Daten zur Verfügung stehen.

In der 3D-Analyse des Gehens in der Ebene fielen im Gruppenvergleich von Gruppe I mit Gruppe II keine deutlichen Bewegungs- oder Belastungsunterschiede auf. Nur in der maximalen Inversion auf der kontralateralen Seite wurde ein signifikanter Unterschied zwischen beiden Gruppen festgestellt (Gruppe I:  $17.5^{\circ} \pm 2.9^{\circ}$  vs. Gruppe II:  $14.1^{\circ} \pm 4.7^{\circ}$ ). Dessen klinische Relevanz ist bei einem Unterschied von nur  $3^{\circ}$  nicht eindeutig, da ein statistischer Messfehler von ca.  $2-3^{\circ}$  zu bedenken ist, der den klinischen Unterschied mindern kann.

Weiterhin lieferte die Auswertung eine unterschiedliche Tendenz der maximalen Ankle Power im Vergleich der betroffenen Seite mit der kontralateralen Seite bei Gruppe II, die im Durchschnitt auf der kontralateralen Seite um  $0,4 \text{ W/kg}$  größer war (Non-OP-Seite:  $3,37 \text{ W/kg}$  vs. OP-Seite:  $2,97 \text{ W/kg}$ ). Beim Gehen in der Ebene könnte die kontralaterale Seite durch die Patienten der Gruppe II mehr belastet worden sein. Darüber hinaus zeigte die 3D-Analyse des Gehens in der Ebene keine weiteren Unterschiede zwischen oder innerhalb der beiden Gruppen auf.

In der Forschungsliteratur wurden bisher in der 3D-Analyse des Gehens in der Ebene vor allem räumlich-zeitliche Parameter wie Schrittlänge, Ganggeschwindigkeit und Kadenz sowie die Kinematik der unteren Extremitätengelenke bewertet. Elbaz et al. untersuchten Patienten nach operativer Versorgung einer Sprunggelenkverletzung mithilfe des GaitSmart Analysesystems und verglichen diese anschließend mit einer unverletzten gepaarten Kontrollgruppe (Elbaz et al. 2016). Alle Parameter, also die Kinematik des Knies und des Sprunggelenks sowie die Schrittlänge, unterschieden sich in deren Studie in der Patienten- und der Kontrollgruppe signifikant. Allerdings wurden die Untersuchungen bereits kurz nach der postoperativen Immobilisationsphase und vor einer längerfristigen Rehabilitation durchgeführt und bilden daher keine langfristigen Resultate ab. Kinetische Parameter wie Gelenkkräfte oder -momente gaben Elbaz et al. nicht an (Elbaz et al. 2016). Deren Studie demonstriert, dass sich eine instabile Sprunggelenkverletzung kurz- und mittelfristig beachtlich auf die fließende Ausführung des Gehens in der Ebene auswirken kann.

Northeast et al. schlossen konservativ therapierte Patienten mit chronischer Instabilität des Sprunggelenks in eine bewegungsanalytische Studie ein. In der 3D-Analyse des Gehens wurden bei den Patienten im Vergleich mit einer gesunden Kontrollgruppe bis auf eine verstärkte maximale Inversion in der Standphase keine Unterschiede deutlich (Northeast et al. 2018). Die Autoren nannten ein erhöhtes propriozeptives Bewusstsein der Patienten über die Gelenkposition als mögliche Ursache der verstärkten Inversion, da eine vermehrte Inversion bei Bodenkontakt knöchernen Restriktionen des Fuß-Sprunggelenkkomplexes ausgleichen könne. Northeast et al. vermuteten außerdem eine Verstärkung der kinematischen Unterschiede bei dynamischeren Bewegungen wie dem Einbeinspringen oder dem Gehen auf unebenem Grund. Die Forschungsgruppe postulierte, dass leichte kinetische und kinematische Veränderungen im Gelenk mit einer stärker deutlichen Ausprägung bei höherer Belastung korrelieren. Eine Studie dazu liegt allerdings noch nicht vor. Weiterhin werteten die Autoren ein gestörtes Gangbild mit Einschränkungen im beidseitigen Abrollverhalten als Entlastungsversuch sowohl für den Rück- als auch den Vorfuß (Donovan und Feger 2017, Northeast et al. 2018).

In einer weiteren Studie von Hsu et al. wurde nach einer medianen Evaluationszeit von vier Monaten nach Versorgung einer instabilen Sprunggelenkverletzung in der 3D-Ganganalyse der Patienten nicht nur eine kürzere Schrittlänge, sondern auch eine geringere Schrittgeschwindigkeit und Kadenz des betroffenen Beins im Vergleich zum kontralateralen Bein und eine asymmetrische Rumpfbewegung festgestellt (Hsu et al. 2019).

Zusätzlich lieferten Wang et al. Ergebnisse einer 3D-Ganganalyse von Patienten mit operativ versorgten Sprunggelenkverletzung zum Zeitpunkt von neun Wochen und sechs Monaten postoperativ. Deren Ergebnisse zeigten neun Wochen postoperativ ein signifikantes Dorsalextensionsdefizit des betroffenen Sprunggelenks der Patienten im Vergleich zur Dorsalextension

des Sprunggelenks einer gesunden Kontrollgruppe. Sechs Monate postoperativ war dieser Unterschied nicht mehr statistisch signifikant (Lessl 2012,Wang et al. 2010).

Van Hove et al. gaben bei Patienten achtzehn Monate nach instabiler Sprunggelenkverletzung mit operativer Therapie eine verminderte Ganggeschwindigkeit und eine geringere Schrittlänge, außerdem eine verminderte maximale Dorsalextension und Plantarflexion, aber keine Unterschiede der Ab-/Adduktion und Eversion/Inversion im Vergleich zu einer gesunden Kontrollgruppe an. Sie postulierten darüber hinaus, dass ein Defizit der maximalen Plantarflexion beim Abdruckvorgang über 4,5° klinisch relevant auffiel (Becker et al. 1995,Losch et al. 2002,van Hove et al. 2019,Wang et al. 2010).

Becker et al. und weitere Autoren stellten weiterhin bei Patienten mit einseitiger Sprunggelenkverletzung Defizite der maximalen Bodenreaktionskräfte sowohl in der Stand- als auch in der Schwungphase des Gehens in der Ebene fest. Sie maßen bei diesen Patienten eine Mehrbelastung des betroffenen Vorfußes beim Gehen in der Ebene, die möglicherweise der Entlastung des Rückfußes dienen sollte oder durch ein Dorsalextensionsdefizit des betroffenen Sprunggelenks bedingt war (Becker et al. 1995,Lessl 2012,Lin et al. 2009).

In der aktuellen Studie manifestierten sich bei dem ausgewählten Patientenkollektiv mindestens acht Jahre postoperativ in der 3D-Analyse des Gehens in der Ebene weder kinematische oder kinetische Unterschiede im Vergleich beider Gruppen miteinander noch beim Vergleich der betroffenen und der kontralateralen Seite innerhalb beider Gruppen. Damit werden die Erkenntnisse der genannten Autoren unterstützt, die beim Gehen in der Ebene in der langfristigen postoperativen Untersuchung nur noch geringe Defizite aufzeigen konnten.

Zusammenfassend führen die Ergebnisse der vorliegenden und diskutierten Studien zu dem Schluss, dass bei einigen Patienten mit instabilen Sprunggelenkverletzungen zu einem frühen postoperativen Zeitpunkt in der 3D-Analyse des Gehens in der Ebene deutliche Bewegungsdefizite im betroffenen Sprunggelenk vorliegen können, die zusätzlich die Bewegung des kontralateralen Sprunggelenks beeinflussen und ein asymmetrisches Gangbild erzeugen können. Diese Bewegungseinschränkungen können sich im weiteren Heilungsverlauf soweit zurückbilden, dass sie langfristig beim Gehen in der Ebene nicht mehr nachweisbar sind.

Eine Studie von Losch et al. untermauert diese These zusätzlich. In deren postoperativen Bewegungsanalyse des Sprunggelenks fiel trotz eines signifikanten Unterschiedes der RoM des Sprunggelenks keine Störung des Gangbildes auf (Losch et al. 2002). Nur das Plantarflexionsmoment war unmittelbar nach Beginn der Standphase auf der betroffenen Seite auffällig reduziert. Losch et al. interpretierten dies als interne Strategie des Patienten zur Entlastung des betroffenen Gelenks. Die Reduktion des Plantarflexionsmoments auf der betroffenen Seite hielt auch ein Jahr postoperativ ohne subjektive Einschränkung des Patienten an. Die Autoren vermuteten daher, dass sich das frühpostoperative Schonverhalten während des Gehens in der Ebene als Normalmuster automatisierte und auch später vom Patienten beibehalten wurde. Sie postulierten darüber hinaus, dass die Gesamtamplitude der RoM bei gesunden Probanden im Allgemeinen nur bei 32-35° liegt und der maximale Winkelbereich der Plantarflexion und Dorsalextension beim Gehen in der Ebene insofern nicht erreicht wurde. Ein klinisch gemessenes Dorsalextensionsdefizit von 9° beim Gehen in der Ebene spielte bei den Patienten daher keine wesentliche Rolle. Zur weiteren Prüfung einer erkennbaren postoperativen Bewegungseinschränkung müssen den Autoren nach erst extremere Bewegungsausmaße provoziert werden (Losch et al. 2002,Winter 1987 S. 29-43).

Schlussendlich liefert die vorliegende Studie durch die 3D-Analyse des Gehens in der Ebene keine Hinweise darauf, dass die Erfüllung der postulierten Repositionskriterien langfristig zu einem besseren funktionellen Ergebnis des Patienten führt (s. 5.10.2). Aus diesem Grund werden anschließend Funktionstests erläutert, die der dreidimensionalen Analyse der Sprunggelenkfunktion während einer dynamischen Bewegung mit höherer Belastung dienen. (s. 5.9).

### 8.1.5 Beidbeiniger Squat

Das Auftreten eines Dorsalextensionsdefizits im oberen Sprunggelenk bei der Ausführung des beidbeinigen Squats beschrieben Dill et al. beispielhaft bei Probanden, bei denen zuvor in der klinischen RoM-Untersuchung kein Dorsalextensionsdefizit aufgefallen war. In deren Studie ging ein größerer Dorsalextensionswinkel im Sprunggelenk mit einem größeren Knieflexionswinkel und somit einer größeren maximalen Squattiefe einher (Dill et al. 2014). Die Ergebnisse von Dill et al. indizieren, dass erst extremere Bewegungsausmaße, wie sie beim beid- oder einbeinigen Squat zu sehen sind, bestimmte Bewegungsdefizite im Sprunggelenk aufdecken.

Der erste Funktionstest in der Testbatterie ist der (beidbeinige) Squat. In der vorliegenden Arbeit wurde die Kinematik des oberen Sprunggelenks der betroffenen Seite mit der kontralateralen Seite während des beidbeinigen Squats verglichen. Bei Gruppe I war im Vergleich der betroffenen Seite mit der kontralateralen Seite ein mittlerer Unterschied der Dorsalextension von  $2,3^\circ$  zu sehen (OP-Seite  $24,64^\circ \pm 6,04^\circ$  vs. Non-OP-Seite  $26,94^\circ \pm 5,59^\circ$ ). Dies entspricht einem Defizit von etwa 10% der in der Forschungsliteratur angegebenen Normwerte ( $20-30^\circ$  = maximale Dorsalextension) (Wurm 2016). Bei Gruppe II lag der Unterschied zwischen der OP-Seite und der Non-OP-Seite bei  $4,8^\circ$  und war somit doppelt so groß wie bei Gruppe I (OP-Seite  $21,56^\circ \pm 6,42^\circ$  vs. Non-OP-Seite  $26,37^\circ \pm 4,82^\circ$ ,  $p=0,0017$ ). Die Patienten der Gruppe II wiesen dementsprechend auf der betroffenen Seite beim Squat eine im Vergleich zu den Literaturwerten etwa 20% reduzierte maximale Dorsalextension des Sprunggelenks auf. Der statistisch zwar signifikante Unterschied von  $2-3^\circ$  bei Gruppe I sollte wegen der zuvor erwähnten Messfehlertoleranzen klinisch nicht überbewertet werden. Bei Gruppe II übertrifft das Dorsalextensionsdefizit der betroffenen Seite den statistischen Messfehler mit  $4,8^\circ$  und kann somit als klinisch relevant eingeschätzt werden.

Diese Ergebnisse stützen die aufgestellte Hypothese, dass bei Gruppe II, bei der die Repositionskriterien nicht erfüllt sind, im Vergleich der betroffenen Seite mit der kontralateralen Seite häufiger Dorsalextensionsdefizite auf der betroffenen Seite zu erwarten sind als bei Gruppe I, bei der die Repositionskriterien erfüllt sind (s. Tabelle 2). Im Vergleich beider Gruppen miteinander konnten jedoch weder im betroffenen noch im kontralateralen Sprunggelenk statistisch signifikante Unterschiede der Dorsalextension gemessen werden.

Bei der maximalen Außenrotation des Sprunggelenks wiesen die Patienten der Gruppe I mit einer mittleren Differenz von  $4,4^\circ$  ebenfalls einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen der betroffenen Seite und der kontralateralen Seite auf (Gruppe I: OP-Seite  $24,64^\circ \pm 6,39^\circ$  vs. Non-OP-Seite  $20,27^\circ \pm 6,02^\circ$ ,  $p=0,0075$ ). Bei Gruppe II war diesbezüglich kein signifikanter Unterschied messbar. Beide Gruppen unterschieden sich sowohl in der maximalen Außenrotation der betroffenen Seite als auch der kontralateralen Seite mit jeweils mehr als  $5^\circ$  (OP-Seite: Gr. I:  $24,64^\circ \pm 6,39^\circ$  vs. Gr. II:  $18,17^\circ \pm 6,95^\circ$ , Non-OP-Seite: Gr. I  $20,27^\circ \pm 6,02^\circ$  vs. Gr. II  $14,94^\circ \pm 5,23^\circ$ ). In der Forschungsliteratur sind bislang noch keine Aussagen zur Bedeutung der Außenrotation des Sprunggelenks beim beidbeinigen Squat veröffentlicht worden.

Der Unterschied zwischen Gruppe I und Gruppe II sowohl auf der betroffenen als auch auf der kontralateralen Seite ist in der vorliegenden Studie diesbezüglich bemerkenswert. Alle Probanden wurden angewiesen, beide Fußsohlen während des Squats dauerhaft in Kontakt mit dem Boden und den Fuß stabil auf dem Boden zu halten. Die Innen- oder Außenrotationsstellung des Fußes wurde daher durch den Probanden bereits vor Beginn der Ausführung gewählt und ist durch die Untersuchende nicht korrigiert worden. Nur eine hüftbreite Fußpositionierung zu Beginn der Übung wurde vorgegeben. Die Außenrotationsstellung des betroffenen Sprunggelenks bei Gruppe I könnte auf einer postoperativ veränderten Gelenkstellung basieren. Die vorliegenden Ergebnisse lassen jedoch ohne weitere Untersuchungen keine abschließende Bewertung zu. Hier bedarf es zukünftig weiterer Studien, die die Rotation im Sprunggelenk bei komplexen Bewegungsabläufen und deren klinische Relevanz nach instabiler Sprunggelenkverletzung untersuchen werden.

Darüber hinaus fiel während des beidbeinigen Squats bei Gruppe I eine signifikante Seitendifferenz des Plantarflexionsmoments beim maximalen Squat von im Mittel 0,11Nm/kg auf und die betroffene Seite wurde stärker belastet als die kontralaterale Seite (OP-Seite 0,50 +/- 0,10Nm/kg vs. Non-OP-Seite 0,39 +/- 0,11Nm/kg,  $p=0,0029$ ). Bei Gruppe II war die Seitendifferenz mit 0,17Nm/kg ebenfalls signifikant (OP-Seite 0,53 +/- 0,11Nm/kg vs. Non-OP-Seite 0,36 +/- 0,22Nm/kg,  $p=0,0136$ ). Diese Daten deuten auf eine asymmetrische Mehrbelastung des betroffenen Sprunggelenks hin. Der Gruppenvergleich lieferte keine signifikanten Unterschiede.

Anders als in der vorliegenden Arbeit wurden in der Forschungsliteratur bisher hauptsächlich kinetische Untersuchungen des beidbeinigen Squats mit dem Heben von zusätzlichem Gewicht veröffentlicht (z.B. Langhantelsquat) (Choe et al. 2021, Schoenfeld 2010, Swinton et al. 2012). Escamilla et al. maßen bei maximalem Squat und engem Fußstand ein Plantarflexionsmoment von 51 +/- 72Nm, das in Relation zum gehobenen Gewicht gesetzt wurde (Escamilla 2001, Escamilla et al. 2001). Diese Daten sind mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit jedoch nicht vergleichbar, da kein zusätzliches Gewicht verwendet wurde. Escamilla et al. waren der Meinung, dass eine 3D-Analyse der 2D-Analyse des Squats aufgrund der präziseren Ergebnisse durchaus vorzuziehen ist.

Fox und weitere Autoren lieferten Daten einer Studie mit vier jungen gesunden Probanden zum Vergleich des Asian Squats (Fersen auf dem Boden) mit dem Catcher's Squat (Fersen angehoben). In dieser betrug die mittlere maximale Dorsalextension 9,7° (Asian Squat) und 7,6° (Catcher's Squat) und das mittlere maximale Plantarflexionsmoment 0,20Nm/kg (Asian Squat) und 0,50Nm/kg (Catcher's Squat) (Fox 2019). Dies entsprach einem um 150% vergrößerten Plantarflexionsmoment beim Catcher's Squat. Dieses Ergebnis könnte durch einen vergrößerten Hebelarm des Plantarflexionsmoments erklärt werden, wenn sich der Gelenkmittelpunkt beim Anheben der Ferse nach proximal verschoben und sich das Center of Pressure unter dem Fuß nach anterior bewegt hat. Im Vergleich von Fox' Daten des Asian Squats und des Catcher's Squats mit der vorliegenden Arbeit wird deutlich, dass sich die Ergebnisse der Plantarflexionsmomente beider Gruppen eher dem Wert des Catcher's Squats annähern.

Eine Ursache dafür könnte sein, dass die Patienten dieser Studie aufgrund eines Dorsalextensionsdefizits die Ferse des betroffenen Beins früher vom Boden abheben mussten und somit ein größeres Plantarflexionsmoment erzeugten. Die Normdaten der Dorsalextension von Fox et al. weichen allerdings stark von den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit ab. Es bedarf in Zukunft weiterer Studien für vergleichbare Daten von Normprobanden und Patienten in gleichem Alter, da auch die Normdaten bei verschiedenen Altersgruppen variabel sein können (Panero et al. 2017).

In der vorliegenden Arbeit wurde neben der Kinematik des Sprunggelenks auch die des Kniegelenks während des beidbeinigen Squats analysiert. Das Kniegelenk umfasst mit etwa 0° bis +160° einen größeren Bewegungsradius als das Sprunggelenk mit etwa -30° bis +15° (Schoenfeld 2010). Eine Bewegungseinschränkung des Kniegelenks wird während des Squats daher bereits optisch deutlicher wahrgenommen als ein Bewegungsdefizit des Sprunggelenks. Zusätzlich wird der maximale Knieflexionswinkel und somit der tiefste Punkt des Squats maßgeblich von der maximal möglichen Dorsalextension im Sprunggelenk mitbestimmt (Gomes et al. 2020, Kim et al. 2015, Lamontagne et al. 2011). Deswegen kann eine Einschränkung der Dorsalextension auch zu einer funktionellen Einschränkung der Knieflexion führen.

Endo et al. zeigten in einer Studie, dass beim beidbeinigen Squat der Bewegungsumfang eines Sprunggelenks den des kontralateralen Sprunggelenks beeinflusst hat und umgekehrt und dass die maximale Tiefe des beidbeinigen Squats bereits von einer nur einseitigen Einschränkung der Dorsalextension beeinträchtigt wurde (Endo et al. 2020). Zum Vergleich beschrieben Fox et al. bei jungen gesunden Probanden beim beidbeinigen Squat mit Bodenkontakt der Fersen maximale Knieflexionswinkel von im Durchschnitt 121°. Hemmerich et al. veröffentlichten maximale Knieflexionswinkel von 157° +/- 6° mit angehobenen Fersen (Fox 2019, Hemmerich et al. 2006).

In der vorliegenden Studie zeigten die Patienten der Gruppe I im Seitenvergleich von ipsilateralem und kontralateralem Kniegelenk auf der betroffenen Seite ein Defizit der maximalen Knieflexion von  $2,2^\circ$  (OP-Seite  $93,50^\circ \pm 17,00^\circ$  vs. Non-OP-Seite  $95,74^\circ \pm 14,14^\circ$ ,  $p=0,0841$ ). Bei Gruppe II war das Knieflexionsdefizit mit  $2,9^\circ$  nicht wesentlich größer als das der Gruppe I, aber es war statistisch signifikant (OP-Seite  $79,92^\circ \pm 18,28^\circ$  vs. Non-OP-Seite  $82,89^\circ \pm 16,98^\circ$ ,  $p=0,0443$ ). Sowohl Gruppe I als auch Gruppe II lagen während des beidbeinigen Squats  $20^\circ$  unter dem literarischen Vergleichswert von  $121^\circ$  maximaler Knieflexion bei Normprobanden. Allerdings wurden die Normwerte bei gesunden Probanden ohne Vorverletzungen erhoben und waren somit nur bedingt vergleichbar. In der Forschungsliteratur liegen bis heute leider keine kinematischen oder kinetischen Daten zur dreidimensionalen Analyse des beidbeinigen Squats von Patienten mit instabiler Sprunggelenkverletzung vor.

Beim beidbeinigen Squat wurde im Seitenvergleich von betroffener und kontralateraler Seite nicht nur bei Gruppe II, sondern auch bei Gruppe I ein signifikantes Knieflexionsdefizit der betroffenen Seite von  $2,9^\circ$  bzw.  $2,2^\circ$  festgestellt. Die klinische Relevanz eines Knieflexionsdefizits von  $2-3^\circ$  wurde bei einer statistischen Messfehlergröße von  $2-3^\circ$  allerdings kritisch betrachtet, denn das Knieflexionsdefizit konnte nicht sicher von der Messtoleranz abgegrenzt werden. Diesbezüglich bedarf es zukünftig weiterer Forschung.

In der Analyse des beidbeinigen Squats fiel der Unterschied der maximalen Knieflexion zwischen der betroffenen und der kontralateralen Seite am deutlichsten im Gruppenvergleich auf. Auf der kontralateralen Seite unterschieden sich Gruppe I und II um  $13,5^\circ$ , auf der betroffenen Seite um  $12,9^\circ$  ( $p<0,1$ ). Ein Unterschied zwischen Gruppe I und II von  $13^\circ$  konnte auch nach Abzug des möglichen statistischen Messfehlers von  $2-3^\circ$  mit  $10^\circ$  Differenz weiterhin als klinisch relevant gewertet werden. Gruppe II erzielte in diesem Test auf beiden Seiten also deutlich schlechtere Ergebnisse als Gruppe I. Weiterhin besteht die Vermutung, dass eine Einschränkung der Knieflexion durch eine Einschränkung der Dorsalextension entstehen kann (Gomes et al. 2020, Kim et al. 2015, Lamontagne et al. 2011).

In Zusammenschau aller Befunde ist die Aussage zulässig, dass ein größeres Dorsalextensionsdefizit des betroffenen Sprunggelenks bei Gruppe II zu einer stärkeren Einschränkung der Knieflexion auf beiden Seiten während des beidbeinigen Squats geführt hat als bei Gruppe I. Gruppe II wies beim beidbeinigen Squat nämlich nicht nur auf der betroffenen Seite, sondern auch der kontralateralen Seite ein größeres Knieflexionsdefizit auf als Gruppe I.

Insgesamt kann durch diesen Funktionstest die Hypothese bestätigt werden, dass die Patienten, bei denen die Repositionskriterien erfüllt sind (Gruppe I), auch geringere Bewegungseinschränkungen des benachbarten Kniegelenks aufweisen als die Patienten, bei denen die Repositionskriterien nicht erfüllt sind (Gruppe II). Außerdem ist die Aussage zulässig, dass geringe Bewegungsdefizite des Sprung- und Kniegelenks möglicherweise erst in der 3D-Analyse einer körperlich anstrengenderen Bewegung auffallen, die in der klinischen Untersuchung und während des Gehens in der Ebene nicht erfasst werden können.

#### 8.1.6 Einbeiniger Squat

Auch beim einbeinigen Squat kann ein Dorsalextensionsdefizit des Sprunggelenks mit einer veränderten Kinematik von Knie- und Sprunggelenk und einer verminderten maximalen Tiefe des Squats einhergehen (Gomes et al. 2020, Kim et al. 2015, Lamontagne et al. 2011). Darüber hinaus kann durch die einbeinige Ausführung des Squats die Koordinationsfähigkeit des Patienten überprüft werden. Zudem lässt sich die Bewegung des betroffenen Gelenks mit der des kontralateralen Gelenkes besser vergleichen, denn der zuvor beschriebene Einfluss des kontralateralen Sprunggelenks auf die Gesamtbewegung des Standbeins ist im Einbeinstand sehr gering. Ergänzend können Instabilitäten im Hüft- oder Kniegelenk entdeckt werden.

Die kinematischen Ergebnisse des Einbeinsquats zeigten im Vergleich der Gruppen I und II miteinander keine signifikanten Unterschiede auf. Allerdings zeigten die Patienten der Gruppe I, bei denen die Repositionskriterien erfüllt sind, im Vergleich zu den Patienten der Gruppe II, bei denen die Repositionskriterien nicht erfüllt sind, eine größere maximale Knieflexion der betroffenen Seite (Standbein). Statistisch deutete sich der Unterschied nur an ( $p=0,0772$ ), klinisch handelte es sich allerdings um eine Differenz von  $8,5^\circ$  in der maximalen Knieflexion auf der betroffenen Seite (Gruppe I:  $62,5^\circ$  vs. Gruppe II:  $53^\circ$ ). Auf der kontralateralen Seite in der Funktion als Standbein war dieser Unterschied hingegen nicht zu sehen (Gruppe I:  $65^\circ$  vs. Gruppe II:  $63,5^\circ$ ). Diese Ergebnisse bestätigen die vorgelegte Hypothese, dass beim einbeinigen Squat bei Gruppe I auf der betroffenen Seite geringere Bewegungseinschränkungen des benachbarten Kniegelenks zu erkennen sind als bei Gruppe II.

Diese These wird überdies durch die Ergebnisse innerhalb einer Gruppe gestützt. Die Patienten der Gruppe II zeigten am tiefsten Punkt des einbeinigen Squats in der Knieflexion eine größere Seitendifferenz zwischen betroffener und kontralateraler Seite als die Patienten der Gruppe I (Gruppe I: OP-Seite  $65,2^\circ$  Non-OP-Seite  $62,5^\circ$  vs. Gruppe II: OP-Seite  $53,0^\circ$  Non-OP-Seite  $63,5^\circ$ ). Beim Vergleich der Dorsalextension der betroffenen Seite zur kontralateralen Seite innerhalb einer Gruppe fielen bei beiden Gruppen Defizite auf. Allerdings waren diese bei Gruppe II größer als bei Gruppe I. Innerhalb der Gruppe I war ein signifikantes Knieflexionsdefizit von  $3,9^\circ$  auf der betroffenen Seite im Vergleich zur kontralateralen Seite erkennbar (OP-Seite  $24,06^\circ \pm 4,86^\circ$  vs. Non-OP-Seite  $27,95^\circ \pm 4,68^\circ$ ,  $p=0,0005$ ). Bei den Patienten, bei denen die Repositionskriterien nicht erfüllt sind, war das Dorsalextensionsdefizit mit  $5,5^\circ$  auf der betroffenen Seite noch größer (OP-Seite  $20,60^\circ \pm 6,02^\circ$  vs. Non-OP-Seite  $26,07^\circ \pm 5,32^\circ$ ,  $p=0,0269$ ). Darüber hinaus fiel bei Gruppe II der mittlere Unterschied der maximalen Knieflexion von  $10,5^\circ$  sehr deutlich auf und war bereits mit bloßem Auge sichtbar (OP-Seite  $52,99^\circ \pm 15,29^\circ$  vs. Non-OP-Seite  $63,51^\circ \pm 10,51^\circ$ ,  $p=0,0144$ ). Dies war hingegen bei Gruppe I weder klinisch noch statistisch so eindrücklich (OP-Seite  $65,2^\circ \pm 8,8^\circ$  vs. Non-OP-Seite  $62,5^\circ \pm 11,3^\circ$ ,  $p=0,0873$ ).

Folglich ist die Aussage zulässig, dass eine Erfüllung der Repositionskriterien wie bei Gruppe I in einer Übung wie dem beid- und einbeinigen Squat mit einer besseren Sprunggelenkfunktion korreliert. Außerdem macht der einbeinige Squat deutlich, dass Patienten, bei denen die Repositionskriterien erfüllt sind, bei dessen Ausführung geringere Knieflexionsdefizite auf der betroffenen Seite aufwiesen als Patienten, bei denen die Repositionskriterien nicht erfüllt sind. Bei beiden Gruppen wurde außerdem ein Dorsalextensionsdefizit auf der betroffenen Seite gemessen, allerdings war jenes bei Gruppe II größer als bei Gruppe I.

Insgesamt sprechen die Ergebnisse dafür, dass Patienten, bei denen die Repositionskriterien erfüllt sind, bei der Ausführung des Einbeinsquats bessere kinematische Ergebnisse erzielen als Patienten, bei denen diese Kriterien nicht erfüllt sind. Die Kinetik des einbeinigen Squats bedarf zukünftig weiterer klinischer Studien, weil in der Forschungsliteratur bis zum heutigen Tag keine vergleichbaren Daten der Kinetik von Patienten mit Sprunggelenkverletzungen vorliegen.

Die 3D-Analyse dieses funktionellen Tests ist in der Forschung noch neu. In der Forschungsliteratur wird der Einbeinsquat bislang am häufigsten mit gesunden Probanden durchgeführt und kinematische oder kinetische Daten erhoben (van der Straaten et al. 2019). Park et al. nutzten den Test bei Patienten mit chronischer Sprunggelenkinstabilität zur Überprüfung der statischen Balancefähigkeit (Park et al. 2019). Es wurde die Zeit angegeben, die nötig war, um das Knie um  $70^\circ$  zu flektieren. Eine 3D-Analyse ist jedoch nicht durchgeführt worden. Das Ergebnis deren Studie war, dass der Einbeinsquat sich als funktioneller Test gut eignete, um Sprunggelenkinstabilitäten zu erkennen, und dass muskuläre Defizite der am oberen Sprunggelenk agierenden Muskeln sich stark auf die Stabilität des Sprunggelenks auswirkten. Es scheint daher für Zukunft sinnvoll, die Ergebnisse der aktuellen Studie um eine explizite Erhebung der maximalen Muskelkräfte zu erweitern (s. 8.3.3) (Park et al. 2019).

Erst kürzlich wurde von Da Costa et al. eine Studie (2021) veröffentlicht, in der die Kinematik der unteren Extremitäten junger gesunder Probanden während des Einbeinsquats untersucht worden war. Diese Studie zeigte, dass sowohl der maximale Dorsalextensions- als auch der maximale Knie- und Hüftflexionswinkel signifikant mit der maximalen Squattiefe korrelieren und dass ein größerer Dorsalextensionwinkel mit einer geringeren Hüftflexion und -anteversion einherging. Es wurde kein Zusammenhang zwischen passiv erhobener RoM des Sprunggelenks und dynamischer RoM während des Einbeinsquats beschrieben (da Costa et al. 2021). Daher scheint es in der Zukunft wichtig, in eine Nachuntersuchung des Sprunggelenks komplexe Bewegungen mit variierenden Bewegungsausmaßen und Belastungen also variierende Geschwindigkeiten, Richtungswechsel oder zusätzliches Gewicht einzuarbeiten. Diese Ergebnisse könnten die Ergebnisse der passiven RoM ergänzen oder möglicherweise infrage stellen. Außerdem scheint es sinnvoll, nicht nur das Sprunggelenk, sondern auch die Kinematik und Kinetik der benachbarten Gelenke während einer komplexen Bewegung zu untersuchen.

Darüber hinaus sahen Wyndow et al. beim Einbeinsquat einen Zusammenhang zwischen einer vermehrten Valgisierung des Knies und einem vermindertem Dorsalextensionswinkel. Bei Patienten mit einem Dorsalextensionsdefizit könnte das angrenzende Kniegelenk durch den konsekutiven Valgusstress während einer funktionellen Übung laut Wyndow et al. mehr belastet sein (Wyndow et al. 2016). Umso wichtiger scheint es, zukünftig weitere Studien bezüglich der Kinetik und Kinematik von Sprunggelenk und benachbarten Gelenken an Patienten mit instabilen Sprunggelenkverletzungen, wie der vorliegenden Patientenklientel, durchzuführen. Vor allem über das Dorsalextensions- und das Knieflexionsmoment lassen sich Aussagen zur Gelenkbelastung eines Patienten treffen, wenn diese gemessen und im Vergleich zu Normdaten bewertet werden. So könnte in Zukunft das Risiko verringert werden, dass posttraumatische Anschlussarthrosen an benachbarten Gelenken entstehen oder deren Kausalität nicht berücksichtigt wird.

#### 8.1.7 Y-Balance-Test

Der Y-Balance-Test wird zur Bewertung der posturalen Stabilität und der dynamischen Gleichgewichtshaltung angewendet (Freund et al. 2019). Zusätzlich wird er als Prädiktor für ein höheres Verletzungsrisiko herangezogen, da die Ergebnisse im Y-Balance-Tests mit einer funktionellen Beeinträchtigung der unteren Extremität korrelieren (s. 5.9.3) (Alnahdi et al. 2015, Gribble et al. 2012). Mit dem Y-Balance-Test lassen sich zudem Limitationen der Standstabilität prüfen, die durch zahlreiche Faktoren der motorischen Kontrolle der unteren Extremität wie Muskelkraft, Propriozeption und Gelenkbeweglichkeit beeinflusst wird (Freund et al. 2019).

In der vorliegenden Studie führten die Patienten den Test mit dem rechten und dem linken Bein aus (s. 5.9.3 und 6.4.6.3). Die jeweils maximal erreichten Weiten des Schwungbeins sowohl in anteriorer als auch in posteromedialer und posterolateraler Richtung wurden im Verhältnis zur Länge des Standbeins bewertet.

Manchen Autoren zufolge wird die maximale Weite des Schwungbeins durch die Beweglichkeit im Sprung- und Kniegelenk des Standbeins beeinflusst. Ein größerer Dorsalextensionswinkel und ein größerer Knieflexionswinkel ermöglichen laut ihnen einen tieferen Einbeinsquat. Das Schwungbein kann folglich weiter nach vorne bzw. nach anterior geschoben werden. Die Forschungsliteratur stützt die Hypothese, dass eine Bewegungseinschränkung der unteren Extremität, z.B. ein Dorsalextensions- oder Knieflexionsdefizit, mit einem schlechteren Ergebnis im Y-Balance-Test und somit mit einer schlechteren Koordinationsfähigkeit einhergeht. Außerdem können die Einschränkungen der betroffenen Extremität auch als Defizite auf der kontralateralen Seite zu erkennen sein (Alnahdi et al. 2015, Gribble et al. 2012, O'Connor et al. 2020, Pairoit de Fontenay et al. 2015).

In der aktuellen Studie erreichten Gruppe I und II im Gruppenvergleich des Y-Balance-Tests weder auf der betroffenen noch auf der kontralateralen Seite signifikant unterschiedliche maximale Weiten des



Schwungbeins. Einzig bei der Ausführung der Übung mit der betroffenen Seite fiel eine unterschiedliche Tendenz in der posteromedialen Richtung auf, denn Gruppe I erreichte hier im Mittel 81,5% und Gruppe II nur 72,7% der Länge des Standbeins ( $p=0,0674$ ). Auf der kontralateralen Seite lieferte der Gruppenvergleich keinen signifikanten Unterschied (Gruppe I: 84,5% vs. Gruppe II: 78,2%). Darüber hinaus waren die maximal erreichten Weiten in allen Richtungen im Verhältnis zur Beinlänge bei Gruppe II im Mittel ca. 4% geringer als bei Gruppe I, blieben jedoch ohne statistische Signifikanz (s. Tabelle 21).

Diese Ergebnisse stützen die aufgestellte Hypothese, dass die Patienten, bei denen die Repositionskriterien erfüllt sind, in der Koordinationsprüfung des betroffenen Sprunggelenks bessere Ergebnisse erzielen als die Patienten, bei denen die Repositionskriterien nicht erfüllt sind. Zusätzlich schnitten in allen untersuchten Parametern des Y-Balance-Tests nicht nur die Patienten der Gruppe I, sondern auch die Patienten der Gruppe II im Mittel mit der kontralateralen Extremität um 1-5% Prozentpunkte besser ab als mit der betroffenen Extremität (s. Tabelle 22).

Der Composite Score gibt einen Gesamteindruck des Y-Balance-Tests des Standbeins mithilfe der maximalen Bewegung in alle Richtungen (s. 6.4.6.3). Je größer der prozentuale Wert ist, umso besser ist die Koordinationsfähigkeit bzw. posturale Stabilität des Patienten auf dem gewählten Bein. Gruppe I zeigte im Composite Score mit 2,2% einen signifikanten Unterschied zwischen betroffener und kontralateraler Seite (OP-Seite 75,45% +/- 8,26% vs. Non-OP-Seite 77,68% +/- 9,59%,  $p=0,0412$ ). Bei Gruppe II fielen sowohl bei der Bewegung des Schwungbeins nach posteromedial als auch bei der Auswertung des Composite Scores signifikante Unterschiede von 5,5% und 4% zwischen der betroffenen und der kontralateralen Seite auf (posteromedial: OP-Seite 72,70% +/- 11,47% vs. Non-OP-Seite 78,21% +/- 11,59%,  $p=0,322$ ; Composite Score: OP-Seite 70,04% +/- 7,33% vs. Non-OP-Seite 74,00% +/- 7,69%,  $p=0,0273$ ).

In der Forschungsliteratur veröffentlichten Freund et al. Normdaten für den Y-Balance-Test für gesunde Frauen zwischen 50 und 79 Jahren. In deren Studie schnitten die jüngsten Frauen signifikant besser ab als die Frauen zwischen 60 und 69 Jahren und auch deutlich besser als die Frauen zwischen 70 und 79 Jahren. Die Frauen zwischen 50 und 59 Jahren erreichten im Mittel im Verhältnis zur Beinlänge eine Weite von 65% nach anterior, 104% nach posteromedial, 101% nach posterolateral und 90% im Composite Score. Damit lagen deren Mittelwerte in jedem Fall deutlich über den Ergebnissen des Patientenkollektivs dieser Studie. Allerdings war der Studie von Freund et al. die Beinlänge von der Spina iliaca anterior superior (SIAS) bis zum medialen Malleolus gemessen worden, wohingegen in der vorliegenden Studie die funktionelle Beinlänge (SIAS bis Malleolus lateralis) zur Berechnung verwendet wurde. Dies macht die Ergebnisse beider Studien nur bedingt vergleichbar.

Salas-Gómez et al. lieferten erste Ergebnisse von 22 Patienten mit bimalleolärer Sprunggelenkfraktur mit einem Durchschnittsalter von 43 Jahren, die den Y-Balance-Test sechs Monate postoperativ zur Koordinationsprüfung durchgeführt hatten. Die Forschungsgruppe gab bei den Patienten mit dem betroffenen Bein maximal erreichte Weiten nach anterior von  $53.8 \pm 13.2\%$ , nach posteromedial von  $99.0 \pm 14.4\%$ , nach posterolateral  $92.3 \pm 16.2\%$  und einen Composite Score von  $82.2 \pm 13.0\%$  an. Auf dem kontralateralen Bein lieferten sie Werte von  $62.4 \pm 11.1\%$  nach anterior,  $99.7 \pm 13.8\%$  nach posteromedial,  $98.0 \pm 16.0$  nach posterolateral und einen Composite Score von  $89.2 \pm 11.3\%$ . Im Vergleich zu den Daten der aktuellen Studie schnitten Salas-Gómez' Patienten in der Richtung nach anterior schlechter ab, übertrafen die vorliegende Patientenklientel allerdings in der posteromedialen und -lateralen Richtung sowie im Composite Score. Bei Salas-Gómez' Patienten wurde die Beinlänge zudem wie bei Freund et al. von der SIAS bis zum medialen Malleolus gemessen. Dadurch erhöhte sich bei größerer Beinlänge der Betrag des Quotienten und somit das Ergebnis.

In einer Folgestudie scheint es daher günstiger, die Messung der Beinlänge für vergleichbare Daten entsprechend der in der Forschungsliteratur gängigen Ausführung durchzuführen (Alnahdi et al. 2015, Freund et al. 2019, Gribble et al. 2012, Hertel et al. 2006).

In den Daten von Salas-Gómez et al. korrelierten ferner eine größere Dorsalextension im Sprunggelenk und eine größere Muskelkraft im Hüftgelenk signifikant mit der maximal erreichten Weite in anteriorer Richtung und mit dem Composite Score (Salas-Gomez et al. 2020). Jene Forschungsgruppe wertete bilaterale Differenzen größer als 3,3° außerdem als klinisch relevant und postulierte, dass das kontralaterale Bein als Vergleich zum Erkennen einer Pathologie genutzt werden konnte. Demzufolge dürfen die Ergebnisse des Gruppenvergleichs der vorliegenden Studie als klinisch relevant eingestuft werden, da die mittlere Differenz beider Gruppen bei jedem betrachteten Parameter ca. 4% betrug und über 3,3° lag (Salas-Gomez et al. 2020).

Durch die 3D-Auswertung des Y-Balance-Tests kann die aufgestellte Hypothese der aktuellen Arbeit bestätigt werden. Die Gruppe, bei der die Repositionskriterien erfüllt sind, erzielte im Mittel bessere funktionelle Ergebnisse im Y-Balance-Test und wies somit geringere Bewegungs- und Koordinationsdefizite auf als die Gruppe, bei der die Repositionskriterien nicht erfüllt sind.

#### 8.1.8 Side-Hop-Test

Der Side-Hop-Test ist ein einbeiniger Sprungtest, bei dem der Patient in seitlicher Richtung eine Weite von 30cm von beiden Seiten überspringt. In der Forschungsliteratur wurde bei der Auswertung des Side-Hop-Tests bislang vor allem die Beweglichkeit und Krafterzeugung des Knie- und Hüftgelenks erwähnt (Itoh et al. 2016). Durch Rosen et al. wurde er in einer Metaanalyse als sehr gut geeigneter Test zur Bewertung der Sprunggelenkfunktion von Patienten mit chronischer Sprunggelenkinstabilität hervorgehoben (Rosen et al. 2019). Postoperative kinematische und Kinetische Daten des Sprunggelenks liegen vor allem bei Patienten mit instabilen Syndesmoseverletzungen bis heute nicht in der Literatur vor.

Yoshida et al. untersuchten in einer Studie die RoM des Sprunggelenks während des Side-Hop-Tests bei gesunden Probanden (N=15). Die Absicht jener Autoren war es, eine Testbatterie für Patienten mit Knöchelverstauchungen aufzubauen (Yoshida et al. 2011). Deren Probanden erzielten im Mittel eine Inversion/Eversion von  $27\pm 3.8^\circ$ . Sie demonstrierten so, dass die mittlere Inversion/Eversion des Sprunggelenks in den verschiedenen Phasen des Side-Hops signifikant variierte.

Wurde der Side-Hop-Test diagnostisch bei Patienten mit Knöchelverstauchungen und konsekutiver Instabilität des Sprunggelenks angewandt, zeigte sich die RoM des betroffenen Sprunggelenks vergrößert. Markstrom et al. waren der Meinung, dass die vergrößerte RoM durch eine Bandinstabilität bedingt sein könnte (Markstrom et al. 2018, Yoshida 2018, Yoshida et al. 2011).

Eine Hypothese der vorliegenden Arbeit ist, dass die Patienten der Gruppe I, bei der die Repositionskriterien erfüllt sind, ein besseres Ergebnis im koordinativ anspruchsvollen Side-Hop-Test erzielen als die Patienten der Gruppe II, bei der die Repositionskriterien nicht erfüllt sind. Leider konnten die Ergebnisse des Side-Hop-Tests in der vorliegenden Studie nicht quantitativ ausgewertet werden, weil nicht alle Patienten körperlich dazu in der Lage waren, den Test entsprechend den Vorgaben des Studienprotokolls auszuführen. Der Test wurde daher gemäß bestimmten Gütekriterien nur qualitativ bewertet und die Patienten beider Gruppen werden entsprechend in vier Kategorien eingeteilt (s. 7.3.6). Bei der qualitativen Auswertung des Side-Hop-Tests wurden keine Unterschiede zwischen den Gruppen deutlich. Sowohl einige Patienten der Gruppe I als auch der Gruppe II wiesen bei der Ausführung des Funktionstests große koordinative Defizite auf. Dies könnte zum einen durch das hohe Alter einiger Patienten innerhalb beider Gruppen, zum anderen durch eine mangelnde (postoperative) Balance- und Koordinationsfähigkeit bedingt worden sein.

Hier bedarf es in Zukunft weiterer Forschung, die eine höhere Fallzahl umfasst und eine größere Anzahl jüngerer Patienten einschließt. Dadurch soll das fortgeschrittene Alter der Patienten als fraglichen Bias für die unzureichende Ausführung des Tests in beiden Patientengruppen ausgeglichen werden. Es ist ratsam, die Ergebnisse der Patienten mit Sprunggelenkverletzung zukünftig mit Normdaten zu vergleichen (s. 8.3) (Yoshida et al. 2011). Bis zur Fertigstellung dieser Arbeit lagen in der

Forschungsliteratur keine quantitativen Daten einer 3D-Analyse des Side-Hop-Tests von Patienten mit instabiler Syndesmoseverletzung zum Vergleich vor.

## 8.2 Überprüfung der Hypothesen und Studienziel

Ziel der vorliegenden Studie ist es, eine quantitative Nachuntersuchung der Sprunggelenkfunktion von Patienten nach der operativen Versorgung einer instabilen Syndesmoseverletzung mittels einer 3D-Bewegungsanalyse durchzuführen. Dadurch soll überprüft werden, ob die Erfüllung der in einer Vorgängerstudie postulierten intraoperativen Repositionskriterien zu einem besseren klinischen Ergebnis führt oder nicht (s. 5.7). Die Haupthypothese besagt, dass die Patienten, bei denen die Repositionskriterien erfüllt sind (Gruppe I), ein langfristig besseres funktionelles Ergebnis des Sprunggelenks erzielen als die Patienten, bei denen die Repositionskriterien nicht erfüllt sind (Gruppe II).

In der 3D-Analyse des Gehens in der Ebene konnten weder kinetische noch kinematische signifikante Unterschiede zwischen beiden Gruppen nachgewiesen werden. Außerdem wurden bei beiden Patientengruppen sowohl in der klinischen Untersuchung der RoM als auch in der 3D-Analyse des Gehens in der Ebene keine signifikanten kinematischen oder kinetischen Unterschiede des betroffenen Sprunggelenks im Vergleich zur kontralateralen Seite erhoben.

Umso wichtiger scheint es, die Patienten zukünftig mit verschiedenen dynamischen Funktionstests über die Alltagsbewegung hinaus zu belasten. Bereits andere Autoren wie Northeast et al. postulierten, dass leichte kinetische und kinematische Veränderungen im Gelenk bei niedriger Belastung mit einer deutlicheren Ausprägung der Veränderung bei höherer Belastung korrelieren. Ungleichheiten könnten daher durch dynamische Bewegungen wie dem Gehen auf unebenem Boden oder dem Einbeinspringen verstärkt werden (Hertel 2002, Northeast et al. 2018).

In der Tat wird durch die vorliegende Studie aufgezeigt, dass ein Dorsalextensionsdefizit erst in den dynamischen Funktionstests, hier dem ein- und beidbeinigen Squat und dem Y-Balance-Test, deutlich wird. Gruppe I erzielte in diesen Funktionstests bessere kinematische Ergebnisse als Gruppe II. Nicht nur ein geringeres Dorsalextensionsdefizit des betroffenen Sprunggelenks im Vergleich zur kontralateralen Seite, sondern auch ein größerer maximaler Knieflexionswinkel der betroffenen Seite beim Squat fiel bei Gruppe I im Vergleich mit Gruppe II auf. Erfüllte Repositionskriterien korrelieren somit in diesen drei Funktionstests (ein- und beidbeiniger Squat, Y-Balance-Test) mit einer besseren dynamischen Sprunggelenkfunktion. Zusätzlich zeigte diese Studie, dass sich zur genaueren Einschätzung der Sprunggelenkfunktion 3D-Analysen von funktionellen Tests eignen. Der durch die aktuelle Studie erprobte Side-Hop-Test eignet sich für die vorliegende Patientenklientel aufgrund seiner koordinativen Schwierigkeit nicht.

## 8.3 Limitationen

Im folgenden Abschnitt wird die Umsetzung des vorliegenden Forschungsvorhabens selbstkritisch beleuchtet und auf die Limitationen der Durchführung hingewiesen. Dadurch sollen schlussendlich Impulse und Anreize für zukünftige Arbeiten entstehen.

### 8.3.1 Messmethodik

Limitierende Faktoren können bei der praktischen Durchführung der bewegungsanalytischen Messung auftreten. Ungleiche Positionierungen der Marker auf der Haut und ein sich unter den Markern bewegender Weichteilmantel bzw. eine Adipositas der Probanden stellen die größten Fehlerquellen während einer dreidimensionalen Messung dar (Della Croce et al. 2005, Oppelt et al. 2020). Della Croce et al. empfahlen daher, die Positionierung nur von einer Person und unter Kontrolle einer zweiten Person vorzunehmen, um die Messfehler durch leicht abweichende Markerpositionierungen möglichst

gering zu halten (Della Croce et al. 2005). In dieser Studie wurde außerdem ein BMI > 30kg/m<sup>2</sup> als Ausschlusskriterium verwendet (s. 6.2.2). Die 3D-Messung wurde stets durch dieselbe Person durchgeführt und bei Bedarf zusätzlich durch eine zweite erfahrende Person korrigiert (Della Croce et al. 2005, Szczerbik und Kalinowska 2011).

Auch die Auswahl des Markermodells stellt eine gewisse Limitation dar, da nicht mit jedem Modell alle definierten Parameter erhoben werden können (van Hove et al. 2019). Das Modell sollte daher im Voraus präzise ausgewählt werden. In der vorliegenden Studie wurden sowohl das *Salford Lower Body Gait Model* als auch das *Oxford Foot Model* zur Markerpositionierung verwendet, da sie sich am besten für die geplante Messung eigneten.

Zusätzlich sollte ein systematischer Messfehler der Berechnungsalgorithmen der 3D-Analyse von bis zu 5° in jede Ergebnisinterpretation miteinfließen. In der vorliegenden Studie waren beispielsweise die die Inversions-/Eversionswinkel im Mittel sehr gering (Gruppe I: 17,5°, Gruppe II: 14,1°), wodurch sich ein Messfehler von bis zu 5° umso schwerwiegender auf die klinische Bewertung eines statistisch signifikanten Unterschieds auswirkte.

In der Zukunft könnte mit derselben Fragestellung eine multizentrische Studie in mehreren Bewegungslabors durchgeführt werden, um die 3D-Messungen durch unterschiedliche Untersuchende zu objektivieren. Außerdem kann so die Reliabilität der neu erarbeiteten Messmethoden bei wiederholter Durchführung überprüfen werden.

### 8.3.2 Messdurchführung

Ein weiterer limitierender Faktor im Allgemeinen ist die alltagsungewöhnliche Situation der 3D-Messung für den Patienten. Der Patient trug während der 3D-Messung reflektierende Marker und -cluster auf seinem Körper und bewegte sich wenig bekleidet und barfuß auf sehr ebenem Boden (Kraftmessplatte, Druckmessplatte), während er von Videokameras gefilmt wurde. Es scheint aus diesem Grund umso wichtiger, mehrere Zyklen einer Messung durchzuführen, um die intra- und interindividuelle Gangvariabilität und die künstliche Messsituation auszugleichen (Oppelt et al. 2020). Zusätzlich scheint eine Eingewöhnungsphase des Patienten durch ein Auf- und Ablaufen über die Kraftmessplatten sinnvoll.

Im Speziellen konnten die Funktionstests in der aktuellen Studie nicht durch jeden Patienten gemäß den Vorgaben des Studienprotokolls durchgeführt werden (s. E). Nicht nur beim beidbeinigen Squat, sondern auch beim einbeinigen Squat und beim Y-Balance-Test wurde von einigen Patienten zum Beispiel die Ferse des Standbeins angehoben, um eine größere maximale Beugung im Kniegelenk zu erreichen. Diese Ausführung entsprach nicht denen des Studienprotokolls. Zum einen ist es möglich, dass durch den Patienten ein Kompensationsmechanismus eines vorhandenen Dorsalextensionsdefizits angewendet wurde, zum anderen kann der Squat bereits zuvor mit angehobenen Fersen erlernt worden sein. Beim Y-Balance-Test fiel darüber hinaus auf, dass das Schwungbein beim Erreichen der maximalen Weite abgesetzt, der Einbeinstand nicht stabil gehalten wurde oder die Y-Form mit dem Schwungbein nicht adäquat nachgebildet werden konnte. Die Ausführung des Side-Hop-Tests gemäß den Vorgaben des Studienprotokolls war bei einem Großteil der hier untersuchten Patienten koordinativ oder kraftbedingt sogar nicht möglich (s. 8.1.8). Dieser Test wurde daher bei der quantitativen Auswertung nicht berücksichtigt.

Zusammenfassend kann die Qualität der Studie durch die fehlerhafte Ausführung einer Übung reduziert worden und die Ergebnisse können somit weniger gut mit anderen Studien vergleichbar sein. Daher ist es für zukünftige Studien wichtig, die Patienten zu Beginn der Messung besser über die vorgeschriebene Ausführung zu informieren oder deren Ausführung deutlicher zu korrigieren. Eine längere Einlaufphase bzw. Testphase einer funktionellen Übung kann vorteilhaft sein.

### 8.3.3 Zusätzliche aussagekräftige Parameter

Weitere Informationen über die Kinematik und Kinetik der unteren Extremitäten könnten in Zukunft durch die Erhebung zusätzlicher Messgrößen gewonnen werden. Einige Autoren sind der Meinung, dass neben der Operation auch die initiale Frakturklassifikation in Weber A, B oder C ein wichtiger Parameter für das funktionelle Ergebnis nach einer operativen Sprunggelenkversorgung ist [95-97] (s. 8.1.2). In der vorliegenden Studie wurde das Patientenkollektiv mit Syndesmoseverletzungen durch eine Weber B/C Fraktur oder isolierten Syndesmoseverletzungen untersucht, um die Ergebnisse mit der Vorgängerstudie vergleichen zu können. In einer zukünftigen Studie könnte man die Frakturklassifikation zusätzlich als eigenen Parameter auswerten und sie auf eine signifikante Korrelation mit dem funktionellen Ergebnis prüfen (s. Tabelle 1).

Die Pedobarographie ermöglicht die Messung des Center of Pressure (CoP). Das CoP ist einer der in der Forschungsliteratur am häufigsten verwendeten Parameter zur Interpretation von Sprunggelenkinstabilitäten (Maki et al. 1994, Prieto et al. 1996). Koldenhoven et al. bewerteten nicht nur den Maximalwert der Geschwindigkeit des CoP im Gangzyklus, sondern auch die Variabilität der CoP Position während verschiedener Phasen des Gangzyklus. Damit konnte der Zeitpunkt festgestellt werden, an dem der Patient die maximale Instabilität im Sprunggelenk erreicht (Koldenhoven et al. 2018). Eine Auswertung des gesamten Gangzyklus in einzelnen Phasen scheint nicht nur in der Pedobarographie, sondern auch in der 3D-Ganganalyse in Zukunft sehr interessant. So könnte die Gelenkstabilität zusätzlich während des initialen Bodenkontakts und des Abstoßvorgangs bewertet werden. Dies erfordert allerdings einen großen zeitlichen Umfang sowie spezielle technische und statistische Instrumente zur Berechnung, die dem Messlabor zur Verfügung stehen müssen.

Bei den 3D-Analysen des Squats und des Einbeinquats scheint es sinnvoll, neben der RoM von Sprung- und Kniegelenk zukünftig auch die RoM des Hüftgelenks zu untersuchen. Wie die Ergebnisse der vorliegenden Studie demonstrieren konnten, hat ein Dorsalextensionsdefizit des Sprunggelenks vor allem während der dynamischen Bewegung Auswirkungen auf das benachbarte Kniegelenk.

Kim et al. wiesen darauf hin, dass neben einer größeren RoM des Sprunggelenks auch eine größere Hüftflexion und der Beckenneigungswinkel mit einem tieferen Squat einhergingen (Kim et al. 2015, Lamontagne et al. 2011). Diese Annahme führt zu der neuen Hypothese, dass auch Veränderungen in der Hüftgelenkbewegung die Dorsalextension im OSG beeinflussen können. Dies ist ebenfalls ein Ansatzpunkt einer zukünftigen Studie.

Die S2-e-Leitlinien für Sprunggelenkfrakturen (2015) gaben an, dass die Prognose einer Sprunggelenkverletzung abhängig von der Verletzungsart ist (Schmidmaier et al. 2015, Hinweis: aktuell in Überarbeitung). Zusätzliche Knorpelschäden gingen demnach in Studien mit einem schlechteren funktionellen Ergebnis einher. Neben der nicht beeinflussbaren Schwere des Traumas beeinflusst möglicherweise auch die physiotherapeutische Nachbehandlung das langfristige klinische Resultat. Die Intensität der postoperativen Physiotherapie hängt dabei neben der Fitness des Patienten wahrscheinlich auch von der gewünschten Belastung des Gelenks (Leistungssport vs. Alltagsbewegungen) und der Patientencompliance ab. In der vorliegenden Studie gaben zwar fast alle Patienten an, eine postoperative Physiotherapie erhalten zu haben. Diese unterschied sich allerdings stark in ihrem Umfang. In einer zukünftigen Studie kann sinnvoll sein, auch die prä- und postoperative Physiotherapie als Einflussfaktor auf das funktionelle Ergebnis zu untersuchen.

### 8.3.4 Auswahl der Funktionstests

Neben der Verbesserung der 3D-Analyse durch zusätzliche Parameter der bereits erprobten Tests kann eine zukünftige Studie auch von einer größeren oder anderen Testbatterie profitieren. In der vorliegenden Arbeit war ein Großteil der Patienten nicht in der Lage, den Side-Hop-Test gemäß den Vorgaben auszuführen. Diesen Test sollte man daher nur anwenden, wenn eine höhere Probandenzahl

vorliegt oder durch eine homogenere Altersverteilung eine größere Anzahl an jüngeren Patienten eingeschlossen werden kann. Das fortgeschrittene Alter der Patienten kommt außerdem als Störfaktor für die unzureichende Ausführung des Tests in Frage. Alternativ kann der Test in weiterführenden Studien durch einen anderen Funktionstest ersetzt werden (s. 8.1.8).

Park et al. empfahlen, die Funktionsprüfung des Sprunggelenks um die explizite Erhebung der maximalen Muskelkräfte zu erweitern, weil nicht nur die Biomechanik der Gelenke, sondern auch muskuläre Defizite der Hüft-, Ober- und Unterschenkelmuskulatur große Auswirkungen auf die Bewegung der unteren Extremität hatten (Park et al. 2019). Die Muskelkräfte wurden in der vorliegenden Studie nicht erhoben. In einer Folgestudie können zu diesem Zweck der *single heel rise test* oder der *side-step test* in die Testbatterie aufgenommen werden (Park et al. 2019).

### 8.3.5 Auswahl des Patientenkollektivs

Eine der Hauptlimitationen der vorliegenden Studie ist die Größe des Patientenkollektivs. Zum einen wurden in jede Gruppe nur dreizehn Patienten eingeschlossen, zudem wurde das nachuntersuchte Patientenkollektiv durch die vorausgegangene Studie vorgegeben. Zu Vergleichszwecken wurden nur diejenigen Patienten erneut kontaktiert, die bereits an der Vorgängerstudie teilgenommen haben. Die Follow-Up-Rate betrug lediglich 48%, was mitunter durch das lange Zeitintervall zwischen Operation und zweiter Nachuntersuchung bedingt sein konnte. Achtzehn Patienten konnten mit der vorliegenden Adresse und Telefonnummer nicht mehr erreicht werden. Bei achtzehn Patienten scheiterte eine Studienteilnahme an mangelndem Interesse an einer erneuten Untersuchung. Nicht jedem Teilnehmer der Vorgängerstudie konnte folglich eine Re-Evaluation angeboten werden. Darüber hinaus könnte durch die Wiedervorladung eine Patientenselektion stattgefunden haben, denn Patienten mit Beschwerden, Kritik oder Lob stellten sich möglicherweise eher zu einer zweiten Nachuntersuchung vor als Patienten ohne Anliegen. Zusätzlich mussten aufgrund der Ausschlusskriterien und der Auswertung über das Matching-Verfahren nachträglich Patienten beider Patientengruppen aus der aktuellen Studie geschlossen werden, was das Gesamtkollektiv weiter verkleinerte.

Insgesamt standen für die vorliegende Studie eine Patientenklientel mit einem mittleren Alter von 60,1 Jahren für Gruppe I bzw. von 58,4 Jahren für Gruppe II mit einer maximalen Altersspanne beider Gruppen von 36-76 Jahren zur Verfügung. Patienten unter 36 und über 76 Jahren wurden in dieser Studie also nicht bewegungsanalytisch nachuntersucht. In einer Studie von Egol et al. wurden in einer postoperativen Ganganalyse von Patienten mit Sprunggelenkfrakturen signifikante Unterschiede der räumlichen und zeitlichen Parameter zwischen Patienten über und unter 40 Jahren deutlich (Egol et al. 2006). Daher ist es für zukünftige Studien wesentlich, eine größere Patientenklientel aller Geschlechtern und Altersspannen, z.B. von achtzehn bis 85 Jahren und unterschiedlichen Aktivitätsgraden zu untersuchen. Überdies könnte man eine gesunde Kontrollgruppe einschließen, um deren Ergebnisse als Normdaten mit den Ergebnissen der Gruppen I und II zu vergleichen. Nähern sich die Ergebnisse der Gruppe I sehr denen der Normprobanden, könnten die Repositionskriterien ein weiteres Mal validiert werden.

### 8.3.6 Repositionskriterien

Zuletzt beschränken die Repositionskriterien selbst die vorliegende Studie. Vetter et al. beschrieben in ihrer Studie zur Validierung der intraoperativen Repositionskriterien von 2020, dass interindividuelle anatomische Unterschiede des Sprunggelenks mit allen gegebenen Strukturen die Objektivierung einer optimalen Reposition anhand festgelegter Parameter der Bildgebung erschwerten (Vetter et al. 2021). Es besteht die Möglichkeit, dass die Kriterien nicht allgemeingültig sind und dass nicht jeder Patient von einer Sprunggelenkreposition gemäß den vorliegenden Kriterien profitiert (s. Tabelle 2).

Daher sollte in einer zukünftigen Studie dringend analysiert werden, welche Patienten (jung vs. alt, gesund vs. vorerkrankt, männlich vs. weiblich, sportlich vs. unsportlich) durch die Einhaltung der Repositionskriterien ein besseres funktionelles Ergebnis erzielen. Für diese Patienten könnte dann auch die Strahlenmehrbelastung durch die intraoperative 3D-Bildgebung und die verlängerte OP-Dauer aufgrund der 3D-Bildgebung begründet und gerechtfertigt werden.

#### 8.4 Schlussfolgerung und Ausblick

Zusammenfassend beschäftigt sich die vorliegende Studie mit dem langfristigen Einfluss der Erfüllung von radiologischen Repositionskriterien auf die Sprunggelenkfunktion bei Patienten mit operativ versorgten akuten instabilen Syndesmoseverletzungen. Als Grundlage dienen Vorgängerstudien von Franke et al. und Vetter et al. (Vetter et al. 2021). Hierzu wurden im einleitenden Teil dieser Arbeit vier Teilhypothesen aufgestellt, die einen Vorteil für Patienten, bei denen die Repositionskriterien erfüllt sind (Gruppe I), gegen über Patienten, bei denen die Repositionskriterien nicht erfüllt sind (Gruppe II), in einer 3D-Bewegungsanalyse postulieren (s. 5.10.2). In der Auswertung fielen beim Gehen in der Ebene zwischen beiden Patientengruppen keine signifikanten kinetischen oder kinematischen Unterschiede auf. Erst in der Ausführung von Bewegungen mit höherer Anforderung unterschieden sich die beiden Gruppen deutlich. Beim Squat und Einbeinsquat wiesen die Patienten der Gruppe I im Mittel ein geringeres Dorsalextensionsdefizit im betroffenen Sprunggelenk im Vergleich zur kontralateralen Seite auf als die Patienten der Gruppe II. Zusätzlich war beim einbeinigen Squat bei Gruppe II die durchschnittliche Knieflexion der betroffenen Seite kleiner als bei Gruppe I. Bei den koordinativ anspruchsvolleren Y-Balance-Test erzielte Gruppe I ebenfalls bessere Ergebnisse als Gruppe II, beim Side-Hop-Test wurden keine Unterschiede deutlich.

Für die klinische Praxis der Behandlung einer Syndesmoseverletzung sind diese Ergebnisse deswegen relevant, weil mit ihnen angedeutet werden könnte, dass die Operation selbst ein Einflussfaktor auf das langfristige postoperative Resultat des Patienten ist. Eine Einhaltung der Repositionskriterien korrelierte mit einem besseren funktionellen Resultat des Sprunggelenks bei Patientengruppen mit höherem Leistungsanspruch an das Gelenk. Da die Unterschiede bei den untersuchten Gruppen allerdings erst in der Ausführung komplexer Bewegungen zu erkennen waren, reicht eine klinische Nachuntersuchung alleine für die Beurteilung der Sprunggelenkfunktion zukünftig wohl nicht aus. Zusätzliche Funktionstests sind daher für die postoperative Nachuntersuchung ein erweiterndes Instrument und können durch deren 3D-Analyse bereits geringe funktionelle Einschränkungen aufdecken.

Das Fazit der vorliegenden Studie ist, dass die Erfüllung der Repositionskriterien bei der operativen Versorgung von akuten instabilen Syndesmoseverletzungen ein Faktor für einen positiven Heilungsprozess ist. Die Untersuchung zeigen, dass so das funktionelle postoperative Ergebnis des Patienten verbessert werden kann, vor allem dann, wenn der Patient einen höheren Belastungsanspruch an das betroffene Sprunggelenk hat. Diese Daten könnten einen wichtigen Beitrag dazu leisten, posttraumatische Schäden mit resultierender Inaktivität, Minderungen der Erwerbsfähigkeit sowie hohe Nachbehandlungskosten zu verringern.

Ein wichtiger Aspekt bezüglich der praktischen Umsetzung ist, dass die Repositionskriterien nur in einer intraoperativen 3D-Bildgebung beurteilt werden können. Diese geht mit einer Strahlenmehrbelastung des Patienten einher. Da vermutlich nicht alle Patienten die maximale Sprunggelenkfunktion ausnutzen und daher nicht jeder Patient gleichwertig von einer optimalen Reposition profitiert, sollte die Anfertigung einer 3D-Bildgebung vom präoperativen Belastungsprofil des Patienten abhängig gemacht werden. Körperlich aktivere oder jüngere Patienten streben postoperativ wohl eine höhere Sprunggelenkbelastung an als ältere oder weniger aktive Menschen. Dennoch kann eine auch nur leicht eingeschränkte Sprunggelenkbewegung die Sturzgefahr bei älteren Patienten zusätzlich vergrößern. Bei vollständig immobilen Patienten mit geringer Sprunggelenkbelastung sollte die

Indikation zur Strahlenmehrbelastung dennoch aufgrund des niedrigen Nutzens streng gestellt werden.

Zum Schluss darf positiv bewertet werden, dass die vorliegende Studie im Sinne einer Machbarkeitsstudie der 3D-Analyse von Funktionstests erfolgreich durchgeführt wurde. Erst durch die Analyse der Funktionstests konnten bei beiden Patientengruppen signifikante Unterschiede der Sprunggelenkfunktion aufgedeckt werden, die in der 3D-Ganganalyse nicht gemessen wurden. Diese Studie ist zum Zeitpunkt der Veröffentlichung die erste in der Forschungsliteratur, in der eine funktionelle Testung des Sprunggelenks mittels einer dreidimensionalen Bewegungsanalyse durchgeführt und anschließend eine Testbatterie aufgestellt werden konnte. Drei der ausgewählten Tests eigneten sich für die 3D-Auswertung (z.B. Squat und Einbeinsquat), der vierte war für die Patientenklientel ungeeignet (Side-Hop-Test). Einzelne Tests könnten in Zukunft gegen spezifischere, weniger anspruchsvolle Tests ersetzt werden. Darüber hinaus können in Folgestudien Messparameter, z.B. die Kinematik des Hüft- und die Kinetik des Kniegelenks ergänzt, oder die Gruppengrößen erweitert werden, um die Patientenverteilung in den Gruppen homogener zu gestalten. So kann zukünftig noch genauer untersucht werden, welchen Einfluss erfüllte Repositionskriterien langfristig auf das postoperative Ergebnis von Patienten mit akuten instabilen Syndesmoseverletzungen und somit auf die Funktion von Sprunggelenk und benachbarten Gelenken nehmen.



*Abschlusszitat nach Sir Isaac Newton*

*1st law of motion: ...and a body in motion tends to stay in motion unless acted on by an external force.*

## 9 ZUSAMMENFASSUNG

Sprunggelenkverletzungen sind die häufigsten Verletzungen der unteren Extremität. Umso wichtiger ist es, dass diese Verletzungen möglichst ohne posttraumatische Folgeschäden abheilen. Die Forschungsgruppe MINTOS der BG Klinik Ludwigshafen stellte zum Zweck der optimalen operativen Versorgung von Verletzungen des Sprunggelenks (Weber B/C und isolierte Sprunggelenkfrakturen) radiologische Repositionskriterien auf. In einer 2020 veröffentlichten vergleichenden Studie zeigte diese Forschungsgruppe, dass das Erreichen einer anatomischen Reposition gemäß den definierten Kriterien zu einer signifikant besseren postoperativen Sprunggelenkfunktion führt als bei einer Reposition, die die Kriterien nicht erfüllt. Die größte Limitation deren Studie war, dass nur die Ergebnisse der Range of Motion-Messung quantitativ, aber die des Olerud/Molander-Scores zur Bewertung der Sprunggelenkfunktion und des Kellgren/Lawrence-Scores zur Einschätzung des Arthrogrades nur subjektiv und qualitativ vorlagen.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, die postulierte These der Forschungsgruppe MINTOS durch eine instrumentelle dreidimensionale Bewegungsanalyse desselben Patientenkollektivs zu prüfen. Bei der dreidimensionalen Bewegungsanalyse handelt es sich um ein computergestütztes Messsystem, mit dem Gelenkwinkel (Kinematik), Gelenkkräfte und Gelenkmomente (Kinetik) in Bewegung dokumentiert und analysiert werden können, die in der klinischen Untersuchung, z.B. des Sprunggelenks möglicherweise nicht erkennbar sind. Da bis dato in der Forschungsliteratur keine Daten zu einer dreidimensionalen Bewegungsanalyse von Patienten nach operativer Versorgung einer akuten instabilen Syndesmoseverletzung mittels Funktionstests vorliegen, dient die vorliegende Studie zudem als Machbarkeitsstudie. Die Haupthypothese der Arbeit ist, dass die Patienten, bei denen die postulierten Repositionskriterien erfüllt sind, neben der Range of Motion-Messung auch in einer dynamischen Funktionsuntersuchung bessere kinematische und kinetische Resultate erzielen als die Patienten, bei denen die Repositionskriterien nicht erfüllt sind.

Die Datenerhebung fand im Bewegungslabor der BG Klinik Ludwigshafen statt. Aus dem vorhandenen Patientenkollektiv der Vorgängerstudien konnten 26 Patienten eingeschlossen und in zwei Gruppen eingeteilt werden (Gruppe I: Repositionskriterien erfüllt, Gruppe II: Repositionskriterien nicht erfüllt). Für jeden Patienten lag die Operation mindestens acht Jahre zurück. Neben einer quantitativen Auswertung der Range of Motion und der Erhebung des Olerud/Molander-Scores wurde zudem eine dreidimensionale Analyse des Gehens in der Ebene, des Squats, des Einbeinsquats, des Y-Balance-Tests und des Side-Hop-Tests durchgeführt. Anschließend wurden kinematische und kinetische Parameter sowohl im Seitenvergleich der betroffenen und kontralateralen Seite als auch im Gruppenvergleich statistisch ausgewertet (unverbundener t-Test, Mann-Whitney-U-Test, Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test).

In der Range of Motion fiel entsprechend den Ergebnissen der vorausgegangenen Studie ein signifikanter Unterschied des Dorsalextensionsdefizits im betroffenen Sprunggelenk zwischen beiden Patientengruppen auf. Im Olerud/Molander-Score gab Gruppe II häufiger Schmerzen und eine postoperative Schwellung im Sprunggelenk an als Gruppe I.

In der Pedobarographie belastete Gruppe II den Vorfuß auf der betroffenen Seite mehr als Gruppe I, was durch ein Dorsalextensionsdefizit des betroffenen Sprunggelenks bedingt worden sein kann. Die dreidimensionale Analyse des Gehens in der Ebene ergab keine signifikanten Unterschiede. In der dreidimensionalen Analyse der Funktionstests, also bei Bewegungen mit höherer Gelenkbelastung und koordinativer Anforderung, unterschieden sich Gruppe I und II signifikant. Beim Squat und

Einbeinsquat wies Gruppe I im Mittel ein geringeres Dorsalextensionsdefizit des betroffenen Sprunggelenks im Vergleich zur kontralateralen Seite auf als Gruppe II. Darüber hinaus war die maximale Knieflexion der betroffenen Seite während des Einbeinsquats bei Gruppe I größer als bei Gruppe II. Im kontralateralen Kniegelenk zeichnete sich dieser Unterschied der Knieflexion nicht ab. Beim Y-Balance-Test zur Koordinationsprüfung erreichten die Patienten der Gruppe I mit der betroffenen Seite in der maximalen Weite nach posteromedial bessere Ergebnisse als Gruppe II. Auch innerhalb der Gruppen I und II zeichneten sich bessere Ergebnisse der kontralateralen Seite im Vergleich zur betroffenen Seite ab. Der Side-Hop-Test war für die vorliegende Patientenklientel ungeeignet.

Diese Ergebnisse deuten an, dass die Patienten, bei denen die Repositionskriterien erfüllt sind, in der dreidimensionalen bewegungsanalytischen Nachuntersuchung geringere funktionelle Defizite im betroffenen Sprunggelenk und im ipsilateralen Kniegelenk aufwiesen als die Patienten, bei denen die Repositionskriterien nicht erfüllt sind. Die Patienten der Gruppe I zeigten vor allem geringe Dorsalextensionsdefizite im betroffenen Sprunggelenk als Gruppe II.

Die Hypothese dieser Arbeit ist, dass das langfristige postoperative Resultat durch die operative Sprunggelenkreposition beeinflusst wird und die Erfüllung der Repositionskriterien dementsprechend zu einer besseren postoperativen Sprunggelenkfunktion führt. In der Vorgängerstudie wurde diese Hypothese bereits durch eine passive Range of Motion-Messung quantitativ bestätigt. Sie konnte nun durch die dreidimensionale Bewegungsanalyse erweitert werden. Da die Unterschiede zwischen dem betroffenen Sprunggelenk und der kontralateralen Seite, zwischen dem ipsilateralen Kniegelenk und der kontralateralen Seite sowie zwischen beiden Gruppen allerdings erst bei der Ausführung der Funktionstests signifikant zu erkennen waren, scheint die dreidimensionale Bewegungsanalyse ein wichtiges neues Instrument für die postoperative Untersuchung von Patienten mit instabilen Syndesmoseverletzungen zu sein. Es ist außerdem wichtig, die Testbatterie gut an die Patientenklientel anzupassen, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. In der aktuellen Studie war der Side-Hop-Test für einige Patienten beider Gruppen koordinativ zu anspruchsvoll und wurde nicht ausgewertet. In Folgestudien könnte das Patientenkollektiv bezüglich des Alters und des Aktivitätsgrads erweitert und die Funktionstestbatterie an die körperliche Fitness des Patienten angepasst werden.

Das Fazit der vorliegenden Studie ist, dass die Erfüllung der Repositionskriterien bei der operativen Versorgung von akuten instabilen Syndesmoseverletzungen ein Faktor für einen positiven Heilungsprozess ist. Die Ergebnisse zeigen, dass das funktionelle Ergebnis des Patienten durch erfüllte Repositionskriterien verbessert werden kann, vor allem dann, wenn der Patient einen höheren Belastungsanspruch an das betroffene Sprunggelenk hat. Diese Daten könnten einen wichtigen Beitrag dazu leisten, posttraumatische Schäden mit resultierender Inaktivität, Minderungen der Erwerbsfähigkeit sowie hohe Nachbehandlungskosten von Patienten mit akuten instabilen Syndesmoseverletzungen zu verringern.

## 10 LITERATURVERZEICHNIS

- Alnahdi, A. H., Alderaa, A. A., Aldali, A. Z. und Alsobayel, H. (2015). **Reference values for the Y Balance Test and the lower extremity functional scale in young healthy adults.** *J Phys Ther Sci* 27 (12), 3917-3921, doi: 10.1589/jpts.27.3917.
- Atesok, K., Finkelstein, J., Khoury, A., Peyser, A., Weil, Y., Liebergall, M. und Mosheiff, R. (2007). **The use of intraoperative three-dimensional imaging (ISO-C-3D) in fixation of intraarticular fractures.** *Injury* 38 (10), 1163-1169, doi: 10.1016/j.injury.2007.06.014.
- Baker, R. (2013). **Measuring walking : a handbook of clinical gait analysis**, 1. Aufl., Mac Keith Press, London.
- Baker, R. und Robb, J. (2006). **Foot models for clinical gait analysis.** *Gait Posture* 23 (4), 399-400, doi: 10.1016/j.gaitpost.2006.03.005.
- Barbosa, P. B., Kojima, K., Demmer, P. (2006). **Syndesmosis injury: Fibulo-tibial positioning screw.**  
URL: [https://www2.aofoundation.org/wps/portal/!ut/p/a1/04\\_Sj9CPykssy0xPLMnMz0vMAfGjzOKN\\_A0M3D2DDbz9\\_UMMDRyDXQ3dw9wMDAwCTYEKlvEocDQnTr8BDuBoQEh\\_QW5oKABaevup/dl5/d5/L2dJQSEvUUt3QS80SmfL1o2XzJPMDBHSVMwS09PVDEwQVNFmUdWRjAwMFE1/?basicTechnique=Syndesmosis%20injury%3A%20Fibulo-tibial%20positioning%20screw&bone=Tibia&segment=Malleoli&showPage=redfix](https://www2.aofoundation.org/wps/portal/!ut/p/a1/04_Sj9CPykssy0xPLMnMz0vMAfGjzOKN_A0M3D2DDbz9_UMMDRyDXQ3dw9wMDAwCTYEKlvEocDQnTr8BDuBoQEh_QW5oKABaevup/dl5/d5/L2dJQSEvUUt3QS80SmfL1o2XzJPMDBHSVMwS09PVDEwQVNFmUdWRjAwMFE1/?basicTechnique=Syndesmosis%20injury%3A%20Fibulo-tibial%20positioning%20screw&bone=Tibia&segment=Malleoli&showPage=redfix) [Stand:02.10.2017].
- Beckenkamp, P. R., Lin, C. W., Chagpar, S., Herbert, R. D., van der Ploeg, H. P. und Moseley, A. M. (2014). **Prognosis of physical function following ankle fracture: a systematic review with meta-analysis.** *J Orthop Sports Phys Ther* 44 (11), 841-851, B842, doi: 10.2519/jospt.2014.5199.
- Becker, H. P., Rosenbaum, D., Kriese, T., Gerngross, H. und Claes, L. (1995). **Gait asymmetry following successful surgical treatment of ankle fractures in young adults.** *Clin Orthop Relat Res* (311), 262-269.
- Bonnaire, F. und Bula, P. (2010). **Sprunggelenkfrakturen. Diagnostik, Klassifikation und Behandlungsstrategie.** *Trauma und Berufskrankheit* (doi: 10.1007/s10039-010-1674-z, S. 349–359).
- Braun, B. J., Veith, N. T., Herath, S. C., Hell, R., Rollmann, M., Orth, M., Holstein, J. H. und Pohlemann, T. (2018). **[A new continuous gait analysis system for ankle fracture aftercare].** *Unfallchirurg* 121 (4), 293-299, doi: 10.1007/s00113-017-0332-3.
- Breusch, S., Clarius, M., Mau, H., Sabo, D. (2017). **Klinikleitfaden Orthopädie Unfallchirurgie**, 8. Aufl, Elsevier, 507-512.

- Broos, P. L. und Bisschop, A. P. (1991). **Operative treatment of ankle fractures in adults: correlation between types of fracture and final results.** *Injury* 22 (5), 403-406, doi: 10.1016/0020-1383(91)90106-o.
- Carson, M. C., Harrington, M. E., Thompson, N., O'Connor, J. J. und Theologis, T. N. (2001). **Kinematic analysis of a multi-segment foot model for research and clinical applications: a repeatability analysis.** *J Biomech* 34 (10), 1299-1307.
- Choe, K. H., Coburn, J. W., Costa, P. B. und Pamukoff, D. N. (2021). **Hip and Knee Kinetics During a Back Squat and Deadlift.** *J Strength Cond Res* 35 (5), 1364-1371, doi: 10.1519/JSC.0000000000002908.
- Cvetanovich, G. L., Farkas, G. J., Beck, E. C., Malloy, P., Jan, K., Espinoza-Orias, A. und Nho, S. J. (2020). **Squat and gait biomechanics 6 months following hip arthroscopy for femoroacetabular impingement syndrome.** *J Hip Preserv Surg* 7 (1), 27-37, doi: 10.1093/jhps/hnaa004.
- da Costa, G. V., de Castro, M. P., Sanchotene, C. G., Ribeiro, D. C., de Brito Fontana, H. und Ruschel, C. (2021). **Relationship between passive ankle dorsiflexion range, dynamic ankle dorsiflexion range and lower limb and trunk kinematics during the single-leg squat.** *Gait Posture* 86, 106-111, doi: 10.1016/j.gaitpost.2021.03.015.
- Davidovitch, R. I., Weil, Y., Karia, R., Forman, J., Looze, C., Liebergall, M. und Egol, K. (2013). **Intraoperative syndesmotic reduction: three-dimensional versus standard fluoroscopic imaging.** *J Bone Joint Surg Am* 95 (20), 1838-1843, doi: 10.2106/JBJS.L.00382.
- Del Buono, A., Florio, A., Boccanera, M. S. und Maffulli, N. (2013). **Syndesmosis injuries of the ankle.** *Curr Rev Musculoskelet Med* 6 (4), 313-319, doi: 10.1007/s12178-013-9183-x.
- Della Croce, U., Leardini, A., Chiari, L. und Cappozzo, A. (2005). **Human movement analysis using stereophotogrammetry. Part 4: assessment of anatomical landmark misplacement and its effects on joint kinematics.** *Gait Posture* 21 (2), 226-237, doi: 10.1016/j.gaitpost.2004.05.003.
- Dill, K. E., Begalle, R. L., Frank, B. S., Zinder, S. M. und Padua, D. A. (2014). **Altered knee and ankle kinematics during squatting in those with limited weight-bearing-lunge ankle-dorsiflexion range of motion.** *J Athl Train* 49 (6), 723-732, doi: 10.4085/1062-6050-49.3.29.
- Donovan, L. und Feger, M. A. (2017). **Relationship between ankle frontal plane kinematics during different functional tasks.** *Gait Posture* 54, 214-220, doi: 10.1016/j.gaitpost.2017.03.017.
- Egol, K. A., Dolan, R. und Koval, K. J. (2000). **Functional outcome of surgery for fractures of the ankle. A prospective, randomised comparison of management in a cast or a functional brace.** *J Bone Joint Surg Br* 82 (2), 246-249, doi: 10.1302/0301-620x.82b2.10039.

- Egol, K. A., Tejwani, N. C., Walsh, M. G., Capla, E. L. und Koval, K. J. (2006). **Predictors of short-term functional outcome following ankle fracture surgery.** *J Bone Joint Surg Am* 88 (5), 974-979, doi: 10.2106/JBJS.E.00343.
- Elbaz, A., Mor, A., Segal, G., Bar, D., Monda, M. K., Kish, B., Nyska, M. und Palmanovich, E. (2016). **Lower Extremity Kinematic Profile of Gait of Patients After Ankle Fracture: A Case-Control Study.** *J Foot Ankle Surg* 55 (5), 918-921, doi: 10.1053/j.jfas.2016.04.004.
- Endo, Y., Miura, M. und Sakamoto, M. (2020). **The relationship between the deep squat movement and the hip, knee and ankle range of motion and muscle strength.** *J Phys Ther Sci* 32 (6), 391-394, doi: 10.1589/jpts.32.391.
- Escamilla, R. F. (2001). **Knee biomechanics of the dynamic squat exercise.** *Med Sci Sports Exerc* 33 (1), 127-141, doi: 10.1097/00005768-200101000-00020.
- Escamilla, R. F., Fleisig, G. S., Lowry, T. M., Barrentine, S. W. und Andrews, J. R. (2001). **A three-dimensional biomechanical analysis of the squat during varying stance widths.** *Med Sci Sports Exerc* 33 (6), 984-998, doi: 10.1097/00005768-200106000-00019.
- Fong, C. M., Blackburn, J. T., Norcross, M. F., McGrath, M. und Padua, D. A. (2011). **Ankle-dorsiflexion range of motion and landing biomechanics.** *J Athl Train* 46 (1), 5-10, doi: 10.4085/1062-6050-46.1.5.
- Fox, J. T., Hefzy, M. S. (2019). **Knee and Ankle Biomechanics during Squatting with Heels on and Off of the Ground, with and Without Weight Shifting.** *Bone Muscle* 2, 1-9.
- Frank, M., Bauwens, K. und Ekkernkamp, A. (2009). **[Fractures of the upper ankle].** *Orthopade* 38 (10), 981-995, doi: 10.1007/s00132-009-1497-4.
- Franke, J., von Recum, J., Suda, A. J., Grutzner, P. A. und Wendl, K. (2012). **Intraoperative three-dimensional imaging in the treatment of acute unstable syndesmotic injuries.** *J Bone Joint Surg Am* 94 (15), 1386-1390, doi: 10.2106/JBJS.K.01122.
- Franke, J., von Recum, J., Suda, A. J., Vetter, S., Grutzner, P. A. und Wendl, K. (2014). **Predictors of a persistent dislocation after reduction of syndesmotic injuries detected with intraoperative three-dimensional imaging.** *Foot Ankle Int* 35 (12), 1323-1328, doi: 10.1177/1071100714549047.
- Franke, J., von Recum, J., Wendl, K. und Grutzner, P. A. (2013). **[Intraoperative 3-dimensional imaging - beneficial or necessary?].** *Unfallchirurg* 116 (2), 185-190, doi: 10.1007/s00113-013-2359-4.
- Franke, J., Wendl, K., Suda, A. J., Giese, T., Grutzner, P. A. und von Recum, J. (2014). **Intraoperative three-dimensional imaging in the treatment of calcaneal fractures.** *J Bone Joint Surg Am* 96 (9), e72, doi: 10.2106/JBJS.L.01220.

- Freund, J. E., Stetts, D. M., Oostindie, A., Shepherd, J. und Vallabhajosula, S. (2019). **Lower Quarter Y-Balance Test in healthy women 50-79 years old.** *J Women Aging* 31 (6), 475-491, doi: 10.1080/08952841.2018.1510248.
- Gardner, M. J., Demetrakopoulos, D., Briggs, S. M., Helfet, D. L. und Lorich, D. G. (2006). **Malreduction of the tibiofibular syndesmosis in ankle fractures.** *Foot Ankle Int* 27 (10), 788-792.
- Gianola, S., Castellini, G., Stucovitz, E., Nardo, A. und Banfi, G. (2017). **Single leg squat performance in physically and non-physically active individuals: a cross-sectional study.** *BMC Musculoskelet Disord* 18 (1), 299, doi: 10.1186/s12891-017-1660-8.
- Gomes, J., Neto, T., Vaz, J. R., Schoenfeld, B. J. und Freitas, S. R. (2020). **Is there a relationship between back squat depth, ankle flexibility, and Achilles tendon stiffness?** *Sports Biomech*, 1-14, doi: 10.1080/14763141.2019.1690569.
- Goost, H., Wimmer, M. D., Barg, A., Kabir, K., Valderrabano, V. und Burger, C. (2014). **Fractures of the ankle joint: investigation and treatment options.** *Dtsch Arztebl Int* 111 (21), 377-388, doi: 10.3238/arztebl.2014.0377.
- Grass, R. (2000). **[Injuries of the inferior tibiofibular syndesmosis].** *Unfallchirurg* 103 (7), 519.
- Gribble, P. A., Hertel, J. und Plisky, P. (2012). **Using the Star Excursion Balance Test to assess dynamic postural-control deficits and outcomes in lower extremity injury: a literature and systematic review.** *J Athl Train* 47 (3), 339-357, doi: 10.4085/1062-6050-47.3.08.
- Halasi, T., Kynsburg, A., Tallay, A. und Berkes, I. (2004). **Development of a new activity score for the evaluation of ankle instability.** *Am J Sports Med* 32 (4), 899-908, doi: 10.1177/0363546503262181.
- Hancock, M. J., Herbert, R. D. und Stewart, M. (2005). **Prediction of outcome after ankle fracture.** *J Orthop Sports Phys Ther* 35 (12), 786-792, doi: 10.2519/jospt.2005.35.12.786.
- Hegedus, E. J., McDonough, S. M., Bleakley, C., Baxter, D. und Cook, C. E. (2015). **Clinician-friendly lower extremity physical performance tests in athletes: a systematic review of measurement properties and correlation with injury. Part 2--the tests for the hip, thigh, foot and ankle including the star excursion balance test.** *Br J Sports Med* 49 (10), 649-656, doi: 10.1136/bjsports-2014-094341.
- Hemmerich, A., Brown, H., Smith, S., Marthandam, S. S. und Wyss, U. P. (2006). **Hip, knee, and ankle kinematics of high range of motion activities of daily living.** *J Orthop Res* 24 (4), 770-781, doi: 10.1002/jor.20114.
- Hertel, J. (2002). **Functional Anatomy, Pathomechanics, and Pathophysiology of Lateral Ankle Instability.** *J Athl Train* 37 (4), 364-375.

- Hertel, J., Braham, R. A., Hale, S. A. und Olmsted-Kramer, L. C. (2006). **Simplifying the star excursion balance test: analyses of subjects with and without chronic ankle instability.** *J Orthop Sports Phys Ther* 36 (3), 131-137, doi: 10.2519/jospt.2006.36.3.131.
- Hsu, C. Y., Tsai, Y. S., Yau, C. S., Shie, H. H. und Wu, C. M. (2019). **Differences in gait and trunk movement between patients after ankle fracture and healthy subjects.** *Biomed Eng Online* 18 (1), 26, doi: 10.1186/s12938-019-0644-3.
- Huang, P. Y., Lin, C. F., Kuo, L. C. und Liao, J. C. (2011). **Foot pressure and center of pressure in athletes with ankle instability during lateral shuffling and running gait.** *Scand J Med Sci Sports* 21 (6), e461-467, doi: 10.1111/j.1600-0838.2011.01367.x.
- Itoh, H., Takiguchi, K., Shibata, Y., Okubo, S., Yoshiya, S. und Kuroda, R. (2016). **Correlation between hip function and knee kinematics evaluated by three-dimensional motion analysis during lateral and medial side-hopping.** *J Phys Ther Sci* 28 (9), 2461-2467, doi: 10.1589/jpts.28.2461.
- Janda, V. (2009). **Manuelle Muskelfunktionsdiagnostik**, Aufl. 4, Urban&Fischer, München.
- Jensen, S. L., Andresen, B. K., Mencke, S. und Nielsen, P. T. (1998). **Epidemiology of ankle fractures. A prospective population-based study of 212 cases in Aalborg, Denmark.** *Acta Orthop Scand* 69 (1), 48-50, doi: 10.3109/17453679809002356.
- Kendoff, D., Citak, M., Gardner, M. J., Stubig, T., Krettek, C. und Hufner, T. (2009). **Intraoperative 3D imaging: value and consequences in 248 cases.** *J Trauma* 66 (1), 232-238, doi: 10.1097/TA.0b013e31815ede5d.
- Kim, S. H., Kwon, O. Y., Park, K. N., Jeon, I. C. und Weon, J. H. (2015). **Lower extremity strength and the range of motion in relation to squat depth.** *J Hum Kinet* 45, 59-69, doi: 10.1515/hukin-2015-0007.
- Kimmel, L. A., Edwards, E. R., Liew, S. M., Oldmeadow, L. B., Webb, M. J. und Holland, A. E. (2012). **Rest easy? Is bed rest really necessary after surgical repair of an ankle fracture?** *Injury* 43 (6), 766-771, doi: 10.1016/j.injury.2011.08.031.
- Klöpfer-Krämer, I. und Augat, P. (2015). **Instrumentelle Ganganalyse.** *Trauma Berufskrankheit* 17, 10-14.
- Koldenhoven, R. M., Feger, M. A., Fraser, J. J. und Hertel, J. (2018). **Variability in center of pressure position and muscle activation during walking with chronic ankle instability.** *J Electromyogr Kinesiol* 38, 155-161, doi: 10.1016/j.jelekin.2017.12.003.



- Kros, W., Keijsers, N. L. W., van Ochten, J. M., Bierma-Zeinstra, S. M. A. und van Middelkoop, M. (2016). **Center of pressure during stance and gait in subjects with or without persistent complaints after a lateral ankle sprain.** *Gait Posture* 48, 24-29, doi: 10.1016/j.gaitpost.2016.04.022.
- Kunugi, S., Masunari, A., Koumura, T., Fujimoto, A., Yoshida, N. und Miyakawa, S. (2018). **Altered lower limb kinematics and muscle activities in soccer players with chronic ankle instability.** *Phys Ther Sport* 34, 28-35, doi: 10.1016/j.ptsp.2018.08.003.
- Lamontagne, M., Brisson, N., Kennedy, M. J. und Beaulé, P. E. (2011). **Preoperative and postoperative lower-extremity joint and pelvic kinematics during maximal squatting of patients with cam femoro-acetabular impingement.** *J Bone Joint Surg Am* 93 Suppl 2, 40-45, doi: 10.2106/JBJS.J.01809.
- Lessl, E. (2012) **Bewegungsanalytische Untersuchungen nach Sprunggelenksfraktur mit dem Heidelberger Fußmodell.** Medizinische Dissertation, Universität Heidelberg.
- Lin, C. F., Gross, M. L. und Weinhold, P. (2006). **Ankle syndesmosis injuries: anatomy, biomechanics, mechanism of injury, and clinical guidelines for diagnosis and intervention.** *J Orthop Sports Phys Ther* 36 (6), 372-384, doi: 10.2519/jospt.2006.2195.
- Lin, C. W., Moseley, A. M., Herbert, R. D. und Refshauge, K. M. (2009). **Pain and dorsiflexion range of motion predict short- and medium-term activity limitation in people receiving physiotherapy intervention after ankle fracture: an observational study.** *Aust J Physiother* 55 (1), 31-37, doi: 10.1016/s0004-9514(09)70058-3.
- Linens, S. W., Ross, S. E., Arnold, B. L., Gayle, R. und Pidcoe, P. (2014). **Postural-stability tests that identify individuals with chronic ankle instability.** *J Athl Train* 49 (1), 15-23, doi: 10.4085/1062-6050-48.6.09.
- Liu, Q., Zhao, G., Yu, B., Ma, J., Li, Z. und Zhang, K. (2016). **Effects of inferior tibiofibular syndesmosis injury and screw stabilization on motion of the ankle: a finite element study.** *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 24 (4), 1228-1235, doi: 10.1007/s00167-014-3320-y.
- Losch, A., Meybohm, P., Schmalz, T., Fuchs, M., Vamvakakis, F., Dresing, K., Blumentritt, S. und Stürmer, K. M. (2002). **[Functional results of dynamic gait analysis after 1 year of hobby-athletes with a surgically treated ankle fracture].** *Sportverletz Sportschaden* 16 (3), 101-107, doi: 10.1055/s-2002-34750.
- Ludwig, O. (2015). **Ganganalyse in der Praxis. Anwendung in Prävention, Therapie und Versorgung,** 2. Aufl., C. Maurer, Geislingen.
- Luxenhofer, M., Beisemann, N., Schnetzke, M., Vetter, S. Y., Grutzner, P. A., Franke, J. und Keil, H. (2020). **Diagnostic accuracy of intraoperative CT-imaging in complex articular fractures - a cadaveric study.** *Sci Rep* 10 (1), 4530, doi: 10.1038/s41598-020-61267-w.

- Magan, A., Golano, P., Maffulli, N. und Khanduja, V. (2014). **Evaluation and management of injuries of the tibiofibular syndesmosis**. *Br Med Bull* 111 (1), 101-115, doi: 10.1093/bmb/ldu020.
- Maki, B. E., Holliday, P. J. und Topper, A. K. (1994). **A prospective study of postural balance and risk of falling in an ambulatory and independent elderly population**. *J Gerontol* 49 (2), M72-84, doi: 10.1093/geronj/49.2.m72.
- Markstrom, J. L., Schelin, L. und Hager, C. K. (2018). **A novel standardised side hop test reliably evaluates landing mechanics for anterior cruciate ligament reconstructed persons and controls**. *Sports Biomech*, 1-17, doi: 10.1080/14763141.2018.1538385.
- McCann, R. S., Crossett, I. D., Terada, M., Kosik, K. B., Bolding, B. A. und Gribble, P. A. (2017). **Hip strength and star excursion balance test deficits of patients with chronic ankle instability**. *J Sci Med Sport* 20 (11), 992-996, doi: 10.1016/j.jsams.2017.05.005.
- Medlexi.de (2020) **Gangzyklus**. URL: <https://medlexi.de/Gangzyklus> [Stand:17.08.2020].
- Mettler, A., Chinn, L., Saliba, S. A., McKeon, P. O. und Hertel, J. (2015). **Balance training and center-of-pressure location in participants with chronic ankle instability**. *J Athl Train* 50 (4), 343-349, doi: 10.4085/1062-6050-49.3.94.
- Miller, T. L. und Skalak, T. (2014). **Evaluation and treatment recommendations for acute injuries to the ankle syndesmosis without associated fracture**. *Sports Med* 44 (2), 179-188, doi: 10.1007/s40279-013-0106-1.
- Mittlmeier, T. und Rosenbaum, D. (2005). **[Clinical gait analysis]**. *Unfallchirurg* 108 (8), 614-629, doi: 10.1007/s00113-005-0978-0.
- Nilsson, G., Ageberg, E., Ekdahl, C. und Eneroth, M. (2006). **Balance in single-limb stance after surgically treated ankle fractures: a 14-month follow-up**. *BMC Musculoskelet Disord* 7, 35, doi: 10.1186/1471-2474-7-35.
- Nilsson, G., Jonsson, K., Ekdahl, C. und Eneroth, M. (2007). **Outcome and quality of life after surgically treated ankle fractures in patients 65 years or older**. *BMC Musculoskelet Disord* 8, 127, doi: 10.1186/1471-2474-8-127.
- Northeast, L., Gautrey, C. N., Bottoms, L., Hughes, G., Mitchell, A. C. S. und Greenhalgh, A. (2018). **Full gait cycle analysis of lower limb and trunk kinematics and muscle activations during walking in participants with and without ankle instability**. *Gait Posture* 64, 114-118, doi: 10.1016/j.gaitpost.2018.06.001.
- O'Connor, S., McCaffrey, N., Whyte, E. F., Fop, M., Murphy, B. und Moran, K. (2020). **Can the Y balance test identify those at risk of contact or non-contact lower extremity injury in adolescent and collegiate Gaelic games?** *J Sci Med Sport* 23 (10), 943-948, doi: 10.1016/j.jsams.2020.04.017.

- O'Hara, N. N., Isaac, M., Slobogean, G. P. und Klazinga, N. S. (2020). **The socioeconomic impact of orthopaedic trauma: A systematic review and meta-analysis.** PLoS One 15 (1), e0227907, doi: 10.1371/journal.pone.0227907.
- Obrebsky, W. T., Dirschl, D. R., Crowther, J. D., Craig, W. L., 3rd, Driver, R. E. und LeCroy, C. M. (2002). **Change over time of SF-36 functional outcomes for operatively treated unstable ankle fractures.** J Orthop Trauma 16 (1), 30-33, doi: 10.1097/00005131-200201000-00007.
- Olerud, C. und Molander, H. (1984). **A scoring scale for symptom evaluation after ankle fracture.** Arch Orthop Trauma Surg 103 (3), 190-194, doi: 10.1007/BF00435553.
- Oppelt, K., Hogan, A., Stief, F., Grutzner, P. A. und Trinler, U. (2020). **Movement Analysis in Orthopedics and Trauma Surgery - Measurement Systems and Clinical Applications.** Z Orthop Unfall 158 (3), 304-317, doi: 10.1055/a-0873-1557.
- Pairot de Fontenay, B., Argaud, S., Blache, Y. und Monteil, K. (2015). **Contralateral limb deficit seven months after ACL-reconstruction: an analysis of single-leg hop tests.** Knee 22 (4), 309-312, doi: 10.1016/j.knee.2015.04.012.
- Panero, E., Gastaldi, L. und Rapp, W. (2017). **Two-Segment Foot Model for the Biomechanical Analysis of Squat.** J Healthc Eng 2017, 9652948, doi: 10.1155/2017/9652948.
- Park, Y. H., Park, S. H., Kim, S. H., Choi, G. W. und Kim, H. J. (2019). **Relationship Between Isokinetic Muscle Strength and Functional Tests in Chronic Ankle Instability.** J Foot Ankle Surg 58 (6), 1187-1191, doi: 10.1053/j.jfas.2019.04.005.
- Patrick, J. (2003). **The Case for gait analysis as part of the management of incomplete spinal cord injury.** Spinal Cord 41, 479-482.
- Pope, M., Chinn, L., Mullineaux, D., McKeon, P. O., Drewes, L. und Hertel, J. (2011). **Spatial postural control alterations with chronic ankle instability.** Gait Posture 34 (2), 154-158, doi: 10.1016/j.gaitpost.2011.04.012.
- Prieto, T. E., Myklebust, J. B., Hoffmann, R. G., Lovett, E. G. und Myklebust, B. M. (1996). **Measures of postural steadiness: differences between healthy young and elderly adults.** IEEE Trans Biomed Eng 43 (9), 956-966, doi: 10.1109/10.532130.
- Rammelt, S., Grass, R. und Zwipp, H. (2008). **[Ankle fractures].** Unfallchirurg 111 (6), 421-438, doi: 10.1007/s00113-008-1460-6.
- Rammelt, S. G., R.; Biewener, A.; Zwipp, H. (2004). **Anatomie, Biomechanik und Klassifikation der Sprunggelenkfrakturen.** Trauma Berufskrankheit (October 2004), doi: <https://doi.org/10.1007/s10039-003-0804-2>.

- Ramsey, P. L. und Hamilton, W. (1976). **Changes in tibiotalar area of contact caused by lateral talar shift.** *J Bone Joint Surg Am* 58 (3), 356-357.
- Reinbolt, J. A., Schutte, J. F., Fregly, B. J., Koh, B. I., Haftka, R. T., George, A. D. und Mitchell, K. H. (2005). **Determination of patient-specific multi-joint kinematic models through two-level optimization.** *J Biomech* 38 (3), 621-626, doi: 10.1016/j.jbiomech.2004.03.031.
- Richter, M. und Zech, S. (2009). **Intraoperative 3-dimensional imaging in foot and ankle trauma-experience with a second-generation device (ARCADIS-3D).** *J Orthop Trauma* 23 (3), 213-220, doi: 10.1097/BOT.0b013e31819867f6.
- Rosen, A. B., Needle, A. R. und Ko, J. (2019). **Ability of Functional Performance Tests to Identify Individuals With Chronic Ankle Instability: A Systematic Review With Meta-Analysis.** *Clin J Sport Med* 29 (6), 509-522, doi: 10.1097/JSM.0000000000000535.
- Rosenbaum, D. (1999). **Pedobarographie in der orthopädischen Praxis**, Aufl. 39, Steinkopff, Heidelberg.
- Roth, K. und Willimczik, K. (1999). **Bewegungswissenschaft**, 1. Aufl., Rowohlt Taschenbuch, Hamburg, S. 21-36.
- Sagi, H. C., Shah, A. R. und Sanders, R. W. (2012). **The functional consequence of syndesmotic joint malreduction at a minimum 2-year follow-up.** *J Orthop Trauma* 26 (7), 439-443, doi: 10.1097/BOT.0b013e31822a526a.
- Salas-Gomez, D., Fernandez-Gorgojo, M., Sanchez-Juan, P., Bercero, E. L., Isabel Perez-Nunez, M. und Barbado, D. (2020). **Quantifying balance deficit in people with ankle fracture six months after surgical intervention through the Y-Balance test.** *Gait Posture* 95, 249-255 ePub, doi: 10.1016/j.gaitpost.2020.10.037.
- Schmidmaier, G., Ferbert, T., Meenen, N., Schütz, M. (2015). **S2-e Leitlinie Sprunggelenkfraktur.** URL: <https://docplayer.org/38368491-S2e-leitlinie-012-003-sprunggelenkfraktur-aktueller-stand-05-2015-awmf-register-nr-012-003-klasse-s2e.html> [Stand:20.11.2019. Hinweis: Diese Leitlinie wird aktuell überarbeitet].
- Schmidt, R., Meyer-Wölbert, B., Röderer, M., Becker, H. P., Benesch, S., Fels, T. und Gerngroß, H. (1999). **Dynamische Ganganalyse - Mittel zur Qualitätssicherung nach operativ versorgten Sprunggelenkfrakturen.** *Der Unfallchirurg* (102), 110-114.
- Schnetzke, M., Vetter, S. Y., Beisemann, N., Swartman, B., Grutzner, P. A. und Franke, J. (2016). **Management of syndesmotic injuries: What is the evidence?** *World J Orthop* 7 (11), 718-725, doi: 10.5312/wjo.v7.i11.718.
- Schoenfeld, B. J. (2010). **Squatting kinematics and kinetics and their application to exercise performance.** *J Strength Cond Res* 24 (12), 3497-3506, doi: 10.1519/JSC.0b013e3181bac2d7.

- Schuh, R., Hofstaetter, J., Krismer, M., Bevoni, R., Windhager, R. und Trnka, H. J. (2012). **Total ankle arthroplasty versus ankle arthrodesis. Comparison of sports, recreational activities and functional outcome.** *Int Orthop* 36 (6), 1207-1214, doi: 10.1007/s00264-011-1455-8.
- Schulte, E., Schumacher, U. und Schünke, M. (2018). **PROMETHEUS LernAtlas der Anatomie, Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem.,** 5. Aufl., Thieme, 262-265.
- Segal, G., Elbaz, A., Parsi, A., Heller, Z., Palmanovich, E., Nyska, M., Feldbrin, Z. und Kish, B. (2014). **Clinical outcomes following ankle fracture: a cross-sectional observational study.** *J Foot Ankle Res* 7 (1), 50, doi: 10.1186/s13047-014-0050-9.
- Sint Jan, S. V. (2007). **Color Atlas of Skeletal Landmark Definitions. Guidelines for Reproducible Manual and Virtual Palpations,** Churchill Livingstone, Edinburgh. Seite?
- Skopljak, A., Muftic, M., Sukalo, A., Masic, I. und Zunic, L. (2014). **Pedobarography in diagnosis and clinical application.** *Acta Inform Med* 22 (6), 374-378, doi: 10.5455/aim.2014.22.374-378.
- Sman, A. D., Hiller, C. E., Rae, K., Linklater, J., Black, D. A. und Refshauge, K. M. (2014). **Prognosis of ankle syndesmosis injury.** *Med Sci Sports Exerc* 46 (4), 671-677, doi: 10.1249/MSS.0000000000000151.
- Sman, A. D., Hiller, C. E., Rae, K., Linklater, J., Morellato, J., Trist, N., Nicholson, L. L., Black, D. A. und Refshauge, K. M. (2014). **Predictive factors for ankle syndesmosis injury in football players: a prospective study.** *J Sci Med Sport* 17 (6), 586-590, doi: 10.1016/j.jsams.2013.12.009.
- Smeeing, D. P., Houwert, R. M., Briet, J. P., Kelder, J. C., Segers, M. J., Verleisdonk, E. J., Leenen, L. P. und Hietbrink, F. (2015). **Weight-bearing and mobilization in the postoperative care of ankle fractures: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials and cohort studies.** *PLoS One* 10 (2), e0118320, doi: 10.1371/journal.pone.0118320.
- Stebbins, J., Harrington, M., Thompson, N., Zavatsky, A. und Theologis, T. (2006). **Repeatability of a model for measuring multi-segment foot kinematics in children.** *Gait Posture* 23 (4), 401-410, doi: 10.1016/j.gaitpost.2005.03.002.
- Swinton, P. A., Lloyd, R., Keogh, J. W., Agouris, I. und Stewart, A. D. (2012). **A biomechanical comparison of the traditional squat, powerlifting squat, and box squat.** *J Strength Cond Res* 26 (7), 1805-1816, doi: 10.1519/JSC.0b013e3182577067.
- Szczerbik, E. und Kalinowska, M. (2011). **The influence of knee marker placement error on evaluation of gait kinematic parameters.** *Acta Bioeng Biomech* 13 (3), 43-46.
- Tang Qian Ying, C., Lai Wei Hong, S., Lee, B. H. und Thevendran, G. (2016). **Return to physical activity after gastrocnemius recession.** *World J Orthop* 7 (11), 746-751, doi: 10.5312/wjo.v7.i11.746.

- Tegner, Y. und Lysholm, J. (1985). **Rating systems in the evaluation of knee ligament injuries**. Clin Orthop Relat Res (198), 43-49.
- Teramoto, A., Kura, H., Uchiyama, E., Suzuki, D. und Yamashita, T. (2008). **Three-dimensional analysis of ankle instability after tibiofibular syndesmosis injuries: a biomechanical experimental study**. Am J Sports Med 36 (2), 348-352, doi: 10.1177/0363546507308235.
- The New Potato (2021). **Pistol Squats**. URL: <http://www.thenewpotato.com/2016/01/21/quick-leg-workout-at-home/> [Stand:16.04.2021].
- Tunturi, T., Kemppainen, K., Patiala, H., Suokas, M., Tamminen, O. und Rokkanen, P. (1983). **Importance of anatomical reduction for subjective recovery after ankle fracture**. Acta Orthop Scand 54 (4), 641-647.
- van der Straaten, R., Bruijnes, A., Vanwanseele, B., Jonkers, I., De Baets, L. und Timmermans, A. (2019). **Reliability and Agreement of 3D Trunk and Lower Extremity Movement Analysis by Means of Inertial Sensor Technology for Unipodal and Bipodal Tasks**. Sensors 19 (1), doi: 10.3390/s19010141.
- van Hove, S., Houben, M., Verbruggen, J., Willems, P., Meijer, K. und Poeze, M. (2019). **Gait analysis related to functional outcome in patients operated for ankle fractures**. J Orthop Res 37 (7), 1658-1666, doi: 10.1002/jor.24071.
- Velamed GmbH (2020). **Kombination von Druckmessplatten**. URL: <https://www.velamed.com/produkte/druckmess-platten-sohlen/druckmess-platten> [Stand:16.09.2020].
- Verwaltungs-Berufsgenossenschaft (VBG) (2021). **Side-Hop**. URL: [https://www.vbg.de/DE/3\\_Praevention\\_und\\_Arbeitshilfen/1\\_Branchen/11\\_Sport/04\\_EISHO\\_CKEY/2\\_Diagnostik\\_Versorgung/01\\_Funktionelle\\_Testes\\_EH/04\\_Beweglichkeit/Schwerpunkt\\_Beweglichkeit\\_node.html](https://www.vbg.de/DE/3_Praevention_und_Arbeitshilfen/1_Branchen/11_Sport/04_EISHO_CKEY/2_Diagnostik_Versorgung/01_Funktionelle_Testes_EH/04_Beweglichkeit/Schwerpunkt_Beweglichkeit_node.html) [Stand:16.04.2021].
- Vetter, S. Y., Euler, F., von Recum, J., Wendl, K., Grutzner, P. A. und Franke, J. (2016). **Impact of Intraoperative Cone Beam Computed Tomography on Reduction Quality and Implant Position in Treatment of Tibial Plafond Fractures**. Foot Ankle Int 37 (9), 977-982, doi: 10.1177/1071100716650532.
- Vetter, S. Y., Euler, J., Beisemann, N., Swartman, B., Keil, H., Grutzner, P. A. und Franke, J. (2021). **Validation of radiological reduction criteria with intraoperative cone beam CT in unstable syndesmotic injuries**. Eur J Trauma Emerg Surg 47(4), 897-903, doi: 10.1007/s00068-020-01299-z.
- Vioreanu, M., Dudeney, S., Hurson, B., Kelly, E., O'Rourke, K. und Quinlan, W. (2007). **Early mobilization in a removable cast compared with immobilization in a cast after operative treatment of ankle fractures: a prospective randomized study**. Foot Ankle Int 28 (1), 13-19, doi: 10.3113/FAI.2007.0003.

- von Recum, J. M., H.; Wendl, K (2006). **Frische Verletzung des OSG** Trauma Berufskrankheit 8, 14-19.
- Walsh, A. S., Sinclair, V., Watmough, P. und Henderson, A. A. (2018). **Ankle fractures: Getting it right first time**. Foot 34, 48-52, doi: 10.1016/j.foot.2017.11.013.
- Wang, R., Thur, C. K., Gutierrez-Farewik, E. M., Wretenberg, P. und Brostrom, E. (2010). **One year follow-up after operative ankle fractures: a prospective gait analysis study with a multi-segment foot model**. Gait Posture 31 (2), 234-240, doi: 10.1016/j.gaitpost.2009.10.012.
- Winter, D. A. (1987). **The biomechanics and motor control of human gait**. University of Waterloo Press, Waterloo.
- Wirth, C. J., Zichner, Ludwig (2002). **Orthopädie und orthopädische Chirurgie: Fuß**, Thieme, Stuttgart. S. 23-25.
- Wülker, N. (2015). **Orthopädie und Unfallchirurgie**, 3 Aufl., Thieme.
- Wurm, M., Wiewiorski, M., Gösele, A., Valderrabano, V. (2016). **Die klinische Untersuchung von Fuß und Sprunggelenk**. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin 67, 111-116.
- Wyndow, N., De Jong, A., Rial, K., Tucker, K., Collins, N., Vicenzino, B., Russell, T. und Crossley, K. (2016). **The relationship of foot and ankle mobility to the frontal plane projection angle in asymptomatic adults**. J Foot Ankle Res 9, 3, doi: 10.1186/s13047-016-0134-9.
- Yarboro, S. R., Richter, P. H. und Kahler, D. M. (2017). **The evolution of 3D imaging in orthopedic trauma care**. Unfallchirurg 120 (Suppl 1), 5-9, doi: 10.1007/s00113-016-0226-9.
- Yoshida, M., Aoki, N., Taniguchi, K., Yoshida, M., Katayose, M. (2018). **Kinematic Analysis of the Ankle Joint on the Side Hop Test in Subjects with Ankle Sprains**. Translational Sports Medicine 1 (6), doi: 10.1002/tsm2.44.
- Yoshida, M., Taniguchi, K. und Katayose, M. (2011). **Analysis of muscle activity and ankle joint movement during the side-hop test**. J Strength Cond Res 25 (8), 2255-2264, doi: 10.1519/JSC.0b013e3181ec86d5.
- Yousefi, M., Sadeghi, H., Ilbiegi, S., Ebrahimabadi, Z., Kakavand, M. und Wikstrom, E. A. (2020). **Center of pressure excursion and muscle activation during gait initiation in individuals with and without chronic ankle instability**. J Biomech 108, 109904, doi: 10.1016/j.jbiomech.2020.109904.
- Zalavras, C. und Thordarson, D. (2007). **Ankle syndesmotric injury**. J Am Acad Orthop Surg 15 (6), 330-339.

## 11 ANHANG

### A. Trauma-Score nach Olerud/Molander (Olerud und Molander 1984)

Patient:	Geburtsdatum:	Datum:	Ergebnis:
<b>Pain</b>	None	25	
	While walking on uneven surface	20	
	While walking on even surface outdoors	10	
	While walking indoors	5	
	Constant and severe	0	
<b>Stiffness</b>	None	10	
	Stiffness	0	
<b>Swelling</b>	None	10	
	Only evenings	5	
	Constant	0	
<b>Jumping</b>	Possible	5	
	Impossible	0	
<b>Supports</b>	No support	10	
	Taping, wrapping	5	
	Stick or crutch	0	
<b>Work, activities of daily life</b>	Same as before injury	20	
	Loss of tempo	15	
	Change to a simpler job/part time	10	
	Severely impaired work capacity	0	
<b>Running</b>	possible	5	
	impossible	0	
<b>Stair climbing</b>	no problems	10	
	impaired	5	
	impossible	0	
<b>Squatting</b>	no problems	5	
	impossible	0	
<b>Results</b>	91-100 points		<b>excellent</b>
	61-90		<b>good</b>
	31-60		<b>fair</b>
	0-30		<b>poor</b>



## B. Ankle Activity Score nach Halasi (Halasi et al. 2004)

TABLE 3  
Ankle Activity Score

Category	Sports and Activities	Ankle Activity Score <sup>a</sup>			Category	Sports and Activities	Ankle Activity Score <sup>a</sup>				
		T	C	R			T	C	R		
10	American football	10	9	8	5	Diving	5	5	4		
	Basketball	10	9	8		Scuba diving	5	5	4		
	Gymnastics	10	9	8		Skating, in-line skating	5	5	4		
	Handball	10	9	8		Track and field: track events	5	5	4		
	Rugby	10	9	8		Triathlon	5	5	4		
	Soccer	10	9	8		Weightlifting, body building	5	5	4		
9	Hockey	9	8	7	All competitive sports of categories 4 and 3 with seasonal conditioning	5					
	Korfball	9	8	7	Heavy physical work	5					
	Martial arts: judo, karate, kung fu, taekwondo	9	8	7	4	Alpine skiing and snowboarding	4	4	4		
	Orienteering	9	8	7		Bowling/curling	4	4	4		
	Rhythmic gymnastics	9	8	7		Golf	4	4	4		
	Volleyball	9	8	7		Mountain biking/bmx	4	4	4		
8	Boxing	8	7	6		Power lifting	4	4	4		
	Freestyle snowboarding	8	7	6		Sailing	4	4	4		
	Ice hockey	8	7	6	Physical work	4					
	Tennis	8	7	6	3	Cycling	3	3	3		
	Wrestling	8	7	6		Equestrian	3	3	3		
7	Aerobics, fitness	7	6	5		Motorsports, technical sports	3	3	3		
	Badminton	7	6	5		Rowing, kayaking	3	3	3		
	Baseball	7	6	5		Shooting, archery	3	3	3		
	Cross-country running	7	6	5	Water polo and swimming	3	3	3			
	Modern pentathlon	7	6	5	Able to walk on any uneven ground	3					
	Squash	7	6	5	2	No sports, everyday activities not limited	2				
	Surfing, windsurfing	7	6	5		1	Able to walk on even ground, but everyday activities limited	1			
	Table tennis	7	6	5			0	Unable to walk, disabled because of ankle problems	0		
	Track and field: field events	7	6	5							
	Water skiing	7	6	5							
6	Dancing	6	5	4							
	Fencing	6	5	4							
	Floorball	6	5	4							
	Mountain and hill climbing	6	5	4							
	Nordic skiing	6	5	4							
	Parachuting	6	5	4							
	Softball	6	5	4							
	Special professions and working activities <sup>b</sup>	6									

<sup>a</sup>T, top level (international elite, professional, national team, or first division); C, lower competitive levels; R, recreational level (participation should be considered only if it exceeds 50 hours per year).

<sup>b</sup>Special professions include ballet dancer, professional soldier, special rescue worker, stuntman, and so forth.

## C. Einwilligungserklärung

### **"Validierung von Repositionskriterien der operativen Versorgung von akuten Syndesmoseverletzungen mittels instrumenteller 3D-Ganganalyse"**

durchgeführt von den Leitern des Motorik-Labors der BG Klinik Ludwigshafen,  
Dr. med. Aidan Hogan und Dr. phil. Ursula Trinler  
sowie Laura Blaschke, Cand. med.

#### **Einwilligungserklärung**

„Ich erkläre mich bereit an der o. g. Studie freiwillig teilzunehmen. Ich bin in einem persönlichen Gespräch ausführlich und verständlich über Wesen, Bedeutung, Risiken und Tragweite der Studie aufgeklärt worden. Ich hatte die Gelegenheit zu einem Beratungsgespräch. Alle meine Fragen wurden zufriedenstellend beantwortet, ich kann jederzeit neue Fragen stellen. Ich habe darüber hinaus den Text der Studienaufklärung gelesen und verstanden.

Ich hatte ausreichend Zeit, mich zu entscheiden. Mir ist bekannt, dass ich jederzeit und ohne Angabe von Gründen meine Einwilligung zur Teilnahme an der Studie zurückziehen kann (mündlich oder schriftlich), ohne dass mir daraus Nachteile entstehen.“

**Ich habe verstanden und bin damit einverstanden, dass Videoaufnahmen von mir gemacht werden, auf denen ich zu erkennen bin, alle meine studienbezogenen Gesundheitsdaten pseudoanonymisiert (d.h. kodiert ohne Angabe von Namen, Anschrift, Initialen oder Ähnliches) erhoben, auf Datenträgern gespeichert und vom Auftraggeber der Studie ausgewertet werden. Die Daten werden maximal zehn Jahre gespeichert und anschließend gelöscht.**

**Aufgenommene Videos sind nur vom Studienteam einzusehen. Die Weitergabe an Dritte einschließlich Publikation erfolgt ausschließlich in anonymer Form, das heißt, dass meine Daten nicht meiner Person zugeordnet werden können. Somit wird mein Gesicht auf Videos unkenntlich gemacht oder das Video so zugeschnitten, dass das Gesicht nicht zu erkennen ist.**

**Für den Fall, dass ich die Studienteilnahme widerrufe, werden meine bereits erhobenen personenbeziehbaren Daten zum frühestmöglichen Zeitpunkt gelöscht.**

Ein Exemplar der Studieninformation und Einwilligungserklärung habe ich erhalten, gelesen und verstanden.

*Ort, Datum, Unterschrift Patient / Proband*

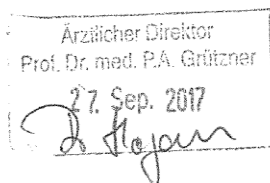
Ich habe das Aufklärungsgespräch geführt und die Einwilligung des Teilnehmers eingeholt.

*Ort, Datum, Name des aufklärenden Arztes in Druckbuchstaben und Unterschrift*

## D. Ethikvotum



- Ethik-Kommission -



### Landesärztekammer Rheinland-Pfalz

Körperschaft des Öffentlichen Rechts  
Postfach 29 26 · 55019 Mainz  
Deutschhausplatz 3 · 55116 Mainz  
Telefon (06131) 28822-63 /-64 /-65 /-67  
Telefax (06131) 28822-66

Landesärztekammer Rhld.-Pf. · Postfach 29 26 · 55019 Mainz

BG Klinik  
Berufsgenossenschaftliche Unfallklinik Ludwigshafen  
Professor Dr. Paul- Alfred Grützner  
Klinik für Unfallchirurgie  
Ludwig-Guttman-Str. 13  
67071 Ludwigshafen

Ansprechpartner:  
Frau Pierzina, Frau Lermen,  
Frau Rademacher, Frau Schleith

Telefon:  
-63 (Pie), -64 (Ler), -65 (Rd), -67 (GS)

E-Mail: [ethik-kommission@laek-rip.de](mailto:ethik-kommission@laek-rip.de)

Bitte bei jedem Schriftwechsel die  
Bearbeitungsnummer angeben!



Mainz, den 26.09.2017 / Ler

Antrag (Klinische Forschung/mono.) Herr Prof. Dr. GRÜTZNER, BG Unfallklinik, Ludwigshafen, vom 22.06.2017, Eingang 03.07.2017:

"Validierung von Repositionskriterien der operativen Versorgung von akuten Syndesmosenverletzungen mittels instrumenteller 3D-Bewegungsanalyse"

**Bearbeitungs-Nr. 837.304.17 (11138)**

Sehr geehrte Damen und Herren,

die Ethik-Kommission bei der Landesärztekammer Rheinland-Pfalz hat in ihrer Sitzung am 26.07.2017 über Ihren Antrag beraten und folgenden Beschluss gefasst:

Auf der Grundlage der zur Beratung vorgelegten Unterlagen sowie der durch Ihr Schreiben vom 12.09.2017 nachgereichten Dokumente bestehen nach dem gegenwärtigen Stand keine berufsethischen und berufsrechtlichen Bedenken gegen die Durchführung der geplanten Studie. Sie erhalten damit ein zustimmendes Votum.

Die Ethik-Kommission geht jedoch davon aus, dass Sie folgende Hinweise beachten:

1. Die nachgereichten Angaben werden so verstanden, dass das mündliche Aufklärungsgespräch erst am Untersuchungstag stattfindet. Hier ist eine ausreichende Bedenkzeit sicherzustellen, d.h. die Patienten sollten darauf hingewiesen werden, dass auf Wunsch auch ein zweiter Termin zur Vorstellung im Motoriklabor vereinbart werden kann, wenn noch Bedenkzeit benötigt wird.
2. Die Angaben zum Datenschutz sollten noch einmal überprüft und in allen Dokumenten in Übereinstimmung gebracht werden. Beispielsweise wird im Studienprotokoll auf Seite 12 (Punkt 3) eine *maximale* Speicherdauer von 10 Jahren angegeben, dies sollte auch in Patienteninformation und Einwilligungserklärung übereinstimmend dargestellt werden (statt *mindestens* 10 Jahre). Laut Patienteninformation können die Patienten bei Widerruf entscheiden, ob sie mit der weiteren Auswertung der Daten

F:\Ethik\Korrespondenz\11138\1b\_11138\_2017\_9\_22\_11\_20.doc

Deutsche Apotheker- und Ärztekbank – IBAN DE07 3006 0601 0001 2997 35 – BIC DAAEED33XXX  
Mainzer Volksbank eG – IBAN DE96 5519 0000 0654 2750 23 – BIC MVBMD55




einverstanden sind; in der Einwilligungserklärung steht dagegen, dass die Daten bei Widerruf umgehend gelöscht werden. Der Begriff „pseudoanonymisiert“ (letzte Seite der Patienteninformation) sollte korrigiert werden.  
Die Formulierung, dass eine Entschlüsselung „nur im Falle eines akuten Notfalls, der eine Intervention von ärztlicher oder gesetzlicher Seite erfordert“ erfolgt, passt für die konkrete Studie nicht.

Ferner gibt die Ethik-Kommission folgende allgemeine Hinweise:

Die Verantwortlichkeit des Studienarztes bleibt in vollem Umfang bestehen und wird durch diese Entscheidung nicht berührt. Die Entscheidung ergeht unter dem Vorbehalt gleichbleibender Gegebenheiten.

Der Ethik-Kommission sind alle schwerwiegenden Komplikationen in beurteilbarer Form unverzüglich mitzuteilen. Die Ethik-Kommission bittet darum, dass ihr das Ergebnis der Studie zur Kenntnis gebracht wird.

Mit freundlichen Grüßen

  
Prof. Dr. Krämer  
Stellv. Vorsitzende



Folgende Unterlagen haben zur Beratung vorgelegen:

Anschreiben vom 22.06.2017 (eingegangen am 03.07.2017) mit folgenden Anlagen:

Antragsformular vom 31.03.2017  
Wissenschaftliches Studienprotokoll vom 22.06.2017 Version 1.0  
Lebenslauf Prof. Dr. Grützner  
Einwilligungserklärung  
Fragebogen Einschätzung der Sprunggelenksfunktion  
Patienteninformationsschrift

Anschreiben vom 12.09.2017 (eingegangen am 19.09.2017) mit folgenden nachgereichten Anlagen:

Wissenschaftliches Studienprotokoll vom 05.09.2017 Version 1.1  
Qualisys EC Zertifikat vom 01.06.2016  
Einwilligungserklärung Version 1.1  
Patienteninformationsschrift Version 1.1



- Ethik-Kommission -

## Landesärztekammer Rheinland-Pfalz

Körperschaft des Öffentlichen Rechts  
Postfach 29 26 · 55019 Mainz  
Deutschhausplatz 3 · 55116 Mainz  
Telefon (06131) 28822-0 (Zentrale)  
Telefax (06131) 28822-66

**Ansprechpartner/in:**

**Frau Pierzina, Frau Lermen,  
Frau Rademacher, Frau Schleith**

**Telefon: - 63 (Pie), - 64 (Ler), - 65 (Rd), - 67 (GS)**

---

### 374. Sitzung der Ethik-Kommission vom 26.07.2017

#### Teilnehmerliste

**Prof. Dr. I. Krämer, stellv. Vorsitzende,**  
Direktorin der Apotheke der Universitätsmedizin, Mainz

**Prof. Dr. med. W. G. Dippold,**  
ehem. Chefarzt der Klinik für Innere Medizin (Gastroenterologie, Hämatologie und Onkologie), St. Vincenz u. Elisabeth Hospital, Mainz

**Prof. Dr. H. C. Dominick,**  
ehem. Leiter der Kinderklinik Ludwigshafen

**Prof. Dr. med. H.-J. Gilfrich,**  
ehem. Chefarzt der Med. Klinik des St. Katharinen-Krankenhauses Frankfurt/Main, Internist, Mitglied der Medizinischen Fakultät der Universität Mainz

**Prof. Dr. Th. Hitschold,**  
Chefarzt der Frauenklinik, Klinikum Worms

**PD Dr. med. M. Böckers,**  
Facharzt für Haut- und Geschlechtskrankheiten, Dermatohistologie, Allergologie, Nieder-Olm

**Frau Dipl.-Soz. M. Hahn,**  
ehem. Leiterin des Sozialdienstes der Universitätskliniken Mainz

**Herr M. Pfeiffer,**  
als Vertreter der Patientenorganisationen in Rheinland-Pfalz

**Frau M. Kern,**  
als Vertreterin der Patientenorganisationen in Rheinland-Pfalz

**Herr G. Meiborg,**  
Jurist

## E. Studienprotokoll

<b>Probanden Nr.:</b>	<b>Name:</b>	
<b>Unterschrift Mitarbeiter:</b>		
<b>1. Einladung des Probanden</b>	<b>Datum</b>	<b>Sonstiges</b>
Erste Einladung des Probanden und Information über Studie per Telefon		
Weitere Information per Email/ Post (Info Messung, Kleidung...)		
Terminierung des Probanden		
Ausdrucken der Einverständniserklärungsform für die Messung		
<b>2. Kalibration des Systems</b>	<b>Datum</b>	<b>Sonstiges</b>
Wand Error unter 1mm	Wand Error:	
Kamera Errors unter 1.5mm	Größter Kamera Error (Kamera Nr.):	
Vermerk der Kalibrierungsfehler in die Excel Liste		
<b>3. Messvorbereitung</b>	<b>Datum</b>	<b>Sonstiges</b>
Anlegen des Probanden in Qualisys (QTM) mit LB_xx		
Anlegen des Probanden in I:\_Projekte\Motoriklabor\ZBA_Syndesmosenstudie		
Erstellen eines Full-body marker models (Salford model) in QTM → Einstellung „Multiple force plates“ → Gewicht und Größe des Probanden in „Full-body“-Session eintragen		
Nullung der Kraftmessplatten		
Unterschrift des Probanden auf der Einverständniserklärung		
<b>4. Anamnesebogen</b>	<b>Datum</b>	<b>Sonstiges</b>
Geschlecht, Geburtsdatum, Gewicht, Gruppenzugehörigkeit, Schmerz- und Bewegungsanamnese anhand des separaten Anamneseprotokolls		
<b>5. Fragebögen</b>	<b>Datum</b>	<b>Sonstiges</b>
Olerud/Molander-Score		
Ankle Activity Index nach Tegner		
<b>6. Beweglichkeits- und Krafttests</b>	<b>Datum</b>	<b>Sonstiges</b>
RoM aller großen Gelenke der unteren Extremität - Hüftgelenk - Kniegelenk - Sprunggelenk		
Kraftgrade nach Janda beidseits - Glut max., med. und min. - Tib. ant. und post. - Triceps surae		
<b>7. Marker- Platzierung</b>	<b>Datum</b>	<b>Sonstiges</b>

Marker werden nach dem Protokoll des Salford Full Body Models geklebt (abgeheftet in Ordner...)		
<b>8. Fotos von Markerbeklebung</b>	<b>Datum</b>	<b>Sonstiges</b>
Ganzkörperbild aller vier Seiten (Foto in Beckenhöhe)		
<b>9. Statische Messung</b>	<b>Datum</b>	<b>Sonstiges</b>
Anteriorer und posteriorer Trial: ACHTUNG: Überprüfe, dass alle Marker gesehen werden (v.a. Knie medial)		
Nach Aufnahme der Trials, Labeling von mindestens einem statischen Trial (Überprüfung aller Marker)		
<b>10. Gangzyklen</b>	<b>Datum</b>	<b>Sonstiges</b>
Mind. fünf linke und fünf rechte Versuche, bei denen der Fuß eine Kraftmessplatte voll trifft. Der ganze Fuß ist auf der Kraftmessplatte.		
Der Proband bleibt im Unwissen der Kraftmessplatten im Boden, um „Targeting“ zu vermeiden. Der Proband wird angeleitet, plan zu den Kameras zu laufen, also gerade auf die Video-Kamera zu.		
<b>11. Provokationstests</b>	<b>Datum</b>	<b>Sonstiges</b>
a) Squats beid- und einbeinig auf Kraftmessplatte Platzieren der Beine so breit, wie der Proband es privat gewohnt ist. Standbein/e ohne die Ferse abzuheben. Maximale Tiefe. Arme vor der Brust verschränkt. Je zehn Stück		
b) Y-Balance-Test Einbeinstand in der Mitte des auf dem Boden markierten Y mit dem Standfuß auf der Kraftmessplatte. Schwungfuß soll bodennah so weit wie möglich in alle 3 Richtungen bewegt werden. Schwungfuß nicht absetzen. Arme in die Hüften. Je drei Stück in alle drei Richtungen		
c) Side-Hop-Test: Einbeiniger Sprung über eine Markierung von 30cm Weite (jeweils seitwärts in eine Richtung und zurück). Ausführung so stabil wie möglich, es geht um eine qualitative Ausführung. Schwungfuß nicht absetzen. Arme wie gewünscht. Fünf Stück auf jedem Bein		
<b>12. Nachbereitung</b>	<b>Datum</b>	<b>Sonstiges</b>
Patienten und Probanden in Wertetabellen einfügen.		
Daten auswerten.		

## F. Anamnesebogen

Datum der Messung:			Labornummer:		
Name:			Vorname:		
Geburtsdatum		Größe		Gewicht	
RoM li	DE/P F		EV/I N		IR/A R
RoM re	DE/P F		EV/I N		IR/A R
MFT Janda li	TS		TA		TP
MFT Janda re	TS		TA		TP
<b>1. Liegen bei Ihnen im Moment Beschwerden vor, wenn ja welche?</b>					
<b>2. Wenn ja, haben Sie Schmerzen und wie stark sind diese? 0 = kein Schmerz bis 10 = extreme Schmerzen</b> (Bitte beschreiben Sie auch eine Schmerzart wie `stechend, brennend, einschießend etc. und wann diese auftreten.)					
<b>3. Seit wann treten Ihre Beschwerden auf (gab es einen konkreten neuen Auslöser)?</b>					
<b>4. Nehmen Sie aktuell Medikamente? Wenn ja, welche?</b>					
<b>5. Welchen Beruf üben Sie aus?</b>					
<b>6. Treiben Sie Sport? Wenn ja, was und in welcher Regelmäßigkeit?</b>					
<b>7. Welche Therapien (ärztlich/physiotherapeutisch/Ergotherapeutisch etc.) wurden bei Ihnen bereits durchgeführt? Welche Therapieform hatte Ihnen geholfen?</b>					



## 12 LEBENSLAUF

### Persönliches

Vornamen, Nachname  
Geburtsdaten  
Staatsangehörigkeit

Laura Magdalena Blaschke  
14.12.1992 in Heidelberg  
deutsch



### Schulischer Werdegang

1999-2003

Friedrich-Ebert-Grundschule Eppelheim

2003-2012

Dietrich-Bonhoeffer-Gymnasium Eppelheim

13. Juni 2012

Abitur

2004-2010

Teilnahme am Hector-Seminar zur Förderung naturwissenschaftlich hochbegabter SchülerInnen, Heidelberg

### Universitärer Werdegang

WS 2013/14 – SS 2015

Vorklinischer Abschnitt an der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz

07. September 2015

Erster Abschnitt der Ärztlichen Prüfung

WS 2015/16 – SS 2019

Klinischer Abschnitt an der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Fakultät Mannheim

Famulaturen chronologisch: Universitätsklinikum Heidelberg (Viszeralchirurgie), Kantonsspital Baselland, Basel (Orthopädie), Berlin Steglitz (Ambulante Allgemeinmedizin), BG Klinik Ludwigshafen (Ambulante Unfallchirurgie)

11. April 2019

Zweiter Abschnitt der Ärztlichen Prüfung

Mai 2019 – Mai 2020

Praktisches Jahr in 4 Quartalen:

Innere Medizin - Klinikum der Stadt Ludwigshafen (Gastroenterologie, Kardiologie)

Chirurgie – Universitätsspital Zürich (Plastische, Rekonstruktive und Wiederherstellungschirurgie, Chirurgische Notfallambulanz), Universitätsklinikum Mannheim (Orthopädie und Unfallchirurgie)

Anästhesie – Universitätsklinikum Mannheim

Ambulante Urologie - Klinikum der Stadt Ludwigshafen

15. Juni 2020

Ärztliche Prüfung an der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Fakultät Mannheim

### **Medizinische Vorerfahrungen**

September 2012 - August 2013

Freiwilliges Soziales Jahr in der Reha-Klinik Heidelberg-Königstuhl in Heidelberg

Juni 2014 – Januar 2019

studentische Aushilfe im Pflegebereich der Chirurgie der Universitätsklinik Heidelberg

Fachbereiche: Allgemein-/Viszeralchirurgie, Urologie, Gefäßchirurgie, Herzchirurgie, intensivmedizinische Stationen

Januar 2018

Freiwilligendienst im Institute for Indian Mother and Child (IIMC) – basale medizinische Versorgung und Bildung

### **Beruflicher Werdegang**

01.10.2020 - heute

Ärztin in Weiterbildung in der Klinik für Allgemein-, Viszeral- und minimalinvasive Chirurgie des Krankenhaus Nordwest in Frankfurt am Main

### **Laufende Promotion**

2016 – heute

BG Klinik Ludwigshafen, Orthopädie und Unfallchirurgie

„Validierung von Repositionskriterien der operativen Versorgung von akuten instabilen Syndesmoseverletzungen mittels instrumenteller 3D-Bewegungsanalyse“

**Frankfurt, 09.09.2022**

## 13 DANKSAGUNG

Ich bedanke mich bei Herrn Prof. Dr. med. P.A. Grützner für die tolle Möglichkeit, ein so innovatives und vielseitiges Dissertationsthema zu bearbeiten.

Ich danke Herrn Dr. med. A. Hogan und Frau Dr. phil. U. Trinler für die zuverlässige, stets freundliche Betreuung und Hilfsbereitschaft während der jahrelangen Forschung.

Ein großes Dankeschön geht an Ursula für den kontinuierlichen Dialog, die gute Erreichbarkeit, den sportwissenschaftlichen Rat und vor allem für die Unterstützung aus der Ferne in der Endphase der Arbeit.

Außerdem möchte ich mich sehr herzlich bei Aidan dafür bedanken, dass er mir Durchhaltevermögen für ein gutes wissenschaftliches Arbeiten und wissenschaftliches Präsentieren beigebracht und mir stets mit sachlichem und fachlichem Rat beigestanden hat.

Ich danke außerdem Herrn Kuhn für die praktischen Tipps und meinen Eltern für die bedingungslose Unterstützung.

## 14 EIDESSTATTLICHE VERSICHERUNG

1. Bei der eingereichten Dissertation zum Thema *Validierung von Repositionskriterien der operativen Versorgung von akuten instabilen Syndesmoseverletzungen mittels instrumenteller dreidimensionaler Bewegungsanalyse* handelt es sich um meine eigenständig erbrachte Leistung.
2. Ich habe nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und mich keiner unzulässigen Hilfe Dritter bedient. Insbesondere habe ich wörtlich oder sinngemäß aus anderen Werken übernommene Inhalte als solche kenntlich gemacht.
3. Die Arbeit oder Teile davon habe ich bislang nicht an einer Hochschule des In- oder Auslands als Bestandteil einer Prüfungs- oder Qualifikationsleistung vorgelegt.
4. Die Richtigkeit der vorstehenden Erklärungen bestätige ich.
5. Die Bedeutung der eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unrichtigen oder unvollständigen eidesstattlichen Versicherung sind mir bekannt.  
Ich versichere an Eides statt, dass ich nach bestem Wissen die reine Wahrheit erkläre und nichts verschwiegen habe.

Ort, Datum

Unterschrift