Aus der Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie
Klinik der Universität München
Direktion:
Prof. Dr. med. Wolfgang Böcker
Prof. Dr. med. Boris Holzapfel, PhD

Prophylaktische Fasziotomie des anterioren Kompartiments bei Tibiaosteotomien: Subjektive und objektive Langzeitergebnisse der Dorsalextension im oberen Sprunggelenk

Dissertation
zum Erwerb des Doktorgrades der Medizin
an der Medizinischen Fakultät der
Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von
Tobias Randeu

aus
Bruneck

2022

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät

der Universität München

Berichterstatter:	Prof. Dr. med. Ekkehard Euler
Mitberichterstatter:	Prof. Dr. med. Christian Zeckey, MHBA Prof. Dr. Dipl.-Ing. Volkmar Jansson
Mitbetreuung durch den	
promovierten Mitarbeiter:	Dr. med. Nikolaus Degen
Dekan:	Prof. Dr. med. Thomas Gudermann
Tag der mündlichen Prüfung:	25.05.2022

Inhaltsverzeichnis

1 EINLEITUNG 1

1.1 Stand der Wissenschaft 1
1.1.1 Systematische Literaturrecherche 1
1.1.2 Tibiaosteotomien zur Längen-, Achs- und/oder Torsionskorrektur mittels Marknagel 2
1.1.3 Faszien und Muskelkompartimente am Unterschenkel 5
1.1.4 Akutes und chronisches, belastungsbedingtes Kompartmentsyndrom 8
1.1.5 Fasziotomie 12
1.1.5.1 Indikationen 12
1.1.5.2 Techniken 14
1.1.5.3 Ergebnisse 16
1.1.6 Muskelkraftmessung mittels „hand-held dynamometer“ 19
1.1.6.1 Reliabilität von HHDs 21
1.1.6.2 Durchführung der isometrischen Maximalkraftmessung mit HHDs im OSG 22
1.1.7 Bestimmung der ROM im OSG 23
1.1.8 Physiologische Seitendifferenz von ROM und Kraft im OSG 24

2 STUDIENZIEL UND FRAGESTELLUNG 26

3 MATERIAL UND METHODEN 28

3.1 Patientenkollektiv 28
3.1.1 Einschlusskriterien und Patientensuche 28
3.1.2 Ausschlusskriterien 28
3.1.3 Patientenrekrutierung und Ethikvotum 29
3.1.4 Studienkollektiv 30

3.2 Nachuntersuchung 31
3.2.1 Messparameter 31
3.2.2 Messzeitpunkt 32
3.2.3 Messgerät 32
3.2.4 Messstandort 33
3.2.5 Fragebogen 33
3.2.6 Untersuchungsprotokoll 34
3.2.6.1 Aktive ROM im OSG 35
3.2.6.2 Kraft (MIMK) der DE im OSG 35
3.2.6.3 Muskelhernie 36
3.2.6.4 Zehenspitzen- / Fersengang 37
3.2.6.5 Seitendifferenz / Dominanz 37

3.3 Statistische Auswertung 38

4 ERGEBNISSE 39

4.1 Eigenschaften des Patientenkollektivs 39
4.1.1 Alter zum OP-Zeitpunkt 39
4.1.2 Seitenverteilung 39
4.1.3 OP-Indikation 40

4.1.4 Body-Mass-Index (BMI) 40
4.2 Auswertung der subjektiven Einschätzung 41
4.3 Auswertung der objektiv gemessenen Parameter 45
4.3.1 Kraft (MIMK) der DE: OP-Seite vs. 10%-Normperzentile 45
4.3.2 Kraft (MIMK) der DE: OP-Seite vs. Gegenseite 48
4.3.3 ROM der DE: OP-Seite vs. Gegenseite 50
4.3.4 Korrelation zwischen Kraft und ROM der DE 51
4.4 Subgruppenanalyse 53
4.4.1 Zusammenhang subjektiver und objektiver Parameter der DE im OSG 53
4.4.1.1 Funktion „Fuß anheben“ 53
4.4.1.2 Funktion „Treppe-Hinaufsteigen und -Hinabsteigen“ 56
4.5 Kraft und ROM der DE bei Längen- vs. Achs-, Torsionskorrektur 58
4.6 Weitere Folgen der Fasziotomie 59
4.6.1 Muskelhernien und Sensibilitätsstörungen 59
4.6.2 Kraft und ROM bei Fällen mit / ohne Muskelhernie 60
5 DISKUSSION 61
5.1 Zusammenfassung der Hauptergebnisse 61
5.2 Diskussion der Methoden 61
5.3 Diskussion der Ergebnisse 66
5.4 Ausblick 70
6 ZUSAMMENFASSUNG 72
7 LITERATURVERZEICHNIS 74
8 ANHANG 78
8.1 Abkürzungsverzeichnis 78
8.2 Abbildungsverzeichnis 79
8.3 Tabellenverzeichnis 80
8.4 Votum der Ethikkommission 81
8.5 Fragebogen 83
8.6 Untersuchungsprotokoll 84
9 DANKSAGUNG 85
10 AFFIDAVIT 86
11 PUBLIKATIONSLISTE 87

1 Einleitung

1.1 Stand der Wissenschaft

1.1.1 Systematische Literaturrecherche

Der Entstehung der vorliegenden Arbeit ging der fachliche Diskurs zur Fragestellung voraus, ob Patient*innen nach Tibiaosteotomien zur Längen-, Achs- und/oder Torsionskorrektur, bei denen gleichzeitig eine prophylaktische Fasziotomie des anterioren Unterschenkelkompartiments durchgeführt wird, langfristig relevante funktionelle Einschränkungen bemerken oder solche messbar sind. Die schlussendliche Formulierung des konkreten Studienziels ist im Folgenden (unter 2. Studienziel und Fragestellung) zu finden. Zunächst folgte auf Basis des genannten Diskurses jedoch eine systematische Literaturrecherche zur Klärung des Standes der Wissenschaft.

In der Fachliteratur fanden sich nach ausgiebiger Recherche keine Studien, welche Funktionseinschränkungen im Sprunggelenk langfristig nach prophylaktischer, minimal-invasiver Fasziotomie des anterioren Unterschenkel-Kompartiments subjektiv oder objektiv untersuchten. Ebenso konnte keine Arbeit mit ähnlicher Fragestellung nach elektiven Tibiaosteotomien und Marknagel-Fixierung gefunden werden.

Zur Recherche wurden zunächst die Datenbanken Pubmed, Cochrane Library und Google Scholar nach passenden Publikationen durchsucht. Es wurden Studien mit Publikationsdatum bis einschließlich Dezember 2018 erfasst. Da keine passenden Studien zu prophylaktischen Fasziotomien gefunden wurden, wurde der thematische Suchradius zunächst auf Studien zur Tibiaosteotomie zum Zwecke der Längen-, Achs- und/oder Torsionskorrektur mittels Marknagel im Allgemeinen erweitert sowie anschließend auf die physiologische Funktion von Faszien, deren Pathologien sowie diagnostische und therapeutische Möglichkeiten. Schließlich wurde auch nach geeigneten Messmethoden zur Quantifizierung von Kraft und Bewegungsumfang der Dorsalextension (DE) im oberen Sprunggelenk (OSG) gesucht. Als Suchbegriffe wurden MeSH (Medical Subject Headings)-Termini verwendet (vgl. Tab.1).

Tabelle 1 - MeSH (Medical Subject Headings) -Termini der Literatur-Recherche

MeSH-Termini	
leg lengthening	*dorsiflexor strength*
intramedullary lengthening	*m. tibialis anterior*
implantable lengthening nails	*muscle strength*
compartment syndrome	*isometric strength*
acute compartment syndrome	*muscle strength dynamometer*
anterior compartment syndrome	*ankle joint*
chronic exertional compartment syndrome	*dorsiflexor strength*
fasciotomy	*range of motion*

Die Auswahl der passenden Publikationen erfolgte mehrschrittig anhand der Titel, der Abstracts und der gesamten Artikel, wobei eine inhaltliche Aufarbeitung der relevanten Kernaussagen der ausgewählten 78 Quellen erfolgte. Der hieraus sowie aus Fachbüchern und Artikeln zu den fachlichen Grundlagen des Themengebietes der vorliegenden Arbeit recherchierte Stand der Wissenschaft wird im Folgenden dargestellt.

1.1.2 Tibiaosteotomien zur Längen-, Achs- und/oder Torsionskorrektur mittels Marknagel

Die Verlängerung eines Röhrenknochens beruht auf dem Prinzip der Kallusdistraktion, also dem dosierten Auseinanderziehen des Osteotomiespaltes und des darin befindlichen Knochenkallus. Dieser ist das durch Osteoblasten neugebildete Knochenregenerat, welches dem „Bruchkallus“ bei der natürlichen Knochenbruchheilung (sogenannte „indirekte“ oder „sekundäre“ Frakturheilung) entspricht. Durch die regelmäßige Distraktion (meist um insgesamt einen Millimeter täglich in mehreren Teilschritten) kommt es zu einer stetigen Nachproduktion von Kallus durch die körpereigenen Regenerationsmechanismen bei gleichzeitigem Längengewinn. So entsteht mittels Kallusdistraktion (im Englischen „distraction osteogenesis“) zusätzliche Knochensubstanz und, nach Mineralisierung des Kallus,

letztlich ein um die Distraktionsstrecke verlängerter, vollbelastbarer Röhrenknochen [1–3].

Die chirurgische Umsetzung wurde lange Zeit durch zirkuläre externe Fixation durchgeführt - eine heute noch angewandte, gut untersuchte Methode. Sie wurde bereits 1944 von R. Wittmoser zur Frakturbehandlung praktiziert, später durch G.A. Ilizarov bekannt gemacht und schließlich auch nach ihm benannt („Ilizarov-Ringfixateur“) [4,5]. Ein derartiger Fixateur externe findet heute noch in der Traumatologie Anwendung, beispielweise bei der Behandlung komplizierter Tibia- oder Sprunggelenksfrakturen [6]. Eine deutliche Erweiterung der therapeutischen Möglichkeiten dieses Verfahrens erfolgte etwa zeitgleich in den USA durch die Brüder C. und H. Taylor (1994) und in Deutschland durch K. Seide (1995) in Form des „Hexapod-Fixateurs“ [7,8]. Durch dessen vielfache Konfigurationsmöglichkeiten lassen sich neben der Verlängerung auch komplexe, mehrdimensionale Achsumstellungen präzise durchführen.

Einen weiteren großen Fortschritt im Bereich der Kallusdistraktion stellt die Entwicklung der Distraktionsmarknägel dar, welche sich durch verschiedene interne Mechanismen (z.B. mechanisch, elektrisch oder magnetisch angetrieben) sukzessive extendieren. Als Vorteile solcher Implantate gelten die höhere knöcherne Stabilität sowie eine höhere Beweglichkeit und Beübbarkeit der umgebenden Gelenke durch die intramedulläre Lage, der geringere Weichteilschaden und das somit geringere Infektrisiko durch den Wegfall der Fixations-Pins sowie nicht zuletzt ein größerer Patientenkomfort im Vergleich zum Ringfixateur. Aufgrund dessen kann auch die Rehabilitation früher begonnen werden und insgesamt schneller verlaufen. Nachteile der Marknagel-Verfahren im Vergleich zu einem externen Fixateur stellen hingegen die höheren Kosten der Implantate, der eventuell größere Blutverlust während des Eingriffes sowie der Verlust der Option einer postoperativen, nicht-invasiven Anpassung der Achs- und/oder Torsionskorrektur dar. Daher spielt bei intramedullären Systemen die exakte präoperative Planung eine noch entscheidendere Rolle. Zusammengefasst kann der Marknagel dem Fixateur externe in Bezug auf Verlängerungsergebnis und Patientenkomfort mindestens gleichgestellt werden [1,2,9,10].

Einen ersten Schritt in der Entwicklung weg vom Fixateur externe und hin zum Marknagel stellte zunächst die Kombination beider Verfahren dar. So konnte bereits

vor der Etablierung von rein intramedullären Verlängerungs-Systemen die Tragezeit des externen Fixateurs mittels des sogenannten „lengthening over nail“ (LON) verringert werden. Hierbei wird im selben Eingriff ein Marknagel zur inneren Schienung implantiert und ein externer Fixateur als Getriebe der Distraktion fixiert. Bereits nach Erreichen der Ziellänge kann der Fixateur entfernt werden, also nach etwa einem Drittel der bei alleiniger Verwendung nötigen Tragezeit. Ab diesem Zeitpunkt dient der Marknagel als alleinige Stabilisierung der Konsolidierungsphase, wobei seitens der Patient*innen weiterhin Teilbelastung einzuhalten ist. Ebenso treten durch dieses Vorgehen Frakturen im Regeneratbereich, welche nach alleiniger Behandlung mit einem Fixateur gelegentlich beobachtet wurden, seltener auf [11,12].

Der erste voll-implantierbare Marknagel (mechanisch angetrieben mittels Ratschenmechanismus) zur Kallusdistraktion am Femur wurde 1983 von Bliskunov vorgestellt. Seitdem entstanden in chronologischer Reihenfolge folgende Distraktionsmarknägel: Albizzia®-Nagel (DePuy, Mount Waverly, Australien; Ratschenmechanismus; heute nicht mehr in Verwendung), Fitbone® SAA („Sliding Active Actuator"; Wittenstein Intens, Igersheim, Deutschland; elektromotorisch, gleitend), Fitbone® TAA („Telescope Active Actuator"; elektromotorisch, teleskopierend), ISKD® („Intramedullary Skeletal Kinetic Distractor“; Orthofix, Verona, Italien; Rollratschen, teleskopierend), Phenix® (Phenix® medical, Paris, Frankreich; magnetisch, teleskopierend), Precice® (NuVasive, San Diego, USA; magnetisch mit Getriebe, teleskopierend) [2,3].

Im Gegensatz zur reinen Längenkorrektur mittels Fixateur externe oder Verlängerungs-Marknagel, steht für Achs- und/oder Torsionskorrekturen zusätzlich die Fixierung mittels (winkelstabiler) Plattensysteme zu Verfügung. So kann typischerweise eine Varus-Stellung im Knie - sofern sie durch eine zu geringe Höhe des medialen Tibiaplateaus verursacht wird - auch an der medialen proximalen Tibia korrigiert werden, indem eine öffnende Keilosteotomie („medial open wedge high tibial osteotomy“) und Fixierung mit einer winkelstabilen Platte (z.B. Tomofix®-System) durchgeführt wird [13]. Sollen zusätzliche Torsions- oder Längenabweichungen korrigiert werden, bieten Osteosynthese- oder Verlängerungs-Marknägel diese Möglichkeiten. Osteosynthese-Marknägel (z.B. Expert Tibia Nail ETN® [DePuy Synthes, Oberdorf, Schweiz]) werden in der Arbeitsgruppe 3D-Chirurgie an der Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie der LMU

München hierbei nötigenfalls intraoperativ geplant oder zur Feinjustierung mittels einer Biegepresse konfiguriert, um das Korrekturausmaß entsprechend der präoperativen Planung einzustellen [14]. Unter den Verlängerungs-Marknägeln bietet das Modellspektrum des Precice®-Nagels mittlerweile sowohl vollbelastbare als auch zum Segment-Transport geeignete Nägel an. Die gegebenenfalls indizierte Verwendung von Pollerschrauben dient zudem der Sicherung und weiteren Feineinstellung des Korrekturergebnisses [15]. Die Osteotomiehöhe an der proximalen Tibia liegt dabei im metaphysären Bereich, was die beste Kombination aus knöchernem Heilungspotential und möglichem Korrekturausmaß bietet [16].

Der Fixateur stellt auch heutzutage, gerade in Ländern mit geringerem Pro-Kopf-Budget für medizinische Behandlungen als in Deutschland, das klassische Verfahren zur operativen Längenkorrektur dar.

Grundsätzlich liegen die Vorteile der Verwendung externer Fixateure gegenüber Marknägeln – gerade im Bereich der traumatologischen Akutversorgung – in der geringeren Invasivität und kürzeren OP-Zeit. Hinsichtlich der Komplikationen zeigten sich laut Ramos et al. bei Fixateuren jedoch auch häufiger oberflächliche Wundinfekte und Pseudarthrosen [6]. Marknägel hingegen waren aufgrund der intramedullären Lage zwar selten, aber häufiger als Fixateure, mit Osteitiden und Osteomyelitiden verbunden. Auch das Auftreten eines postoperativen akuten Kompartmentsyndroms (KS) war hier häufiger zu beobachten.

1.1.3 Faszien und Muskelkompartimente am Unterschenkel

Anatomisch gesehen sind Faszien (von lateinisch „fascia“: das Band / die Bandage) undifferenzierte mesenchymale Gewebe, welche sich um differenzierte Gewebe wie Organe oder Muskeln legen. Generell wird zwischen oberflächlichen und tiefen Faszien unterschieden, wobei in der Chirurgie und Physiotherapie mit „Faszie“ meistens die tiefe Faszie gemeint ist. Für viele medizinische und therapeutische Disziplinen gewinnen Faszien immer mehr an Bedeutung, da sie sowohl bei der Ausbreitung von Infektionen und Ödemen als auch bei Pathologien wie dem KS oder der Fibromyalgie eine wichtige Rolle spielen. Eine Aufgabe speziell von Muskelfaszien ist es, einzelne Muskeln bzw. Muskelgruppen zu umschließen und diese in ihrer Umgebung zu befestigen, wodurch ein sogenanntes Kompartiment

entsteht. Zudem haben sie für den Muskel auch eine mechanisch vorteilhafte Funktion, da sie diesen während der Kontraktion in seiner Position führen und als Trennschicht zur Umgebung seine Beweglichkeit sichern [17,18]. Alle Muskelgruppen der Extremitäten werden von Faszien umgeben, denen je nach Ausprägung aber eine unterschiedliche klinische Relevanz zukommt. So sind die Faszien der unteren Extremität verdickt und kräftig, was wohl evolutionsbiologisch durch den aufrechten Gang des Menschen bedingt ist. Dieser setzt den venösen Rückstrom des Blutes aus den Beinen zum Herz voraus, was einerseits durch Venenklappen realisiert wird, andererseits durch die sogenannte Muskelpumpe. Wenn sich beispielsweise die Muskeln des Unterschenkels beim Gehen kontrahieren, vergrößert sich deren Umfang. Da diese Expansion aber durch die dort besonders robusten Faszien eingeschränkt wird, befördert der überschüssige Druck das Blut aus den tiefen Beinvenen wieder in Richtung Herz. Durch den gleichen Mechanismus wird auch die Lymphe aus den Beinen abtransportiert [19].

Am Unterschenkel bilden die *Fascia cruris*, die *Membrana interossea cruris*, die Tibia und die Fibula vier Muskellogen (vgl. Abb. 1): die Extensorenloge (anteriores Kompartiment), die Peroneusloge (laterales Kompartiment), die tiefe Beugerloge (tiefes dorsales Kompartiment) und die oberflächliche Beugerloge (oberflächliches dorsales Kompartiment). Jedes dieser vier Kompartimente verfügt über eine eigene Blutversorgung und eigene Nervenstrukturen. Einzelne Quellen diskutieren zudem die Existenz eines fünften Kompartiments, bestehend aus dem *M. tibialis posterior* und der ihn umgebenden Muskelfaszie [18–20].

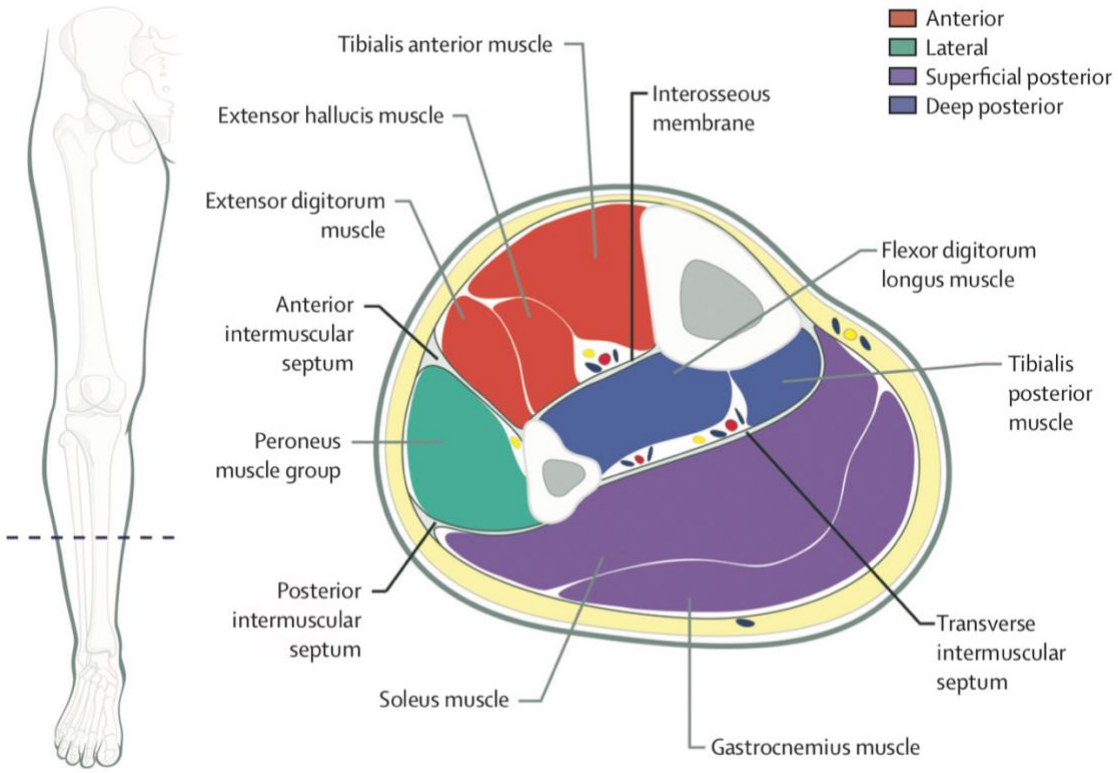


Abbildung 1 - Querschnitt des Unterschenkels (nach von Keudell et al.[18])

Im Bereich der Extremitäten kommt im Zusammenhang mit dem akuten wie auch dem chronischen KS der Extensorenloge, also dem anterioren Muskelkompartiment des Unterschenkels, eine besondere Bedeutung zu. Dieses wird von der *Fascia cruris*, der Tibia, der *Membrana interossea cruris*, der Fibula und intermuskulären Septen begrenzt. Es enthält den für die DE im OSG essenziellen *M. tibialis anterior* sowie die *Mm. extensor hallucis longus* und *extensor digitorum longus*, welche für die DE der Großzehe und der übrigen Zehen verantwortlich sind. Die Versorgung des anterioren Kompartiments wird durch die *A.* und *V. tibialis anterior* und den *N. fibularis* (/ *N. peroneus*) *profundus* gewährleistet. Eine Schädigung dieser muskulären oder nervalen Strukturen kann von einer leichten Extensorenschwäche bis hin zum Vollbild des Fallfußes führen [18–22].

1.1.4 Akutes und chronisches, belastungsbedingtes Kompartmentsyndrom

Besonders in der Traumatologie, sei es als akute Verletzungsfolge oder im frühen postoperativen Verlauf, hat das akute KS eine hohe klinische Relevanz. So stellt das postoperative KS unmittelbar nach der tiefen Beinvenenthrombose die zweithäufigste Komplikation in der Frakturbehandlung am Unterschenkel dar [21]. Pathophysiologisch kommt es durch ein adäquates Trauma - wozu auch das chirurgische zählen kann - zu einer Gewebeschädigung des Muskels. Die darauf eintretende reaktive präkapilläre Vasodilatation sowie ein Kollabieren der postkapillären Venolen und eine erhöhte kapilläre Permeabilität führen zu einem Anstieg des interstitiellen Gewebedrucks im geschädigten Muskel. Dieser bedingt eine sukzessive Verminderung der Perfusion und führt schließlich zu einer Gewebehypoxie. Die Kombination von Hypoxie und Hypoglykämie im geschädigten Gewebe und der damit einhergehende ATP (Adenosintriphosphat)-Mangel führt auf Zellebene zu Schwellung und Nekrose. Dies resultiert wiederum in einer Erhöhung des Gewebedrucks, was die Perfusion weiter einschränkt und somit einen Circulus vitiosus in Gang setzt (vgl. Abb. 2). Die insbesondere am Unterschenkel robusten Faszien, aber auch zu eng anliegende (Gips-)Verbände, können verhindern, dass sich eine derartige Schwellung in der Umgebung ausdehnen kann. Als Folge werden die Strukturen innerhalb des Kompartiments, einschließlich der versorgenden Nerven und großen Blutgefäße, zunehmend schädlich komprimiert.

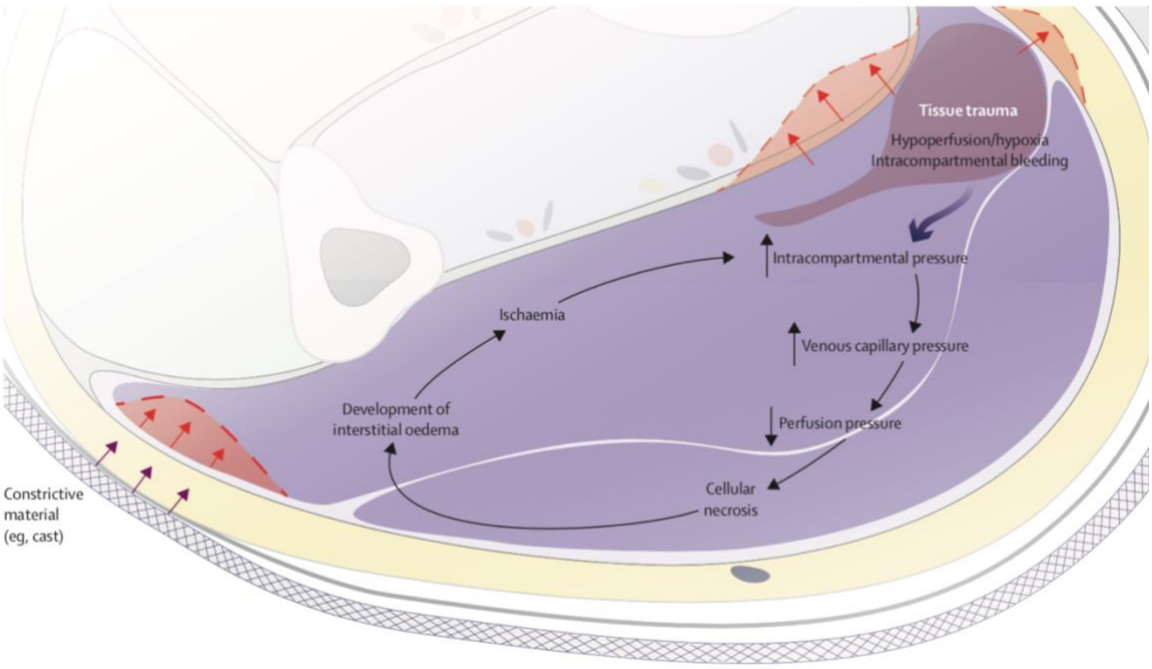


Abbildung 2 - Pathophysiologie des akuten KS (nach von Keudell et al.[18])

Sollte keine zeitnahe Druckentlastung erfolgen, drohen nacheinander Muskelischämie, Nervenkompression / -schädigung und Muskelnekrosen, bis hin zu systemischen Komplikationen wie Rhabdomyolyse, welche zu einem akuten Nierenversagen führen kann. Auch die nekrosebedingte Hyperkaliämie und Azidose können systemische Komplikationen wie Herzrhythmusstörungen und Multiorganversagen hervorrufen. Neben dieser traumatischen Genese kann auch die Wiederherstellung der Perfusion einer ischämischen Extremität zu einem KS führen. Diese, als post-ischämisches KS bekannte, Komplikation tritt gehäuft nach gefäßchirurgischen Eingriffen zur Therapie von pAVK (periphere arterielle Verschlusskrankheit) oder traumatischen Gefäßverletzungen auf. Nachdem die Perfusion des ischämischen Gewebes wiederhergestellt ist, kommt es zur Bildung von Sauerstoff- und Lipidperoxyl-Radikalen sowie zu einem Kalzium-Einstrom in die Zelle, was zu Störungen der mitochondrialen oxidativen Phosphorylierung und schließlich zu einer Zerstörung der Zellmembran führt. Dies resultiert schließlich in den oben genannten Mechanismen zur Entstehung und in den Komplikationen eines akuten KS. In seltenen Einzelfällen kann auch eine Infektion durch Streptokokken der Gruppe A, deren Fokus unklar bleibt und welche nur in Blutkulturen nachweisbar ist, ursächlich für ein akutes KS sein. Vermutlich kommt es hierbei durch Exotoxine der Streptokokken zu einer direkten Muskelschädigung, wodurch die beschriebenen pathophysiologischen Prozesse des KS angestoßen werden [18].

Die Diagnose eines akuten KS kann meist klinisch gestellt werden. Hierbei gelten neben der tastbaren deutlichen Verhärtung des Kompartiments im Seitenvergleich, evtl. mit Umfangsvermehrung, auch überproportionale, schwer therapierbare Schmerzen in Ruhe und bei passiver Streckung sowie zunächst sensorische, dann motorische und zuletzt auch vaskuläre (Pulsdefizit) Auffälligkeiten als die wichtigsten, klinisch bestimmbaren Parameter. Während die Faktoren Schmerz, Sensorik und Motorik eine hohe Spezifität (>97%) und einen hohen negativ prädiktiven Wert (>98%) aufweisen, sind deren Sensitivität und positiv prädiktiver Wert gering (<19% bzw. <15%). Hier schafft die sichtbare und meist tastbare Schwellung und Verhärtung Abhilfe (Sensitivität: 54%, Spezifität: 76%, positiv prädiktiver Wert: 70%, negativ prädiktiver Wert: 63%). Um ein KS definitiv auszuschließen, ist die invasive Druckmessung des Kompartiments die Methode der Wahl (Sensitivität: 94%, Spezifität: 98%, positiv prädiktiver Wert: 93%, negativ prädiktiver Wert: 99%) [23]. Diese erfolgt anhand eines Nadel-Manometers oder

verschiedener druckmessender Katheter (z.B. „Wick“-, „Transducer-tip“-, „Slit“-Katheter), welche bei einem KS als Folge einer Fraktur nicht weiter als 5 cm von dieser entfernt zu liegen kommen sollten, um den maximalen Kompartimentdruck abzuleiten. Der physiologische Kompartimentdruck ist bei gesunden Erwachsenen signifikant geringer als bei Kindern. Dies zeigten Staudt et al. erstmals an jeweils 20 Kindern (mittleres Alter 2,2 Jahre) und Erwachsenen (40,5 Jahre) durch invasive, bilaterale Druckmessung der vier Kompartimente am Unterschenkel [24]. Hierbei fanden die Autoren neben den teilweise mehr als doppelt so hohen Druckwerten bei Kindern, dass das anteriore Kompartiment im Vergleich zu den anderen drei Unterschenkel-Kompartimenten deutlich höhere Werte aufwies. So zeigte sich für Erwachsene dort ein mittlerer Druck von 9,7 mmHg (Kinder: 16,6 mmHg), entgegen den anderen Kompartimenten, die Werte von 5,15 - 6,0 mmHg (Kinder: 13,4 - 14,3 mmHg) aufwiesen. Weitere Quellen geben den physiologischen Kompartimentdruck im anterioren Kompartiment des Unterschenkels mit 8 - 10 mmHg an; bei einem akuten KS kann dieser hingegen auf über 30 - 40 mmHg ansteigen [18,25]. Neuere Ansätze gehen dahin, die Diagnose eines KS zügiger und sicherer zu stellen als es die bisher gängige Druckmessung erlaubt. So können beispielsweise durch die Bestimmung von intramuskulärer Glukose Rückschluss auf den Muskelstoffwechsel gezogen werden, welcher durch die Druckerhöhung und Ischämie beeinträchtigt ist. Bislang nur am Hundemodell konnte bereits 15 Minuten nach Induktion eines KS eine Abnahme der intramuskulären Glukosekonzentration im Vergleich zu einem Kontrollbein gemessen werden [26]. Die Autoren merkten allerdings an, dass dieses äußerst schnelle Verfahren zur Detektion eines erhöhten Kompartimentdrucks noch weiterentwickelt werden müsste, um klinische Studien an Menschen durchzuführen. Einen weiteren vielversprechenden Parameter zur Einschätzung des Muskelstoffwechsels stellt der intramuskuläre pH-Wert dar, der mittels spezieller Sonden kontinuierlich gemessen werden kann. Mit diesem Verfahren konnten Johnstone et al. an 62 Patient*innen eine signifikant höhere Sensitivität und Spezifität als mit der herkömmlichen Kompartimentdruck-Messung erzielen. Somit hätte diese, allerdings ähnlich invasive, Methode dem Autor zufolge durchaus das Potential, die Diagnose eines KS genauer und schneller zu stellen. Eine multizentrische klinische Studie hierzu ist noch ausstehend, wurde aber bereits angekündigt [27]. Challa et al. bestimmten den intramuskulären pH-Wert nicht-invasiv mittels eines Nahinfrarotspektroskopie-(NIRS)-pH-Messgeräts. Auch hier konnten signifikante Zusammenhänge des Kompartimentdrucks mit dem Abfall von pH-Wert,

Kapillardurchblutung und Oxygenierung gezeigt werden. In dieser Studie wurde das KS an acht gesunden Proband*innen mittels einer Oberschenkelmanschette zur venösen Stauung sowie pneumatischem Druck auf das Bein von außen simuliert [28]. Eine ebenso nicht-invasive Möglichkeit zur Diagnosestellung eines KS könnte in Zukunft die NIRS darstellen, mittels welcher, ähnlich der Pulsoxymetrie, die Gewebedurchblutung bestimmt werden kann. Bei Risikopatient*innen könnte dadurch ein erhöhter Kompartimentdruck indirekt über eine Abnahme der Gewebeperfusion detektiert werden. Die NIRS wies im Tiermodell bereits vielversprechende Ergebnisse auf, kam aber bisher am Menschen nur in kleinen Fallstudien zum Einsatz und muss für den breiten Gebrauch noch in größeren Studien evaluiert werden [18].

Das Auftreten des akuten KS der Extensorenloge wurde vereinzelt auch als schwerwiegende Komplikation von Längen-, Achs- und/oder Torsionskorrekturen mittels Marknagel beobachtet. Als Ursachen werden Blutungen oder Schwellungen im Zuge der Tibiaosteotomie und Marknagelimplantation angenommen. So berichteten Kenawey et al. sowie Bilen et al. über jeweils einen Fall eines postoperativen KS in einem Kollektiv von 12, bzw. 13 Fällen von Tibiaosteotomien mit Marknagelung [2,11,29].

Die zweite Ausprägung der Erkrankung ist das chronische, belastungsbedingte KS („chronic exertional compartment syndrome“ - CECS), häufig auch als chronisches KS bezeichnet. Bei dieser unter Läufern, Athleten und Soldaten weit verbreiteten Verletzung kommt es bei hoher Belastung zu starken, ischämischen Muskelschmerzen. Als Risikofaktoren gelten der Gebrauch von anabolen Steroiden und Kreatin, also Substanzen zur Vergrößerung des Muskelvolumens, sowie plyometrisches Training. Pathophysiologisch kommt es während Zuständen erhöhter Belastung zu einer Druckerhöhung im betroffenen Muskelkompartiment, die aufgrund der Non-Compliance des geschlossenen osteofibrösen Raumes zu wiederkehrenden, reversiblen Ischämien führt [30]. Am häufigsten tritt das CECS am Unterschenkel auf - speziell im anterioren Kompartiment - und kann meist erfolgreich durch eine Fasziotomie und somit dauerhafte Druckentlastung therapiert werden [20,22,31,32]. Allerdings werden teils hohe Rezidivraten von bis zu 44,7% berichtet [31].
Neben Sportlern gelten auch Diabetiker, darunter hauptsächlich Frauen, als Risikogruppe für ein CECS [33]. Die Pathophysiologie ist weitgehend unbekannt,

wobei ein interstitielles Muskelödem aufgrund der mit dem Diabetes mellitus einhergehenden Schädigung der Mikrovaskularisation als Ursache diskutiert wird. Klinisch ist diese Differentialdiagnose v.a. in der Abklärung einer bei Diabetikern häufig vorkommenden pAVK relevant. Ein CECS kann im Vergleich zu einer pAVK nämlich relativ einfach und erfolgreich mittels Fasziotomie therapiert werden.

1.1.5 Fasziotomie

1.1.5.1 Indikationen

Das akute KS ist bei wachen Patient*innen eine klinische Diagnose. Dem typischen, überproportional hohen Schmerz, welcher mittels der üblicherweise benötigten, gewichtsadaptierten Analgetika nicht adressierbar ist, in Kombination mit einer eindeutigen tastbaren Verhärtung durch Druckzunahme des Kompartiments, sollte die Indikation zur notfallmäßigen Fasziotomie folgen. Die Entstehung weiterer Symptome wie eines sensiblen oder motorischen Defizits, oder zuletzt eines Pulsdefizits, darf keinesfalls abgewartet werden, da sie mit einem schlechteren funktionellen Outcome und letztlich einer höheren Letalität verbunden sind [18,34].
Bei bewusstlosen oder analgosedierten Patient*innen sowie im Zweifelsfall kann eine zusätzliche apparative Diagnostik im Sinne der invasiven Druckmessung des Kompartiments erfolgen. Es ist allerdings umstritten, ob ein Absolutwert zur Indikation einer operativen Therapie existiert [18,25]. Als dafür weitaus relevanter gilt hingegen die Differenz aus dem diastolischen Blutdruck und dem Druck im betroffenen Kompartiment, Δp, welche schon 1975 von Whitesides et al. beschrieben wurde [35]. Duckworth und McQueen zufolge sollte dieses Δp zwischen diastolischem Blutdruck und Druck im anterioren Kompartiment im physiologischen Zustand deutlich über 30 mmHg liegen, während unter 30 mmHg demnach eine Fasziotomie indiziert wäre [25]. Neben diesem Kriterium ist auch die Dauer des Druckanstieges relevant. So wurden laut einer Studie von McQueen und Court-Brown durch die Anwendung der Kriterien $\Delta p \leq 30$ mmHg für >2 Stunden drei von 116 Patient*innen mit Tibiaschaftfrakturen im Laufe von 24 Stunden notfallmäßig fasziotomiert, ohne ein anteriores KS zu übersehen [36]. Wären absolute Druckwerte im Kompartiment (30 mmHg bzw. 40 mmHg) zur Indikationsstellung der Fasziotomie angewandt worden, wäre ebenfalls kein Fall eines KS übersehen worden, allerdings wären 50 bzw. 27 Patient*innen unnötig fasziotomiert worden. Das Vorgehen nach

diesen Empfehlungen, von den Autoren als Edinburgh-Protokoll bezeichnet, soll zu einer frühen Entlastung des Kompartiments und somit geringerer Komplikationsrate führen, ohne gleichzeitig die Anzahl an unnötigen Fasziotomien zu erhöhen. White et al. untersuchten das Outcome dieser Vorgehensweise an 101 Fällen [37]. Sie verglichen dazu jeweils den Langzeitverlauf von Patient*innen mit Tibiaschaftfrakturen, welche im anterioren Kompartiment für >6 Stunden einen Druck >30 mmHg aufwiesen mit solchen, die 30 mmHg nie überschritten. Beide Gruppen zeigten dauerhaft ein $\Delta p>30$ mmHg, da ansonsten laut dem Edinburgh-Protokoll die Indikation zur Fasziotomie bestanden hätte. Nachdem im akuten Verlauf keine Komplikationen auftraten, gab es auch jeweils ein Jahr nach dem Ereignis sowohl bei Muskelkraftmessungen als auch der Rückkehr zur Alltagsaktivität keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen. Die vorliegenden Studien, welche sich mit dem Edinburgh-Protokoll auseinandersetzten, beschäftigten sich allerdings ausschließlich mit der Extensorenloge und nicht mit anderen Kompartimenten des Unterschenkels, obwohl die Normaldrücke - und damit Δp - in diesen durchaus anders sein können [24].
Eine irreversible Schädigung der Muskulatur durch ein KS konnte in Tierversuchen nach etwa 6-12 Stunden nachgewiesen werden. Bei der Entscheidung zu einer notfallmäßigen Fasziotomie sollte allerdings auch immer bedacht werden, dass die Druckerhöhung ein dynamischer und fluktuierender Prozess ist und individuelle Schwankungen vorhanden sein können, was eine genaue Druck- und Zeitangabe zur Therapieindikation erschwert [18,25].

Eine notfallmäßige Fasziotomie ist nur beim akuten KS notwendig. Bei der Fasziotomie im Rahmen eines CECS handelt es sich hingegen um einen elektiven Eingriff, welcher nach Ausschöpfung konservativer Methoden, bestehend in einer Änderung der Trainingsmodalitäten (z.B. Dehnungsübungen, Schuhwechsel, orthopädische Einlagen), Physiotherapie oder der lokalen Infiltration mit Lokalanästhetika, bei entsprechend hoher subjektiver Beeinträchtigung der Patient*innen geplant werden kann [30,38]. Die Indikation zur Fasziotomie ist, im Gegensatz zum akuten KS, hierbei weniger eindeutig zu stellen. Verleisdonk et al. konnten auch nach Belastung nur bei 52% aller CECS-Verdachtsfälle eine messbare Druckerhöhung im betroffenen Kompartiment nachweisen [32]. Somit ist hier primär die eindeutige Anamnese zur Stellung der Diagnose ausschlaggebend.

Um die Komplikation des postoperativen akuten KS nach elektiver Tibiaosteotomie und Einbringung des Marknagel zu verhindern, wurde im Rahmen von Eingriffen zur Längen-, Achs- und/oder Torsionskorrektur die prophylaktische Fasziotomie des anterioren Kompartiments des Unterschenkels von vielen in diesem Bereich versierten Operateuren in deren routinemäßiges Prozedere aufgenommen [2,10]. In der Arbeitsgruppe „3D-Chirurgie“ (vor 2009 Arbeitsgruppe „Sonderimplantate“) an der Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie der LMU München wird dies seit Oktober 2003 praktiziert. Zuvor waren bei der Behandlung von ca. 60 Fällen postoperativ drei Fälle von akuten KS aufgetreten, welche durch notfallmäßige Fasziotomien langfristig komplikationslos verliefen.

1.1.5.2 Techniken

Zur Therapie eines akuten KS erfolgt die Fasziotomie am Unterschenkel offen, das heißt über einen ausgedehnten Hautschnitt als Dermatofasziotomie. Sofern nicht eindeutig nur ein einziges Kompartiment betroffen ist, werden über diesen Zugang alle vier Kompartimente eröffnet. Hierzu wir ein lateraler Hautschnitt auf Höhe der Peroneusloge angelegt, welche zuerst eröffnet wird. Von hier aus erfolgt die Dekompression der weiteren Muskellogen (unilaterale Kompartmentspaltung nach Matsen). Alternativ können die oberflächliche und tiefe Beugerloge auch über einen zweiten, dorsomedial angelegten Zugang eröffnet werden (bilaterale Dermatofasziotomie). Bei offenen Techniken wird die Haut in der Regel primär nicht wieder verschlossen, da diese ebenfalls Druck auf das Kompartiment ausüben kann. Stattdessen kommt eine Kunsthautdeckung mit sterilen Verbänden in Frage, welche im Verlauf nach schrittweise zunehmender Dermatotaxis zugunsten eines sekundären Hautverschlusses entfernt wird [34].

Da es sich beim CECS um eine elektive OP-Indikation handelt, beschäftigten sich in diesem Zusammenhang mehrere Publikationen mit möglichst minimal-invasiven Techniken der Fasziotomie, um günstigere Voraussetzungen für Rehabilitation und Kosmetik zu schaffen. So operierten beispielsweise Sebik und Doğan CECS-Patient*innen in endoskopischer Technik [39]. Über einen 1 cm langen, horizontalen Schnitt in der Mitte des anterolateralen Unterschenkels wurde zunächst ein Trokar eingebracht. Mittels Endoskop und eines „Smillie Meniscus Knife“ konnte die Faszie des anterioren Kompartiments anschließend unter Sicht nach distal und proximal

gespalten werden. Dieses Prozedere sollte den Autoren zufolge die Wahrscheinlichkeit herabsetzen, den *N. fibularis superficialis* zu schädigen. Maffulli et al. legten das anteriore Kompartiment hingegen über einen 2,5 cm langen, vertikalen Hautschnitt frei, lösten die Faszie vom umgebenden Unterhautgewebe ab und inzidierten sie mit einem Skalpell [38]. Anschließend wurde die Faszie mit einer langen, speziellen Schere nach proximal und distal gespalten. Aufgrund der geringen Öffnung des Instruments war es möglich, das umgebende Gewebe weitgehend zu schonen. Dieser Methode bedienten sich auch Drexler et al. [30]. Sie nutzten den schon bestehenden Zugang, um auch das laterale Kompartiment zu spalten, da dieses beim CECS nach dem anterioren Kompartiment am zweithäufigsten betroffen ist. De Fijter et al. spalteten die Faszie des anterioren Kompartiments mittels eines Fasziotoms, welches über einen 1 cm langen Hautschnitt etwa einen Finger breit lateral der Tibia eingebracht wurde [40]. Nach einer kleinen Inzision der Faszie wurde diese nach proximal und distal gespalten, wobei das Fasziotom nach distal eng entlang der Tibiavorderkante geführt wurde, um einer Schädigung des N. fibularis superficialis vorzubeugen.

In der Arbeitsgruppe 3D-Chirurgie an der Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie der LMU München wurde neben weiteren Techniken und OP-Instrumenten auch die minimal-invasive subkutane Fasziotomie mittels Fasziotom (vgl. Abb. 3) zur prophylaktischen Anwendung etabliert. Hierbei wird derselbe Hautschnitt zunächst für die Fasziotomie und anschließend für die minimal-invasive Bohrloch-Osteotomie genutzt. Analog der Technik von De Fijter et al. wird die Faszie über einen 7-10 mm langen Hautschnitt etwa 1 cm lateral der Tibiavorderkante zunächst dargestellt und über 3-5 mm längs inzidiert. Anschließend wird das Fasziotom mit dem langen Schenkel unterhalb und dem kurzen Schenkel oberhalb der Faszie angesetzt und anschließend um ca. 90° entlang der Längsachse verkippt, sodass die beiden Schenkel die Faszie eng einschließen und eine Verletzung anliegender Strukturen weitgehend ausgeschlossen werden kann. Die Faszie wird dann nach distal bis etwa eine Hand breit proximal der Malleolengabel gespalten. In analoger Technik erfolgt die Spaltung nach proximal bis knapp auf Höhe der *Tuberositas tibiae*. Über denselben Zugang wird schließlich, unter schonender Verdrängung des *M. tibialis anterior* vom ventralen Anteil der Faszie sowie unter dem Schutz einer Gewebeschutzhülse, ebenfalls in minimal-invasiver Technik die Bohrloch-Osteotomie der Tibia angelegt und mit einem schmalen Meißel komplettiert [2].

a) b)

Abbildung 3 - Fasziotom zur minimal-invasiven Faszienspaltung (a).
Kopf des Fasziotoms im Detail (b).

1.1.5.3 Ergebnisse

In einer Studie mit 40 Fällen von akuten KS traumatischer oder vaskulärer Genese zeigten Heemskerk und Kitslaar, dass bei Entlassung aus der stationären Behandlung nach der notfallmäßiger Fasziotomie lediglich 45% der Fälle eine gute Funktion der unteren Extremität ohne größere motorische und sensible Einschränkungen aufwiesen [41]. Während bei 27,5% eine höhergradige Funktionseinschränkung des Beines bestand musste bei 12,5% eine Amputation erfolgen. Die übrigen 15% der Patient*innen verstarben im Laufe der Hospitalisierung. Diese Ergebnisse aus dem Jahr 2003 waren durchaus vergleichbar mit früheren Studien zum post-ischämischen KS, in welchen die Amputationsrate bei 11-21% und die Mortalität bei 11-15% lagen.
Frink et al. untersuchten 24 Patient*innen im Mittel 2,4 Jahre nach akutem KS auf klinische Defizite nach [42]. Die Range of Motion (ROM) zeigte sich im Vergleich zur Gegenseite um 69,2% für die DE sowie um 53,8% für die Plantarflexion (PF) vermindert. Ebenso waren die dynamisch gemessene DE- und PF-Kraft im Vergleich zur gesunden Gegenseite signifikant vermindert. 53,8% der Patient*innen beklagten sensible Defizite, während 15,4% Schmerzen in Ruhe und 26,9% Schmerzen bei Belastung angaben. Das Ziel dieser Studie war es ursprünglich, den Einfluss von multiplen Verletzungen auf das Vorhandensein klinischer Defizite nach einem akuten KS zu erfassen. Keiner der erhobenen Parameter unterschied sich in der Nachuntersuchung aber signifikant zwischen Patient*innen mit einem KS im Rahmen eines Polytraumas gegenüber solchen mit einem isolierten KS.

Studien bezüglich der Behandlung von CECS beschrieben das Outcome hauptsächlich hinsichtlich des Auftretens von Komplikationen, dem Wiederauftreten der Symptomatik oder anhand von Fragebögen zur Lebensqualität. Eine Studie zur allgemeinen Lebensqualität nach minimal-invasiver Therapie des CECS zeigte im Mittel 36 Monate postoperativ eine insgesamt hohe subjektive Zufriedenheit der Patient*innen, gemessen mittels der Short-Form Health Survey-36 (SF-36) und

European Quality of Life-5 Dimension (EQ-5D) Fragebögen [38]. In einer Fallstudie mit 54 CECS-Patient*innen und einem follow-up von durchschnittlich 50 Monaten wurden die Komplikationen nach Fasziotomie des anterioren und lateralen Kompartiments des Unterschenkels erfasst [30]. Diese umfassten v.a. Hämatome, Wiederauftreten der Symptomatik, Wundinfektionen und Nervenkompressionen / -schädigungen. Der gute subjektive Erfolg wurde auch hier mittels Fragebögen (Tegner, Short-Form Health Survey-12 (SF12) und NAS (numerische Analogskala zur Erhebung von Schmerzen)) erhoben.

Zur Differenzierung der Wirkungsweise der Fasziotomie von möglichen Auswirkungen eines KS ist außerdem der Effekt von Fasziotomien auf intakte Muskulatur interessant. Dieser wurde bislang jedoch nur am Tiermodell untersucht. Garfin et al. zeigten 1981 am Hundemodell, dass eine Fasziotomie eine signifikante Kraftminderung bewirkte [17]. Dazu wurde die Faszie des *M. tibialis cranialis*, welcher in Ursprung, Ansatz und Funktion am ehesten dem *M. tibialis anterior* des Menschen entspricht, intraoperativ gespalten. Durch elektrische Stimulation des Muskels vor und unmittelbar nach der Fasziotomie konnte eine signifikante Kraftminderung von etwa 15% gemessen werden. Gleichzeitig nahm der Druck im Kompartiment, gemessen mit einem „Wick"-Katheter, durch den Eingriff um 50% ab. Zudem zeigte diese Arbeit, dass weder der Hautschnitt noch die Hautnaht einen signifikanten Einfluss auf die gemessenen Parameter Kraft und Druck hatten. Die Autoren erklärten ihre Ergebnisse durch ein Zusammenspiel aus Muskelvolumen und Kompartmentdruck, welches die Muskelkraft beeinflusst. Ein ähnliches Experiment führten Huijing und Baan am anterioren Kompartiment von Ratten durch [43]. Auch hier konnte eine Kraftminderung von etwa 10% durch die Fasziotomie gezeigt werden. Unter anderem wurde in dieser Studie auch Wert auf die Präparation des extramuskulären Bindegewebes gelegt, welches ebenfalls eine Rolle in der Kraftübertragung und Längenänderung des Muskels bei der Kontraktion zu spielen schien.

Unter den klinischen Ergebnissen der Fasziotomie ist außerdem die Schädigung des *N. fibularis* (/ *N. peroneus*) *superficialis* zu nennen. Insbesondere in der Notfall-Therapie des akuten KS kommen iatrogene Läsionen vergleichsweise oft vor, und werden angesichts der zeitkritischen Therapie und der relativ geringen funktionellen Konsequenzen in Kauf genommen. Dieser, für die sensible Innervation der Haut über dem lateralen Sprunggelenk und Fußrücken zuständige, Nerv ist aufgrund

seines variablen Verlaufes für Schädigungen im Rahmen einer Fasziotomie sehr anfällig. Tomaszewski et al. zeigten in einer Metaanalyse von 14 Studien, dass der *N. fibularis superficialis* in 82,7% der Fälle seinem regulären Verlauf folgt, also im distalen Drittel des Unterschenkels durch die Faszie des lateralen Kompartiments an die Oberfläche tritt und sich dort in seine Endäste (*N. cutaneus dorsalis medialis* und *N. cutaneus dorsalis intermedius*) teilt [44]. Andere weit verbreitete anatomische Varianten sind eine Aufteilung in der Tiefe und das Austreten der sensiblen Endäste durch die Faszien des anterioren und lateralen Kompartiments (15,6%) sowie das Austreten eines alleinigen Endastes durch das laterale Kompartiment (1,8%) (vgl. Abb. 4).

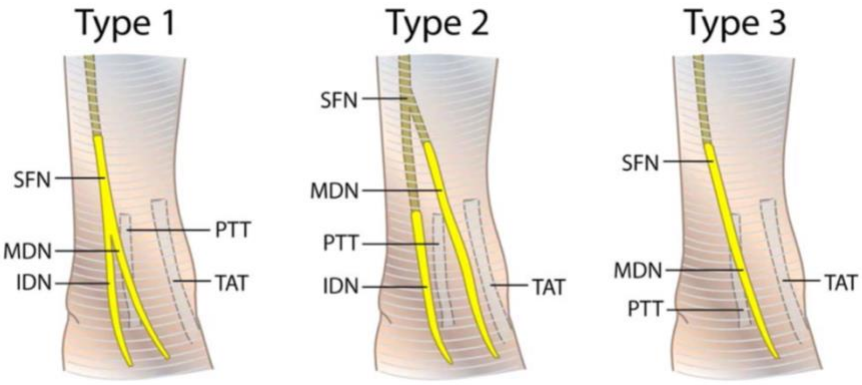


Abbildung 4 - Drei anatomische Varianten des N. fibularis superficialis (nach Tomaszewski et al.[44]) Dargestellt ist der Verlauf des N. fibularis superficialis (SFN) am distalen Unterschenkel mit Aufteilung in seine Endäste - die Nn. cutaneus dorsalis medialis (MDN) und cutaneus dorsalis intermedius (IDN) - in anatomischer Relation zu den Sehnen des M. tibialis anterior (TAT) und des M. peroneus (fibularis) tertius (PTT)

De Fijter et al. zeigten nach minimal-invasiver Fasziotomie des anterioren Kompartiments zur Therapie eines CECS bei 2% der Patient*innen eine unmittelbare postoperative Schädigung des *N. fibularis superficialis*, welche auch im follow-up von durchschnittlich 5,2 Jahren noch persistierte und sich in Form von Sensibilitätsstörungen im Versorgungsgebiet des Nerven äußerte [40]. Ebenso berichteten Drexler et al., dass 2,1% ihrer Fälle nach minimal-invasiver Spaltung des anterioren und/oder lateralen Kompartiments vergleichbare Sensibilitätsstörungen aufwiesen [30]. Im klinischen Alltag ist dieser Nerv v.a. durch seine Verwendung als autogenes Transplantat zum Nervenersatz in der oberen Extremität bekannt. Aufgrund des begrenzten, rein sensiblen Defizits im Falle einer Schädigung, wird im Notfall in der Regel seiner Schonung kaum Stellenwert zugemessen. In einer elektiven Situation sollte der *N. fibularis superficialis* aber in seinem Verlauf dargestellt und geschont werden [39,40,44].

Nach einer therapeutischen Fasziotomie wird gelegentlich eine Vorwölbung des darunter liegenden Muskels durch die Faszienlücke beobachtet, eine sogenannte Muskelhernie [39]. Diese präsentiert sich als Weichteilschwellung, welche bei Anspannung des entsprechenden Muskels - am häufigsten des *M. tibialis anterior* - noch prominenter wird; gelegentlich wird eine Muskelhernie auch erst dann sicht- / tastbar. Neben der postoperativen Muskelhernie kann diese auch als eigenständige Pathologie auftreten oder begleitend bei einem CECS vorliegen, wahrscheinlich als Ausdruck einer chronischen Druckerhöhung im Kompartiment [32]. Die klinische Präsentation kann von asymptomatisch bis schmerzhaft reichen, wobei die Ursachen hierfür noch nicht vollständig geklärt sind. Als mögliche Erklärungen der Symptomatik werden unter anderem die temporäre Einklemmung von Muskelgewebe in der Faszienlücke, die längerfristig zu lokalisierten Nekrosen führen kann, oder auch die Kompression von oberflächlichen Nerven diskutiert. Neben konservativen Maßnahmen wie Analgesie, Kompressionsbehandlung und Physiotherapie sowie unterschiedlichen Ansätzen zur Wiederherstellung der Faszie besteht die am weitesten verbreitete Therapie einer symptomatischen Muskelhernie in der elektiven, komplettierenden Fasziotomie des Kompartiments [40,45].

1.1.6 Muskelkraftmessung mittels „hand-held dynamometer“

Muskelkraftmessung kann auf verschiedene Weisen erfolgen. Während große, stationäre Dynamometer die Muskelkraft sowohl isometrisch als auch dynamisch messen können, werden im klinischen Alltag, v.a. in den Bereichen Physiotherapie, Physikalische Medizin oder Rehabilitation, häufig sogenannte „hand-held dynamometer“ (HHD) eingesetzt. Diese kleinen, für den Handbetrieb ausgelegten Kraftmesszellen gibt es einerseits in Form eines Druckmessers, der vom Untersucher direkt gegen die zu untersuchende Muskelgruppe gedrückt wird, andererseits auch als Zugkraftmesser. Bei Letzterem wird die Kraft über eine Manschette auf die Messzelle übertragen. Vorteile von HHDs sind ihre einfache und schnelle Anwendung, geringe Größe und Tragbarkeit sowie die im Vergleich zu stationären Dynamometern niedrigeren Anschaffungskosten (ca. 1.000€ vs. ca. 40.000€). Schlussendlich spricht auch die hohe Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit denen stationärer Geräte bei der isometrischen Kraftmessung für den Einsatz von HHDs. Dies wurde von Stark et al. in einer Metaanalyse von 19 Studien gezeigt, die

sich jeweils mit dem direkten Vergleich der Ergebnisse beider Arten von Messgeräten an unterschiedlichen Muskelgruppen beschäftigten [46]. Während 17 dieser Studien für eine gute Reliabilität sprachen, fielen zwei Arbeiten auf, bei welchen das Ergebnis gegen den Einsatz von HHDs sprach (Korrelationskoeffizient nach Pearson r=0,28-0,43 für Schulterabduktoren; r=0,43-0,45 für Knieextensoren). Die Autoren der Metaanalyse erklärten dies durch Mängel in der Durchführung der Kraftmessung bei den entsprechenden Studien. Insgesamt wurde jedoch eine gute Vergleichbarkeit der Messergebnisse der beiden Methoden festgestellt, wobei der Großteil der ausgewerteten Studien einen hohen positiven Korrelationskoeffizienten nach Pearson aufwies, was einen direkten Zusammenhang der gemessen Kraftwerte der beiden Methoden darstellte. Zwei der Arbeiten ermittelten zudem einen hohen „intraclass correlation coefficient“ (ICC), ein Maß, um Ergebnisse zweier oder mehrerer Gruppen miteinander zu vergleichen, für die Knieflexoren bzw. -extensoren (ICC=0,83-0,85 bzw. ICC=0,80).

Einige Arbeiten veröffentlichten bereits Normwerte für die maximale isometrische Muskelkraft (MIMK) in verschiedenen Muskelgruppen, u.a. speziell für die Kraftmessung mittels HHD. Während Huber et al. die Normperzentilen für Frauen und Männer getrennt festlegten, zeigten Spink et al. den Unterschied der MIMK zwischen jüngeren und älteren Proband*innen auf [47,48]. Stoll et al. bestimmten diesbezüglich Regressionsgleichungen zur Berechnung des Idealwerts für ein bestimmtes Geschlecht und Alter [49]. Die Normwerte korrelierten daneben aber auch signifikant mit Größe und Gewicht der Proband*innen, wie mehrere Studien zeigten [50–52]. Diverse Arbeiten beschäftigten sich mit Kraftwerten des Normalkollektivs, um bei bestimmten neurologischen Erkrankungen, z.B. nach Schlaganfall oder bei Diagnosen wie Zerebralparese oder amyotrophe Lateralsklerose (ALS) anhand eines einmalig gemessenen Wertes prognostische Aussagen treffen zu können [52–54]. Aus diesen Ergebnissen konnten auch allgemeine Aussagen zur Muskelkraft in Bezug auf Alter und Geschlecht abgeleitet werden: So ist die MIMK von Männern generell größer als die von gleichaltrigen Frauen, wobei die geschlechtsspezifischen Kraftunterschiede der oberen Extremität bedeutsamer sind als die der unteren. Die MIMK erreicht im Alter von 20 bis 30 Jahren einen Höhepunkt und nimmt geschlechtsunspezifisch mit zunehmendem Alter ab. Ein Kraftwert kann als grundsätzlich als auffällig gering betrachtet werden, wenn dieser eine deutliche Verminderung zu einer Voruntersuchung aufweist. Liegen keine Messwerte zum

Vergleich vor, wird von Huber et al. die 10%-Normperzentile als Grenze zur klinisch auffälligen Kraftminderung angesehen [47].

1.1.6.1 Reliabilität von HHDs

Bei gewissen Muskelgruppen, z.B. der Schultermuskulatur, lassen sich mit HHDs sehr hohe Intratester-Reliabilitäten, also hohe Messgenauigkeiten bei wiederholten Messungen desselben Untersuchers in einer oder mehreren Sitzungen, erzielen [55,56]. Auch die Intratester-Reliabilität für die DE im OSG ist mit einem ICC von durchschnittlich 0,86 bzw. 0,90-0,91 sehr gut [48,57].

Die Intertester-Reliabilität hingegen, also die Messgenauigkeit bei Wiederholung einer Messung durch unterschiedliche Untersucher, gilt als Schwachpunkt von HHDs im Vergleich zu stationären Kraftmessern. Die Angaben zum ICC variieren hierbei stark (ICC=0,64-0,65 bzw. ICC=0,81-0,88 für die DE im OSG) [47,48]. Bohannon und Andrews zeigten im Gegensatz zu dieser Annahme eine sehr gute Intertester-Reliabilität für einzelne Muskelgruppen, darunter auch die Dorsalextensoren im OSG (r=0,91) [58]. In dieser Studie konnten jedoch alle Untersucher viel Erfahrung im Bereich der Muskelkraftmessung mit HHDs aufweisen. Bohannon fasste wiederum einige Jahre später in einer Metanalyse 18 Studien zur Intertester-Reliabilität von HHDs zusammen, in welcher er darstellte, dass die meisten Studien einen Reliabilitätskoeffizienten von >0,7 aufwiesen [59]. Da die Messungen jedoch durch ein Missverhältnis zwischen Kraft des Untersuchers und Kraft der Proband*innen bzw. der untersuchten Muskelgruppen stark beeinflusst wurden, empfahl er für alle Settings mit mehreren Untersuchern die Überprüfung der Intertester-Reliabilität. Weitere Publikationen zeigten zudem eine Abhängigkeit der Intertester-Reliabilität von Griffstärke, Geschlecht und Körpergewicht des Untersuchers [60,61]. Da HHDs vom Untersucher gegen die aufgebrachte Kraft der Proband*innen gehalten werden, wurden Messungen immer dann genauer, wenn ein Untersucher deutlich stärker als die zu untersuchende Muskelgruppe war. Diese Auswirkungen zeigten sich besonders dann, wenn weibliche Untersucherinnen starke Muskelgruppen (z.B. die Knieextensoren) von männlichen Probanden untersuchten. Da die Dorsalextensoren im OSG, wie auch die Handgelenksextensoren, zu den schwächeren Muskelgruppen des Körpers zählen, wurden diese allerdings nicht maßgeblich durch diese Faktoren beeinflusst.

1.1.6.2 Durchführung der isometrischen Maximalkraftmessung mit HHDs im OSG

Bei Muskelkraftmessungen mit HHDs zeigte sich eine genaue Definition und Einhaltung des Prozederes als besonders wichtig. Bohannon erwähnte in einer Metaanalyse zur isometrischen Maximalkraftmessung mittels HHD die Möglichkeit, durch eine Fixierung der Kraftmesszelle mittels eines Gurtes eventuelle Kraftdefizite auf Seiten des Untersuchers auszugleichen [59]. Davis et al. zeigten diesbezüglich, dass durch Fixierung des HHD an einer eigens dafür angefertigten Metallkonstruktion eine signifikant größere MIMK der PF im OSG erzielt werden konnte als durch rein „manuelle“ Messungen (324,6 N vs. 277,4 N) [62]. Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse erwies sich in beiden Messreihen als exzellent (mit Fixierung: ICC=0,96; ohne Fixierung: ICC=0,98). Die Autoren diskutierten, dass insbesondere bei der Kraftmessung an starken Proband*innen bzw. Muskelgruppen eine Vorrichtung zur Fixierung des HHD bessere Ergebnisse erzielen könne, während bei schwächeren Proband*innen oder Muskelgruppen, wie den Dorsalextensoren im OSG, beide Methoden als äquivalent zu betrachten seien.

Die in Studien zur Messung der MIMK mittels HHD zu findenden Angaben zum Mess-Prozedere ähnelten einander jeweils stark: In allen Studien wurde den Proband*innen vor der eigentlichen Kraftmessung die Bewegung, welche später durchführt werden sollte, genau erklärt. Anschließend wurden sie, sobald die zu untersuchende Körperregion durch einen nicht-elastischen Gurt an der Untersuchungsliege befestigt war, aufgefordert, ihre Muskelkraft innerhalb von 1-2 Sekunden auf ein Maximum zu erhöhen. Der Untersucher hielt dabei mit seiner eigenen Kraft dagegen, sodass die aufgebrachte MIMK der Proband*innen an der Kraftmesszelle abgelesen werden konnte. Diese sollte für etwa 3-5 Sekunden gehalten werden, bevor die Messung beendet wurde. Bei dieser Methode der Kraftmessung, dem sogenannten „make“-Test, brachten die Proband*innen die gesamte Kraft auf. Im Gegensatz dazu wurde in der Literatur auch der „break“-Test beschrieben, bei welchem der Untersucher eine der Proband*innen gehaltene Position mit seinem Messgerät „durchbrach“. Stratford und Balsor zeigten, dass sich mittels „break“-Test grundsätzlich höhere Kraftwerte erzielen ließen [63]. Allerdings war dieser in Bezug auf wiederholte Messungen weniger reliabel als der „make“-Test (ICC=0,87 vs. ICC=0,95). Im Vergleich mit den jeweiligen Tests an einem stationären Dynamometer zeigten beide Methoden eine ähnlich hohe Reliabilität.

Zur Messung der MIMK mit HHD wurde in der Mehrzahl der verfügbaren Quellen, u.a. zur Bestimmung von Normwerten, der „make“-Test eingesetzt [47,48,56–58].

Zur Vereinheitlichung der Messtechnik gilt es auch die Stellung der umgebenden Gelenke zu beachten. Durch die Vorspannung des *M. triceps surae*, welche sich je nach Stellung des Kniegelenkes ändert, kann beispielsweise die Kraft der DE im OSG beeinflusst werden. Eine sitzende Position mit gebeugtem Knie findet hauptsächlich bei stationären Dynamometern und dynamischer Kraftmessung Anwendung. Mehrere Studien zur isometrischen Maximalkraftmessung der DE und PF wurden, um Einflüsse der Schwerkraft möglichst auszuschalten, in Rückenlage, bei gestrecktem Knie und mit dem OSG in Neutral-Null-Stellung durchgeführt [57,64–66]. Die Messung mit einem HHD schien zudem leichter durchführbar und reproduzierbar zu sein, wenn die jeweils zu untersuchende Extremität dabei durch einen Gurt an der Untersuchungsliege fixiert war. Geboers et al. zeigten, dass die Stellung des OSG während bei der isometrischen Maximalkraftmessung einen signifikanten Einfluss auf die Messergebnisse hatte [54]. Bei Messungen jeweils in 0° (Neutral-Null-Stellung) und in 30° PF wurden in der 30°-Stellung signifikant höhere Kraftwerte als in 0°-Stellung gemessen. Huber et al. untersuchten die DE und PF wie die meisten oben zitierten Studien zur isometrischen Maximalkraftmessung in Rückenlage, mit gestrecktem Knie und in Neutral-Null-Stellung im OSG [47].

1.1.7 Bestimmung der ROM im OSG

Die präzise Bestimmung der ROM im OSG erfolgt mittels Goniometer. Im Sitzen und bei frei hängenden Beinen wird dieses über dem lateralen Malleolus der Proband*innen platziert und ein Arm in der Beinachse ausgerichtet. Diese wird klinisch als gedachte Linie zwischen *Malleolus lateralis* und Fibulaköpfchen definiert. Der andere Arm des Goniometers wird parallel zum Schaft des 5. Metatarsale ausgerichtet. Ein 90°-Winkel auf dem Goniometer entspricht der klinischen Neutral-Null-Stellung [64].

Die physiologische ROM im OSG beträgt nach Neutral-Null-Methode für DE / PF: 20-30° / 0° / 40-50° [67].

1.1.8 Physiologische Seitendifferenz von ROM und Kraft im OSG

Die ROM der DE und PF im OSG weist laut mehreren Studien zur Erhebung von Normperzentilen an gesunden Proband*innen verschiedener Geschlechts- und Altersgruppen keinen signifikanten Unterschied zwischen rechter und linker, bzw. dominanter und nicht-dominanter, Seite auf [64,68–70].

Bezüglich der Fragestellung, ob bei gesunden Proband*innen eine natürliche Seitendifferenz der MIMK im OSG vorliegt, kommen hingegen verschiedene Studien zu unterschiedlichen Ergebnissen:

In einer Publikation von Sepic et al. wurde bei weiblichen Probandinnen kein signifikanter Kraftunterschied zwischen dominanter und nicht-dominanter Seite gefunden [64]. Bei männlichen Probanden hingegen war die Kraft jeweils auf der nicht-dominanten Seite signifikant größer als auf der dominanten Seite (DE: $p<0,01$; PF: $p<0,05$). Die Dominanz des Beines wurde für diese Studie seitengleich zur Dominanz der Hand definiert, also war bei Rechtshändern das linke Bein stärker und umgekehrt.

Moraux et al. stellten hingegen eine messbare Seitendifferenz an gesunden Frauen wie Männern gleichermaßen fest [71]. Die Definition der dominanten Seite erfolgte hier ebenso seitengleich, das dominante Bein lag also per definitionem auf derselben Seite wie die dominante Hand. Die Differenz der DE- und PF-Kraft zeigte sich bei Rechtshändern signifikant zugunsten des dominanten rechten Beines. Auch bei Linkshändern war das rechte Bein, hier also das nicht-dominante, stärker; letzteres Ergebnis war allerdings nur für die PF signifikant.

Valderrabano et al. wiederum untersuchten an 12 Proband*innen einzelne Muskeln der unteren Extremität im Seitenvergleich mittels isometrischer Kraftmessung und Elektromyogramm (EMG) [69]. Die Dominanz wurde bei dieser Studie darüber festgelegt, auf welchem Bein die Proband*innen bevorzugt einbeinig springen würden. Im EMG findet sich bei Kontraktion von Typ II-Muskelfasern (fast-twitch-Fasern) typischerweise eine hohe Frequenz, während sich bei Typ I-Fasern (slow-twitch-Fasern) eine tiefere ableiten lässt. Für den *M. tibialis anterior* zeigten sich auf der dominanten Seite signifikant niedrigere mittlere EMG-Frequenzen (148,6 Hz) als auf der nicht-dominanten (157,8 Hz) ($p<0,05$). Dies könnte den Autoren zufolge darauf hindeuten, dass sich bei maximaler Kontraktion auf der dominanten Seite

mehr Typ I-Fasern oder aber auf der nicht-dominanten mehr Typ II-Fasern als auf der jeweiligen Gegenseite kontrahieren. Hieraus lässt sich allerdings nur bedingt auf die isometrisch aufgebrachte Maximalkraft schließen. Diese wurde aber parallel gemessen und fiel für die DE im OSG auf der nicht-dominanten Seite um etwa 10,0% geringer aus als auf der dominanten (24,8 vs. 27,3 Nm). Diese Kraftdifferenz erwies sich allerdings als nicht signifikant. Lediglich für die PF konnte in diesem Zusammenhang eine signifikante Seitendifferenz von 18,3% zugunsten der dominanten Seite gezeigt werden ($p<0,05$).

Schließlich fanden sich auch Studien, welche bezüglich der Kraft im OSG keine Seitendifferenz feststellen konnten. So bestimmten Geboers et al. im Rahmen einer Immobilisationsstudie Referenzwerte der MIMK der DE an 72 gesunden Proband*innen mittels eines stationären Dynamometers und fanden dabei keine signifikanten Differenzen zwischen rechtem und linkem bzw. dominantem und nicht-dominantem Bein [54]. Ebenso konnten Guillén-Rogel et al. mittels eines speziell angefertigten stationären Dynamometers keine signifikanten Kraftunterscheide zwischen dominanter und nicht-dominanter Seite zeigen [70]. Die Dominanz wurde in beiden Studien darüber bestimmt, mit welchem Bein die Proband*innen bevorzugt einen Ball schießen würden.

Verschiedene Studien mit vergleichbarer Methodik kamen zu höchst unterschiedlichen Ergebnissen. Somit ließ sich bezüglich der physiologischen Seitendifferenz der DE-Kraft keine abschließende Aussage über eine mögliche Verwendung der Gegenseite als Referenz treffen.

2 Studienziel und Fragestellung

Neben ihrer Relevanz in der Therapie des akuten und chronischen KS spielen Fasziotomien an der unteren Extremität auch im Rahmen von elektiven Tibiaosteotomien eine wichtige Rolle. Ziel dieser Studie war es, erstmals Spätfolgen der prophylaktischen anterioren Fasziotomie im Rahmen von Tibiaosteotomien zur Längen-, Achs- und/oder Torsionskorrektur mittels Marknagel systematisch zu erfassen und festzustellen, ob sich nach diesem operativen Procedere langfristig Funktionseinschränkungen insbesondere der DE im OSG erheben lassen. Diese sollte sowohl subjektiv mittels Fragebogen als auch objektiv mittels Kraftmessung und ROM-Bestimmung analysiert werden. Die Ergebnisse sollten eine erste Nutzen-Risiko-Abwägung zwischen der Vorbeugung eines KS und den festgestellten Folgen der prophylaktischen anterioren Fasziotomie erlauben.

Somit waren folgende Zielsetzungen definiert worden:

1) Zu erheben, ob zum Nachuntersuchungszeitpunkt subjektive Funktionseinschränkungen vorlagen und quantifizieren, wie stark beeinträchtigend diese waren.
2) Anhand objektiver Parameter zu untersuchen, ob entsprechende Eingriffe langfristig eine messbare Funktionsminderung im OSG mit sich brachten.
3) Mittels Subgruppenanalysen weitere Erkenntnisse zur Pathogenese subjektiver Beeinträchtigungen zu gewinnen.
4) Weitere, im Rahmen der Fasziotomie möglicherweise relevante, Parameter wie das Vorliegen von Sensibilitätsstörungen und Muskelhernien zu erheben.

Die Relevanz dieser Fragestellungen ergibt sich dadurch, dass eine Fußheberschwäche je nach Ausprägung eine durchaus relevante Einschränkung im Alltag darstellt, die bis zu einem sogenannten Fallfuß mit hieraus resultierender Gehbehinderung reichen kann. Bereits eine Muskelschwäche ohne klinische Fallfußsymptomatik korrelierte signifikant mit vermehrten Stürzen im Alter [72–75]. Dem gegenüber steht die äußerst relevante postoperative Komplikation des akuten anterioren KS mit seinen extremitäten- bis lebensbedrohlichen Folgeschäden, was die Durchführung einer prophylaktischen Fasziotomie im klinischen Alltag bis dato rechtfertigt. Sollte sich allerdings zeigen, dass durch das kombinierte operative

Vorgehen von Tibiaosteotomie und prophylaktischer Fasziotomie für die Patient*innen größere funktionelle Einschränkungen in relevanter Häufigkeit verursacht werden, müsste das nach Studienlage weitgehend unklare Risiko des akuten KS bei entsprechenden Eingriffen sorgsam gegen das funktionelle Defizit abgewogen und die Praxis der prophylaktischen anterioren Fasziotomie kritisch überdacht und mit weiteren Studien analysiert werden.

3 Material und Methoden

3.1 Patientenkollektiv

3.1.1 Einschlusskriterien und Patientensuche

Für die Studie kamen grundsätzlich alle Patient*innen in Frage, bei welchen eine prophylaktische Fasziotomie des anterioren Kompartiments im Zuge einer Längen-, Achs- und/oder Torsionskorrektur der Tibia mittels Marknagel durchgeführt wurde. Anhand von OP-Berichten konnte dies für alle Fälle nachvollzogen werden. Als Beginn der Datenerhebung wurde der OP-Zeitpunkt ab einschließlich Oktober 2003 festgelegt, da die prophylaktische Fasziotomie seit diesem Zeitpunkt von der Arbeitsgruppe 3D-Chirurgie (vor 2009 „Arbeitsgruppe Sonderimplantate“) an der Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie (bis 2021 „Klinik für Allgemeine, Unfall- und Wiederherstellungschirurgie“) der LMU München routinemäßig bei dieser Art von Eingriffen durchgeführt wurde. Alle Eingriffe wurden von demselben Operateur, Dr. med. P.H. Thaller, M.Sc., Leiter der Arbeitsgruppe, durchgeführt.

Zur Suche der in Frage kommenden Fälle und Erstellung einer Datenbank aller entsprechenden Behandlungen dienten das Klinische Arbeitsplatzsystem (KAS) des LMU Klinikums der Universität München, die abteilungseigene Dokumentation sowie OP-Berichte.

Die Datenbank enthielt für den Zeitraum von Oktober 2003 bis inklusive April 2018 143 Patient*innen (16 Patient*innen wurden beidseitig operiert, somit 159 Fälle), bei welchen eine prophylaktische Fasziotomie des anterioren Kompartiments im Rahmen einer Tibiaosteotomie durchgeführt wurde.

3.1.2 Ausschlusskriterien

Von der Studie a priori ausgeschlossen wurden Patient*innen mit einer, bereits im Rahmen der Aufnahmeuntersuchung präoperativ dokumentierten, Funktionsminderung im OSG der operierten Extremität im Vergleich zur Gegenseite (Unterschied der Kraftgrade nach Janda und/oder ROM-Seitendifferenz von >5°).

Dies konnte anhand von prä- und postoperativ angelegten Untersuchungsprotokollen nachvollzogen werden.

Zudem wurden Patient*innen mit muskuloskelettalen oder neurologischen Erkrankungen, bei welchen ein Vergleich von Kraft oder ROM zur Gegenseite oder auch mit Normwerten nicht sinnvoll erschien, ausgeschlossen. Hierzu zählten beispielsweise neuropathische Erkrankungen, Muskeldystrophie, Poliomyelitis, Rachitis, Morbus Blount oder Fibulaaplasie. Auch Patient*innen mit Zustand nach posttraumatischem KS, Arthrodesen im Sprunggelenk oder bereits präoperativ bestehenden Muskelhernien wurden ausgeschlossen.

69 Patient*innen (73 Fälle) wurden nach Anwendung dieser Kriterien ausgeschlossen (vgl. Abb. 5).

3.1.3 Patientenrekrutierung und Ethikvotum

Zur Teilnahme an der Studie wurden alle Patient*innen aus der Datenbank eingeladen, auf welche die aufgeführten Ausschlusskriterien nicht zutrafen. Somit konnten 74 Patient*innen (86 Fälle) anhand eines ausführlichen postalischen Anschreibens und/oder telefonisch kontaktiert werden. Da für viele Patient*innen die Anreise, teilweise aus ganz Deutschland und Europa, für die klinische Nachuntersuchung zu Studienzwecken nicht möglich war, beschränkten sich diese auf ein Ausfüllen des mitgeschickten Fragebogens.

Von den Patient*innen, mit welchen Kontakt aufgenommen werden konnte, erklärten sich 34 (41 Fälle) zur Teilnahme an der Studie bereit (vgl. Abb. 5).

Ein positives Votum der Ethikkommission der LMU München war zuvor eingeholt worden (Projekt Nr. 18-527; siehe Anhang: 8.4). Die erhobenen Daten wurden nach Einverständnis zur Teilnahme irreversibel anonymisiert ausgewertet. Der Großteil der teilnehmenden Patient*innen war zum Zeitpunkt der Nachuntersuchung volljährig und einverständnisfähig. Bei zwei noch nicht volljährigen Patient*innen wurde das Einverständnis neben den Patient*innen selbst auch von den Erziehungsberechtigten eingeholt.

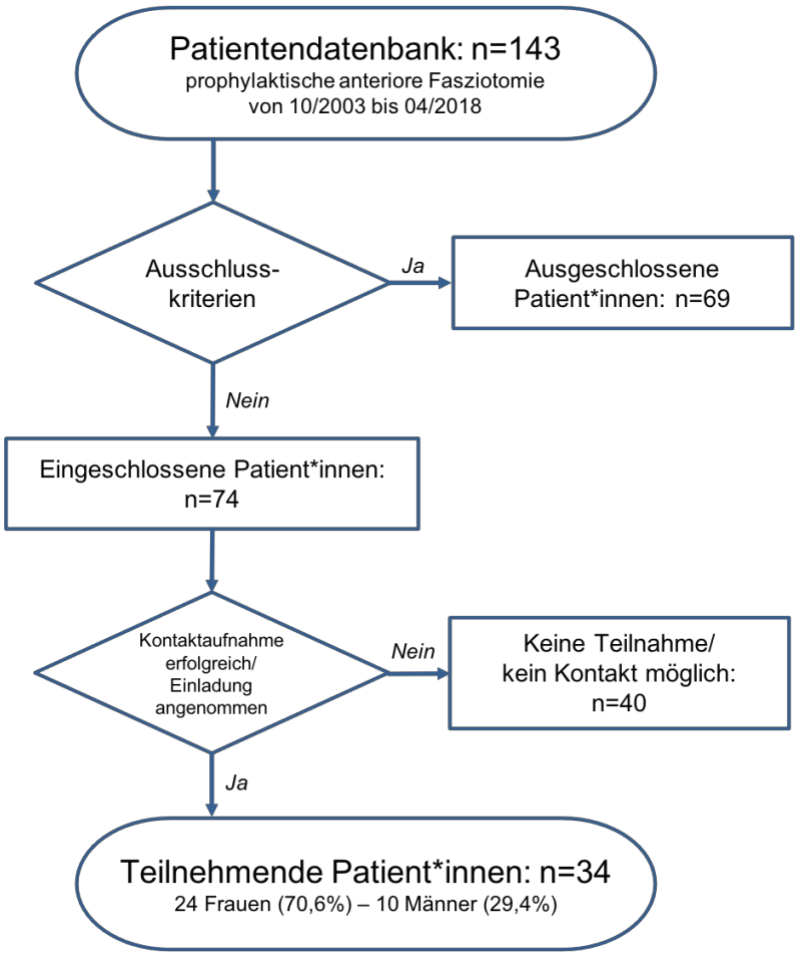


Abbildung 5 - Patientenrekrutierung

3.1.4 Studienkollektiv

Das Studienkollektiv setzte sich aus 34 Patient*innen zusammen, davon 24 Frauen (70,6%) und 10 Männer (29,4%). In Abbildung 6 wurde deren Aufteilung hinsichtlich der Art der Teilnahme an der Studie genauer dargestellt.

Insgesamt ergaben sich somit 41 Fälle von prophylaktischen Fasziotomien, bei welchen das langfristige subjektive Outcome mittels Fragebogen untersucht wurde (28 weiblich (68,3%), 13 männlich (31,7%)). 23 dieser Fälle wurden zudem auch objektiv nachuntersucht (15 weiblich (65,2%), 8 männlich (34,8%)).

In 16 Fällen wurde die Fasziotomie im Rahmen einer reinen Achs- und/oder Torsionskorrektur mittels Marknagel (Expert Tibia Nail ETN®) durchgeführt. In den anderen 25 Fällen wurden verschiedene Marknägel zur Kallusdistraktion eingebracht (7x Fitbone TAA®, 4x ISKD®, 1x Phenix®, 11x Precice®, 2x LON).

*Abbildung 6 - Übersicht über die ausgewerteten Patient*innen- und Fasziotomiefälle*

3.2 Nachuntersuchung

3.2.1 Messparameter

Im Rahmen der routinemäßigen prä- und regelmäßigen post-operativen Untersuchungen der Patient*innen mit u.a. Bestimmung der Kraftgrade nach Janda konnte eine persistierende Kraftminderung der DE im OSG letztlich nicht detektiert werden. Daher sollte diese Studie mit genaueren Messmethoden im späten Verlauf feststellen, ob die minimal-invasive Fasziotomie für die Patient*innen, auch subjektiv, wirklich keinerlei Nachteile im Alltag mit sich brachte.

Folgende Merkmale wurden in Zusammenarbeit mit einer physiotherapeutischen Mitarbeiterin des Muskuloskelettalen Universitätszentrums München (MUM) der LMU München zur Erhebung definiert:

1) Parameter der subjektiven Einschätzung (Funktionsminderung der Fuß-, Großzehen- und übrigen Zehenhebung sowie Einschränkungen bei den Alltagsaktivitäten Treppe-Hinaufsteigen und -Hinabsteigen)
2) Isometrische Maximalkraftmessung der DE im OSG mittels HHD im Seitenvergleich

3) Aktive ROM der DE im OSG nach Neutral-Null-Methode im Seitenvergleich
4) Sensibilitätsstörungen und Muskelhernien im Bereich des Unterschenkels

3.2.2 Messzeitpunkt

Es wurde festgelegt, dass das operierte Bein bei allen untersuchten Fällen seit mindestens 3 Monaten vollbelastet sein sollte. Abhängig von der Art des Eingriffes konnte die Nachuntersuchung somit frühestens 4-6 Monate postoperativ durchgeführt werden, da auch Phasen der Teilbelastung eingehalten werden mussten. Dieses Vorgehen diente dazu, Einflussfaktoren auf die Messung wie postoperative Schmerzen der Frühphase oder Kraftminderung durch die Teilbelastungsphase soweit wie möglich auszuschalten.

3.2.3 Messgerät

Zur isometrischen Maximalkraftmessung der DE im OSG wurde das Gerät *Force Dial ™ Model FDL 100 Force Gage* (Wagner Instruments, P.O. Box 1217, Greenwich, CT 06836-1217, USA; vgl. Abb. 7) verwendet, welches über Verordnungen der Klinik und Poliklinik für Orthopädie, Physikalische Medizin und Rehabilitation der LMU München von April bis Dezember 2018 für Messungen zur Verfügung stand. Das Gerät wurde zur einfacheren Handhabung bei der Zugkraftmessung zusätzlich mit Handgriffen ausgestattet.

Die duale analoge Messskala erlaubte ein Ablesen der gemessenen MIMK in „kilogram-force“ (kgf). Die maximale Kapazität des Modells *FDL 100* betrug 50 kgf mit einem Fehler von 0,3% des Maximalwertes, also 0,15 kgf.

Kraft wird heute nach geltendem Internationalem Einheitensystem (SI) in der Einheit Newton (N) angegeben. Die ehemals gebräuchliche Angabe „kilogram-force“ ist jedoch sehr anschaulich: sie entspricht der Kraft, die durch die Erdbeschleunigung (9,81 m/s^2) auf eine Masse von 1 kg ausgeübt wird. Sie wurde lange auch mit der Einheit kilopond (kp) bezeichnet.

Es gilt also: 1 kp = 1 kgf = 1 kg x 9,81 m/s^2 = 9,81 N.

Da auch die Normperzentilen der DE-Kraft von Huber et al., welche mit einem ähnlichen Gerät und dieser Studie identischem Messaufbau bestimmt wurden, in kp erhoben wurden, wurde die auf dem HHD angegebene Einheit kgf zur besseren Vergleichbarkeit und Anschaulichkeit beibehalten [47].

Abbildung 7 - Handgehaltener Zugkraftmesser Force Dial ™ Model FDL 100 Force Gage

3.2.4 Messstandort

Alle Nachuntersuchungen erfolgten in den Sprechstundenräumen der Arbeitsgruppe 3D-Chirurgie an der Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie der LMU München. Campus Innenstadt, Nußbaumstraße 20, München, D-80336.

3.2.5 Fragebogen

Siehe Anhang: 8.5

Zur Erhebung von subjektiven Beeinträchtigungen nach prophylaktischer Fasziotomie bei Tibiaosteotomien wurde ein eigens zu diesem Zweck erstellter Fragebogen eingesetzt. Dieser fragte gezielt sowohl die Funktionen der Fußhebermuskulatur als auch Treppensteigen als alltagsrelevanten, funktionellen Parameter ab.

Auf die entsprechenden Fragestellungen, ob das „Fuß - “, „große Zehe - “ und „übrige Zehen Anheben“ zum Erhebungszeitpunkt schwerer fiel als vor der Operation, konnten die Patient*innen auf einer numerischen Ratingskala (NRS) von 1-5 antworten. 1 stand hierbei für „überhaupt nicht zutreffend“, 5 für „voll zutreffend“. Dieser Abschnitt erfragte gesondert die Funktionen der einzelnen Muskeln des anterioren Kompartiments, nämlich die *Mm. tibialis anterior*, *extensor hallucis longus* und *extensor digitorum longus.* Als für den Alltag funktionell wichtige Parameter wurden das „Treppe-Hinaufsteigen“ und „-Hinabsteigen“ in den Fragebogen aufgenommen.

Abschließend wurden die Patient*innen dazu aufgefordert, eventuelle weitere Einschränkungen anzugeben. Hier wurde explizit auf Sensibilitätsstörungen im Bereich der Narben, des Unterschenkels oder des Fußrückens hingewiesen, um eventuelle Schädigungen der sensiblen Endäste des *N. fibularis superficialis* zu erfassen.

Patient*innen, welche beidseitig operiert worden waren, füllten für jedes Bein, also jeden Fall, einen eigenen Fragebogen aus.

3.2.6 Untersuchungsprotokoll

Siehe Anhang: 8.6

Um bei jeder Nachuntersuchung die gleiche Abfolge einhalten und die entsprechenden Zielwerte erheben zu können wurde vorab ein Untersuchungsprotokoll erstellt. Das Vorgehen wurde in Zusammenschau mit dem Operateur und Frau K. Hilpert-Will, medizinisch therapeutische Leiterin am Muskuloskelettalen Universitätszentrum München (MUM) der LMU München, etabliert und konnte durch diverse Literaturquellen in seiner Durchführung und Güte bestätigt werden [47,50,58,61].

Alle Nachuntersuchungen wurden von demselben Untersucher (Doktorand) durchgeführt. Dieser war durch die oben genannten Personen in der Handhabung des Kraftmessgerätes instruiert worden und führte vor der Datenerhebung zu Studienzwecken mehrere Probedurchgänge des Untersuchungsprotokolls an

gesunden Proband*innen durch. Vorab wurde den Patient*innen zudem der Ablauf genau erläutert, um möglichst homogene Untersuchungsbedingungen zu schaffen.

3.2.6.1 Aktive ROM im OSG

Zu Beginn der Nachuntersuchung wurde mithilfe eines Goniometers jeweils beidseitig die ROM im OSG nach der Neutral-Null-Methode bestimmt. Die Patient*innen saßen dazu auf einer Untersuchungsliege, die Beine frei hängend, während das Goniometer über dem *Malleolus lateralis* platziert wurde. Ein Arm wurde in einer gedachten Linie in Richtung des Fibulaköpfchens ausgerichtet, der andere parallel zum Schaft des 5. Metatarsale.

Indem die Patient*innen nun aufgefordert wurden, den Vorfuß ohne Unterstützung möglichst weit anzuheben und abzusenken, konnte jeweils die aktive ROM von DE und PF bestimmt werden. Anschließend wurde in derselben Position durch Druck auf die Fußsohle bzw. den Spann auch die passive ROM ermittelt.

Da in der Literatur ein Zusammenhang zwischen aktiver ROM und Kraft / Funktion der DE gezeigt werden konnte, wurden nur die Messwerte der aktiven DE in die Auswertung übernommen [70].

3.2.6.2 Kraft (MIMK) der DE im OSG

Die Kraft der Fußhebermuskulatur wurde als MIMK einheitlich in Rückenlage gemessen. Die Patient*innen lagen dazu flach und mit nebeneinander ausgestreckten Beinen auf einer Untersuchungsliege. Nur das jeweils zu untersuchende Bein wurde im Bereich der mittleren / distalen Tibia über einen nicht-elastischen Gurt an der Liege fixiert. Anschließend wurde eine Manschette, welche ihrerseits durch einen Haken am Zugkraftmessers befestigt war, auf Höhe der distalen Metatarsalknochen am Fuß der Patient*innen platziert. Das OSG befand sich hierbei in Neutral-Null-Stellung. Um den Einfluss des Kraftunterschiedes zwischen Patient*innen und Untersucher zu minimieren, saß Letzterer auf einem Stuhl am Fußende der Liege und stellte seine Beine mit angewinkelten Knien darauf an. Der Aufbau der Messung wurde in Abbildung 8 schematisch dargestellt.

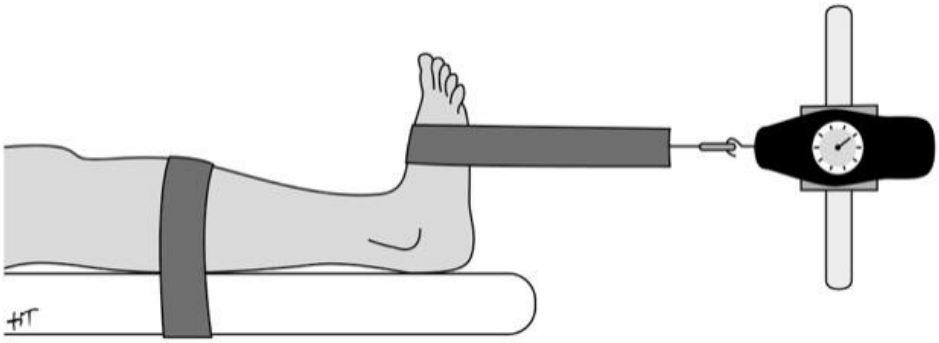


Abbildung 8 - Messaufbau Kraftmessung (LMU, H. Thun ©)

Zur Kraftmessung wurden die Patient*innen dazu aufgefordert, den Zug gegen die Manschette langsam zu erhöhen. Der Untersucher hielt hierbei das OSG in der Ausgangsstellung, also nach Neutral-Null-Methode in 0°, wodurch die Kraft der DE über die Manschette auf den Zugkraftmesser übertragen wurde. Da die Patient*innen bei dieser Form der Messung die gesamte Kraft aufbrachten und der Untersucher nur dagegenhielt, handelte es sich um den sogenannten „make“-Test [56]. Nachdem die Patient*innen nach einigen Sekunden ein Maximum an Zugkraft erreicht hatten, wurde die entsprechende MIMK vom Messgerät abgelesen und die Messung beendet. Anschließend wurde das kontralaterale Bein untersucht. Dieses Prozedere wurde schließlich nochmals für beide Beine wiederholt, sodass aus der Untersuchung jeweils zwei Kraftmessungen pro Seite resultierten. Durch das abwechselnde Messen stand zudem genügend Zeit zur Erholung des untersuchten Beines zur Verfügung.

In die Auswertung wurde schließlich für jede Seite der höhere der beiden gemessenen Kraftwerte übernommen. Oft war der erste Versuch noch zögerlich, sodass meist der zweite Messwert größer war. Das Bilden des Mittelwerts oder häufigeres Messen hätten somit das Ergebnis verfälscht bzw. nicht relevant verbessert.

3.2.6.3 Muskelhernie

Weiter wurde untersucht, ob am operierten Bein eine sicht- / tastbare Muskelhernie des *M. tibialis anterior* durch die Fasziotomielücke vorhanden war. In manchen Fällen kam diese auch erst bei Anspannung der Muskulatur oder im Stehen zum Tragen (vgl. Abb. 9).

Abbildung 9 - Muskelhernien bei Anspannung bzw. im Stehen

3.2.6.4 Zehenspitzen- / Fersengang

Abschließend wurden die Patient*innen noch dazu aufgefordert, jeweils einige Meter auf den Zehenspitzen bzw. den Fersen zu gehen. Da diese Versuche bei allen Fällen unauffällig ausfielen, wurde dieser Punkt nicht eigens ausgewertet.

3.2.6.5 Seitendifferenz / Dominanz

Da sich bezüglich der physiologischen Seitendifferenz der MIMK in der Literatur kein Konsensus feststellen ließ, wurde in dieser Studie auf die Bestimmung des dominanten und nicht-dominanten Beines verzichtet (vgl. Kapitel 1.1.8). Für die Auswertung wurde angenommen, dass die Kraft des jeweils kontralateralen Beines, falls nicht beidseitig operiert, als Referenzwert für die operierte Seite genutzt werden konnte. Für die ROM hingegen bestand diese Problematik nicht, da sich nach ausgiebiger Recherche kein Anhalt auf eine physiologische Seitendifferenz fand.

3.3 Statistische Auswertung

Die erhobenen Parameter und Messwerte wurden zunächst in Microsoft Excel gesammelt und irreversibel anonymisiert. Die statistische Auswertung erfolgte mittels des Statistikprogramms IBM SPSS Statistics, Version 25.0.0.1.

Die deskriptive Darstellung in Tabellenform beinhaltete standardmäßig den Median, den Mittelwert (*M*), die einfache Standardabweichung (*SD*) und das 95%-Konfidenzintervall (*95%-KI*). Im Fließtext wurden Mittelwerte grundsätzlich unter Angabe der einfachen Standardabweichung (± *SD*) angegeben.

Vor einer induktiven Testung wurden die auszuwertenden Parameter mittels Histogrammen und Shapiro-Wilk-Test auf deren Normalverteilung überprüft. Anschließend wurden die Unterschiede der zentralen Tendenzen mittels t-Test (normalverteilt) oder Wilcoxon-Rangsummentest (auch: Mann-Whitney-U-Test) (nicht normalverteilt) verglichen. Bei Testungen mit geringen Fallzahlen wurde grundsätzlich der Wilcoxon-Rangsummentest angewandt. Korrelationen wurden anhand des Korrelationskoeffizienten nach Spearman-Rho berechnet. Für alle induktiven Testungen wurde ein Signifikanzniveau von p=0,05 angenommen.

Die graphische Darstellung der Ergebnisse erfolgte mittels GraphPad Prism, Version 8.0.1.

4 Ergebnisse

4.1 Eigenschaften des Patientenkollektivs

4.1.1 Alter zum OP-Zeitpunkt

Die 41 eingeschlossen Fälle waren zum Zeitpunkt der prophylaktischen Fasziotomie zwischen 13 und 64 Jahre alt. Das mittlere Alter lag bei 24,1 ± 11,3 Jahren (vgl. Tab. 2). Die Nachuntersuchungen fanden durchschnittlich 6,1 ± 4,1 Jahre postoperativ statt.

Tabelle 2 - Alter zum OP-Zeitpunkt nach Geschlecht

	Alter [Jahre]			
Fasziotomiefälle	Median	*M*	*SD*	*95%-KI*
Alle Fälle (n=41)	19,0	24,1	± 11,3	[20,5; 27,6]
Frauen (n=28)	17,5	22,9	± 11,6	[18,3; 27,5]
Männer (n=13)	22,0	26,5	± 10,0	[20,5; 32,6]

4.1.2 Seitenverteilung

Die Seitenverteilung der Fälle war gleichmäßig - Rechts 46,3%, Links 53,7% (vgl. Tab. 3).

Tabelle 3 - Seitenverteilung nach Geschlecht

	Seitenverteilung - Häufigkeit (%)	
	Rechts	Links
Alle Fälle (n=41)	19 (46,3)	22 (53,7)
Frauen (n=28)	12 (42,9)	16 (57,1)
Männer (n=13)	7 (53,8)	6 (46,2)

4.1.3 OP-Indikation

25 (61,0%) der ausgewerteten Fälle erfolgten im Rahmen einer Längenkorrektur (Kallusdistraktion mittels motorisiertem Verlängerungs-Marknagel bzw. in 2 Fällen LON). In 16 (39,0%) Fällen erfolgte die Fasziotomie im Zuge einer reinen Achs- und/oder Torsionskorrektur der Tibia mittels Marknagel (vgl. Tab. 4).

Tabelle 4 - OP-Indikation (Längen- vs. Achs- und/oder Torsionskorrektur) nach Geschlecht

	OP-Indikation - Häufigkeit (%)	
Tibiaosteotomie zur	Längenkorrektur	Achs-, Torsionskorrektur
Alle Fälle (n=41)	25 (61,0)	16 (39,0)
Frauen (n=28)	16 (57,1)	12 (42,9)
Männer (n=13)	9 (69,2)	4 (30,8)

4.1.4 Body-Mass-Index (BMI)

38 der 41 eingeschlossenen Fälle machten Angaben zu Größe und Gewicht. Daraus wurde der Body-Mass-Index (BMI) zur Bewertung des Körpergewichts in Relation zur Körpergröße mittels der Formel BMI = Gewicht [kg] / (Größe [m])^2 errechnet.

Der BMI des gesamten Studienkollektivs siedelte sich mit 22,9 ± 3,9 kg/m^2 im Normbereich an (vgl. Tab. 5).

Tabelle 5 - Body-Mass-Index (BMI) nach Geschlecht

	BMI [kg/m^2]			
Patient*innen	Median	Mittelwert	*SD*	*95%-KI*
Alle Fälle (n=38)	22,5	22,9	± 3,9	[21,5; 24,4]
Frauen (n=25)	21,0	22,1	± 4,2	[20,3; 23,8]
Männer (n=13)	25,5	24,6	± 2,7	[23,0; 26,3]

4.2 Auswertung der subjektiven Einschätzung

Der Fragebogen zur Erfassung einer Funktionsminderung im OSG wurde in n=40 Fällen ausgewertet (27 Frauen (67,5%), 13 Männer (32,5%); vgl. Abb. 10). In einem Fall wurde der Fragebogen nicht komplettiert, weshalb dieser nicht in die Auswertung aufgenommen wurde.

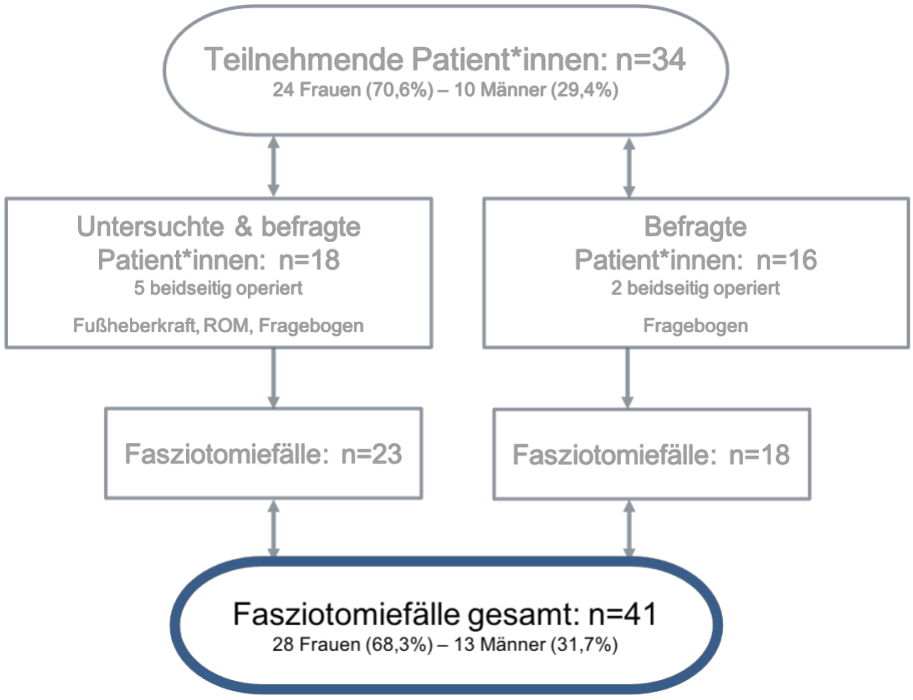


Abbildung 10 - Fasziotomiefälle für die Auswertung der Fragebögen zur Funktion im OSG (fett umrandet). 1 Fragebogen nicht auswertbar, somit n=40

Bei der Beantwortung der Kernfrage, ob durch die prophylaktische Fasziotomie im Rahmen einer Tibiaosteotomie eine subjektive Einschränkung der Fußhebung zustande kam, gaben 78,1% der befragten Fälle keine oder nur geringe Beschwerden (NRS 1-2) an.

In den gesonderten Fragestellungen nach Beschwerden bei der Großzehen- bzw. übrigen Zehenhebung hatten 87,8% bzw. 92,7% der Fälle keine oder geringe Beschwerden (vgl. Tab 6).

Tabelle 6 - Auswertung der Fragebögen zur Funktion der Fußhebung nach Fasziotomie

	Häufigkeit der Antworten (%)				
	1 – „trifft überhaupt nicht zu“				5 – „trifft voll zu“
Es fällt mir schwerer als vor der Operation...	1	2	3	4	5
n=40					
...den Fuß anzuheben	23 (56,1)	9 (22,0)	5 (12,2)	3 (7,3)	0 (0,0)
...die große Zehe anzuheben	35 (85,4)	1 (2,4)	2 (4,9)	1 (2,4)	1 (2,4)
...die übrigen Zehen anzuheben	36 (87,8)	2 (4,9)	0 (0,0)	2 (4,9)	0 (0,0)
...Treppen hinauf zu steigen	24 (58,5)	7 (17,1)	9 (22,0)	0 (0,0)	0 (0,0)
...Treppen hinab zu steigen	19 (46,3)	9 (22,0)	9 (22,0)	2 (4,9)	1 (2,4)

Erhebliche subjektive Beschwerden (NRS 5) traten in nur einem einzelnen Fall im Bereich der Großzehenhebung auf. Die große Mehrheit der Patient*innen gab hier, sowie auch in den beiden anderen abgefragten Funktionen, jedoch keine Beschwerden an (vgl. Abb. 11).

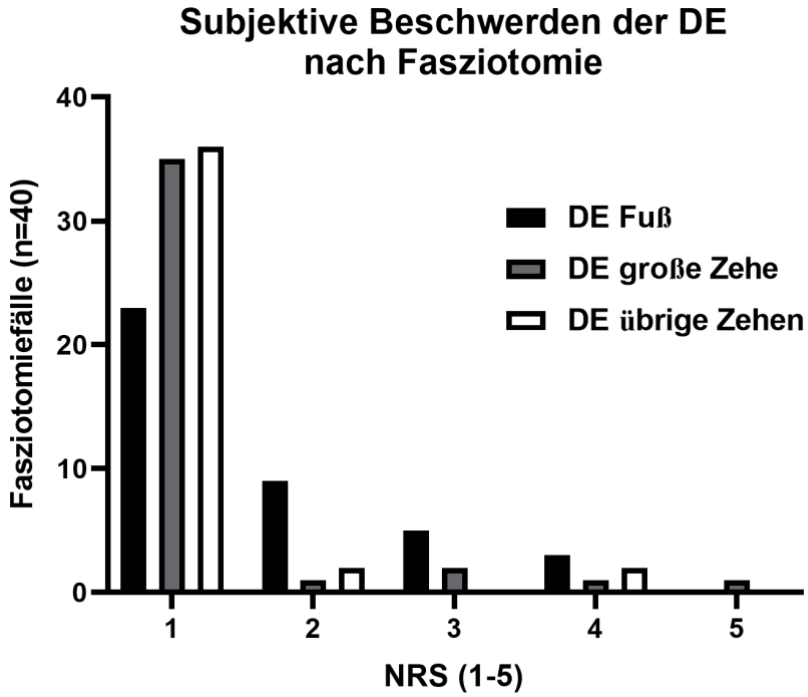


Abbildung 11 - Darstellung der Ergebnisse des Fragebogens zur Erfassung der subjektiven Dorsalextensionsfunktion nach Fasziotomie (NRS 1 = keine Beschwerden – NRS 5 = erhebliche Beschwerden)

In Bezug auf das Treppensteigen zeigten sich stärkere Beschwerden vorwiegend im Bereich des Hinabsteigens (vgl. Abb. 12). Die Mehrheit der Befragten gab jedoch auch bei diesen Fragestellungen keine oder nur geringe Beschwerden (NRS 1-2) an (Treppe Hinaufsteigen: 75,6% - Treppe Hinabsteigen: 68,3%; vgl. Tab. 6).

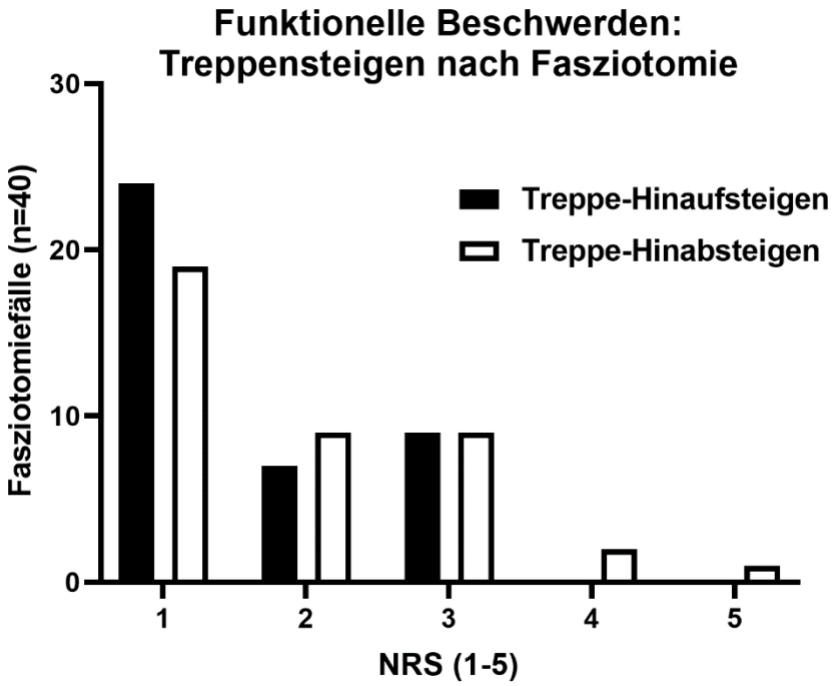


Abbildung 12 - Darstellung der Ergebnisse des Fragebogens zur Erfassung von funktionellen Beschwerden in Form von Treppensteigen (NRS 1 = keine Beschwerden – NRS 5 = erhebliche Beschwerden)

In der Untergruppe der weiblichen Patientinnen wurden stärkere subjektive Einschränkungen (NRS ≥ 3) häufiger angegeben als bei den männlichen Patienten. Die Beobachtung, dass die große Mehrheit der Fälle keine oder nur geringe Einschränkungen hatte war allerdings unabhängig vom Geschlecht der Befragten (vgl. Abb. 13).

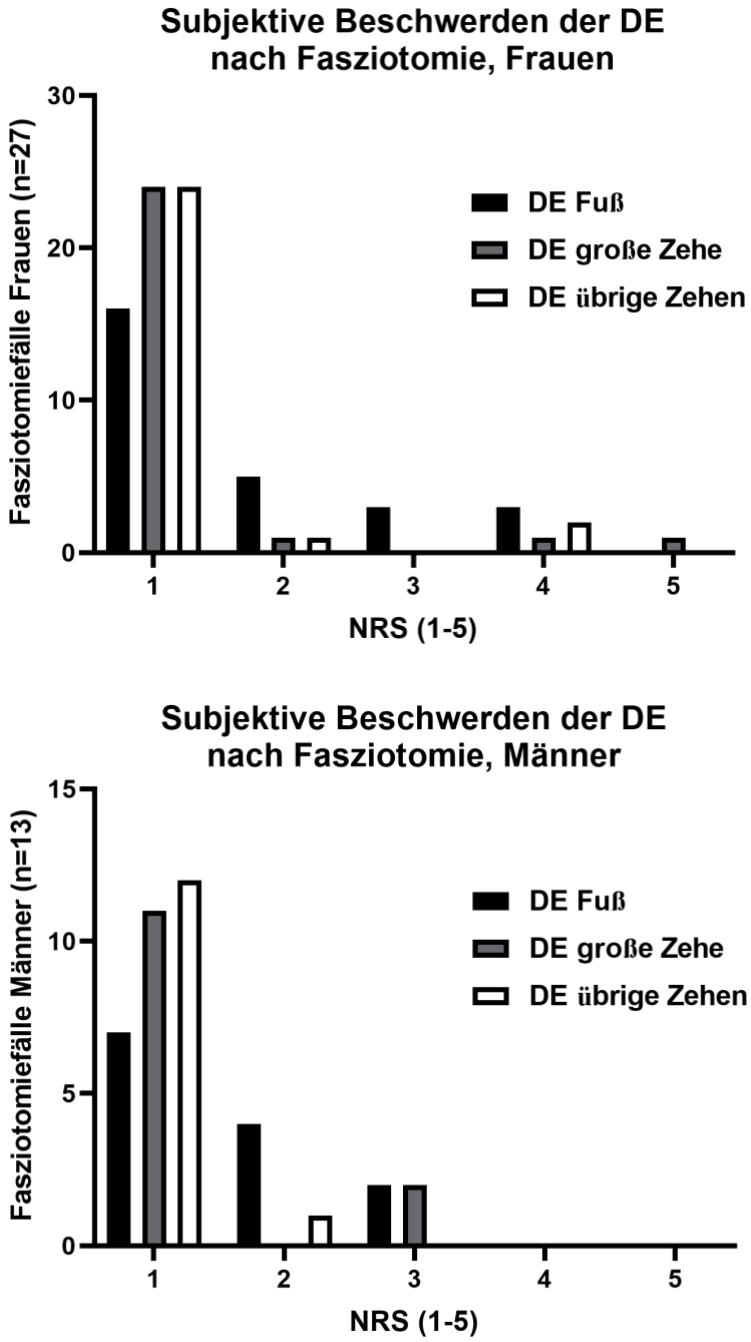


Abbildung 13 - Gegenüberstellung des NRS zur Erfassung der subjektiven Dorsalextensionsfunktion von Frauen (oben) und Männern (unten) (NRS 1 = keine Beschwerden – NRS 5 = erhebliche Beschwerden)

4.3 Auswertung der objektiv gemessenen Parameter

4.3.1 Kraft (MIMK) der DE: OP-Seite vs. 10%-Normperzentile

Die MIMK des operierten Beines wurde gegen die 10%-Normperzentile getestet, welche von Huber et al. bestimmt und als Grenze zur klinischen Auffälligkeit angesehen wurde [47]. Da für Männer und Frauen unterschiedliche 10%-Normperzentilen definiert wurden (Frauen: 13,0 kgf, Männer: 20,0 kgf), wurden beide Geschlechter getrennt gegen den Wert der jeweiligen Perzentile getestet.

Die Fallzahl belief sich auf alle klinisch nachuntersuchten Fälle n=23, darunter 15 Frauen (65,2%) und 8 Männer (34,8%) (vgl. Abb. 14).

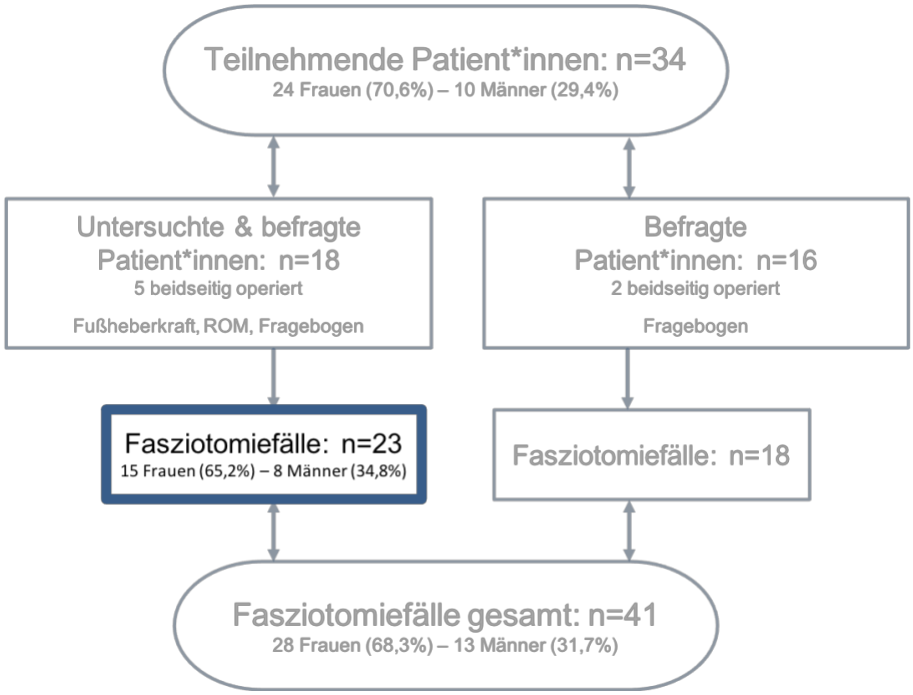


Abbildung 14 - Alle in Bezug auf Kraft (MIMK) und ROM der DE im OSG nachuntersuchten Fasziotomiefälle (fett umrandet)

Die mittlere gemessene MIMK der weiblichen Fälle lag bei 13,3 ± 3,5 [11,4; 15,2] kgf. Das *95%-KI* schloss den Testwert der 10%-Normperzentile (13,0 kgf) ein.
Die mittlere gemessene MIMK der männlichen Fälle lag bei 18,6 ± 5,6 [13,9; 23,2] kgf. Auch hier schloss das *95%-KI* den Testwert (20,0 kgf) ein (vgl. Tab. 7).

Tabelle 7 – Kraft (MIMK) vs. 10%-Normperzentile aus Huber et al.[47] nach Geschlecht

	Kraft (MIMK) OP-Seite [kgf]				
Gruppen	Median	*M*	*SD*	*95%-KI*	10%-Normperzentile[47]
Frauen (n=15)	14,5	13,3	± 3,5	[11,4; 15,2]	13,0
Männer (n=8)	16,3	18,6	± 5,6	[13,9; 23,2]	20,0

Das in der Kraftmessung erhobene Merkmal MIMK der DE im OSG zeigte sich im getesteten Kollektiv (vgl. Abb. 14) für die Untergruppe der weiblichen Patientinnen im Histogramm normalverteilt, nicht jedoch für die der männlichen Patienten (vgl. Abb. 15). Diese Beobachtung wurde durch die induktive Testung auf Normalverteilung mittels Shapiro-Wilk-Test bestätigt (Frauen: p=0,484 - also normalverteilt; Männer: p=0,043 - also nicht normalverteilt). Gemäß des in Kapitel 3.3 definierten Auswertungs-Algorithmus wurde im nächsten Schritt der Wilcoxon-Rangsummentest zur Prüfung signifikanter Unterschiede des Merkmals MIMK zur jeweiligen 10%-Normperzentile verwendet.

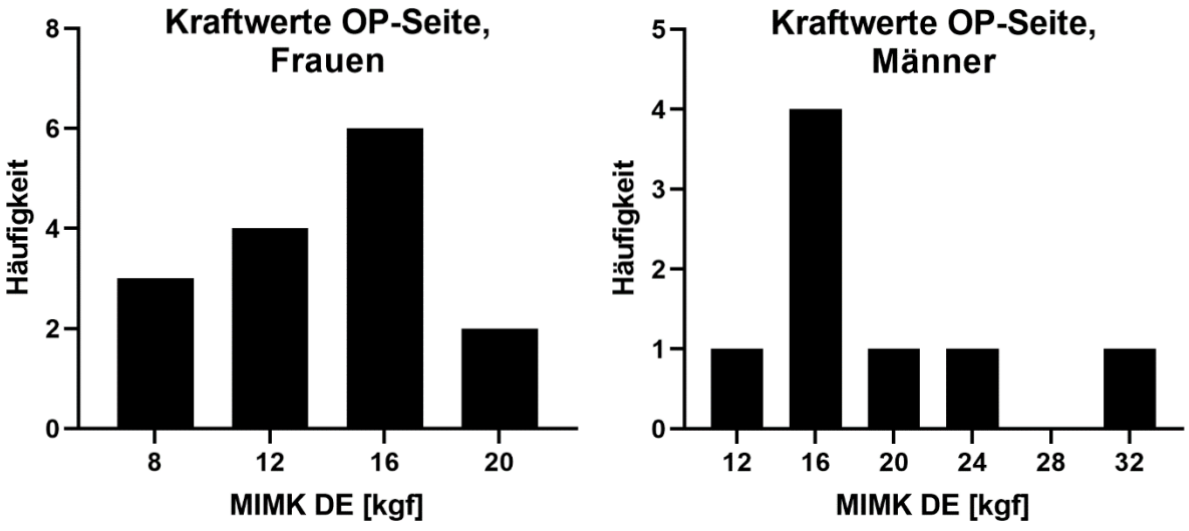


Abbildung 15 - Verteilungen der gemessenen MIMK der DE: links für Frauen (n=15), rechts für Männer (n=8)

Der Mittelwert der gemessenen MIMK unterschied sich für die weiblichen Fälle mit 13,3 kgf nicht signifikant vom Testwert 13,0 kgf (p=0,798). Auch der Mittelwert der männlichen Fälle von 18,6 kgf unterschied sich nicht signifikant vom Testwert 20,0 kgf (p=0,262; vgl. Abb. 16).

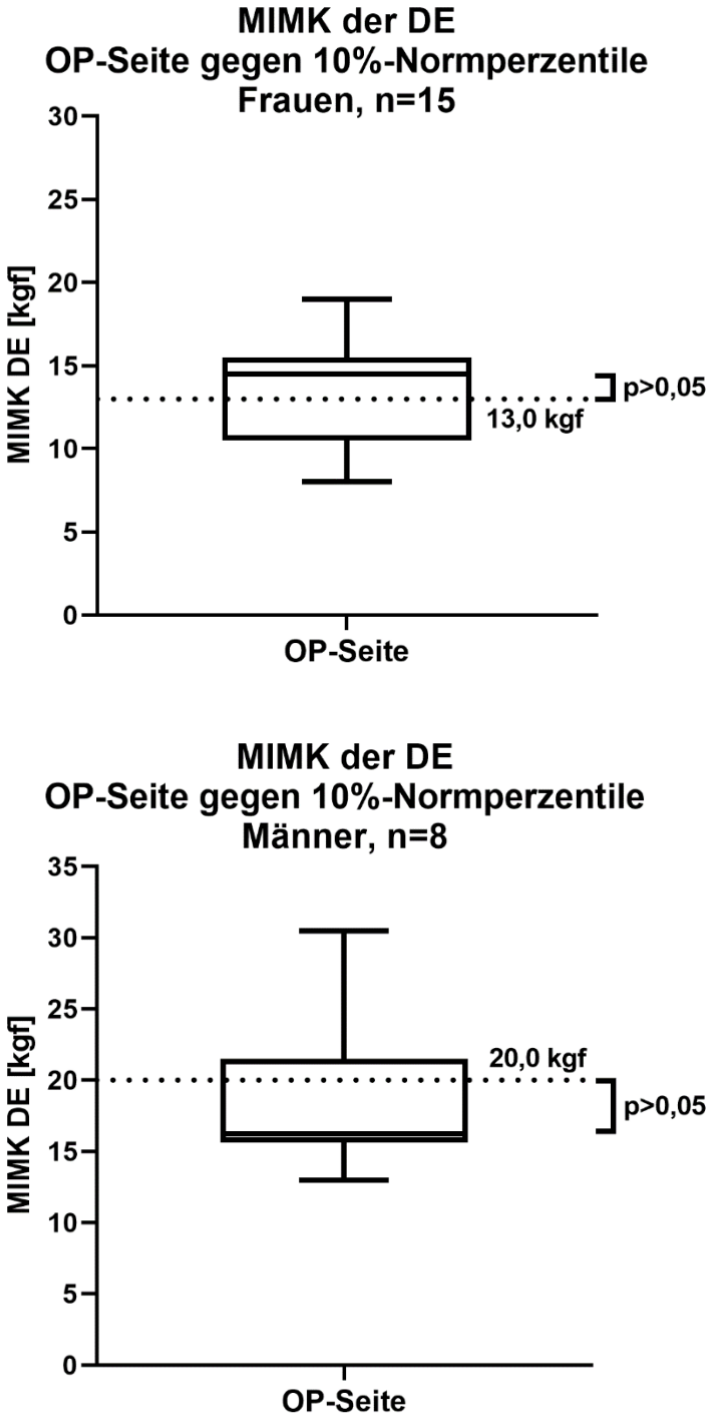


Abbildung 16 - Kraft (MIMK) der DE im OSG der OP-Seite im Vergleich mit der jeweiligen 10%-Normperzentile.
Frauen gegen 13,0 kgf (oben; n.s.); Männer gegen 20,0 kgf (unten; n.s.)

4.3.2 Kraft (MIMK) der DE: OP-Seite vs. Gegenseite

Die Fallzahl für die Auswertung im Seitenvergleich belief sich auf n=11 (vgl. Abb. 17), davon 7 Frauen (63,6%) und 4 Männer (36,4%) - 7 Rechts (63,3%) und 4 Links (36,4%).

Von den insgesamt 23 Fällen, bei welchen MIMK- und ROM-Messungen durchgeführt wurden, konnte die Kraftmessung bei 2 Patient*innen nur einseitig stattfinden. Dies war auf Einschränkungen des kontralateralen Beines zum Untersuchungszeitpunkt zurückzuführen. Ebenso wurden die 5 beidseitig operierten Patient*innen (10 Fälle) ausgeschlossen.

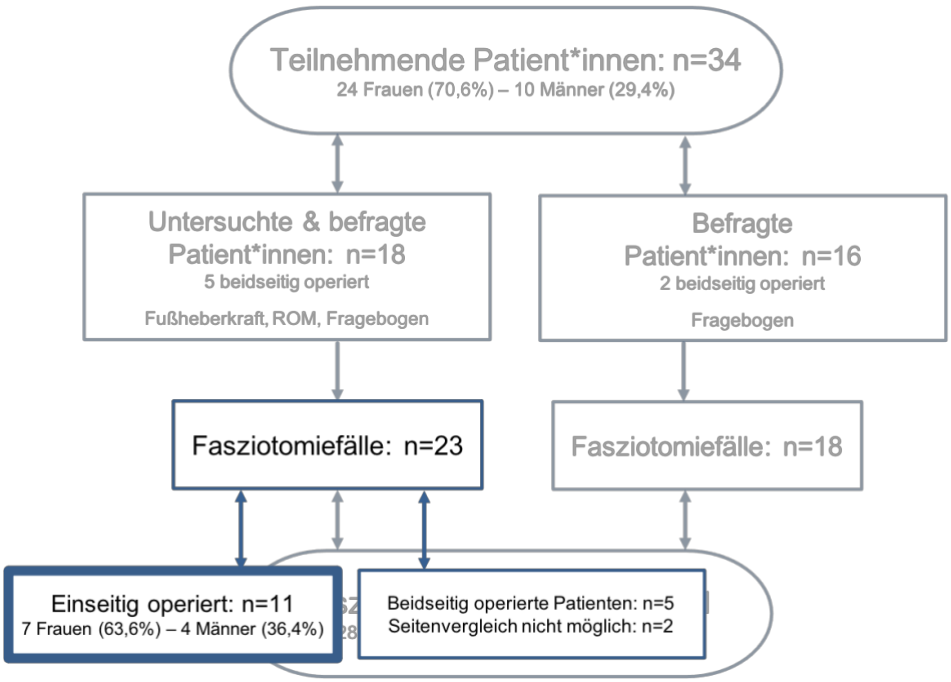


Abbildung 17 - Für den Seitenvergleich der Kraft (MIMK) und der ROM der DE ausgewertete Patientengruppe (fett umrandet)

Die OP-Seite wies im direkten Seitenvergleich eine Differenz der MIMK von im Mittel 1,5 kgf zur gesunden Gegenseite auf (vgl. Tab. 8). Dies entsprach einer Kraftminderung um 8,6%.

Tabelle 8 - Kraft (MIMK) der DE im OSG im Seitenvergleich

	Kraft (MIMK) [kgf]			
Gruppen	Median	*M*	*SD*	*95%-KI*
OP-Seite (n=11)	15,0	16,0	± 6,5	[11,6; 20,3]
Gegenseite (n=11)	16,0	17,5	± 6,3	[13,3; 21,7]

Das erhobene Merkmal MIMK der DE im OSG war für die OP- und die gesunde Gegenseite jeweils normalverteilt, weshalb die zentralen Tendenzen mittels gerichtetem t-Test für gepaarte Stichproben verglichen wurden.

Die Kraftminderung der OP-Seite (16,0 ± 6,5 [11,6; 20,3] kgf) gegenüber der Gegenseite (17,5 ± 6,3 [13,3; 21,7] kgf) um somit 1,5 kgf erwies sich als signifikant (p=0,003; vgl. Abb. 18).

Aufgrund der geringen Fallzahl wurde die Hypothese zusätzlich mit dem Wilcoxon-Rangsummentest überprüft, welcher das Ergebnis bestätigte (p=0,0055).

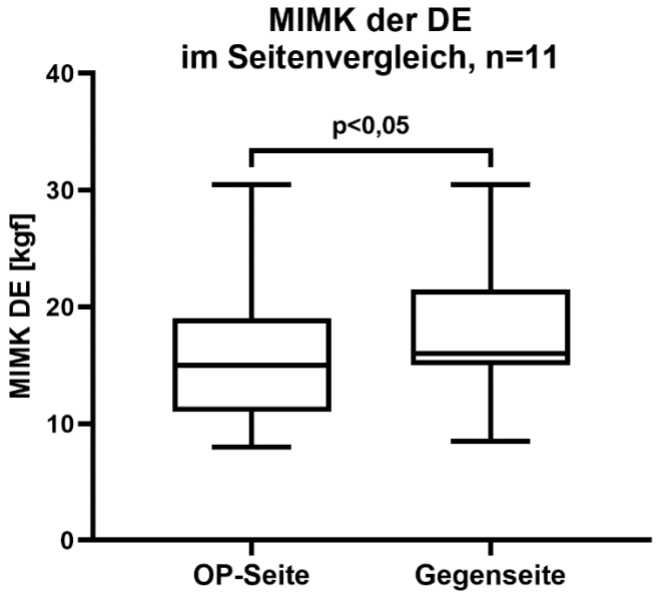


Abbildung 18 - Kraft (MIMK) der DE von OP- und gesunder Gegenseite im Seitenvergleich (p<0,05)

4.3.3 ROM der DE: OP-Seite vs. Gegenseite

Bei derselben Patientengruppe (n=11; vgl. Abb. 17) wurde die aktive ROM der DE im OSG zwischen OP- und gesunder Gegenseite verglichen.

Die DE zeigte sich auf der OP-Seite im Mittel um 1,6° geringer als auf der Gegenseite (vgl. Tab. 9)

Tabelle 9 - Aktive ROM der DE im OSG im Seitenvergleich

	ROM, aktiv [°]			
Gruppen	Median	*M*	*SD*	*95%-KI*
OP-Seite (n=11)	15,0	14,4	± 5,8	[10,5; 18,2]
Gegenseite (n=11)	15,0	16,0	± 7,1	[11,3; 20,8]

Das erhobene Merkmal aktive ROM der DE war für die OP- und die gesunde Gegenseite jeweils normalverteilt, weshalb auch hier mittels gerichtetem t-Test für gepaarte Stichproben getestet wurde.
Die gemessene Minderung der aktiven DE der OP-Seite von im Mittel 1,6° gegenüber der Gegenseite war nicht signifikant (p=0,0985; vgl. Abb. 19).
Die Überprüfung der Hypothese mit dem Wilcoxon-Rangsummentest zeigte ebenso keinen signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen (p=0,114).

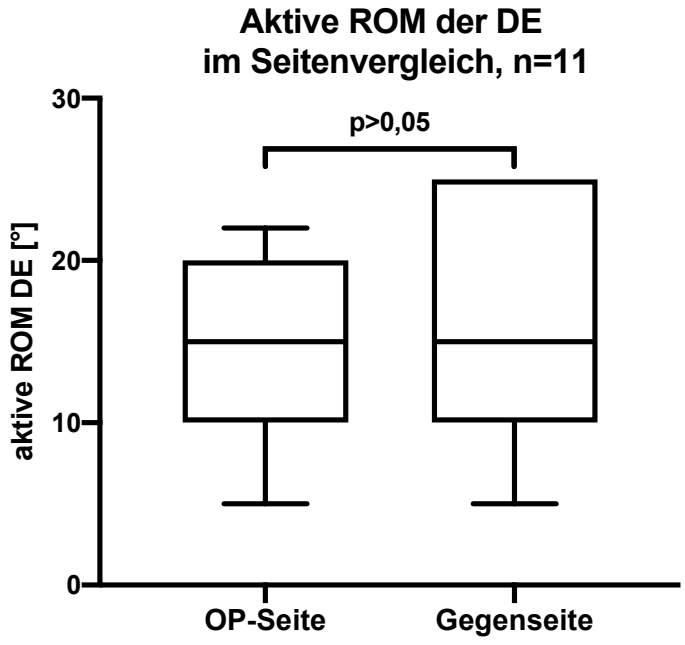


Abbildung 19 - Aktive ROM der DE von OP- und gesunder Gegenseite im Seitenvergleich (n.s.)

4.3.4 Korrelation zwischen Kraft und ROM der DE

Für alle nachuntersuchten Fälle (n=23, vgl. Abb. 14) wurde getestet, ob eine Kraftminderung der DE mit einer Verkleinerung der ROM korrelierte.

Zur Einschätzung einer Kraftminderung mit klinischer Auswirkung auf die Fußhebung wurde die 10%-Normperzentile nach Huber et al. als Grenzwert verwendet [47]. Da für Frauen und Männer unterschiedliche Normperzentilen festgelegt worden waren, wurde folgendermaßen vorgegangen, um die Kraftwerte auch geschlechtsunabhängig miteinander vergleichen zu können:
Vom gemessenen Kraftwert (MIMK) wurde der Wert der jeweiligen 10%-Normperzentile (Frauen: 13,0 kgf; Männer: 20,0 kgf) abgezogen. Dies ergab also die Abweichung von der theoretischen Grenze zur klinischen Auffälligkeit in kgf, welche in den folgenden Auswertungen als „Kraft vs. 10%-Normperzentile" bezeichnet wird.

Die gemessenen Kraftwerte wichen für Frauen und Männer gemeinsam mit -0,3 ± 4,3 [-2,2; 1,6] kgf im Mittel knapp unter die 10%-Normperzentile ab, schlossen diese aber im *95%-KI* ein.
Die ROM war mit 12,4 ± 6,6 [9,6; 15,3] ° deutlich kleiner als die Normwerte nach Neutral-Null-Methode (20-25°) (vgl. Tab. 10).

Tabelle 10 - Kraft vs. 10%-Normperzentile und aktive ROM der DE

Messwerte (n=23)	Median	*M*	*SD*	*95%-KI*
Kraft vs. 10%-Normperzentile [kgf]	-1,5	-0,3	± 4,3	[-2,2; 1,6]
ROM, aktiv [°]	10,0	12,4	± 6,6	[9,6; 15,3]

Die entsprechenden Wertepaare von Kraft vs. 10%-Normperzentile und aktiver ROM der DE wurden in ein Streudiagramm mit Regressionsgerade aufgetragen (vgl. Abb. 20). Der Korrelationskoeffizient nach Spearman-Rho zeigte für diese graphische Korrelation einen signifikanten, deutlichen Zusammenhang zwischen Kraft und aktiver ROM der DE des Fußes (r_s=0,584; p=0,002).

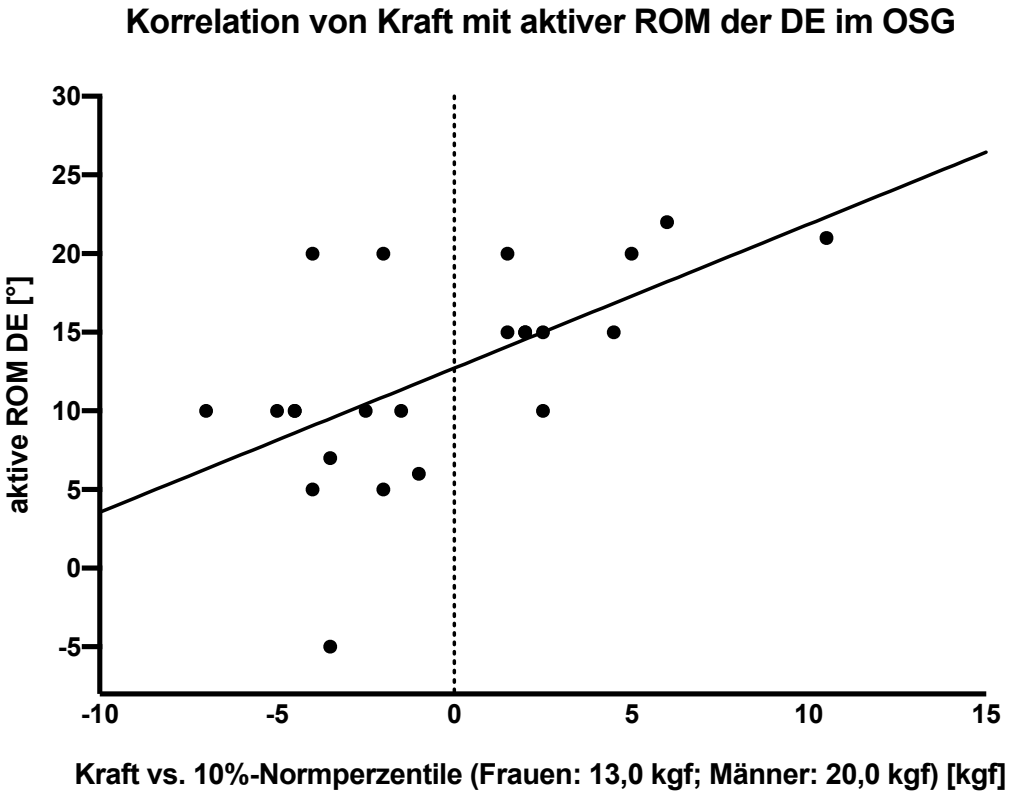


Abbildung 20 - Streudiagramm mit Regressionsgerade (r_s=0,584; p<0,05): Korrelation zwischen Kraftwerten und aktiver ROM der DE im OSG. >0 = stärker als 10%-Normperzentile; <0 = schwächer als 10%-Normperzentile

4.4 Subgruppenanalyse

4.4.1 Zusammenhang subjektiver und objektiver Parameter der DE im OSG

Ausgewertet wurden jeweils die Zusammenhänge der subjektiven Beschwerden der Patient*innen in den Parametern „Fuß anheben“, „Treppe-Hinaufsteigen“ und „Treppe-Hinabsteigen“ mit den objektiv erhobenen Werten für Kraft und ROM der DE im OSG.

Um den Vergleich zwischen zwei Gruppen zu ermöglichen, wurden die Antworten des Fragebogens der binären Variable „keine oder geringe subjektive Beschwerden“ (NRS 1-2) vs. „stärkere subjektive Beschwerden“ (NRS 3-5) zugeordnet. Anschließend wurden zudem die Korrelationen zwischen NRS und Kraft bzw. ROM graphisch dargestellt und berechnet.

Um alle Kraftwerte geschlechtsunabhängig miteinander vergleichen zu können, wurde auch in der Subgruppenanalyse die in Kapitel 4.3.4 eingeführte *Kraft vs. 10%-Normperzentile* verwendet.

Die Fallzahl setzte sich aus 22 der 23 nachuntersuchten Fälle (vgl. Abb. 14) zusammen, da ein Fragebogen nicht komplettiert wurde.

4.4.1.1 Funktion „Fuß anheben“

Die Kraft von Fällen mit keinen oder nur geringen subjektiven Beschwerden in der DE des Fußes (NRS 1-2) war im Mittel um 2,4 kgf größer als die von solchen mit stärkeren Beschwerden (NRS 3-4). Zudem waren die Kraftwerte der subjektiv beschwerdefreien Fälle um die 10%-Normperzentile angesiedelt, die Werte der Fälle mit stärkeren Beschwerden fielen hingegen darunter.
Die ROM der DE war bei den Fällen, mit keinen oder geringen Beschwerden, im Mittel um 5,6° größer (vgl. Tab. 11).

Tabelle 11 - Kraft und aktive ROM der DE – „Fuß anheben“

Subjektive Beschwerden „Fuß anheben“ - n=22								
	Kraft vs. 10%-Normperzentile [kgf]				ROM, aktiv [°]			
NRS	Median	*M*	*SD*	*95%-KI*	Median	*M*	*SD*	*95%-KI*
1-2 (n=16)	0,0	0,1	± 4,6	[-2,3; 2,5]	15,0	13,6	± 7,0	[9,9; 17,3]
3-4 (n=6)	-2,8	-2,3	± 2,8	[-5,2; 0,7]	8,5	8,0	± 2,3	[5,6; 10,4]

Aufgrund der geringen Fallzahlen in der Gruppe mit stärkeren subjektiven Beschwerden (NRS 3-4) der Funktion „Fuß anheben“ wurde die induktive Testung mittels Wilcoxon-Rangsummentest durchgeführt.
Die Kraft vs. 10%-Normperzentile der DE unterschied sich nicht signifikant zwischen Fällen mit keinen oder nur geringen Beschwerden (NRS 1-2) und solchen mit stärkeren Beschwerden (NRS 3-4) (p=0,301; vgl. Abb. 21).

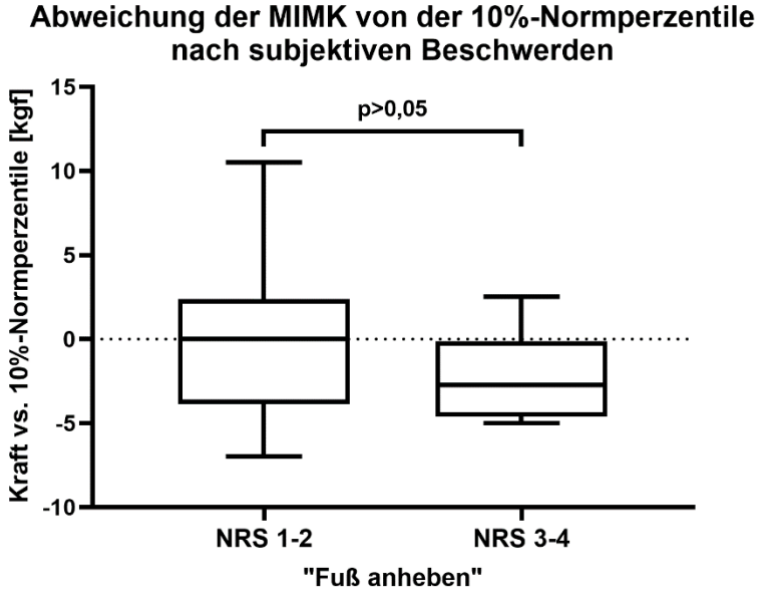


Abbildung 21 - Abweichung der gemessenen MIMK der DE von der jeweiligen 10%-Normperzentile nach subjektiven Beschwerdegruppen in der Funktion „Fuß anheben“ (n.s.). Die Nulllinie entspricht der 10%-Normperzentile. NRS 5 kam nicht vor.

Die aktive ROM war bei Fällen mit stärkeren Beschwerden (NRS 3-4) mit 8,0 ± 2,3 [5,6; 10,4] ° signifikant kleiner als 13,6 ± 7,0 [9,9; 17,3] ° bei Fällen mit keinen oder geringen Beschwerden der DE des Fußes (NRS 1-2) (p=0,021; vgl. Abb. 22).

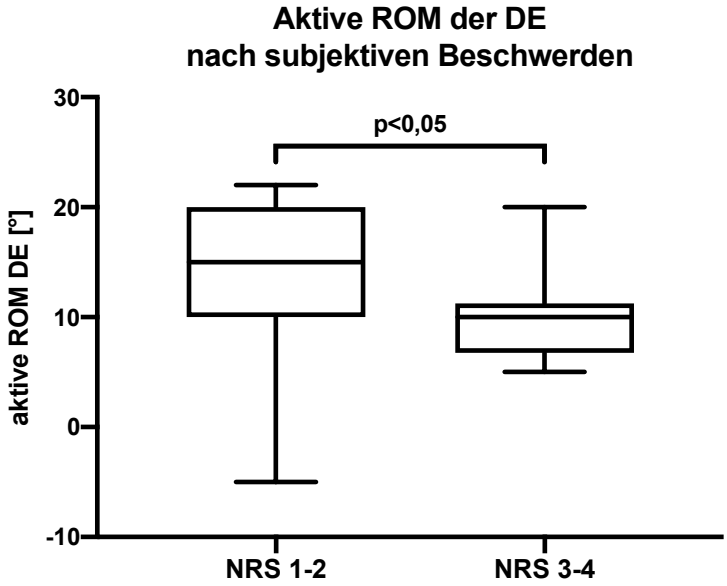


Abbildung 22 - Gemessene ROM-Werte der DE nach subjektiven Beschwerdegruppen in der Funktion „Fuß anheben“ (p<0,05). NRS 5 kam nicht vor.

Korrelation „Fuß anheben“ mit Kraft und ROM

Wie bereits durch die induktive Testung festgestellt, zeigte sich kein signifikanter Zusammenhang zwischen NRS und Kraft der DE (r_s= -0,213; p=0,342; vgl. Abb. 23).

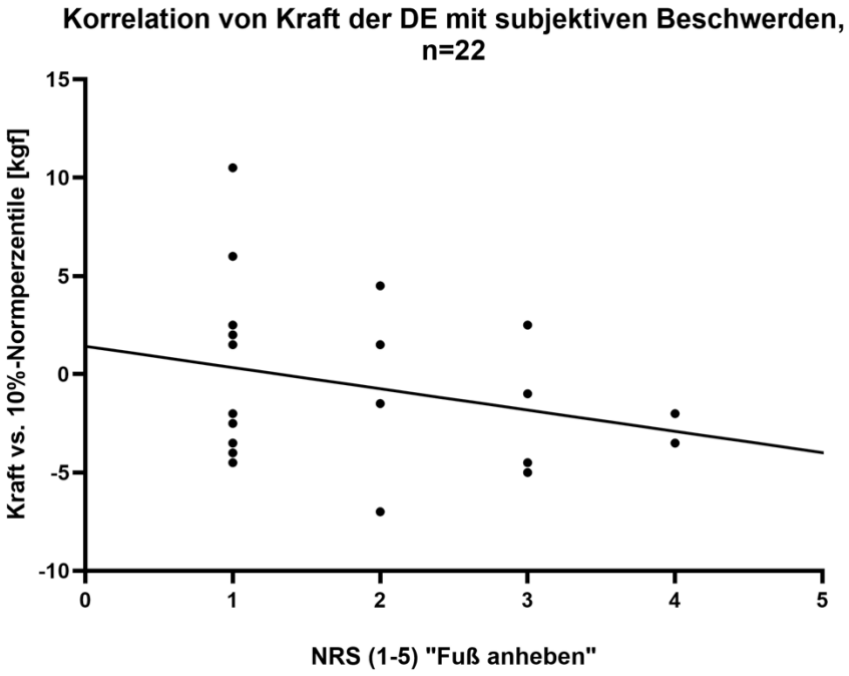


Abbildung 23 - Streudiagramm mit Regressionsgerade (r_s= -0,213; n.s.): Korrelation zwischen gemessenen Kraftwerten und subjektiven Beschwerden in der Funktion „Fuß anheben“

Stärkere subjektive Beschwerden zeigten hingegen eine signifikante negative Korrelation mit einem Abnehmen der ROM (r_s= -0,463; p=0,03; vgl. Abb. 24).

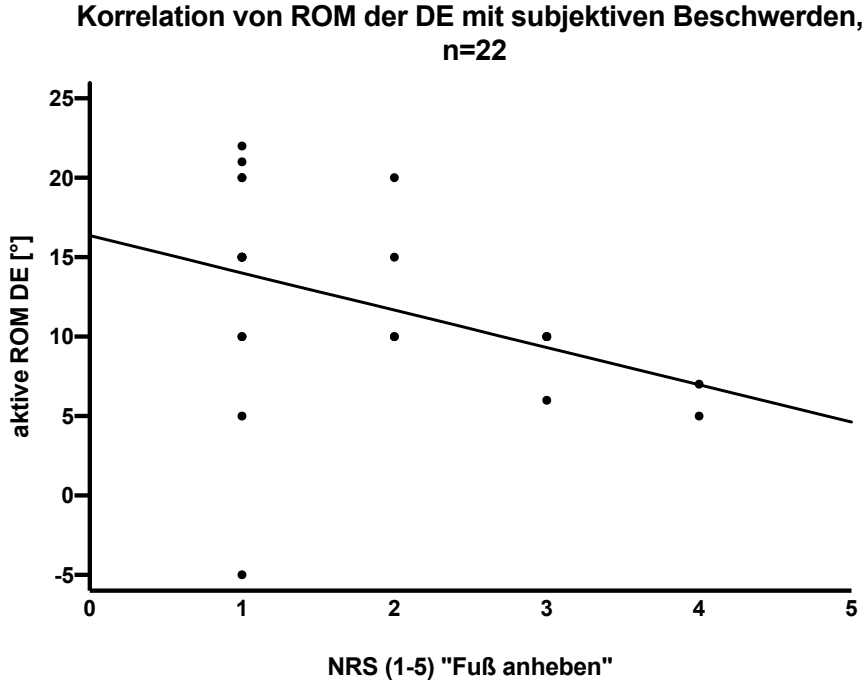


Abbildung 24 - Streudiagramm mit Regressionsgerade (r_s= -0,463; p<0,05): Korrelation zwischen gemessenen ROM-Werten und subjektiven Beschwerden in der Funktion „Fuß anheben“

4.4.1.2 Funktion „Treppe-Hinaufsteigen und -Hinabsteigen“

Die Kraft bei Fällen mit keinen oder nur geringen Beschwerden (NRS 1-2) beim Treppe-Hinaufsteigen war im Mittel um 2,9 kgf größer war als bei solchen mit stärkeren Beschwerden (NRS 3-5). Beim Treppe-Hinabsteigen betrug diese Kraftdifferenz 1,3 kgf. Zudem waren die Kraftwerte der subjektiv beschwerdefreien Fälle jeweils um die 10%-Normperzentile angesiedelt, die Werte der Fälle mit Beschwerden fielen hingegen darunter.

Bei Fällen mit NRS 1-2 im Bereich Treppe-Hinaufsteigen war die ROM im Mittel um 4,6° größer als bei Fällen mit NRS 3-5. Beim Treppe-Hinabsteigen betrug die Differenz im Mittel um 2,7° (vgl. Tab. 12).

Tabelle 12 - Kraft und aktive ROM der DE – „Treppe-Hinaufsteigen und -Hinabsteigen“

	Subjektive Beschwerden „Treppe-Hinaufsteigen“ - n=22							
	Kraft vs. 10%-Normperzentile [kgf]				ROM, aktiv [°]			
NRS	Median	*M*	*SD*	*95%-KI*	Median	*M*	*SD*	*95%-KI*
1-2 (n=18)	0,0	0,0	± 4,5	[-2,3; 2,2]	15,0	12,9	± 6,9	[9,5; 16,4]
3 (n=4)	-3,0	-2,9	± 1,5	[-5,3; -0,5]	8,5	8,3	± 2,1	[5,0; 11,5]

	Subjektive Beschwerden „Treppe-Hinabsteigen“ - n=22							
	Kraft vs. 10%-Normperzentile [kgf]				ROM, aktiv [°]			
NRS	Median	*M*	*SD*	*95%-KI*	Median	*M*	*SD*	*95%-KI*
1-2 (n=14)	0,0	-0,1	± 5,0	[-3,0; 2,8]	15,0	13,1	± 7,3	[8,9; 17,3]
3-5 (n=8)	-2,0	-1,4	± 2,5	[-3,4; 0,7]	10,0	10,4	± 5,0	[6,2; 14,5]

Wie für die Funktion „Fuß anheben“ wurde die induktive Testung auch für das Treppensteigen aufgrund der geringen Fallzahlen in den Gruppen mit stärkeren subjektiven Beschwerden (NRS 3 bzw. 3-5) mittels Wilcoxon-Rangsummentest durchgeführt.

Sowohl für das Treppe-Hinaufsteigen als auch -Hinabsteigen waren die gemessenen Kraftunterschiede nicht signifikant (p=0,268 bzw. p=0,837).

Ebenso unterschieden sich die mittleren ROM-Werte von Fällen mit keinen oder geringen Beschwerden nicht signifikant von solchen mit stärkeren Beschwerden (p=0,268 bzw. p=0,173).

4.5 Kraft und ROM der DE bei Längen- vs. Achs-, Torsionskorrektur

Da es denkbar wäre, dass bei Patient*innen, welche mit Distraktionsmarknägeln (inkl. LON) behandelt wurden, insbesondere die ROM der DE deutlich kleiner ist als bei reinen Umstellungsosteotomien, wurden die objektiv erhobenen Parameter der jeweiligen Gruppen „Längenkorrektur“ (n=10) und „Achs-, Torsionskorrektur“ (n=13) miteinander verglichen. Dazu wurden alle nachuntersuchten Fälle ausgewertet (n=23, vgl. Abb. 14).

Die Kraft vs. 10%-Normperzentile war bei Fällen von Längenkorrektur im Mittel um 0,2 kgf kleiner als bei reiner Achs- und/oder Torsionskorrektur.
Die ROM der DE war in der Gruppe von Längenkorrekturen durchschnittlich um 2,2° kleiner (vgl. Tab. 13).

Tabelle 13 - Kraft und aktive ROM der DE: Längen- vs. Achs-, Torsionskorrektur

	Kraft vs. 10%-Normperzentile [kgf]				ROM, aktiv [°]			
Marknagel zur	Median	*M*	*SD*	*95%-KI*	Median	*M*	*SD*	*95%-KI*
Längenkorrektur (n=10)	-1,5	-0,2	± 5,2	[-3,9; 3,5]	10,0	11,2	± 8,8	[4,9; 17,5]
Achs-, Torsions-korrektur (n=13)	-1,5	-0,4	± 3,7	[-2,6; 1,8]	15,0	13,4	± 4,4	[10,7; 16,0]

Die Merkmale Kraft vs. 10%-Normperzentile und ROM der DE im OSG unterschieden sich in der induktiven Testung, welche aufgrund der geringen Fallzahlen mittels Wilcoxon-Rangsummentest durchgeführt wurde, nicht signifikant zwischen den Gruppen „Längenkorrektur“ und „Achs-, Torsionskorrektur“ (p=1,0 bzw. p=0,466).

Auch die Betrachtung der subjektiven NRS-Bewertungen im Fragebogen zeigte weder für die Funktion „Fuß anheben“ noch für Funktionen „Großzehen-“ oder „übrige Zehenhebung“ signifikante Unterschiede zwischen den beiden Gruppen (p=0,463 bzw. p=0,062 bzw. p=0,164).

4.6 Weitere Folgen der Fasziotomie

4.6.1 Muskelhernien und Sensibilitätsstörungen

Um darzustellen, wie viele Fälle in Folge der Fasziotomie an sicht- / tastbaren Muskelhernien oder Sensibilitätsstörungen im Versorgungsgebiet des *N. fibularis superficialis* litten, wurden alle nachuntersuchten Fälle ausgewertet (n=23, vgl. Abb. 14). Bezüglich der Sensibilitätsstörungen wurden nur solche im Bereich der Haut des ventralen und lateralen distalen Unterschenkels, des Sprunggelenks und des Fußrückens gewertet, nicht aber Gefühlsstörungen über OP-Narben, Schrauben, Pins oder an anderen, nicht für das Versorgungsgebiet des Nerven charakteristischen, Lokalisationen.

Eine Muskelhernie konnte in 13 der 23 Fälle (56,5%) nachgewiesen werden.
Eine Sensibilitätsstörung, die dem Versorgungsgebiet des *N. fibularis superficialis* entspricht, wurde in 6 Fällen (26,1%) angegeben (vgl. Tab. 14).

Tabelle 14 - Folgen der Fasziotomie: Muskelhernie und Sensibilitätsstörung

	Häufigkeit (%)	
Folgen der Fasziotomie	ja	nein
Muskelhernie (n=23)	13 (56,5)	10 (43,5)
Sensibilitätsstörung (n=23)	6 (26,1)	17 (73,9)

4.6.2 Kraft und ROM bei Fällen mit / ohne Muskelhernie

Fälle mit sicht- / tastbaren Muskelhernien (n=13) wurden in Bezug auf Kraft und ROM der DE im OSG mit solchen ohne Muskelhernie (n=10) verglichen. Alle nachuntersuchten Fälle wurden ausgewertet (n=23, vgl. Abb. 14).

Die Kraft vs. 10%-Normperzentile unterschied sich zwischen den Patient*innen mit und ohne Muskelhernie nicht voneinander.
Die ROM war in den Fällen mit Muskelhernie durchschnittlich um 0,4° größer als bei Patient*innen ohne (vgl. Tab. 15).

Tabelle 15 - Kraft und ROM der DE bei Fällen mit sicht- / tastbarer Muskelhernie vs. ohne

	Kraft vs. 10%-Normperzentile [kgf]				ROM DE [°]			
Muskelhernie	Median	*M*	*SD*	*95%-KI*	Median	*M*	*SD*	*95%-KI*
nein (n=10)	-0,3	-0,3	± 3,3	[-2,6; 2,0]	15,0	12,2	± 7,4	[7,0; 17,5]
ja (n=13)	-1,5	-0,3	± 5,1	[-3,4; 2,8]	10,0	12,6	± 6,2	[8,9; 16,4]

Die Merkmale Kraft vs. 10%-Normperzentile und ROM der DE im OSG unterschieden sich in der induktiven Testung, welche aufgrund der geringen Fallzahlen mittels Wilcoxon-Rangsummentest durchgeführt wurde, nicht signifikant zwischen Fällen mit und ohne Muskelhernie (p=0,784 bzw. 0,849).

Die Betrachtung der subjektiven Einschätzung in der Funktion „Fuß anheben“ aus dem Fragebogen durch die Patient*innen zeigte signifikant höhere NRS-Werte (also stärkere Beschwerden) bei Fällen mit Muskelhernie (Median: 2,0; Interquartilbereich: 2) im Vergleich zu Fällen ohne Hernie (Median: 1,0; Interquartilbereich: 0) (p=0,028). Die NRS-Werte der Funktionen „Großzehen-“ und „übrige Zehenhebung“ unterschieden sich zwischen Fällen mit und ohne Muskelhernie nicht signifikant (p=1,0 bzw. p=0,074).

5 Diskussion

5.1 Zusammenfassung der Hauptergebnisse

41 Fälle wurden in einem mittleren Zeitraum von 6,1 Jahren nach der Tibiaosteotomie mit anteriorer Fasziotomie zu subjektiven Beschwerden der DE im OSG befragt; 23 davon wurden zudem auch objektiv in Bezug auf Kraft und ROM der DE nachuntersucht. Subjektiv berichteten 78,1% der Fälle über keine oder nur geringe Beschwerden bei der DE im OSG. Die objektiv erhobenen Kraftwerte (MIMK) fielen weder für Frauen noch für Männer signifikant unter die jeweilige 10%-Normperzentile ab, welche anhand der Fachliteratur als Grenze zur klinischen Auffälligkeit definiert worden war. Im Seitenvergleich mit der gesunden Gegenseite zeigte sich eine signifikante Kraftminderung der operierten Seite um 8,6%. Stärkere subjektive Beschwerden der Fußhebung (NRS 3-4) waren signifikant mit einer Verminderung der ROM der DE im OSG korreliert (r_S= -0,46; $p<0,05$), nicht jedoch mit einer Verminderung der Kraft.

5.2 Diskussion der Methoden

Die Studie zur Erfassung der klinischen Funktion der DE im OSG nach elektiver Fasziotomie im Rahmen von Tibiaosteotomien zur Längen-, Achs- und/oder Torsionskorrektur sollte erstmals eine mögliche, langfristige Funktionseinschränkung subjektiv wie auch objektiv detektieren. Bei dem untersuchten Kollektiv bestanden, im Gegensatz zu Arbeiten mit entfernt vergleichbaren Fragestellungen, keine Muskel- oder sonstige Weichteilschäden durch ein vorausgegangenes KS oder eine Tibiafraktur.

Bei Osteotomien zur Längen-, Achs- und/oder Torsionskorrektur mittels Marknagel handelt es sich grundsätzlich um relativ selten durchgeführte Eingriffe. Da bei dieser Studie die elektive Fasziotomie des anterioren Kompartiments im Mittelpunkt stand, wurden zudem nur an der Tibia operierte Fälle aufgenommen. Weiterhin entstehen operativ zu korrigierende Beindeformitäten nicht selten aufgrund von Erkrankungen, bei welchen eine Funktionsmessung im Vergleich mit der Normalbevölkerung nicht sinnvoll erscheint oder durch die schon präoperativ Seitendifferenzen von Kraft oder

ROM bestehen. Daher trafen die bewusst strikt angesetzten Ausschlusskriterien auf knapp die Hälfte aller Fälle aus der erstellten Datenbank zu und es ergaben sich schließlich relativ kleine Fallzahlen für die statistische Auswertung, was sicherlich eine Schwäche der Studie darstellt. Andere Studien, welche sich beispielsweise mit Längenkorrekturen der Tibia mittels Marknagel beschäftigten, wiesen im Vergleich 12 bzw. 19 Fälle auf [9,29]. Studien, welche sich mit dem Outcome von Fasziotomien im Rahmen der Therapie von akuten KS oder CECS befassten, schlossen ähnlich viele oder unter Umständen auch durchaus mehr Fälle ein (26, 40 bzw. 59) [30,41,42]. Bei therapeutischen Fasziotomien handelt es sich allerdings um deutlich häufiger durchgeführte Eingriffe als im prophylaktischen Rahmen. Langfristige Ergebnisse zur minimal-invasiven Fasziotomie wurden bisher nur anhand des Auftretens von Komplikationen oder subjektiver Bewertung der Alltagsfunktion erhoben, nicht aber mittels spezifischer Fragen nach der Funktion der Fußheber oder gar objektiver Messwerte wie Kraft oder ROM der DE.

Eine weitere Limitation der Methodik besteht in der Validität der Ausschlusskriterien. Die präoperative Kraft- und ROM-Bestimmung wurde nicht - wie in der Nachuntersuchung - mittels Kraftmessgerät und Goniometer durchgeführt, sondern mittels der klinischen Einteilung der Kraftgrade nach Janda und Schätzung der Winkel. So könnte bei der Kraftgradbestimmung nach Janda durchaus beidseitig Kraftgrad 5/5 (Bewegung gegen starken Widerstand) vorliegen, mittels Kraftmessgerät aber eine signifikante Seitendifferenz detektiert werden. Zudem wurden die Untersuchungen zwar ebenso durch einen einzigen Untersucher durchgeführt (Operateur), aber nicht durch denselben Untersucher wie die Nachuntersuchungen (Doktorand). Es wäre in diesem Sinne also durchaus denkbar, dass an einem verkürzten oder achsabweichenden Bein die Kraft und der Bewegungsumfang gegenüber dem kontralateralen Bein bereits präoperativ in einem Maße vermindert war, wie es im Rahmen der Nachuntersuchungen mit genauerer Methodik detektiert wurde. Bei identischer präoperativer Messung mit Kraftmessgerät und Goniometer, wären diese Patient*innen möglicherweise unter die Ausschlusskriterien gefallen. Diese methodische Einschränkung muss bei der Interpretation der Ergebnisse der Kraftmessung berücksichtigt werden.

Alle Eingriffe wurden von demselben Operateur durchgeführt, sodass die Durchführung der Fasziotomie technisch vergleichbar war. Dies stellt sicherlich eine Stärke der Studie dar, da unterschiedliche Fasziotomie- oder OP-Techniken möglicherweise Einfluss auf das Ergebnis haben.

Die in der Nachuntersuchung erhobenen Parameter wurden in Zusammenschau von klinischer Expertise und verschiedenen Literaturquellen definiert. Hierbei wurde besonders bei der Wahl der Methode zur Kraftmessung viel Wert auf Validität und Genauigkeit aber trotzdem einfache Handhabung gelegt. So galt es nämlich geringe Kraftunterschiede zu detektieren, die anhand der präoperativen Bestimmung von Kraftgraden nach Janda möglicherweise nicht festzustellen waren. Diese Anforderungen konnten schließlich in einem HHD, einem handgehaltenen Zugkraftmesser, vereint werden. Anhand der vorhandenen Literatur konnte gezeigt werden, dass ein solches Gerät durchaus reliable, mit stationären Dynamometern vergleichbare, Messungen hervorbringen konnte und in den Bereichen Kosten und praktischer Anwendbarkeit deutliche Vorteile aufwies [46]. Als einziger, größerer Kritikpunkt von HHDs wurde in einigen Quellen die variable Intertester-Reliabilität aufgeführt [47,48,59–61]. Diese wurde einerseits durch mangelnde Expertise bei der Messung, andererseits durch Unterschiede im Kräfteverhältnis zwischen Patient*innen und Untersucher erklärt. In dieser Studie konnte diese Problematik umgangen werden, indem alle Kraftmessungen von demselben Untersucher durchgeführt wurden, welcher vor Beginn der Messungen einen Übungszyklus zur Einarbeitung am Gerät durchlief. Außerdem zählen die Fußheber im OSG zu den schwächeren Muskelgruppen des Menschen, was die Reproduzierbarkeit der Messungen tendenziell erhöht (vgl. 1.1.6.1).

Die Anwendung des sogenannten „make“-Tests konnte als die zu bevorzugende Methode zur Quantifizierung der MIMK festgelegt werden, nachdem diese in mehreren Literaturquellen, an welchen sich auch der Versuchsaufbau dieser Studie orientierte, Anwendung fand [47,48,56–58]. Messungen mittels „make“- und „break“-Test könnten durchaus unterschiedliche Ergebnisse erzielen, wobei mit letzterem grundsätzlich höhere Kraftwerte gemessen werden [63]. Daher wurde viel Wert daraufgelegt, immer den „make“-Test anzuwenden, um die Daten schließlich vergleichbar zu machen. Huber et al., mit deren Normperzentilen die Messwerte dieser Studie verglichen wurden, bedienten sich ebenfalls dieser Methode [47].

Bezüglich des Zeitpunktes der Nachuntersuchung wurde eine Rückkehr zur Vollbelastung seit mindestens drei Monaten vorausgesetzt. Da bekannt ist, dass bereits kurzfristige Immobilisation große Effekte auf die Muskelkraft haben kann, sollte diese Einflussgröße für die Studie möglichst klein gehalten werden. Geboers et al. zeigten, dass die DE-Kraft nach durchschnittlich vier Wochen Immobilisation im Vergleich zum gesunden Bein um 24,0% abnahm ($p<0,001$) [54]. Diese Zeit entsprach bereits der Mindestdauer der Entlastung bzw. Teilbelastung, die das Patientenkollektiv aus dieser Studie postoperativ einhalten musste. Wall et al. beschrieben bei vollständiger Immobilisation bereits nach fünf Tagen eine signifikante Abnahme der Muskelkraft des *M. quadriceps femoris* um 9,0%, nach 14 Tagen um 22,9% [76]. Sollte die Zeit zwischen Teilbelastung und Nachuntersuchung also zu kurz gewesen sein, um einen ausreichenden Wiederaufbau der Muskulatur zu gewährleisten, hätten sowohl objektive als auch subjektive Parameter negativ beeinflusst werden können. Nach dem mittleren Zeitraum von über sechs Jahren zwischen Eingriff und Nachuntersuchung konnte in dieser Studie allerdings eine komplette Erholung und Anpassung der Muskulatur an die täglichen Bedürfnisse angenommen werden. Dass nicht alle Fälle zum gleichen postoperativen Zeitpunkt nachuntersucht wurden, stellt sicherlich eine größere Einschränkung dieser Studie dar. Eine oder mehrere Kraftmessungen zu definierten Zeitpunkten, idealerweise vor und nach der Tibiaosteotomie und Fasziotomie, könnten die Aussagekraft der Ergebnisse deutlich verbessern. Ein derartiges Studienprotokoll und somit prospektiver Ansatz waren allerdings im Rahmen dieser Studie nicht umsetzbar.

Grundsätzlich muss bei der Interpretation der Ergebnisse auch bedacht werden, dass in den Nachuntersuchungen nur das Gesamtergebnis betrachtet werden konnte. Somit könnte eine Kraft- oder ROM-Minderung wie auch eine subjektive Einschränkung des operierten Beines allein durch die prophylaktische Fasziotomie verursacht worden sein, andererseits aber auch durch die Tibiaosteotomie oder ein Zusammenspiel dieser oder weiterer Faktoren. Um den alleinigen Effekt der Fasziotomie auf Kraft und ROM der DE unter Ausschluss aller möglichen Störfaktoren zu bestimmen, wären sehr zeitnahe prä- und postoperative Messungen erforderlich. Hierbei müssten jedoch andere Faktoren wie z.B. die ausreichende Schmerztherapie oder die Gefährdung des Operationsergebnisses in Betracht gezogen werden. In Tierversuchen konnte anhand intraoperativer Muskelstimulation und Kraftmessung eine signifikante, unmittelbare Kraftminderung von 10-15% nach

Spaltung des Kompartiments gezeigt werden [17,43]. Eine Studie dieser Art am Menschen wäre ethisch nicht vertretbar.

Der Fragebogen (siehe Anhang: 8.5) zur Erhebung der subjektiven Einschränkungen in der Fußhebung wurde speziell für diese Studie entworfen, da kein bereits validierter Fragebogen so gezielt nach den einzelnen Funktionen der Fuß- und Zehenhebermuskulatur fragte. Da in vielen Fällen seit der Operation bereits mehrere Jahre vergangen waren, könnten sich hier allerdings Probleme bei der Erinnerung, etwa an präoperativ schon bestehende Beschwerden, ergeben haben. Derartige „recall bias“ ließen sich nur durch einen prospektiven Ansatz umgehen.

Als weitere Einschränkung muss die möglicherweise existierende physiologische Seitendifferenz der DE-Kraft im OSG bedacht werden. Diesbezüglich ließ sich in der vorhandenen Literatur kein Konsensus feststellen. Einerseits gab es Studien die feststellten, dass zwischen rechtem und linkem Bein kein signifikanter Unterschied der MIMK bestand und es somit legitim wäre, das jeweils kontralaterale Bein als Referenz zu benutzen [54,69,70]. Andererseits zeigten Publikationen, dass das dominante, in anderen Arbeiten oder Probandenkollektiven aber auch das nicht-dominante, Bein signifikant stärker war als die Gegenseite [64,71]. Selbst die Bestimmung der Dominanz der Beine war in diesen Studien äußerst heterogen, was eine Interpretation der Ergebnisse zusätzlich erschwerte. Die ROM unterschied sich hingegen nicht zwischen dominantem und nicht-dominantem Bein, weshalb hier ein Seitenvergleich ohne Zweifel berechtigt war [64,68–70]. Die Seitenverteilung der Fälle dieser Arbeit war mit 46,3% Rechts und 53,7% Links ausgeglichen. Die Dominanz und eine eventuelle Seitendifferenz wurden nicht untersucht, das kontralaterale Bein wurde aber als Referenz verwendet, um eine Kraft- oder ROM-Minderung der operierten Seite festzustellen.

5.3 Diskussion der Ergebnisse

Im gesamten Studienkollektiv sowie bei den ausgeschlossenen und nicht teilnehmenden Patient*innen zeigte sich in einem Zeitraum von knapp 15 Jahren und bei knapp 160 Fällen kein Fall von postoperativem KS, was im Vergleich zu den genannten eigenen Fällen vor Einführung der Fasziotomie und den wenigen Quellen in der Literatur für die Wirksamkeit der minimal-invasiven anterioren Fasziotomie als prophylaktische Maßnahme spricht.

Die eingeschlossenen Patient*innen waren zum Zeitpunkt der Operation durchschnittlich 24,1 Jahre alt, während die Nachuntersuchungen im Mittel 6,1 Jahre danach stattfanden. Somit konnte man davon ausgehen, dass der Eingriff bei den meisten Patient*innen nach Abschluss der Pubertät bzw. des Wachstums erfolgte, was dem häufigsten Zeitpunkt für eine elektive Längen-, Achs- und/oder Torsionskorrektur entspricht. Auch die Geschlechterverteilung im Patientenkollektiv der Studie spiegelte mit gut 2/3 Frauen in etwa die Verteilung aller Fälle der Datenbank wider. Die Seitenverteilung zwischen rechtem und linkem Bein war in etwa gleichmäßig und der BMI mit durchschnittlich 22,9 kg/m^2 im Normbereich.

Die subjektive Beeinträchtigung der befragten Fälle erwies sich insgesamt als gering. Die Fußhebung bereitete den Befragten aber stärkere Beschwerden als das isolierte Heben der Großzehe oder der übrigen Zehen. Dabei hatten selbst im Bereich der Fußhebung knapp 80% der Fälle keine oder nur geringe Beschwerden. Dieses Ergebnis ließ sich entweder durch eine sehr akkurate Beurteilung durch die Studienteilnehmer oder aber durch die größere klinische Relevanz der Fußhebung im Vergleich zur isolierten Zehenhebung erklären. Die DE im OSG spielt nämlich eine wichtige Rolle in der allgemeinen Stand- und Gangsicherheit. Eine Fußheberschwäche, wie sie beispielsweise in Folge von Schlaganfällen oder *N. fibularis profundus*-Paresen mit der Maximalausprägung eines Fallfußes vorkommen kann, wurde bereits in mehreren Studien als einer der entscheidenden prädiktiven Faktoren für Stürze im Alltag bewertet [72–75]. Dabei korrelierten die Kraft der Dorsalextensoren im OSG, der Hüft- und auch der Kniestrecker deutlich stärker mit dem Auftreten von Gleichgewichtsproblemen, Gangunsicherheiten und Stürzen als die Kraft anderer Muskelgruppen der unteren Extremität.

Interessanterweise bestanden beim Treppe-Hinabsteigen grundsätzlich stärkere subjektive Beschwerden als beim -Hinaufsteigen, obwohl die aktive DE für Ersteres

eigentlich nicht gebraucht wird. Dieses Ergebnis kann möglicherweise durch eine allgemeine Gangunsicherheit erklärt werden, welche z.B. durch unzureichende postoperative Physiotherapie zustande gekommen sein könnte. Daher wurde das Treppensteigen, ursprünglich als wichtiger Parameter zur Beurteilung der DE im Alltag gedacht, schlussendlich als wenig relevant für die Fragestellungen der Studie angesehen.

In den objektiven Nachuntersuchungen wurde eine signifikante Kraftminderung von 1,5 kgf (8,6%) der operierten gegenüber der nicht operierten Gegenseite festgestellt. Der Vergleich der MIMK der operierten Seite mit der von Huber et al. festgestellten 10%-Normperzentile, welche als Grenze zur klinischen Auffälligkeit angesehen wird, zeigte aber, dass diese festgestellte Kraftminderung klinisch nicht relevant zu sein schien [47]. Eine signifikante Unterschreitung dieser Perzentile konnte weder für Frauen (13,0 kgf vs. 13,3 ± 3,5 kgf) noch für Männer (20,0 kgf vs. 18,6 ± 5,6 kgf) gezeigt werden. Auch die Zusammenschau mit den subjektiv angegebenen Beschwerden der Patient*innen im Rahmen der Subgruppenanalyse zeigte, dass nicht die Kraft, sondern vielmehr das Bewegungsausmaß der DE relevant für die Ausprägung subjektiver Beschwerden zu sein schien. In der klinischen Nachuntersuchung waren bei keinem der Fälle Auffälligkeiten im Fersen- und Zehenspitzengang festzustellen, was als grobes Maß für eine erhaltene Funktionalität im OSG spricht. Zusammenfassend muss erneut - wie bereits in der Diskussion der Methodik einschränkend angeführt wurde - erwähnt werden, dass anhand der zu Verfügung stehenden Ausschlusskriterien nicht mit letzter Sicherheit ausgeschlossen werden konnte, dass signifikante Kraftunterschiede im Seitenvergleich schon präoperativ bestanden haben.

Die wenigen Patient*innen, die über stärkere Beschwerden der Fußhebung berichteten, zeigten eine signifikant geringere ROM der DE als diejenigen, die keine oder nur geringe Beschwerden angaben. Ebenso bestand hier eine signifikant negative Korrelation zwischen NRS und ROM (r_s=-0,463; p=0,03). Da diese Zusammenhänge für die Kraft (MIMK) nicht gezeigt werden konnten, scheinen subjektive Beschwerden in der Fußhebung eher mit einer verminderten DE im OSG als mit einer Kraftminderung des *M. tibialis anterior* zusammenhängen.

Obwohl aufgrund dieser Ergebnisse die ROM und weniger die Kraft als entscheidende Größe zur objektiven Bewertung der DE erschien, ist eine strenge

Trennung dieser beiden Größen nicht möglich. Guillén-Rogel et al. bestimmten die Zusammenhänge zwischen aktiver ROM und MIMK der Fuß- und Großzehenhebung an jungen, gesunden Proband*innen [70]. Die Ergebnisse zeigten eine signifikante, moderate Korrelation zwischen ROM und Kraft der DE (r_p=0,473; p<0,01). Auch für die Kraft der Großzehenheber wurde ein signifikanter, schwacher Zusammenhang mit der ROM gezeigt (r_p=0,279; p<0,05).
In der vorliegenden Studie konnte ebenso eine signifikante, deutliche Korrelation zwischen ROM der DE im OSG und der Differenz der gemessenen Kraft zur geschlechtsspezifischen 10%-Normperzentile gezeigt werden (r_s=0,584; p<0,01).

Es wäre durchaus naheliegend, dass bei Längenkorrekturen im Gegensatz zu reinen Achs- und/oder Torsionskorrekturen speziell die ROM unterschiedlich beeinträchtigt ist. Eine unzureichende Dehnung des *M. triceps surae* während der Verlängerung kann erfahrungsgemäß sogar zu einem temporären Spitzfuß führen, was die DE merklich einschränken würde. Zudem könnte man aufgrund von Veränderungen der mechanischen Achse des Muskels oder der prolongierten Teilbelastung weitere Differenzen von Kraft und ROM vermuten. Diese Faktoren hätten großen Einfluss auf die Ergebnisse dieser Studie, da alle Tibiaosteotomien, ungeachtet der Indikation, gemeinsam ausgewertet wurden. Durch einen Vergleich dieser Parameter zwischen den ähnlich großen Gruppen in dieser Arbeit konnte aber gezeigt werden, dass sich weder Kraft noch ROM signifikant zwischen Fällen mit Längenkorrekturen und solchen mit reinen Achs- und/oder Torsionskorrekturen unterschieden. Auch für die subjektive Beeinträchtigung der Fußhebermuskulatur konnte kein signifikanter Unterschied gezeigt werden. Somit schien die Art des Eingriffes keinen Einfluss auf die erhobenen Parameter zu haben oder aber durch das lange Intervall bis zur Nachuntersuchung ausreichend kompensiert zu sein.

Auch das Auftreten einer klinisch sicht- / tastbaren Muskelhernie des *M. tibialis anterior* durch die Fasziotomielücke war kein Faktor, der einen signifikanten Unterschied in Kraft oder ROM mit sich brachte. Knapp 57% der Fälle wiesen eine solche Hernie auf, als kosmetisch störend wurde diese aber nur von den wenigsten empfunden. Im Gegenteil berichteten Patient*innen mit Hypoplasien oder höhergradigen Hypotrophien - welche zwar von der Teilnahme an dieser Studie ausgeschlossen wurden, aber einen größeren Teil des üblichen Patientenklientels der Arbeitsgruppe repräsentieren - sogar von kosmetischen Vorteilen im Sinne einer Herstellung der Körpersymmetrie durch den postoperativ zunehmenden

Unterschenkelumfang am präoperativ schmaleren Bein. Allerdings zeigte sich bei Fällen mit Muskelhernie eine signifikant stärkere subjektive Beeinträchtigung der Fußhebung. Wie genau eine Muskelhernie für die DE im OSG relevant sein könnte ist unklar, da bei ebendiesen Fällen die objektiven Parameter keine signifikanten Unterschiede zeigten. Möglicherweise könnte ein, durch die Herniation bei Muskelkontraktion hervorgerufener, erhöhter Widerstand die subjektive Beeinträchtigung verstärken.

Rund 25% der untersuchten Fälle wiesen zudem Sensibilitätsstörungen über dem lateralen Fußrücken und Sprunggelenk auf, die mit dem sensiblen Innervationsgebiet des *N. fibularis superficialis* vereinbar wären. Dies entspricht in etwa der Häufigkeit, mit welcher ein Endast dieses sehr variabel verlaufenden Nervs nicht nur durch das laterale sondern auch durch das anteriore Kompartiment an die Oberfläche tritt [44]. In diesen Fällen wäre eine Schädigung eines sensiblen Endastes bei der elektiven, minimal-invasiven Fasziotomie durch das Fasziotom durchaus denkbar. Eine solche Nervenschädigung trat sei es bei Drexler et al. als auch bei De Fijter et al. nach minimal-invasiver Spaltung des anterioren Kompartiments mittels Fasziotom bei etwa 2% der Patient*innen auf [30,40]. In einer Notfallsituation wäre dies eine durchaus zu vernachlässigende Komplikation, bei einer elektiven Fasziotomie sollte der Verlauf des Nerven aber nach Möglichkeit beachtet und geschont werden [39,44]. Die genaue Genese dieser Sensibilitätseinschränkungen müsste in weiteren Untersuchungen abgeklärt werden.

Ein Vergleich dieser Ergebnisse mit denen anderer Studien war aufgrund des Fehlens von Publikationen mit vergleichbarem Kollektiv und ähnlichen Zielgrößen kaum möglich. Allerdings ließ sich die mittlere ROM der DE der untersuchten Fälle von 12,4° durchaus mit den Ergebnissen von Obremskey et al. vergleichen, welche 12 Monate nach Marknagelung von Tibiaschaftfrakturen eine ROM von 13,2° erhoben [77]. Weiter waren die Ergebnisse in Bezug auf die Korrelation von Kraft und ROM der Fußhebung, wie bereits beschrieben, gut mit denen von Guillén-Rogel et al. vereinbar [70].

5.4 Ausblick

Die Durchführung einer minimal-invasiven anterioren Fasziotomie bei elektiven Tibiaosteotomien mittels Marknagel ist eine von vielen Operateuren etablierte Maßnahme, um ein postoperatives KS zu verhindern. Das Risiko bei Unterlassung dieser Maßnahme ist nicht abschließend geklärt. Studien, in welchen ein postoperatives KS als Komplikation einer elektiven Marknagelung der Tibia auftrat, sowie eigene Beobachtungen lassen aber auf eine Auftretenswahrscheinlichkeit von etwa 1/12-20 Fällen schließen [11,29]. Auch besteht nach Manifestation eines KS ein sehr hohes Risiko von schweren bleibenden Schäden, welche von Muskel- und Nervenschädigung (z.B. Fallfuß) bis zum Verlust der Extremität und in seltenen Fällen bis zum Tod reichen. Diese Studie konnte erstmals zeigen, dass es im langfristigen Verlauf nach Tibiaosteotomien mit prophylaktischer Fasziotomie nur in sehr wenigen Fällen zu einer subjektiv und/oder klinisch relevanten Funktionseinschränkung der Fußhebung kommt. Vor diesem Hintergrund erscheint die Durchführung einer prophylaktischen Fasziotomie bei entsprechenden Eingriffen weiterhin gerechtfertigt. Aufgrund des festgestellten Zusammenhangs zwischen ROM der DE im OSG und subjektiven Beschwerden sollte in der Nachbehandlung aber insbesondere der aktive und passive Bewegungsumfang im OSG wiederholt kontrolliert und bei Bedarf gezielt verbessert werden, bis Normwerte erreicht werden, um langfristige subjektive Beeinträchtigungen zu vermeiden.

Um eine abschließende Aussage über den isolierten Nutzen und das Risiko der Fasziotomie als Zusatzeingriff bei Tibiaosteotomien zu treffen, sollte deren Wirksamkeit in der Prävention des postoperativen akuten KS und deren klinische Konsequenzen in einem prospektiven Studienansatz mit ausreichender Fallzahl verfolgt werden. Eine Fallzahlberechnung auf Grundlage eines Abfalls der MIMK unter die 10%-Normperzentile (Schwellenwert zur klinischen Relevanz nach Huber et al.) sowie den Standardabweichungen nach Stoll et al. ergab eine notwendige Fallzahl von mindestens n=13 [47,49]. Ein anderer Ansatz der Fallzahlberechnung mit einer Mindestzahl von n=42 orientiert sich an einer Arbeit von Stucki et al., in welcher die isometrische Maximalkraftmessung mit Ergebnissen des Health Assessment Questionnaire (HAQ) korreliert wurden [78]. Hier zeigte sich, dass die kleinste, klinisch relevante Funktionsminderung im HAQ einer Kraftminderung von etwa 15% der MIMK entsprach. Da diese Ergebnisse jedoch auf Messungen an Knie und Ellbogen von Patient*innen mit Rheumatoider Arthritis beruhen, müsste kritisch überprüft

werden, ob die Übertragbarkeit auf die DE im OSG und auf das vorliegende Patientenkollektiv gegeben ist. Somit ist für eine prospektive Studienplanung aktuell keine Fallzahlplanung anhand verfügbarer Studienergebnisse möglich und muss individuell vorgenommen werden.
Anhand prä- und postoperativer Messungen von Kraft und ROM mittels Kraftmessgerät und Goniometer sowie Befragungen zu fest definierten Zeitpunkten im Behandlungsverlauf könnten die Schwächen, die sich in dieser Studie offenbart haben, umgangen werden. Ebenso könnten in einem prospektiven Ansatz die Anamnese der Patient*innen sowie die genaue Ursache und das Ausmaß der Beinlängendifferenz oder Achsabweichung erfasst und deren Auswirkung auf das Ergebnis bestimmt werden. Zuletzt könnten auch Details der Behandlung, wie der Distraktions-Konsolidierungsindex bei Längenkorrekturen oder die Art und Dauer der postoperativen Physiotherapie, mit den erhobenen Werten korreliert werden.

In einem zweiten Schritt könnte ein kontrolliert-randomisiertes Studiendesign in diesem Zusammenhang noch höhere Aussagekraft bringen, wobei hier zunächst die Frage gestellt werden muss, ob es ethisch vertretbar wäre, in einer der beiden Behandlungsgruppen bewusst auf die prophylaktische Fasziotomie zu verzichten und das Risiko für ein postoperatives KS einzugehen. Ein Multi-Center-Ansatz in Kooperation mit Häusern, welche bislang anstelle der Fasziotomie ein engmaschiges postoperatives klinisches Monitoring mit durchgehender OP-Bereitschaft durchführen, wäre aber denkbar. Für ein solches Monitoring könnte beispielsweise das Edinburgh Protokoll von McQueen und Court-Brown zum Einsatz kommen, um ein KS möglichst früh zu erkennen, gleichzeitig aber keine unnötigen Fasziotomien durchzuführen [36]. In Zukunft könnten auch (ggf. nicht-invasive) pH-Wert-Messungen im betroffenen Kompartiment die Diagnosemöglichkeiten erweitern und vereinfachen [27,28].

6 Zusammenfassung

Hintergrund: Eine minimal-invasive prophylaktische Fasziotomie des anterioren Kompartiments wird im Rahmen von Tibiaosteotomien zur Längen-, Achs- und/oder Torsionskorrektur mit anschließender Marknagelung von vielen Operateuren aufgrund des erhöhten Risikos eines postoperativen KS durchgeführt. Die funktionellen Auswirkungen dieses Eingriffes sind bislang noch nicht untersucht.

Zielsetzung: Diese Studie sollte langfristige subjektive Ergebnisse nach elektiver Tibiaosteotomie und Fasziotomie bei Patient*innen ohne vorherige muskuläre Einschränkung aufzeigen. Zudem sollten erstmals in einem solchen Kollektiv objektive Parameter der Fußhebung erhoben und diese mit den subjektiven Beschwerden korreliert werden. Dadurch sollte zum einen das langfristige funktionelle und subjektive Outcome dieser wenig beschriebenen Patientengruppe untersucht werden und zum anderen eine erste Nutzen-Risiko-Abwägung der Fasziotomie in der Vermeidung des KS getroffen werden.

Material und Methoden: 41 Fälle (28 Frauen, 13 Männer), bei welchen eine prophylaktische Fasziotomie im Rahmen von elektiven Längen-, Achs und/oder Torsionskorrekturen der Tibia mittels Marknagel durchgeführt wurden, wurden im Mittel 6,1 ± 4,1 Jahre postoperativ zur subjektiven Einschätzung der Funktion der Fußhebermuskulatur befragt. In 23 Fällen (15 Frauen, 8 Männer) wurden die Kraft (MIMK) und die ROM der DE im OSG gemessen. Die Kraftwerte wurden mit der 10%-Normperzentile, der Grenze zu einer klinisch relevanten Kraftminderung, verglichen. Soweit anwendbar, wurden die Parameter jeweils mit der gesunden, nicht operierten Gegenseite verglichen. Die Korrelation von subjektiven Beschwerden mit objektiv gemessenen Parametern wurde in Subgruppenanalysen ausgewertet.

Ergebnisse: 78,1% der Fälle berichteten zum Untersuchungszeitpunkt über keine oder nur geringe subjektive Beschwerden der Fußhebung. Bezüglich Großzehen- und übriger Zehenhebung waren dies 87,8% bzw. 92,7% der Fälle. Die mittlere Kraft der operierten Fälle unterschied sich nicht signifikant von der geschlechtsspezifischen 10%-Normperzentile für Frauen: 13,0 kgf vs. 13,3 ± 3,5 [11,4; 15,2] kgf und Männer: 20,0 kgf vs. 18,6 ± 5,6 [13,9; 23,2] kgf. Die mittlere Kraft der Fußheber der fasziotomierten Seite war mit 16,0 ± 6,5 [11,6; 20,3] kgf signifikant

geringer als die der gesunden Gegenseite mit 17,5 ± 6,3 [13,3; 21,7] kgf ($p<0.01$). Die subjektive Beeinträchtigung der Fußhebung korrelierte signifikant negativ mit der ROM (r_s= -0,46; $p<0,05$), nicht aber mit der Kraft.

Schlussfolgerung: Nur wenige Patient*innen, bei welchen im Zuge einer Tibiaosteotomie zur Längen-, Achs- und/oder Torsionskorrektur eine prophylaktische Fasziotomie durchgeführt wurde, berichteten von einer langfristigen, stärkeren Funktionseinschränkung der Fußhebermuskulatur. Die kleine, aber statistisch signifikante, Kraftminderung der DE zur gesunden Gegenseite fiel nicht signifikant unter die 10%-Normperzentile ab, welche die Grenze zur klinischen Auffälligkeit darstellt. Ebenso korrelierte die Kraft nicht mit subjektiven Beschwerden der Fußhebung. Falls diese jedoch im Alltag auftraten, korrelierten sie signifikant mit einer Verminderung der ROM der DE. Daher sollte bei entsprechenden Patient*innen im Rahmen der postoperativen Nachsorge ein besonderes Augenmerk auf den Bewegungsumfang gelegt werden. Insgesamt zeigten die Ergebnisse dieser Studie eine gute langfristige Funktion der Fußhebung nach Tibiaosteotomien mit prophylaktischer Fasziotomie und rechtfertigen somit in Zusammenschau der Ergebnisse und des Standes der Wissenschaft deren Durchführung zur Vermeidung der äußerst relevanten Komplikation eines postoperativen KS.

7 Literaturverzeichnis

1. Hasler, C. C. & Krieg, A. H. Current concepts of leg lengthening. *J. Child. Orthop.* **6**, 89–104 (2012).

2. Thaller, P. H., Wolf, F. & Kucukkaya, M. Surgical techniques for lengthening and deformity correction of the tibia with lengthening nails. *Tech. Orthop.* **29**, 150–157 (2014).

3. Thaller, P. H., Degen, N., Fürmetz, J. & Wolf, F. Correction of length, alignment and torsion with fully implantable lengthening nails. Experiences with five different systems. *Trauma Berufskrankh.* **19**, 182–190 (2017).

4. Wittmoser, R. Ostosythesis by Pressure [Zur Druckosteosynthese]. *Langenbecks Arch. Für Klin Chir.* **276**, 231 (1953).

5. Ilizarov, G. A. & Deviatov, A. A. [Surgical lengthening of the shin with simultaneous correction of deformities]. *Ortop. Travmatol. Protez.* **30**, 32–37 (1969).

6. Ramos, T., Eriksson, B. I., Karlsson, J. & Nistor, L. Ilizarov external fixation or locked intramedullary nailing in diaphyseal tibial fractures: a randomized, prospective study of 58 consecutive patients. *Arch. Orthop. Trauma Surg.* **134**, 793–802 (2014).

7. Seybold, D., Geßmann, J., Özokyay, L., Muhr, G. & Graf, M. Der Taylor Spatial Frame: Korrektur von posttraumatischen Deformitäten an Unterschenkel und Rückfuß. *Unfallchirurg* **111**, 985–996 (2008).

8. Seide, K., Wolter, D. & Kortmann, H. R. Fracture reduction and deformity correction with the hexapod Ilizarov fixator. *Clin. Orthop.* 186–195 (1999).

9. Burghardt, R. D., Manzotti, A., Bhave, A., Paley, D. & Herzenberg, J. E. Tibial lengthening over intramedullary nails: A matched case comparison with Ilizarov tibial lengthening. *Bone Jt. Res.* **5**, 1–10 (2016).

10. Rozbruch, S. R., Birch, J. G., Dahl, M. T. & Herzenberg, J. E. Motorized intramedullary nail for management of limb-length discrepancy and deformity. *J. Am. Acad. Orthop. Surg.* **22**, 403–409 (2014).

11. Bilen, F. E., Kocaoglu, M., Eralp, L. & Balci, H. I. Fixator-assisted nailing and consecutive lengthening over an intramedullary nail for the correction of tibial deformity. *Bone Jt. J.* **92**, 146–152 (2010).

12. Rozbruch, S. R., Kleinman, D., Fragomen, A. T. & Ilizarov, S. Limb lengthening and then insertion of an intramedullary nail: a case-matched comparison. *Clin. Orthop.* **466**, 2923–2932 (2008).

13. Sabzevari, S., Ebrahimpour, A., Roudi, M. K. & Kachooei, A. R. High Tibial Osteotomy: A Systematic Review and Current Concept. . *NUMBER* **4**, 9 (2016).

14. Thaller, P. H. *et al.* Intraoperative customization of intramedullary nails – First results. *Injury* **50**, 11–16 (2019).

15. Fürmetz, J. *et al.* Blocking screws for alignment control in intramedullary limb lengthening. *Injury* **48**, 1597–1602 (2017).

16. Kim, K.-I., Thaller, P. H., Ramteke, A., Lee, S. H. & Lee, S.-H. Corrective Tibial Osteotomy in Young Adults Using an Intramedullary Nail. *Knee Surg. Relat. Res.* **26**, 88–96 (2014).

17. Garfin, S. R. *et al.* Role of fascia in maintenance of muscle tension and pressure. *J. Appl. Physiol.* **51**, 317–320 (1981).

18. von Keudell, A. G. *et al.* Diagnosis and treatment of acute extremity compartment syndrome. *The Lancet* **386**, 1299–1310 (2015).

19. Benjamin, M. The fascia of the limbs and back - a review. *J. Anat.* **214**, 1–18 (2009).

20. de Bruijn, J., Winkes, M., van Eerten, P. & Scheltinga, M. Chronisches

belastungsbedingtes Kompartmentsyndrom als Ursache anterolateraler Beinschmerzen. *Unfallchirurg* **122**, 840–847 (2019).

21. Jäger, C. & Echtermeyer, V. Kompartmentsyndrom des Unterschenkels und des Fußes: Anatomie und Pathophysiologie. *Unfallchirurg* **111**, 768–775 (2008).

22. Frink, M., Hildebrand, F., Krettek, C., Brand, J. & Hankemeier, S. Compartment Syndrome of the Lower Leg and Foot. *Clin. Orthop. Relat. Res.* **468**, 940–950 (2010).

23. Ulmer, T. The clinical diagnosis of compartment syndrome of the lower leg: are clinical findings predictive of the disorder? *J. Orthop. Trauma* **16**, 572–577 (2002).

24. Staudt, J. M., Smeulders, M. J. C. & van der Horst, C. M. A. M. Normal compartment pressures of the lower leg in children. *J. Bone Joint Surg. Br.* **90-B**, 215–219 (2008).

25. Duckworth, A. D. & McQueen, M. M. The Diagnosis of Acute Compartment Syndrome: A Critical Analysis Review. *JBJS Rev.* 1 (2017) doi:10.2106/JBJS.RVW.17.00016.

26. Doro, C. J., Sitzman, T. J. & O'Toole, R. V. Can intramuscular glucose levels diagnose compartment syndrome?: *J. Trauma Acute Care Surg.* **76**, 474–478 (2014).

27. McMillan, T. E., Gardner, W. T., Schmidt, A. H. & Johnstone, A. J. Diagnosing acute compartment syndrome—where have we got to? *Int. Orthop.* **43**, 2429–2435 (2019).

28. Challa, S. T., Hargens, A. R., Uzosike, A. & Macias, B. R. Muscle Microvascular Blood Flow, Oxygenation, pH, and Perfusion Pressure Decrease in Simulated Acute Compartment Syndrome: *J. Bone Jt. Surg.* **99**, 1453–1459 (2017).

29. Kenawey, M., Krettek, C., Liodakis, E., Wiebking, U. & Hankemeier, S. Leg lengthening using intramedullay skeletal kinetic distractor: Results of 57 consecutive applications. *Injury* **In Press, Corrected Proof**, (2010).

30. Drexler, M. *et al.* Single minimal incision fasciotomy for the treatment of chronic exertional compartment syndrome: outcomes and complications. *Arch. Orthop. Trauma Surg.* **137**, 73–79 (2017).

31. Waterman, C. B. R., Laughlin, C. M., Kilcoyne, C. K., Cameron, K. L. & Owens, L. B. D. Surgical Treatment of Chronic Exertional Compartment Syndrome of the Leg: Failure Rates and Postoperative Disability in an Active Patient Population. *J. Bone Jt. Surg.* **95**, 592–596 (2013).

32. Verleisdonk, E. J. M. M., Schmitz, R. F. & van der Werken, C. Long-term results of fasciotomy of the anterior compartment in patients with exercise-induced pain in the lower leg. *Int. J. Sports Med.* **25**, 224–229 (2004).

33. Edmundsson, D. S., Toolanen, G. L. & Stål, P. S. Muscle changes in patients with diabetes and chronic exertional compartment syndrome before and after treatment with fasciotomy. *Muscle Nerve* (2017) doi:10.1002/mus.25715.

34. Jäger, C. & Zeichen, J. Das akute Kompartmentsyndrom des Unterschenkels. *Oper. Orthop. Traumatol.* **23**, 5–14 (2011).

35. Whitesides, T. E., Haney, T. C., Morimoto, K. & Harada, H. Tissue pressure measurements as a determinant for the need of fasciotomy. *Clin. Orthop.* 43–51 (1975).

36. McQueen, M. M. & Court-Brown, C. M. Compartment Monitoring in Tibial Fractures: The Pressure Threshold for Decompression. *J. Bone Joint Surg. Br.* **78-B**, 99–104 (1996).

37. White, T. O., Howell, G. E. D., Will, E. M., Court-Brown, C. M. & McQueen, M. M. Elevated Intramuscular Compartment Pressures Do Not Influence Outcome after Tibial Fracture: *J. Trauma Inj. Infect. Crit. Care* **55**, 1133–1138 (2003).

38. Maffulli, N., Loppini, M., Spiezia, F., D'Addona, A. & Maffulli, G. D. Single minimal incision fasciotomy for chronic exertional compartment syndrome of the lower leg. *J. Orthop. Surg.* **11**, (2016).

39. Sebik, A. & Doğan, A. A technique for arthroscopic fasciotomy for the chronic exertional tibialis anterior compartment syndrome. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* **16**, 531–534 (2008).

40. de Fijter, W. M., Scheltinga, M. R. & Luiting, M. G. Minimally Invasive Fasciotomy in Chronic Exertional Compartment Syndrome and Fascial Hernias of the Anterior Lower Leg: Short- and Long-Term Results. *Mil. Med.* **171**, 399–403 (2006).

41. Heemskerk, J. & Kitslaar, P. Acute Compartment Syndrome of the Lower Leg: Retrospective Study on Prevalence, Technique, and Outcome of Fasciotomies. *World J. Surg.* **27**, 744–747 (2003).

42. Frink, M. *et al.* Long term results of compartment syndrome of the lower limb in polytraumatised patients. *Injury* **38**, 607–613 (2007).

43. Huijing, P. A. & Baan, G. C. Myofascial Force Transmission Causes Interaction between Adjacent Muscles and Connective Tissue: Effects of Blunt Dissection and Compartmental Fasciotomy on Length Force Characteristics of Rat Extensor Digitorum Longus Muscle. *Arch. Physiol. Biochem.* **109**, 97–109 (2001).

44. Tomaszewski, K. A. *et al.* Superficial fibular nerve variations of fascial piercing: A meta-analysis and clinical consideration: Superficial Fibular Nerve Variations. *Clin. Anat.* **30**, 120–125 (2017).

45. Kramer, D. E. *et al.* Diagnosis and Management of Symptomatic Muscle Herniation of the Extremities: A Retrospective Review. *Am. J. Sports Med.* **41**, 2174–2180 (2013).

46. Stark, T., Walker, B., Phillips, J. K., Fejer, R. & Beck, R. Hand-held dynamometry correlation with the gold standard isokinetic dynamometry: a systematic review. *PM R* **3**, 472–479 (2011).

47. Huber, E., Stoll, T., Ehrat, B. & Stucki, G. Zuverlässigkeit und Normperzentilen einer neuen isometrischen Muskelkraftmessmethode. *Physiotherapie* **5**, 29–39 (1997).

48. Spink, M. J., Fotoohabadi, M. R. & Menz, H. B. Foot and Ankle Strength Assessment Using Hand-Held Dynamometry: Reliability and Age-Related Differences. *Gerontology* **56**, 525–532 (2010).

49. Stoll, T., Huber, E., Seifert, B., Michel, B. A. & Stucki, G. Maximal isometric muscle strength: normative values and gender-specific relation to age. *Clin. Rheumatol.* **19**, 105–113 (2000).

50. Andrews, A. W., Thomas, M. W. & Bohannon, R. W. Normative values for isometric muscle force measurements obtained with hand-held dynamometers. *Phys. Ther.* **76**, 248–259 (1996).

51. Bohannon, R. W. Reference Values for Extremity Muscle Strength Obtained by Hand-Held Dynamometry From Adults Aged 20 to 79 Years. 7.

52. Muscular weakness assessment: use of normal isometric strength data. The National Isometric Muscle Strength (NIMS) Database Consortium. *Arch. Phys. Med. Rehabil.* **77**, 1251–1255 (1996).

53. Meldrum, D., Cahalane, E., Conroy, R., Fitzgerald, D. & Hardiman, O. Maximum voluntary isometric contraction: Reference values and clinical application. *Amyotroph. Lateral Scler.* **8**, 47–55 (2007).

54. Geboers, J. F., Tuijl, J. van, Seelen, H. A. M. & Drost, M. R. Effect of immobilization on ankle dorsiflexion strength. *Scand. J. Rehabil. Med.* **32**, 66–71 (2000).

55. Awatani, T. *et al.* Same-session and between-day intra-rater reliability of hand-held dynamometer measurements of isometric shoulder extensor strength. *J. Phys. Ther. Sci.* **28**, 936–939 (2016).

56. Bohannon, R. W. Test-Retest Reliability of Hand-Held Dynamometry During a Single Session of Strength Assessment. *Phys. Ther.* **66**, 206–209 (1986).

57. Kelln, B. M., McKeon, P. O., Gontkof, L. M. & Hertel, J. Hand-held dynamometry: reliability of lower extremity muscle testing in healthy, physically active,young adults. *J. Sport Rehabil.* **17**, 160–170 (2008).

58. Bohannon, R. W. & Andrews, A. W. Interrater Reliability of Hand-Held Dynamometry. *Phys. Ther.* **67**, 931–933 (1987).

59. Bohannon, R. W. Intertester reliability of hand-held dynamometry: a concise summary of published research. *Percept. Mot. Skills* **88**, 899–902 (1999).

60. Wadsworth, C. T., Nielsen, D. H., Corcoran, D. S., Phillips, C. E. & Sannes, T. L. Interrater reliability of hand-held dynamometry: effects of rater gender, body weight, and grip strength. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.* **16**, 74–81 (1992).

61. Wikholm, J. B. & Bohannon, R. W. Hand-held Dynamometer Measurements: Tester Strength Makes a Difference. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.* **13**, 191–198 (1991).

62. Davis, P. R. *et al.* Repeatability, consistency, and accuracy of hand-held dynamometry with and without fixation for measuring ankle plantarflexion strength in healthy adolescents and adults. *Muscle Nerve* **56**, 896–900 (2017).

63. Stratford, P. W. & Balsor, B. E. A Comparison of Make and Break Tests Using a Hand-Held Dynamometer and the Kin-Com. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.* **19**, 28–32 (1994).

64. Sepic, S. B., Murray, M. P., Mollinger, L. A., Spurr, G. B. & Gardner, G. M. Strength and range of motion in the ankle in two age groups of men and women. *Am. J. Phys. Med.* **65**, 75–84 (1986).

65. Fugl-Meyer, A. R., Gustafsson, L. & Burstedt, Y. Isokinetic and static plantar flexion characteristics. *Eur. J. Appl. Physiol.* **45**, 221–234 (1980).

66. Fugl-Meyer, A. R. Maximum isokinetic ankle plantar and dorsal flexion torques in trained subjects. *Eur. J. Appl. Physiol.* **47**, 393–404 (1981).

67. Benninghoff, A. & Drenckhahn, D. *Taschenbuch Anatomie*. (Elsevier, Urban & Fischer, 2008).

68. Stefanyshyn, D. J. & Engsberg, J. R. Right to left differences in the ankle joint complex range of motion. *Med. Sci. Sports Exerc.* **26**, 551–555 (1994).

69. Valderrabano, V. *et al.* Muscular Lower Leg Asymmetry in Middle-Aged People. *Foot Ankle Int.* **28**, 242–249 (2007).

70. Guillén-Rogel, P., San Emeterio, C. & Marín, P. J. Associations between ankle dorsiflexion range of motion and foot and ankle strength in young adults. *J. Phys. Ther. Sci.* **29**, 1363–1367 (2017).

71. Moraux, A. *et al.* Ankle dorsi-and plantar-flexion torques measured by dynamometry in healthy subjects from 5 to 80 years. *BMC Musculoskelet. Disord.* **14**, 104 (2013).

72. Daubney, M. E. & Culham, E. G. Lower-Extremity Muscle Force and Balance Performance in Adults Aged 65 Years and Older. *Phys. Ther.* (1999) doi:10.1093/ptj/79.12.1177.

73. MacRae, P. G., Lacourse, M. & Moldavon, R. Physical Performance Measures That Predict Faller Status in Community-Dwelling Older Adults. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.* **16**, 123–128 (1992).

74. Fukagawa, N. K., Wolfson, L., Judge, J., Whipple, R. & King, M. Strength Is a Major Factor in Balance, Gait, and the Occurrence of Falls. *J. Gerontol. A. Biol. Sci. Med. Sci.* **50A**, 64–67 (1995).

75. Takazawa, K., Arisawa, K., Honda, S., Shibata, Y. & Saito, H. Lower-extremity muscle forces measured by a hand-held dynamometer and the risk of falls among day-care users in Japan: using multinomial logistic regression analysis. *Disabil. Rehabil.* **25**, 399–404 (2003).

76. Wall, B. T. *et al.* Substantial skeletal muscle loss occurs during only 5 days of disuse. *Acta Physiol. Oxf. Engl.* **210**, 600–611 (2014).

77. Obremskey, W. T., Cutrera, N. & Kidd, C. M. A prospective multi-center study of intramedullary nailing vs casting of stable tibial shaft fractures. *J. Orthop. Traumatol.* **18**, 69–76 (2017).

78. Stucki, G., Brühlmann, P., Stucki, S. & Michel, B. A. Isometric muscle strength is an indicator of self-reported physical functional disability in patients with rheumatoid arthritis. *Br. J. Rheumatol.* **37**, 643–648 (1998).

8 Anhang

8.1 Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung	u.a.	unter anderem
BMI	Body-Mass-Index	v.a.	vor allem
bzw.	beziehungsweise	vgl.	vergleiche
CECS	chronic exertional compartment syndrome	vs.	versus
		z.B.	zum Beispiel
DE	Dorsalextension	*95%-KI*	95%-Konfidenzintervall
EMG	Elektromyogramm		
HAQ	Health Assessment Questionnaire		
HHD	hand-held dynamometer – handgehaltenes Kraftmessgerät		
ICC	intraclass correlation coefficient		
kg	Kilogramm		
kgf	kilogram-force		
kp	Kilopond		
KS	Kompartmentsyndrom		
LMU	Ludwig-Maximilians-Universität		
LON	lenghtening over nail		
M	Mittelwert		
MeSH	Medical Subject Headings		
MIMK	maximale isometrische Muskelkraft		
N	Newton		
n	Fallzahl		
n.s.	nicht signifikant		
NRS	numerische Ratingskala		
NIRS	Nahinfrarotspektroskopie		
OSG	Oberes Sprunggelenk		
pAVK	periphere arterielle Verschlusskrankheit		
PF	Plantarflexion		
ROM	Range of Motion		
SD	einfache Standardabweichung		
Tab.	Tabelle		

8.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Querschnitt des Unterschenkels (nach von Keudell et al.[18])..... 7

Abbildung 2 - Pathophysiologie des akuten KS (nach von Keudell et al.[18])..... 8

Abbildung 3 - Fasziotom zur minimal-invasiven Faszienspaltung 16

Abbildung 4 – Drei anatomische Varianten des N. fibularis superficialis (nach Tomaszewski et al.[44])..... 18

Abbildung 5 - Patientenrekrutierung 30

*Abbildung 6 - Übersicht über die ausgewerteten Patient*innen- und Fasziotomiefälle 31*

Abbildung 7 - Handgehaltener Zugkraftmesser Force Dial ™ Model FDL 100 Force Gage 33

Abbildung 8 - Messaufbau Kraftmessung (LMU, H. Thun ©) 36

Abbildung 9 - Muskelhernien bei Anspannung bzw. im Stehen..... 37

Abbildung 10 - Fasziotomiefälle für die Auswertung der Fragebögen zur Funktion im OSG.... 41

Abbildung 11 - Darstellung der Ergebnisse des Fragebogens zur Erfassung der subjektiven Dorsalextensionsfunktion nach Fasziotomie..... 42

Abbildung 12 - Darstellung der Ergebnisse des Fragebogens zur Erfassung von funktionellen Beschwerden in Form von Treppensteigen 43

Abbildung 13 - Gegenüberstellung des NRS zur Erfassung der subjektiven Dorsalextensionsfunktion 44

Abbildung 14 - Alle in Bezug auf Kraft (MIMK) und ROM der DE im OSG nachuntersuchten Fasziotomiefälle..... 45

Abbildung 15 - Verteilungen der gemessenen MIMK der DE..... 46

Abbildung 16 - Kraft (MIMK) der DE im OSG der OP-Seite im Vergleich mit der jeweiligen 10%-Normperzentile. 47

Abbildung 17 - Für den Seitenvergleich der Kraft (MIMK) und der ROM der DE ausgewertete Patientengruppe 48

Abbildung 18 - Kraft (MIMK) der DE von OP- und gesunder Gegenseite im Seitenvergleich ($p<0,05$) 49

Abbildung 19 - Aktive ROM der DE von OP- und gesunder Gegenseite im Seitenvergleich (n.s.) 50

Abbildung 20 - Streudiagramm mit Regressionsgerade ($r_s=0,584$; $p<0,05$): Korrelation zwischen Kraftwerten und aktiver ROM der DE im OSG.. 52

Abbildung 21 - Abweichung der gemessenen MIMK der DE von der jeweiligen 10%-Normperzentile nach subjektiven Beschwerdegruppen in der Funktion „Fuß anheben“ (n.s.). 54

Abbildung 22 - Gemessene ROM-Werte der DE nach subjektiven Beschwerdegruppen in der Funktion „Fuß anheben“ ($p<0,05$). 55

Abbildung 23 - Streudiagramm mit Regressionsgerade ($r_s= -0,213$; n.s.): Korrelation zwischen gemessenen Kraftwerten und subjektiven Beschwerden in der Funktion „Fuß anheben“ 55

Abbildung 24 - Streudiagramm mit Regressionsgerade ($r_s= -0,463$; $p<0,05$): Korrelation zwischen gemessenen ROM-Werten und subjektiven Beschwerden in der Funktion „Fuß anheben“ 56

8.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 - MeSH (Medical Subject Headings) -Termini der Literatur-Recherche 2
Tabelle 2 - Alter zum OP-Zeitpunkt nach Geschlecht 39
Tabelle 3 - Seitenverteilung nach Geschlecht 39
Tabelle 4 - OP-Indikation (Längen- vs. Achs- und/oder Torsionskorrektur) nach Geschlecht.. 40
Tabelle 5 - Body-Mass-Index (BMI) nach Geschlecht 40
Tabelle 6 - Auswertung der Fragebögen zur Funktion der Fußhebung nach Fasziotomie..... 42
Tabelle 7 – Kraft (MIMK) vs. 10%-Normperzentile aus Huber et al.[47] nach Geschlecht 46
Tabelle 8 - Kraft (MIMK) der DE im OSG im Seitenvergleich 49
Tabelle 9 - Aktive ROM der DE im OSG im Seitenvergleich 50
Tabelle 10 - Kraft vs. 10%-Normperzentile und aktive ROM der DE 51
Tabelle 11 - Kraft und aktive ROM der DE – „Fuß anheben“ 54
Tabelle 12 - Kraft und aktive ROM der DE – „Treppe-Hinaufsteigen und -Hinabsteigen“ 57
Tabelle 13 - Kraft und aktive ROM der DE: Längen- vs. Achs-, Torsionskorrektur 58
Tabelle 14 - Folgen der Fasziotomie: Muskelhernie und Sensibilitätsstörung 59
Tabelle 15 - Kraft und ROM der DE bei Fällen mit sicht- / tastbarer Muskelhernie vs. ohne.... 60

8.4 Votum der Ethikkommission

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

ETHIKKOMMISSION BEI DER LMU MÜNCHEN

Ethikkommission · Pettenkoferstr. 8 · 80336 München

Dr. med. Nikolaus Degen
Klinikum der Universität München
Klinik für Allgemeine-, Unfall- und
Wiederherstellungschirurgie
Nussbaumstr. 20
80336 München

Vorsitzender:
Prof. Dr. W. Eisenmenger
Telefon+49 (0)89 440055191
Telefax+49 (0)89 440055192
Ethikkommission@
med.uni-muenchen.de
www.ethikkommission.med.uni
-muenchen.de

Anschrift:
Pettenkoferstr. 8a
D-80336 München

20.09.2018 Hb/ck

Projekt Nr: **18-527** (bitte bei Schriftwechsel angeben)

Beratung nach Fakultätsrecht

Studientitel: Klinische Ergebnisse von Marknagelkorrekturen bei Längen-, Achs- und Torsionsabweichungen an der unteren Extremität
Antragsteller: Dr. med. Nikolaus Degen, Klinikum der Universität München, Klinik für Allgemeine-, Unfall- und Wiederherstellungschirurgie, Nussbaumstr. 20, 80336 München

Sehr geehrter Herr Dr. Degen,

besten Dank für Ihr Schreiben vom 06.09.2018 mit der Beantwortung unserer Fragen bzw. Erfüllung der Auflagen und den noch ausstehenden bzw. überarbeiteten Unterlagen.

Die Ethikkommission (EK) kann Ihrer Studie nun die ethisch-rechtliche Unbedenklichkeit zuerkennen.

Vorsorglich möchte ich darauf hinweisen, dass auch bei einer positiven Beurteilung des Vorhabens durch die EK die ärztliche und juristische Verantwortung für die Durchführung des Projektes uneingeschränkt bei Ihnen und Ihren Mitarbeitern verbleibt.

Allgemeine Hinweise:

- Änderungen im Verlauf der Studie sind der EK zur erneuten Prüfung vorzulegen.
- Schwerwiegende unerwartete studienabhängige Ereignisse sind der EK mitzuteilen (trifft nur für interventionelle Projekte zu).
- Das Ende der Studie ist anzuzeigen und das Ergebnis vorzulegen.
- Die ärztliche und juristische Verantwortung bei der Durchführung der Studie verbleibt uneingeschränkt bei Ihnen und Ihren Mitarbeitern. Bitte berücksichtigen Sie, dass diese Bewertung die ggf. erforderliche Konsultation des behördlichen Datenschutzbeauftragten nach Art. 26 BayDSG nicht ersetzt.

Mitglieder der Kommission:
Prof. Dr. W. Eisenmenger (Vorsitzender), Prof. Dr. E. Held (Vorsitzender), Prof. Dr. H. Angstwurm, Prof. Dr. S. Böck, J. Eckert, Prof. Dr. B. Emmerich, Prof. Dr. S. Endres, Prof. Dr. R. Fischer, Prof. Dr. H. U. Gallwas, Prof. Dr. O. Genzel- Boroviczény, Prof. Dr. K. Hahn, Prof. Dr. N. Harbeck, Dr. B. Henrikus, Prof. Dr. C. Heumann, Prof. Dr. A. Holstege, Prof. Dr. Huber, Prof. Dr. V. Klauss, Dr. F. Kohlmayer, Prof. Dr. J. Lindner, Prof. Dr. S. Lorenzl, Prof. Dr. G. Marckmann, Dr. V. Mönch, PD Dr. Dr. H. Mückter, Prof. Dr. A. Nassehi, Prof. Dr. R. Penning, Prof. Dr. J. Peters, Prof. Dr. K. Pfeifer, Dr. I. Saake, Prof. Dr. H. Schardey, Prof. Dr. M. Schmauss, Prof. Dr. U. Schroth, Prof. Dr. O. Steinlein, PD Dr. G. Stüben, Prof. Dr. H. Waldner, PD Dr. U. Wandl, Prof. Dr. C. Wendtner, Dr. A. Yassouridis, Dr. C. Zach

Für Ihre Studie wünsche ich Ihnen viel Erfolg.

Mit freundlichen Grüßen

Prof. Dr. W. Eisenmenger
Vorsitzender der Ethikkommission

8.5 Fragebogen

Stand: 23.06.2018

Fragebogen zur Studie:
„Messung von Kraft und Funktion im oberen Sprunggelenk nach prophylaktischer anteriorer Fasziotomie am Unterschenkel “

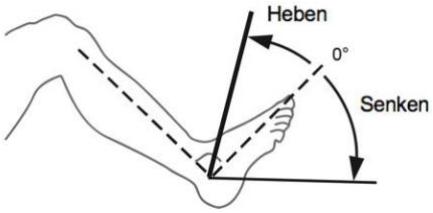
Patientendaten

Name: _____

Vorname: _____

Geb.datum: _____ Ausgefüllt am: _____

Bitte bewerten Sie die folgenden Aussagen nach Ihrem subjektiven Empfinden,
von 1 (trifft gar nicht zu) bis 5 (trifft voll und ganz zu):



Es fällt mir schwerer als vor der Operation…					
...den Fuß anzuheben	1	2	3	4	5
...die große Zehe anzuheben	1	2	3	4	5
...die übrigen Zehen anzuheben	1	2	3	4	5
Z3: Ich hatte auch nach Ablegen der Unterarmgehstützen noch Probleme…					
...Treppen hinauf zu gehen	1	2	3	4	5
...Treppen hinab zu steigen	1	2	3	4	5
...wenn 2-5: wie lange hielten die Probleme an?					
...wenn 2-5: sind diese Beschwerden vollständig abgeklungen?	1	2	3	4	5

Andere Anmerkungen zur Fuß- / Zehenhebung im Rahmen der Behandlung
(z.B. auch Gefühlsstörungen am Unterschenkel/Vorfuß etc.)::

8.6 Untersuchungsprotokoll

Stand: 16.07.2018

Untersuchungsprotokoll zur Studie:
„Messung von Kraft und Funktion im oberen Sprunggelenk nach prophylaktischer anteriorer Fasziotomie am Unterschenkel “

Patientendaten

Name: _____

Vorname: _____

Geb.datum: _____ ausgefüllt am: _____

Größe: _____ cm Gewicht: _____ kg

Fasziotomie: O rechts O links O beidseits

Kraftmessung mit HHD [kp]:

1. Messung re: _____ 1. Messung li: _____

2. Messung re: _____ 2. Messung li: _____

ROM Dorsalextension und Plantarflexion im OSG [°]:

Dorsalextension

ROM (aktiv) re: _____ ROM (aktiv) li: _____

ROM (passiv) re: _____ ROM (passiv) li: _____

Plantarflexion

ROM (aktiv) re: _____ ROM (aktiv) li: _____

ROM (passiv) re: _____ ROM (passiv) li: _____

Muskelhernie: O sicht- /tastbar O nicht sicht-/tastbar

Zehenspitzengang: O unauffällig O auffällig: _____

Fersengang: O unauffällig O auffällig: _____

Klinikum der Universität München | Klinik für Allgemeine, Unfall- und Wiederherstellungschirurgie (Direktor: Prof. W. Böcker)
Arbeitsgruppe 3D-Chirurgie (Bereichsleiter Dr. P.H. Thaller)

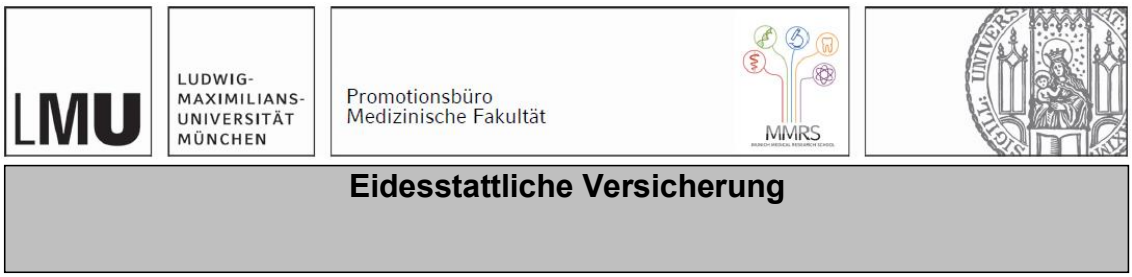
9 Danksagung

Ich möchte mich herzlich bei Herrn Dr. med. P.H. Thaller, M.Sc., sowohl für die Überlassung des Themas als auch für die Hilfestellungen bei verschiedensten Aspekten der Studie und der Dissertation bedanken. Besonders möchte ich auch Herrn Dr. med. N. Degen für die kontinuierliche Betreuung und Geduld danken. Ein großer Dank gilt Herrn Prof. Dr. med. E. Euler für die stetige Begleitung als habilitierter Betreuer und das konstruktive Korrekturlesen.

Danken möchte ich zudem Frau K. Hilpert-Will, Physiotherapeutin Bsc., medizinisch therapeutische Leiterin am Muskuloskelettalen Universitätszentrum München (MUM) der LMU, für das Überlassen des Kraftmessgerätes zur Durchführung der Nachuntersuchungen und die beigetragene Expertise. Weiter danke ich dem gesamten Team der Arbeitsgruppe 3D-Chirurgie für die Hilfsbereitschaft sowie Frau Dipl. Phys. K. Manz, M.Sc., vom Institut für Medizinische Informationsverarbeitung, Biometrie und Epidemiologie (IBE) der LMU für die freundliche Beratung bei der statistischen Auswertung und Frau H. Thun vom MultiMediaLabor Campus Innenstadt der LMU für die Erstellung einer anschaulichen Grafik.

Nicht zuletzt bedanke ich mich bei allen (ehemaligen) Patientinnen und Patienten für die Bereitschaft zur Teilnahme an der Studie.

10 Affidavit



Eidesstattliche Versicherung

Randeu, Tobias

Name, Vorname

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Dissertation mit dem Titel:

Prophylaktische Fasziotomie des anterioren Kompartiments bei Tibiaosteotomien: Subjektive und objektive Langzeitergebnisse der Dorsalextension im oberen Sprunggelenk

selbständig verfasst, mich außer der angegebenen keiner weiteren Hilfsmittel bedient und alle Erkenntnisse, die aus dem Schrifttum ganz oder annähernd übernommen sind, als solche kenntlich gemacht und nach ihrer Herkunft unter Bezeichnung der Fundstelle einzeln nachgewiesen habe.

Ich erkläre des Weiteren, dass die hier vorgelegte Dissertation nicht in gleicher oder in ähnlicher Form bei einer anderen Stelle zur Erlangung eines akademischen Grades eingereicht wurde.

Sursee, 31.05.2022	Tobias Randeu
Ort, Datum	Unterschrift Doktorand

11 Publikationsliste

Teile dieser Dissertation wurden im August 2021 durch den Springer Verlag als „Online first article“ in der Fachzeitschrift „Der Unfallchirurg“ publiziert:

Degen, N., Randeu, T., Wolf, F., Fürmetz, J., Euler, E., Böcker, W. & Thaller, PH. Prophylaktische Fasziotomie bei Tibia-Osteotomien: funktionelle Ergebnisse. Unfallchirurg (2021). https://doi.org/10.1007/s00113-021-01070-y