

AUS DER KLINIK FÜR KIEFER- UND GESICHTSCHIRURGIE
DER UNIVERSITÄT ZU LÜBECK
DIREKTOR: PROFESSOR DR. DR. PETER SIEG

**Einfluss der Transplantatlänge sowie der Spaltung der
Membrana interossea auf die Entnahmemorbidität
nach Fibulatransfer**

Inauguraldissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde
(Dr. med. dent.)

der Universität zu Lübeck

- Aus der Sektion Medizin -

vorgelegt von

DR. MED. ALI SHAKERY TEHRANY

aus Teheran-Iran

Lübeck 2019

1. Berichterstatter: Prof. Dr. Dr. Samer Hakim

2. Berichterstatterin/Berichterstatter:

Tag der mündlichen Prüfung:

Zum Druck genehmigt. Lübeck, den

Promotionskommission der Sektion Medizin

Für meine Familie

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	1
1.1. Einführung.....	1
1.2. Anatomie des Unterschenkels.....	2
1.2.1. Knöcherner Aufbau.....	2
1.2.2. Gefäßversorgung.....	3
1.2.3. Innervation.....	4
1.3. Muskellogen des Unterschenkels.....	5
1.4. Muskulatur des Unterschenkels.....	6
1.5. Fibulatransplantat.....	7
1.5.1. Überblick.....	7
1.5.2. Geschichte und Entwicklung.....	8
1.5.3. Transplantatentnahme über einen lateralen Zugang.....	9
1.6. Morbidität der Entnahmestelle.....	13
1.7. Fragestellung und Ziele.....	16
2. Material und Methoden.....	17
2.1. Material.....	17
2.1.1. Herkunft der Unterschenkelpräparate.....	17
2.1.2. Instrumente.....	17
2.1.3. Geräte / Software.....	18
2.2. Methoden.....	19
2.2.1. Lagerung der Präparate.....	19
2.2.2. Vorbereitung der Unterschenkelpräparate.....	19
2.2.3. Präparation und Datenmessung.....	22
2.2.4. Statistische Auswertung.....	25
3. Ergebnisse.....	26
3.1. Datenerhebung.....	26
3.1.1. Vorbereitung.....	26
3.1.2. Messung der Sehnenansatzdislokation.....	26
3.1.3. Zusammenfassung.....	28
4. Diskussion.....	35
4.1. Studiendesign.....	36
4.2. Chirurgische Entnahmetechnik und Transplantatlänge.....	37

4.3. Methodik der ausgewählten Zugspannung.....	39
4.4. Postoperative Morbidität.....	41
4.4.1. Kurzzeitmorbidität	41
4.4.2. Langzeitmorbidität.....	43
5. Zusammenfassung.....	52
6. Literaturverzeichnis	54
7. Danksagung	62
8. Lebenslauf.....	63

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1 Tibia, Fibula und Membrana interossea cruris eines rechten Unterschenkels aus Schünke, Schulte [3].....	2
Abb. 1.2 Varianten der Aufteilung der A. peronea aus Strauch, Yu [6].....	3
Abb. 1.3 Verlauf des N. fibularis communis aus Schünke, Schulte [3]	4
Abb. 1.4 Muskellogen und Leitungsbahnen am Unterschnkel aus Schünke, Schulte [3]	5
Abb. 1.5 Rechter Unterschenkel in der Ansicht von ventral aus Schünke, Schulte [3]	7
Abb. 1.6 Entnahme eines Fibulatransplantates modifiziert aus Wolff and Hölzle [1]	10
Abb. 1.7 Entnahme eines Fibulatransplantates, Darstellung des Gefäßbündels von anterior	10
Abb. 1.8 Entnahme eines Fibulatransplantates, Darstellung des Gefäßbündels von posterior aus Wolff and Hölzle [1].....	11
Abb. 1.9 Querschnittanatomie eines osteokutanen Fibulatransplantates aus Wolff and Hölzle [1].....	12
Abb. 2.1 Hautinzisionen entlang der Streckersehnen. Die isolierte Sehne des Halux wurde hervorgehoben.....	19
Abb. 2.2 Linker Fuß in der Ansicht von ventrolateral	19
Abb. 2.3 Übersichtsdarstellung des Versuchsaufbaus mit stabilisiertem Unterschenkel.....	21
Abb. 2.4 Querschnitt durch einen rechten Unterschenkel modifiziert aus Schünke, Schulte [3].....	22
Abb. 2.5 Sequentielle Durchtrennung der Membrana interossea und segmentale Osteotomie der Fibula	23
Abb. 3.1 Verschiebung des Sehnenansatzes des M. extensor hallucis longus (EHL) nach Spaltung der Membrana interossea und segmentaler Osteotomie der Fibula .	32
Abb. 3.2 Verschiebung des Sehnenansatzes des M. extensor digitorum longus (EDL) nach Spaltung der Membrana interossea und segmentaler Osteotomie der Fibula .	33
Abb. 3.3 Gesamtverschiebung des Sehnenansatzes des M. extensor digitorum longus (EDL, oben) sowie des M. extensor hallucis longus (EHL, unten) nach Spaltung der Membrana interossea und segmentaler Osteotomie der Fibula	34
Abb. 4.1 Spannung-Dehnungs-Diagramm einer Sehne nach Becker and Krahl [2] aus Rüter [5].....	40

Abkürzungsverzeichnis:

A.	Arteria
Aa.	Arteriae
Abb.	Abbildung
Art.	Artikulation
AOFAS	American Orthopaedic Foot and Ankle Society
BMI	Body Mass Index
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
cm	Zentimeter
EDL	extensor digitorum longus
EHL	extensor hallucis longus
et al.	et alii (und andere)
kg	Kilogramm
M.	Musculus
Mm.	Musculi
MRT	Magnetresonanztomographie
N.	Nervus
Nn.	Nervi
s.	siehe
vs.	versus

1. Einleitung

1.1. Einführung

Der Einsatz eines freien vaskularisierten Fibulatransplantates entwickelte sich zu einer etablierten rekonstruktiven Methode nach einem ablativen chirurgischen Eingriff im Bereich des Ober- und Unterkiefers [7-9]. Diese Methode bietet suffizientes Knochengewebe sowohl für eine kurzstreckige als auch für eine langstreckige Rekonstruktion der Mandibula und ermöglicht eine spätere Rehabilitation durch Implantat-getragene Restaurationen [10-12]. Ein wichtiges Thema, das bereits nach der Etablierung dieser Entnahmetechnik in retrospektiven sowie prospektiven Studien untersucht wurde, ist die Morbidität der Donor-Seite [13-16]. Die Studien berichten von einer Schwäche bis hin zu einem Funktionsverlust der Extensoren mit dem Resultat einer Gangstörung und insbesondere einer herabgesetzten Dorsalflexion des Fußes und der Großzehe bei einem beträchtlichen Anteil der Patienten [14, 17-20]. Die Morbidität der Donor-Seite kann durch eine selten auftretende Schädigung, besonders des N. fibularis profundus, unzureichend durch die eingesetzte Entnahmetechnik erklärt werden oder durch eine direkte Schädigung der an der Fibula inserierenden Muskeln. Betroffen sind die Peronealmuskeln (Fibularismuskulatur, Mm. fibulares longus et. brevis) und die Unterschenkelextensoren, der M. extensor hallucis longus (EHL) und M. extensor digitorum longus (EDL). Beide Muskeln entspringen an der Fibula und an der angrenzenden Membrana interossea an verschiedenen Stellen. In Abhängigkeit von der Länge und der Lage des entnommenen Fibula-Segments und dem Ausmaß der Ablösung der Membrana interossea lässt sich eine Dislokation oder ein Verlust des muskulären Ursprungs der Extensoren beobachten. Diese Veränderungen können letztendlich zu den oben genannten Komplikationen führen. Die variabel beschriebene Lage des muskulären Ursprungs beider Extensoren (EDL und EHL) wurde bisher nicht im Hinblick potentieller Unterschiede bezüglich der Morbidität der Donor-Seite in Folge der Entnahme eines freien Fibulatransplantates berücksichtigt. Das Ziel der vorliegenden Untersuchung war es, den Einfluss der ausgewählten Entnahmestelle und der Länge des entnommenen Fibulatransplantates auf einen Verlust des muskulotendinösen Ursprungs der EHL und EDL zu evaluieren und die relevanten Folgen im Hinblick auf die Morbidität der Donor-Seite zu eruieren.

1.2. Anatomie des Unterschenkels

1.2.1. Knöcherner Aufbau

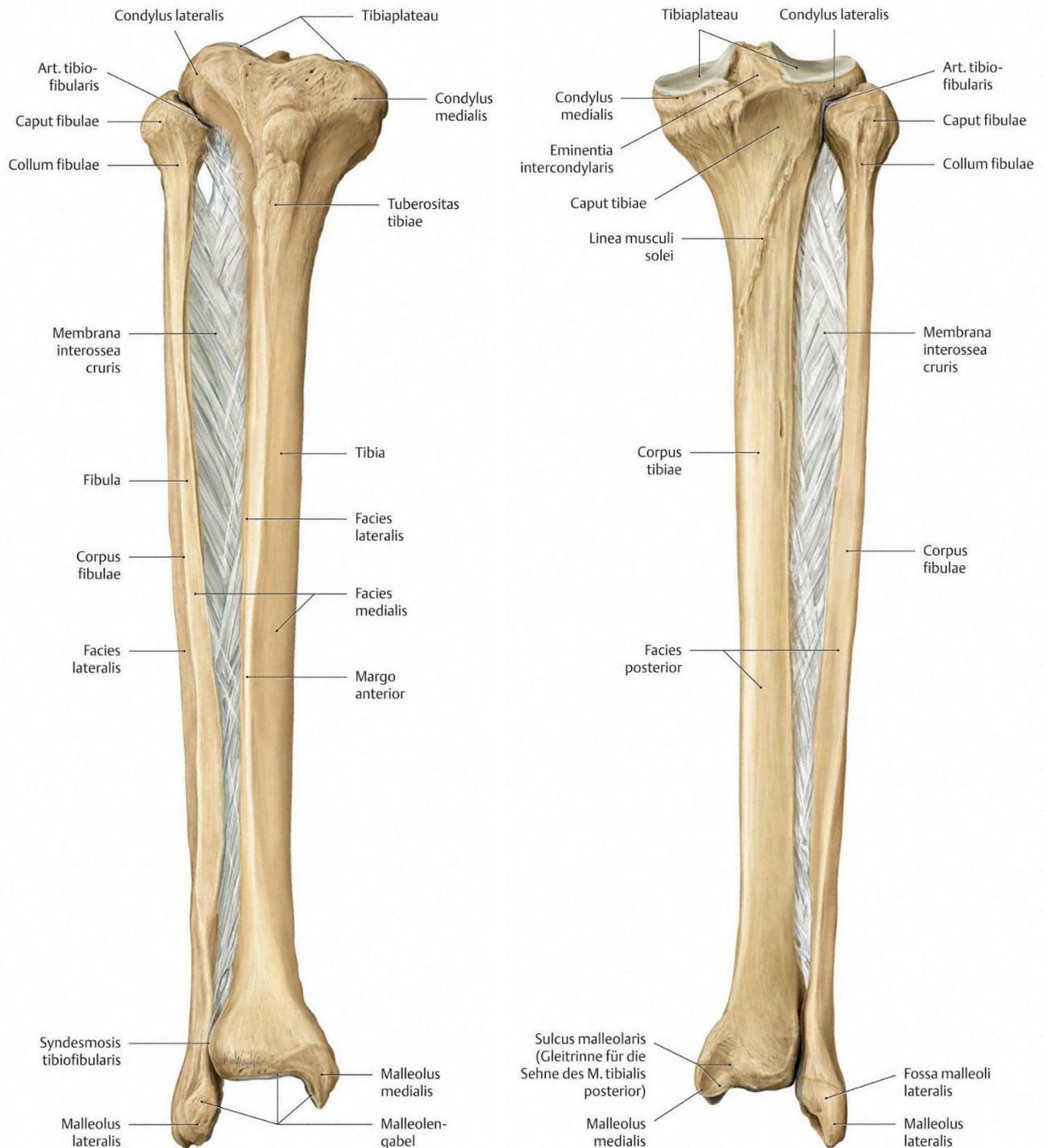


Abb. 1.1 Tibia, Fibula und Membrana interossea cruris eines rechten Unterschenkels aus Schünke, Schulte [3]
Ansicht von ventral (links) und dorsal (rechts)

Das Skelett des Unterschenkels besteht aus den beiden Unterschenkelknochen, Tibia und Fibula (Abb. 1.1).

Anatomische Besonderheiten der Fibula

Die Fibula ist ein Röhrenknochen und zeigt sich im Querschnitt im proximalen Bereich vierkantig und im distalen Abschnitt eher dreieckig und ist im Wesentlichen von den Unterschenkelmuskeln umgeben. Ihr Durchmesser beträgt 1,5 bis 2 cm. Beim Erwachsenen ist sie ca. 33 bis 40 cm lang [6, 21]. Im proximalen Bereich sind die beiden Knochen durch eine Amphiarthrose (Art. tibiofibularis) und distal durch eine Synarthrose (Syndesmosis tibiofibularis) miteinander verbunden. Am lateralen Knöchel ist die Fibula als Malleolus lateralis zu tasten. Zusammen mit der Tibia bildet die Fibula die Malleolengabel. Sie umgreift die Trochlea tali und ist somit wesentlich an der Stabilität des oberen Sprunggelenkes beteiligt [6]. Die Membrana interossea cruris spannt sich als eine Zwischenknochenmembran zwischen Tibia und Fibula aus und besteht aus straffem Bindegewebe. Sie ist an der dorsomedial lokalisierten Margo interossea der Fibula befestigt und dient einem Teil der Unterschenkelmuskeln als Ursprung [3, 22]. Der Fibulaschaft spielt für die Statik der unteren Extremitäten in mechanischer Hinsicht eine geringe Rolle. Aus diesem Grund eignet sich dieser Bereich als Spender für ein autologes Knochentransplantat [23].

1.2.2. Gefäßversorgung

Die Blutversorgung des Unterschenkels erfolgt über die Endäste der A. poplitea, die Aa. tibialis anterior und posterior. Die A. tibialis anterior zieht über die Membrana interossea cruris hinweg auf deren anterioren Fläche und verläuft zwischen dem M. tibialis anterior und den Zehenstreckern zum Fußrücken. Die A. tibialis posterior setzt die Richtung der A. poplitea fort und tritt unter den Sehnen des M. soleus zusammen mit Begleitvenen in den Bindegewebsraum zwischen den tiefen und oberflächlichen Flexoren ein. Unterhalb des Innenknöchels teilt sich die A. tibialis posterior in ihre beiden Endäste (A. plantaris medialis und lateralis) und versorgt die Fußsohle [24].

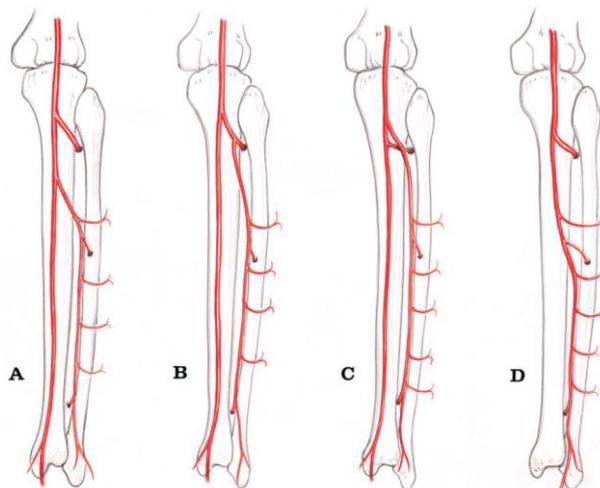


Abb. 1.2 Varianten der Aufteilung der A. peronea aus Strauch, Yu [6]

Die A. fibularis (peronea) geht in ca. 90% der Fälle ca. 7 cm distal des Caput fibulae, wenig distal des Sehnenbogens, aus der A. tibialis posterior hervor (Abb. 1.2, A) und versorgt die Fibula durch periostale Blutgefäße sowie durch die zumeist in der oberen Hälfte des mittleren Fibuladrittels in die Fibula einstrahlende A. nutricia fibulae [3, 25, 26]. Die Lokalisation des Foramen nutricium spielt bei dem Transfer eines vaskularisierten Fibulatransplantates eine wichtige Rolle. Sowohl die medulläre als auch die periostale Blutversorgung sollten gesichert werden.

In ca. 1% aller Fälle zweigt sich die A. peronea von der A. tibialis anterior oder proximal hiervon direkt von der A. poplitea ab (Abb. 1.2, B und C). In 8% ist die A. tibialis posterior nicht angelegt und wird vollständig von der A. peronea ersetzt (Abb. 1.2, D) [6]. Der venöse Blutabfluss erfolgt über zwei begleitende Venen.

1.2.3. Innervation

Der N. fibularis (peroneus) communis zweigt sich im distalen Bereich des Oberschenkels vom N. tibialis ab, folgt dann dem medialen Rand des M. biceps femoris und gelangt mit ihm zum Caput fibulae, wo er an der Außenseite des Kniegelenkes direkt um das Fibulaköpfchen herumzieht. An dieser Stelle verzweigt sich der N. cutaneus surae lateralis, der die Haut des lateralen Unterschenkels innerviert. Anschließend tritt er in die Fibularisloge ein und teilt sich in die beiden Endäste, den N. fibularis (peroneus) profundus und den N. fibularis (peroneus) superficialis auf (Abb. 1.3). Der tiefe Wadenbeinnerv tritt durch das Septum intermusculare cruris anterior in die Extensorenloge und innerviert die Mm. tibialis anterior, extensor digitorum longus und

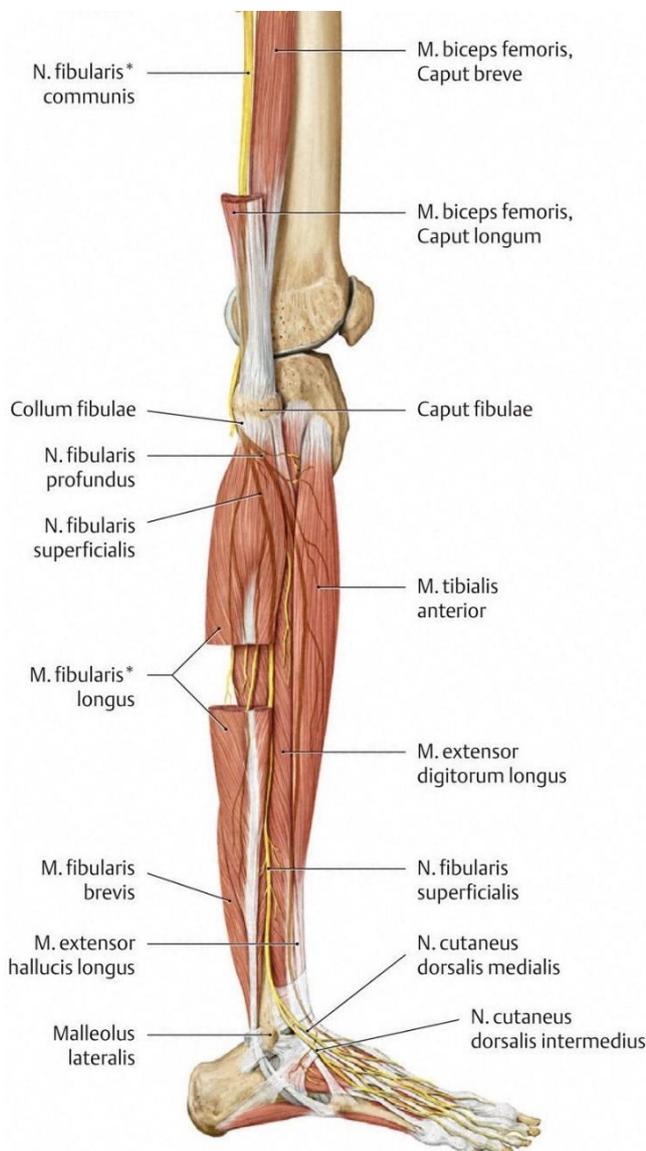


Abb. 1.3 Verlauf des N. fibularis communis aus Schünke, Schulte [3]

extensor hallucis longus, während der oberflächliche Wadenbeinnerv zunächst in der Fibularisloge verbleibt und die Mm. fibularis (peroneus) longus und breves versorgt. Die zwei Hautäste des N. fibularis superficialis, der N. cutaneus dorsalis medialis und der N. cutaneus dorsalis intermedius innervieren sensibel den Fußrücken und die Zehen. Die einander zugekehrten Hautseiten des ersten und zweiten Zehs werden durch den R. cutaneus des N. peroneus profundus versorgt. Der laterale Fußrand hingegen wird sensibel vom N. cutaneus dorsalis lateralis, dem Endast des N. suralis versorgt. Der N. suralis entsteht durch die Vereinigung des N. cutaneus surae medialis (Ast des N. tibialis) mit dem Ramus communicans des N. cutaneus surae lateralis aus dem N. peroneus [3, 24].

1.3. Muskellogen des Unterschenkels

Der Unterschenkel beinhaltet vier Muskellogen, die von Septen getrennt werden. Diese sind die Extensorenloge, die Fibularisloge (Peroneusloge) sowie die oberflächliche und tiefe Flexorenloge (Abb. 1.4). Das Septum intermusculare cruris anterior befindet sich zwischen Extensoren und Fibularisgruppe. Die Fibularisgruppe wird durch das Septum intermusculare cruris posterior von den Flexoren getrennt. Die Extensoren und die tiefen Beuger werden durch die Membrana interossea cruris voneinander isoliert. Das tiefe Blatt der Fascia cruris trennt die tiefen von den oberflächlichen Flexoren [24].

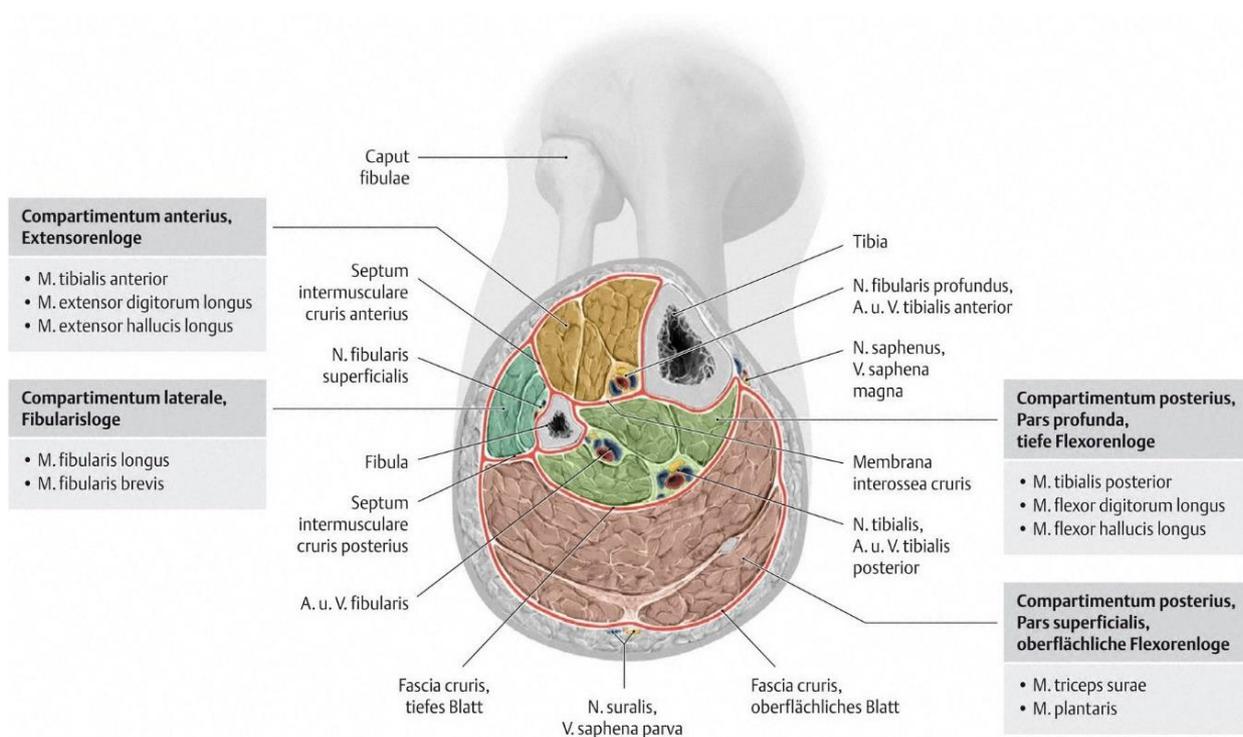


Abb. 1.4 Muskellogen und Leitungsbahnen am Unterschnkel aus Schünke, Schulte [3]

1.4. Muskulatur des Unterschenkels

Die Muskeln des Unterschenkels werden in vier Gruppen eingeteilt, die als Muskellogen bezeichnet werden (Abb. 1.4).

Die Mm. peroneus (fibularis) longus et. breves bilden die Peroneusgruppe. Die Fibula dient zum Teil beiden Muskeln als Ursprung.

Die an der Hinterfläche des Unterschenkels entspringende Flexorengruppe beinhaltet die oberflächlichen (Mm. triceps surae und plantaris) sowie die tiefen Flexoren (Mm. tibialis posterior, flexor digitorum longus und flexor hallucis longus). Von den Flexoren der Pars profunda entspringen die Mm. flexor hallucis longus und tibialis posterior vollständig oder teilweise von der Fibula.

Zur Extensorengruppe gehören die Mm. tibialis anterior, extensor hallucis longus und extensor digitorum longus (Abb. 1.5). Der M. extensor hallucis longus (EHL) wird von den Mm. tibialis anterior und extensor digitorum longus bedeckt. Er entspringt in den distalen Zweidrittel des Unterschenkels von der Facies medialis der Fibula sowie von der Membrana interossea cruris. Die Sehne wird im Sprunggelenkbereich durch das Retinaculum musculorum superius und inferius geführt und inseriert an der Basis der Phalanx distalis und der Phalanx proximalis des Hallux. Die Muskelkontraktion führt im oberen Sprunggelenk zu einer Dorsalextension und im Bereich der Gelenke der Großzehe zur Extension. Da seine Ansatzsehne wenig von der Lage der Pro- und Supinationsachse des Fußes abweicht, kann der Muskel je nach Ausgangsstellung des Fußes als Supinator oder Pronator wirken [24, 27, 28].

Der M. extensor digitorum longus (EDL) hat seinen Ursprung am proximalen Tibiaende unterhalb des Condylus lateralis, Margo anterior der Fibula, Membrana interossea cruris, Septum intermusculare cruris anterius und Fascia cruris. Sein Muskelbauch wird proximal zum Teil vom M. tibialis anterior bedeckt. Die Ansatzsehne des langen Zehenstreckers wird ebenfalls auf Höhe des Sprunggelenks durch das Retinaculum musculorum superius und inferius geführt. Sie teilt sich unter dem Retinaculum extensorum inferius in vier Teilsehnen auf, die in den Dorsalaponeurosen der 2.-5. Zehe bzw. deren Dorsalseite inserieren. Die Kontraktion des Muskels bewirkt im oberen Sprunggelenk eine Dorsalextension, im unteren Sprunggelenk eine Pronation und im Bereich der Gelenke der Zehen eine Extension.

Die motorische Innervation beider Muskeln erfolgt durch den N. fibularis profundus (N. ischiadicus) [24, 28].

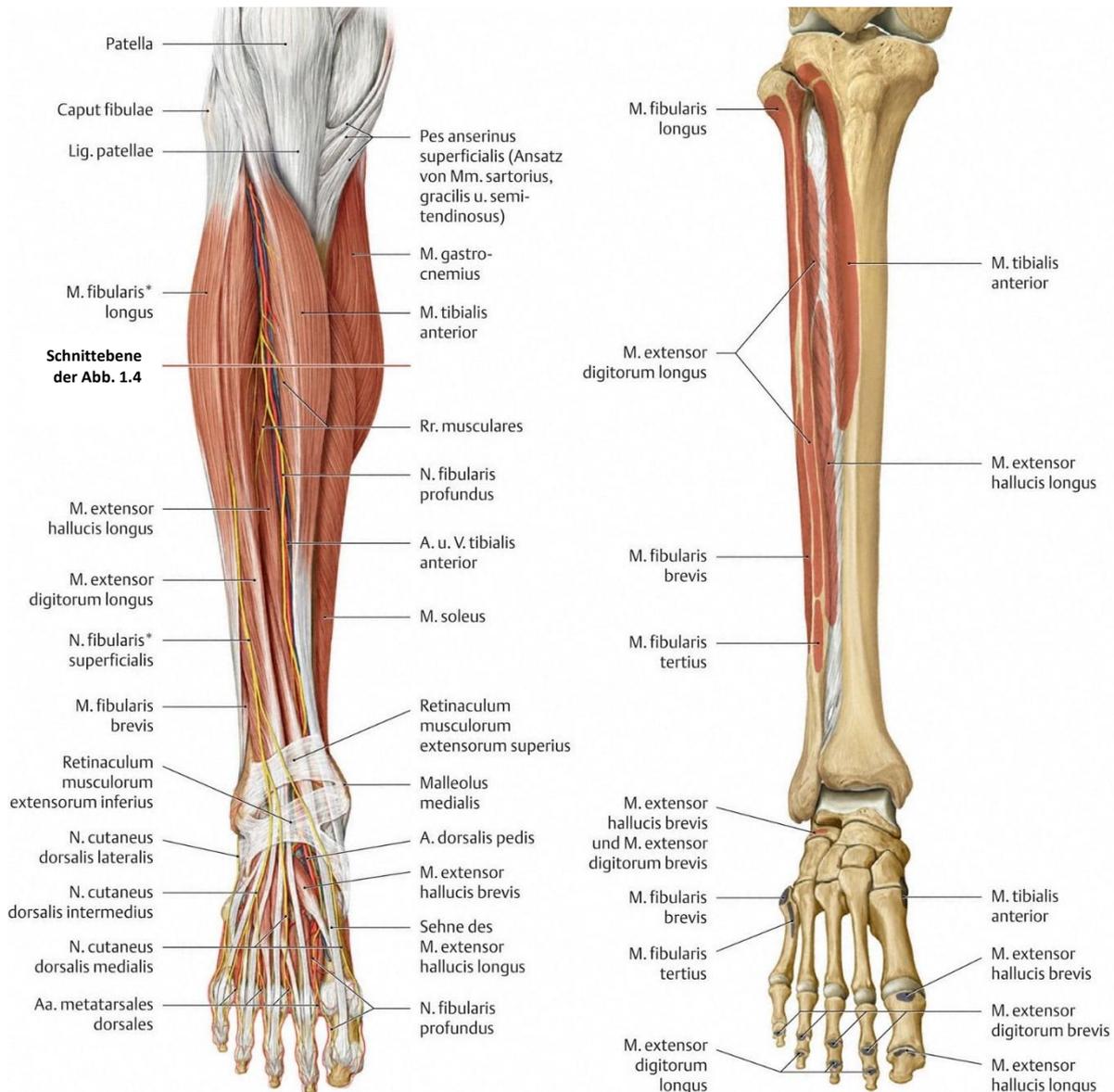


Abb. 1.5 Rechter Unterschenkel in der Ansicht von ventral aus Schünke, Schulte [3]

Links: Muskeln und Leitungsbahnen der Extensorenloge.
 Rechts: Ursprungsflächen der Muskeln wurden farblich hervorgehoben.

1.5. Fibulatransplantat

1.5.1. Überblick

Bei dem freien, autologen, gefäßgestielten Fibulatransplantat handelt es sich um ein Knochentransplantat mit der höchst verfügbaren Länge als ein rein ossäres Transplantat oder in Kombination mit ein oder zwei Hautinseln. Das Indikationsspektrum reicht daher von der Rekonstruktion der Knochen an den Extremitäten bis zum Ersatz des gesamten Unterkiefers, einschließlich des Verschlusses großer Perforationsdefekte der Mundhöhle. Die Transplantatentnahme kann mit dem sogenannten „Zwei-Team-Ansatz“ durchgeführt werden, wodurch diese

Spenderstelle insbesondere für Primärrekonstruktionen im Kopf- und Halsbereich attraktiv wird. Die Qualität des dünnen und gefügigen Hautstiels ist vergleichbar mit der der radialen Unterarmhaut, und das 3–5 cm breite Septum bietet der Hautinsel eine gute Flexibilität, die zum spannungsfreien Auskleiden der Mundhöhle genutzt werden kann. Somit eignet sich der osteokutane Fibulalappen hervorragend zur Rekonstruktion von Kompositdefekten des Unterkiefers [29]. Das Transplantat verfügt über einen ausreichend langen und hochkalibrigen Gefäßstiel, wodurch mikrochirurgische Anastomosen gut durchzuführen sind. Häufige arteriosklerotische Veränderungen in den Unterschenkelgefäßen sind eine bekannte klinische Tatsache, die bei der Auswahl der Lappen berücksichtigt werden muss [1]. Obwohl einige Autoren [7, 30, 31] eine routinemäßige Angiographie bei klinisch normalen Befunden der Fußpulse als nicht gerechtfertigt erachteten, führten die meisten Autoren eine Bewertung der Gefäßanatomie und des Status der Gefäßintegrität der Spenderstelle durch präoperative Maßnahmen wie Angiographie oder MRT durch [32-36]. Nach klinischer Erfahrung muss jeder fünfte Kandidat aufgrund einer schweren arteriosklerotischen Schädigung oder einer venösen Insuffizienz der Unterschenkelgefäße vom Fibulatransfer ausgeschlossen werden [35].

1.5.2. **Geschichte und Entwicklung**

Das erste mikrochirurgische Fibulatransplantat wurde von Taylor et al. 1975 als muskulo-ossäres Transplantat zur Rekonstruktion eines Defektes der Tibia verwendet [34]. Zunächst wurde das muskulo-ossäre mikrochirurgische Fibulatransplantat für ausgedehnte Rekonstruktionen bei Knochendefekten der Extremitäten eingesetzt [37]. Die Transplantatentnahme erfolgte über einen posterioren Zugang in Bauchlage, der ursprünglich von Taylor et al. beschrieben wurde [34]. Die erste Mitnahme einer Hautinsel im Sinne eines osteomuskulokutanen Transplantates wurde 1983 von Chen und Yan beschrieben [38]. Diese Erweiterung der Lappenhebung wurde erst durch den, von Gilbert vorgeschlagenen, lateralen Zugang für die Entnahme des Knochentransplantates möglich. Gilbert veröffentlichte 1979 eine vereinfachte Technik, bei der die Patienten mit gebeugtem Knie auf dem Rücken blieben. Die Fibula wurde entnommen bevor der Gefäßstiel durchtrennt wurde. Die Peronealgefäße wurden dann direkt unterhalb der Trifurkation entnommen. Die Entnahmezeit reduzierte sich auf ca. 30 bis 50 Minuten und der gesamte Transfer wurde in drei Stunden durchgeführt [39]. Der laterale Zugang (Abb. 1.6, Abb. 1.7, Abb. 1.8 und Abb.

1.9) war einfacher durchzuführen und ermöglichte die Visualisierung der Hautäste (Perforatoren) der Peronealarterie [40]. Der Einsatz eines Fibulatransplantates zur Unterkieferrekonstruktion wurde überraschenderweise erst lange Zeit später in Betracht gezogen. Die erste Unterkieferrekonstruktion wurde 1989 von Hidalgo durchgeführt [41]. Seitdem hat das Fibulatransplantat in der Rekonstruktion des Unterkiefers erheblich an Bedeutung gewonnen. Das Transplantat vom Wadenbein eignet sich besonders gut zur Deckung von ausgedehnten Defekten des Unterkiefers, die mehr als die Hälfte des Kiefers betreffen (bis zu einer Defektlänge von bis zu 25-30 cm) vor allem bei zahnlosen Patienten. Aufgrund der verfügbaren Knochenlänge und der Möglichkeit, die Position des Hautlappens zu variieren, lassen sich Knochensegmente und Hautinseln aus verschiedenen Teilen des Lappens kombinieren, welches mehr Flexibilität beim Lappendesign ermöglicht [35, 42, 43]. Mit Hilfe dieses Transplantates kann der gesamte Unterkiefer rekonstruiert werden [9, 34]. Im Vergleich dazu sind Transplantate aus dem Beckenkamm oder der Scapula bezüglich der Transplantatlänge begrenzt.

1.5.3. Transplantatentnahme über einen lateralen Zugang

Zur Hebung eines osteokutanen Fibulatransplantates wird zuerst die Lage der Hautinsel markiert. Diese befindet sich in der Regel am Übergang zwischen dem mittleren und unteren Drittel der Fibula. Es ist empfehlenswert ca. 7–8 cm Knochen sowohl am proximalen als auch am distalen Ende zu belassen. Dadurch wird der N. peroneus (fibularis) communis am Fibulaköpfchen geschützt. Zusätzlich bleibt die Stabilität im oberen Sprunggelenk (Articulatio talocruralis) sicher erhalten. Dennoch ist es möglich, ein ca. 25 cm langes Fibulatransplantat zu heben, das für eine komplette Rekonstruktion des Unterkiefers ausreicht [22, 41]. Die Abb. 1.9 zeigt schematisch die Querschnittanatomie eines osteokutanen Fibulatransplantates.

Die Hautinzision erfolgt lateral entlang des M. peroneus (fibularis) longus. Wenn die Mitnahme eines Hautlappens angestrebt wird, wird das nötige Hautareal zuvor eingezeichnet und die anteriore Kurve in die Inzision miteinbezogen (Abb. 1.6). Entlang der Hautinzision wird die Fascia cruris ebenfalls gespalten. Die Perforatoren der Hautinsel werden durch das Isolieren der Faszie der Mm. peronei im Septum intermusculare posterius dargestellt. Nach anteriorer Retraktion der Peronealmuskeln lässt sich die laterale Kante der Fibula palpieren. Proximal der Hautinsel wird das Septum intermusculare posterius entlang der Fibula scharf durchtrennt.

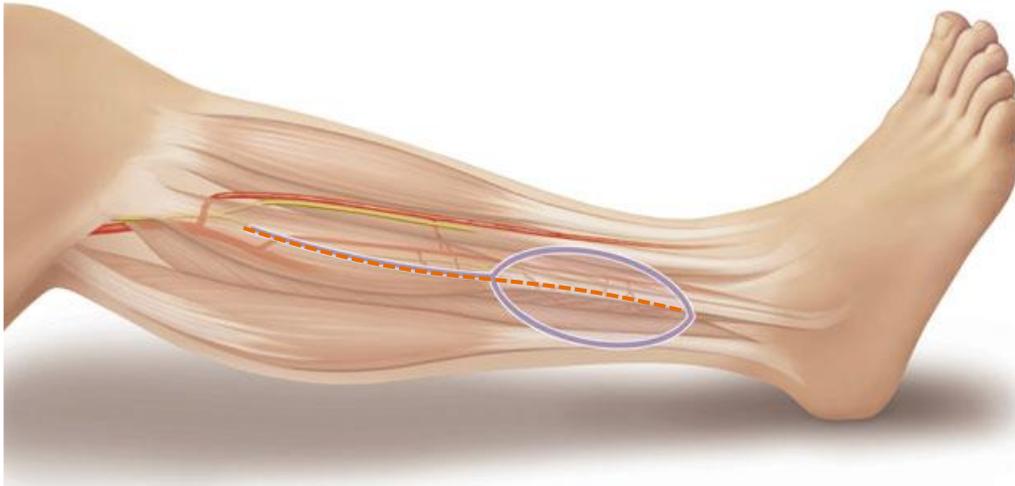


Abb. 1.6 Entnahme eines Fibulatransplantates modifiziert aus Wolff and Hölzle [1]
 Darstellung der Schnittführung bei einem lateralen Zugang zur Hebung eines Fibulatransplantates mit (lila Markierung) oder ohne (orange gestrichelte Linie) Hautinsel.

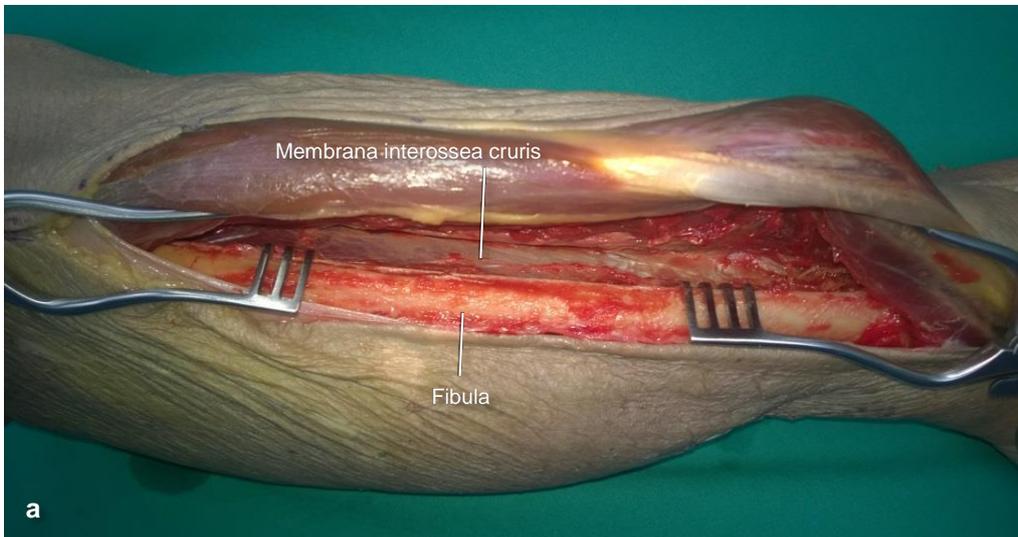


Abb. 1.7 Entnahme eines Fibulatransplantates, Darstellung des Gefäßbündels von anterior
 Das Fibulatransplantat und die Membrana interossea über einen lateralen Zugang in der gesamten zulässigen Länge dargestellt (a). Nach Spaltung der Membrana interossea und des M. tibialis posterior wurde der Gefäßbündel von anterior Präpariert (b, modifiziert aus Taner [4]).

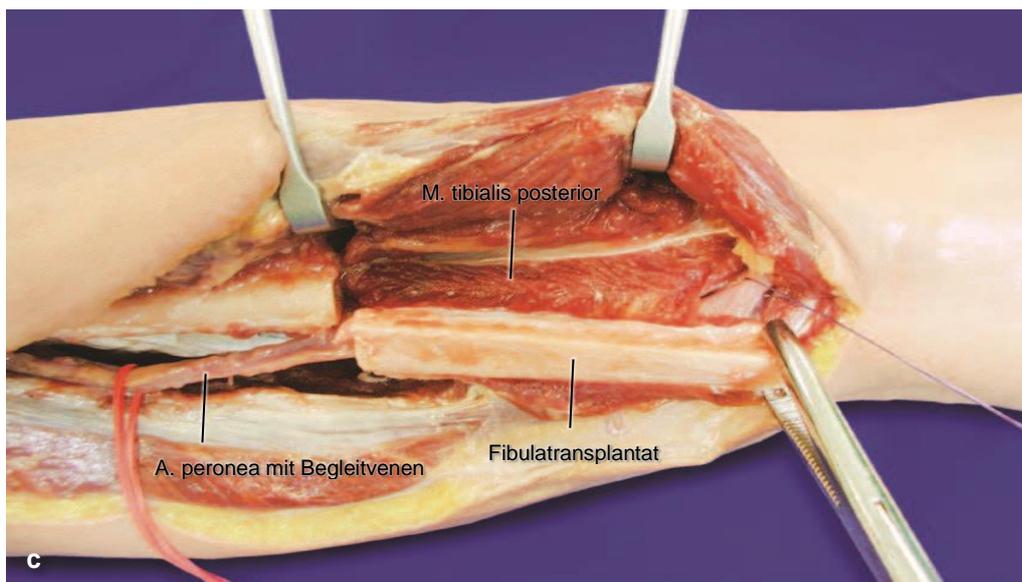
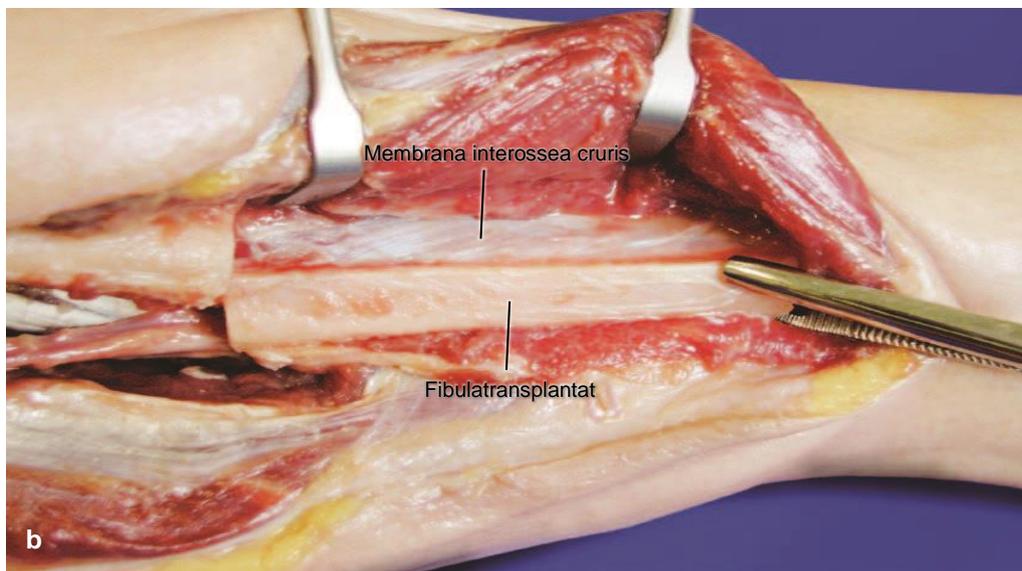
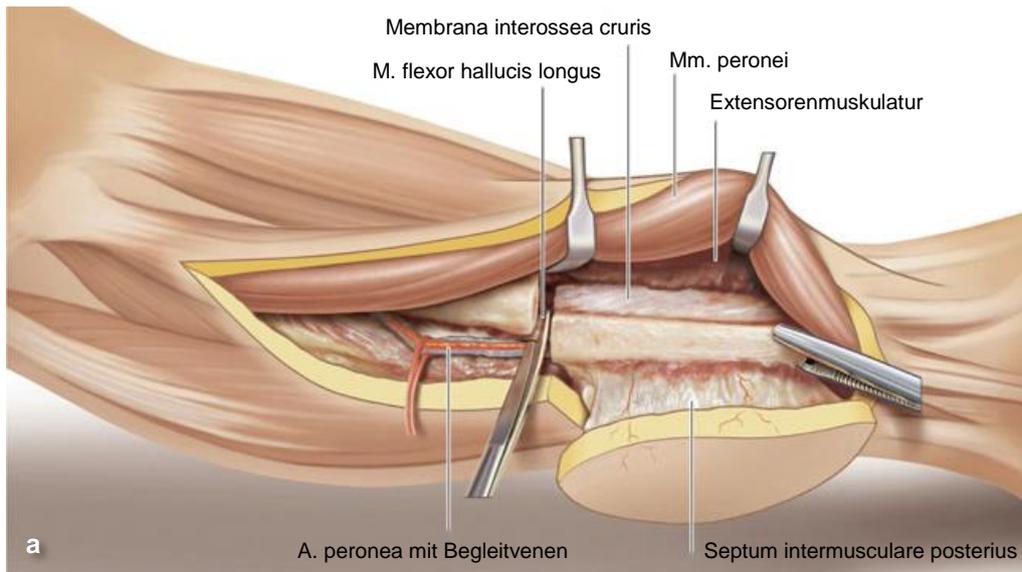


Abb. 1.8 Entnahme eines Fibulatransplantates, Darstellung des Gefäßbündels von posterior aus Wolff and Hölzle [1]

Das Fibulatransplantat und die Membrana interossea wurden über einen lateralen Zugang in der nötigen Länge dargestellt (a und b). Die Membrana interossea wurde gespalten, darunter ist der M. tibialis posterior sichtbar. Der Gefäßbündel wurde von posterior Präpariert (c).

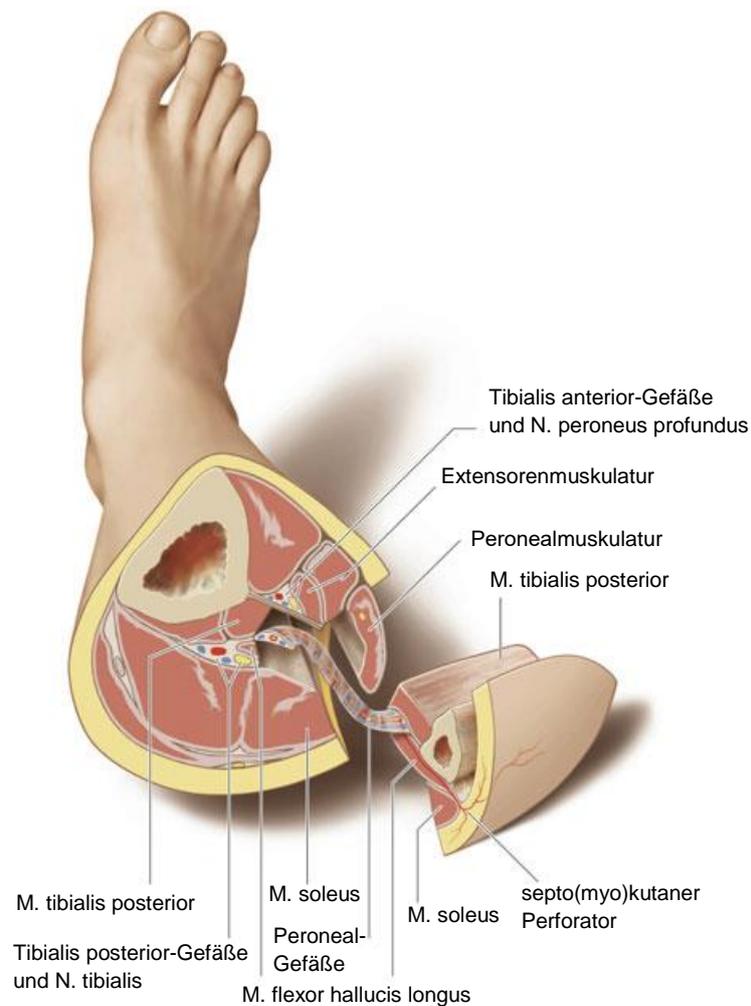


Abb. 1.9 Querschnittanatomie eines osteokutanen Fibulatransplantates aus Wolff and Hölzle [1]

Über einen lateralen Zugang lässt sich der Gefäßbündel von anterior und posterior darstellen. Wenn die Entnahme der Fibula in der maximal zulässigen Länge geplant ist, lässt sich der Gefäßstiel bequem von anterior präparieren. Nach Darstellung der Fibula und der Membrana interossea, werden die Membran und der darunter liegende M. tibialis posterior gespalten. Der Gefäßbündel lässt sich von anterior aufsuchen und entnehmen (Abb. 1.7). Die Präparation des Gefäßstiels von posterior wird bevorzugt, wenn nur ein Teil der maximal zulässigen Länge entnommen werden soll. Die Fibula wird in der gewünschten Länge im distalen Bereich präpariert und der Gefäßstiel wird wie folgt von posterior präpariert. Der M. soleus wird nach posterior retrahiert um die Erreichbarkeit der Flexorenloge zu verbessern. Dorsal der Fibula lässt sich nun der M. flexor hallucis longus sichtbar machen, der proximal der Hautinsel von der Fibula abgelöst wird. Anschließend wird die Präparation in die tiefe Flexorenloge fortgesetzt. Durch das Aufsuchen und Verfolgen der Muskeläste lassen sich die Peronealgefäße in der Tiefe identifizieren. In einem durchbluteten Bein kann die Arterie leicht an der

dorsalen Seite der Fibula getastet werden. Somit wird bei dieser Vorgehensweise der Gefäßstiel von posterior dargestellt (Abb. 1.8). Die Äste zu den umgebenden Muskeln und dem Fibulaknochen werden ligiert und durchtrennt. Es folgt die distale Osteotomie der Fibula. Hier wird, wie bereits oben erwähnt, ein Abstand von ca. 8 cm zum Außenknöchel eingehalten. Je nach notwendiger Transplantatlänge wird die proximale Osteotomie in derselben Art und Weise durchgeführt. Das Septum intermusculare anterius wird zwischen den beiden Osteotomien an der anterioren Kante der Fibula durchtrennt. Die Extensoren werden stumpf und epiperiostal von der Fibula abgelöst bis die Membrana interossea cruris erreicht wird. Mit einem Abstand von ca. 1 cm zu dem osteotomierten Fibulasegment wird die Membrana interossea gespalten (Abb. 1.7 und Abb. 1.8). Die Peronealgefäße werden distal ligiert und abgesetzt. Der M. tibialis posterior wird durchtrennt, so dass eine Manschette des Muskels am Fibulaknochensegment verbleibt. Im Bereich der Hautinsel werden die Haut und die Faszie jetzt auch entlang der dorsal vorgezeichneten Kurve inzidiert. Der Knochen samt Hautinsel und dem korrespondierenden Septum intermusculare posterius wird gehoben. Mit einem Abstand von ca. 2 cm zum Knochen werden der M. flexor hallucis longus und das Septum intermusculare posterius distal durchtrennt. Der Lappen kann nun nach lateral mobilisiert werden. Der M. flexor hallucis longus wird proximal unter Schutz des Gefäßstiels ebenfalls durchtrennt. Der Lappen ist jetzt bereit für den mikrovaskulären Transfer. Je nach notwendiger Länge des Gefäßstiels kann dieser nun entnommen werden.

1.6. Morbidität der Entnahmestelle

Die Morbidität der Donor-Seite nach Entnahme eines Fibulatransplantates lässt sich in funktionelle, vaskuläre sowie neurologische Störungen einteilen. Darüber hinaus werden Weichteilkomplikationen beobachtet. Insgesamt scheint die Entnahme eines Fibulatransplantates bei Erwachsenen nicht mit wesentlicher Morbidität verbunden zu sein [29, 44]. Jedoch wurden bereits kurzfristige und langfristige Morbidität der Entnahmestelle beschrieben. Zu den Kurzzeitmorbiditäten gehören Schmerzzustände, Wundheilungsstörungen bis hin zu Infektionen, Ödeme, Serome sowie Hämatome. Die Langzeitmorbidität beinhaltet chronische Schmerzzustände, Sensibilitätsstörungen, Muskelschwäche, Gelenk- und Ganginstabilität, Bewegungseinschränkungen, morphologische Veränderungen an den benachbarten Gelenken, Phänomene wie

Entwicklung von Hammerzehe sowie Stressfrakturen der Tibia nach Fibulaentnahme [13, 35, 45-54].

Neben der Hypästhesie am Malleolus lateralis sind leichte anfängliche Schmerzen und Ödemneigungen zu beobachten. Es kann zu einer objektivierbaren Einschränkung der Beuge- oder Streckfunktion des Großzehen- oder Sprunggelenks kommen, die jedoch subjektiv kaum wahrgenommen wird [7, 55, 56]. Dennoch berichten einige Patienten über Schmerzen und Schwäche beim Gehen für mehrere Monate nach der Operation [57-59] und es wurde eine geringere bevorzugte Geschwindigkeit beim Gehen im Vergleich zur Kontrollgruppe festgestellt [57].

Nach Hebung eines osteokutanen Fibulatransplantats wird in vielen Fällen ein Hauttransplantat zur Deckung der Entnahmestelle benötigt [52]. Nahezu alle Studien beschäftigen sich mit postoperativen Komplikationen der Spenderregion bei einem lateralen Zugang nach Gilbert [39]. Der von Blake als Alternative dargestellte mediale Zugang bietet zwar ästhetische und technische Vorteile [60], konnte sich jedoch bis dato nicht im klinischen Alltag durchsetzen. Über diesen Zugang lässt sich lediglich ein ossäres Fibulatransplantat gewinnen.

Das von der *American Orthopaedic Foot & Ankle Society (AOFAS)* veröffentlichte klinische Bewertungssystem, der „*AOFAS Ankle-Hindfoot Score*“, ist eines der am häufigsten verwendeten Bewertungsinstrumente in der Fußchirurgie [61]. Dieses von Kitaoka et al. entwickelte klinische Bewertungssystem kombiniert subjektive Merkmale wie Schmerz- und Funktionsbewertungen des Patienten mit objektiven Bewertungen basierend auf der körperlichen Untersuchung des Arztes (z. B. Gang, Sagittalbewegung, Rückfußbewegung, Stabilität und Ausrichtung des Knöchel-Rückfußes) [62]. Der Fragebogen enthält neun Abschnitte, die in drei Subskalen (Schmerz, Funktion und Ausrichtung) unterteilt werden können. Jeder der neun Abschnitte wird bewertet und ergibt eine Gesamtpunktzahl von 0 Punkten (was auf starke Schmerzen und Beeinträchtigungen hinweist) bis 100 Punkten (keine Symptome oder Beeinträchtigungen). Der OAFAS Score ermöglicht eine objektive Bewertung des postoperativen Zustands des Patienten. Des Weiteren ist es möglich die Ergebnisse verschiedener Untersuchungen miteinander zu vergleichen.

Die objektiven Befunde unterscheiden sich nicht selten von dem subjektiven Befinden des Patienten. Dazu gehören Faktoren wie Funktionalität, körperliche Wahrnehmung und Ästhetik sowie Einschränkungen im Alltag. Bei dem „*Hospital Anxiety and Depression Scale*“ Fragebogen handelt es sich um eine Selbsteinschätzungsskala, die

sich als zuverlässiges Instrument zur Erkennung von Depressionen und Angstzuständen in einer Krankenhausambulanz erwiesen hat. Die Angst und Depressions Subskalen sind ebenfalls gültige Messgrößen für die Schwere der emotionalen Störung. Die Einführung dieser Selbsteinschätzungsskala in die allgemeine Krankenhauspraxis würde die große Aufgabe der Erkennung und Behandlung von emotionalen Störungen bei Patienten in medizinischen und chirurgischen Abteilungen erleichtern [63].

Das Ziel der Qualitätssicherung sollte die Verbesserung der medizinischen Behandlung sein. Neben qualitätssichernden Maßnahmen, die hauptsächlich auf klinischen Parametern und medizinischen Bewertungen beruhen, gewinnen subjektive Meinungen von Patienten zunehmend an Bedeutung. Besonders in der plastischen und rekonstruktiven Chirurgie hängt die Bewertung des Operationsergebnisses stark vom subjektiven Befinden der Betroffenen ab [64]. In den letzten Jahren hat das Interesse an der Einbeziehung des Konzepts „Lebensqualität“ in die Bewertung medizinischer Interventionen zugenommen. Das Fehlen einer allgemeinen Definition, die als Grundlage für die wissenschaftliche Bewertung der medizinischen Behandlung dienen kann, ist jedoch ein Problem. Dimenas et al. schlugen 1990 drei Hauptfaktoren der Lebensqualität in der Medizin wie folgt vor: Subjektives Wohlbefinden, Gesundheit und Wohlergehen. „Subjektives Wohlbefinden“ ist die zentrale Komponente bei der Bewertung der Lebensqualität. Unter Berücksichtigung der Wahrnehmung des Einzelnen in Bezug auf seine Lebenssituation stellt „Gesundheit“ eine subjektive sowie objektive Bewertung des körperlichen und geistigen Zustands dar, während „Wohlergehen“ die Gesamtheit der objektiven Umweltfaktoren widerspiegelt. Daher sollte die Bewertung der Lebensqualität in der Medizin im Idealfall diese drei Hauptfaktoren berücksichtigen [65]. Die Bewertung und Dokumentation der gesundheitsbezogenen Lebensqualität ist nicht nur in der Psychologie, sondern auch in der Medizin ein etabliertes Konzept bei der Bewertung von Interventionen und der Darstellung von Gesundheitszuständen in Bevölkerungsgruppen. Nach einer Entwicklungsphase von mehreren Jahrzehnten stehen nun eine Reihe etablierter krankheitsspezifischer sowie generischer Bewertungsinstrumente zur Verfügung. Die SF-36-Gesundheitsumfrage ist eines der am meisten verbreiteten generischen Instrumente. Mit Hilfe des SF-Fragebogens, als geeignetes Screening-Instrument, lassen sich der allgemeine Gesundheitszustand und mögliche Veränderungen vor allem in der Rehabilitationsforschung erfassen [66].

1.7. Fragestellung und Ziele

Das sogenannte „freie Fibulatransplantat“ wird häufig zur knöchernen Rekonstruktion im Kopf-Hals-Bereich eingesetzt. Die Morbiditätsrate der Donor-Seite (Entnahmestelle) ist relativ gering. Jedoch wird als eine der wichtigsten Folgen dieser Operation eine Schwäche der Extensoren, insbesondere die des Großzehs beschrieben. Diese Extensoren (Mm. extensor hallucis longus (EHL) und extensor digitorum longus (EDL)) entspringen sowohl an der Fibula als auch an der Membrana interossea cruris und verlieren nach Transplantatentnahme einen Teil ihres Ursprungs. Das Ziel dieser Dissertation war es, im Rahmen einer anatomischen/biomechanischen Untersuchung der nicht fixierten Kadaver, je nach Präparationsmethode und Länge des entnommenen Transplantates, die relevanten biomechanischen Veränderungen zu registrieren. Zu diesem Zweck wurden die Extensoren mittels angehängter Gewichte auf Zug beansprucht und die Unterschenkel-Präparate nach den etablierten chirurgischen Methoden präpariert. Anschließend erfolgte schrittweise die Transplantatentnahme (pro Schritt ein Drittel) von distal nach proximal, bis die maximal zulässige Länge erreicht war. Nach jedem Schritt (Durchtrennung der Membrana interossea bzw. Osteotomie der Fibula) wurden die biomechanischen Veränderungen, im Sinne einer Dislokation der Ansatzsehne, erfasst. Diese Veränderungen liefern Hinweise auf den Verlust des muskulären Ursprungs der Extensoren und möglicherweise auf die postoperative Morbidität der Entnahmestelle und können zur Abschätzung der Prognose sowie der Optimierung der Behandlung beitragen. Die Untersuchungen beschäftigten sich daher vorwiegend mit den Mm. extensor hallucis longus (EHL) und extensor digitorum longus (EDL) im Hinblick auf folgende Schwerpunkte/Fragen:

- Präparationsmethode: Führt die schrittweise Durchtrennung der Membrana interossea cruris von distal nach proximal zu den biomechanischen Veränderungen?
- Entnahmestelle: Wie groß sind die biomechanischen Veränderungen nach der Entnahme einzelner Segmente von distal nach proximal und wie unterscheiden sie sich?
- Länge des entnommenen Transplantates: Wie hoch sind die biomechanischen Veränderungen, wenn die entnommene Länge von distal nach proximal in drei Schritten erhöht wird?

2. Material und Methoden

2.1. Material

2.1.1. Herkunft der Unterschenkelpräparate

Das untersuchte Material stammt von Spendern, die ihren Körper dem Anatomischen Institut der Universität zu Lübeck für Ausbildung und Wissenschaft testamentarisch zur Verfügung gestellt haben.

Die Leichname der Körperspender wurden unter Genehmigung durch das „Gesetz über das Leichen-, Bestattungs- und Friedhofswesen (Bestattungsgesetz) des Landes Schleswig-Holstein vom 04.02.2005, Abschnitt II, § 9 (Leichenöffnung, anatomisch)“ untersucht. In diesem Fall ist es gestattet, die Körper von Spender/Innen zu wissenschaftlichen Zwecken und/oder Lehraufgaben zu sezieren. Auf einen Antrag bei der Ethikkommission kann deswegen verzichtet werden.

Für die anatomische und biomechanische Untersuchung der Extensoren des Unterschenkels wurden 11 Unterschenkelpräparate hergestellt. Weitere fünf Unterschenkelpräparate wurden zwecks Studiendesigns und Voruntersuchungen bearbeitet. Die en-bloc entnommenen Unterschenkel entstammten von nicht fixierten und frisch gefrorenen Kadavern.

2.1.2. Instrumente

Digitaler Messschieber, Alpha Tools, 0 - 150 mm, Stahl

Präparierschere 11,5 cm, spitz/spitz

Inzisionsschere mit Knopf 14 cm

Pinzette, anatomisch, stumpf 14 cm

Pinzette, anatomisch, spitz 13 cm

Pinzette, chirurgisch

Chirurgische Schere, Metzenbaum, 14 cm, stumpf/stumpf, gebogen

Raspatorium

Skalpells-Griff, Bayha, 13 cm

Skalpellsklingen, Bayha, Klinge Nummer 15,18, 20

Oszillierende Säge

Edelstahl Drahtseil, Durchmesser 4 mm 7x7 V4A A4

Hantelscheiben Set, 1 kg und 0,5 kg Gewichte

Umlenkrolle mit Holzgewinde

Holzschraube

Lüsterklemme

Schrauben-Metallhaken

Holzbrett

Hautmarker, Edding®

Lineal

Knochenhaltezange Langenbeck

Stryker Säge, chirurgisches Motorensystem mit Batterie

Akkuschrauber/Schraubenzieher

Wundhacken, Weitlaner Retractor/Wundspreizer

Edelstahl Nadel

2.1.3. **Geräte / Software**

Bildbearbeitung

Adobe Photoshop Elements 9

Statistik

R Version 3.4.1, *The R Project for Statistical Computing*

RStudio, Version 1.0.136

IBM SPSS Statistics

2.2. Methoden

2.2.1. Lagerung der Präparate

Die Lagerung der nicht fixierten Präparate erfolgte in einem Tiefkühlraum bei -20 °C.

2.2.2. Vorbereitung der Unterschenkelpräparate

Die Unterschenkelpräparate wurden unter laufendem Leitungswasser langsam über mindestens drei Stunden aufgetaut.

Zunächst wurden die Sehnen des M. extensor hallucis longus (EHL) und des M. extensor digitorum longus (EDL) an der Phalanges proximales freipräpariert. Es erfolgte eine Hautinzision entlang der Sehnen auf der dorsalen Fläche (Abb. 2.1). Nach stumpfer Präparation wurden die Sehnen bis an den Insertionsstellen



Abb. 2.1 Hautinzisionen entlang der Streckersehnen. Die isolierte Sehne des Halux wurde hervorgehoben.

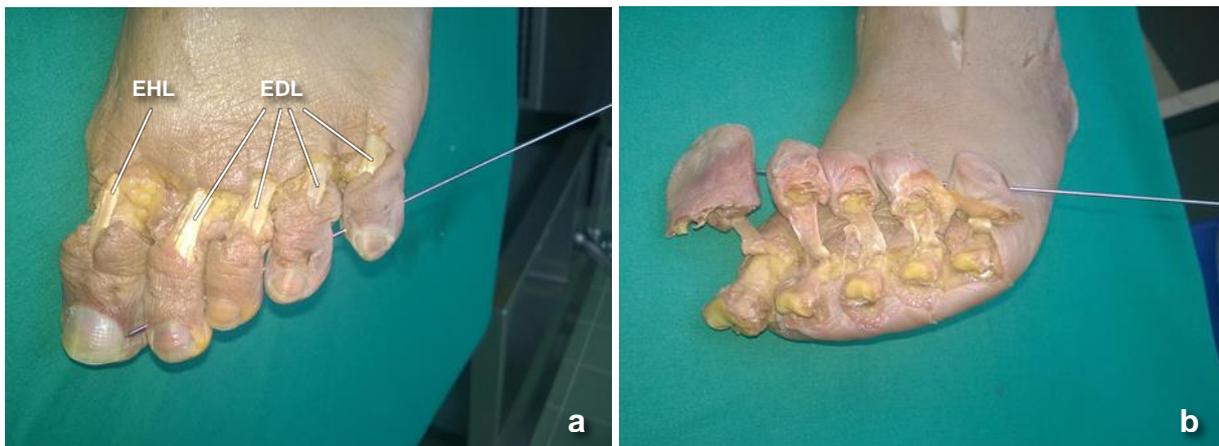


Abb. 2.2 Linker Fuß in der Ansicht von ventrolateral

Die Sehnen des M. extensor hallucis longus (EHL) und des M. extensor digitorum longus (EDL) wurden proximal der Ansatzfläche isoliert. Die Phalanges 2 bis 5 wurden via Edelstahl-Nadel verblockt (a). Die Zehen wurden nach dorsal umgeklappt (b).

dargestellt und anschließend zirkulär von dem umliegenden Gewebe isoliert (Abb. 2.2, a). Um eine ungestörte Kraftübertragung auf die Extensoren zu ermöglichen wurden sämtliche Strukturen bis auf die Streckersehnen und deren Insertionen am Knochen in diesem Bereich durchtrennt und die Zehen exartikuliert, so dass die Zehen lediglich durch die isolierten Streckersehnen mit den Extensoren verbunden waren. Anschließend wurden die Zehen D2 bis D5 mit einer Edelstahl-Nadel verblockt um

darüber eine Zugbelastung auf die korrespondierenden Sehnen des M. extensor digitorum longus zu ermöglichen (Abb. 2.2).

Für die folgende Untersuchung erfolgte eine Fixierung der Unterschenkelpräparate auf einer Holzplatte über Holzschrauben. Diese wurden auf Höhe des Caput fibulae bzw. der Tibiakondylen, der Malleolen sowie des knöchernen Rückfußes eingebracht. Mit Hilfe von Drahtseilen und in Holz eingeschraubten Umlenkrollen wurden Gewichte mit den Sehnen verbunden. Die Großzehe (EHL) wurde über einen axial eingeschraubten Metallhaken durch ein Drahtseil mit 2,5 kg Gewicht verbunden. Die verblockten Zehen D2 bis D5 (EDL) wurden via eines Metallhakens an 4 kg Gewicht angeschlossen. Die Präparate und die Umlenkrollen wurden so ausgerichtet, dass die Krafteinwirkung auf die Zehen möglichst axial erfolgt (entlang des Sehnenverlaufs am Fuß, Abb. 2.3, unten). Ein digitaler Messschieber wurde zwischenmontiert, so dass jede Verschiebung der Sehnen der Mm. extensor hallucis longus (EHL) und extensor digitorum longus (EDL) während der Untersuchung registriert und gemessen werden konnte (Abb. 2.3, oben).

Unmittelbar nach dem Anschluss der Gewichte an den Sehnen wurde eine primäre Verschiebung beobachtet. Diese entsprach vor allem der elastischen Dehnung der Sehnen und Muskel (näheres s. Diskussion, Seite 39). Durch die zuvor von uns durchgeführten Versuche entschieden wir uns bei der geplanten Untersuchung für eine Belastung der EHL mit 2,5 kg und der EDL mit 4 kg. Höhere Gewichte führten zu plastischen Veränderungen oder gar Ruptur der Sehnen und waren daher ungeeignet. Um möglichst Fehlmessungen bei der Fibula-Entnahme zu vermeiden wurde in dieser Phase gewartet bis keinerlei Veränderungen von dem Messschieber registriert wurden.

Bei unseren Voruntersuchungen zum Studiendesign wurde ein Gleichgewicht nach weniger als 10 min erreicht, so dass keinerlei Verschiebungen mehr beobachtet wurden, erst dann wurde mit dem nächsten Schritt, der gezielten Präparation zur Fibula-Entnahme, begonnen.

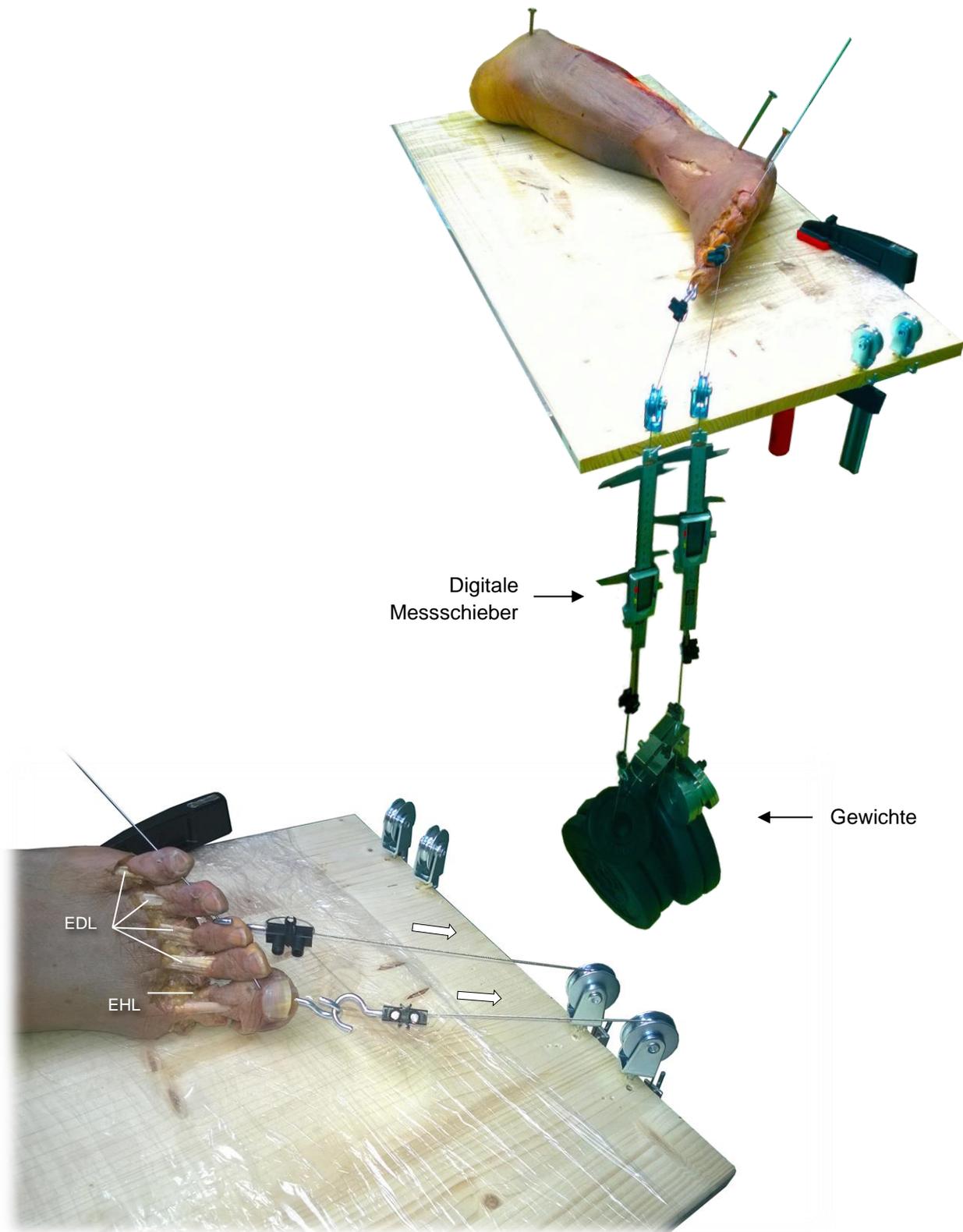


Abb. 2.3 Übersichtsdarstellung des Versuchsaufbaus mit stabilisiertem Unterschenkel

Die Zehen wurden über ein Drahtseil an Gewichte angeschlossen. Die Großzehe wurde durch einen axial eingeschraubten Metallhaken mit dem Drahtseil verbunden. Die Zehen D2-D5 waren durch eine Edelstahl-Nadel verblockt über einen Metallhaken angebunden. Ein digitaler Messschieber wurde dazwischenmontiert. Die Sehnen des M. extensor hallucis longus (EHL) und des M. extensor digitorum longus (EDL) wurden axial auf Zug beansprucht. Der Messschieber registrierte kleinste Verschiebungen der Sehnen.

2.2.3. Präparation und Datenmessung

Darstellung der Fibula und der Membrana interossea cruris

Die anatomische Präparation zur Entnahme des Fibulaknochens wurde, angelehnt an den in der Literatur beschriebenen [6] und etablierten chirurgischen Methoden, wie folgt durchgeführt:

Die Schnittführung erfolgte lateral über den gesamten Fibula-Knochen (vom Fibulakopf bis zum lateralen Malleolus).

Ähnlich wie bei der chirurgischen Fibulahebung über einen lateralen Zugang (näheres s. Einleitung Seite 9) erfolgte zunächst die Darstellung der Fibula zwischen Mm. soleus / gastrocnemius und Mm. fibularis (peroneus) longus und brevis (Abb. 2.4). Nach Spaltung der Muskelfaszien wurde die Präparation anterior des Septum intermusculare cruris anterius subfaszial fortgesetzt. Die Mm. fibularis longus et brevis sowie die Mm. extensor digitorum longus (EDL) und hallucis longus (EHL) wurden von der anterolateralen Fläche der Fibula abgelöst. Anschließend wurde medial der Fibula die Membrana interossea cruris dargestellt (Abb. 2.5). Auf der posterioren Seite wurden die Mm. soleus und flexor hallucis longus ebenfalls von der Fibula isoliert.

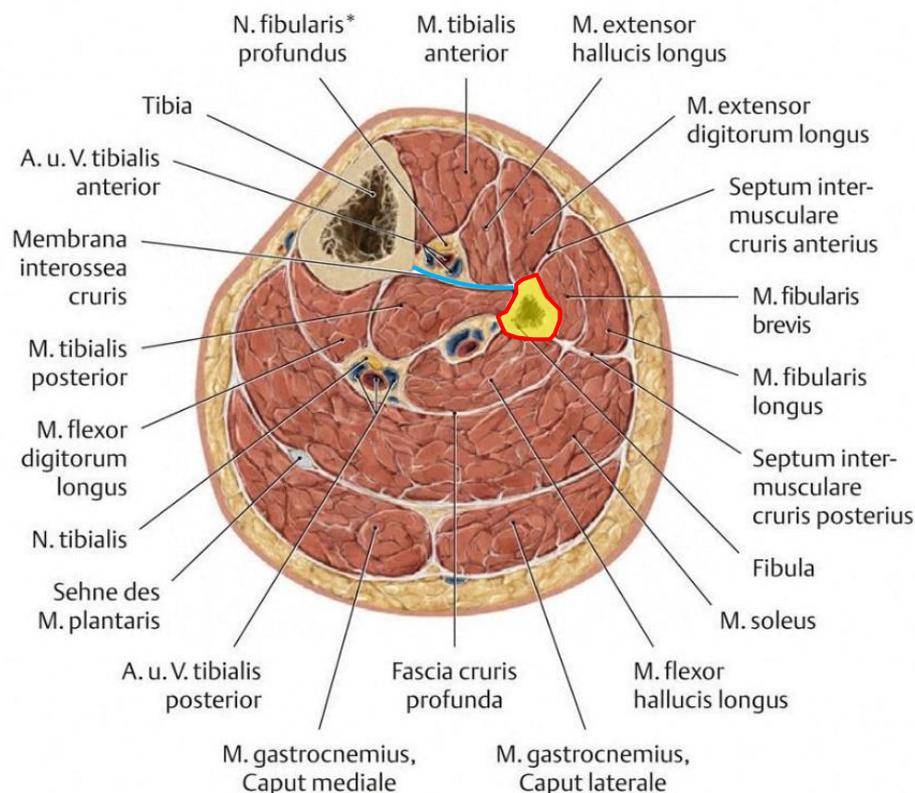


Abb. 2.4 Querschnitt durch einen rechten Unterschenkel modifiziert aus Schünke, Schulte [3]

Ansicht von proximal, die Membrana interossea cruris wurde durch eine blaue Linie markiert. Die Fibula wurde farblich hervorgehoben und rot umrandet.

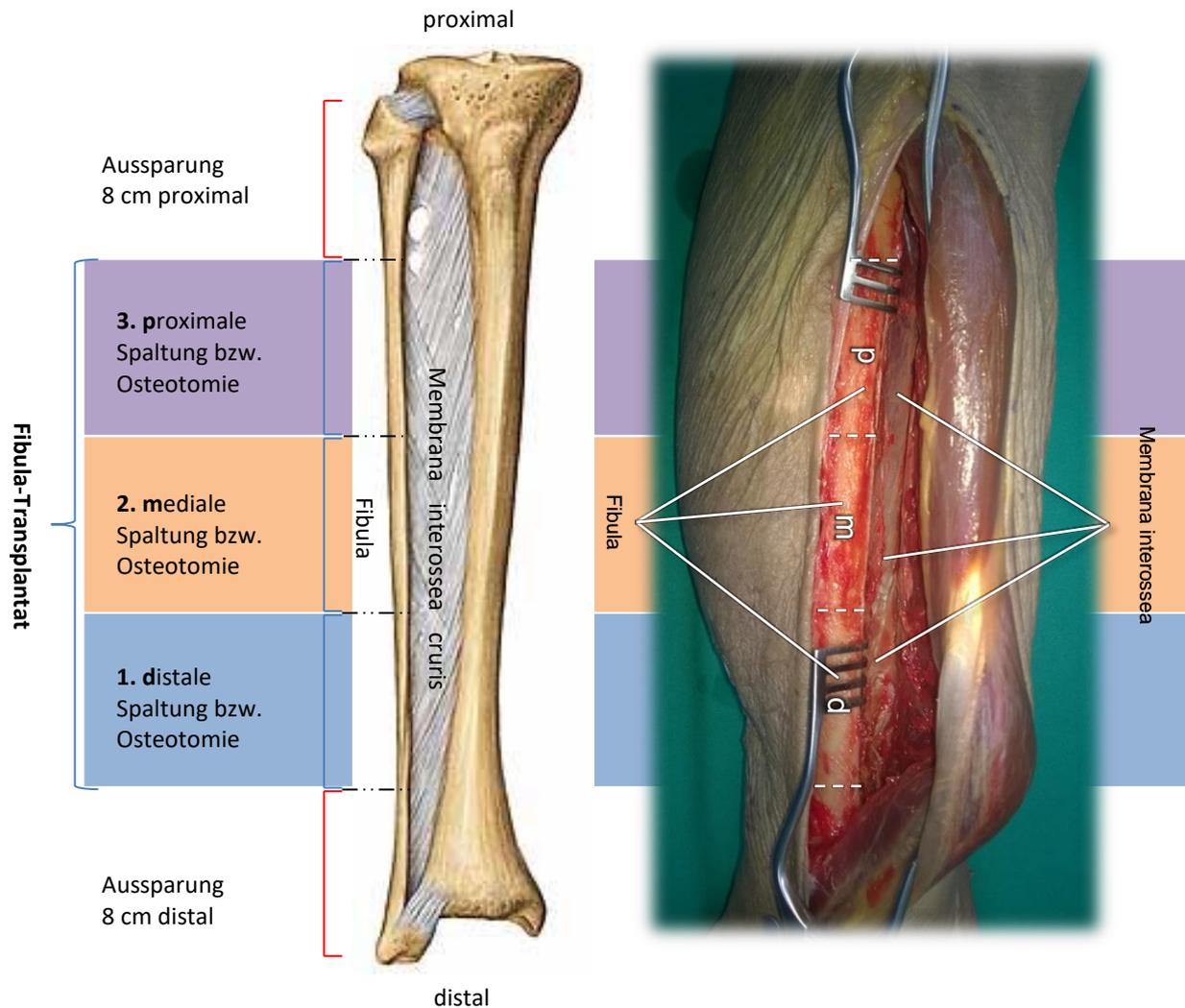


Abb. 2.5 Sequentielle Durchtrennung der Membrana interossea und segmentale Osteotomie der Fibula
Die Spaltungen bzw. Osteotomien erfolgten über einen lateralen Zugang in drei Schritten von distal nach proximal. Die gestrichelten Linien markieren jeweils die zu entnehmenden Segmente.

Schrittweise Spaltung bzw. Osteotomie und Datenmessung

Nach Aussparung von 8 cm proximal und distal erfolgte zunächst die Spaltung der Membrana interossea in drei Schritten von distal nach proximal mit einem Skalpell. Anschließend wurde in derselben Reihenfolge die entsprechende Osteotomie der Fibula-Segmente und deren Entnahme von distal nach proximal mit einer oszillierenden Säge durchgeführt (Abb. 2.5 und Tab. 2.1).

Vor jeder Spaltung bzw. Osteotomie wurde der Messschieber auf null gestellt. Nach der Spaltung bzw. Osteotomie wurde die entsprechende Sehnenverschiebung von dem jeweiligen Messschieber (für EHL und EDL) abgelesen und dokumentiert (Abb. 2.3).

Tab. 2.1 Schematische Darstellung der Versuchsreihe an Unterschenkelknochen; Fibula und Tibia samt Membrana interossea cruris

Schrittweise Spaltung der Membrana interossea cruris (gelb) und segmentale Osteotomie der Fibula (rot), die Schritte wurden von distal nach proximal durchgeführt.

proximal					
distal					
Schritt 1	Schritt 2	Schritt 3	Schritt 4	Schritt 5	Schritt 6
Spaltung des distalen Drittels der Membrana interossea cruris	Spaltung des mittleren Drittels der Membrana interossea cruris	Spaltung des proximalen Drittels der Membrana interossea cruris	Osteotomie des distalen Drittels der Fibula	Osteotomie des mittleren Drittels der Fibula	Osteotomie des proximalen Drittels der Fibula

2.2.4. Statistische Auswertung

Bei dieser Arbeit wurden Verschiebungen der Sehnen der Mm. extensor digitorum longus (EDL) und extensor hallucis longus (EHL) nach einer sequentiellen Spaltung der Membrana interossea sowie der segmentalen Osteotomie der Fibula mit einem Messschieber erhoben, während die Sehnen der EDL und EHL durch hängende Gewichte unter Zugkraft gesetzt wurden. Die Verschiebungen bzw. Dislokationen (ΔL in mm) wurden isoliert und kumulativ für jede Spaltung oder Osteotomie registriert. Die Ergebnisse wurden zusätzlich als Mittelwerte \pm Standardabweichung aufgeführt. Die statistische Analyse erfolgte mit Hilfe der Statistik-Software „R“. Bei größeren Stichproben ($N > 30$ beim Ein-Stichprobentest sowie dem Test für abhängige Stichproben und $N > 50$ beim Zwei-Stichproben-Test) kann nach dem zentralen Grenzwerttheorem eine Normalverteilung angenommen werden [67]. Bei der vorliegenden Untersuchung lag eine relativ kleine Stichprobe ($N=11$) vor. Daher wurden die Stichproben im Vorfeld durch den Shapiro-Wilk-Test auf eine Normalverteilung geprüft. Dabei zeigte sich die Normalverteilung nur bei einem Teil der Stichproben. Somit war eine der Voraussetzungen für einen t-Test nicht erfüllt. Aus diesem Grund führten wir den Wilcoxon-Test durch. Die Messungen (einzelne und kumulative Verschiebung ΔL der jeweiligen Sehne) wurde gegen null verglichen. Zur Adjustierung des α -Niveaus wurde die Bonferroni-Holm-Korrektur verwendet. Diese Methode ist im Vergleich zur Bonferroni-Korrektur weniger konservativ und hat daher eine höhere Teststärke. Die korrigierten p-Werte wurden als signifikant erachtet, wenn diese kleiner als das festgelegte Signifikanzniveau waren ($p < 0.05$).

3. Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse wie folgt vorgestellt:

1. Verschiebung (Dislokation) der Sehnenansätze bei der sequentiellen Spaltung der Membrana interossea sowie der segmentalen Osteotomie der Fibula.
2. Statistische Auswertung der gemessenen Sehnenenddislokationen.

3.1. Datenerhebung

3.1.1. Vorbereitung

Je nach Indikation und Defektgröße werden unterschiedlich lange Fibulatransplantate zur knöchernen Rekonstruktion benötigt. Dieser Abschnitt widmet sich dem Einfluss einer Fibulatransplantatentnahme auf die unter Zuglast stehenden langen Zehenstrecker. Im Einzelnen wurden die Sehnen der Mm. extensor digitorum longus (EDL) und hallucis longus (EHL) im Bereich der proximalen Phalangen an den Zehen freipräpariert und vollständig isoliert. Das umliegende Gewebe wurde durchtrennt, so dass die Phalangen lediglich mit den langen Zehenstreckern in Verbindung standen. Die Zehen wurden durch Drahtseil und Umlenkroller mit freihängenden Gewichten verbunden (2,5 kg an EHL und 4 kg an EDL). Ein Messschieber wurde im Verlauf des Drahtseils zwischengeschaltet um Verschiebungen der Ansatzsehne zu registrieren (näheres s. Material und Methoden, Seite 19). Anschließend wurde mit der Präparation zur Fibulatransplantatentnahme begonnen.

3.1.2. Messung der Sehnenansatzdislokation

Nach Darstellung der Fibula und der Membrana interossea wurde zunächst die Membrana interossea in drei Schritten von distal nach proximal per Inzision gespalten. Anschließend wurde die Fibula in der gleichen Reihenfolge segmental osteotomiert und entnommen. Nach jeder Spaltung bzw. Osteotomie wurde die Verschiebung (ΔL) mit dem digitalen Messschieber gemessen (näheres s. Material und Methoden, Seite 22). Die Tab. 3.1/Abb. 3.1 und Tab. 3.2/Abb. 3.2 zeigen jeweils die einzelnen (nicht kumulativen) Verschiebungen der Ansatzsehnen des EHL und EDL. Zusätzlich wurden die Summen der einzelnen Verschiebungen als kumulative Verschiebungen der Sehnen gesondert aufgeführt. Einen Überblick über die Gesamtverschiebung der Sehnenansätze nach Addition der jeweiligen Dislokationen nach Spaltung der Membrana interossea und segmentaler Osteotomie der Fibula zeigt Abb. 3.3.

M. extensor hallucis longus (EHL)

Spaltung der Membrana interossea

Nach der Spaltung im distalen Abschnitt wurde die höchste Verschiebung der Ansatzsehne beobachtet ($0,056 \pm 0,097$ mm, $p=0,0537$). Mit einem geringen Unterschied lag die Verschiebung nach der Durchtrennung des medialen Abschnitts an der zweiten Stelle ($0,052 \pm 0,057$ mm, $p=0,0537$). Deutlich weniger zeigte sich die Dislokation proximal ($0,039 \pm 0,049$ mm, $p=0,05265$). Die P-Werte lagen jeweils knapp über 0,05. Ähnlich zeigten sich die P-Werte auch bei den kumulativen Messungen und somit waren die isolierten ebenso wie die kumulativen Verschiebungen nicht signifikant (Tab. 3.1, Abb. 3.1).

Osteotomie der Fibula

Die Osteotomie der Fibula im distalen Abschnitt bewirkte die mit Abstand größte Dislokation der Ansatzsehne ($0,368 \pm 0,231$ mm, $p=0,02$). Deutlich geringer war die Dislokation nach der Osteotomie im medialen ($0,128 \pm 0,107$ mm, $p=0,02517$) sowie im proximalen ($0,118 \pm 0,080$ mm, $p=0,02517$) Drittel. Alle Verschiebungen waren im signifikanten Bereich. Die entsprechenden kumulativen Dislokationen waren ebenfalls alle signifikant (Tab. 3.1, Abb. 3.1).

M. extensor digitorum longus (EDL)

Spaltung der Membrana interossea

Die Spaltung der Membrana interossea im medialen Abschnitt führte zur maximalen Verschiebung der Ansatzsehne ($0,041 \pm 0,089$ mm, $p=0,326$) gefolgt von der Verschiebung im distalen Drittel ($0,026 \pm 0,063$ mm, $p=0,326$). Die geringste Dislokation wurde proximal beobachtet ($0,022 \pm 0,060$ mm, $p=0,326$). Weder die einzelnen Dislokationen noch die kumulativen Verschiebungen waren signifikant (Tab. 3.2, Abb. 3.2).

Osteotomie der Fibula

Die distale Osteotomie der Fibula zeigte die größte Verschiebung des Sehnenansatzes ($0,195 \pm 0,118$ mm, $p=0,0198$), an nächster Stelle die Osteotomie im medialen Abschnitt ($0,111 \pm 0,096$ mm, $p=0,03815$). Am geringsten war die Verschiebung im proximalen Drittel ($0,066 \pm 0,060$ mm, $p=0,04648$). Sowohl die einzelnen als auch die kumulativen Verschiebungen waren in jedem Abschnitt signifikant (Tab. 3.2, Abb. 3.2).

3.1.3. Zusammenfassung

Die Spaltung der Membrana interossea verursachte in der kumulativen Messung zwar eine deutliche aber nicht signifikante Verschiebung der Sehne des EHL ($0,147 \pm 0,15$ mm, $p=0,053$). Deutlich unscheinbarer zeigte sich die Verschiebung der Sehne des EDL ($0,089 \pm 0,19$ mm, $p=0,203$). Im Einzelnen betrachtet führte die Spaltung im distalen Abschnitt der Membrana interossea zur wesentlichsten Verschiebung des EHL ($0,056 \pm 0,097$ mm, $p=0,053$). Die höchste Verschiebung bei EDL wurde nach der Spaltung der Membrana interossea im medialen Abschnitt ($0,041 \pm 0,089$ mm, $p=0,326$) beobachtet. Weder die einzelnen Verschiebungen noch die kumulativen Messungen waren signifikant (Tab. 3.3).

Im Gegensatz dazu führte die segmentale Osteotomie der Fibula zur signifikanten Verschiebung beider Streckersehnen der EHL und EDL sowohl nach jeder einzelnen Osteotomie als auch als kumulative Verschiebung des Sehnenansatzes. Die Osteotomie der distalen Fibula (distales Drittel der verfügbaren Fibula-Länge) verursachte die höchste Verschiebung der Sehnenansätze der EHL und EDL ($0,368 \pm 0,231$ mm, $p=0,02$ bei EHL und $0,195 \pm 0,118$ mm, $p=0,0198$ bei EDL). Die Messungen zeigten, dass die Verschiebung bei einer Osteotomie des mittleren ($0,128 \pm 0,107$ mm, $p=0,025$ bei EHL und $0,111 \pm 0,096$ mm, $p=0,038$ bei EDL) und noch mehr des proximalen Drittel der Fibula ($0,118 \pm 0,08$ mm, $p=0,025$ bei EHL und $0,066 \pm 0,060$ mm, $p=0,046$ bei EDL) abnahm (Tab. 3.4).

Tab. 3.1 Verschiebung des Sehnenansatzes des M. extensor hallucis longus (EHL) nach Spaltung der Membrana interossea und segmentaler Osteotomie der Fibula

Einzelne (oben) und kumulative (unten) Verschiebung

Präparat EHL	Verschiebung der Ansatzsehne ΔL (mm)					
	Membrana interossea			Fibula		
	distal	medial	proximal	distal	medial	proximal
1	0	0	0	0,44	0,01	0,12
2	0,33	0,13	0,01	0,69	0	0
3	0	0,06	0,01	0,2	0,19	0,21
4	0	0	0	0,04	0,18	0,14
5	0	0	0	0,02	0,01	0,02
6	0,07	0,08	0,12	0,29	0,11	0,11
7	0	0	0	0,28	0,12	0,26
8	0,06	0,08	0,09	0,62	0,35	0,17
9	0,1	0,06	0,03	0,36	0,16	0,07
10	0,05	0	0,05	0,66	0,22	0,05
11	0,01	0,16	0,12	0,45	0,06	0,15
\bar{X} (Mittelwert)	0.056364	0.051818	0.039091	0.368182	0.128182	0.118182
SD	0,097496	0,057414	0,048673	0,231336	0,107034	0,079601
p-Wert (Wilcoxon)	0,0277	0,02685	0,01755	0,000976	0,005062	0,005062
p-Wert (Holm)	0,0537	0,0537	0,05265	0,005856	0,02531	0,02531

Präparat EHL	Kumulative Verschiebung der Ansatzsehne ΔL (mm)					
	Membrana interossea			Fibula		
	distal	medial	proximal	distal	medial	proximal
1	0	0	0	0,44	0,45	0,57
2	0,33	0,46	0,47	0,69	0,69	0,69
3	0	0,06	0,07	0,2	0,39	0,6
4	0	0	0	0,04	0,22	0,36
5	0	0	0	0,02	0,03	0,05
6	0,07	0,15	0,27	0,29	0,4	0,51
7	0	0	0	0,28	0,4	0,66
8	0,06	0,14	0,23	0,62	0,97	1,14
9	0,1	0,16	0,19	0,36	0,52	0,59
10	0,05	0,05	0,1	0,66	0,88	0,93
11	0,01	0,17	0,29	0,45	0,51	0,66
\bar{X} (Mittelwert)	0.056364	0.108182	0.147273	0.368182	0.496364	0.614545
SD	0.097496	0.136222	0.155955	0.231336	0.27123	0.279763
p-Wert (Wilcoxon)	0,0277	0,01796	0,01796	0,000977	0,00333	0,00333
p-Wert (Holm)	0,05388	0,05388	0,05388	0,005859	0,01665	0,01665

Tab. 3.2 Verschiebung des Sehnenansatzes des M. extensor digitorum longus (EDL) nach Spaltung der Membrana interossea und segmentaler Osteotomie der Fibula

Einzelne (oben) und kumulative (unten) Verschiebung

Präparat EDL	Verschiebung der Ansatzsehne ΔL (mm)					
	Membrana interossea			Fibula		
	distal	medial	proximal	distal	medial	proximal
1	0,21	0,2	0,2	0,15	0,02	0,09
2	0	0	0	0,28	0	0
3	0	0	0	0,23	0,16	0,06
4	0	0	0	0,07	0,12	0,06
5	0	0	0	0,02	0	0
6	0,05	0,01	0	0,14	0,29	0,18
7	0	0	0	0,24	0,13	0,12
8	0,03	0,24	0,03	0,25	0,15	0,02
9	0	0	0	0,05	0,1	0,07
10	0	0	0	0,38	0,23	0
11	0	0	0,01	0,33	0,02	0,13
\bar{X} (Mittelwert)	0.026364	0.040909	0.021818	0.194545	0.110909	0.066364
SD	0.06313	0.089045	0.059803	0.117589	0.09586	0.059879
p-Wert (Wilcoxon)	0,1088	0,1088	0,1088	0,000977	0,007632	0,01162
p-Wert (Holm)	0,3264	0,3264	0,3264	0,00586	0,03816	0,04648

Präparat EDL	Kumulative Verschiebung der Ansatzsehne ΔL (mm)					
	Membrana interossea			Fibula		
	distal	medial	proximal	distal	medial	proximal
1	0,21	0,41	0,61	0,15	0,17	0,26
2	0	0	0	0,28	0,28	0,28
3	0	0	0	0,23	0,39	0,45
4	0	0	0	0,07	0,19	0,25
5	0	0	0	0,02	0,02	0,02
6	0,05	0,06	0,06	0,14	0,43	0,61
7	0	0	0	0,24	0,37	0,49
8	0,03	0,27	0,3	0,25	0,4	0,42
9	0	0	0	0,05	0,15	0,22
10	0	0	0	0,38	0,61	0,61
11	0	0	0,01	0,33	0,35	0,48
\bar{X} (Mittelwert)	0.026364	0.067273	0.089091	0.194545	0.305455	0.371818
SD	0.06313	0.139577	0.194548	0.117589	0.163851	0.181704
p-Wert (Wilcoxon)	0,1088	0,1088	0,067889	0,000977	0,000977	0,00333
p-Wert (Holm)	0,2176	0,2176	0,203667	0,005862	0,005862	0,01332

Tab. 3.3 Mittlere Verschiebung des Sehnenansatzes der Mm. extensor hallucis longus (EHL) und extensor digitorum longus (EDL) nach Spaltung der Membrana interossea im Vergleich

Prozedur					
Verschiebung des Sehnenansatzes EHL		$\bar{X} \pm SD$	0,056 ± 0,097	0,052 ± 0,057	0,039 ± 0,049
		ρ	0,0537	0,0537	0,05265
	Kum.	$\bar{X} \pm SD$	0,056 ± 0,097	0,108 ± 0,136	0,147 ± 0,156
		ρ	0,05388	0,05388	0,05388
Verschiebung des Sehnenansatzes EDL		$\bar{X} \pm SD$	0,026 ± 0,063	0,041 ± 0,089	0,022 ± 0,060
		ρ	0,3264	0,3264	0,3264
	Kum.	$\bar{X} \pm SD$	0,026 ± 0,063	0,067 ± 0,140	0,089 ± 0,195
		ρ	0,2176	0,2176	0,203667

Tab. 3.4 Mittlere Verschiebung des Sehnenansatzes der Mm. extensor hallucis longus (EHL) und extensor digitorum longus (EDL) nach segmentaler Osteotomie der Fibula im Vergleich

Prozedur					
Verschiebung des Sehnenansatzes EHL		$\bar{X} \pm SD$	0,368 ± 0,231	0,128 ± 0,107	0,118 ± 0,080
		ρ	0,020076	0,02517	0,02517
	Kum.	$\bar{X} \pm SD$	0,368 ± 0,231	0,496 ± 0,271	0,615 ± 0,280
		ρ	0,01998	0,01998	0,01998
Verschiebung des Sehnenansatzes EDL		$\bar{X} \pm SD$	0,195 ± 0,118	0,111 ± 0,096	0,066 ± 0,060
		ρ	0,0198	0,03815	0,04648
	Kum.	$\bar{X} \pm SD$	0,195 ± 0,118	0,305 ± 0,164	0,372 ± 0,182
		ρ	0,01998	0,01998	0,01998

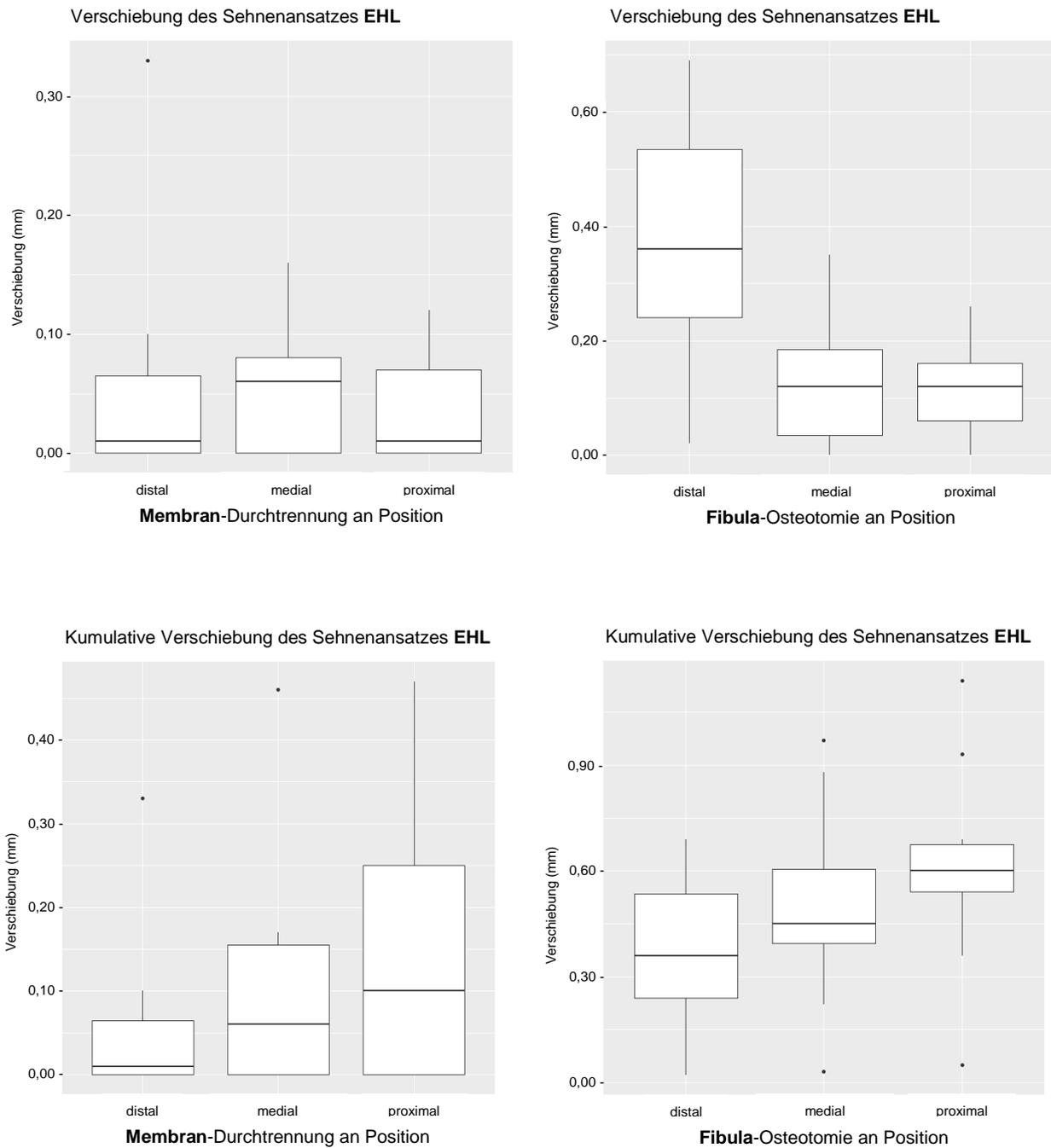


Abb. 3.1 Verschiebung des Sehnenansatzes des M. extensor hallucis longus (EHL) nach Spaltung der Membrana interossea und segmentaler Osteotomie der Fibula

Einzelne (oben) und kumulative (unten) Verschiebung

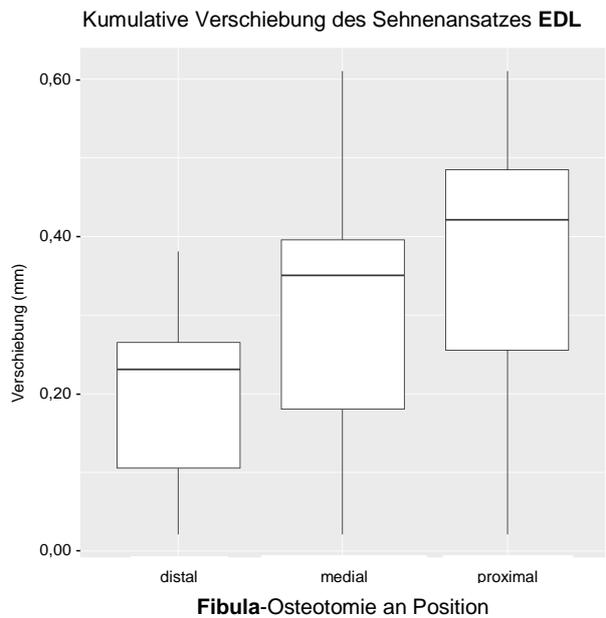
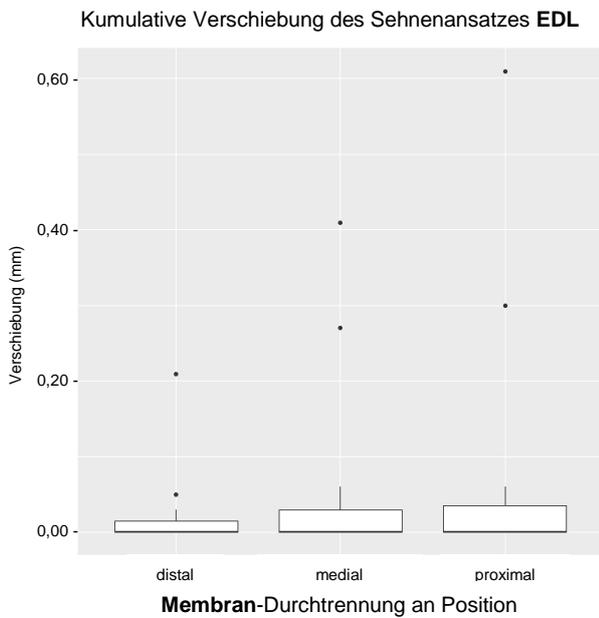
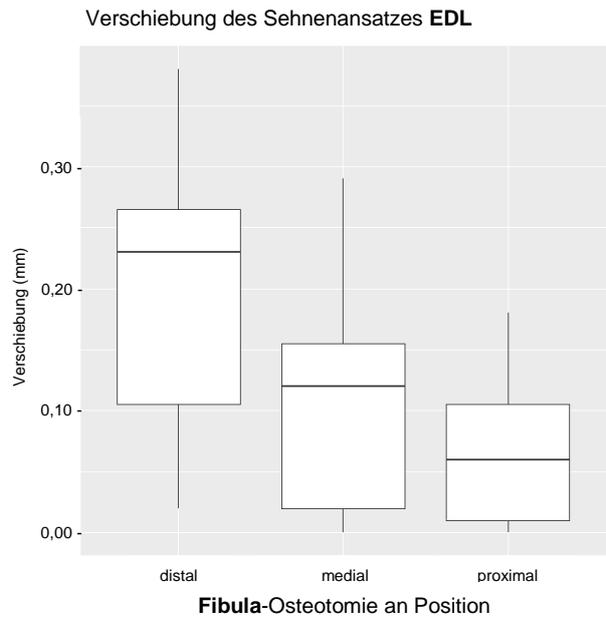
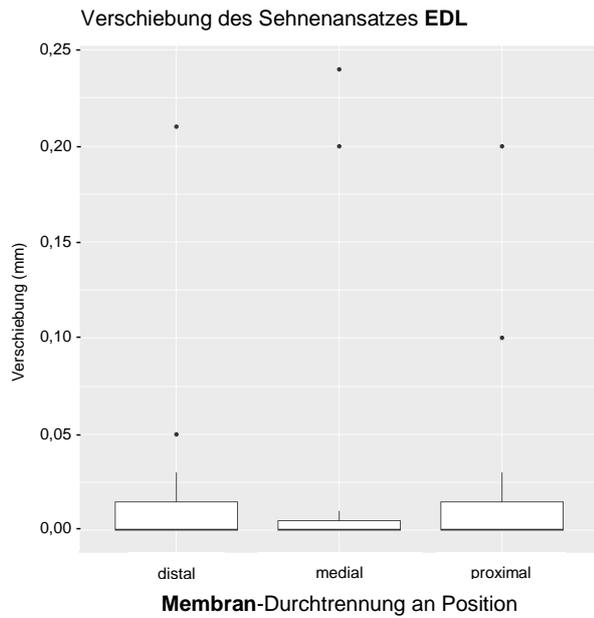


Abb. 3.2 Verschiebung des Sehnenansatzes des M. extensor digitorum longus (EDL) nach Spaltung der Membrana interossea und segmentaler Osteotomie der Fibula

Einzelne (oben) und kumulative (unten) Verschiebung

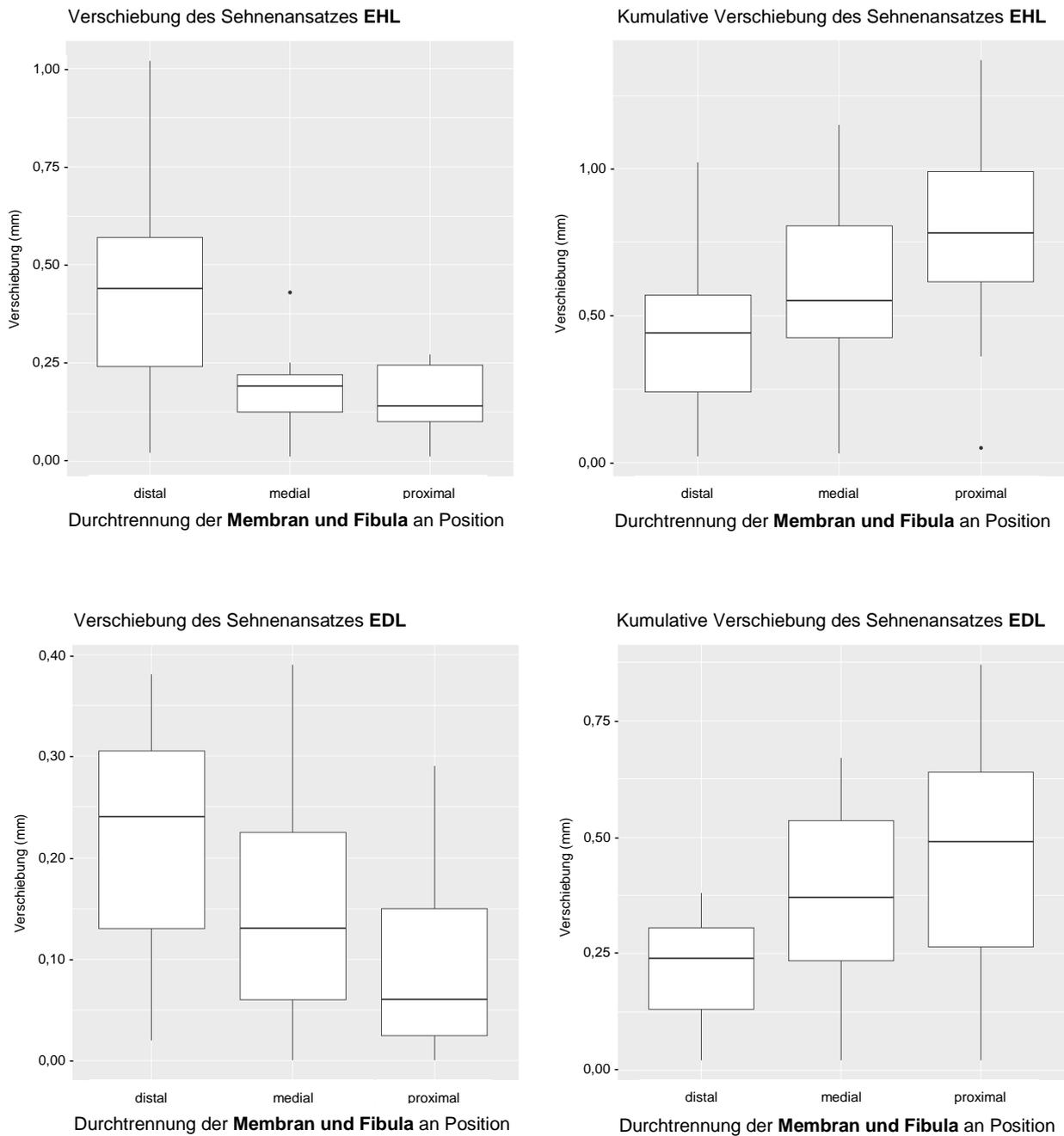


Abb. 3.3 Gesamtverschiebung des Sehnenansatzes des M. extensor digitorum longus (EDL, oben) sowie des M. extensor hallucis longus (EHL, unten) nach Spaltung der Membrana interossea und segmentaler Osteotomie der Fibula

Einzelne (oben) und kumulative (unten) Verschiebung

4. Diskussion

Die plastisch-rekonstruktive Chirurgie, insbesondere bei ausgedehnten Defekten im Kopf-Hals-Bereich, ist eine Herausforderung für den behandelnden Chirurgen. Dabei spielen nicht nur technische und medizinische Aspekte zur Wiederherstellung der Ästhetik und Funktion eine wichtige Rolle, sondern zunehmend auch das subjektive Befinden und die psychische Wahrnehmung der Patienten.

Das Fibulatransplantat kommt als eine etablierte Methode in der orofazialen Rekonstruktionschirurgie zum Einsatz und wird als Behandlung der Wahl, insbesondere für eine Unterkieferrekonstruktion verwendet [7]. Mit wenigen Osteotomien lässt sich die Fibula in die gewünschte Knochenform bringen. Wenn bei der Rekonstruktion mehr Volumen benötigt wird, kann der M. flexor hallucis longus in den Lappen eingebaut werden [68]. Der Gefäßstiel bietet eine ausreichende Länge und einen suffizienten Durchmesser. Die Hautinsel des Lappens hat sich in 91 bis 100% der Fälle [69, 70] als zuverlässig erwiesen. Diverse Berichte über die Einsatzmöglichkeiten dieses Transplantates, die gut beschriebene Anatomie und ausführliche technische Details bei der Lappenentnahme haben den verstärkten Einsatz der Fibula bedingt, insbesondere wenn ein vaskularisiertes Knochentransplantat benötigt wird [7, 34, 68, 71].

Im Allgemeinen ist eine der wichtigsten Überlegungen bei der Auswahl eines Lappens der Spenderdefekt [72-74]. Dabei sollte der Funktionsverlust immer berücksichtigt werden, ebenso wie die Häufigkeit und Art von Komplikationen an der Entnahmestelle. Die meisten Komplikationen an der Spenderstelle des freien Wadenbeins werden als mild oder vorübergehend beschrieben. Die unmittelbare postoperative Morbidität wird mit 15 bis 21% als gering eingeschätzt [48, 68, 72].

Die Morbidität der Entnahmestelle am Unterschenkel wurde im letzten Jahrzehnt in mehrere klinischen Studien untersucht [13, 14, 16]. Die an der Morbidität der Entnahmestelle beteiligten Kofaktoren sind jedoch vielfältig. Darunter sind die Erfahrung des Operateurs, die Operationszeit, die Entnahmetechnik, die Art des Wundverschlusses am Unterschenkel sowie der Rehabilitationsprozess [15].

Es ist daher notwendig, die isolierte Wirkung von spezifischen Faktoren auf die Morbidität der Entnahmetechnik zu berücksichtigen. Dies ist besonders wichtig bei muskulären Störungen, die durch einen Verlust bzw. eine Verschiebung der Ursprünge der relevanten Muskeln entstehen.

Die funktionelle Beeinträchtigung der beiden Hauptakteure unter den Extensoren des Unterschenkels, nämlich des M. extensor hallucis longus (EHL) und des M. extensor digitorum longus (EDL), können eine spezifische Morbidität nach Entnahme eines Fibulatransplantates darstellen. Dies führt zu einer Einschränkung der Dorsalflexion im oberen Sprunggelenk und der Zehen sowie der Inversion/Eversion des Fußes. Eine Möglichkeit zur Untersuchung der isolierten Auswirkung ihrer Beeinträchtigung ist durch eine biomechanische Untersuchung an nicht fixierten und frisch gefrorenen Kadaverpräparaten gegeben. Trotz Einschränkungen einer Kadaverstudie ermöglichen die Reproduzierbarkeit der Entnahmetechnik und die standardisierten Messmethoden die Beseitigung der damit verbundenen Verzerrungen, die in klinischen Situationen auftreten.

4.1. Studiendesign

Bei der vorliegenden Arbeit wurden 11 Unterschenkelpräparate von nicht fixierten und frisch gefrorenen Kadavern eingeschlossen. Weitere 5 Präparate wurden im Rahmen der Voruntersuchungen zum Studiendesign und zur Auswahl der geeigneten Zugbelastung (näheres s. Kapitel 4.3 sowie Material und Methoden Seite 19) bearbeitet. Es lagen keinerlei Informationen über das Alter, Geschlecht, Vorerkrankungen und Todesursache der Körperspender vor.

Bei einer aussagekräftigen Arbeit von Thome im Rahmen einer Literaturübersicht wurden 174 Studien mit 2384 Fibulatransplantationen analysiert [75]. Im Zeitraum zwischen 1975 und 2004 wurden 1419 Patienten mit Fibulatransplantaten versorgt. Darunter befanden sich 1133 (ca. 80%) Männer und 286 (ca. 20%) Frauen. Das Durchschnittsalter bei dem Eingriff lag im Gesamtkollektiv bei 42 Jahren. Bei der Diagnoseverteilung litten 31% der Patienten an Malignomen und 69% an anderen Tumoren sowie sonstigen Diagnosen (Osteoradionekrose, Trauma usw.). Daher liegt es nahe, dass sich die von uns untersuchten Körperspender möglicherweise von dem üblichen Patientenkollektiv mit Fibulatransfer unterscheiden. Jedoch bezieht sich diese Untersuchung auf anatomische bzw. biomechanische Eigenschaften (z.B. Muskelursprünge und deren Verlust bei Fibulaentnahme), die im Laufe des Lebens relativ konstant bleiben. Darüber hinaus wird die Unterschenkel-Anatomie des Muskel-Sehnen-Apparates im Allgemeinen mit Bezug auf das Geschlecht nicht unterschiedlich voneinander betrachtet. Letztendlich zeigte unsere Untersuchung keinerlei Zeichen einer Verletzung oder sichtbare pathologische Veränderungen in der Donorregion.

4.2. Chirurgische Entnahmetechnik und Transplantatlänge

Dank der verfügbaren Transplantatlänge bietet das Fibulatransplantat ein großes Spektrum an Möglichkeiten zur Rekonstruktionen im Bereich der Extremitäten bis hin zu einem vollständigen Ersatz des Unterkiefers [9, 34]. Es eignet sich besonders gut zur Wiederherstellung von ausgedehnten Defekten des Unterkiefers, die über die Hälfte des Kiefers hinaus reichen (bis zu einer Defektlänge von 25-30 cm) [22].

Die Inzidenz und die Schwere der Morbidität an der Donor-Seite nach Fibulaentnahme wurden in den letzten Jahren mehrmals untersucht [14, 16, 47, 50, 57, 76]. Jedoch wurde die entnommene Transplantatlänge mit Bezug auf die postoperative funktionelle Rekonvaleszenz und die Morbidität häufig nicht berücksichtigt.

Mit dieser biomechanischen Kadaverstudie konnten wir zeigen, dass die Entnahme des distalen Abschnitts des Wadenbeins, einschließlich der Durchtrennung der Membrana interossea, den größten Einfluss auf die Verschiebung der Ansatzsehne des M. hallucis longus und in geringerem Maße auch auf den M. extensor digitorum longus ausübt. Eine Erweiterung der Osteotomie auf eine proximalere Stelle, um das mittlere und proximale Drittel des Wadenbeins hatte einen geringeren Einfluss auf die kumulative Verschiebung der beiden Muskelursprünge und konsequenterweise auf die dorsale Flexion der Zehen und damit verbundene Morbidität der Entnahmestelle.

Fibulatransplantate lassen sich über einen chirurgischen Zugang von anterior, posterior, medial und lateral entnehmen. Meist wird der laterale Zugang nach Gilbert gewählt [39]. Über diesen Zugang lassen sich sämtliche Varianten des Lappens realisieren [77] (näheres s. Einleitung Seite 7).

Die medizinische Literatur zur Morbidität an der Spenderstelle ist widersprüchlich [46-48, 53, 68, 78]. Obwohl in den 1980er Jahren über die Technik der medialen Entnahme der Fibula berichtet wurde [52], hat sie bei mikrovaskulären rekonstruktiven Chirurgen wenig Akzeptanz gefunden. Bei einer Studie von Blake et al. aus dem Jahr 2008 wurde der mediale Zugang als Alternative dargestellt, mit dem Vorteil, dass die Dissektion des Knochens unter Sicht des Gefäßstiels erfolgen kann [60]. Nach unserem Kenntnisstand gibt es nur eine Studie von Catala-Lehnen et al., die die Morbidität der Spenderstellen bei einem medialen und lateralen Zugang untersucht und mit Bezug auf die Langzeitmorbidität nach Fibulaentnahme miteinander verglichen hat [79]. Sie fanden heraus, dass der mediale Zugang mit einer geringeren funktionellen Einschränkung des Fußes und des Sprunggelenks einhergeht, mit einem mittleren AOFAS-Wert von 94,4 Punkten im Vergleich zu 85,6 Punkten in der lateralen Gruppe.

Darüber hinaus wiesen die Patienten in der medialen Gruppe in 8 der 9 Subskalen höhere Werte auf. Die Ergebnisse des AOFAS-Scores stimmten mit den Ergebnissen bezüglich spezifischer Beeinträchtigungen überein. Die laterale Gruppe wies mehr neurologische und vaskuläre Beeinträchtigungen auf. In Bezug auf die Analyse der Lebensqualität wurde kein signifikanter Unterschied in den SF-36-Scores beobachtet; Patienten in der medialen Gruppe erzielten jedoch in 7 von 8 Subskalen ein höheres Ergebnis. Wenn man die beiden Techniken vergleicht, ist eine weniger auffällige Narbe ein sehr wichtiger Vorteil des medialen Ansatzes, insbesondere für weibliche Patienten. Daher stellen Catala-Lehnen et al. den medialen Zugang, insbesondere bei Frauen, als eine realisierbare Alternative zu dem lateralen Zugang dar [79]. Der Nachteil besteht vor allem darin, dass der mediale Zugang nicht zum Einsatz kommen kann, wenn die Mitnahme einer Hautinsel erforderlich ist, weil die Vorbereitung der Perforatoren der Hautinsel mit diesem Zugang nicht möglich ist.

Derzeit ist der laterale Zugang die am meisten verbreitete Methode zur Entnahme der Fibula [79]. Bei diesem operativen Zugang ist die Exposition des Gefäßstiels von anterior oder posterior möglich. Zur Entnahme der maximal verfügbaren Transplantatlänge wird die Membrana interossea cruris vollständig durchtrennt. Dadurch lässt sich das Gefäßbündel von anterior (ventral) darstellen und präparieren. Alternativ wird der Gefäßstiel von posterior (dorsal) dargestellt. Hierzu erfolgt eine Dissektion in die tiefe Flexorenloge, die Muskeläste der Peronealgefäße werden anschließend in proximaler Richtung verfolgt und das Gefäßbündel dargestellt [1]. Bei dieser Präparationsvariante wird die Membrana interossea cruris nur im Bereich des zu entnehmenden Transplantates durchtrennt.

Da bei der vorliegenden Arbeit die Ablösung der Membrana interossea auf ihrer Gesamtlänge keine signifikante Verschiebung des muskulären Ursprungs des EHL oder EDL hervorgerufen hat, scheint die Präparation des Gefäßbündels von anterior, nach Durchtrennung der Membrana interossea, die Extensoren des Unterschenkels nicht direkt zu beeinflussen. In Fällen, in denen nur ein begrenztes Knochensegment für die Rekonstruktion benötigt wird, kann jedoch eine dorsale (posteriore) Präparation der Peronealgefäße ohne Durchtrennung der Membrana interossea in ihrer Gesamtlänge und Entnahme nicht benötigter Anteile der Fibula bevorzugt werden.

4.3. Methodik der ausgewählten Zugspannung

Nach unserem Kenntnisstand ist die vorliegende Arbeit die erste Untersuchung, die dieses biomechanische Modell für diesen Zweck beschreibt und etabliert. Um den Verlust an muskulärem Ursprung der von uns untersuchten Extensoren des Unterschenkels (EHL und EDL) nach Entnahme eines Fibulatransplantates zu erfassen, wurden die Sehnen einer Zugbeanspruchung ausgesetzt. Zum „Weichgewebe“ gehören unter anderem Muskeln und Sehnen. Charakteristisch für die Extrazellulärmatrix ist der Inhalt an Kollagen und Elastin. Bei geringer Dehnung nimmt Elastin den größten Teil der Energie auf und verleiht dem Gewebe Steifigkeit. Ein Muskel ist häufig von einer Muskelfaszie umgeben. Diese besteht aus straffem kollagenem Bindegewebe. Darunter liegt das Epimysium aus lockerem Bindegewebe, das den ganzen Muskel umhüllt. Die von hier einstrahlenden Bindegewebssepten umhüllen als Perimysium einzelne Muskelfaserbündel. Die einzelnen Muskelfasern innerhalb des Primärbündels werden von Endomysium umgeben, welches wichtig für die Reißfestigkeit des Muskels ist. Der Anteil an Kollagenfasern im Muskel- und Sehngewebe ist hoch. Diese sind im Ruhezustand wellig und dehnbar. Mit zunehmender Dehnung werden sie in Zugrichtung gestreckt und beschränken die Dehnung des Weichgewebes. Dadurch kann große Verformungen standgehalten und dann zur ursprünglichen Konfiguration zurückgekehrt werden. Die Spannungs-Dehnungs-Kurve ist nicht-linear. Darüber hinaus sind die Weichgewebe viskoelastisch. Unter Viskoelastizität versteht man ein teilweise elastisches und zum Teil visköses Materialverhalten. Beispielsweise lassen sich Relaxation und Kriechverhalten als viskoelastische Eigenschaften in Weichteilen beobachten [80-82]. G. Arnold veröffentlichte 1974 eine Untersuchung über Festigkeit und Kraft-Längenänderungsverhalten der Strecksehnen des menschlichen Fußes [83]. Das vollständige Kraft-Längenänderungs-Diagramm unter Zugbeanspruchung der Sehnen zeigt einen unteren nicht-linearen Anfangsteil, an den sich ein fast linearer Bereich anschließt. Darauf folgen ein kurzer oberer nicht-linearer Teil und dann ein Maximum. Vor, gelegentlich unmittelbar nach dem Maximum und regelmäßig im weiteren Verlauf spielt sich der Zerreißvorgang (Bruchvorgang) der Sehnen ab, im Diagramm erkennbar in Form von Zacken, Einsenkungen und Stufen. Bei dieser Untersuchung ging man von der Annahme aus, dass sich die physiologischen Belastungen im sogenannten „fast-linearen“ Bereich des Kraft-Längenänderungs-Diagrammes abspielen. Die Höchstkraft (Reißfestigkeit) der Sehne des M. extensor hallucis longus

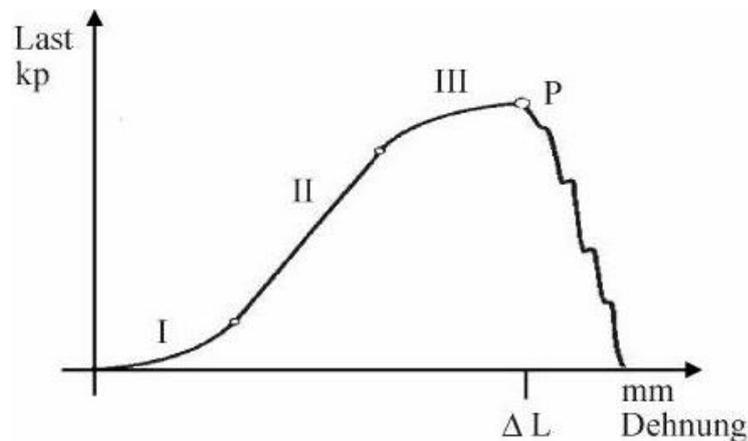


Abb. 4.1 Spannung-Dehnungs-Diagramm einer Sehne nach Becker and Krahl [2] aus Rüter [5]

beträgt 54,6 kp (535,4 N; 1 Kilopond [kp] = 1 Kilogram-force [kgf] = 9,8 Newton). Erheblich niedriger sind die Höchstkräfte zu den Sehnen II bis V mit 20,2 kp (198,1 N), 23,9 kp (234,4 N), 25,8 kp (253 N) bzw. 21,7 kp (212,8 N) (addiert 91,6 kp = 898,3 N). Die durchschnittliche Querschnittsfläche der Sehne des langen Großzehenstreckers betrug 5,49 mm². Damit erhalten wir eine Zugspannung von 1,3 kp/mm² am unteren Übergangspunkt, 7,2 kp/mm² (70,6 N/mm²) am oberen und eine Zugfestigkeit (nominale Zugspannung am Maximalpunkt) von 9,9 kp/mm² (97,1 N/mm²) [83]. Das biomechanische Verhalten der Sehne kann erst nach Normalisierung der Zugkraft (Kraft / Querschnittsfläche der Sehne) und der Längenänderung (Längenänderung/Sehnengesamtlänge) studiert werden. Somit entsteht aus dem o.g. Kraft-Längenänderungs-Diagramm eine von der Probenform unabhängige Kurve, nämlich das Spannung-Dehnungs-Diagramm (Abb. 4.1). Diese gliedert sich in drei Regionen: Die nicht lineare Grundregion (*toe region*, Abb. 4.1- I: Ausstreckung der Sehnenstruktur), die lineare Region (*linear region*, Abb. 4.1- II: elastischer Bereich) und die Versagensregion (*failure region*, Abb. 4.1- III: plastischer Bereich, mikrostrukturelle Schäden). Anschließend treten Faserrisse oder knöcherne Ausrisse auf (Abb. 4.1- P).

Darüber hinaus lassen sich in der Literatur nur wenige verfügbare Berichte über die aktiven Muskelkräfte des Unterschenkels, wie von Mijatovic, Bulic [84], finden. Nach unserem Kenntnisstand liegen bis heute keine Untersuchungen vor, die über Spannung-Dehnungs-Verhältnisse einer Sehne, in ihrer gesamten Länge, zusammen mit den korrespondierenden Muskeln berichten. Aufgrund struktureller Unterschiede ist es zu erwarten, dass das Dehnungsverhalten der Muskelgewebe eines nicht fixierten und frisch gefrorenen Kadavers unter Zugspannung von einer Sehne variiert.

In der vorliegenden Arbeit wurden die untersuchten Extensoren des Unterschenkels (EHL und EDL) in ihrer Gesamtlänge von Ursprung bis Ansatz mit Zugspannung beansprucht. Unser Ziel war es, die Extensoren innerhalb des elastischen Dehnungsbereichs zu belasten um plastische Veränderungen zu vermeiden. Durch den Verlust des muskulären Ursprungs bei einer Fibulaentnahme ändert sich der Dehnungskoeffizient des Muskel-Sehnen-Apparates. Dieser ließ sich als eine Längenveränderung bzw. Dislokation des parallelgeschalteten Messschiebers bei den unter Zugspannung stehenden Extensoren registrieren. Nach jedem Untersuchungsschritt (Ablösung der Membrana interossea und Osteotomie der Fibula) lag bereits nach Ablauf von 10 Minuten wieder ein Gleichgewicht vor, so dass die viskoelastischen Veränderungen nicht mehr zu berücksichtigen waren. Die von uns gewählten Gewichte ($2,5 \text{ kg} = 24,5 \text{ N}$ für EHL und $4 \text{ kg} = 39,2 \text{ N}$ für EDL) basieren auf unseren experimentellen Voruntersuchungen (näheres s. Material und Methoden Seite 19). Unter dieser Zugspannung ließen sich reproduzierbare Dehnungsverhältnisse erfassen. Der Einsatz von Gewichten, die doppelt so schwer waren, führte regelmäßig zu plastischen Veränderungen oder gar Rupturen der Muskulatur.

4.4. Postoperative Morbidität

Die Morbidität der Donor-Seite nach Entnahme eines gefäßgestielten Fibulatransplantats lässt sich in Kurz- und Langzeitmorbidität einteilen. Zu der passageren bzw. kurzzeitigen Morbidität gehören Schmerzen, Wundheilungsstörungen, Thrombosen, Nekrosen, Hämatom- und Serombildung sowie Ödeme. Als Langzeitmorbidität lassen sich chronische Schmerzen, Narbenbildung, Sensibilitätsstörungen, muskuläre Schwäche, Gangunsicherheit bzw. Instabilität in den benachbarten Gelenken und deren morphologische Veränderung nennen.

4.4.1. Kurzzeitmorbidität

Wenn bei der Fibulahebung die Mitnahme einer Hautinsel geplant wird, lässt sich der entstandene Hautdefekt je nach Defektgröße nicht immer direkt verschließen. Hidalgo et al. berichteten 1995 über die Indikation einer Hauttransplantation, um den Defekt an der Entnahmestelle zu versorgen [68]. Nach einer Studie von Shindo et al. ist die Breite der Hautinsel allein kein zuverlässiges Kriterium für die Bestimmung der Notwendigkeit, die Spenderstelle einer Hauttransplantation zu unterziehen. Der primäre Verschluss führte im Vergleich zur Spalthauttransplantation tendenziell zu

einer höheren Rate an Komplikationen sowohl bei großen als auch bei kleinen Wunden. Der primäre Verschluss von Defekten an der Spenderstelle der Fibula sollte vorgenommen werden, wenn dies ohne Spannung entlang der Nahtlinie erreicht werden kann [85]. Abgesehen von dem Risiko einer Wundheilungsstörung bei sehr hoher Spannung am Wundrand, besteht nach González-García et al., aufgrund der resultierenden Hauteinziehung an der Entnahmestelle ein ungünstiges ästhetisches Ergebnis [86]. Sieg et al. stellten bei 21% der Patienten (n=13) eine protrahierte Wundheilungsstörung durch Weichteilinfektion oder Wunddehiszenz in der Donorregion fest. Sie fanden heraus, dass unter den Patienten mit einer Wundheilungsstörung, häufiger neben Entnahme des ossären Fibulatransplantat auch die Mitnahme einer Hautinsel erfolgte (12 vs. 1). Wie oben bereits erwähnt fanden Shindo et al. ein deutlich höheres Risiko einer Wundheilungsstörung im Falle eines Direktverschlusses der Entnahmestelle (38% vs. 18%). Als Ursache nannten sie eine zu hohe Spannung im Bereich der Wunde am Unterschenkel mit der Gefahr der Entwicklung eines Pseudo-Kompartmentsyndroms [85]. Die Entwicklung eines Pseudo-Kompartmentsyndroms wurde auch von Klein et al. [76] und Kerrary et al. [87] beschrieben. Jedoch wurde von Sieg et al. noch nie ein Pseudo-Kompartmentsyndrom beobachtet, das möglicherweise auf äußere Spannung zurückzuführen war. Sie waren der Ansicht, dass bei einer Fibulaentnahme alle drei Kompartimente obligatorisch eröffnet werden, sodass ist die Entwicklung eines echten Kompartmentsyndroms ausgeschlossen ist. Grundvoraussetzung ist, dass lege artis kein Verschluss der Faszien oder der Membrana interossea durch Adaptation der benachbarten Muskeln durchgeführt wird [14].

In der Literatur wird aus den genannten Gründen gehäuft ein Verschluss des Sekundärdefektes mittels eines Hauttransplantates propagiert. Während Hidalgo et al. [68], Sieg et al. [14] und Yim et al. [88] eine Hauttransplantation zur Defektdeckung ab einer Defektgröße von 4 cm für nötig halten, hält Hayden eine Versorgung mit Hautlappen ab einer Defektbreite von 6 cm für angemessen. Im Vergleich dazu werden Hautdefekte bis zu einer Größe von 8 cm von Buncke [89] direkt verschlossen.

Neben Wunddehiszenz und prolongierter Wundheilungsstörung werden auch Nekrosen als kurzzeitige Komplikation beobachtet. Sieg et al. beschrieben bei 13,1 % der Patienten eine oberflächliche Nekrose der Haut und Unterhaut. Sie fanden jedoch keine Nekrosen der Muskulatur, freiliegende Sehnen oder Knochen, während Klein et

al. [76] in 4% der Fälle und Shindo et al. [85] bei 7,5% ihrer Patienten davon berichteten.

4.4.2. Langzeitmorbidity

Neurologische Störungen gehören zu den häufig beschriebenen chronischen Komplikationen nach Hebung eines Fibulatransplantates. Diese können in sehr unterschiedlichem Ausmaß auftreten. Aufgrund der engen anatomischen Beziehungen kann es bei einer Fibulaentnahme zur Verletzung der Nachbarstrukturen kommen. Neurologische Defizite werden bei einer Verletzung der Nn. fibularis (peroneus) profundus und superficialis beobachtet, insbesondere wenn die entnommenen Transplantate sehr weit bis in das proximale Drittel des Fibulaschaftes reichen [90]. Eine Schädigung des N. fibularis profundus verursacht motorische und sensorische Defizite. Die Folge ist eine gestörte Innervation der Mm. extensor hallucis longus, extensor digitorum longus, tibialis anterior und extensores digitorum breves, die sich klinisch als Großzehen- und Fußheberparese bemerkbar machen. Zusätzlich fällt eine Hypästhesie zwischen der ersten und zweiten Zehe auf. Die Verletzung des N. fibularis superficialis führt zu einer Parese der Mm. fibularis (peroneus) longus und breves. Sensibilitätsstörungen werden in medialen und lateralen Anteilen der Haut des Fußrückens und umschriebenen Hautbereichen des distalen Unterschenkels registriert. Bei einer Schädigung des Nervenstammes, N. fibularis (peroneus) communis, auf Höhe des Caput fibulae, wird ein Verlust aller oben genannten Qualitäten beobachtet. Dieser lässt sich jedoch durch das Einhalten eines Sicherheitsabstandes von 7-8 cm zum Fibulaköpfchen bei Transplantatentnahme in der Regel vermeiden [22]. Die Inzidenz einer postoperativen Sensibilitätsstörung wird in der Literatur unterschiedlich angegeben. Zimmermann et al. fanden objektiv bei 76,3 % der Patienten eine Sensibilitätsstörung. Diese wurde subjektiv nur von 47,4% der Patienten angegeben [13]. Im Vergleich dazu war die Inzidenz einer Sensibilitätsstörung bei Hidalgo et al. 17,5% [68], Goodacre et al. 22% [56], Lee et al. 30% [78] und Sieg et al. 48% [14].

Postoperative Schmerzzustände gehören überwiegend zur kurzzeitigen Morbidity nach einer Operation. Jedoch wird in der Literatur über länger bestehende schwache chronische bis hin zu starken Schmerzen berichtet. Sieg et al. beobachteten in 4,8% der operierten Patienten starke und nahezu permanent bestehende Schmerzen, während bei 27,4 % der Patienten eher milde und selten auftretende Schmerzzustände

festgestellt wurde. Die Tatsache, dass Schmerzen stark subjektiv empfunden werden, erschwert die Vergleichbarkeit dieser nicht objektivierbaren Wahrnehmung.

Obwohl einige Studien von einzelnen Patienten mit schwerer Funktionsstörung berichteten, wird die Gesamtmorbidität an der Entnahmestelle nach Fibulahebung in den meisten Fällen als gering eingeschätzt [47, 52, 56, 78, 91, 92].

Ein Ziel dieser Arbeit war es zu untersuchen, inwiefern die Spaltung der Membrana interossea und die segmentale Osteotomie der Fibula biomechanische Veränderungen in Unterschenkel-Extensoren (EHL und EDL) hervorrufen, die zur Abschätzung der postoperativen Morbidität beitragen können.

Die in drei Schritten von distal nach proximal durchgeführte Spaltung der Membrana interossea zeigte keinerlei signifikante Unterschiede, im Sinne einer Verschiebung der unter Zugspannung stehenden Sehnen der Zehenstrecker. Jedoch wurde die höchste Dislokation nach Spaltung im distalen Drittel der Membran registriert.

Im Gegensatz dazu führte die segmentale Osteotomie der Fibula zur signifikanten Verschiebung beider Extensoren sowohl nach jeder einzelnen Osteotomie als auch als kumulative Verschiebung des Sehnenansatzes. Die höchste Verschiebung der Sehnenansätze der EHL und EDL wurde nach Osteotomie des distalen Fibula-Segmentes beobachtet gefolgt von den Verschiebungen nach Osteotomien im medialen und proximalen Drittel. Diese Ergebnisse weisen möglicherweise auf einen Verlust des muskulären Ursprungs und eine konsekutive funktionelle Beeinträchtigung der untersuchten Zehenstrecker hin. Es lässt sich vermuten, dass die Fibulaentnahme im distalen Drittel den höchsten Einfluss auf die Funktion der Zehenstrecker ausübt. Eine Schwäche der EHL und EDL kann sich als eine Schwäche der Dorsalextension im oberen Sprunggelenk, im Bereich der Gelenke des Hallux und weiterer Zehen und je nach Ausgangsstellung in Supination/Pronation bemerkbar machen. Des Weiteren wird dieser Einfluss durch eine Verlängerung der Transplantatlänge nach proximal größer. Unsere Ergebnisse stimmen mit denen von Anthony et al. nicht überein, da sie keine Korrelation zwischen subjektiver oder gemessener Morbidität des Patienten, der Länge der entnommenen Fibula (8-25 cm) oder der Verwendung eines Hauttransplantats feststellen [72]. Frühere klinische und biomechanische Studien haben gezeigt, dass die Länge des verbleibenden Teils des distalen Teils der Fibula einen wichtigen Einfluss auf die Langzeitstabilität des Sprunggelenks hat. Inwiefern die Länge der entnommenen Fibula einen Einfluss auf die Morbidität hat ist noch nicht

abschließend geklärt. Eindeutige Richtwerte konnten auch von Uchiyama et al. nicht eruiert werden [93].

In der Literatur wird vermehrt über muskuläre Schwäche und funktionelle Beeinträchtigungen unterschiedlichen Ausmaßes nach einer Fibulaentnahme berichtet.

Nach Vail et al. kann eine muskuläre Schwäche aus drei Gründen wie folgt entstehen [53]: Durch eine isolierte Verletzung der motorischen Innervation, funktionelle Dehnung des Muskels durch den Verlust bzw. die Verlegung des muskulären Ursprungs sowie eine Kontraktion des Muskels in Folge einer Verkürzung oder Versteifung der Sehnen.

Goodacre et al. hielten eine sich langsam entwickelnde postoperative Vernarbung in der Umgebung der Mm. flexor et extensor hallucis longus für die mögliche Ursache einer progredienten Parese [56].

Sie stellten nur bei 10,1 % der Patienten eine Muskelschwäche fest, während Zimmermann et al. in ihren objektiven Ergebnissen motorische Defizite in 39,5% und reduzierte Muskelkraft bei 44,7% der Patienten beobachteten. Darüber hinaus wurde von Sieg et al. bei 27,4 % der Patienten sowohl eine Schwäche in Dorsalextension des Hallux als auch eine Verkrümmung der Zehen beschrieben [14]. Shpitzer et al. fanden ebenfalls eine persistierende motorische Schwäche der Großzehe bei 27% der Patienten [52]. Tang et al. beschrieben insbesondere leichte Defizite bei Streckung (43%) bzw. Beugung (29%) der Großzehe [17].

Farhadi et al. führten eine neuromuskuläre orthopädisch-biomechanische Untersuchung zur Evaluation der isometrischen muskulären Spannung der Mm. tibialis anterior et posterior, extensor hallucis longus (EHL) und fibularis (peroneus) longus durch. Bei einer Befragung gaben 40 % der Patienten eine muskuläre Schwäche an. Die biomechanische Untersuchung zeigte aber nicht nur bei diesen 40%, sondern bei allen Patienten eine Schwäche der Mm. tibialis anterior et posterior. Bei dieser Analyse wurde zwar eine verminderte Muskelkraft des EHL auf der operierten Seite erfasst, jedoch unterschied sich der Wert auf der kontralateralen gesunden Seite nicht signifikant [50].

Eine aktuelle Studie von Rendenbach et al. berichtete von einem signifikanten Defizit in Dorsalextension im Sprunggelenk und eine bedeutende Reduktion des AOFAS Score [16]. Sie fanden diese Ergebnisse nicht überraschend, da die Muskeln, die im distalen Bereich der Fibula ihren Ursprung nehmen für die Dorsalextension relevant

sind und die daraus resultierende Effekte, mit Bezug auf die Gleichgewichtsfähigkeit, in anterior-posteriorer Richtung signifikant höher waren als in medio-lateraler Richtung. Valderrabano et al. berichteten darüber, dass sich durch den Verlust des muskulären Ursprungs im Bereich der Fibula und der Membrana interossea cruris, die Funktion der betroffenen Muskeln soweit verändert, dass eine langanhaltende Fehlbelastung die Entwicklung einer sekundären Arthritis begünstigt [94]. Farhadi et al. stellten bei 80% der Patienten eine Osteoarthritis fest [50].

Hidalgo et al. beschrieben 1995 die Mitnahme des M. flexor hallucis als anatomisch günstig, um bei den lateralen Defekten den Totraum unter dem Unterkiefer und bei den anterioren Defekten den Unterkieferbogen zu versorgen und nannten diese Möglichkeit als einen weiteren einzigartigen Vorteil dieser Spenderregion. Sie gaben an, dass die meisten Patienten, die postoperativ eine verminderte Halluxflexionsfähigkeit bemerken, diese als merkwürdigen, aber funktional unwichtigen Befund betrachten [68].

Einige Studien berichten über die Entwicklung von Hammer- und Krallenzehen im postoperativen Verlauf. Babovic et al. fanden Hammerzehen bei ca. 17% (6 von 36 Patienten) der untersuchten Patienten [48], Rendenbach et al. bei ca. 15% (4 von 27) der Patienten [16], während Rogers et al. bei fünf von insgesamt 15 Patienten (ca. 31%) Hammerzehendeformitäten an der Großzehe feststellten [95]. Sieg et al. beobachteten bei 27% der Patienten nach einer Beobachtungszeit von vier Monaten Hammer- und Krallenzehen [14]. Interessanterweise wurden diese Zehendeformitäten von Sieg et al. nicht wie bei Rogers, Rendenbach oder Babovic nur am großen Zeh, sondern auch an den anderen Zehen der operierten Seite beobachtet. Zehendeformitäten wurden neben sensorischen Störungen sowie Gangstörungen auch von Feuvrier et al. beschrieben [19].

Die Inzidenz der postoperativen Ausbildung von Hammer- oder Krallenzehen wurde in nur wenigen Studien zur Fibulaentnahme berücksichtigt. Dies liegt möglicherweise daran, dass ihr Auftreten nicht stark mit Gangstörungen zusammenhängt [14]. Die von Hadouiri et al. durchgeführte Ganganalyse wies auf ein Missverhältnis von muskulären Agonisten und Antagonisten im Bereich der Zehe der operierten Seite hin [20]. Möglicherweise lässt sich die postoperative Entstehung von Hammerzehen durch Kontraktur der Flexoren oder ein Missverhältnis zwischen Flexoren und Extensoren (Ungleichgewicht von Agonisten und Antagonisten) erklären. Darüber hinaus kann eine Ischämie im Bereich des muskulären Stumpfes nach Ablösung des M. flexor

hallucis longus von seinem Ursprung bei der Fibulaentnahme zu einer Kontraktur führen. Aus diesem Grund empfiehlt Disa gar eine komplette Resektion des Muskels zusammen mit der Transplantatentnahme durchzuführen [96].

Zu den funktionellen Komplikationen gehört auch die Bewegungseinschränkung des Fußes und des Sprunggelenks. Diese lässt sich bei einer Prüfung von Flexion/Extension und bei Pronation/Supination eruieren. Während Rogers et al. eine Bewegungseinschränkung bei 62% der Patienten [95] feststellten, gab Khakpour in seiner Arbeit bei 32% der Patienten, nach Fibulaentnahme über einen lateralen Zugang, eine milde Bewegungseinschränkung an. Diese lag in den meisten Fällen bei 10° [97]. Antony et al. beobachteten im Rahmen isokinetischer Tests bei 29% der Patienten eine Abnahme des Bewegungsumfanges im Sprunggelenk bei Flexion und Extension. Alle Kraftmessungen an Knie und Knöchel ergaben eine signifikant verringerte Kraft im Spenderbein im Vergleich zum nicht operierten Kontrollbein. Trotz signifikanter Verminderung der Kraft, deuteten die subjektive Ergebnisse darauf hin, dass das objektiv gemessene Ausmaß der Einschränkung des Bewegungsumfanges und muskuläre Schwächen nicht im gleichen Maße von den Patienten als Beeinträchtigung wahrgenommen wurden [72]. Eine geringere Rate an Patienten mit einer verminderten Flexion und Extension wurde von Shpitzer et al. (12,2%) [52] und Sieg et al. (11,3%) [14] angegeben. Bei den Ergebnissen von Sieg et al. wurde jedoch vermerkt, dass die Erfassung des Bewegungsumfanges im Rahmen des AOFAS Kitaoka Scores erfolgte, der im Vergleich zu absoluten Bewegungsgraden eher eine grobe Einteilung der Defizite ermöglicht.

Wie bereits oben erwähnt, ist es empfohlen, bei der Fibulaentnahme 6-8 cm proximal und distal zu belassen, um einerseits den N. peroneus communis zu schützen und andererseits eine Instabilität des oberen Sprunggelenkes zu vermeiden [22]. Trotz regelrecht durchgeführter Transplantatentnahme wird in der Literatur nicht selten von einer Gelenkinstabilität berichtet. Shpitzer et al. [52] beobachteten bei 4 % und Sieg et al. [14] bei 6,5 % der Patienten eine Gelenkinstabilität. Bei einer Studie von Bodde et al. stellten 30% der Patienten ein Gefühl der Knöchelinstabilität fest [57]. Bei einer Befragung gaben 20 % der Patienten von Farhadi et al. eine Sprunggelenksinstabilität an. Interessanterweise konnte bei der klinischen Untersuchung dieser Patienten nur bei 40% Anzeichen einer mechanischen Instabilität nachgewiesen werden [50]. Sie erklären die Diskrepanz zwischen den subjektiven Angaben und den objektiven Befunden durch die von den Patienten entwickelten Kompensationsmaßnahmen wie

langsames Gehen und vorsichtiges Aufsetzen, die letztendlich dazu führen, dass nach einer Gewöhnungszeit die Patienten eine Instabilität nicht mehr als solches wahrnehmen. Tang et al. fanden bei 42 % der Patienten das Gefühl einer Instabilität [17], führten jedoch keine klinische Untersuchung durch. Wie von diesen Autoren angegeben, ist das Gefühl der Instabilität eher ein Gefühl der Ermüdung bei wiederholten Bewegungen als eine objektivierbare Instabilität. Aus den oben genannten Gründen spielt die klinische Untersuchung eine entscheidende Rolle für die Beurteilung muskuloskelettaler Pathologien [57].

Sieg et al. berichteten in einer Langzeit-Beobachtungsstudie mit 57 Patienten (davon fünf Patienten mit beidseitiger Fibulaentnahme, insgesamt 62 Donorregionen) über eine Gleichgewichtsstörung bei ca. 15% der Patienten in einem Zeitraum von 2-167 Monaten nach Entnahme der Fibula. Darunter zeigten ca. 5% der Fälle eine erhebliche Beeinträchtigung nach der Operation. Die klinische Bewertung nach Kitaoka *Ankle-Hindfoot Score* lieferte vergleichbare Werte bezüglich der Gleichgewichtsstörung. Der Mittelwert lag bei 87 Punkten (Median 93). In 62,9% der Fälle wurden 90 bis 100 Punkte und somit ein sehr gutes Ergebnis erreicht. 21,0% der Fälle erzielten eine gute Bewertung mit 75 bis 89 Punkten, während bei 6,5% mit 60 bis 74 Punkten ein befriedigendes Ergebnis vorlag und in 9,7% der Score mit 0 bis 59 Punkten schlecht war [14]. Weitere Studien von Garrett, Farhadi und Rogers et al. zeigen schlechtere Medianwerte von 77-87 Punkten [47, 50, 95].

Rendenbach et al. untersuchten im Rahmen einer prospektiven Kohortenstudie 27 Patienten prä- und postoperativ mit einer Mandibularesektion und Rekonstruktion mit einem freien Fibulatransplantat. Das Ziel dieser Studie war es, funktionelle Defizite, Leistungsvermögen sowie Gleichgewichtsfähigkeit vor und nach der Operation zu beobachten und zu vergleichen. Die mittlere Beobachtungszeit lag bei 8 Monaten. Sie berichteten über eine signifikante postoperative Verschlechterung der maximalen Spitzenleistung pro Körpermaße (*maximum peak power per body mass, MPP*) sowie der Gleichgewichtsfähigkeit. Um die Auswirkungen der Fibulaentnahme auf den Alltag zu bewerten, ist es wichtig, die Ergebnisse der Gleichgewichtsprüfung in Verbindung mit dem Patientenfragebogen zu berücksichtigen. In der subjektiven Umfrage gaben 40,7% der Patienten postoperative Gangunsicherheit oder Sturzangst an. In allen Fällen war jedoch eine ausreichende Länge des distalen Stumpfes und eine vorsichtige Dissektion gewährleistet. Die Ergebnisse dieser Arbeit stimmten mit anderen Studien überein, die auch in der Langzeitanalyse auf hohe Raten subjektiv

empfundener Sprunggelenkinstabilität hinweisen [17, 50, 57, 98], obwohl andere Gruppen nicht über diese Erfahrungen berichteten [1, 14, 29]. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass die meisten Studien zur Morbidität an der Spenderstelle die Instabilität des Stehens oder des Gehens nicht prospektiv und mit Hilfe einer Kraftmessplatte zur Bestimmung der Bodenreaktionskraft beurteilten [16]. Zusammenfassend ergab die postoperative klinische Untersuchung von Rendenbach et al. keine Knöchelinstabilität des Spenderbeins. Trotzdem konnten sie mit der aktuellen Studie die subjektiven Gangerfahrungen und die Unsicherheit durch den Einsatz von Gleichgewichtstests objektivieren. Daher sollte möglicherweise berücksichtigt werden, dass die subjektive Stand- und Gangunsicherheit vom Patienten als Knöchelinstabilität missverstanden werden kann [16]. Radiologische Anzeichen einer Osteoporose können im distalen Wadenbeinsegment nach einigen Jahren auftreten, führen aber nicht zu einer Gehbehinderung oder einer Formveränderung des Sprunggelenks [78].

Darüber hinaus beschäftigen sich nur wenige Studien mit dem subjektiven Befinden der Patienten, bezüglich Funktionalität, körperlichem Befinden, Einschränkungen im Alltag sowie ästhetischen Problemen [13, 17, 57, 95]. Mit Hilfe eines Fragebogens „*Hospital Anxiety and Depression Scale*“ beschäftigte sich eine Studie von Rogers et al. gezielt mit dem psychischen Zustand des Patienten. Dabei wurden die Patienten nach depressiven Zuständen und Ängsten befragt. Sie fanden heraus, dass die funktionelle Zufriedenheit mit einem guten psychischen Zustand korreliert [95].

Die gesundheitsbezogene Lebensqualität gewinnt in der Medizin zunehmend an Bedeutung. Ein Instrument zur Erfassung der gesundheitsbezogenen Lebensqualität ist der SF-36 Fragebogen [66]. Dieses Instrument ist eines der verbreitetsten generischen Instrumente und mittlerweile in mehreren Sprachen verfügbar. Mithilfe vom SF-Fragebogen verglich Khakpour in seiner Arbeit die gesundheitsbezogene Lebensqualität bei Patienten, die einen medialen Zugang zur Fibulaentnahme erhielten, mit Patienten, die einen lateralen Zugang hatten [97]. Interessanterweise fand er heraus, dass die Männer mit einem lateralen Zugang und die Frauen aus der medialen Gruppe bessere Ergebnisse erzielten. Vergleichsweise gaben die Frauen aus der medialen Gruppe weniger Schmerzen an als die Frauen der lateralen Gruppe. In einer Studie von Farhadi et al. wurden 48 Patienten nach Fibulaentnahme in einem mittleren Beobachtungszeitraum von 32,3 Monaten untersucht [50]. Im Allgemeinen war die subjektive Wahrnehmung der Patienten bezüglich der Morbidität an der

Spenderstelle gering. Jedoch klagten 60% der Patienten über Muskelkrämpfe und 40% gaben ein Schwächegefühl an.

Von Kurul et al. [99] und Hidalgo [100] wurde beschrieben, dass die Defektgröße und Lokalisation der Entnahmestelle einen bedeutenden Einfluss auf die Lebensqualität der Patienten ausüben. Außerdem stellte Hidalgo Techniken vor, die zu einer verbesserten Ästhetik und Funktion in der Donorregion führen.

Zu den Limitationen der vorliegenden Arbeit gehört die relativ begrenzte Anzahl des untersuchten Materials. Da wir zudem in erster Linie die Reihenfolge der Ablösungs- bzw. Osteotomieschritte bestimmen mussten, konnten bei einer Verschiebung nach einer einzelnen Osteotomie (z.B. des mittleren Drittels des Wadenbeins) nur begrenzte Informationen gewonnen werden. Die nach einzelnen Schritten auftretenden niedrigen Verschiebungswerte können auf den ersten Blick für eine Funktionsbeeinträchtigung irrelevant erscheinen. Diese Werte können zwar im klinischen Alltag nicht als Absolutwerte übertragen werden, bieten jedoch Hinweise über das zu erwartende Ausmaß einer Muskelablösung und der damit verbundenen Bewegungseinschränkung. Eine direkte Umrechnung in Werte eines Bedside-Tests, wie sie in verschiedenen orthopädischen Scores (z.B. Kitaoka Knöchelhalsfuß [14] oder AOFAS [16] Scores) beschrieben ist, kann durch ein solches biomechanisches Kadavermodell nicht zuverlässig erreicht werden.

Darüber hinaus ist die Funktionsbeeinträchtigung des Unterschenkels nach der Entnahme eines Fibulatransplantates ein multifaktorieller Nebeneffekt, der durch den Gefäßzustand des Unterschenkels, den Umfang und die Dauer des Entnahmeverfahrens, die Erfahrung des Operateurs, die postoperative Behandlung sowie die Rehabilitation beeinflusst werden kann.

Dennoch erlaubt dieses experimentelle biomechanische Modell die Bewertung der isolierten Wirkung der Fibulatransplantatentnahme auf die Ablösung der Streckmuskeln der Zehen unabhängig von möglichen Einflussfaktoren, die im klinischen Alltag beobachtet werden, wie z.B. die zusätzliche Entnahme einer Hautinsel oder eine prolongierte Wundheilung.

Weitere prospektive klinische Studien unter Berücksichtigung der Osteotomiestelle sowie der Transplantatlänge in einem homogenen Patientenkollektiv können die erwartete Beeinträchtigung der Streckmuskulatur nach Entnahme eines freien Fibulatransplantates aufklären.

Unter Berücksichtigung dieser biomechanischen Ergebnisse kann die lokale Morbidität der Streckmuskeln der Zehen auf ein Minimum reduziert werden, wenn eine sorgfältige Auswahl der Osteotomiestelle sowie eine zurückhaltende Entnahme des Wadenbeins durchgeführt wird.

5. Zusammenfassung

Das freie Fibulatransplantat wird standardmäßig zur knöchernen Rekonstruktion im Kopf-Hals-Bereich eingesetzt. Als eine der wichtigsten Folgen dieser Operation wird eine Schwäche der Extensoren, insbesondere des Großzehs beschrieben. Diese Extensoren entspringen sowohl an der Fibula als auch an der Membrana interossea cruris und verlieren nach diesem Eingriff einen Teil ihres Ursprungs.

Im Rahmen dieser anatomischen/biomechanischen Studie wurden 11 nicht fixierte Kadaverunterschenkel untersucht. Um die Auswirkung einer Fibulaentnahme auf die Extensoren zu untersuchen, wurden die Sehnen der Zehenstrecker unmittelbar proximal der Ansatzstelle freipräpariert und vollständig isoliert. Anschließend wurden die Sehnen der Mm. extensor hallucis longus (EHL) und extensor digitorum longus (EDL) mit Hilfe von Drahtseilen mit Gewichten verbunden und axial auf Zug beansprucht (2,5 kg für EHL und 4 kg für EDL). Ein digitaler Messschieber wurde dazwischengeschaltet um die Dislokation der Sehnen während einer Fibulaentnahme zu registrieren. Die Unterschenkel-Präparate wurden nach den etablierten chirurgischen Methoden präpariert. Die maximal zulässige Länge eines Fibulatransplantates wurde in drei Segmente geteilt (distal, medial und proximal) schrittweise entnommen. Nach jedem Schritt (Durchtrennung der Membrana interossea und Osteotomie der Fibula) wurde die Dislokation der Sehne erfasst.

Die statistische Auswertung der einzelnen und kumulativen Verschiebungen wurde mit dem Wilcoxon-Test evaluiert. Die p-Werte wurden nach der Bonferroni-Holm-Methode korrigiert.

Bei der Spaltung der Membrana interossea waren weder die einzelnen Verschiebungen noch die kumulativen Messungen signifikant. Die höchste Verschiebung nach Spaltung der Membrana interossea wurde bei EHL im distalen Drittel ($0,056 \pm 0,097$ mm, $p=0,053$) und bei EDL im medialen Abschnitt ($0,041 \pm 0,089$ mm, $p=0,326$) registriert.

Im Gegensatz dazu führte die segmentale Osteotomie der Fibula zur signifikanten Verschiebung beider Streckersehnen sowohl nach jeder einzelnen Osteotomie als auch als kumulative Verschiebung des Sehnenansatzes. Die Osteotomie des distalen Segmentes verursachte die höchste Verschiebung der Sehnenansätze der EHL und EDL ($0,368 \pm 0,231$ mm, $p=0,02$ bei EHL und $0,195 \pm 0,118$ mm, $p=0,0198$ bei EDL) gefolgt von den Verschiebungen im medialen und proximalen Drittel.

Die Dislokation der Sehnen nach jedem Schritt weist konsekutiv auf den Verlust des muskulären Ursprungs der jeweiligen Sehne hin.

Zu den Limitationen der vorliegenden Arbeit gehören das unbekannte Alter und die begrenzte Anzahl des untersuchten Materials.

Unsere Ergebnisse zeigen, dass die Ablösung der Membrana interossea cruris, die bei der Präparation des Gefäßbündels über einen lateralen Zugang von anterior durchgeführt wird, gar auf ihrer Gesamtlänge, keine relevante Verschiebung des muskulären Ursprungs des EHL oder EDL hervorgerufen hat und die Extensoren der Unterschenkel nicht wesentlich beeinflusst. Jedoch führte die Osteotomie der Fibula in jedem der drei Abschnitte zu einer signifikanten Verschiebung als Hinweis auf einen Verlust des muskulären Ursprungs.

Diese Ergebnisse zeigen, dass durch die Reduktion des entnommenen Fibulatransplantates auf die benötigte Länge, möglicherweise die postoperative Funktionsbeeinträchtigung der Zehenstrecker auf ein Minimum reduziert werden kann. Es sind daher weitere prospektive klinische Studien notwendig, die diese Ergebnisse im Einzelnen überprüfen.

6. Literaturverzeichnis

1. Wolff, K.-D. and F. Hölzle, *Raising of Microvascular Flaps*. 2011.
2. Becker, W. and H. Krahl, *Die Tendopathien. Grundlagen, Klinik Therapie*. 1978, Stuttgart Thieme-Verlag.
3. Schünke, M., et al., *Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem 182 Tabellen*.
4. Taner, C., *Morbidität der Unterschenkel-Spenderregion nach Entnahme eines vaskularisierten Fibulatransplantates*. 2011.
5. Rüter, A., *Strukturelle Beschaffenheit und Anordnung kraftaufnehmender Elemente in langen Sehnen*. <http://www-brs.ub.ruhr-uni-bochum.de/netahtml/HSS/Diss/RueterAnja/diss.pdf>, 2019.
6. Strauch, B., H.-L. Yu, and L. Liang, *Atlas of microvascular surgery anatomy and operative techniques ; [anatomy and operative approaches]*. 2. ed. 2006, New York [u.a.]: Thieme. XVIII, 686 S.
7. Hidalgo, D.A., *Fibula free flap mandibular reconstruction*. Clin Plast Surg, 1994. **21**(1): p. 25-35.
8. Sieg, P., et al., *Defect-related variations in mandibular reconstruction using fibula grafts.: A review of 96 cases*. British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery, 2002. **40**(4): p. 322-329.
9. Taylor, G.I., R.J. Corlett, and M.W. Ashton, *The Evolution of Free Vascularized Bone Transfer: A 40-Year Experience*. Plast Reconstr Surg, 2016. **137**(4): p. 1292-305.
10. Hakim, S.G., et al., *The eligibility of the free fibula graft for masticatory rehabilitation using monocortical implants insertion—a morphologic and biomechanical study*. Clinical Oral Investigations, 2012. **16**(2): p. 673-678.
11. Hakim, S.G., et al., *Masticatory rehabilitation following upper and lower jaw reconstruction using vascularised free fibula flap and enossal implants—19 years of experience with a comprehensive concept*. Clinical Oral Investigations, 2015. **19**(2): p. 525-534.
12. Jacobsen, H.-C., et al., *Oral rehabilitation with dental implants and quality of life following mandibular reconstruction with free fibular flap*. Clinical Oral Investigations, 2016. **20**(1): p. 187-192.
13. Zimmermann, C., et al., *Donor site morbidity after microvascular fibula transfer*. Clinical Oral Investigations, 2001. **5**(4): p. 214-219.
14. Sieg, P., et al., *Long-term evaluation of donor site morbidity after free fibula transfer*. British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery, 2010. **48**(4): p. 267-270.
15. Ling, X.F. and X. Peng, *What is the price to pay for a free fibula flap? A systematic review of donor-site morbidity following free fibula flap surgery*. Plast Reconstr Surg, 2012. **129**(3): p. 657-74.

16. Rendenbach, C., et al., *Prospective biomechanical analysis of donor-site morbidity after fibula free flap*. J Craniomaxillofac Surg, 2016. **44**(2): p. 155-9.
17. Tang, C.L., et al., *Donor site morbidity following vascularized fibular grafting*. Microsurgery, 1998. **18**(6): p. 383-386.
18. Lee, K.-S. and J.-W. Park, *Free vascularized osteocutaneous fibular graft to the tibia*. Microsurgery, 1999. **19**(3): p. 141-147.
19. Feuvrier, D., et al., *Long-term donor-site morbidity after vascularized free fibula flap harvesting: Clinical and gait analysis*. Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery, 2016. **69**(2): p. 262-269.
20. Hadouiri, N., et al., *Donor site morbidity after vascularized fibula free flap: gait analysis during prolonged walk conditions*. International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery, 2018. **47**(3): p. 309-315.
21. Collin, T., et al., *Technical considerations of fibular osteocutaneous flap dissection*. J Plast Reconstr Aesthet Surg, 2008. **61**(12): p. 1503-6.
22. Hausamen, J.-E., et al., *Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie Elektronische Ressource Operationslehre und -atlas*. 4. Aufl. ed. Online Ressource (720 S.).
23. Zilles, K. and B. Tillmann, *Anatomie mit 121 Tabellen*. XV, 1022 S.
24. Lippert, H. and T. Deller, *Lehrbuch Anatomie 184 Tabellen ; [Online-Zugang + interaktive Extras www.studentconsult.de]*. 7., erw. Aufl. ed. XII, 884 S.
25. Manktelow, R.T., R.M. Zuker, and K. Finch, *Microvascular reconstruction : anatomy, applications, and surgical technique*. 1986.
26. McKee, N.H., P. Haw, and T. Vettese, *Anatomic study of the nutrient foramen in the shaft of the fibula*. Clin Orthop Relat Res, 1984(184): p. 141-4.
27. Tillmann, B., et al., *Bewegungsapparat*. [Neuauf., 20. Aufl.], 2., verb. Aufl. ed. XI, 797 S.
28. Sobotta, J., R. Putz, and R. Pabst, *Anatomie des Menschen der komplette Atlas in einem Band ; allgemeine Anatomie, Bewegungsapparat, innere Organe, Neuroanatomie ; Tabellenheft ; [Online-Zugang + interaktive Extras www.studentconsult.de]*. 22., neu bearbeitete Auflage ed. 830 S.
29. Holzle, F., et al., *Clinical outcome and patient satisfaction after mandibular reconstruction with free fibula flaps*. Int J Oral Maxillofac Surg, 2007. **36**(9): p. 802-6.

30. Disa, J.J. and P.G. Cordeiro, *The current role of preoperative arteriography in free fibula flaps*. *Plast Reconstr Surg*, 1998. **102**(4): p. 1083-8.
31. Mao, C., et al., [*The value of preoperative routine donor leg angiography in free fibula flaps*]. *Zhonghua Kou Qiang Yi Xue Za Zhi*, 2002. **37**(1): p. 15-7.
32. Lorenz, R.R. and R. Esclamado, *Preoperative magnetic resonance angiography in fibular-free flap reconstruction of head and neck defects*. *Head Neck*, 2001. **23**(10): p. 844-50.
33. Mast, B.A., *Comparison of magnetic resonance angiography and digital subtraction angiography for visualization of lower extremity arteries*. *Ann Plast Surg*, 2001. **46**(3): p. 261-4.
34. Taylor, G.I., G.D. Miller, and F.J. Ham, *The free vascularized bone graft. A clinical extension of microvascular techniques*. *Plast Reconstr Surg*, 1975. **55**(5): p. 533-44.
35. Wolff, K.D., et al., *Experience with the osteocutaneous fibula flap: an analysis of 24 consecutive reconstructions of composite mandibular defects*. *J Craniomaxillofac Surg*, 1996. **24**(6): p. 330-8.
36. Yoshimura, M., et al., *Double peroneal free flap for multiple skin defects of the hand*. *Br J Plast Surg*, 1989. **42**(6): p. 715-8.
37. Hausamen, J.-E., *Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie Operationslehre und -atlas*. 4., vollst. überarb. Aufl. ed. XXV, 760 S.
38. Chen, Z.-W. and W. Yan, *The study and clinical application of the osteocutaneous flap of fibula*. 1983. **4**(1): p. 11-16.
39. Gilbert, A., *Vascularised transfer of the fibula shaft*. *International journal of microsurgery*, 1979. **1**: p. 100-105.
40. Gilbert, A., *Free vascularized bone grafts*. *International surgery*, 1981. **66**: p. 27-31.
41. Hidalgo, D.A., *Fibula free flap: a new method of mandible reconstruction*. *Plast Reconstr Surg*, 1989. **84**(1): p. 71-9.
42. Wei, F., et al., *Fibula Osteoseptocutaneous Flap for Reconstruction of Composite Mandibular Defects*. *Plastic and reconstructive surgery*, 1994. **93**: p. 294-304; discussion 305.
43. Wolff, K.D. and R. Stellmach, *The osteoseptocutaneous or purely septocutaneous peroneal flap with a supramalleolar skin paddle*. *Int J Oral Maxillofac Surg*, 1995. **24**(1 Pt 1): p. 38-43.
44. Holzle, F., et al., [*Evaluation of the lower leg vessels before microsurgical fibula transfer. Magnetic resonance angiography versus digital subtraction angiography*]. *Mund Kiefer Gesichtschir*, 2003. **7**(4): p. 246-53.

45. E. Emery, S., et al., *Tibial Stress Fracture after a Graft Has Been Obtained from the Fibula: A Report of Five Cases**. The Journal of bone and joint surgery. American volume, 1996. **78**: p. 1248-51.
46. Ganel, A. and B. Yaffe, *Ankle Instability of the Donor Site Following Removal of Vascularized Fibula Bone Graft*. Annals of plastic surgery, 1990. **24**: p. 7-9.
47. Garrett, A., et al., *Evaluation of fibula free flap donor site morbidity*. Am J Otolaryngol, 2006. **27**(1): p. 29-32.
48. Babovic, S., C. Johnson, and S. J. Finical, *Free Fibula Donor-Site Morbidity: The Mayo Experience with 100 Consecutive Harvests*. Journal of reconstructive microsurgery, 2000. **16**: p. 107-10.
49. Ivey, M., C.A. Hicks, and J.D. Hook, *Stress fracture of the tibia after harvest of a vascularized fibular graft for repair of nonunion of the humerus*. Orthopedics, 1995. **18**(1): p. 57-60.
50. Farhadi, J., et al., *Free fibula donor-site morbidity: clinical and biomechanical analysis*. Ann Plast Surg, 2007. **58**(4): p. 405-10.
51. Pacifico, M.D., D. Floyd, and S.H. Wood, *Tibial stress fracture as a complication of free-fibula vascularised graft for mandibular reconstruction*. Br J Plast Surg, 2003. **56**(8): p. 832-4.
52. Shpitzer, T., et al., *Leg Morbidity and Function Following Fibular Free Flap Harvest*. Annals of plastic surgery, 1997. **38**: p. 460-4.
53. Vail, T.P. and J.R. Urbaniak, *Donor-site morbidity with use of vascularized autogenous fibular grafts*. J Bone Joint Surg Am, 1996. **78**(2): p. 204-11.
54. Westesson, P.L. and J.C. Wandtke, *Stress fracture of the tibia: an unusual complication of reconstructive surgery of the mandible*. J Oral Maxillofac Surg, 1999. **57**(1): p. 70-4.
55. Colen, S.R., W.W. Shaw, and J.G. McCarthy, *Review of the morbidity of 300 free-flap donor sites*. Plast Reconstr Surg, 1986. **77**(6): p. 948-53.
56. Goodacre, T.E., et al., *Donor site morbidity following osteocutaneous free fibula transfer*. Br J Plast Surg, 1990. **43**(4): p. 410-2.
57. Bodde, E.W., et al., *Donor-site morbidity after free vascularized autogenous fibular transfer: subjective and quantitative analyses*. Plast Reconstr Surg, 2003. **111**(7): p. 2237-42.
58. Meagher, P.J. and W.A. Morrison, *Free fibula flap-donor-site morbidity: case report and review of the literature*. J Reconstr Microsurg, 2002. **18**(6): p. 465-8; discussion 469-70.
59. Urken, M., et al., *Atlas of Regional and Free Flaps for Head and Neck Reconstruction*. Journal of Craniofacial Surgery, 1995. **6**: p. 424.

60. Blake, F., et al., *The Medial Approach to the Fibula: A Feasible Alternative*. Journal of oral and maxillofacial surgery : official journal of the American Association of Oral and Maxillofacial Surgeons, 2008. **66**: p. 319-23.
61. Schneider, W. and S. Jurenitsch, *Normative data for the American Orthopedic Foot and Ankle Society ankle-hindfoot, midfoot, hallux and lesser toes clinical rating system*. Int Orthop, 2016. **40**(2): p. 301-6.
62. Kitaoka, H.B., et al., *Clinical rating systems for the ankle-hindfoot, midfoot, hallux, and lesser toes*. Foot Ankle Int, 1994. **15**(7): p. 349-53.
63. Zigmond, A.S. and R.P. Snaith, *The Hospital Anxiety and Depression Scale*. 1983. **67**(6): p. 361-370.
64. Galanakis, P. and E. Biemer, *[Aspects of quality assurance in plastic surgery. Subjective well-being and satisfaction of 420 plastic surgery patients with preoperative counseling, surgical intervention and after-care]*. Handchirurgie, Mikrochirurgie, plastische Chirurgie : Organ der Deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft für Handchirurgie : Organ der Deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft für Mikrochirurgie der Peripheren Nerven und Gefäße : Organ der Vereinigung der Deutschen Plastischen Chirurgen, 2000. **32**: p. 149-54.
65. Dimenas, E.S., et al., *Defining quality of life in medicine*. Scand J Prim Health Care Suppl, 1990. **1**: p. 7-10.
66. Morfeld, M. and M. Bullinger, *Der SF36 Health Survey zur Erhebung und Dokumentation gesundheitsbezogener Lebensqualität*. Physikalische Medizin Rehabilitationsmedizin Kurortmedizin - PHYSIK MED REHABIL KURORTMEDI, 2008. **18**: p. 250-255.
67. Bortz, J. and C. Schuster, *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler*. 7., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage ed. 2010, Berlin Heidelberg: Springer. XVI, 655 Seiten.
68. Hidalgo, D.A. and A. Rekow, *A review of 60 consecutive fibula free flap mandible reconstructions*. Plast Reconstr Surg, 1995. **96**(3): p. 585-96; discussion 597-602.
69. Neal D. Futran Md, D.M.D., *Closure of the Fibula Free Flap Donor Site With the Sure-Closure™ Skin-Stretching Device*. The Laryngoscope, 2009. **106**: p. 1487-1490.
70. F. Jones, N., S. Monstrey, and B.A. Gambier, *Reliability of the Fibular Osteocutaneous Flap for Mandibular Reconstruction: Anatomical and Surgical Confirmation*. Plastic and reconstructive surgery, 1996. **97**: p. 707-16; discussion 717.

71. Yamano, Y., *Jaw reconstruction using vascularized fibular grafts*. Osaka city medical journal, 1994. **40**: p. 43-52.
72. P. Anthony, J., et al., *Donor Leg Morbidity and Function after Fibula Free Flap Mandible Reconstruction*. Plastic and reconstructive surgery, 1995. **96**: p. 146-52.
73. E. Blackwell, K., *Donor site evaluation for fibula free transfer*. American journal of otolaryngology, 1998. **19**: p. 89-95.
74. A. Hidalgo, D., et al., *A Review of 716 Consecutive Free Flaps for Oncologic Surgical Defects: Refinement in Donor-Site Selection and Technique*. Plastic and reconstructive surgery, 1998. **102**: p. 722-32; discussion 733.
75. Christine Marianne Thome, J., *Das mikrovaskuläre Fibulatransplantat in der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie*. 2008.
76. Klein, S., J.J. Hage, and L. A.E. Woerdeman, *Donor-site necrosis following fibula free-flap transplantation: A report of three cases*. Microsurgery, 2005. **25**: p. 538-42; discussion 542.
77. Cornelius, C.-P. and M. Ehrenfeld, *Revaskularisiertes Fibulatransplantat*, in *Expertise Lappenplastiken und Transplantate im Kopf-Hals-Bereich*, S.H. Lang, F. Bootz, and S. Remmert, Editors. 2018, Georg Thieme Verlag.
78. H Lee, E., et al., *Donor site morbidity following resection of fibula*. The Journal of bone and joint surgery. British volume, 1990. **72**: p. 129-31.
79. Catala-Lehnen, P., et al., *Long-term donor-site morbidity after microsurgical fibular graft: is there a difference between the medial approach and the lateral approach?* J Oral Maxillofac Surg, 2012. **70**(9): p. 2198-204.
80. Humphrey, J., *Continuum biomechanics of soft biological tissues*. Proceedings of The Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2003. **459**: p. 3-46.
81. Fung, Y. and S. Cowin, *Biomechanics. Mechanical Properties of Living Tissues*. Journal of Applied Mechanics-transactions of The Asme - J APPL MECH, 1994. **61**.
82. Lüllmann-Rauch, R., *Histologie : Verstehen - Lernen - Nachschlagen*. 2003, Stuttgart: Thieme.
83. Arnold, G., *Festigkeit und Kraft-Längenänderungs-Verhalten der Strecksehnen des menschlichen Fußes*. Research in Experimental Medicine, 1974. **164**: p. 123-136.
84. Mijatovic, D., K. Bulic, and V. Nikolic, *Quantification model for muscular forces and momentums in human lower extremities*. Coll Antropol, 2006. **30**(3): p. 593-9.

85. Shindo, M., et al., *The Fibula Osteocutaneous Flap in Head and Neck Reconstruction*. Archives of otolaryngology--head & neck surgery, 2000. **126**: p. 1467-72.
86. González-García, R., et al., *Vascularized free fibular flap for the reconstruction of mandibular defects: clinical experience in 42 cases*. Oral surgery, oral medicine, oral pathology, oral radiology, and endodontics, 2008. **106**: p. 191-202.
87. Kerrary, S., et al., *Acute compartment syndrome following fibula flap harvest for mandibular reconstruction*. Journal of cranio-maxillo-facial surgery : official publication of the European Association for Cranio-Maxillo-Facial Surgery, 2011. **39**: p. 206-8.
88. K. Yim M.D, K. and F.-C. Wei M.D, *Fibula osteoseptocutaneous flap for mandible reconstruction*. Microsurgery, 1994. **15**: p. 245-249.
89. Buncke, H.J., *Microsurgery: Transplantation-Replantation*. 1991, Lea&Febiger: Philadelphia, PA. p. 594-633.
90. Satku, K., et al., *The dropped big toe*. Annals of the Academy of Medicine, Singapore, 1992. **21**: p. 222-5.
91. A Hidalgo, D. and A. L Pusic, *Free-flap mandibular reconstruction: A 10-year follow-up study*. Plastic and reconstructive surgery, 2002. **110**: p. 438-49; discussion 450.
92. Robb, G., *Free-Flap Mandibular Reconstruction: A 10-Year Follow-up Study*. Archives of facial plastic surgery : official publication for the American Academy of Facial Plastic and Reconstructive Surgery, Inc. and the International Federation of Facial Plastic Surgery Societies, 2004. **6**: p. 65-66.
93. Uchiyama, E., et al., *Distal Fibular Length Needed for Ankle Stability*. Foot & ankle international / American Orthopaedic Foot and Ankle Society [and] Swiss Foot and Ankle Society, 2006. **27**: p. 185-9.
94. Valderrabano, V., et al., *Ligamentous posttraumatic ankle osteoarthritis*. The American journal of sports medicine, 2006. **34**: p. 612-20.
95. Rogers, S., et al., *A Comparison of the Long-Term Morbidity following Deep Circumflex Iliac and Fibula Free Flaps for Reconstruction following Head and Neck Cancer*. Plastic and reconstructive surgery, 2003. **112**: p. 1517-25; discussion 1526.
96. Disa, J.J., *Discussion: A comparison of the long-term morbidity following deepcircumflex iliac and fibula free flaps for reconstruction following head and neck cancer*. Plast Reconstr Surg, 2003. **112(6)**: p. 1526-1527.

97. Khakpour, P., *Entnahmemorbidity der vaskularisierten Fibula in Bezug auf dem medialen und lateralen Zugang*. 2009, Staats- und Universitätsbibliothek Hamburg: Hamburg.
98. Guo, L., et al., *Vascularized Fibular Graft for Pediatric Mandibular Reconstruction*. *Plastic and reconstructive surgery*, 2008. **121**: p. 2095-105.
99. Kurul, S., et al., *Plastic surgery in irradiated areas: Analysis of 200 consecutive cases*. *European journal of surgical oncology : the journal of the European Society of Surgical Oncology and the British Association of Surgical Oncology*, 1997. **23**: p. 48-53.
100. A. Hidalgo, D., *Aesthetic Improvements in Free-Flap Mandible Reconstruction*. *Plastic and reconstructive surgery*, 1991. **88**: p. 574-85; discussion 586.

7. Danksagung

An erster Stelle möchte ich mich bei meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. Dr. Samer Hakim bedanken, der mich nicht nur im Rahmen dieser Dissertation bestens betreut hat, sondern mir das freundliche Team und die nötigen Mittel zur Verfügung gestellt und meine Ideen und Vorschläge umfassend und produktiv unterstützt hat.

Dem Direktor der Klinik für Kiefer- und Gesichtschirurgie des UKSH, Campus Lübeck, Herrn Prof. Dr. Dr. Sieg danke ich für die freundliche Aufnahme und die angenehme Zusammenarbeit.

Des Weiteren danke ich dem ingenieurwissenschaftlichen Leiter des Labors für Biomechanik und Biomechatronik, Herrn Dr.-Ing. Robert Wendlandt, aus der Klinik für Chirurgie des Stütz- und Bewegungsapparats des UKSH zu Lübeck für die wegweisende Einführung in die Biomechanik, die tolle Unterstützung bei dem Aufbau des Untersuchungsmodells und die Durchführung der Messungen sowie für seine fachlichen Anregungen.

Ich möchte mich auch bei dem Anatomischen Instituts der Universität zu Lübeck dafür bedanken, dass mir die Untersuchung an Körperspendern ermöglicht wurde und die nötigen Räumlichkeiten für diese Untersuchungen zur Verfügung gestellt hat. Speziell erwähnen möchte ich die Präparatorin, Frau Jana Meynicke für die Vorbereitung der Präparate, Unterstützung bei der Präparation sowie Durchführung der Untersuchung.

Herrn Markus Scheinhardt und Herrn Marvin Wright aus dem Institut für Medizinische Biometrie und Statistik der Universität zu Lübeck bin ich für die Unterstützung bei der statistischen Auswertung der Daten dankbar.

Für die konstruktive Manuskriptkorrektur bedanke ich mich besonders bei Frau Dr. Lea von Bialy und Herrn Dr. Dr. Daniel Steller.

Zu guter Letzt danke ich meiner Familie dafür, dass sie mir das Studium der Zahn- und Humanmedizin ermöglicht und mich in jeglicher Hinsicht und zu jeder Zeit unterstützt hat.

8. Lebenslauf

PERSÖNLICHE ANGABEN

Name	Ali Shakery Tehrany
Geburtstag	29.04.1978
Geburtsort	Teheran/Iran
Staatsangehörigkeit	deutsch-iranisch
Familienstand	ledig



SCHULAUSBILDUNG

1992 - 1996	Gymnasium, Abschluss: Abitur (Teheran-Iran)
1989 - 1992	Orientierungsschule
1984 - 1989	Grundschule

STUDIUM

1996 - 2001	Studium des Bauingenieurwesens an der International Imam-Khomeini Universität (IKIU) – Qazvin/Iran Abschluss: Bachelor Bauingenieur
Sommersemester 2003	Studium des Bauingenieurwesens Universität Essen
2003 - 2009	Studium der Zahnmedizin an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
September 2004	Naturwissenschaftliche Vorprüfung, Prädikat: „gut“
Oktober 2006	Zahnärztliche Vorprüfung, Prädikat: „sehr gut“
Juli 2009	Zahnärztliche Prüfung (Staatsexamen), Prädikat „gut“
2005 - 2013	Studium der Humanmedizin an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
März 2008	Erster Abschnitt der Ärztlichen Prüfung, Prädikat: „gut“
Dezember 2012	Ärztliche Prüfung (Staatsexamen), Prädikat: „gut“

STIPENDIUM

2007 - 2012	Stipendiat der Friedrich-Ebert-Stiftung
-------------	---

BERUFLICHE TÄTIGKEIT

- 2000 - 2002 Angestellter Ingenieur bei Know-How Consulting Engineers Teheran
Schwerpunkt: Bauwerk Entwurf, Baukostenberechnung
- Januar 2010-Juni 2013 Beschäftigung als wissenschaftlicher Angestellter in der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Dr. Michael Schünke, Anatomisches Institut Kiel
Dissertation: „Untersuchungen zur Struktur der Mm. supra- und infraspinatus und assoziierter Rotatorenmanschettenrupturen“
- Seit 01.06.2013 Beschäftigung als Assistenzarzt und seit November 2018 als Facharzt für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie und derzeit in Zusatz-Weiterbildung für plastische Operationen am Universitätsklinikum Schleswig-Holstein (UKSH), Campus Lübeck, Klinik für Kiefer- und Gesichtschirurgie
Publikation als Co-Autor: *„The impact of harvest length and detachment of the interosseous membrane on donor-site morbidity following free fibula flap surgery – a biomechanical experimental study“*

VORTRAG

- Norddeutsche Röntgengesellschaft und Röntgengesellschaft von Niedersachsen, Bremen und Sachsen-Anhalt
Gemeinsame Jahrestagung, Hamburg (2012):
Impulsreferat–Anatomie der ligamentären und glenoidalen Strukturen der Schulter
Impulsreferat Anatomie–Bandstrukturen des Hüftgelenkes