

Aus dem Funktionsbereich für Hand- und funktionelle Mikrochirurgie
(Leiter Univ. - Prof. Dr. med. A. Eisenschenk)
der Abteilung für Unfall-, Wiederherstellungschirurgie und Rehabilitativen Medizin
(Direktor Univ.- Prof. Dr. med. Dr. h.c. Axel Ekkernkamp)
der Universitätsmedizin der Universität Greifswald

Thema:

**Langzeitergebnisse nach freier, vaskularisierter Fibulatransplantation
im Unfallkrankenhaus Berlin und in der Universitätsmedizin Greifswald
unter Berücksichtigung MRT-gestützter Diagnostik**

Inaugural - Dissertation

zur

Erlangung des akademischen

Grades

Doktor der Medizin
(Dr. med.)

der

Universitätsmedizin

der

Universität Greifswald

2020

vorgelegt von: Lisa Eckstein
geb. am: 01.01.1994
in: Nürnberg

Dekan:	Prof. Dr. med. Karlhans Endlich
1. Gutachter:	Prof. Dr. med. Andreas Eisenschenk
2. Gutachter:	Prof. Dr. med. Martin Langer
Ort, Raum:	Universitätsmedizin Greifswald, Hauptgebäude, J 02.17
Tag der Disputation:	01.04.2025

GLIEDERUNG

1	EINLEITUNG.....	8
2	KNOCHENTRANSPLANTATION.....	9
	2.1 Allgemeine Indikationsstellung.....	9
	2.2 Knochentransplantatformen.....	10
	2.2.1 Historische Entwicklung.....	10
	2.2.2 Avaskuläre Knochenallografts.....	11
	2.2.3 Knochenautografts.....	12
	2.2.4 Avaskuläre Knochenautografts.....	12
	2.2.5 Vaskularisierte Knochenautografts.....	13
	2.2.6 Zusammenfassung.....	14
	2.3 Freie, vaskularisierte Fibulatransplantate.....	14
	2.3.1 Spezifische Indikationen.....	15
	2.3.2 Spezifische Vorteile, Nachteile und Kontraindikationen.....	15
	2.3.3 Anatomische Grundlagen.....	17
	2.3.4 Operatives Verfahren.....	17
	2.3.5 Mögliche Komplikationen und Prognose.....	27
	2.3.6 Monitoringverfahren.....	28

3	FRAGESTELLUNG.....	29
4	MATERIAL UND METHODEN.....	31
	4.1 Studiendesign.....	31
	4.1.1 Zusammenstellung der Studiengruppe.....	32
	4.1.2 Ablauf der Datenerhebung.....	33
	4.2 Messparameter.....	33
	4.2.1 Fragebögen.....	33
	4.2.1.1 DASH-Score.....	34
	4.2.1.2 SF-36.....	35
	4.2.1.3 MSTS-Enneking-Score.....	38
	4.2.2 Visuelle bzw. numerische Analogskala.....	39
	4.2.3 Messbögen.....	39
	4.2.3.1 Messblatt für obere Gliedmaßen/ untere Gliedmaßen/ Finger.....	40
	4.2.3.2 Rosén- und Lundborg-Score.....	40
	4.2.4 Bildgebende Verfahren.....	43
	4.2.4.1 (Angiographische) Magnetresonanztomographie.....	43
	4.2.4.2 Bone Healing Score (BHS).....	45
	4.2.4.3 Knochenhypertrophieindex nach De Boer & Wood..	46
	4.2.4.4 Modifizierter Weiland-Score nach Höpfner.....	46
	4.3 Statistische Analyse.....	47

5	ERGEBNISSE.....	48
	5.1 Klinische Angaben zur Studiengruppe.....	48
	5.1.1 Geschlechtsverteilung und Demographie.....	48
	5.1.2 Prä- und postoperative Eingriffe nach FVFT.....	49
	5.1.3 Transplantate.....	49
	5.1.3.1 Spender- und Empfängerlokalisierung.....	49
	5.1.3.2 Transplantatlänge, Anastomose- und Osteosyntheseverfahren.....	50
	5.1.4 Prä- und postoperative Gefäßdarstellung.....	51
	5.2 Ergebnisse der subjektiven Patientenzufriedenheit.....	51
	5.3 Ergebnisse der subjektiven muskuloskelettalen Funktionalität	53
	5.4 Ergebnisse der objektiven Funktionsparameter.....	54
	5.4.1 Parameter Motorik.....	55
	5.4.2 Parameter Sensorik.....	55
	5.4.3 Parameter Schmerz.....	56
	5.5 Ergebnisse radiologischer Verfahren.....	56
	5.5.1 Ergebnisse konventioneller radiologischer Verfahren.....	57
	5.5.2 Ergebnisse MRT-bildgebender Verfahren.....	59
	5.6 Ergebnisse in Abhängigkeit postoperativer Komplikationen...	64
	5.6.1 Klinische Angaben zur Komplikationsgruppe K.....	65
	5.6.2 Subjektive Patientenzufriedenheit.....	65
	5.6.3 Subjektive muskuloskelettale Funktionalität.....	67
	5.6.4 Funktionsparameter.....	67

5.6.4.1	Parameter Motorik.....	67
5.6.4.2	Parameter Sensorik.....	69
5.6.4.3	Parameter Schmerz.....	70
5.6.5	Radiologische Verfahren.....	70
5.7	Ergebnisse in Abhängigkeit der Indikationsgruppe.....	73
5.7.1	Klinische Angaben zur Indikationsgruppe I.....	74
5.7.2	Subjektive Patientenzufriedenheit.....	74
5.7.3	Subjektive muskuloskelettale Funktionalität.....	76
5.7.4	Funktionsparameter.....	77
5.7.4.1	Parameter Motorik.....	77
5.7.4.2	Parameter Sensorik.....	78
5.7.4.3	Parameter Schmerz.....	79
5.7.5	Radiologische Verfahren.....	80
6	DISKUSSION.....	83
6.1	Zu diskutierende Fragestellungen.....	83
6.2	Diskussion der klinischen Ergebnisse.....	84
6.2.1	Diskussion der klinischen Angaben zur Studiengruppe.....	86
6.2.2	Diskussion der subjektiven Patientenzufriedenheit.....	88
6.2.3	Diskussion der subjektiven muskuloskelettalen Funktionalität.....	90
6.2.4	Diskussion der objektiven klinischen Funktionsparameter....	91
6.2.4.1	Parameter Motorik.....	91
6.2.4.2	Parameter Sensorik.....	93
6.2.4.3	Parameter Schmerz.....	94

6.3 Diskussion der radiologischen Ergebnisse	94
6.3.1 Stellenwert suffizienter Gefäßstielanastomosen.....	95
6.3.2 Diskussion der Ergebnisse zur Anastomosedurchgängigkeit und zur ossären Integration.....	96
6.3.3 Diskussion der Ergebnisse zur Hypertrophie- und Refrakturnrate.....	99
6.3.4 Diskussion der Ergebnisse zum BHS.....	99
6.3.5 Diskussion der Ergebnisse zum Weiland-Score.....	100
6.3.6 Diskussion des Stellenwerts postoperativer Angio-MRT- Bildgebung.....	102
7 ZUSAMMENFASSUNG.....	105
8 ANHANG.....	107
9 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	124
10 ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	127
11 TABELLENVERZEICHNIS.....	136
12 FORMELVERZEICHNIS.....	139
13 LITERATURVERZEICHNIS.....	140
14 EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG.....	155
15 LEBENS LAUF.....	156
16 DANKSAGUNG.....	158

1 EINLEITUNG

„The transfer of living bone grafts by microvascular techniques has undergone an exciting evolution.“

G. Ian Taylor, 1983

Muskuloskelettale Erkrankungen sind weltweit hauptverantwortlich für chronische Schmerzzustände, physische Funktionseinschränkungen und Beeinträchtigung der Lebensqualität. In der Bundesrepublik Deutschland zählen sie zu den am häufigsten diagnostizierten Erkrankungen, die aufgrund der Therapiemaßnahmen sowie potentieller Berufsunfähigkeit und Frühverrentung hohe volkswirtschaftliche Kosten verursachen [1–3]. Im Jahr 2017 gehörten in Deutschland Knochentransplantationen und –transpositionen mit 85.170 Operationen zu den 50 häufigsten durchgeführten Eingriffen unter vollstationär versorgten Patienten. Sie stellten damit 0,5 % der rund 16,7 Millionen Gesamteingriffe [4]. Dem gegenüber standen im Jahr 2016, laut Anfrage an das statistische Bundesamt, 49.968 Knochentransplantatentnahmen (Bundesland Berlin 2.059).

Die Versorgung langstreckiger Knochendefekte ist mit hohem rekonstruktivem Aufwand verbunden und stellt nach wie vor eine große Herausforderung dar. Die vorliegende Arbeit untersucht das Langzeitergebnis nach freier, vaskularisierter Fibula-Autotransplantation im Hinblick auf mögliche Zusammenhänge zwischen der Art der Indikationsstellung und postoperativen Komplikationen. Ein zweiter Fokus soll auf der Darstellung und Bewertung der Durchgängigkeit der anastomosierten Gefäße und des ossären Transplantates unter Angio-magnetresonanztomographischer Bildgebung mit Kontrastmittel liegen. Der Beleg für die Anwendbarkeit magnetresonanztomographischer Verfahren zur Beurteilung der Vitalität freier, vaskularisierter Fibulatransplantate findet sich u.a. bei SENGEZER et al. (2004) [5].

2 KNOCHENTRANSPLANTATION

2.1 Allgemeine Indikationsstellung

Knochentransplantationen findet allgemein Anwendung in der Behandlung kongenitaler oder erworbener Substanzdefekten im Sinne der Rekonstruktion, Frakturbehandlung, Endoprothetik und Arthrodeese [6,7]. Eine Indikationsstellung besteht bei Patienten mit posttraumatischen, onkologischen ossären segmentalen Defekten oder infektionsbedingtem Substanzverlust mit Notwendigkeit der kavitären Auffüllung. Auch bei Patienten mit erforderlicher Gelenkflächen-Rekonstruktion oder misslungener prothetischer Versorgung sowie bei delayed- bzw. Non-union im Rahmen der Knochenheilung findet das Verfahren Anwendung [8–17]. Als delayed- bzw. Non-union werden Knochenheilungsstörungen bezeichnet, die anhand ihres zeitlichen Auftretens klassifiziert werden. Dabei werden je nach Lokalisation verzögerte Überbauungen zur Kontinuitätswiederherstellung nach 4 bis 6 Monaten post eventum als delayed union definiert, röntgenologisch imponiert ein verbreiteter Frakturspalt. Eine ausbleibende Kontinuitätswiederherstellung nach über 6 bis 8 Monaten mit ausschließlich fibröser Überbauung, Osteolysen und Unruhecallusbildung charakterisiert im Allgemeinen eine Non-union bzw. Pseudarthrose [18,19]. Einschränkend sei hervorgehoben, dass eine zeitliche Klassifikation hier ebenfalls stark von der Lokalisation der bestehenden Knochendiskontinuität abhängig ist. Die Inzidenz einer aseptischen Non-union bei diaphysären Unterarmfrakturen wird in der Literatur zwischen 2 % und 10 % beziffert [20–25].

2.2 Knochentransplantatformen

An den hypothetisch idealen Knochenersatz werden neben einer größtmöglichen Komplikations- und Risikoreduktion der Anspruch auf zellbiologisch günstige Eigenschaften sowie auf eine praktikable klinische Handhabung mit möglichst breitem Variationspektrum gestellt. Dies umfasst den Wunsch nach Abwesenheit möglicher pathogener Nebenwirkungen und insbesondere die immunologische Toleranz im Empfängerorganismus. Hinsichtlich zellbiologischer Aspekte wird ein vollständiger össärer Transplantatein- und umbau, ein osteogenetisches, -induktives und -konduktives Potential auf Knochenbildung und -wachstum und eine biomechanische Belastbarkeit in der Empfängerregion gefordert. Für eine praktikable Handhabung sind eine unkomplizierte Lager- und Bearbeitbarkeit, eine uneingeschränkte Verfügbarkeit und ein möglichst großer Spielraum hinsichtlich Transplantatform und -größe von essentieller Bedeutung [26].

2.2.1 Historische Entwicklung

Das Verfahren der Knochentransplantation reicht mit der Rekonstruktion einer traumatisch bedingten Schädelverletzung unter Verwendung eines Hundeschädelsegments, durchgeführt vom niederländischen Arzt JOB VAN MEEKEREN, zurück auf das Jahr 1668 [27,28]. Anhand knochenphysiologischer Forschungsarbeiten widerlegt BARTH (1895) im Tierexperiment die bis dahin vertretende Lehre OLLIERS (1861), dass in Bezug auf avaskuläre Transplantate die Vitalität eines frisch entnommenen Knochens beim identischen Empfänger oder im Organismus einer gleichen Spezies erhalten bliebe und unter Vaskularisation und Wachstum einheile und prägt den Begriff des schleichenden Ersatzes (creeping substitution) [29,30]. Nahezu zeitgleich zu den Arbeiten mit körperfremden Spenderknochen finden sich in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts Beschreibungen autogener Transplantationen anhand gefäß- und muskelgestielter Techniken zur Tibia- bzw. Femurdefektdeckung [31,32].

Der technische Fortschritt (insbesondere im Feld der OP-Mikroskopie) in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts schafft die Grundlagen die für die mikrovaskuläre Transplantation freier Lappen notwendigen Vergrößerungsmöglichkeiten und die Entwicklung mikrochirurgischen Materials und geeigneter Instrumente [33,34]. Einen „[...] Meilenstein in der Geschichte der plastisch-rekonstruktiven Chirurgie [...]“ legt der Australier TAYLOR (1975) mit der Erstbeschreibung einer erfolgreichen freien, vaskularisierten Fibulatransplantation (FVFT) bei

einem männlichen Jugendlichen im Jahr 1974, nachdem vorangegangene rekonstruktive Therapieversuche gescheitert waren [35]. Definitionsmäßig abzugrenzen von der *Erstbeschreibung* sind mit UEBA und FUJIKAWA (1973) die *Erstdurchführer* einer freien, vaskularisierten Fibulatransplantation, die das Verfahren bei einem 11-jährigen Patienten mit neurofibrombedingtem Ulnateilverlust anwenden, jedoch erst 1983 publizieren [36]. In den Folgejahren finden sich (größere) klinisch-kasuistische Publikationen, zunehmend auch mit technisch-methodischen Weiterentwicklungen sowie im Hinblick auf ein erweitertes Anwendungsspektrum wie beispielsweise onkologischen Patientenkohorten [8,9,11–14,17,37–49].

2.2.2 Avaskuläre Knochenallografts

Allografts als körperfremdes Knochenersatzmaterial können als rein ossäres Interponat oder in osteoartikulärer Form Anwendung finden [67–69]. Konservierungsbedingt ist aufgrund der Osteoblastenapoptose bei avaskulären Knochenallografts keine vom Transplantat ausgehende Osteogenese möglich, jedoch besteht mit der osteoinduktiven und osteokonduktiven Potenz die Möglichkeit zur Knochenapposition und zum schleichenden Transplantatersatz. Aus dem Aufschluss von Proteinen der Knochenmatrix wie BMP (bone morphogenetic protein), insbesondere aus dem Kortex, resultiert eine osteoinduktive Wirkung, die vom Patientenalter sowie von Beschaffenheit, Vorbehandlung sowie Lagerungsdauer des Materials abhängig ist. Darüber hinaus dient das Transplantat als Leitschiene für die Neovaskularisation, wobei insbesondere über die Einwanderung von Osteoprogenitorzellen aus der Spongiosa und deren Differenzierung zu Osteoblasten eine endostale Osteoidbildung ermöglicht wird (osteokonduktive Potenz) [26].

Die Vorteile körperfremder Knochentransplantate bestehen insbesondere im fehlenden Hebedefekt beim Empfänger [50]. Avaskuläre Knochengrafts erfordern dabei einen geringeren operativen Aufwand als freie, vaskularisierte Autografts und reduzieren damit die Risiken unter verlängerten Operationszeiten.

Als nachteilig erweisen sich unter knochenphysiologischen Aspekten in einer langsameren und unvollständigeren creeping substitution sowie aufgrund eines Mangels an adaptivem Hypertrophieverhalten und mechanischer Stabilität bei erhöhten Komplikationsraten [51–54]. Die Neovaskularisation bleibt auf das Periost der angrenzenden Empfängerknochen beschränkt,

sodass von einem unvollständigen Revaskularisationsprozess ausgegangen wird [26,55,56]. Ein weiterer Nachteil besteht in der Unmöglichkeit eines vollständigen Ausschlusses von Infektionsübertragung und dem Hervorrufen lokaler und systemischer Immunantworten beim Empfänger, was die Stimulation einer Knochenbildung weiter beeinträchtigen kann [34,52,57].

2.2.3 Knochenautografts

Autografts als körpereigenes ossäres Rekonstruktionsmaterial können spongiös oder kortikospongiös sowie vaskulär oder avaskulär gehoben werden [34,55]. Allgemein birgt ein spongiöses Transplantat ein höheres osteoinduktives Potential, kortikospongiöse Transplantate finden Anwendung bei erforderlicher höherer mechanischer Stabilität [34,58,59]. Allgemeine Überlegenheit gegenüber Allografts weisen körpereigene Ersatzmaterialien bezüglich ihrer immunologischen Toleranz im Empfängerorganismus sowie einem geringerem Allergie- und Infektionsübertragungsrisiko auf [9,60]. Die Unterschiede hinsichtlich differenzierter Indikationsstellung sowie Vor- und Nachteilen sind durch den Vaskularisationsgrad der Transplantate bedingt und werden im Folgenden dementsprechend dargestellt.

2.2.4 Avaskuläre Knochenautografts

Bei den - historisch bedingt auch als sogenannte konventionelle Transplantate bezeichneten - avaskulären Grafts erfolgt die Verpflanzung ohne den das Knochensegment versorgenden Gefäßstiel. Bei Defektstrecken unter 6 cm sowie einem gut vaskularisierten Transplantatbett, Infektionsfreiheit, adäquater Immobilisation und rigider interner Fixation sowie ausreichend vorhandener Möglichkeit zur Weichteildeckung erachten mehrere Autoren avaskuläre Autografts als die Therapieoption der Wahl [34,55,61,62]. Ähnliche Kriterien finden sich bei weiteren Autoren [55,62]. Nach SCHUIND et al. (1993) werden nicht-vaskularisierte autogene Transplantate in den meisten Fällen eingesetzt [60].

Es konnte jedoch gezeigt werden, dass avaskuläre Autografts den freien, vaskularisierten unter knochenphysiologischen Aspekten (creeping substitution, Revaskularisation und dem Anteil vitaler kortikaler Osteozyten, Knochenhypertrophie) unterlegen sind [46,51,59]. Es besteht ein erhöhtes Risiko für delayed oder Non-union und Ermüdungsfrakturen aufgrund von Infektionen und mechanischer Transplantatschwächung nach 6 – 12 Monaten [34,35,63,64]. Darüber

hinaus können Autografts im Allgemeinen nur in begrenzter Anzahl und Umfang gehoben werden.

Die Vorteile nicht-vaskulärer Autografts liegen in der Immunkompatibilität der Transplantate bei erhaltener aktiver Osteogenese, geringerer Komplikationsrate sowie einer verkürzten Eingriffsdauer bedingt durch den Verzicht auf eine mikrochirurgische Anastomosierung [51,55,60].

2.2.5 Vaskularisierte Knochenautografts

HIERNER et al. (2009) definieren „[...] freie] 'vaskularisierte Knochentransplantate' [...] als Pflänzlinge, welche ihre eigene Blutversorgung mit in das Empfängerlager bringen.“, nach HIRAYAMA et al. (1984) handelt es sich um vitales Knochengewebe unter Erhalt von Osteozyten und –blasten mit Fähigkeit zur früheren Knocheneinheilung [11,65]. MURAMATSU et al. (2014) üben Kritik am Begriff eines „vitalen“ Knochentransplantates, da es auch bei freien, vaskularisierten Grafts zu Zelluntergang kommt [46].

Allgemein wird bei vaskularisierten Autografts eine Unterscheidung zwischen gefäßgestielten, vaskularisierten und freien, vaskularisierten Transplantaten vorgenommen. Handelt es sich bei gestielten Grafts um eine Mobilisation bei erhaltenem Gefäßstiel ohne unterbrochene Blutversorgung zwischen Spender- und Empfängerregion, erfordern freie Transplantate eine Wiederherstellung der Blutzirkulation. Hierbei kommt es zu einer vollständigen Verlagerung von Knochen(anteilen) unter Mitnahme der periostalen bzw. endostalen Blutgefäßversorgung vom Donor- zum Empfängergebiet. Intraoperativ werden die versorgenden Arterien und Venen durchtrennt und in der Empfängerregion neu anastomosiert [34,66].

Resultierend daraus finden sich aufgrund des Knochenvitalitätserhalts bei gestielten bzw. freien, vaskularisierten Transplantaten eine größere Rate erfolgreicher össärer Einheilungen bei verringertem postoperativen Frakturrisiko sowie umfangreicherer postoperativer Hypertrophie gegenüber avaskulären Transplantaten [9,30,34,51,56,61,67–70]. Widersprüchliche Angaben finden sich in der Literatur zum postoperativen Einheilungsprinzip: Für HANKISS und HOLDENRIED (2011) reagiert das Transplantat nach dem Prinzip einer Etagenfraktur- bzw. Osteotomieheilung, was ARATA et al. (1984) ablehnen [62,67].

Hinsichtlich der Indikationsstellung zur Verpflanzung freien, vaskularisierten Knochenmaterials findet das Verfahren aufgrund der Möglichkeit einer kombinierten Knochen-

Weichteildefektdeckung durch freie osteokutane Lappenplastiken ohne aufwändige mehrzeitige Operationen verstärkt klinische Anwendung [34,55,71]. Nach PLIEFKE et al. (2009) handelt es sich dabei bei der freien, vaskularisierten Fibula um das am häufigsten gewählte Transplantat [80].

Postuliert TAYLOR et al. (1975) ein gleiches biologisches Verhalten zwischen thrombosierte vaskularisierten und avaskulären Transplantaten, zeigt HAW et al. (1978) im Tiermodell eine beschleunigte Einheilung und eine größere Anzahl vitaler Osteozyten nach Thrombosierung gegenüber der nicht-vaskularisierten Kontrollgruppe [43,88]. SIEGERT et al. (1987) unterstützen die von BERGGREN et al. (1982) aufgestellte These, dass der den Knochen umgebende Muskelmantel eine Barriere für den Prozess der creeping substitution bei postoperativer Thrombosierung darstellt [79,89].

2.2.6 Zusammenfassung

Für VON GARREL und GOTZEN (1998) gibt es nicht *den* idealen Knochenersatz, auch HIERNER et al. (2009) betonen die Bedeutung verschiedener "[...] sich ergänzende[r] Techniken [...]" [26,65]. Präoperative Fragestellungen zur individuellen Auswahl eines Verfahrens umfassen neben Defektursache, -größe, -typ (partiell bzw. segmental) und – lokalisation auch die biomechanischen Anforderungen im Empfängergebiet, deren Nähe zur Spenderregion, bestehende Vorerkrankungen und Voroperationen, Behandlungsdauer und anatomische Voraussetzungen wie der Zustand von Gelenken, Nerven und Bändern [65,69].

2.3 Freie, vaskularisierte Fibulatransplantate

Die freie, vaskularisierte Fibula stellt für die Rekonstruktion langstreckiger Knochen-(Weichteil-)Defekte an den Extremitäten und dem Schädel skelett das Transplantat der Wahl dar. Sie ist nach Einschätzung vieler Autoren die am häufigsten gewählte Spenderstelle für autogene vaskularisierte Knochengrafts [12,14,34,48,55] und stellt die Hauptstütze der Knochenrekonstruktion dar [39,72–74]. Es existieren verschiedene Modifikationen des Verfahrens im Sinne der Verwendung als „[...] 'double barrel'-, 'twin barrel'-, 'folded'-, 'double strut'-, 'bipedicled vascularized'– und 'osteo[septo]cutane' Fibula [...]" [75–78].

2.3.1 Spezifische Indikationen

Die Indikationsstellungen zur Verwendung freier, vaskularisierter Fibulatransplantate entsprechen im Allgemeinen denen der gestielten vaskularisierten (Auto)transplantate. HANKISS und HOLDENRIED (2011) fassen die Anwendung wie folgt zusammen: traumatisch oder osteomyelitisbedingte Knochendefekte $> 6 - 8$ cm, onkologische Patienten nach Tumorresektion unter Bestrahlung bzw. Chemotherapie, bei adjuvanten Maßnahmen nach Osteosarkomresektion sowie bei Defektstrecken unter $< 4 - 8$ cm bei vorgeschädigtem Weichteillager und gleichzeitigen Gefäß- bzw. kombinierten Radius-Ulnadefekten [62].

ROSE et al. (2005) betrachten die freie, vaskularisierte Fibula insbesondere im Rahmen einer glenohumeralen Arthrodeese bei anspruchsvollen Patienten als indiziert [79]. Ursächlich für Defekte am Oberarm sind vor allem Traumata, in ca. 10 % der Fälle findet sich ein Osteosarkom, selten sind kongenitale Fehlbildungen [80–82] .

Darüber hinaus findet das freie, vaskularisierte Fibulatransplantat Anwendung zur Phallusrekonstruktion, bei aseptischer Hüftkopfnekrose bzw. infizierter Pseudarthrose und bei erforderlichen Längenwachstumserhalt bei pädiatrischen Patienten [5,8,38,83–86]. Laut MALIZOS et al. (2010) ist hierbei die Fibula unter Epiphyseneinschluss am besten zur Rekonstruktion distaler Radiusdefekte geeignet, nach INNOCENTI et al. (1998) ist die Anwendung dabei nur an der oberen Extremität für Rekonstruktionen an proximalem Humerus bzw. distalem Radius möglich [69,87]. Aufgrund der zusätzlich hebbaren Diaphyse in variabler Länge und der anatomisch gut für die obere Extremität geeigneten Form und Durchmesser der Fibula empfehlen INNOCENTI et al. (2005) diese im Vergleich zu Beckenkamm- oder Skapulatransplantaten [86].

2.3.2 Spezifische Vorteile, Nachteile und Kontraindikationen

Ein freies, vaskularisiertes Fibulagraft bietet aufgrund biomechanischer und geometrischer Eigenschaften Vorteile gegenüber Rippen- bzw. Beckenkammtransplantaten. Neben einer vaskularisierungsbedingt um das Zwei- bis Vierfache erhöhten mechanischen Widerstandsfähigkeit, Festigkeit und Elastizität ermöglicht die zylindrische Form bei schlankem Schaft und konstanter Kortikalisstärke eine Einpassbarkeit in die diaphysäre Medulla des Empfängerknöchens. Dabei sind insgesamt weniger rekonstruktive Korrekturen erforderlich als bei massiven Knochenallografts und prädestinieren die Fibula insbesondere für

den ossären Ersatz längerer diaphysärer Defekte an Radius und Ulna [8,39,72–74,88–90]. Auch die Kombination mit Silikonarthroplastik zur Rekonstruktion metakarpaler Läsionen mit Gelenkeinschluss ist im Gegensatz zu Beckenkamm- bzw. Skapulagrafts möglich [91]. Laut BISHOP (2005) weisen die fibulären, freien, vaskularisierten Knochengrafts gegenüber freien, vaskularisierten Beckenkammtransplantaten ein größeres Hypertrophiepotential auf [34].

Bei der Hebung einer freien, vaskularisierten Fibula erweist sich ein vergleichsweise einfacher Zugang zu den Peroneal- bzw. Tibialis-anterior-Gefäßen als mikrochirurgisch anastomosierbaren Gefäßstiel als ein weiterer Verfahrensvorteil. Aufgrund mehrerer myo- bzw. fasziokutaner, von den Peronealgefäßen entspringenden Perforatorästen besteht die Möglichkeit zur Hebung um einen bis zu ca. 10 x 20 cm großen (distalen) Hautlappens, der im Rahmen eines Monitoringverfahrens oder zur Weichteildefektdeckung Verwendung finden kann [16,92]. Osteomuskuläre Grafts basierend auf der Peronealmuskulatur, dem M. flexor hallucis longus oder Anteilen des M. soleus sind ebenso wie eine Transplantatsegmentierung zum Einsatz an multiplen Empfängerstellen möglich [34,61].

Hinsichtlich der Kontraindikationen kann zwischen allgemeinen und gefäßstatusbedingten Aspekten unterschieden werden. Ist ein rekonstruktiver Eingriff aufgrund eines schlechten Allgemeinzustandes des Patienten, ausgedehnter Infektionen über den gesamten Transplantatbereich oder mangelnder Patientenkooperation nicht möglich, können auch insuffiziente Durchblutungsverhältnisse, eine 1-Gefäßversorgung des Beins oder Vorschäden an Spender- bzw. Empfängergefäßen den Eingriff als undurchführbar gestalten [41,93,94]. Das vollständige Fehlen der A. peronea wird mit einer Inzidenz von 0,1 % angegeben, in 0,2 % bis 0,9 % findet sich eine A. peronea magna als die einzige den Fuß versorgende Arterie [95–99]. Variationen, bei denen die genannte Arterie die Hauptblutgefäßversorgung übernimmt, werden mit < 1 % angegeben [96]. Insgesamt erweist sich ein durchgängiger 3-Gefäßabfluss über die A. tibialis anterior und posterior sowie über die A. peronea als ideale Voraussetzung. OXFORD und DUCIC (2005) konnten in einer Studie mit n = 16 Patienten zeigen, dass auch bei 100 %-igem Gefäßverschluss der A. tibialis anterior bzw. posterior als Gefäßstiel und vorliegendem 2-Gefäß-Abfluss eine erfolgreiche Transplantation ohne auftretende Komplikationen möglich ist [94]. In Bezug auf eine präoperativ bestehende Spendergefäßokklusion betrachten SMITH et al. (2003) eine mehr als 50 %-ige Stenosierung an der geplanten Spenderarterie als Kontraindikation für die Entnahme eines freien, vaskularisierten Transplantats [100].

2.3.3 Anatomische Grundlagen

Aufgrund der Hebbbarkeit einer variablen diaphysären Fibulalänge sind je nach Autor Defekte bis maximal 20 – 30 cm Transplantatlänge überbrückbar [12,13,15,16]. Gefäßstiellängen basierend auf der A. peronea sind bis maximal 5 – 8 cm Länge erreichbar [63,93].

2.3.4 Operatives Verfahren

Wählt TAYLOR (1975) im Rahmen der Erstbeschreibung einer freien, vaskularisierten Fibulatransplantation einen dorsalen Zugang ausgehend von der Fossa poplitea, wird heute weithin eine laterale Schnittführung nach GILBERT (1979) empfohlen [14,35,55,93,101]. Auf den aktuell durchgeführten modifizierten lateralen Zugang nach GILBERT zwischen M. soleus und M. peroneus longus soll nun im Folgenden eingegangen werden: Hierbei erfolgt die Lagerung des Patienten in Rückenlage unter Unterschenkel-Innenrotation und Knieflexion, gegebenenfalls unter Zuhilfenahme von Lagerungskeilen. Nach Auswickeln der Extremität und Anlage der Blutsperrre mit 300 mmHg wird die Fibula zwischen Malleolus lateralis und Caput fibulae per Palpation identifiziert und longitudinal in Fünftel unterteilt (siehe Abbildung 1).



Abbildung 1: Planung des Operationsfeldes mit Unterteilung der Fibula in Fünftel (mit freundlicher Unterstützung durch Fr. Dorothea Scheurlen, ukb)

Bei geplantem osteokutanem Transplantat werden die Perforatoren per Doppler-Sonographie dargestellt und eine entsprechende Hautinsel angezeichnet. Der Hautschnitt verläuft anschließend entlang der lateralen Fibulakante bzw. der Hautlappenvorderkante über die mittleren drei Drittel (siehe Abbildung 2).



Abbildung 2: Hautschnitt über die mittleren 3 Fünftel entlang der Hautinselvorderkante (mit freundlicher Unterstützung durch Fr. Dorothea Scheurlen, ukb)



Abbildung 3: Identifikation des Fettstreifens zwischen M. soleus und M. peroneus longus (mit freundlicher Unterstützung durch Fr. Dorothea Scheurlen, ukb)



Abbildung 4: Präparation des Septum intermusculare laterale mit Darstellung der perforierenden Gefäße (Pfeile) der geplanten Hautinsel () (mit freundlicher Unterstützung durch Fr. Dorothea Scheurlen, ukb)*

Dorsal der Sehne des *M. peroneus longus* wird der schmale Fettstreifen identifiziert, der den Eingang zum Septum intermusculare laterale markiert und von dort ausgehend stumpf in die Tiefe bis zur Darstellung des *M. flexor hallucis longus* präpariert (siehe Abbildung 3 und 4).

Durch das Septum oder am Rand des *M. soleus* verlaufende Perforatoren der *A. peronea* werden ligiert, eine Ausnahme stellt die geplante Hebung eines osteomuskulären Lappens basierend auf dem *M. soleus* dar. Der *M. soleus* wird folgend an seinem Ursprung von der Fibula abgetrennt, die Darstellung und Schonung der Peronealgefäße wird durch Verlagerung des *M. flexor hallucis longus* nach dorsal ermöglicht. Orientierungshilfe bietet hierbei der Ursprung des *M. flexor hallucis longus*, unter dem die Peronealgefäße in der Tiefe kreuzen. Alternativ kann die Kontinuität des *M. soleus* zunächst erhalten werden und der Gefäßzugang durch Muskelbauchverlagerung erzielt werden. Es folgt eine vorsichtige Abpräparation der Peronealgefäße von der Fibula. Falls nicht bereits durchgeführt, wird nun der *M. soleus* an seinem Ursprung und in seinem Verlauf von der Fibula abgelöst. Der *N. peroneus* wird in seinem Verlauf um den Fibulahals und die proximale Diaphyse identifiziert, geschont und die laterale Peronealmuskulatur vom Knochen abgetragen. Die Präparation erfolgt dabei proximal subperiostal zur Schonung des benachbart verlaufenden *N. peroneus*, distal kann aufgrund der entfernteren Lage des superfizialen Astes extraperiostal zum Erhalt der meta-epiphysealen Gefäßkommunikation gearbeitet werden.

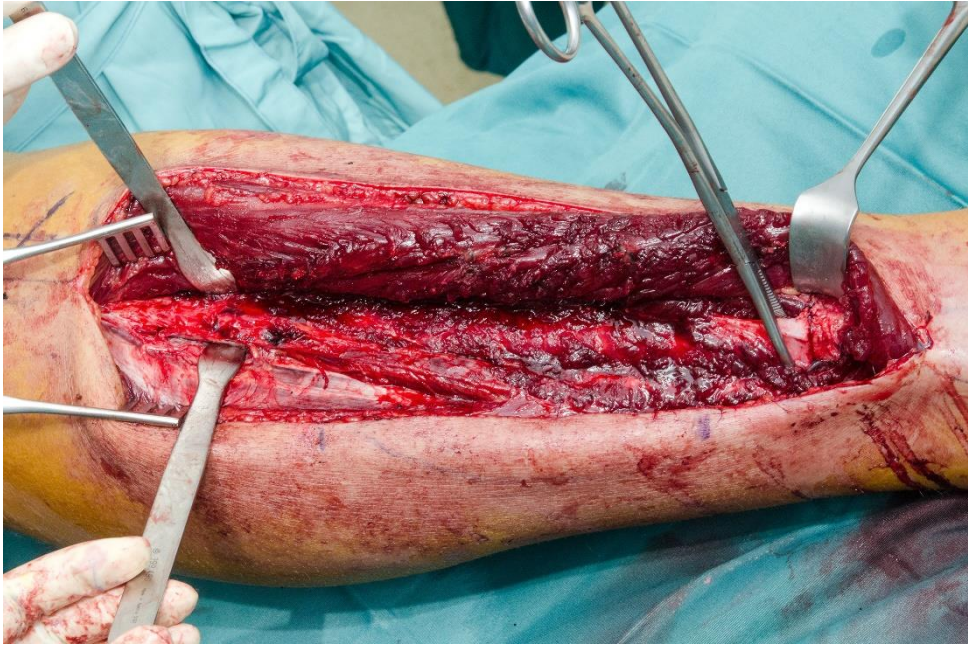


Abbildung 5: Darstellung der Fibula mit muskulärem Mantel (mit freundlicher Unterstützung durch Fr. Dorothea Scheurlen, ukb)

Der Erhalt eines nur schmalen Muskelmantels wird favorisiert, damit bei möglicherweise postoperativ scheiternder Anastomose keine ausgeprägte nekrotische Muskelbarriere für eine Neovaskularisation vorliegt. Die muskuläre Komponente setzt sich dabei aus Anteilen des M. fibularis longus und brevis, des M. extensor digitorum longus und des M. hallucis longus, des M. soleus und des M. flexor hallucis longus zusammen (siehe Abbildung 5).

Nach gleichem Prinzip erfolgt die Hebung des anterioren Kompartiments, wobei dies durch eine früh durchgeführte Osteotomie erleichtert wird. Im nächsten Schritt kann zuerst die Membrana interossea oder die Fibula proximal und distal unter Wahrung eines Abstandes von 7–8 cm zu den angrenzenden Gelenkflächen durchtrennt werden (siehe Abbildung 6). Um eine größere Variationsmöglichkeit an der Empfängerstelle zu gewährleisten, empfiehlt sich laut BISHOP (2005) die Hebung eines Knochengrafts, welches länger als der Substanzdefekt ist, damit der Gefäßstiel länger präperiert werden kann [34].

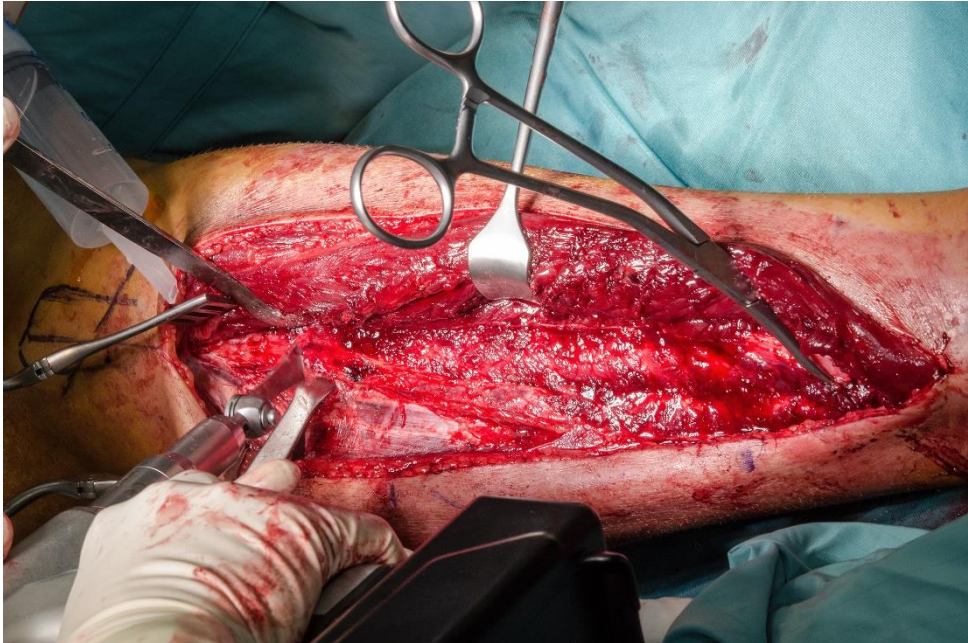


Abbildung 6: Proximale Osteotomie der Fibula mithilfe der oszillierenden Säge (mit freundlicher Unterstützung durch Fr. Dorothea Scheurlen, ukb)

Nach posteriorer Rotation der Fibula und distaler Ligation der A. peronea und Vv. comitantes erfolgt die Präparation in proximale Richtung unter Abtrennung des M. tibialis posterior von der Fibula (siehe Abbildung 7). Mögliche Perforatoren werden ligiert.

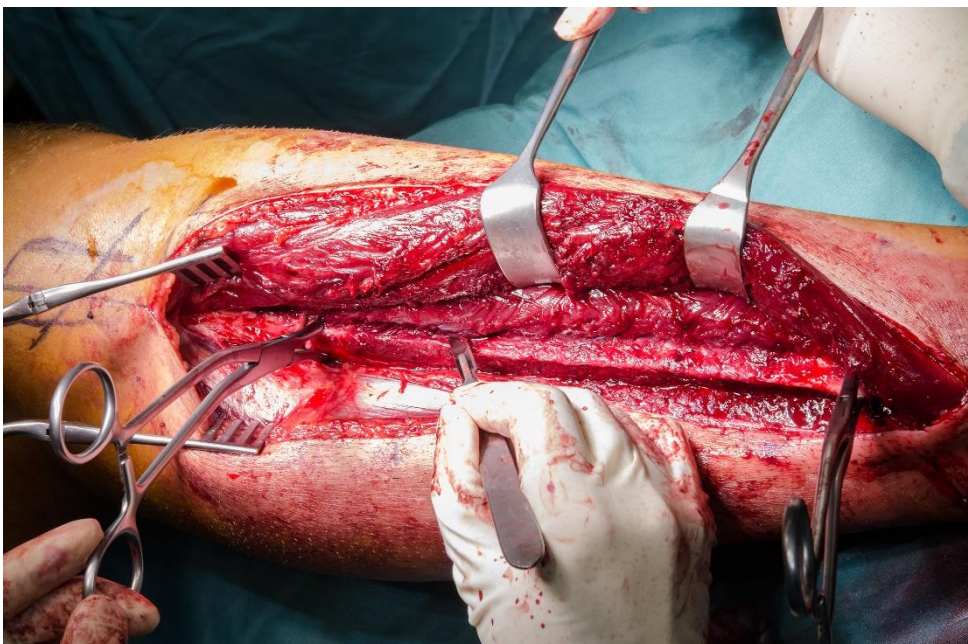


Abbildung 7: Dissektion des M. tibialis posterior unter Außenrotation der Fibula (mit freundlicher Unterstützung durch Fr. Dorothea Scheurlen, ukb)

Die Dissektion des M. flexor hallucis longus wird am Muskelursprung vorgenommen. Durch Öffnung der Blutsperre über mindestens 30 Minuten wird folgend vor der Durchtrennung der Peronealgefäße die größtmögliche Vaskularisation und Erholung des zu transplantierenden Knochenabschnitts erzielt. Die Dissektion der A. peronea wird nach Durchblutungsüberprüfung aus den Osteotomieenden so proximal wie möglich an ihrem Abgang aus der A. tibialis posterior vorgenommen. Es bieten sich Anschlingungen der geklippten arteriellen und venösen Gefäße per Loop an. Es erfolgt die Transplantatmobilisierung und die Spülung des Gefäßstiels mit Heparinlösung (siehe Abbildungen 8 - 10).

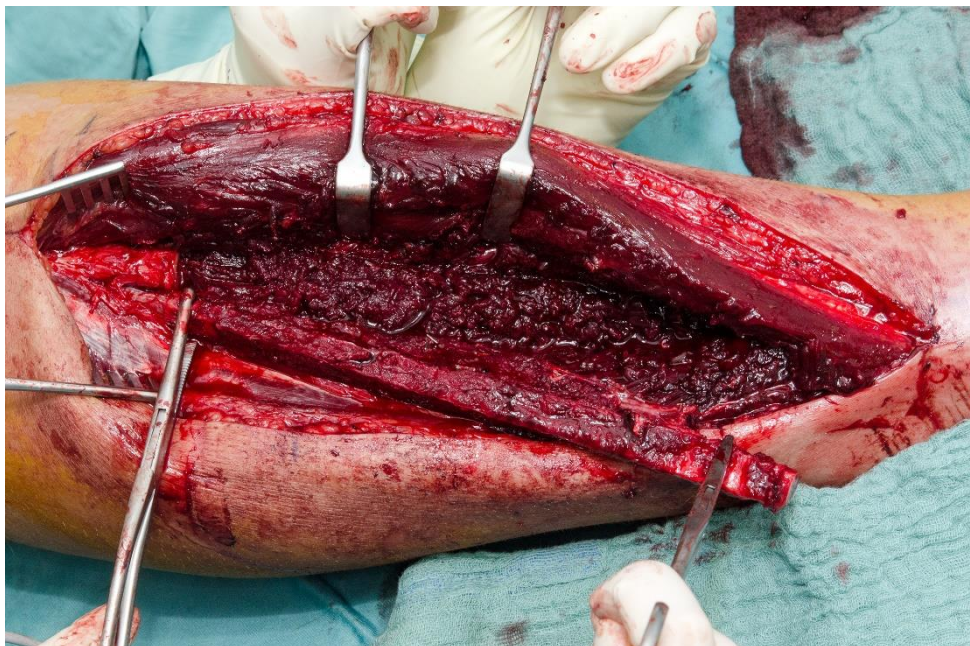


Abbildung 8: Mobilisation der Fibula aus dem Transplantatbett (mit freundlicher Unterstützung durch Fr. Dorothea Scheurle, ukb)



Abbildung 9: Vollständig gehobenes Fibulatransplantat mit dargestelltem peronealen Gefäßstiel (Pfeil) und Hautinsel mit Perforatorgefäßen () (mit freundlicher Unterstützung durch Fr. Dorothea Scheurlen, ukb)*



Abbildung 10: Spülung der Spendergefäße mit Heparinlösung (mit freundlicher Unterstützung durch Fr. Dorothea Scheurlen, ukb)

Die Anlage zweier Drainagen erfolgt intermuskulär zwischen M. soleus und M. flexor hallucis longus sowie subkutan, der abgetrennte M. flexor hallucis longus wird per fortlaufender Naht mit resorbierbarem Material an die Peronealmuskulatur readaptiert. Ein schichtweiser Hautverschluss wird gegebenenfalls unter Hinzunahme eines Spalthauttransplantates durchgeführt (siehe Abbildungen 11).

Das gehobene Knochentransplantat wird in die zeitgleich von einem zweiten Operationsteam präparierte Empfängerregion eingepasst, wobei im Rahmen der mikrochirurgischen Anastomosierung das End-zu-Seit-Prinzip favorisiert wird. Bei Notwendigkeit eines zusätzlichen Venentransplantates empfiehlt sich die Anastomosierung noch vor Implantation an der Empfängerstelle. Zur Torsionsvermeidung sollte das proximale Ende mit der Lappenvene, das distale Ende mit der Vene in Empfängergebiet verbunden werden. Die Orientierungsrichtung der einzubringenden Fibula erweist sich im Normalfall als irrelevant (siehe Abbildung 13). Bei Transplantaten mit zusätzlicher (zumeist aufgrund gut identifizierbarer septo- anstatt muskulokutaner Perforatoren distal gehobener) Hautinsel findet die spätere Orientierung bedingt durch Insel- und Gefäßstiellage bereits bei der intraoperativen Planung Berücksichtigung [93].



Abbildung 11: Hautverschluss unter Spalthauttransplantatverwendung (mit freundlicher Unterstützung durch Fr. Dorothea Scheurlen, ukb)

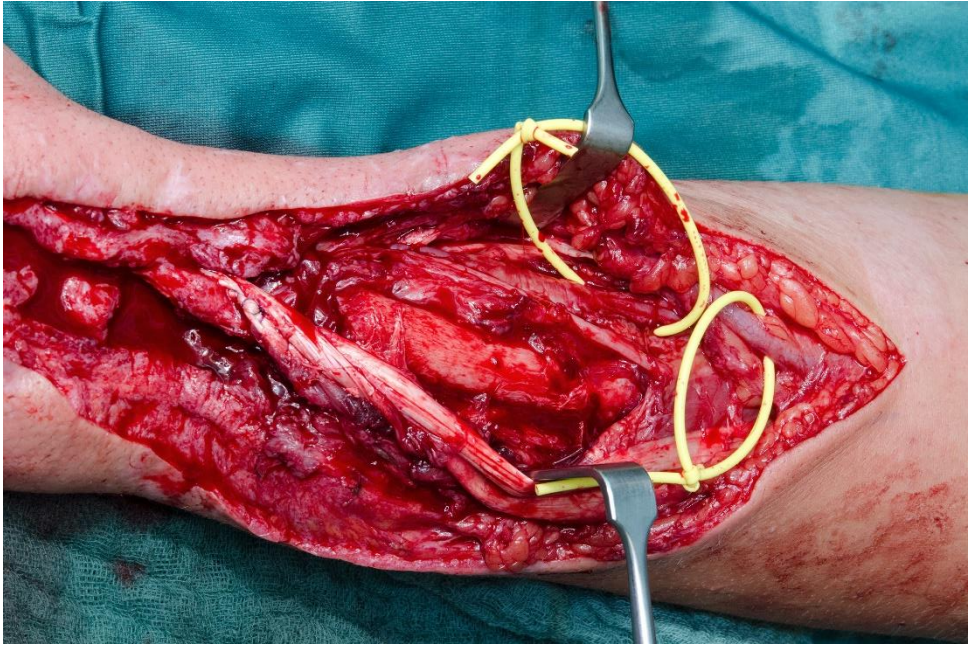


Abbildung 12: Präpariertes Empfängergebiet mit Gefäßanschlingungen per Loops (mit freundlicher Unterstützung durch Fr. Dorothea Scheurlen, ukb)

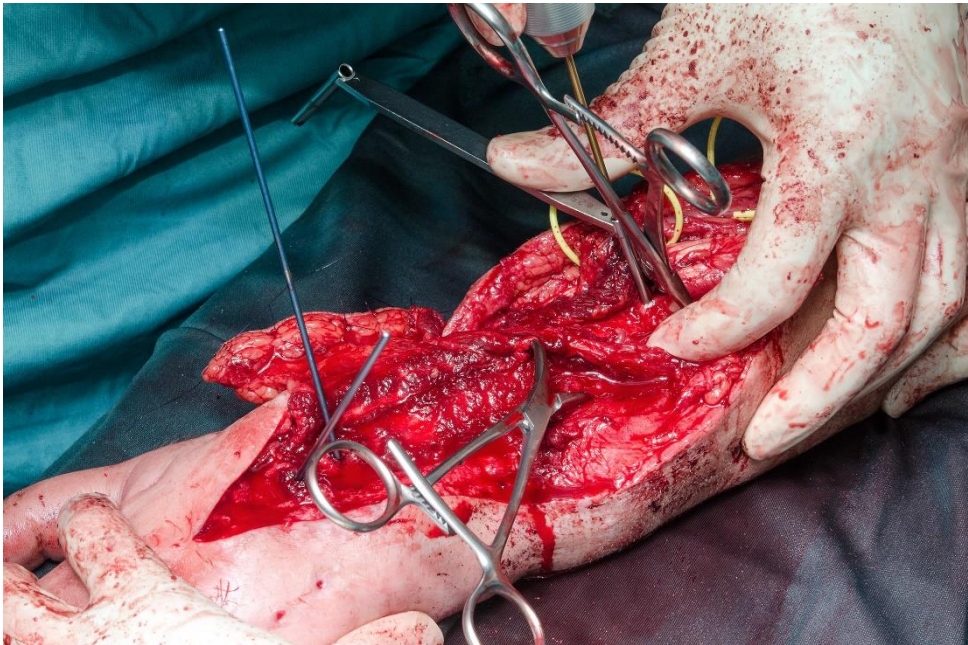


Abbildung 13: Einpassung des Transplantates im Empfängergebiet (mit freundlicher Unterstützung durch Fr. Dorothea Scheurlen, ukb)



Abbildung 14: Intraoperative Drainageeinlage und Hautverschluss (links) sowie 1. postoperativer Tag (rechts) (mit freundlicher Unterstützung durch Fr. Dorothea Scheurlen, ukb)

Die Verwendung von plattenosteosynthetischem Material wird von den meisten Autoren als Mittel der Wahl bevorzugt [12,48,66]. ROSE et al. (2005) können in einer von ihnen durchgeführten Studie an $n = 15$ Patienten eine geringere Frakturinzidenz gegenüber Schraubenosteosynthesen zeigen [79]. HOUDEK et al. (2017) konnten zeigen, dass eine starre Fixation mit einem verringerten Reoperationsrisiko assoziiert ist [12]. Nach HANKISS und HOLDENRIED (2011) bieten interne Verfahren am Oberarm ausreichende Stabilität [62]. Bietet ein Fixateur externe die Vorteile einer verringerten Fragmentverschiebung und verbesserter Einheilungsumgebung, stellen die eingebrachten Pins eine potentielle Eintrittspforte für Infektionen dar [15]. Laut EKKERNKAMP et al. (1988) sind externe Verfahren internen vorzuziehen, da eine zusätzliche Durchblutungsminde rung des Knochens verhindert wird [102].

2.3.5 Mögliche Komplikationen und Prognose

Die primären Einheilungsraten nach freier, vaskularisierter Fibulatransplantation schwanken je nach Literaturangabe zwischen 57 % und 89 % [12,13,15,37,59,70,79]. Laut BISHOP (2005) muss für Rekonstruktionen am Unterarm der Anteil erfolgreich eingeeilter Transplantate mit bis zu 100 % angenommen werden, Schulter- und Klavikularekonstruktionen sind mit schlechten Ergebnissen behaftet, wobei sich insgesamt eine Einheilungsrate von primär 71,4 % für die obere Extremität ergibt [34]. Die Knocheneinheilungszeit für Transplantate am Unterarm liegen nach TAYLOR (1983) bei rund 6 bis 12 Wochen [71]. Laut HAN et al. (1992) profitieren Patienten bei unzureichender klinischer Konsolidierung nach der Erstoperation möglicherweise von einem Sekundäreingriff, wobei typischerweise eine Spongiosaplastik aus dem Beckenkamm Anwendung findet [70]. BISHOP (2005) sieht signifikante Prognoseunterschiede in Abhängigkeit von der Indikationsstellung. Der Autor gibt bei n = 160 untersuchten Transplantaten eine primäre Einheilungsrate von 49 %, sekundär nach Spongiosaanlagerung von 77 % bei Patienten mit Infektionsanamnese an, bei zugrundeliegenden traumatischen oder tumorbedingten Ursachen sowie kongenitalen Anomalien liegen die Raten bei 69 % bzw. 84 % [34]. EISENSCHENK et al. (1998) können eine höhere ossäre Integrationsrate bei Tumorpatienten gegenüber der Trauma- bzw. Tibiapseudarthrosengruppe feststellen [66].

In der Spenderregion finden sich vielen Autoren zufolge eher geringe Morbiditätsraten, wobei Komplikationen meist zeitlich begrenzt auftreten [70,93,103]. Am häufigsten genannt werden Hämatome, Wundheilungsstörungen und tiefe Infektionen [65]. Darüber hinaus können Stressfrakturen der ipsilateralen Tibia, Kontrakturen des M. flexor hallucis longus (4 - 12 %), vorübergehende Schwächungen des M. peroneus (4 - 10 %) sowie ein Kompartmentsyndrom auftreten [10,12,48,65,70,79]. Möglich sind des Weiteren chronische Schmerzen, Spalthauttransplantatverlust und Instabilitäten bzw. Frakturen im oberen Sprunggelenk, ein Spalthauttransplantatverlust sowie chronische Schmerzen, bei denen auch ein später Symptombeginn möglich ist [34,104,105]. Für die Empfängerregionen findet sich ein verhältnismäßig höherer Anteil postoperativer Komplikationen. Die Literaturangaben schwanken hierzu entsprechend eigener Recherche zwischen 0 % und 40 % [12,13,34,41,61,65,66,93]. Dabei sind insbesondere Thrombosen, Infektionen, unzureichender Wundverschluss, Hämatome, (in)kompletter Hautinsellverlust, unzureichende knöcherne Einheilung, Transplantatverlust und postoperative Frakturen zu berücksichtigen [9,48]. Hierbei findet sich der Frakturverlauf seltener an den Osteotomieenden, jedoch häufig innerhalb des

Transplantates [67]. HIERNER et al. (2009) bezeichnen die Ermüdungsfraktur als einen „Mechanismus der Transplantathypertrophie“, da aufgrund des Frakturheilungsprozesses der Knochendurchmesser zunimmt und entsprechend TAYLOR (1983) die ossäre Integration beschleunigt wird [65,71]. Aufgrund mangelnder Innervation des Knochengrafts verläuft ein großer Teil der Ereignisse dabei klinisch stumm [106]. Pseudarthrosen treten mit einer Häufigkeit von 0 % bis 26 % im Literaturvergleich auf [44,87,107,108]. Weitere mögliche Komplikationen im Empfängergebiet sind Infektionen, Weichteilschwellungen, Gefäß-Nerven-Verletzungen, Materiallockerungen sowie Rotations- und Achsenfehlstellungen [41].

2.3.6 Monitoringverfahren

Die Bedeutung des Monitorings liegt in der möglichst frühzeitigen Erkennung eingeschränkter oder vollständig unterbundener Blutversorgung nach erfolgter mikrochirurgischer Anastomosierung, wodurch Nekrosen, Knochenresorption, eine mangelhafte knöcherne Einheilung oder ein vollständiger Transplantatverlust verhindert werden können [109]. Zentrale Kriterien für eine erfolgreiche Transplantation freier, vaskularisierter Knochentransplantate sind hierbei die Perfusion sowie die Oxygenierung [110]. Eine Früherkennung pathologischer Verschlechterungen der genannten Parameter kann in mehr als 70 % der Fälle die Entwicklung von einem primär vaskularisierten hin zu einem sekundär avaskulären Transplantat verhindern [111,112]. Dabei kommt einer engmaschigen postoperativen Vitalitätskontrolle im klinischen Alltag eine große Bedeutung zu [113,114]. PLIEFKE et al. (2009) betrachten hierbei die ersten 72 Stunden nach dem Eingriff als kritische Phase [109]. Zur Auswahl stehen hierbei zum einen klinische Parameter wie Hautkolorit, -turgor, -temperatur sowie die Rekapillarierungszeit und die Beurteilung einer einstichbedingten Blutung aus dem kutanen Transplantatanteil, wobei die Subjektivität hinsichtlich der Befundinterpretation kritisiert wird [14,110].

Als intermittierende Verfahren stehen zum anderen die Magnetresonanztomographie, die Angiographie, die Dopplersonographie und konventionelle radiographische Methoden wie die Szintigraphie mit Tc-99m zur Verfügung. Zu berücksichtigen ist, dass bei intermittierenden Systemen die Diagnostik einer akuten Gefäßstielthrombosierung nicht möglich ist [50]. Die meisten Autoren empfehlen die Verwendung eines Monitorhautlappens („buoy flap“) als ein kontinuierliches Verfahren [34]. Einschränkend sei angeführt, dass ein vitaler Hautlappen nicht zwangsweise auf ein vitales Transplantat rückschließen lässt [115].

3 FRAGESTELLUNG

Zusammenfassend finden bisher in den zahlreich zum Outcome freier, vaskularisierter Fibulatransplantate publizierten (Langzeit-)Studien die Kriterien der primären bzw. sekundären Einheilungsrate, der durchschnittliche Zeitraum für eine ossäre Integration und Knochenhypertrophie sowie die Häufigkeit notwendiger reoperativer Eingriffe bzw. eingriffsbezogener Komplikationen Anwendung. Darüber hinaus werden verschiedene Einflussfaktoren auf das postoperative Ergebnis beleuchtet. Eine Vielzahl von Arbeitsgruppen befassen sich bislang mit der präoperativen Gefäßdarstellung im Spendergebiet und dem postoperativen Monitoring der mikrochirurgischen Gefäßanastomose. Es finden sich in der Literatur hingegen keine Studien, die das Ausmaß der postoperativen Gefäßstieldurchgängigkeit bezogen auf die Transplantatvitalität quantitativ beleuchten und auf mögliche Zusammenhänge in Bezug auf (Langzeit-)Komplikationen untersuchen. Die Magnetresonanztomographie nimmt dabei bislang trotz der Strahlenbelastungsfreiheit und dem Vorteil der Schnittbilddarstellung anhand von Kontrastierung gegenüber der Röntgenbildgebung nur einen untergeordneten Stellenwert ein [116].

In der vorliegenden Arbeit soll für freie, vaskularisierte Fibulatransplantate mit dem Empfängergebiet an der oberen Extremität neben dem allgemeinen Outcome (Funktionalität und Patientenzufriedenheit) ermittelt werden, inwiefern sich die Knocheneinheilung anhand radiologischer Verfahren beurteilen lässt. Darüber hinaus soll untersucht werden, ob mittels minimalinvasiver MR-Angiographie unter Kontrastmittelverwendung die Gefäßstieldurchgängigkeit quantifiziert sowie der damit verbundene Vaskularisierungsgrad des Transplantates im Langzeitergebnis erhoben werden kann. In diesem Zusammenhang soll im Rahmen der vorliegenden Follow-up-Studie der Vaskularisierungsgrad auf mögliche Zusammenhänge hinsichtlich des Knocheneinheilungsverhaltens und der Komplikationsinzidenz untersucht werden.

Daraus ergeben sich folgende Zielfragestellungen:

1. Wie stellt sich das Outcome nach stattgehabter freier, vaskularisierter Fibulatransplantation an der oberen Extremität im Langzeitergebnis dar unter Berücksichtigung

- der Funktionalität im Spender- und Empfängergebiet und der angrenzenden Gelenke,
- der subjektiven postoperativen Zufriedenheit und
- des radiologischen Ergebnisses zum Untersuchungszeitpunkt?

2. Lässt sich anhand einer (Angio-)MRT-Untersuchung mit Kontrastmittel die Hypertrophieform (periostal bzw. endostal) beurteilen?

3. Lassen sich anhand einer (Angio-)MRT-Untersuchung mit Kontrastmittel zur Darstellung und Beurteilung der anastomosierten Gefäßstiele Rückschlüsse auf die Vitalität des Knochentransplantates und Spätkomplikationen wie Transplantatfraktur, persistierende Osteomyelitis oder Pseudarthrose ziehen?

4 MATERIAL UND METHODEN

4.1 Studiendesign

Die vorliegende Arbeit stellt eine Follow-up-Studie mit Patienten dar, die im Zeitraum vom 21.03.2002 bis 07.09.2018 am Unfallkrankenhaus Berlin in der Abteilung für Hand-, Replantations- und Mikrochirurgie und in der Universitätsmedizin Greifswald in der Abteilung für Hand- und funktionelle Mikrochirurgie (Klinik und Poliklinik für Unfall-, Wiederherstellungschirurgie und Rehabilitative Medizin) eine freie, vaskularisierte Fibulatransplantat-Operation erhalten haben. Ein positives Votum wurde von der Ethikkommission der Universitätsmedizin Greifswald erteilt (BB 119/18).

Folgende Ein- und Ausschlusskriterien wurden festgelegt:

1. Einschlusskriterien:

- Operationszeitpunkt FVFT ab 01.01.2002.
- Empfängerlokalisierung an der oberen Extremität.
- Patientenalter zum Untersuchungszeitpunkt \geq 18 Jahre.

2. Ausschlusskriterien:

- Operationszeitpunkt FVFT vor dem 01.01.2002.
- Empfängerlokalisierung im Mund-Kiefer-Gesichtsbereich bzw. unteren Extremität.

4.1.1 Zusammenstellung der Studiengruppe

Im Zeitraum vom 01.06.2018 bis 06.09.2018 wurden $n = 25$ Patienten klinikübergreifend in die Studie eingeschlossen.

Eine Teilnahme wurde von $n = 3$ Patienten aus der ursprünglich ermittelten Patientengruppe abgelehnt (drop-out). Bei $n = 7$ weiteren Patienten konnte weder telefonisch noch wiederholt schriftlich eine Kontaktaufnahme nach Adressermittlung über die jeweils zuständige Melderegisterbehörde erzielt werden. Diese konnten daher nicht in die Studie miteinbezogen werden (lost to follow-up). Ein weiterer Patient $n = 1$ wurde von der Studienleitung aufgrund mangelnder Sprachkenntnisse ausgeschlossen (investigator-caused discontinuation).

Die Gesamtstudiengruppe beläuft sich somit auf $n = 14$ Patienten (56 %), die in die Datenanalyse miteinbezogen werden können (siehe Abbildung 15).

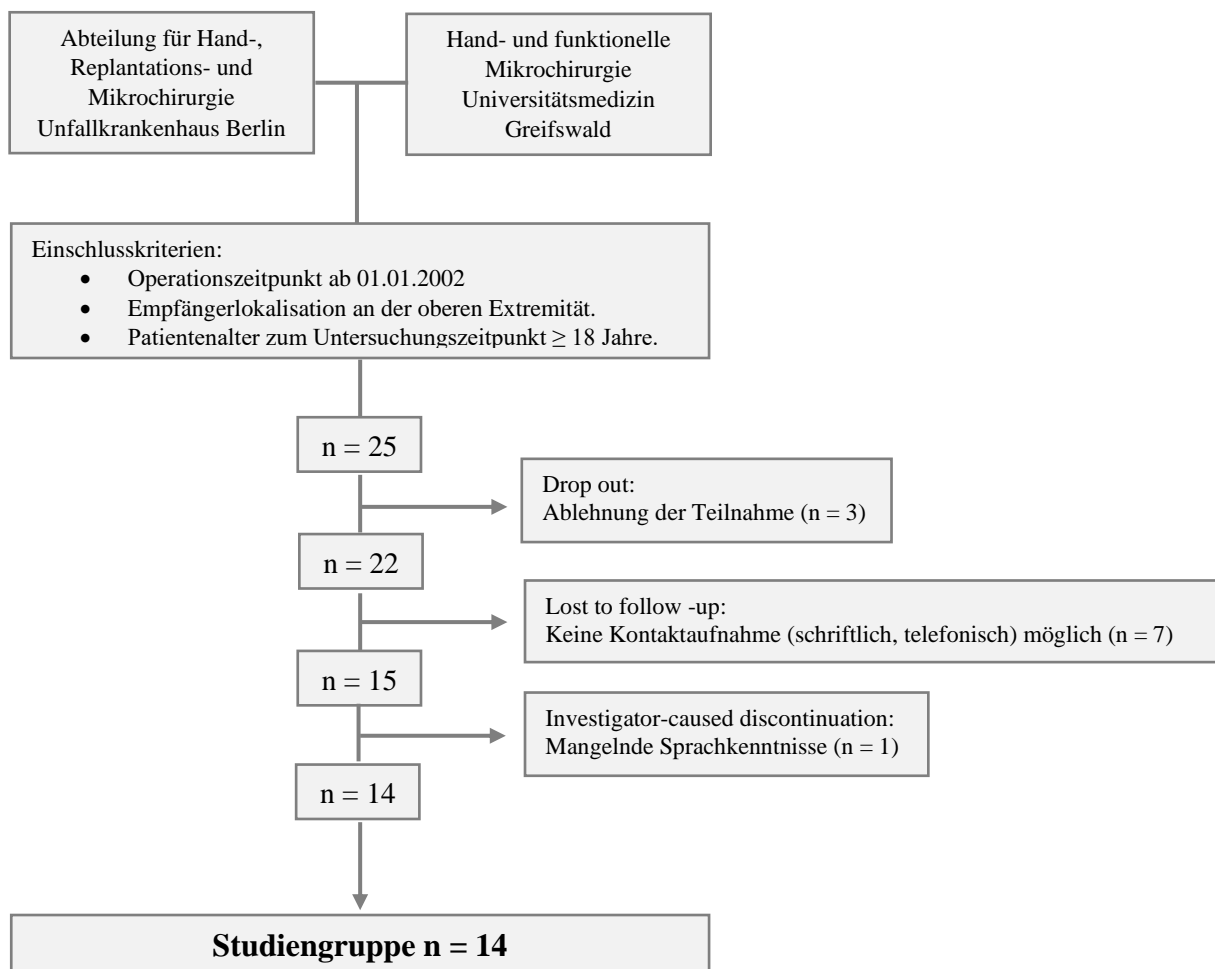


Abbildung 15: Flussdiagramm zur Zusammensetzung der Studiengruppe, $n =$ Patientenzahl

4.1.2 Ablauf der Datenerhebung

Nach Erfassung und Auswertung der Patientenakten anhand von Operationsberichten, Röntgenbefunden, Arztbriefen, berufsgenossenschaftlichen Zwischenberichten und Zusatzgutachten sowie psychotraumatischen Konsilen erfolgte eine telefonische Kontaktaufnahme. Patienten, zu denen kein Kontaktaufbau auf diesem Weg möglich war (Unerreichbarkeit, ungültige Telefonnummer) wurden schriftlich über Ziel und Inhalt der Studie informiert und um schriftliche Rückmeldung gebeten. Es folgte eine postalische Erinnerung an die schriftliche oder telefonisch Rückmeldung an n = 8 Patienten, über die bis zum 22.10.2018 keine Information vorlag.

Die Datenerhebung im Rahmen der klinischen Nachuntersuchung erfolgte im Zeitraum vom 16.08.2018 bis 10.12.2018. Für jeden Patienten wurde ein Termin vereinbart, der sämtliche Erhebungsbestandteile (klinische Anamnese, DASH-Score, SF-36, visuelle bzw. numerische Analogskala, Messblatt für obere Gliedmaßen/ untere Gliedmaßen/ Finger, Rosén- und Lundborg-Score, MSTS-Enneking-Score und die röntgenologische und MR-angiographische Bildgebung mit ringförmigen, makrozyklischen Kontrastmittel) miteinschloss. Die Datenerhebung erfolgte ausnahmslos durch die Doktorandin selbst in Zusammenarbeit mit dem Institut für Radiologie und Neuroradiologie am Unfallkrankenhaus Berlin.

4.2 Messparameter

Die Datenerhebung erfolgte anhand von Frage- und Messbögen sowie einer ausführlichen Patientenanamnese. Dabei wurden sowohl funktionale als auch psychosoziale Aspekte im Hinblick auf das Outcome berücksichtigt. Ergänzend erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Institut für Radiologie und Neuroradiologie am Unfallkrankenhaus Berlin eine radiologische Beurteilung der freien, vaskularisierten Fibulagrafts im Hinblick auf die ossäre Integration, das Hypertrophieverhalten und die Anastomosedurchgängigkeit.

4.2.1 Fragebögen

Zur Erhebung der subjektiven Einschätzung möglicher eingriffsspezifischer Einschränkungen fanden der DASH-Score, der MSTS-Enneking-Score sowie der SF-36 in der jeweiligen deutschen Version zum eigenständigen Ausfüllen Anwendung.

4.2.1.1 DASH-Score

Der 1996 durch die American Academy of Orthopedic Surgeons (AAOS) in Zusammenarbeit mit dem Council of Musculoskeletal Speciality Societies (COMSS) und dem Institute for Work and Health in Toronto entwickelte Disabilities of the Arm, Shoulder and Hand (DASH) - Fragebogen wurde für die klinische Erfassung der muskuloskelettalen Funktionalität an der oberen Extremität entwickelt [117,118]. Aufgrund der Betrachtung der oberen Extremität als funktionelle Einheit ermöglicht der Fragebogen die Anwendung und den Vergleich bei hinsichtlich der Diagnose inhomogenen Patientengruppen [117]. Die ursprünglich englischsprachige Version wurde verschiedenen Reliabilitäts- und Validitätsstudien unterzogen und in Bezug auf die Testgütekriterien, Verständlichkeit und interkulturelle Vergleichbarkeit validiert [117,119–126].

Der zur selbstständigen Beantwortung konzipierte Fragebogen umfasst ein Basis- sowie ein optionales Modul mit insgesamt 38 symptom- und einschränkungsbezogenen Items. Jedes Item kann dabei mit einem Punktwert zwischen 1 und 5 beantwortet werden. Das Basismodul bestehend aus 30 Items gliedert sich in 21 Items mit Fragen zur Bewältigung körperlicher Anforderungen innerhalb der letzten Woche, 5 Items bezüglich der quantitativen Schmerzsymptomatik in Ruhe bzw. unter Belastung und der Schmerzqualität sowie 4 Items zum Einfluss der Einschränkung auf soziale Aktivitäten, Berufstätigkeit, Schlaf und Selbstbild. Das optionale Modul mit insgesamt 8 Items gliedert sich in 2 Untermodule (Sport und Musik bzw. Arbeit und Beruf) mit jeweils 4 Items. Es dient der Erfassung bei Patienten mit berufsbedingten bzw. sportlich-künstlerischen hohen funktionellen Anspruch, der anhand des Basismoduls nicht abgedeckt wird [117,127,128].

Hinsichtlich der Auswertung werden die Punkte aller Items des Basismoduls mit einem maximalen Rohwert von 150 Punkten und einem minimalen Rohwert von 30 Punkten addiert. Der Streubereich liegt bei 120 Punkten. Es wird das arithmetische Mittel gebildet, wobei ein Wert zwischen 1 und 5 vom Patienten definiert werden muss. Insgesamt ist zu beachten, dass mindestens 90 % der Fragen (entspricht 27 von 30 Fragen) beantwortet werden müssen. Bei weniger als 10 % nicht-beantworteter Fragen darf das arithmetische Mittel aus allen beantworteten Fragen für den fehlenden bzw. die fehlenden Werte (maximal 3 Items) herangezogen werden [129]. Zur besseren Vergleichbarkeit kann das Ergebnis auf eine lineare Skala zwischen 0 und 100 umgerechnet werden (siehe Formel 1 bzw. 2) [129].

$$\frac{\text{erzielter Rohwert} - 30 \text{ Minimalpunkte}}{1,2} = \text{Basis} - \text{DASH} - \text{Score (0 - 100)}$$

Formel 1: Transformierung des Basis-DASH-Scores auf eine lineare Skalierung zwischen 0 und 100

Der erzielte Wert verhält sich proportional zum Einschränkungsausmaß d.h. ein Ergebnis von 0 bilden eine sehr gute Funktionalität, ein Ergebnis von 100 eine sehr hohe Einschränkung ab [129]. Die Auswertung des optionalen Moduls erfolgt nach dem gleichen Prinzip, wobei im jeweiligen auszuwertenden Modul 100 % der Fragen beantwortet werden müssen. Aus jedem Untermodul wird ein Rohwert durch Addition der Antwortpunkte gebildet, wobei ein maximaler Rohwert von 20, ein minimaler von 4 Punkten bei einer Streubreite von 16 Punkten erzielt werden kann. Die Umrechnung des Rohwerts erfolgt anhand Formel 2 [129].

$$\frac{\text{erzielter Rohwert} - 4 \text{ Minimalpunkte}}{0,16} = \text{DASH Arbeit bzw. DASH Sport (0 - 100)}$$

Formel 2: Transformierung des DASH-Scores Arbeit bzw. Sport auf eine lineare Skalierung zwischen 0 und 100

Ein Ergebnis von 0 bildet eine gute Funktionalität, ein Ergebnis von 100 eine sehr hohe Einschränkung ab [129].

GUMMESSON et al. (2003) können in einer Längsschnittstudie mit n = 109 Patienten zeigen, dass anhand des DASH-Score sowohl geringfügige als auch starke Veränderungen der Beeinträchtigung im zeitlichen Verlauf erfasst werden können. Die Autoren definieren dabei eine Differenz des Rohsummenwerts um 10 Punkte als minimale Funktionalitätsveränderung [117].

4.2.1.2 SF-36

Der SF-36-Fragebogen (Short Form 36 Outcome Measurement) stellt laut ELLERT et al. (2004) und LAUCIS et al. (2015) das international gebräuchlichste Messinstrument zur Erfassung der Lebensqualität dar [130,131]. Die World Health Organization (WHO) definiert diese 1977 wie folgt:

„Lebensqualität ist die subjektive Wahrnehmung einer Person über ihre Stellung im Leben in Relation zur Kultur und den Wertesystemen, in denen sie lebt und in Bezug auf ihre Ziele, Erwartungen, Standards und Anliegen. Es handelt sich um ein breites Konzept, das in komplexer Weise beeinflusst wird durch die körperliche Gesundheit einer Person, den psychischen Zustand, die sozialen Beziehungen, die persönlichen Überzeugungen und ihre Stellung zu den hervorstechenden Eigenschaften der Umwelt.“[132].

Der empirisch basierte SF-36-Fragebogen wurde als verkürzter Selbstbeurteilungsfragebogen aus dem 149 Items umfassenden Functioning and Well-Being Profile im Rahmen der randomisierten Health Insurance Study in den USA entwickelt [131,133,134]. Die Publikation erfolgte durch WARE und SHERBOURNE (1992) in Zusammenarbeit mit der RAND Corporation. Es folgten zahlreiche Modifikationen des ursprünglichen Manuals, woraus u.a. die beiden gängigen SF-36-Fragebögen hervorgingen: der RAND-36 und der WARE-36. Beide Versionen umfassen identische Items und Antwortmöglichkeiten bei leicht unterschiedlicher Auswertung, wobei der RAND-36 etwas höhere Score-Ergebnisse erzielt. Laut der MOS-Längsschnittstudie führt dies zu keinen bedeutsamen Unterschieden hinsichtlich der Lebensqualitätseinschätzung [131].

Der Vorteil des SF-36-Fragebogens liegt neben seiner Kürze (Beantwortungsdauer rund 15 Minuten) und Verständlichkeit in der vielseitigen krankheitsübergreifenden Einsetzbarkeit bei Patienten ab 14 Jahren unabhängig vom aktuellen Gesundheitszustand. Er kann sowohl zum Patientenscreening als auch zur Differenzierung unterschiedlicher therapeutischer Methoden im Hinblick auf das Outcome und zum Vergleich individueller Krankheitsbelastung herangezogen werden. Die Reliabilität und die Konstruktvalidität sind belegt [130,131,133,134]. Das Messinstrument besteht aus 36 Items, die in die 8 häufigsten durch Krankheit und Therapie beeinflussten Gesundheitsdimensionen zusammengefasst werden. Im Sinne eines bidimensionalen Prinzips werden jeweils 4 Dimensionen mit unterschiedlicher im Manual festgelegter Gewichtung zur Erhebung eines physischen und psychischen Summenscores herangezogen [131,133]. Der Summenscore der physischen Gesundheit setzt sich zusammen aus der körperlichen Funktionsfähigkeit, der körperlichen Rollenfunktion, körperlichen Schmerzen und dem allgemeinen Gesundheitszustand. Die psychische Gesundheit ergibt sich aus den Kriterien Vitalität, soziale Funktionsfähigkeit, emotionale Rollenfunktion und psychisches Wohlbefinden.

Eine zusätzliche Frage (Item-Nummer 2) befasst sich mit dem aktuellen Gesundheitszustand im Vergleich mit dem Zustand im vorangegangenen Jahr und fließt in keine der Dimensionen ein.

Die Beantwortung erfolgt dichotom (ja-nein-Antwortmöglichkeiten) bzw. anhand einer Likertskala mit Abstufungen zwischen 1 und 3 bzw. 4 bzw. 6. Die Auswertung erfolgt manuell oder per Software anhand des zugehörigen Manuals. Trotz leichter nationaler populationsbezogener Gewichtungsunterschiede der Dimensionen werden zur Gewährleistung der internationalen Vergleichbarkeit und Anwendbarkeit auch in Staaten ohne vorhandene landesspezifische Datenlage die US-amerikanische Gewichtung zugrunde gelegt [130].

ELLERT et al. (2004) konnte zeigen, dass die von der Arbeitsgruppe für das bundesdeutsche Gebiet gebildeten Gewichte mit den amerikanischen vergleichbar sind [130].

Die weitere Auswertung erfolgt anhand des zugehörigen Testmanuals. Es erfolgt eine Umkodierung der Antworten anhand von Beibehaltung, Umpolung und Rekalibrierung. Fließt bei der Beibehaltung der ursprüngliche Fragebogenwert unverändert in die Berechnung ein, werden im Rahmen der Umpolung beispielsweise ein Wert von 5 auf einer fünfstufigen Likertskala zu einer 1 transformiert, ein Wert von 4 zu einer 2 usw.. Einige Items erfordern eine Rekalibrierung, die entsprechend der Handweisung individuell für die betreffende Frage durchgeführt wird. Zur Bildung der Summenscores schließt sich ein Auswertungsalgorithmus in drei Schritten an. Hierbei werden anhand der Medianwerte der Gesundheitsdimension und den US-amerikanischen Normwerten sowie der zugehörigen Standardabweichung z-Werte (siehe Formel 3) gebildet. Ein positiver z-Wert ist als eine über dem Populationsnormwert liegende, ein negativer z-Wert als eine unter dem Normwert liegende Lebensqualität zu interpretieren.

$$\frac{\text{Median Studienpopulation} - \text{Median amerikanische Normpopulation}}{\text{Standardabweichung der amerikanischen Normpopulation}} = z - \text{Wert}$$

Formel 3: Berechnung des z-Wertes des SF-36

Die einzelnen z-Scores werden mit der entsprechenden Gewichtung aus dem Handbuch multipliziert und die Produkte der Dimensionen körperliche Funktionsfähigkeit, körperliche Rollenfunktion, körperliche Schmerzen und allgemeiner Gesundheitszustand zum Summenscore der physischen Lebensqualität addiert. Nach gleichem Prinzip erfolgt die

Erhebung des Summenscores der psychischen Lebensqualität durch Addition der gewichteten z-Scores für Vitalität, soziale Funktionsfähigkeit, emotionale Rollenfunktion und psychisches Wohlbefinden. Die Transformation auf eine lineare Skalierung zwischen 0 und 100 wird durch anschließende Multiplikation mit dem Faktor 10 und Addition von 50 erzielt. Die Ergebnisse verhalten sich proportional, ein Wert von 100 stellt somit eine maximale, ein Wert von 0 eine minimale Lebensqualität dar. Die Beurteilung erfolgt anhand standardisierter Normwerte, die dem Manual zu entnehmen sind.

Zu beachten ist laut LAUCIS et al. (2015), dass eine niedrigere Punktzahl im physischen Summenscore eine entsprechend höhere Punktzahl im psychischen Summenscore bedingt. Insbesondere bei orthopädischen Patienten mit häufig umfassenden körperlichen Einschränkungen sollte dies laut den Autoren bei der Interpretation Berücksichtigung finden, da psychische Belastungen unterschätzt werden können [131].

4.2.1.3 MSTS-Enneking-Score

Nach zahlreichen Modifikationen des dem International Symposium on Limb Salvage (ISOLS) im Jahr 1981 entsprungenem standardisiertem Evaluationssystem MSTS untergliedert sich das heute gebräuchliche Scoring-System in 2 Untermodule [135]. Jedes Untermodul gliedert sich in 6 Kategorien, für die untere Extremität umfasst dies die Dimensionen Schmerz, Funktion, emotionale Akzeptanz, Hilfsmittel, Laufen und Gangart sowie für die obere Extremität die Dimensionen Schmerz, Funktion, emotionale Akzeptanz, Positionieren der Hand, Fingerfertigkeit/ Geschicklichkeit und Fähigkeit zum Anheben. Jede Kategorie kann anhand einer Likert-Skala von 0 bis 5 Punkten bewertet werden. Jedem Punktwert ist eine kategorie-spezifische Interpretation auf dem Bogen zugeordnet. Die Punktwerte 2 und 4 entsprechen kategorieübergreifend Intermediärzuständen. Für die untere bzw. obere Extremität ist eine maximale Gesamtpunktzahl von jeweils 30 Rohpunkten, ein Minimum von jeweils 0 Rohpunkten (Streubreite 0 bis 30 Punkte) erzielbar. Ein Ergebnis von 0 bildet ein sehr schlechtes Gesamtoutcome, ein Ergebnis von 30 ein sehr gutes Gesamtoutcome ab. Die Auswertung erfolgt prozentual getrennt für die untere und obere Extremität.

Die Vorteile des MSTS-Enneking-Scores liegen in der einfachen Anwendbarkeit und einer hohen Reliabilität. Als nachteilig zu betrachten ist ein gewisser Grad an Subjektivität, welcher in der Konzeption als Selbstbeurteilungsfragebogen begründet ist [135].

4.2.2 Visuelle bzw. numerische Analogskala

Ergänzend zur Schmerzdimension im SF-36-Fragebogen, der als Bezugszeitraum die vorangegangenen 4 Wochen abfragt, wurde der aktuelle Schmerzzustand im Spender- und Empfängergebiet anhand der Visuellen Analogskala (VAS) erfasst. Anhand eines orangefarbenen Schiebers der Firma mundipharma kann die aktuelle Schmerzstärke („Wie intensiv empfinden Sie Ihren gegenwärtigen Schmerz?“) durch den Patienten auf einer Skala zwischen den Extrempunkten „kein Schmerz“ und „stärkster Schmerz“ auf einer 10 cm langen kontinuierlichen Leiste visuell dargestellt werden. Der entsprechende numerische Wert zwischen 0 und 10 mit einer Skalierung zwischen 0 und 100 mm wurde auf der Rückseite auf eine Nachkommastelle genau abgelesen und dokumentiert. Messfehler anhand einer sonst üblichen manuellen Auswertung bei der Übersetzung in einen Wert auf der Rationalskala oder durch kopiebedingte Verzerrungen der Skalierung werden somit reduziert bzw. vermieden.

SCHOMACHER (2008) kann im Rahmen einer durchgeführten vergleichenden Literaturanalyse zeigen, dass die VAS ein reliables, objektives und valides Instrument für die Erhebung des Schmerzzustandes darstellt. Die VAS zeigt sich dabei veränderungssensitiver gegenüber einer Anwendung der NRS. Ob eine klinisch bedeutende Schmerzreduktion vorliegt, wird abhängig vom der Eingangsmessung beurteilt. Bei einem niedrigen Wert von ≤ 4 in der Eingangserhebung wurde eine klinische Relevanz für eine Veränderung von über 0,5 Punkten, bei einem Eingangsscore von > 4 für eine Veränderung von ≥ 2 Punkten definiert [136].

4.2.3 Messbögen

Zur objektiven Bewertung des funktionalen Bewegungs- und Kraftausmaßes nach der Neutral-Null-Methode in der Spender- und Empfängerregion wurden die standardisierten Messblätter für die Finger (F 4220 0816) sowie die oberen (F 4222 0117) und unteren Gliedmaßen (F 4224 0816) der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) herangezogen [137]. Die Datenerhebung erfolgte unter Zuhilfenahme eines genormten Goniometers (Sanovi-Aventis Deutschland GmbH, Frankfurt am Main, Deutschland) und eines Finger-Winkelmessers (Waldemar Link GmbH & Co. KG, Hamburg, Deutschland) im Rahmen des festgelegten Nachuntersuchungstermins im Seitenvergleich. Ergänzend wurden die Greiffunktionen (Grobgriff, Schlüsselgriff inkl. Kraft (Jamar[®] Hydraulic Hand Dynamometer, Sammons Preston, Bolingbrook, Illinois), Pinzettengriff inkl. Kraft, Schreibgriff, kleiner und großer

Faustschluss) an der oberen Extremität erfasst. Der Erhebung der Sensibilität und Kälteempfindlichkeit findet Abbildung im Rosén- und Lundborg-Score [138,139]. Die per Greulich-Stern (Waldemar Link GmbH & Co. KG, Hamburg, Deutschland) durchgeführte Zweipunktdiskrimination wurde ebenfalls erfasst.

4.2.3.1 Messblatt obere Gliedmaßen/ untere Gliedmaßen/ Finger

Die Neutral-Null-Methode, auch als Nulldurchgangsmethode bezeichnet, stellt ein in der Orthopädie häufig angewendetes Verfahren zur Bewertung des Bewegungsausmaßes in Winkelgraden in einem oder mehreren Gelenken dar. Grundlage der Messung bildet die sogenannte Nullstellung, welche als aufrechtstehende Positionierung des Körpers bei gestreckten Ellenbogen-, Hand- und Fingergelenken und in der Sagittalfläche ausgerichteten Handflächen sowie einer parallelen Fußstellung bei gestreckten Kniegelenken definiert ist. Die Dokumentation erfolgt stets 3-teilig, wobei die Ausgangsposition sowie das Bewegungsausmaß in zwei definierte Bewegungsrichtungen entsprechend den Messblättern angegeben wird [140]. Bei der Auswertung wurde sowohl die Range of Motion als auch das prozentuale Bewegungsausmaß im Vergleich von operierter zu gesunder Extremität berücksichtigt.

4.2.3.2 Rosén- und Lundborg-Score

Das von ROSÉN und LUNDBORG (2000) in Schweden entwickelte numerische Scoresystem dient zur Quantifizierung und Dokumentation des postoperativen Outcomes nach peripheren Nervenverletzungen am distalen Unterarm bzw. dem Handgelenk. Die Autoren können zeigen, dass das Testergebnis gut mit der subjektiven Patienteneinschätzung im Hinblick auf die verletzungsbedingte Alltagsbeeinträchtigung korreliert [138]. Die Konstruktvalidität, interne Konsistenz und Reliabilität sind belegt [139]. Der Bogen setzt sich aus einem sensorischen und einem motorischen Anteil sowie einem Bereich zur Schmerzerfassung zusammen. Zur sensorischen Einschätzung werden für die Innervationsüberprüfung der Semmes-Weinstein-Monofilamenttest, für die Fingerfertigkeit der Sollerman Hand Function Test herangezogen. Darüber hinaus beinhaltet der Bereich die Durchführung der Zwei-Punkt-Diskrimination sowie den Shape/ Texture Identification Test (STI-Test). Die motorische Komponente wird anhand des manuellen Muskeltests und der Griffstärke per Jamar[®] Dynamometer erfasst. Die Schmerzkomponente umfasst die Kriterien Kälteempfindlichkeit und Hyperästhesie.

Semmes-Weinstein-Monofilamenttest

Angewendet wurde das 5 Piece Foot Kit (Touch Test® Sensory Evaluator, North Coast Medical, Inc., Gilroy, USA), dem die dem 5 Piece Hand Kit entsprechenden Filamente mit einer Stärke zwischen 2,83 und 6,65 für die Handsensibilitätsmessung entnommen wurden. Die Testung im Innervationsbereich des N. medianus erfolgt am Daumen an der Phalanx distalis sowie am Zeigefinger distal des Metakarpophalangealgelenks sowie an der Phalanx distalis. Die Messpunkte im Innervationsgebiet des N. ulnaris sind im Bereich des Hypothenars sowie am kleinen Finger distal des Metakarpophalangealgelenks und der Phalanx distalis festgelegt. Die Erhebung wird beginnend mit dem feinsten Monofilament (Stärke 2,83) von distal nach proximal stets auf der palmaren Handfläche durchgeführt. Kann der Patient unter Abknicken der Filamentspitze keine sensorische Information angeben, wird mit dem nächststärkeren Monofilament fortgefahren. Für jeden Messpunkt können maximal 5 Punkte (Filament 2,83) vergeben werden, sodass sich ein Maximalwert von jeweils 15 Punkten für den N. medianus bzw. ulnaris ergibt. Der Streubereich liegt bei 15 Punkten, wobei Werte zwischen 0 und 15 Punkten erzielt werden können. 0 Punkte werden bei fehlender sensorischer Information unter Anwendung des Filaments der Stärke 6,65 vergeben. Die entsprechende Punktwertzuordnung zu den einzelnen Filamenten ist dem Messbogen zu entnehmen.

Zwei-Punkt-Diskrimination nach Moberg

Die Zwei-Punkt-Diskriminationsschwelle wurde anhand eines Greulich-Sterns an der Phalanx distalis des Zeige- und Kleinfingers für den N. medianus bzw. ulnaris erfasst. Die Testspitzenabstände sind in vier Abstufungen (≥ 16 mm, 11 – 15 mm, 6 – 10 mm und ≤ 5 mm) angeordnet und einem jeweiligen Wert zwischen 0 und 3 Punkten zugeordnet. Die Messung erfolgt beginnend mit einem Intervallabstand von ≤ 5 mm und wird bei fehlender sensorischer Information bzw. der Wahrnehmung beider Testspitzen als einen Punkt mit aufsteigendem Intervallabstand fortgesetzt. Es ergibt sich bei vollständiger Intaktheit der Diskriminationsfähigkeit ein Maximalwert von 3 Punkten, der Streubereich liegt bei 3 Punkten mit erzielbaren Werten zwischen 0 und 3 Punkten.

Shape/ Texture Identification Test

Hierbei werden 3 festgelegte Gegenstände mit 3 verschiedenen Oberflächen verwendet, die mit dem Zeige- bzw. Kleinfinger taktil identifiziert werden müssen. Jeder der drei Oberflächenstrukturen ist ein Wert von 1 Punkt für die Erkennung und ein Wert von 0 für die Nicht-Erkennung zugeordnet. Es ergibt sich ein Maximalwert von 6 Punkten, zusammengesetzt

aus zweimal maximal 3 Punkten für das Innervationsgebiet der beiden Nerven. Die Streubreite liegt bei 6 Punkten, wobei Werte zwischen 0 und 6 Punkten erreicht werden können. Ein Wert von 0 Punkten ist als vollständige Unfähigkeit, ein Wert von 6 Punkten als uneingeschränkte Fähigkeit zur taktilen Form- und Strukturerkennung für den N. medianus und ulnaris zu interpretieren.

Sollerman Hand Function Test

Ausgewählt sind im Rahmen des Rosén-Lundborg-Scores die Subtests 4, 7 und 10 aus dem 20 Aufgaben umfassenden Sollerman-Test [141]. Test 4 beinhaltet die Entnahme von $n = 4$ Münzen unterschiedlicher Größe aus einer Geldbörse und die Ablage auf der Tischfläche unter Benutzung des Pinzettengriffs (Daumen, Zeige- und Mittelfinger). Im Rahmen von Aufgabe 7 werden verschieden große Knöpfe unter Anwendung des Pinzetten- und Schlüsselgriffs (Daumen und Zeigefinger) geöffnet und geschlossen. Test 10 umfasst das Aufschrauben von 3 unterschiedlich großen Muttern auf die entsprechenden Schrauben. Für jede Teilaufgabe kann ein Maximalwert von 4 Punkten (weder zeitliche noch qualitative Einschränkung in der Ausführung) und ein Minimalwert von 0 Punkten (keine Durchführung möglich) erzielt werden, sodass sich ein Gesamtscore von 12 Punkten ergibt. Die Streubreite liegt bei 12 Punkten, wobei Werte zwischen 0 und 12 Punkten erzielt werden können. Alle weiteren Punktzusordnungen sind dem Testmanual zu entnehmen.

Manueller Muskeltest nach Janda

Die Einschätzung der motorischen Komponente erfolgt anhand der Kraftgrade nach Janda. Dabei werden für die Palmarabduktion (N. medianus) Scores zwischen 0 (vollständige Lähmung ohne erkennbare Muskelaktivität) und 5 (normale Muskelkraft gegen Widerstand) vergeben. Die Streubreite liegt bei 5 Punkten mit einem Maximalwert von 5 Punkten. Für den N. ulnaris (Abduktion von Ring- und Kleinfinger sowie Adduktion Kleinfinger) wird nach gleicher Skalierung verfahren. Es ergibt sich ein maximaler Score von 15 Punkten mit erzielbaren Werten zwischen 0 und 15 Punkten und einer Streubreite von 15 Punkten.

Griffstärke

Die Messung wurde unter Verwendung eines Jamar[®] Dynamometer unter dreimaliger Messung und anschließender Mittelung der Ergebnisse in kg force durchgeführt [142]. Das Kraftverhältnis zwischen operierter und nicht-operierter Extremität wurde prozentual dokumentiert, als Normwert wird die erzielte Kraft an der gesunden Hand herangezogen.

Kälteempfindlichkeit und Hyperästhesie

Die Evaluation der Schmerzkomponente erfolgt durch Selbsteinschätzung des Patienten anhand einer jeweils vierstufigen Likertskala. Ein Maximalwert von 3 Punkten ist als „keine Einschränkung“, ein Minimalwert von 0 Punkten als „Funktion behindert“ bei einer Streubreite von 3 Punkten definiert.

4.2.4 Bildgebende Verfahren

Die radiologische Beurteilung erfolgte anhand des Knochenhypertrophieindex nach DE BOER und WOOD (1988) und des modifizierten WEILAND-Schemas nach HÖPFNER (2003). Neben der Röntgenbildgebung (DigitalDiagnost 4.1, Philips, Amsterdam, Niederlande) wurden MR-angiographische Aufnahmen (Magnetresonanztomograph Panorama HFO 1.0T, Philips, Amsterdam, Niederlande) mit makrozyklischem, ringförmigen Kontrastmittel zur Beurteilung des anastomosierten Gefäßstiels durchgeführt. Die ossäre Integration findet im Bone Healing Score (BHS) nach GIESSLER et al. (2009) sowohl qualitative als auch quantitative Abbildung. Darüber hinaus wurden die Transplantateinheilungsrate sowie der jeweilige Zeitpunkt der sicheren knöchernen Konsolidierung radiologisch erfasst.

4.2.4.1 (Angiographische) Magnetresonanztomographie

Der Schwerpunkt der radiologischen Befundung konzentriert sich in der vorliegenden Arbeit auf die Frage der Anwendbarkeit MR-(angiographisch)gestützter Diagnostik für die qualitative und quantitative Beurteilung der ossären Integration freier, vaskularisierter Fibulatransplantate im jeweiligen Empfängergebiet. Nach ausführlicher Recherche finden sich hierzu noch keine detaillierten Anwendungsstudien in der Fachliteratur.

Einen grundlegenden Vorteil bietet eine magnetresonanztomographisch gestützte Bildgebung aufgrund der Non-Invasivität bzw. im Rahmen der Befund der Gefäßstieldurchgängigkeit per Angio-MRT aufgrund der Minimal-Invasivität des Verfahrens. Im Gegensatz zur bislang standardisierten Anwendung der Computertomographie zur differenzierten Beurteilung von Knochengraft, benachbartem Empfängerknochen und umliegenden Weichteilgewebe ist darüber hinaus ein vollständiger Verzicht auf eine ionisierende Strahlungsbelastung für den Patienten möglich. Die Vorteile einer MR-Angiographie unter Kontrastmittelverwendung im

Gegensatz zu anderen MR-angiographischen Methoden wie Time-of-Flight, Phasenkontrast-, Volumeneinstrom-, Herzphasen-Differenz- oder Black-Blood-MRA besteht in der Ermöglichung kurzer Messzeiten, der dreidimensionalen Abbildung von Gefäßvolumina unabhängig von der räumlichen Orientierung und der Erzielung einer hohen Signal-to-Noise-Ratio (Verhältnis zwischen MR-Signal zu hintergründigem Bildrauschen). Neben der hierdurch bedingten hohen Gefäßkontrastierung wird eine hyperintense Gefäßdarstellung aufgrund der starken Verkürzung der Wasserrelaxationszeit auf unter 100 ms erzielt. Trotz ihres Schwermetallgehalts betrachten WEISHAUP T et al. (2014) und KAHL-SCHOLZ und VOCKELMANN et al. (2017) paramagnetische gadoliniumhaltige Kontrastmittel aufgrund einer Nebenwirkungshäufigkeit von 1 – 2 % (Wärmegefühl, Kopfschmerzen, Nausea, Erbrechen, pseudoallergische Haut- und Schleimhautreaktionen, äußerst selten anaphylaktische Schockreaktionen, lokale Schmerzen bis zu Nekrosen bedingt durch Extravasate) als gut verträglich und sicher in der Anwendung [143,144]. Die Bedeutung der Nephrotoxizität gadoliniumhaltiger Kontrastmittel und deren Rolle in Zusammenhang mit dem Auftreten der nephrogenen systematischen Fibrose wird kontrovers diskutiert (u.a. ROBERTS et al. (2016)) [145]. JOST et al. (2016) sowie BOYKEN et al. (2018) konnten darüber hinaus im Tiermodell eine Ablagerung von gadoliniumhaltigen Komplexen im Gehirn nachweisen, wobei hierbei nur lineare Kontrastmittel betroffen waren [146,147]. Ein Zusammenhang mit möglichen neurologischen Funktionsstörungen konnte bislang nicht erbracht werden. Für makrozyklische, ringförmige Kontrastmittel ist auf Grundlage der aktuellen Forschung von einer Unbedenklichkeit für das zentrale Nervensystem auszugehen. Insgesamt erhielten n = 9 der n = 14 Patienten zum jeweiligen Nachuntersuchungszeitpunkt eine MR-sowie eine MR-angiographische Bildgebung unter Verwendung von 20 ml makrozyklischem, ringförmigen gadoteridolhaltigen Kontrastmittel (ProHance[®], Bracco Diagnostics, Mailand, Italien) Die Identifikation von Risikopatienten basierte auf der klinischen Anamnese (Herz-Kreislauf-Erkrankungen, multiple Allergien, Asthmatiker, bekannte Kontrastmittelunverträglichkeit) sowie bei vorbestehender bekannter Nierenfunktionsbeeinträchtigung bzw. einem Patientenalter über 60 Jahre zusätzlich auf labordiagnostischer Testung (GFR, Kreatinin, TRH, T₃, T₄).

4.2.4.2 Bone Healing Score (BHS)

Basierend auf vorangegangenen Arbeiten von GIESLER et al. (2008), TAIRA et al. (2004), WEILAND et al. (1984) und VOSSSEN et al. (2005) entwickeln GIESLER et al. (2009) den Bone Healing Score (BHS) als multifaktorielles röntgenologisches Bewertungsschema für die Quantifizierung der knöchernen Konsolidierung vaskularisierter Allotransplantate im Tiermodell [49,51,148–150]. Eine Maximalpunktzahl von 25 Punkten ist erzielbar, wobei die Spannweite zwischen -1 und 25 Punkten liegt (siehe Tabelle 1). Das jeweils erzielte Ergebnis kann anschließend prozentual an der Gesamtpunktzahl gemessen werden. Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht in der Überprüfung der Anwendbarkeit des BHS auf die Bildgebung per Magnetresonanztomographie.

Kriterium	Grad der Ausprägung	Punkteverteilung	
		proximal der Osteotomiestelle	distal der Osteotomiestelle
Periostale Reaktion	Keine	0	0
	Minimal (< 25 %)	1	1
	Mittel (25 – 50 %)	2	2
	Ausgeprägt (50 – 75 %)	3	3
	Komplett (75 – 100 %)	4	4
Kallusumbau	Keiner	0	0
	Partiell	2	2
	Komplett	4	4
Osteotomie-durchbau	Gesamte Linie vollständig sichtbar	0	0
	Linie bereits partiell durchbaut	2	2
	Radiologische Fusion	4	4
Transplantat-aspekt	Sichtbare Resorption	-1	-1
	Keine Veränderung	0	0
	Periostale Reaktion vom Transplantat ausgehend	1	1
Maximal erreichbare Summe		13	13

Tabelle 1: Bone Healing Score. Röntgenologisches Bewertungsschema nach Giessler et al. (2009) [49]

4.2.4.3 Knochenhypertrophie-Index nach De Boer & Wood

Der 1989 von DE BOER und WOOD publizierte Index dient der quantitativen Erfassung der Knochenhypertrophie bei freien, vaskularisierten Fibulatransplantaten auf Grundlage röntgenologischer Bildgebung. Die Autoren können dabei auf Grundlage vorangehender Untersuchungen zeigen, dass aufgrund der triangulären Form des Wadenbeinknochens projektionsbedingte Varianzen bezüglich der erhobenen Knochendurchmesser möglich sind und definierten eine sichere Hypertrophie in diesem Zusammenhang erst ab einem Index ≥ 20 %. Folgende Formeln fanden in der vorliegenden Arbeit gemäß DE BOER und WOOD Anwendung: Die Messungen erfolgten stets zentral im Transplantatbereich [39].

$$\frac{\text{index}^2 - \text{index}^1}{\text{index}^1} \times 100 = \text{Knochenhypertrophie in \%}$$

Formel 4: Allgemeine Formel des Knochenhypertrophie-Index nach De Boer und Wood

$$\frac{\text{Transplantatdurchmesser zum Operationszeitpunkt}}{\text{Durchmesser des Empfängerknöchens zum Operationszeitpunkt}} = \text{index}^1$$

Formel 5: Formel Index¹ des Knochenhypertrophie-Index nach De Boer und Wood

$$\frac{\text{Transplantatdurchmesser zum Nachuntersuchungszeitpunkt}}{\text{Durchmesser des Empfängerknöchens zum Nachoperationszeitpunkt}} = \text{index}^2$$

Formel 6: Formel Index² des Knochenhypertrophie-Index nach De Boer und Wood

4.2.4.4 Modifizierter Weiland-Score nach Höpfner

Der Weiland-Score für freie, vaskularisierte Knochentransplantate findet mit HÖPFNER (2003) eine Modifizierung des ursprünglich von WEILAND et al. (1984) publizierten röntgenologischen Bewertungsschematas zugunsten des Einbezugs der Knochenhypertrophie und der sicheren Knocheneinheilung. Aufgrund der bereits präoperativ bestehenden nahezu gleichen Kaliberstärke, insbesondere im Bereich des proximalen Radius und der distalen Ulna, wird auf eine Befundung in diesen Bereichen verzichtet und im zentralen Abschnitt im Gegensatz zur ursprünglichen Version der Maximalwert von 4 Punkten bereits durch eine vollständige knöcherne Integration erzielt.

Es ergibt sich insgesamt ein maximaler Punktwert von 14 Punkten mit einer Streubreite zwischen 0 und 14 Punkten (siehe Tabelle 2). Die Auswertung erfolgte prozentual gemessen am Maximalwert von 14 Punkten.

Proximaler Transplantat-Bereich	Punkte	Distaler Transplantat-Bereich	Punkte	Zentraler Transplantat-bereich	Punkte
Vollständige Resorption	0	Vollständige Resorption	0	Vollständige Resorption	0
Schwere Resorption	1	Schwere Resorption	1	Schwere Resorption	1
Geringe Resorption	2	Geringe Resorption	2	Geringe Resorption	2
Entspricht postoperativer Situation	3	Entspricht postoperativer Situation	3	Entspricht postoperativer Situation	3
Sichere Knochenheilung	4	Sichere Knochenheilung	4	Kortikalisverdickung	4
Knochenhypertrophie 21-50%	5	Knochenhypertrophie 21-50%	5		
Knochenhypertrophie über 50% oder Remodeling zur Größe des Empfängerknochens	6	Knochenhypertrophie über 50% oder Remodeling zur Größe des Empfängerknochens	6		
Maximaler Punktwert aller Transplantat-bereiche	14				
Ulna: Bewertungsschema grün und rot = 14, lila und blau entfällt Radius: Bewertungsschema grün und blau = 14, lila und rot entfällt					

Tabelle 2: Modifizierter Weiland-Score für den Unterarm nach Höpfner [47]

4.3 Statistische Analyse

Die nachfolgenden statistisch deskriptiv dargestellten metrischen Werte wurden gerundet und einschließlich Median und Streubreite dargestellt, wobei die statistischen Tests auf Mittelwert und Standardabweichung basieren. Die Darstellung der motorisch-funktionellen Ergebnisse erfolgte im kontralateralen Vergleich. Aufgrund des geringen Stichprobenumfangs wurde der Wilcoxon-Test zum Vergleich von gepaarten quantitativen Variablen verwendet. Der Pearson-Korrelationskoeffizient wurde dabei herangezogen, um den Grad der linearen Korrelation aufzuzeigen. Für $p \leq 0,05$ wurden signifikante Unterschiede angenommen. Statistisch signifikante Ergebnisse sind gekennzeichnet.

5 ERGEBNISSE

5.1 Klinische Angaben zur Studiengruppe

Die nachfolgende Darstellung der klinischen Ergebnisse umfasst die Darstellung der Gesamtstudiengruppe (n = 14) unter Einbezug demographischer Merkmale (Alter, Geschlecht, Beruf, Versicherungsstatus) sowie Angaben zur initialen Indikationsstellung für eine FVFT.

Berücksichtigung finden darüber hinaus der Umfang indikationsbezogener prä- und postoperativer Eingriffe, die Darstellung der Transplantatlängen und der exakten Empfängerlokalisationen an der oberen Extremität unter Berücksichtigung der angewendeten Anastomose- und Osteosyntheseverfahren sowie Art und Umfang prä- und postoperativer Gefäßdarstellung.

5.1.1 Geschlechtsverteilung und Demographie

Die endgültige Studiengruppe bestehend aus n = 14 Patienten aus den Bundesländern Berlin, Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern setzte sich aus n = 10 männlichen (71,4 %) und n = 4 weiblichen (28,6 %) Studienteilnehmern zusammen. Das Geschlechterverhältnis männlich zu weiblich belief sich damit auf 2,5. Das Durchschnittsalter betrug im Median zum Operationszeitpunkt 40 Jahre (10 – 67 Jahre), zum Nachuntersuchungszeitpunkt 46,5 Jahre (21 – 77 Jahre). Die Altersverteilung nach Geschlecht zum Operationszeitpunkt erwies sich als identisch (Mann-Whitney-U-Test p = 0,24) zum Nachuntersuchungszeitpunkt als nicht identisch (Mann-Whitney-U-Test p = 0,04). Der Zeitraum zwischen FVFT und Nachuntersuchung betrug im Median 8,5 Jahre (3 Monate - 16,6 Jahre).

50 % der Patienten waren im Rahmen des Unfallgeschehens berufsgenossenschaftlich, 50 % gesetzlich krankenversichert und in den Berufsgruppen Medizin (n = 3), Verkehr (n = 2), Technik (n = 2), Reinigung (n = 1), Landwirtschaft (n = 1), Einzelhandel (n = 1) und

Dienstleistung (n = 2) tätig. Aktuell ohne Erwerbstätigkeit (arbeitslos bzw. berentet) waren n = 2 weitere Studienteilnehmer. Zum Zeitpunkt der Nachuntersuchung arbeitsfähig waren 57,1 % (n = 8), davon 87,5 % im bereits vor der FVFT ausgeübten Beruf. Ein weiterer Patient (12,5 %) durchlief vor der Reintegration in die Erwerbsfähigkeit eine Umschulung. Die Minderung der Erwerbsfähigkeit (MdE) betrug insgesamt im Median 30 % (0 - 100 %).

5.1.2 Prä- und postoperative Eingriffe nach FVFT

Die Transplantation erfolgte im Median 597,5 Tage (21 – 5159 Tage) nach dem Unfallgeschehen bzw. Primärereignis. Bei allen Probanden (100 %) erfolgte ausnahmslos mindestens eine vorangehende diagnosebezogene Operation (nicht FVFT), im Schnitt belaufen sich diese auf 3 Operationen vor dem Fibula-transplantierenden Eingriff (1 – 16 Operationen). Bei 78,6 % der Studienteilnehmer wurde mindestens eine Nachoperation nach der FVFT vorgenommen, im Median wurden dabei 2 Operationen nach dem Fibula-transplantierenden Eingriff (0 – 5 Operationen) durchgeführt. Sowohl die Verteilung des Abstands zwischen Unfall und FVFT in Tagen, des Abstands zwischen FVFT und Nachuntersuchung in Tagen als auch die Verteilung der Anzahl der Re-Operationen nach FVFT erwiesen sich über die Kategorie Geschlecht als identisch (Mann-Whitney-U-Test $p = 0,11$ bzw. $p = 0,54$ bzw. $p = 0,24$). Übergreifend unter Einbezug des transplantierenden Eingriffs erfolgten im Schnitt 6 Operationen (3 – 28 Operationen). Der stationäre Aufenthalt betrug im Median 25 Tage (7 Tage – 2 Monate) bei einer medianen Arbeitsunfähigkeit nach dem Krankenhausaufenthalt in Zusammenhang mit dem FVFT-Eingriff von 20,9 Monate (0 Tage – 16 Jahre). Sämtliche Eingriffe wurden durch das ärztliche Team der Abteilung für Hand-, Replantations- und Mikrochirurgie am Unfallkrankenhaus Berlin unter Beteiligung eines insgesamt 20-köpfigen Ärzteteams vorgenommen.

5.1.3 Transplantate

5.1.3.1 Spender- und Empfängerlokalisierung

Als Spenderlokalisierung wurde in 9 Fällen (64,3 %) die linke, in 5 Fällen (35,7 %) die rechte Fibula gewählt. Eine Differenzierung in Sprung- und Standbein wurde nicht vorgenommen, da die wenigsten Patienten dies sicher angeben konnten. Dabei wurden die Transplantate 8-mal

(57,1 %) von der kontralateralen (rechte Fibula auf linken Unterarm n = 4 bzw. linke Fibula auf rechten Unterarm n = 4), 6-mal (42,9 %) von der ipsilateralen Körperseite (rechte Fibula auf rechten Unterarm n = 1 bzw. linke Fibula auf linken Unterarm n = 5) entnommen.

Die Transplantation des freien, vaskularisierten Knochens erfolgte im Empfängergebiet in n = 8 Fällen (57,1 %) auf den linksseitigen (4-mal Radius, 3-mal Ulna, 1-mal Radius und Ulna kombiniert), in n = 5 Fällen (35,7 %) auf den rechtsseitigen Unterarm (3-mal Radius, 1-mal Ulna, 1-mal Radius und Ulna kombiniert). Darunter erhielt ein Patient (n = 1) eine zusätzliche Überbrückung des Handgelenks. Einem weiteren Patienten (n = 1) wurde ein Fibulatransplantat in den Humerusknochen eingesetzt. Insgesamt lag bei n = 7 Patienten (50 %) eine Verletzung des Radius, bei n = 4 Patienten (28,6 %) eine Verletzung der Ulna und bei n = 2 Patienten (14,3 %) eine kombinierte Verletzung vor. In 57,1 % war der Unterarm der dominanten Hand (Schreibhand) betroffen, davon waren n = 5 Patienten Rechtshänder und n = 3 Patienten Linkshänder.

5.1.3.2 Transplantatlänge, Anastomose- und Osteosyntheseverfahren

Die endgültig eingepasste Fibulatransplantatlänge in der Empfängerregion belief sich im Schnitt auf 7,5 cm (4,5 - 16 cm). Dabei zeigte sich eine Häufung kurzer Transplantate bei den männlichen Patienten (Median = 5,65 cm) gegenüber den weiblichen Patienten (Median = 12,12 cm). Die Transplantatlänge zeigte somit keine identische Verteilung über die Kategorie Geschlecht (Mann-Whitney-U-Test p = 0,01). Es erfolgte in 28,6 % (n = 4) eine primäre Mittransplantation von autogener Beckenkammpongiosa. Eine sekundäre Spongiosaplastik im Rahmen einer Re-Operation wurde bei 14,3 % (n = 2) der Patienten notwendig.

In n = 13 Fällen (92,9 %) wurden plattenosteosynthetische Verfahren zur Fixierung des Knochentransplantats angewendet, einmalig (n = 1) wurde auf eine Drahtcerclage (7,1 %) zurückgegriffen. An der unteren Extremität kamen in n = 2 Fällen (14,3 %) Stellschrauben im Rahmen einer tibiofibulären Stabilisation zum Einsatz. Bei allen Patienten (100 %) wurde als Spendergefäß die A. fibularis samt ihrer Begleitvenen herangezogen. Anastomosiert wurde in n = 6 Fällen (42,9 %) auf die A. radialis, in n = 7 Fällen (50 %) auf die A. ulnaris und in n = 1 Fälle (7,1 %) auf die A. profunda brachii. Als Empfängervenen dienten unter möglicher Mehrfachnennung sowohl die Subkutan- (n = 6; 42,9 %) als auch die Begleitvenen (n = 10; 71,4 %) und die V. profunda brachii (n = 2; 14,3 %). Die Anastomose erfolgte in 35,7 % in proximalen, in 50 % im mittleren und in 14,3 % im distalen Unterarmdrittel. Die arterielle

Anastomose wurde bei $n = 9$ Patienten (64,3 %) als End-zu-Seit-Anastomose, bei $n = 5$ Patienten (35,7 %) als End-zu-End-Anastomose durchgeführt. Eine venöse End-zu-Seit-Anastomose erhielten $n = 4$ Patienten (28,6 %), eine venöse End-zu-End-Anastomose $n = 10$ Patienten (71,4 %). Zur Defektdeckung an der Empfängerstelle wurde bei $n = 5$ Patienten (35,7 %) eine Hautinsel mitgehoben, $n = 3$ Patienten (21,4 %) erhielten ein körpereigenes Spalthauttransplantat.

5.1.4 Prä- und postoperative Gefäßdarstellung

Zur operativen Planung wurde in $n = 13$ Fällen (92,9 %) eine präoperative Angiographie an der unteren Extremität durchgeführt, ein Patient (7,1 %) erhielt keine angiographisch gestützte Gefäßdarstellung. Es erfolgte hier eine ausreichende klinische Befundung. Bei keinem der Studienpatienten wurde bis zum Nachuntersuchungstermin eine postoperative Gefäßdarstellung dokumentiert.

5.2 Ergebnisse der subjektiven Patientenzufriedenheit

Die Beurteilung der subjektiven Patientenzufriedenheit erfolgte anhand psychologischer Testkriterien (SF-36). Die im Rahmen dieses Fragebogens erfassten Ergebnisse zum subjektiven physischen bzw. psychischen Gesundheitszustands des Patientenkollektivs ($n = 14$) werden in Abbildung 16 und 17 abgebildet. In Bezug auf die physischen Gesundheitskomponenten wurde ein medianer Score von 41,9 Punkten (29,9 - 60 Punkte) bei Transformation auf eine lineare Skalierung zwischen 0 und 100 erzielt.

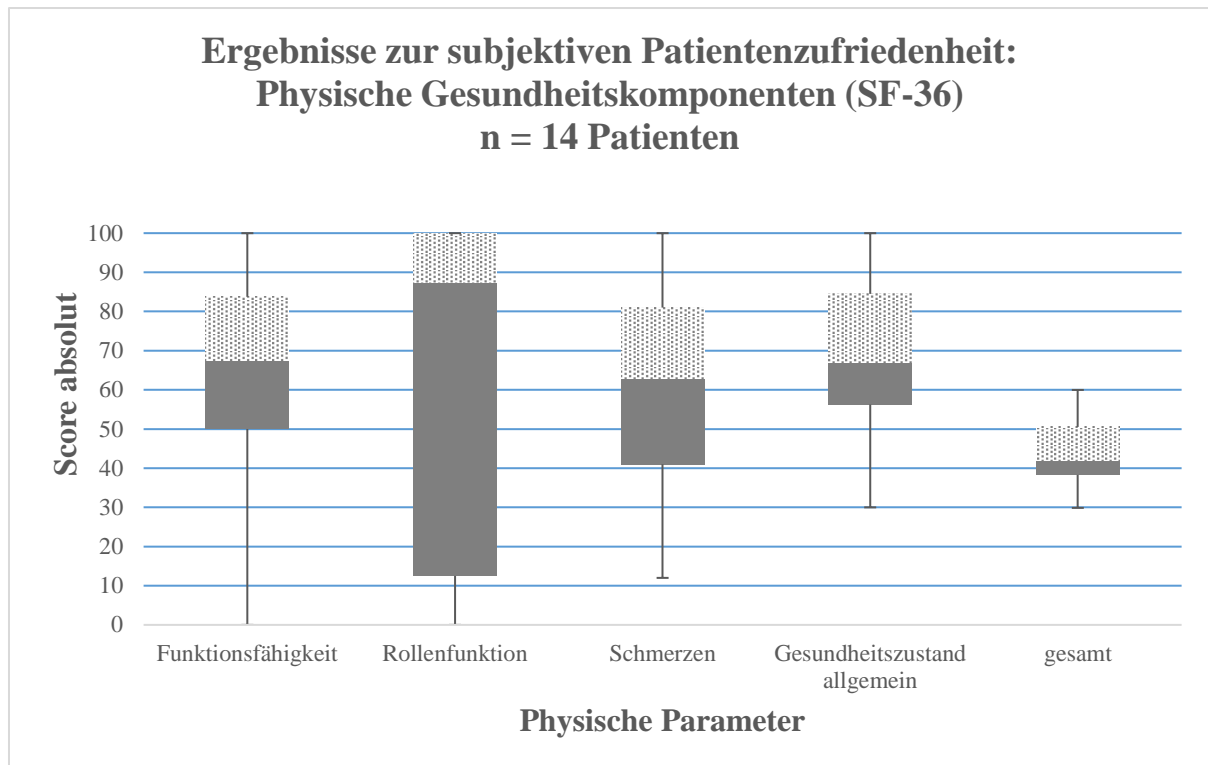


Abbildung 16: Box-Plot-Darstellung der Ergebnisse der SF-36- Parameter (Subskalen) körperliche Funktionsfähigkeit, körperliche Rollenfunktion, körperliche Schmerzen und allgemeiner Gesundheitszustand sowie des Parameters Score physische Gesundheitskomponenten (Gesamtscore der Subskalen) (X-Achse). Angabe von Absolutwerten (Spannweite 0 – 100 Punkte) (Y-Achse). Darstellung von Minimum, 25. Perzentile, Median, 75. Perzentile und Maximum.

Hinsichtlich der psychischen Gesundheitskomponenten wurde ein medianer Score von 50,96 Punkten (14,7 - 63,5 Punkte) erreicht. Ein Wert von 100 stellt dabei eine maximale, ein Wert von 0 eine minimale Lebensqualität dar.

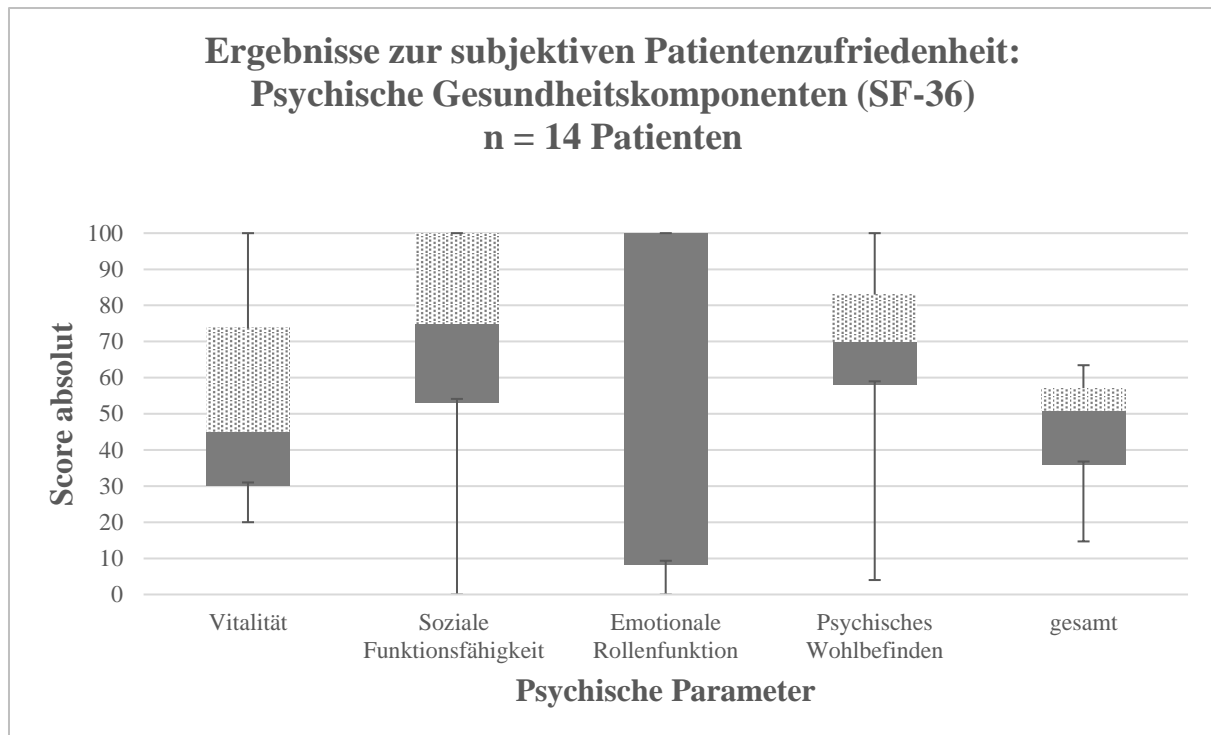


Abbildung 17: Box-Plot-Darstellung der Ergebnisse der SF-36- Parameter (Subskalen) Vitalität, soziale Funktionsfähigkeit, emotionale Rollenfunktion und psychisches Wohlbefinden sowie des Parameters Score psychische Gesundheitskomponenten als Gesamtscore der Subskalen (X-Achse). Angabe von Absolutwerten (Y-Achse). Spannweite 0 - 100 Punkte. Darstellung von Minimum, 25. Perzentile, Median, 75. Perzentile und Maximum

5.3 Ergebnisse der subjektiven muskuloskelettalen Funktionalität

Im Rahmen des DASH-Selbstbeurteilungsbogens erzielte die Gesamtstudiengruppe (n = 14) für das Basismodul nach Transformation auf eine lineare Skalierung zwischen 0 und 100 einen Medianwert von 24,4 Punkten (0 - 60,7 Punkte). Ein Ergebnis von 0 bilden eine sehr gute Funktionalität, ein Ergebnis von 100 eine sehr hohe Einschränkung ab.)

Im Rahmen des MSTS-Enneking-Scores erzielte die Gesamtstudiengruppe einen medianen Score von 73,3 % (15 % - 100 %) für die obere Extremität gemessen an der Maximalpunktzahl von 30 Punkten. Bezüglich der unteren Extremität wurde ein medianer Score von 93,3 % (29 - 100 %) gemessen an der Maximalpunktzahl von 30 Punkten erreicht.

Die differenzierte Darstellung der einzelnen Items ist Tabelle 3 zu entnehmen.

Parameter obere Extremität (OEX)	Score OEX in %	Parameter untere Extremität (UEX)	Score UEX in %
	Median (Min - Max)		Median (Min - Max)
Schmerz	90 (40 - 100)	Schmerz	100 (60 - 100)
Funktion	60 (60 - 100)	Funktion	100 (80 - 100)
Emotionale Akzeptanz	60 (40 - 100)	Emotionale Akzeptanz	80 (60 - 100)
Positionieren der Hand	80 (60 - 100)	Hilfsmittel	100 (80 - 100)
Fingerfertigkeit/ Geschicklichkeit	80 (0 - 100)	Laufen	100 (80 - 100)
Fähigkeit zum Anheben	60 (20 - 100)	Gangart	100 (100 - 100)

Tabella 3: Darstellung der medianen Score für die MSTS-Enneking-Items für die obere Extremität OEX (Schmerz, Funktion, emotionale Akzeptanz, Positionieren der Hand, Fingerfertigkeit/ Geschicklichkeit, Fähigkeit zum Anheben) und die untere Extremität UEX (Schmerz, Funktion, emotionale Akzeptanz, Hilfsmittel, Laufen, Gangart) gemessen an der Gesamtpunktzahl von jeweils 5 Punkten. Spannweite 0 % bis 100 %. Angabe von Minimum und Maximum in Klammern.

5.4 Ergebnisse der objektiven Funktionsparameter

Im Folgenden werden die Ergebnisse der motorischen und sensorischen Funktionsparameter - abgebildet durch die Messblätter für die oberen bzw. unteren Gliedmaßen und Finger (ROM) und den Rosén- und Lundborg-Score - dargestellt. Der Parameter Schmerz spiegelt sich sowohl als Bestandteil im Rosén- und Lundborg-Score als auch anhand der visuellen bzw. numerischen Analogskala wider.

5.4.1 Parameter Motorik

In Bezug auf die objektiven motorischen Ergebnisse (ROM - Range of Motion, RLS - Rosén-Lundborg-Score und Kraft) zeigen sich im Vergleich zur nicht-operierten Gegenseite insbesondere eine Reduzierung der Pro- und Supination (ROM₂) mit einem Medianwert von 32,4 % sowie eine verminderte Kraft im Faustschluss mit einem Medianwert von 39,4 % jeweils im Vergleich zur nicht-operierten Gegenseite (siehe Abbildung 18).

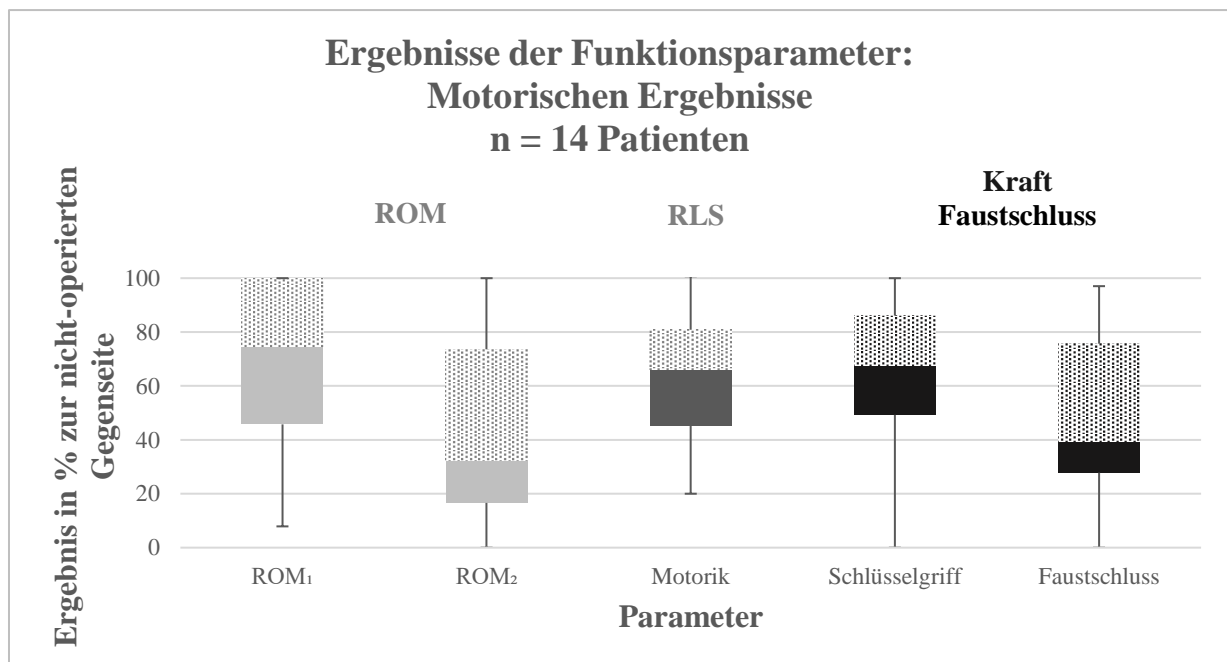


Abbildung 18: Box-Plot-Darstellung des Parameters Motorik (X-Achse) anhand des ROM₁ (Handgelenk Dorsalextension/ Palmarflexion/ Ulna-/ Radialabduktion; Mann-Whitney-U-Test = 0,19) und ROM₂ (Handgelenk Pronation/ Supination; $p = 0,04$) sowie des Rosén-Lundborg-Scores RLS (Untermotul Motorik; $p = 0,3$) und der Kraft anhand Pinchmeter (Schlüsselgriff; $p = 0,64$) und Dynamometer (Faustschluss; $p = 0,19$). Prozentuale Angaben (Y-Achse) im Vergleich zur nicht-operierten Gegenseite (Spannweite 0 – 100 %). Darstellung von Minimum, 25. Perzentile, Median, 75. Perzentile und Maximum.

5.4.2 Parameter Sensorik

Sensorisch erlangte die Gesamtstudiengruppe ($n = 14$) im Rosén-Lundborg-Score einen medianen Score von 93,9 % (64,1 % – 100 %). Die Angabe erfolgt prozentual im Vergleich zur nicht-operierten Gegenseite.

5.4.3 Parameter Schmerz

Der Rosén-Lundborg-Score spiegelt mit einem medianen Score von 100 % (50 - 100 %) eine vollständige Schmerzfreiheit des Patientenkollektivs wider. Differenziert nach Region (Spender- bzw. Empfängerregion) und quantitatives Schmerzausmaß in Ruhe bzw. bei Belastung ergibt sich auf Grundlage der VAS bei Betrachtung der Medianwerte ausschließlich bei Belastung der Empfängerregion mit einem Median von 2,5 Punkten eine auftretende Schmerzsymptomatik (0 - 10 Punkte). In Ruhe beträgt der Median 0 Punkte (0 - 6 Punkte). Hinsichtlich der Spenderstelle rangieren die Scores im Median sowohl in Ruhe als auch bei Belastung bei 0 Punkten (0 - 2 Punkte bzw. 0 - 5,5 Punkte). Die Verteilung der jeweiligen Schmerzparameter erwies sich über die Kategorie Geschlecht als identisch (Mann-Whitney-U-Test $p = 0,54$ bzw. $p = 0,64$ bzw. $p = 0,84$ bzw. $p = 0,73$).

5.5 Ergebnisse radiologischer Verfahren

Im folgenden Abschnitt erfolgt die Darstellung der Ergebnisse der angewendeten radiologischen Verfahren auf Grundlage von Röntgenbildgebung bzw. (Angio)MRT-Bildgebung und der damit verbundenen Scores (BHS sowie modifizierter und konventioneller Weiland-Score). Darüber hinaus werden die Ergebnisse zur ossären Konsolidierung zum Untersuchungszeitpunkt bzw. 12 Monate postoperativ sowie zur Transplantathypertrophie berücksichtigt.

Zunächst werden die Aspekte für die konventionelle (röntgenologische) Bildgebung dargestellt. Es folgt eine Betrachtung der oben genannten Punkte auf Grundlage der (Angio)MRT-gestützten Bildgebung mit der Ergänzung um ein in Zusammenarbeit mit dem Institut für Radiologie und Neuroradiologie am Unfallkrankenhaus Berlin entwickeltes multifaktorielles Bewertungsschema. Im dritten Teil werden die Resultate differenziert anhand einer postoperativ komplikationsfreien und einer von postoperativen Komplikationen betroffenen Patientengruppe sowie abschließend anhand der Indikationsgruppen dargestellt.

5.5.1 Ergebnisse konventioneller radiologischer Verfahren

Die radiologische Beurteilung des Transplantationserfolges beruht konventionell neben computertomographischen Verfahren auf röntgenologischer Bildgebung. Dabei konnte hinsichtlich des Parameters der ossären Konsolidierung bei 57,1 % der Patienten (n = 8) zum Untersuchungszeitpunkt eine gesicherte ossäre Integration des Fibulatransplantats in der Empfängerregion festgestellt werden. Diese erfolgte dabei in 50 % der Fälle (n = 4) innerhalb eines Zeitraums von 12 Monaten postoperativ mit einem Medianwert von 3,3 Monaten (3,1 – 6,2 Monate). Unter Berücksichtigung der Gesamtkonsolidierungsrate von n = 8 Patienten beträgt der mediane Konsolidierungszeitraum 3,4 Monate (3,1 Monate - 2 Jahre). Auf Grundlage des Knochenhypertrophie-Index erzielte die Studiengruppe (n = 12) eine mediane postoperative ossäre Hypertrophie von 1 % (- 24 % - 56 %). Unter Berücksichtigung eines für eine definitionsgemäß sichere Hypertrophie benötigten Indexwertes von ≥ 20 % finden sich bei n = 12 evaluierten Patienten in der Studiengruppe n = 3 Patienten (25 %) mit einer relevanten postoperativen Hypertrophie. Der erzielte Medianwert beträgt hierbei 41 % (23 - 56 %).

Die röntgenologischen Ergebnisse des BHS als multifaktorielles Bewertungsschema für die Quantifizierung der knöchernen Konsolidierung sowie des modifizierten Weiland-Scores unter Einbezug der Knochenhypertrophie und der sicheren Knocheneinheilung im proximalen und distalen bzw. einer möglichen Kortikalisverdickung im zentralen Transplantatbereich sind Abbildung 19 und 20 zu entnehmen. Hierbei lagen die proximalen Score-Werte im Median um 28,6 % gegenüber den distalen Score-Werten erhöht. Im modifizierten Weiland-Score lagen die medianen Ergebnisse um 18,7 % über den Werten des konventionellen Weiland-Scores.

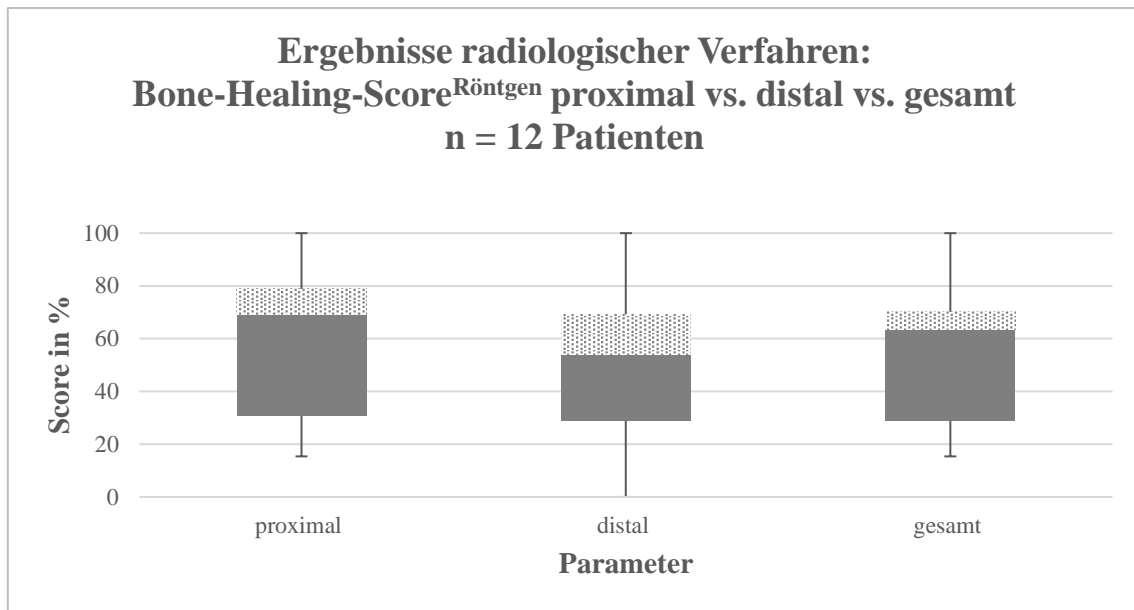


Abbildung 19: Box-Plot-Darstellung der proximalen und distalen Ergebnisse sowie des Gesamtscores des BHS (X-Achse) auf Grundlage röntgenologischer Bildgebung (Parameter: periostale Reaktion, Kallusumbau, Osteotomiedurchbau, Transplantataspekt). Prozentuale Angaben (Y-Achse) gemessen am Maximalwert von 13 Punkten (proximal; Mann-Whitney-U-Test $p = 0,15$ bzw. distal; $p = 0,04$) bzw. 26 Punkten (Gesamtscore; $p = 0,04$). Spannweite 0 – 100 %. Darstellung von Minimum, 25. Perzentile, Median, 75. Perzentile und Maximum.

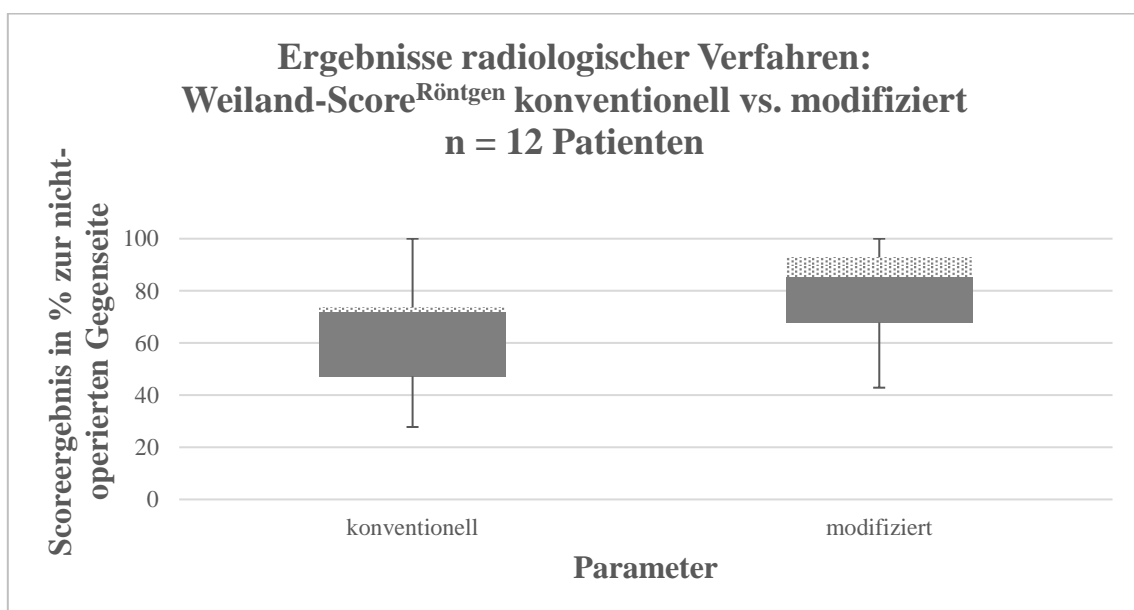


Abbildung 20: Box-Plot-Darstellung der Ergebnisse des konventionellen bzw. modifizierten Weiland-Scores (X-Achse) auf Grundlage röntgenologischer Bildgebung (Parameter: Resorptionsverhalten bzw. Knocheneinheilung, Knochenhypertrophie). Prozentuale Angaben (Y-Achse) gemessen am Maximalwert von 18 Punkten (konventionell; Mann-Whitney-U-Test $p = 0,1$) bzw. 14 Punkten (modifiziert; $p = 0,15$) im Vergleich zur nicht-operierten Gegenseite. Spannweite 0 – 100 %. Darstellung von Minimum, 25. Perzentile, Median, 75. Perzentile und Maximum.

5.5.2 Ergebnisse MRT-bildgebender Verfahren

Bei insgesamt $n = 10$ Patienten der Studiengruppe (71,4 %) wurde neben einer konventionellen röntgenologischen Bildgebung eine zusätzliche MRT-angiographische Diagnostik zum Nachuntersuchungszeitpunkt durchgeführt. Diese Patientenuntergruppe wird im folgenden Kapitel als Referenzstudiengruppe herangezogen.

Diese genannte MRT-Patientengruppe erzielte eine mediane Knochenhypertrophie von 1 % (-24 % - 56 %). Unter Berücksichtigung eines für eine definitionsgemäß sichere Hypertrophie benötigten Indexwertes von ≥ 20 % finden sich in der Studienuntergruppe $n = 2$ Patienten (22,2 %) mit einer relevanten postoperativen Hypertrophie. Der erzielte Medianwert beträgt hierbei 48,5 % (41 % - 56 %).

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Radiologie und Neuroradiologie wurde zur Bewertung der MR-angiographischen Bildgebung ein Bewertungsschema bestehend aus 8 Items (Kortikalisdurchgängigkeit, ossäre Durchbauung proximal bzw. distal, Fettsignal im Markraum proximal bzw. distal, fehlendes paraossales Flüssigkeitssignal, Gefäßstieldurchgängigkeit arteriell bzw. venös) entwickelt (siehe Tabelle 4, Abbildungen 21 - 24). Die Referenzgruppe erzielte im Median 7 Punkte. Dies entspricht 87,5 % gemessen an der Maximalpunktzahl.



Abbildung 21: Darstellung des Kriteriums Kortikalisdurchgängigkeit (siehe Pfeil) des entwickelten MR-angiographischen Bewertungsschemas (MR-BHS). Aufnahme aus vorliegender Studiengruppe (mit freundlicher Unterstützung des Instituts für Radiologie und Neuroradiologie, ukb).

Kriterium	Ausprägung	Punkte- verteilung	Parameter in Referenzgruppe vorliegend („ja“) in %
Kortikalisdurchgängigkeit	Nein	0	77,8
	Ja	1	
Ossäre Durchbauung proximal	Nein	0	66,7
	Ja	1	
Ossäre Durchbauung distal	Nein	0	66,7
	Ja	1	
Fettsignal Markraum proximal	Nein	0	88,9
	Ja	1	
Fettsignal Markraum distal	Nein	0	100
	Ja	1	
Abwesenheit paraossales Flüssigkeitssignal	Nein	0	100
	Ja	1	
Gefäßstieldurchgängigkeit arteriell	Nein	0	100
	Ja	1	
Gefäßstieldurchgängigkeit venös	Nein	0	100
	Ja	1	

Tabelle 4: Multifaktorielles MRT-Bewertungsschema unter Kontrastmittelanwendung (Parameter: Kortikalisdurchgängigkeit, ossäre Durchbauung proximal bzw. distal, Fettsignal im Markraum proximal bzw. distal, fehlendes paraossales Flüssigkeitssignal, Gefäßstieldurchgängigkeit arteriell bzw. venös). Darstellung des erzielten positiven Kriteriumanteils („ja“) in der Referenzgruppe je Item in %.



Abbildung 22: Darstellung des Kriteriums ossäre Durchbauung (siehe Pfeil) des entwickelten MR-angiographischen Bewertungsschemas (MR-BHS). Aufnahme aus vorliegender Studiengruppe (mit freundlicher Unterstützung des Instituts für Radiologie und Neuroradiologie, ukb).

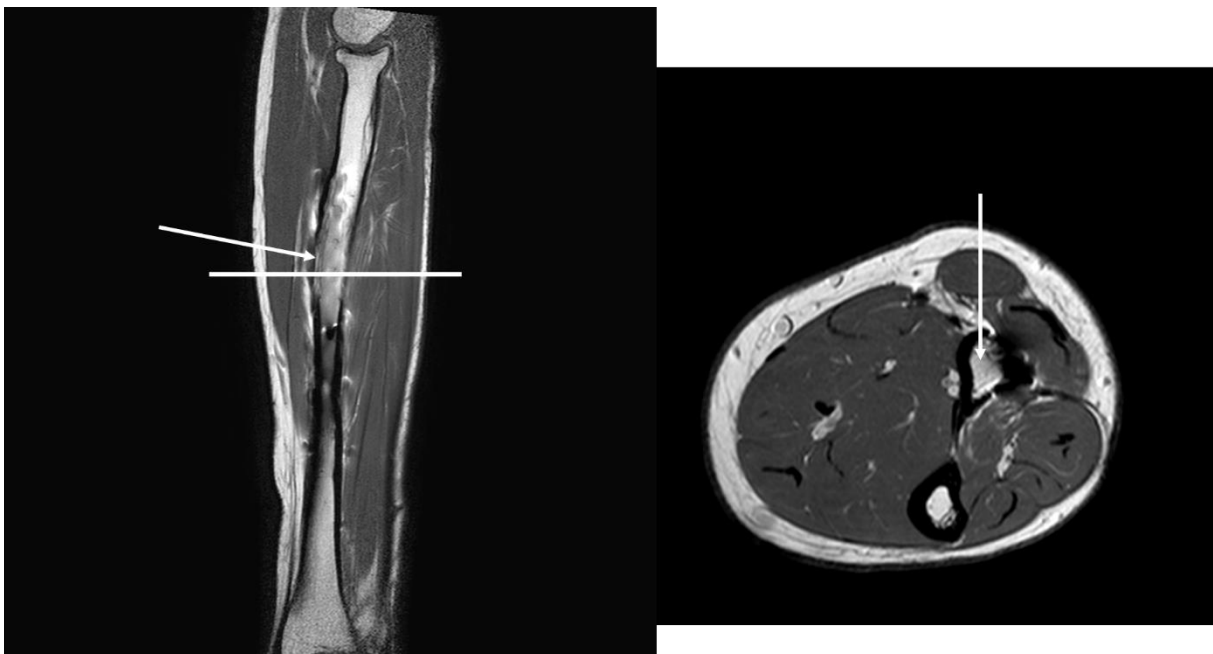


Abbildung 23: Darstellung des Kriteriums Fettsignal Markraum (siehe Pfeile) des entwickelten MR-angiographischen Bewertungsschemas (MR-BHS). Schnitthöhe Bild rechts siehe horizontale Schnittlinie links. Aufnahme aus vorliegender Studiengruppe (mit freundlicher Unterstützung des Instituts für Radiologie und Neuroradiologie, ukb).



Abbildung 24: Darstellung des Kriteriums Anastomosedurchgängigkeit (siehe Pfeil, mit Artefakt durch Gefäßclip bei distal durchgängigen Gefäßtransplantat) des entwickelten MR-angiographischen Bewertungsschemas (MR-BHS). Aufnahme aus vorliegender Studiengruppe (mit freundlicher Unterstützung des Instituts für Radiologie und Neuroradiologie, ukb).

Zur Gegenüberstellung Röntgen- und MR-angiographischer Bewertungsverfahren wurden die kontrastmittelgestützten MR-angiographischen Aufnahmen auf experimenteller Grundlage ebenfalls anhand des BHS befundet (siehe Abbildung 25). Im Median wurde ein Gesamtscore von 69,2 % (15,4 % - 100 %) erzielt. Während sich im Vergleich der proximalen BHS-Ergebnisse exakt gleiche Medianwerte zeigen (69,2 %), weist die magnetresonanztomographischer Bildgebung einen um 21,4 % erhöhter distalen Score-Wert gegenüber einer Bewertung anhand röntgenologisch gestützter Bildgebung auf. Bei Betrachtung der medianen Gesamtscore-Ergebnisse wurde eine Erhöhung des magnetresonanztomographisch gestützter BHS um 9,1 % gegenüber des röntgenologisch gestützten BHS dokumentiert (siehe Tabelle 5).

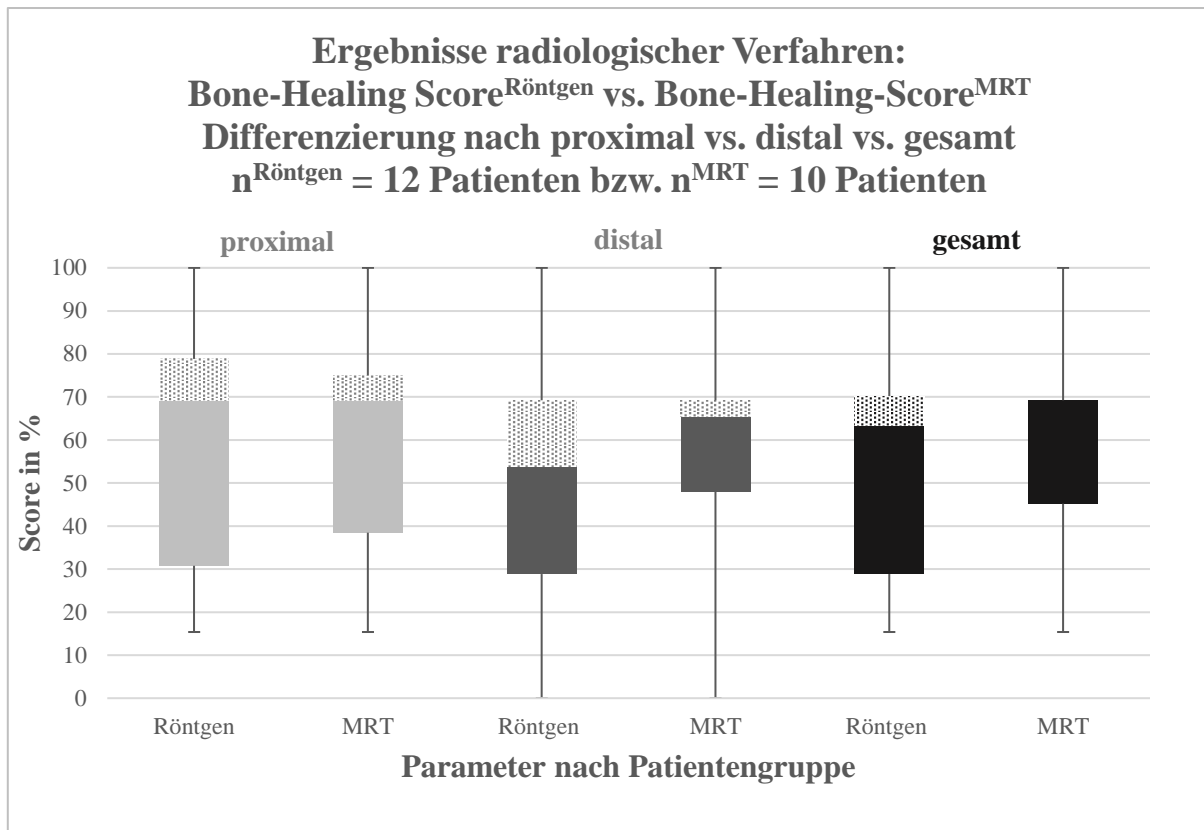


Abbildung 25: Box-Plot-Darstellung der Ergebnisse des röntgenologisch und MRT-gestützten BHS (X-Achse) (Parameter: periostale Reaktion, Kallusumbau, Osteotomiedurchbau, Transplantataspekt). Prozentuale Angaben (Y-Achse) gemessen am Maximalwert von 13 (proximal bzw. distal) bzw. 26 Punkten (gesamt). Spannweite 0 – 100 %. Darstellung von Minimum, 25. Perzentile, Median, 75. Perzentile und Maximum. Mann-Whitney-U-Test (MRT proximal) $p = 0,27$, (MRT distal) $p = 0,09$, (MRT gesamt) $p = 0,18$.

Parameter	$\frac{\text{BHS}^{\text{MRT}} \text{ proximal in } \%}{\text{BHS}^{\text{Röntgen}} \text{ proximal in } \%}$	$\frac{\text{BHS}^{\text{MRT}} \text{ distal in } \%}{\text{BHS}^{\text{Röntgen}} \text{ distal in } \%}$	$\frac{\text{BHS}^{\text{MRT}} \text{ gesamt in } \%}{\text{BHS}^{\text{Röntgen}} \text{ gesamt in } \%}$
Verhältniswert	1,0	1,3	1,1

Tabelle 5: Gegenüberstellung der proximalen, distalen und Gesamt-Ergebnisse des MRT- und röntgenologisch gestützten BHS (Parameter: periostale Reaktion, Kallusumbau, Osteotomiedurchbau, Transplantataspekt). Angabe des jeweiligen Anteils des BHS^{MRT} am $\text{BHS}^{\text{Röntgen}}$ in %.

Hier werden die spezifischen Ergebnisse der MRT-Referenz-Patientengruppe im Hinblick auf den konventionellen und modifizierten Weiland-Score in Abbildung 26 dargestellt. Es ergab sich ein um 13,7 % erhöhter medianer Score-Wert für das modifizierte gegenüber dem konventionellen Weiland-Schema als Ausdruck einer besseren Transplantatzustand-Bewertung auf Grundlage röntgenologischer Diagnostik.

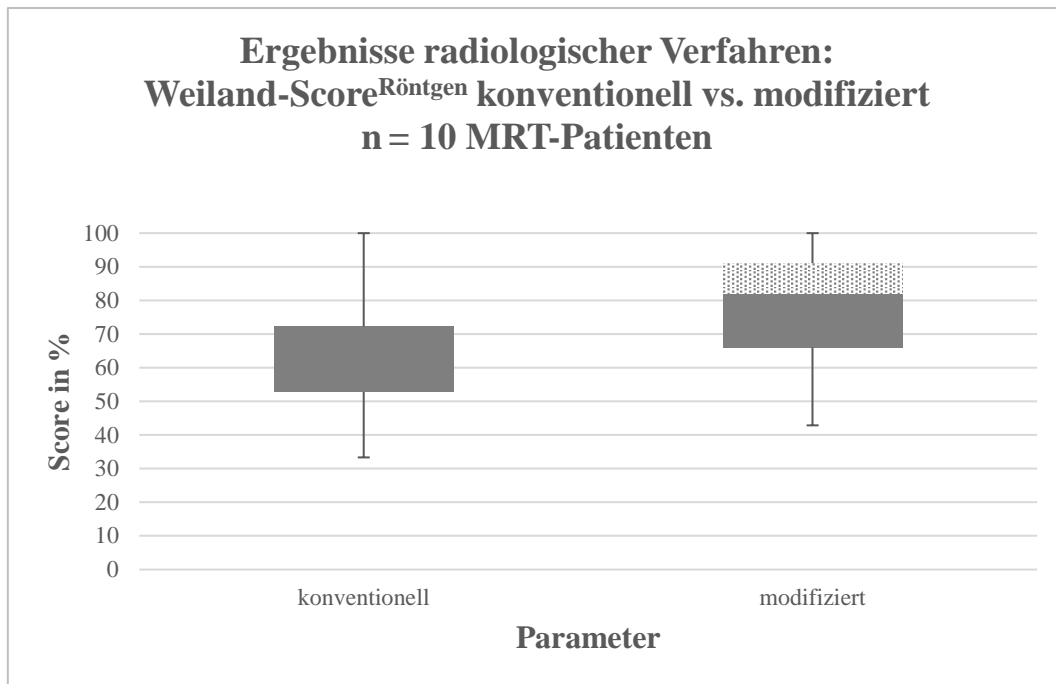


Abbildung 26: Box-Pot-Darstellung der Ergebnisse des konventionellen bzw. modifizierten Weiland-Scores (X-Achse) auf Grundlage röntgenologischer Bildgebung für die MRT-Referenzgruppe $n = 10$ (Parameter: Resorptionsverhalten bzw. Knocheneinheilung, Knochenhypertrophie). Prozentuale Angaben (Y-Achse) gemessen am Maximalwert von 18 Punkten (konventionell; Mann-Whitney-U-Test $p = 0,1$) bzw. 14 Punkten (modifiziert; $p = 0,15$). Spannweite 0 – 100 %. Darstellung von Minimum, 25. Perzentile, Median, 75. Perzentile und Maximum.

5.6 Ergebnisse in Abhängigkeit postoperativer Komplikationen

Als Komplikationen in der Empfängerregion wurden die Pseudarthrose, der Plattenbruch und die bakterielle Infektion definiert. Dabei lag bei keinem Patienten ($n = 0$) nur eine der genannten Komplikationen vor, die Kombinationen belaufen sich wie folgt:

- Pseudarthrose + Plattenbruch: $n = 2$
- Pseudarthrose + bakterielle Infektion: $n = 3$

Es zeigten sich bei insgesamt 35,7 % der Patienten ($n = 5$) postoperative Komplikationen. 64,3 % der Patienten ($n = 9$) verblieben unter Berücksichtigung der genannten Kriterien postoperativ komplikationsfrei. Die nachfolgende Darstellung erfolgt auf Grundlage der postoperativen Komplikationsgruppe (K), die den Ergebnissen des postoperativen komplikationsfreien Patientenkollektivs (NK) gegenübergestellt wird.

5.6.1 Klinische Angaben zur Komplikationsgruppe K

Für das Patientenkollektiv K erfolgte dabei in 14,3 % ein Radius-, 50 % ein Ulna- und in 50 % ein kombinierter Radius-Ulna-Ersatz. Es fanden sich hinsichtlich der arteriellen Anastomosetechnik häufiger End-zu-Seit- (60 %) als End-zu-End-Anastomosen (40 %). Bezüglich der venösen Anastomosetechnik wurden in diesem Patientenkollektiv häufiger End-zu-End-Anastomosen (80 %) durchgeführt. Unter Vorliegen von Komplikationen wurde zu 60 % die A. fibularis auf die A. ulnaris anastomosiert und in 50 % die V. fibularis inkl. Begleitvene(n) auf mehr als eine Vene im Empfängergebiet anastomosiert (Mehrfachanastomose). Die arteriellen und venösen Anastomosen wurden dabei in allen Fällen (100 %) im mittleren Unterarmdrittel vorgenommen. Bei 40 % wurde eine Spongiosaplastik im Rahmen der Fibulatransplantation vorgenommen. In der Gruppe K wurden in 60 % Spalthaut im Rahmen der FVFT transplantiert (*, exakter Test nach Fisher, zweiseitige exakte Signifikanz $p = 0,03$).

5.6.2 Subjektive Patientenzufriedenheit

Bezüglich des SF-36-Fragebogens erlangte die Patientengruppe K ($n = 5$) einen medianen Score von 44,4 Punkten (37,7 Punkte - 54,3 Punkte) in Bezug auf die physischen Gesundheitskomponenten bei Transformation auf eine lineare Skalierung zwischen 0 und 100. Die Patientengruppe NK ($n = 9$) erzielte einen medianen Score von 40,5 Punkten (29,9 - 60 Punkte), zu entnehmen aus Abbildung 27. Ein Wert von 100 stellt dabei eine maximale, ein Wert von 0 eine minimale Lebensqualität dar. Hinsichtlich der psychischen Gesundheitskomponenten wurde für die Patientengruppe K ($n = 5$) ein medianer Score von 52,5 Punkten (35,8 Punkte - 62,2 Punkte), für die Patientengruppe NK ($n = 9$) ein medianer Score von 49,9 Punkten (14,7 Punkte - 63,5 Punkte) erzielt (siehe Abbildung 28). Ein Wert von 100 stellt dabei eine maximale, ein Wert von 0 eine minimale Lebensqualität dar.

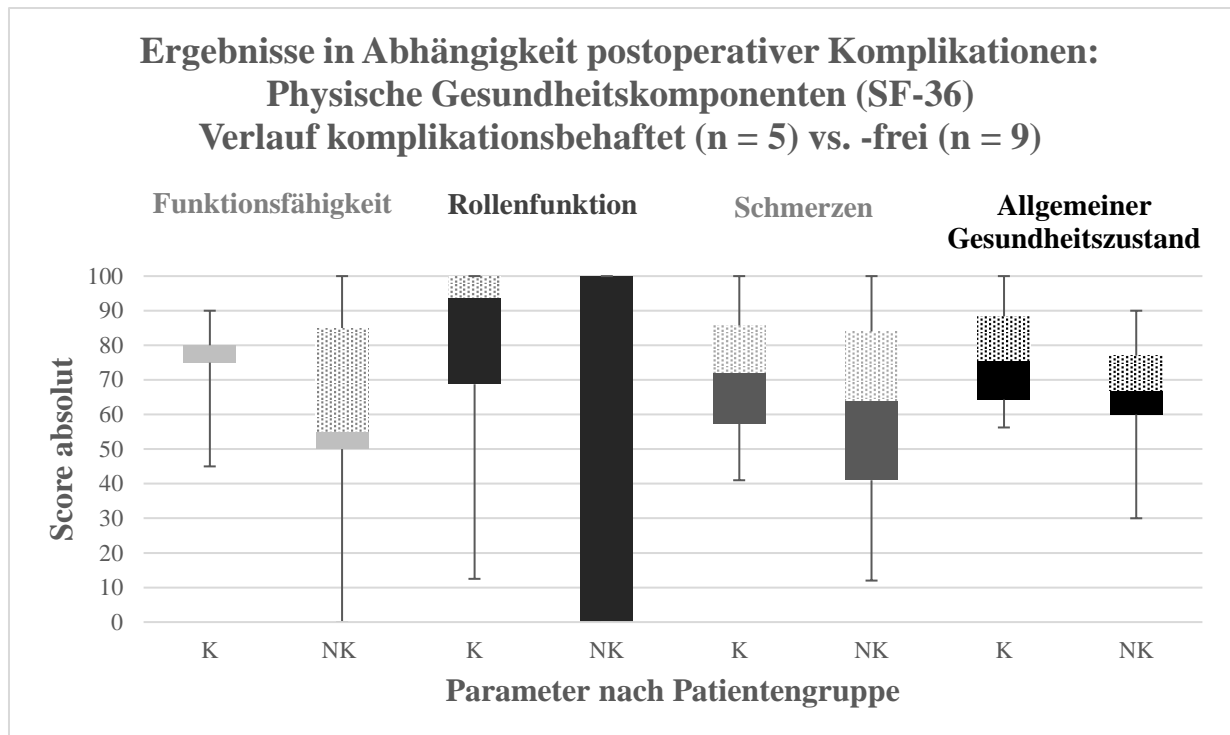


Abbildung 27: Box-Plot-Darstellung der SF-36- Parameter (Subskalen) Funktionsfähigkeit, Rollenfunktion, Schmerzen differenziert nach postoperativer Komplikationsgruppe (K) und postoperativ komplikationsfreier Patientengruppe (NK) (X-Achse). Angabe von Absolutwerten bei einer Spannweite von 0 – 100 Punkten (Y-Achse). Darstellung von Minimum, 25. Perzentile, Median, 75. Perzentile und Maximum.

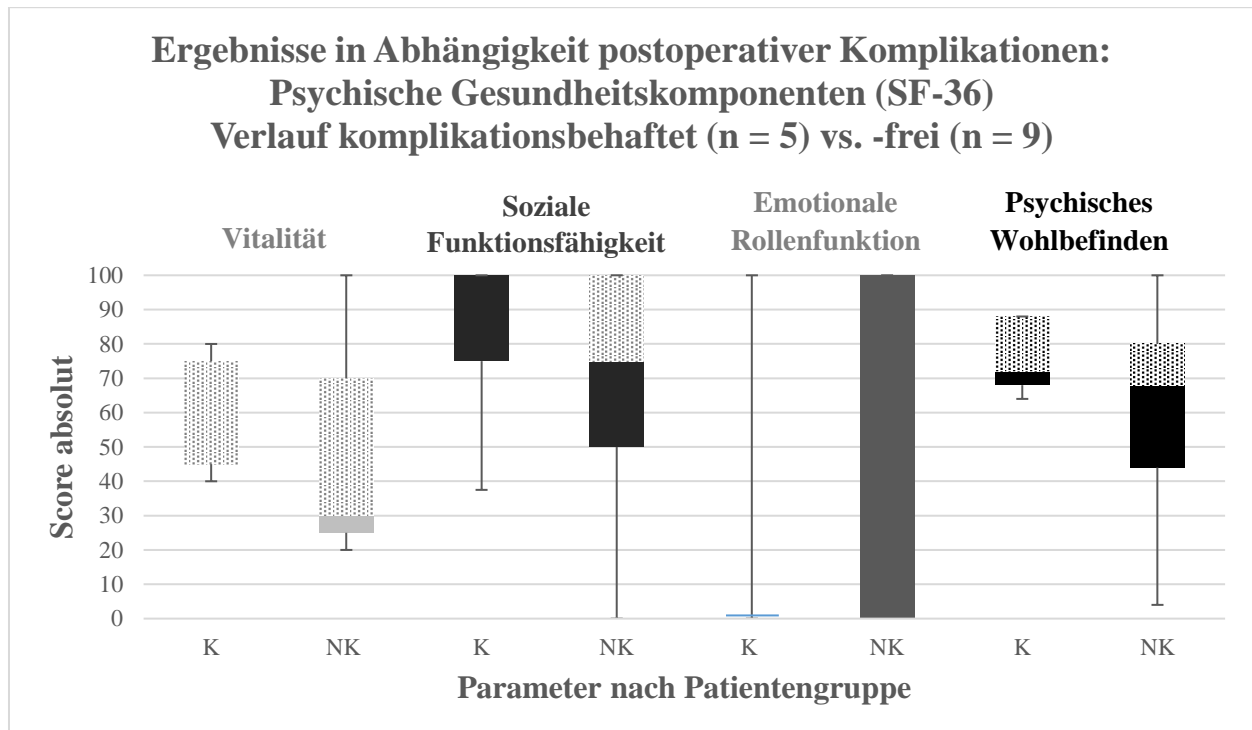


Abbildung 28: Box-Plot-Darstellung der SF-36-Parameter (Subskalen) Vitalität, soziale Funktionsfähigkeit, emotionale Rollenfunktion und psychisches Wohlbefinden differenziert nach postoperativer Komplikationsgruppe (K) und postoperativ komplikationsfreier Patientengruppe (NK) (X-Achse). Angabe von Absolutwerten (Spannweite 0 - 100 Punkte) (Y-Achse). Darstellung von Minimum, 25. Perzentile, Median, 75. Perzentile und Maximum.

5.6.3 Subjektive muskuloskeletale Funktionalität

Im Rahmen des DASH-Selbstbeurteilungsbogens erzielte die Patientengruppe K (n = 5) für das Basismodul nach Transformation auf eine lineare Skalierung zwischen 0 und 100 einen Medianwert von 22,5 Punkten (7,5 Punkte- 47,5 Punkte). Die Patientengruppe NK (n = 9) erreichte einen Medianwert von 25,8 Punkten (0 Punkte - 60,7 Punkte). Ein Ergebnis von 0 bilden eine sehr gute Funktionalität, ein Ergebnis von 100 eine sehr hohe Einschränkung ab. Das optionale Modul mit den beiden Untermodulen (Sport und Musik bzw. Arbeit und Beruf) fand äquivalent zu Kapitel 5.3 bei der Auswertung keine Berücksichtigung.

Im Rahmen des MSTS-Enneking-Scores erzielte die Gruppe K einen medianen Score von 90 % (29 % - 96,7 %) für die untere Extremität gemessen an der Maximalpunktzahl von 30 Punkten. Bezüglich der oberen Extremität wurde ein medianer Score von 76,7 % (15 - 90 %) gemessen an der Maximalpunktzahl von 30 Punkten erreicht.

Die Gruppe NK erreichte einen medianen Score von 96,7 % (83,3 % - 100 %) für die untere Extremität bzw. 70 % (56,7 % - 100 %) für die obere Extremität gemessen an der Maximalpunktzahl von 30 Punkten. Ein Ergebnis von 0 bildet dabei ein sehr schlechtes Gesamtoutcome, ein Ergebnis von 30 ein sehr gutes Gesamtoutcome ab.

5.6.4 Funktionsparameter

Die Ergebnisse der motorischen und sensorischen Funktionsparameter werden analog zu Kapitel 5.3 durch die Messblätter für die oberen bzw. unteren Gliedmaßen und Finger (ROM) und den Rosén- und Lundborg-Score dargestellt. Der Parameter Schmerz spiegelt sich sowohl als Bestandteil im Rosén- und Lundborg-Score als auch anhand der visuellen bzw. numerischen Analogskala wider.

5.6.4.1 Parameter Motorik

In Bezug auf die objektiv erhobenen motorischen Ergebnisse zeigen sich im Vergleich zur nicht-operierten Gegenseite insbesondere für die Gruppe K eine Reduzierung der ROM₂ (Pro- und Supination) um 67,8 % gegenüber der Patientengruppe NK sowie für die Gruppe K eine Reduzierung der ROM₁ (Dorsalextension/ Palmarflexion/ Ulna-/ Radialabduktion im Handgelenk) um 28,6 % gegenüber der Patientengruppe NK. Die Kraft im Faustschluss zeigt

sich für die komplikationsfreie Patientengruppe NK um 25 % gegenüber der Gruppe K verringert. Die graphische Darstellung ist Abbildung 29 zu entnehmen, wobei sich für Gruppe NK eine deutlich größere Streubreite zeigt.

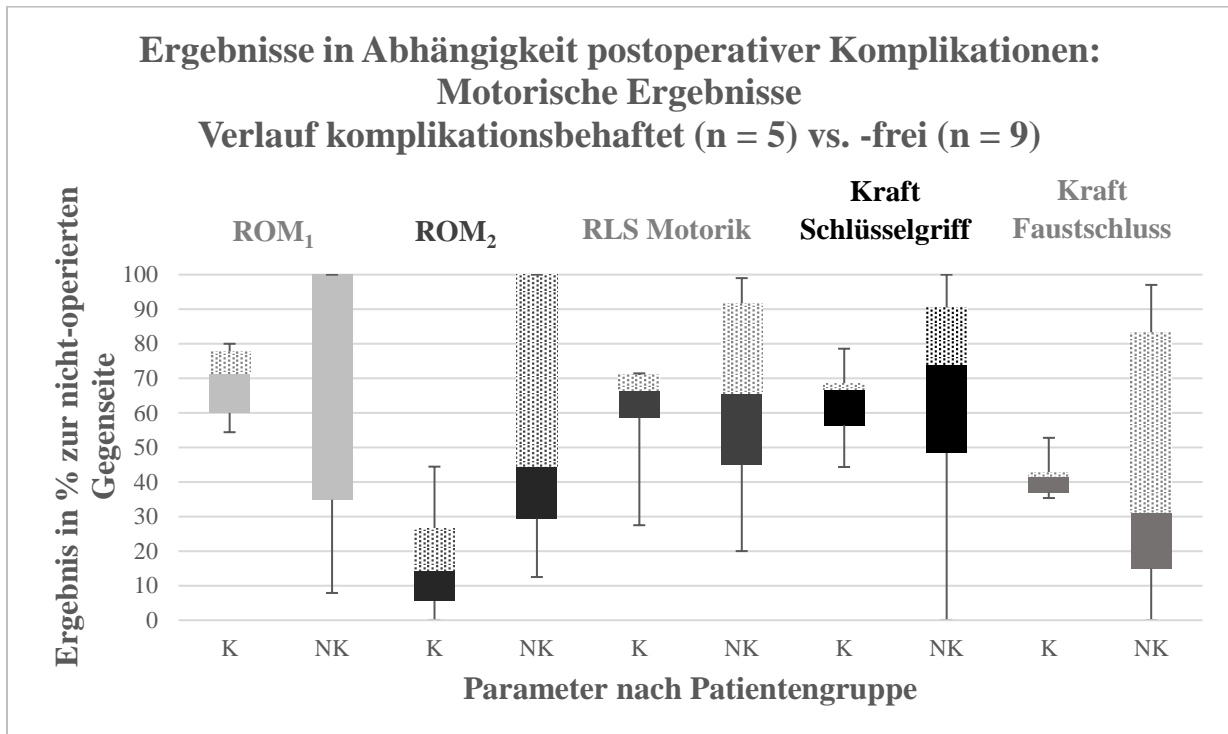


Abbildung 29: Box-Plot-Darstellung des Parameters Motorik (X-Achse) anhand des ROM₁ (Handgelenk Dorsalextension/ Palmarflexion/ Ulna-/ Radialabduktion; Mann-Whitney-U-Test $p = 0,8$) und ROM₂ (Handgelenk Pronation/ Supination; $p = 0,04$) sowie des Rosén-Lundborg-Scores RLS (Untermodul Motorik; $p = 0,3$) und der Kraft anhand Pinchmeter (Schlüsselgriff; $p = 0,7$) und Dynamometer (Faustschluss; $p = 0,8$) differenziert nach postoperativer Komplikationsgruppe (K) und postoperativ komplikationsfreier Patientengruppe (NK). Prozentuale Darstellung (Y-Achse) im Vergleich zur nicht-operierten Gegenseite (Spannweite 0 - 100 %). Darstellung von Minimum, 25. Perzentile, Median, 75. Perzentile und Maximum.

Im Rahmen des MSTS-Enneking-Scores erzielte die Gruppe K einen medianen Score von 76,7 % (15 % - 90 %) für die obere Extremität, die Gruppe NK 70 % (56,7 % - 100 %) gemessen an der Maximalpunktzahl von 30 Punkten. Bezüglich der unteren Extremität wurde für die Gruppe K ein medianer Score von 90 % (29 % - 96,7 %), für die Gruppe NK ein medianer Score von 96,7 % (83,3 % - 100 %) - gemessen an der Maximalpunktzahl von 30 Punkten - erreicht. Die differenzierte Darstellung der einzelnen Items ist Tabelle 6 zu entnehmen.

Parameter obere Extremität (OEX)	Score OEX in %	Score OEX in %	Parameter untere Extremität (UEX)	Score UEX in %	Score UEX in %
	Gruppe K	Gruppe NK		Gruppe K	Gruppe NK
	Median	Median		Median	Median
	(Min - Max)	(Min - Max)		(Min - Max)	(Min - Max)
Schmerz	80 (60 - 100)	100 (40 - 100)	Schmerz	100 (100 - 100)	100 (60 - 100)
Funktion	60 (60 - 80)	80 (60 - 100)	Funktion	100 (80 - 100)	100 (80 - 100)
Emotionale Akzeptanz	60 (60 - 80)	80 (40 - 100)	Emotionale Akzeptanz	80 (60 - 80)	80 (60 - 100)
Positionieren der Hand	100 (80 - 100)	80 (60 - 100)	Hilfsmittel	80 (80 - 100)	100 (80 - 100)
Fingerfertigkeit/ Geschicklichkeit	80 (60 - 100)	100 (60 - 100)	Laufen	100 (80 - 100)	100 (100 - 100)
Fähigkeit zum Anheben	100 (60 - 100)	60 (60 - 100)	Gangart	100 (100 - 100)	100 (100 - 100)

Tabelle 6: Vergleichende Darstellung der medianen Scoree für die MSTS-Enneking-Items für die obere Extremität OEX (Schmerz, Funktion, emotionale Akzeptanz, Positionieren der Hand, Fingerfertigkeit/ Geschicklichkeit, Fähigkeit zum Anheben) und die untere Extremität UEX (Schmerz, Funktion, emotionale Akzeptanz, Hilfsmittel, Laufen, Gangart) gemessen an der Gesamtpunktzahl von jeweils 5 Punkten für die Gruppen K und NK. Spannweite 0 % bis 100 %. Angabe von Minimum und Maximum in Klammern.

5.6.4.2 Parameter Sensorik

Sensorisch erzielte die Patientengruppe K (n = 5) im Rosén-Lundborg-Score einen medianen Score von 94,4 % (64,1 % - 102 %), die Patientengruppe NK (n = 9) einen medianen Score von 93,8 % (66,4 % - 100 %). Die Angabe erfolgt prozentual im Vergleich zur nicht-operierten Gegenseite.

5.6.4.3 Parameter Schmerz

Der Rosén-Lundborg-Score spiegelt für die Gruppe K mit einem medianen Score von 100 % (83,3 % - 100 %) eine vollständige Schmerzfreiheit des Patientenkollektivs wider. Die Gruppe NK erzielte ebenfalls einen medianen Score von 100 % (50 % - 100 %). Differenziert nach Region (Spender- bzw. Empfängerregion) und quantitativem Schmerzausmaß in Ruhe bzw. bei Belastung ergibt sich auf Grundlage der VAS bei Betrachtung der Medianwerte ausschließlich bei Belastung der Empfängerregion mit einem Median von 3 Punkten (0 Punkte- 7 Punkte) für Gruppe K bzw. 2 Punkten (0 Punkte - 10, Punkte) für Gruppe NK eine auftretende Schmerzsymptomatik. In Ruhe beträgt der Median 0 Punkte (0 Punkte - 0 Punkte) für Gruppe K bzw. 0 Punkte (0 Punkte - 6 Punkte) für Gruppe NK. Hinsichtlich der Spenderstelle liegt der Score im Median in Ruhe bei 0 Punkten (0 Punkte - 0 Punkte) für Gruppe K sowie bei 0 Punkten (0 Punkte - 2 Punkte) für Gruppe NK. Bei Belastung ergibt sich für die Spenderregion ein Medianwert von 0 Punkten (0 Punkte - 1,5 Punkte) für Gruppe K bzw. von 0 Punkten (0 Punkte - 5,5 Punkte) für Gruppe NK. Die Verteilung erwies sich über die Kategorie Komplikation als identisch (Mann-Whitney-U-Test $p = 1$ bzw. $p = 0,51$ bzw. $p = 0,8$ bzw. $p = 0,61$).

5.6.5 Radiologische Verfahren

Zum jeweiligen Nachuntersuchungszeitpunkt zeigten sich in der Patientengruppe K 40 % ($n = 2$) der Transplantate radiologisch konsolidiert. Dabei erfolgte die ossäre Integration bei 20 % ($n = 1$) innerhalb der ersten 12 Monate postoperativ. Für die Patientengruppe NK ergab sich eine radiologische Konsolidierungsrate von 66,7 % ($n = 6$) zum Nachuntersuchungszeitpunkt, wobei bei 33,3 % der Patienten ($n = 3$) eine ossäre Durchbauung innerhalb der ersten 12 Monate postoperativ vorlag. Eine relevante Knochenhypertrophie von ≥ 20 % wiesen $n = 2$ Patienten (Gruppe K) bzw. $n = 1$ Patient (Gruppe NK) auf.

Hinsichtlich der angewendeten radiologisch gestützten Scoring-Systeme erzielte die Gruppe K im BHS auf Basis röntgenologischer Bildgebung für das distale Transplantatende einen im Median um 29,4 % erniedrigten Score-Wert gegenüber der komplikationsfreien Patientengruppe (Gruppe NK). Das mediane Gesamtergebnis unter Einbezug proximaler und distaler Bewertung des jeweiligen Transplantatendes lag für die Gruppe K um 8,6 % unter dem Gesamtergebnis der Gruppe NK. Die graphische Darstellung ist Abbildung 30 zu entnehmen.

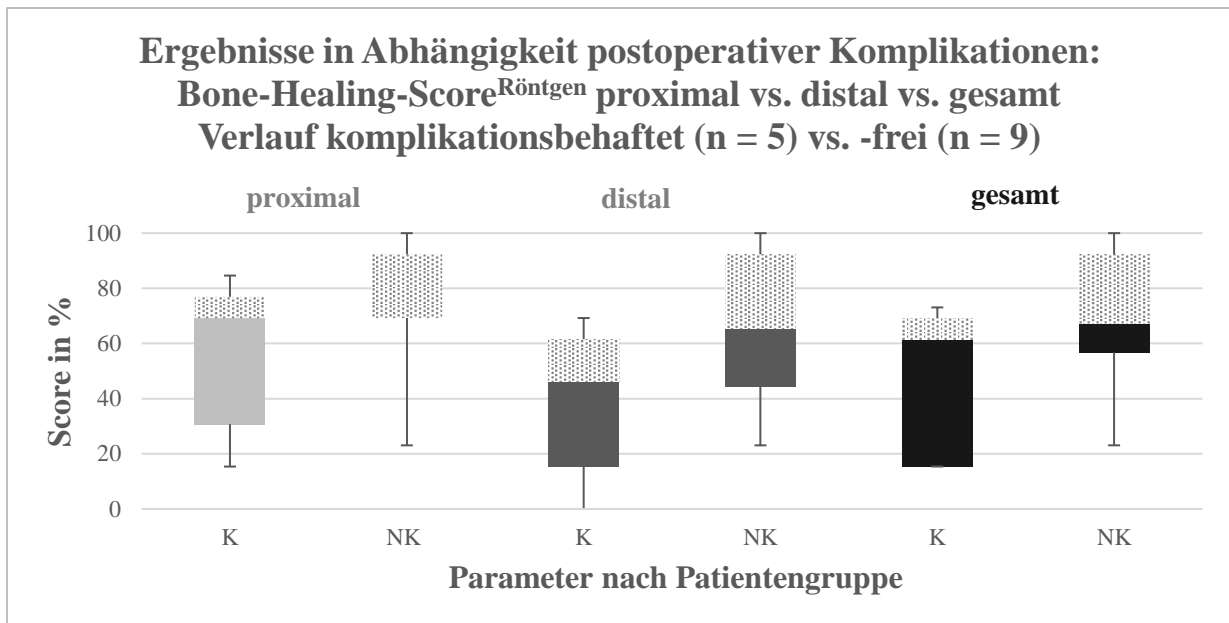


Abbildung 30: Box-Plot-Darstellung der proximalen und distalen Ergebnisse sowie des Gesamtscores des röntgenologisch gestützten BHS differenziert nach postoperativer Komplikationsgruppe (K) und postoperativ komplikationsfreier Patientengruppe (NK) (Parameter: periostale Reaktion, Kallusumbau, Osteotomiedurchbau, Transplantataspert) (X-Achse). Prozentuale Angaben (Y-Achse) gemessen am Maximalwert von 13 Punkten (proximal; Mann-Whitney-U-Test $p = 0,76$ bzw. distal; $p = 0,34$) bzw. 26 Punkten (Gesamtscore; $p = 0,43$). Spannweite 0 – 100 %. Darstellung von Minimum, 25. Perzentile, Median, 75. Perzentile und Maximum.

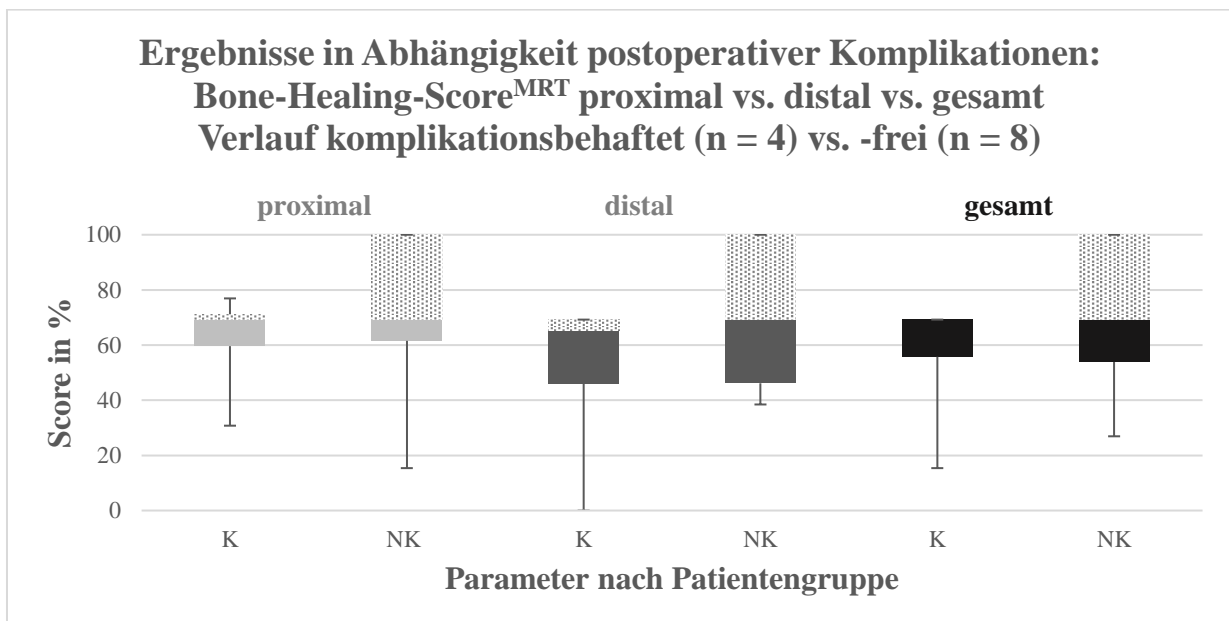


Abbildung 31: Box-Plot-Darstellung der proximalen und distalen Ergebnisse sowie des Gesamtscores des MRT-gestützten BHS differenziert nach postoperativer Komplikationsgruppe (K) und postoperativ komplikationsfreier Patientengruppe (NK) (Parameter: periostale Reaktion, Kallusumbau, Osteotomiedurchbau, Transplantataspert) (X-Achse). Prozentuale Angaben (Y-Achse) gemessen am Maximalwert von 13 Punkten (proximal; Mann-Whitney-U-Test $p = 1$ bzw. distal; $p = 0,76$) bzw. 26 Punkten (Gesamtscore; $p = 0,76$). Spannweite 0 – 100 %. Darstellung von Minimum, 25. Perzentile, Median, 75. Perzentile und Maximum.

Für die Beurteilung des BHS auf Grundlage der MRT-Bildgebung (siehe Abbildung 31) erzielte die Gruppe K gegenüber der Gruppe NK distal einen um 5,6 % erniedrigten Medianwert.

Bei Gegenüberstellung der beiden Patientengruppen hinsichtlich des konventionellen und modifizierten Weiland-Scores (siehe Abbildung 32) erreichte Gruppe NK einen um 18,2 % (konventionell) bzw. 35,3 % (modifiziert) erhöhten Medianwert gegenüber Gruppe K.

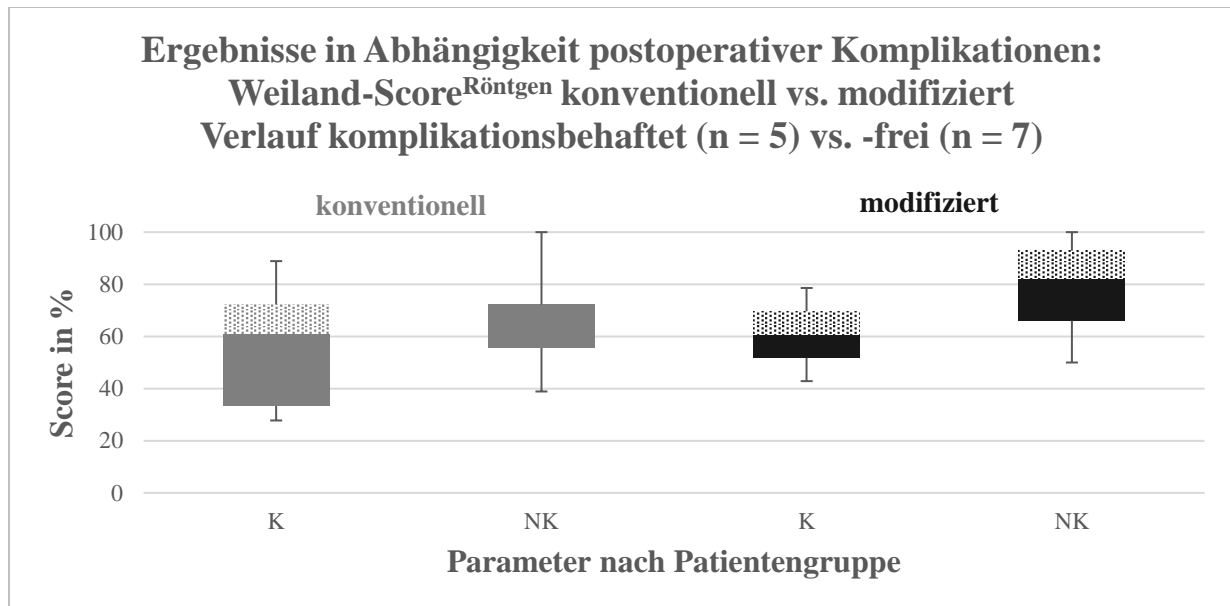


Abbildung 32: Box-Plot-Darstellung der Ergebnisse des konventionellen bzw. modifizierten Weiland-Scores auf Grundlage röntgenologischer Bildgebung differenziert nach postoperativer Komplikationsgruppe (K) und postoperativ komplikationsfreier Patientengruppe (NK) (Parameter: Resorptionsverhalten bzw. Knocheneinheilung, Knochenhypertrophie) (X-Achse). Prozentuale Angaben (Y-Achse) gemessen am Maximalwert von 18 Punkten (konventionell; Mann-Whitney-U-Test $p = 0,34$) bzw. 14 Punkten (modifiziert; $p = 0,41$). Spannweite 0 – 100 %. Darstellung von Minimum, 25. Perzentile, Median, 75. Perzentile und Maximum.

Unter differenzierter Betrachtung der beiden Patientengruppen im Hinblick auf das multifaktorielle Bewertungsschema auf Grundlage der MR-angiographischen Bildgebung wurde eine medianer Punktwert von 7,5 Punkten (93,8 %, Gruppe K) bzw. von 7 Punkten (87,5 %, Gruppe NK) bei einer Maximalpunktzahl von 8 Punkten erzielt. Eine Darstellung der Item-Einzelergebnisse ist Tabelle 7 zu entnehmen. Hierbei wies Gruppe NK einen größeren Patientenanteil für ein jeweils positives Vorliegen („ja“) der Items „ossäre Durchbauung distal“ und „Fettsignal Markraum proximal“ als Gruppe K auf (+ 60 % bzw. + 33,3 %). Für das Item „ossäre Durchbauung proximal“ fand sich in der Gruppe K ein größerer Patientenanteil (+ 25 %) mit vorliegendem positiven Parameter als in Gruppe NK.

Kriterium	Parameter in Patientengruppe K (n = 4) vorliegend („ja“) in %	Parameter in Patientengruppe NK (n = 5) vorliegend („ja“) in %
Kortikalisdurchgängigkeit	75	80
Ossäre Durchbauung proximal	75	60
Ossäre Durchbauung distal	50	80
Fettsignal Markraum proximal	75	100
Fettsignal Markraum distal	100	100
Kein paraossales Flüssigkeitssignal	100	100
Gefäßstieldurchgängigkeit arteriell	100	100
Gefäßstieldurchgängigkeit venös	100	100

Tabelle 7: Multifaktorielles Bewertungsschema nach Mutze auf Grundlage MR-angiographischer Bildgebung unter Kontrastmittelanwendung (Parameter: Kortikalisdurchgängigkeit, ossäre Durchbauung proximal bzw. distal, Fettsignal im Markraum proximal bzw. distal, fehlendes paraossales Flüssigkeitssignal, Gefäßstieldurchgängigkeit arteriell bzw. venös). Darstellung des erzielten positiven Kriteriumanteils („ja“) differenziert nach postoperativer Komplikationsgruppe (K) und postoperativ komplikationsfreier Patientengruppe (NK) je Item in %.

5.7 Ergebnisse in Abhängigkeit der Indikationsgruppe

Übergreifend lassen sich die vorliegenden Indikationen, die eine freie, vaskularisierte Fibulatransplantation erforderlich gemacht haben, in 4 Indikationsgruppen einordnen:

- Indikationsgruppe Osteomyelitis (OM), n = 5
- Indikationsgruppe Pseudarthrose (PA), n = 7
- Indikationsgruppe Tumor (T), n = 1
- Indikationsgruppe Arthrose (A), n = 1

In der nachfolgenden Darstellung wird die infektiöse Indikationsgruppe (I) mit n = 5 Patienten entsprechend der Osteomyelitis-Indikationsgruppe OM einer nicht-infektiösen Indikationsgruppe (NI = PA + T + A) mit n = 9 Patienten gegenübergestellt.

5.7.1 Klinische Angaben zur Indikationsgruppe I

Im Patientenkollektiv I (n = 5) erfolgte in 50 % ein Radius-, 25 % ein Ulna- und in 25 % ein kombinierter Radius-Ulna-Ersatz, wobei sich hinsichtlich der arteriellen Anastomosetechnik häufiger End-zu-Seit- (75 %) als End-zu-End-Anastomosen (25 %) fanden. Bezüglich der venösen Anastomosetechnik wurden in diesem Patientenkollektiv häufiger End-zu-End-Anastomosen (75 %) durchgeführt. Es wurde dabei die A. fibularis zu je 50 % auf die A. radialis bzw. A. ulnaris anastomosiert. Bezüglich der venösen Anastomose verteilen sich die Empfängergefäße zu je 25 % auf die jeweilige Subkutanvene, die jeweilige Begleitvene, die V. cephalica bzw. im Rahmen einer Mehrfachanastomose auf mehrere der genannten Gefäße gleichzeitig. Die arteriellen und venösen Anastomosen wurden dabei in allen Fällen (50 %) im mittleren Unterarmdrittel vorgenommen. In der Gruppe I wurde häufiger (50 %) als beim der nicht-infektiösen Patientenkollektiv NI (20 %) eine Spongiosaplastik im Rahmen der Fibulatransplantation vorgenommen. Lagen eine Infektindikation vor, wurde darüber hinaus häufiger (50 %) als bei der nicht-infektiösen Patientengruppen (10 %) Spalthaut im Rahmen der FVFT transplantiert. Im Vergleich zur nicht-infektiösen Patientengruppe wurde häufiger ein Hauptlappen mittransplantiert (50 % für Gruppe I; 30 % für Gruppe NI).

5.7.2 Subjektive Patientenzufriedenheit

Die Patientengruppe I erlangte hinsichtlich des SF-36-Fragebogens einen medianen Score von 44,37 Punkten (38,5 Punkte - 53 Punkte) in Bezug auf die physischen Gesundheitskomponenten bei Transformation auf eine lineare Skalierung zwischen 0 und 100. Die Patientengruppe NI erzielte einen medianen Score von 40,49 Punkten (29,87 Punkte - 56 Punkte). Ein Wert von 100 stellt dabei eine maximale, ein Wert von 0 eine minimale Lebensqualität dar. Die graphische Darstellung ist Abbildung 33 zu entnehmen.

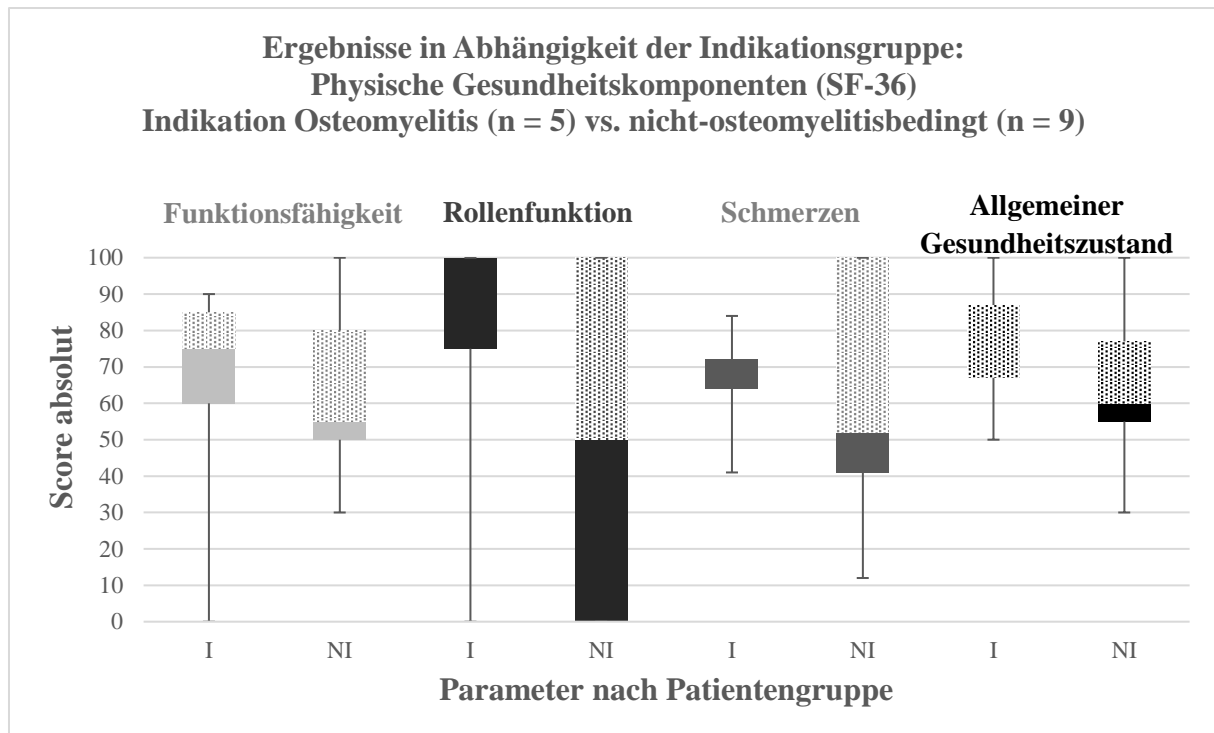


Abbildung 33: Box-Plot-Darstellung der SF-36- Parameter (Subskalen) Funktionsfähigkeit, Rollenfunktion, Schmerzen und allgemeiner Gesundheitszustand differenziert nach (infektiöser) Indikationsgruppe Osteomyelitis (I) und nicht-osteomyelitisbedingter (infektfreier) Indikationsgruppe (NI) (X-Achse). Angabe von Absolutwerten (Spannweite 0 - 100 Punkte) (Y-Achse). Darstellung von Minimum, 25. Perzentile, Median, 75. Perzentile und Maximum.

Bezüglich der psychischen Gesundheitskomponenten wurde für die Patientengruppe I (n = 5) ein medianer Score von 49,9 Punkten (32,6 Punkte - 63,5 Punkte), für die Patientengruppe NI (n = 9) ein medianer Score von 52 Punkten (14,7 Punkte - 63 Punkte) erzielt. Ein Wert von 100 stellt dabei eine maximale, ein Wert von 0 eine minimale Lebensqualität dar. Die graphische Darstellung ist Abbildung 34 zu entnehmen.

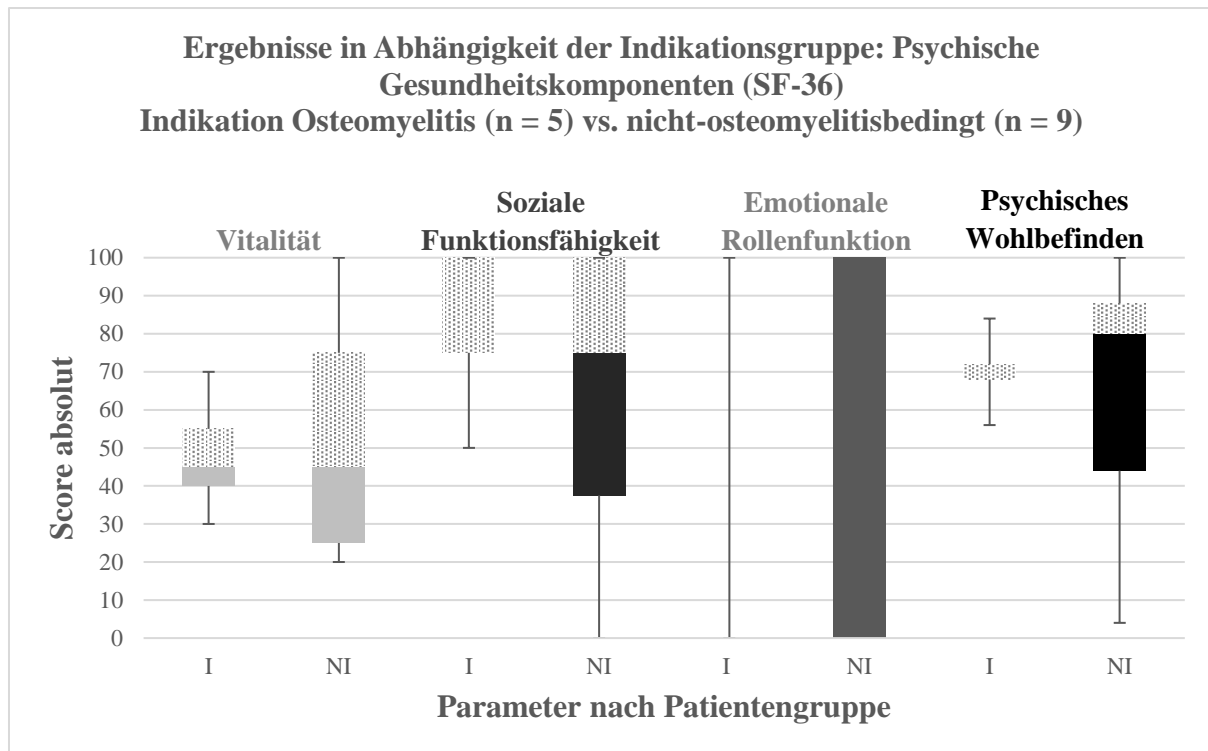


Abbildung 34: Box-Plot-Darstellung der SF-36- Parameter (Subskalen) Vitalität, soziale Funktionsfähigkeit, emotionale Rollenfunktion und psychisches Wohlbefinden differenziert nach (infektiöser) Indikationsgruppe Osteomyelitis (I) und nicht-osteomyelitisbedingter (infektfreier) Indikationsgruppe (NI) (X-Achse). Angabe von Absolutwerten (Spannweite 0 – 100 Punkte) (Y-Achse). Darstellung von Minimum, 25. Perzentile, Median, 75. Perzentile und Maximum.

5.7.3 Subjektive muskuloskelettale Funktionalität

Im Rahmen des DASH-Selbstbeurteilungsbogens erzielte die Patientengruppe I (n = 5) für das Basismodul nach Transformation auf eine lineare Skalierung zwischen 0 und 100 einen Medianwert von 22,5 Punkten (15 Punkte - 54,2 Punkte). Die Patientengruppe NI (n = 9) erreichte einen Medianwert von 29,3 Punkten (0 Punkte - 60,7 Punkte). Ein Ergebnis von 0 bilden eine sehr gute Funktionalität, ein Ergebnis von 100 eine sehr hohe Einschränkung ab. Das optionale Modul mit den beiden Untermodulen (Sport und Musik bzw. Arbeit und Beruf) fand äquivalent zu Kapitel 5.3 und 5.6.3 bei der Auswertung keine Berücksichtigung.

Im Rahmen des MSTS-Enneking-Scores erzielte die Gruppe I einen medianen Score von 93,3 % (86,7 % - 100 %) für die untere Extremität gemessen an der Maximalpunktzahl von 30 Punkten. Bezüglich der oberen Extremität wurde ein medianer Score von 70 % (66,7 - 100 %) gemessen an der Maximalpunktzahl von 30 Punkten erreicht.

Die Gruppe NI erreichte mit einem medianen Score von 93,3 % (29 % - 100 %) für die untere Extremität bzw. 76,7 % (15 % - 100 %) für die obere Extremität gemessen an der Maximalpunktzahl von 30 Punkten vergleichbare Werte. Ein Ergebnis von 0 bildet dabei ein sehr schlechtes Gesamtoutcome, ein Ergebnis von 30 ein sehr gutes Gesamtoutcome ab.

5.7.4 Funktionsparameter

Die Ergebnisse der motorischen und sensorischen Funktionsparameter werden analog zu Kapitel 5.2 und 5.5.2 durch die Messblätter für die oberen bzw. unteren Gliedmaßen und Finger (ROM) und den Rosén- und Lundborg-Score dargestellt. Der Parameter Schmerz spiegelt sich sowohl als Bestandteil im Rosén- und Lundborg-Score als auch anhand der visuellen bzw. numerischen Analogskala wider.

5.7.4.1 Parameter Motorik

Bezüglich der objektiven motorischen Ergebnisse zeigen sich im Vergleich zur nicht-operierten Gegenseite insbesondere für die nicht-infektiöse Patientengruppe NI eine Reduzierung der Pro- und Supination (ROM₂) um 16,7 % gegenüber der Patientengruppe I sowie im Rosén-Lundborg-Score für die Gruppe NI eine Reduzierung um 12 % gegenüber des Patientenkollektivs I. Erhöhte Werte erzielte Gruppe NI gegenüber Gruppe I insbesondere für den Parameter ROM₁ (Handgelenk Dorsalextension/ Palmarflexion/ Ulna-/ Radialabduktion). Die graphische Darstellung ist Abbildung 35 zu entnehmen.

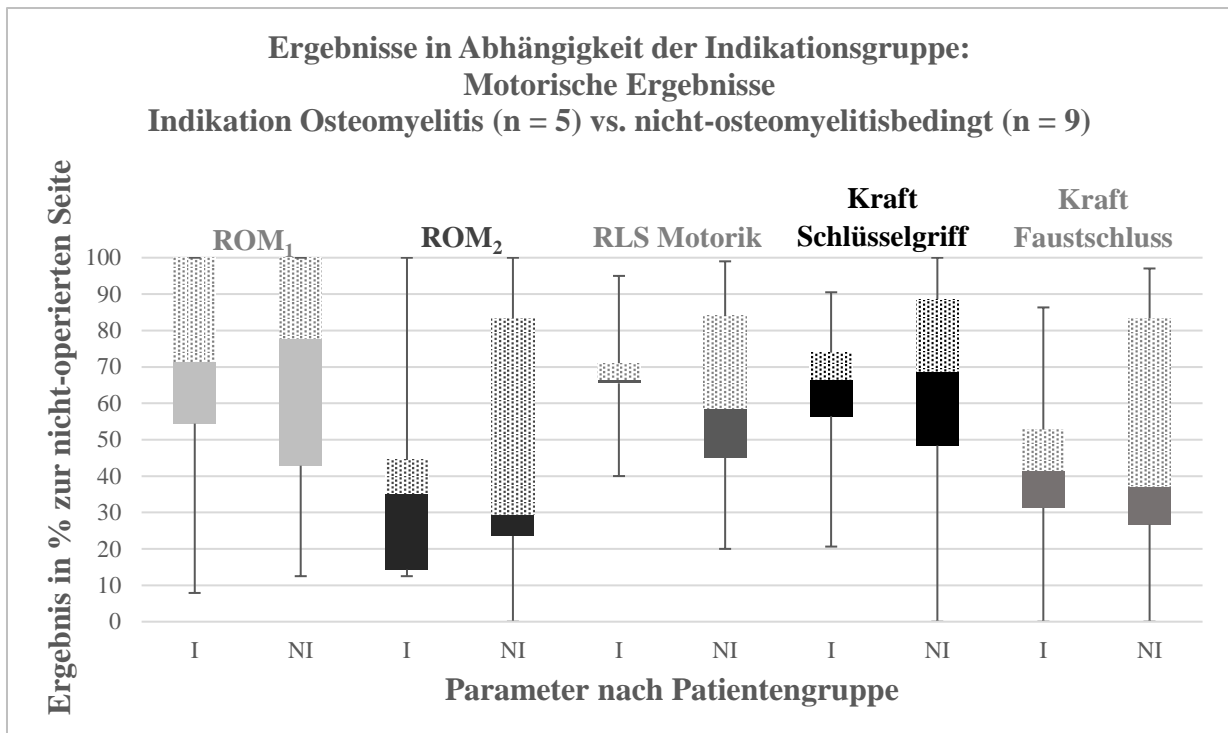


Abbildung 35: Box-Plot-Darstellung des Parameters Motorik (X-Achse) anhand des ROM₁ (Handgelenk Dorsalextension/ Palmarflexion/ Ulna-/ Radialabduktion; Mann-Whitney-U-Test $p = 0,45$) und ROM₂ (Handgelenk Pronation/ Supination; $p = 0,54$) sowie des Rosén-Lundborg-Scores RLS (Untermotul Motorik; $p = 0,37$) und der Kraft anhand Pinchmeter (Schlüsselgriff; $p = 0,64$) und Dynamometer (Faustschluss; $p = 0,45$) differenziert nach (infektiöser) Indikationsgruppe Osteomyelitis (I) und nicht-osteomyelitisbedingter (infektfreier) Indikationsgruppe (NI). Prozentuale Angaben im Vergleich zur nicht-operierten Gegenseite (Y-Achse) (Spannweite 0 – 100 %). Darstellung von Minimum, 25. Perzentile, Median, 75. Perzentile und Maximum.

Im Rahmen des MSTS-Enneking-Scores erzielte die Gruppe I einen medianen Score von 70 % (66,7 % - 100 %) für die obere Extremität, die Gruppe NI 76,7 % (15 % - 100 %) gemessen an der Maximalpunktzahl von 30 Punkten. Bezüglich der unteren Extremität wurde für die Gruppe I ein medianer Score von 93,3 % (86,7 % - 100 %), für die Gruppe NI ein medianer Score von 93,3 % (29 % - 100 %) - gemessen an der Maximalpunktzahl von 30 Punkten - erreicht. Die differenzierte Darstellung der einzelnen Items ist Tabelle 8 zu entnehmen.

5.7.4.2 Parameter Sensorik

Auf sensorischer Ebene erzielte die Patientengruppe I (n = 5) im Rosén-Lundborg-Score einen medianen Score von 94,4 % (87,2 % - 102 %), die Patientengruppe NI (n = 9) einen medianen Score von 81,37 % (64,1 % - 95,9 %). Die Angabe erfolgt prozentual im Vergleich zur nicht-operierten Gegenseite.

Parameter obere Extremität (OEX)	Score OEX in % Gruppe I Median (Min - Max)	Score OEX in % Gruppe NI Median (Min - Max)	Parameter untere Extremität (UEX)	Score UEX in % Gruppe I Median (Min - Max)	Score UEX in % Gruppe NI Median (Min - Max)
Schmerz	80 (60 - 100)	100 (40 - 100)	Schmerz	100 (100 - 100)	100 (100 - 100)
Funktion	80 (60 - 80)	60 (60 - 100)	Funktion	80 (80 - 100)	100 (100 - 100)
Emotionale Akzeptanz	60 (40 - 80)	80 (40 - 100)	Emotionale Akzeptanz	80 (60 - 80)	100 (100 - 100)
Positionieren der Hand	80 (60 - 100)	80 (60 - 100)	Hilfsmittel	100 (80 - 100)	100 (100 - 100)
Fingerfertigkeit/ Geschicklichkeit	80 (60 - 100)	100 (60 - 100)	Laufen	100 (80 - 100)	100 (100 - 100)
Fähigkeit zum Anheben	60 (60 - 100)	80 (60 - 100)	Gangart	100 (100 - 100)	100 (100 - 100)

Table 8: Vergleichende Darstellung der medianen Scoree für die MSTS-Enneking-Items für die obere Extremität OEX (Schmerz, Funktion, emotionale Akzeptanz, Positionieren der Hand, Fingerfertigkeit/ Geschicklichkeit, Fähigkeit zum Anheben) und die untere Extremität UEX (Schmerz, Funktion, emotionale Akzeptanz, Hilfsmittel, Laufen, Gangart) gemessen an der Gesamtpunktzahl von jeweils 5 Punkten für die (infektiöser) Indikationsgruppe Osteomyelitis (I) und nicht-osteomyelitisbedingter (infektfreier) Indikationsgruppe (NI). Spannweite 0 % bis 100 %. Angabe von Minimum und Maximum in Klammern.

5.7.4.3 Parameter Schmerz

Der Rosén-Lundborg-Score spiegelt sowohl für die Gruppe I und NI mit einem medianen Score von 100 % (100 % - 100 %) eine vollständige Schmerzfreiheit des Patientenkollektivs wider. Differenziert nach Spender- bzw. Empfängerregion sowie dem quantitativen VAS-Schmerzausmaß in Ruhe bzw. bei Belastung ergibt sich ausschließlich bei Belastung der Empfängerregion mit einem Median von 2 Punkten (0 Punkte - 7 Punkte) für Gruppe I bzw. 3 Punkten (0 Punkte - 10 Punkte) für Gruppe NI eine auftretende Schmerzsymptomatik. Die

Verteilung erwies sich über die Kategorie Indikation als identisch (Mann-Whitney-U-Test $p = 0,95$ bzw. $p = 0,64$ bzw. $p = 0,84$ bzw. $p = 0,3$).

5.7.5 Radiologische Verfahren

Zum jeweiligen Nachuntersuchungszeitpunkt erwiesen sich in der Patientengruppe I 60 % ($n = 3$) der Transplantate radiologisch konsolidiert. Die ossäre Integration erfolgte dabei bei 20 % ($n = 1$) innerhalb der ersten 12 Monate postoperativ. Für die Patientengruppe NI ergab sich eine radiologische Konsolidierungsrate von 55,6 % ($n = 5$) zum Nachuntersuchungszeitpunkt, wobei bei 22,2 % der Patienten ($n = 2$) eine ossäre Durchbauung innerhalb der ersten 12 Monate postoperativ vorlag. Eine relevante Knochenhypertrophie von ≥ 20 % fanden sich für $n = 1$ Patient (20 %, Gruppe I) bzw. $n = 2$ Patienten (22,2 %, Gruppe NI). Hinsichtlich der angewendeten radiologisch gestützten Scoring-Systeme erzielte die Gruppe NI im BHS auf Basis röntgenologischer Bildgebung ein um 46 % gegenüber Gruppe I verringertes medianes Gesamtergebnis. Die graphische Darstellung ist Abbildung 36 zu entnehmen.

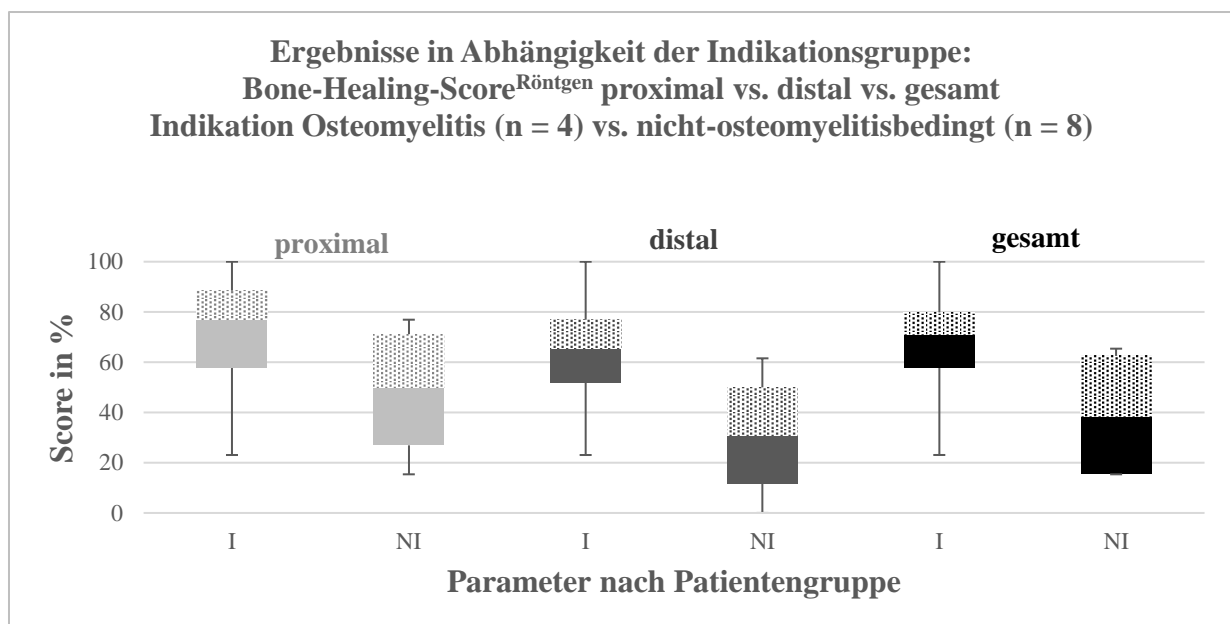


Abbildung 36: Box-Plot-Darstellung der proximalen und distalen Ergebnisse sowie des Gesamtscores des röntgenologisch gestützten BHS differenziert nach (infektiöser) Indikationsgruppe Osteomyelitis (I) und nicht-osteomyelitisbedingter (infektfreier) Indikationsgruppe (NI) (Parameter: periostale Reaktion, Kallusumbau, Osteotomiedurchbau, Transplantataspekt) (X-Achse). Prozentuale Angaben (Y-Achse) gemessen am Maximalwert von 13 Punkten (proximal; Mann-Whitney-U-Test $p = 0,76$ bzw. distal; $p = 0,34$) bzw. 26 Punkten (Gesamtscore; $p = 0,43$). Spannweite 0 – 100 %. Darstellung von Minimum, 25. Perzentile, Median, 75. Perzentile und Maximum.

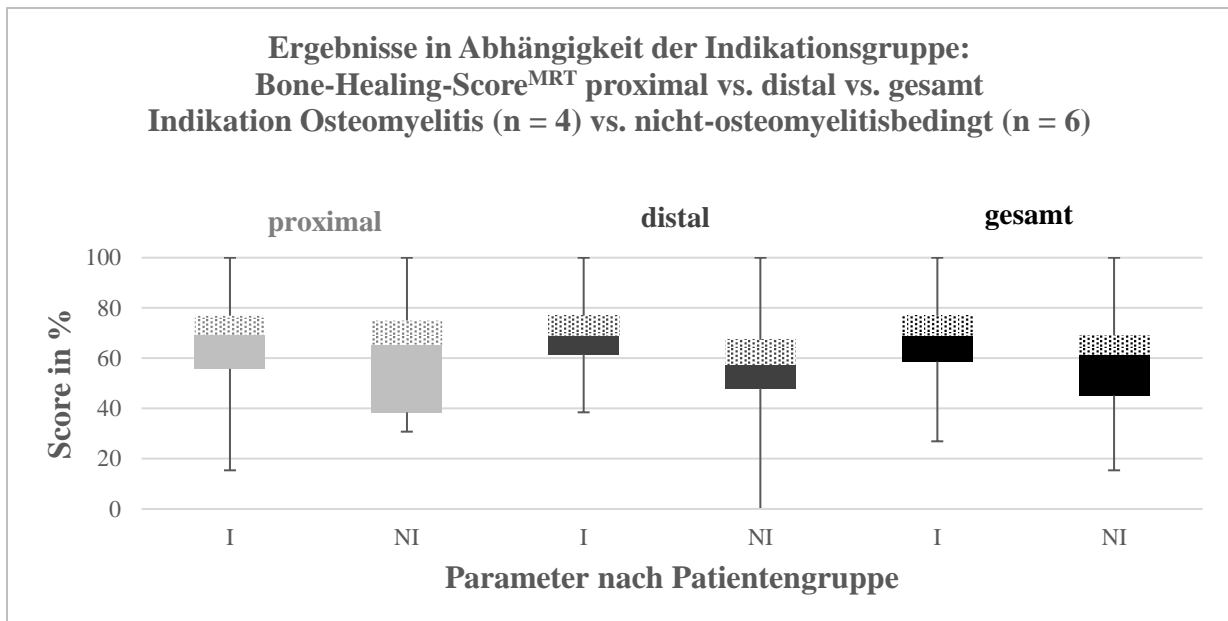


Abbildung 37: Box-Plot-Darstellung der proximalen und distalen Ergebnisse sowie des Gesamtscores des MRT-gestützten BHS differenziert nach (infektiöser) Indikationsgruppe Osteomyelitis (I) und nicht-osteomyelitisbedingter (infektfreier) Indikationsgruppe (NI) (Parameter: periostale Reaktion, Kallusumbau, Osteotomiedurchbau, Transplantataspekt) (X-Achse). Prozentuale Angaben (Y-Achse) gemessen am Maximalwert von 13 Punkten (proximal; Mann-Whitney-U-Test $p = 1$ bzw. distal; $p = 0,67$) bzw. 26 Punkten (Gesamtscore; $p = 0,76$). Spannweite 0 – 100 %. Darstellung von Minimum, 25. Perzentile, Median, 75. Perzentile und Maximum.

Für die Beurteilung des BHS auf Grundlage magnetresonanztomographischer Bildgebung erzielte die Gruppe NI gegenüber der Gruppe I ein um 11,1 % erniedrigtes Gesamtscore-Ergebnis. Die graphische Darstellung ist Abbildung 37 zu entnehmen.

Bei Gegenüberstellung der beiden Patientengruppen hinsichtlich des konventionellen und modifizierten Weiland-Scores erreichte Gruppe NI einen um 17,2 % (konventionell) bzw. 8,3 % (modifiziert) niedrigeren Medianwert gegenüber Gruppe I. Die graphische Darstellung ist Abbildung 38 zu entnehmen.

Unter differenzierter Betrachtung der beiden Patientengruppen im Hinblick auf das multifaktorielle Bewertungsschema auf Grundlage der MR-angiographischer Bildgebung wurde ein medianer Punktwert von 8 Punkten (100 %, Gruppe I) bzw. von 7 Punkten (87,5 %, Gruppe NI) bei einer Maximalpunktzahl von 8 Punkten erzielt. Eine Darstellung der Item-Einzelergebnisse ist Tabelle 9 zu entnehmen.

Hierbei wies Gruppe I einen größeren Patientenanteil für ein jeweils positives Vorliegen („ja“) der Items „Kortikalisdurchgängigkeit“, „ossäre Durchbauung proximal“, „ossäre Durchbauung distal“ und „Fettsignal Markraum proximal“ als Gruppe NI auf (+ 66,7; + 25 %; + 150 bzw. + 25 %).

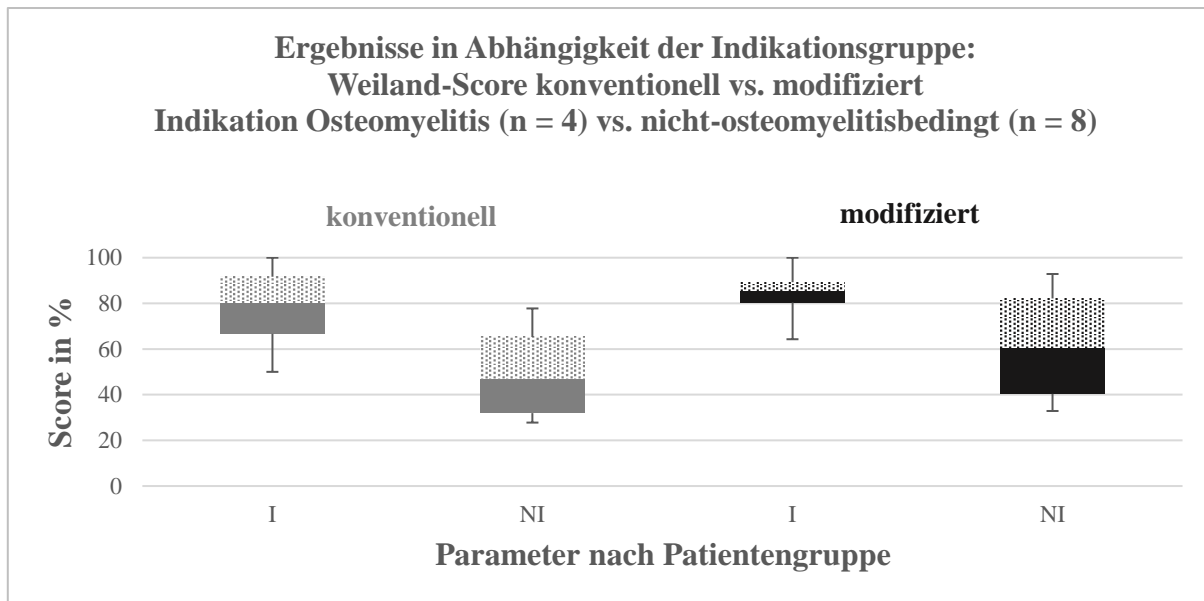


Abbildung 38: Box-Plot-Darstellung der Ergebnisse des konventionellen bzw. modifizierten Weiland-Scores auf Grundlage röntgenologischer Bildgebung (X-Achse) differenziert nach (infektiöser) Indikationsgruppe Osteomyelitis (I) und nicht-osteomyelitisbedingter (infektfreier) Indikationsgruppe (NI) (Parameter: Resorptionsverhalten bzw. Knocheinheilung, Knochenhypertrophie). Prozentuale Angaben (Y-Achse) im Median gemessen am Maximalwert von 18 Punkten (konventionell; Mann-Whitney-U-Test $p = 0,34$) bzw. 14 Punkten (modifiziert; $p = 0,41$). Spannweite 0 – 100 %. Darstellung von Minimum, 25. Perzentile, Median, 75. Perzentile und Maximum.

Kriterium	Parameter in Patientengruppe I (n = 4) vorliegend („ja“) in %	Parameter in Patientengruppe NI (n = 5) vorliegend („ja“) in %
Kortikalisdurchgängigkeit	100	60
Ossäre Durchbauung proximal	75	60
Ossäre Durchbauung distal	100	40
Fettsignal Markraum proximal	100	80
Fettsignal Markraum distal	100	100
Kein paraossales Flüssigkeitssignal	100	100
Gefäßstieldurchgängigkeit arteriell	100	100
Gefäßstieldurchgängigkeit venös	100	100

Tabelle 9: Multifaktorielles Bewertungsschema nach Mutze auf Grundlage MR-angiographischer Bildgebung unter Kontrastmittelanwendung (Parameter: Kortikalisdurchgängigkeit, ossäre Durchbauung proximal bzw. distal, Fettsignal im Markraum proximal bzw. distal, fehlendes paraossales Flüssigkeitssignal, Gefäßstieldurchgängigkeit arteriell bzw. venös). Darstellung des erzielten positiven Kriteriumanteils („ja“) differenziert nach (infektiöser) Indikationsgruppe Osteomyelitis (I) und nicht-osteomyelitisbedingter (infektfreier) Indikationsgruppe (NI) je Item in %.

6 DISKUSSION

6.1 Zu diskutierende Fragenstellungen

In der vorliegenden Follow-up-Studie wurden $n = 14$ Patienten, die im Zeitraum vom 21.03.2002 bis zum 07.09.2018 am Unfallkrankenhaus Berlin in der Abteilung für Hand-, Replantations- und Mikrochirurgie mit einer freien, vaskularisierten Fibula an Radius bzw. Ulna versorgt wurden, hinsichtlich der Funktionalität im Spender- und Empfängergebiet bzw. den angrenzenden Gelenken und ihrer subjektiven Gesamtzufriedenheit zum Nachuntersuchungszeitpunkt untersucht. Hierbei zielte die Fragestellung auf eine Einordnung der Ergebnisse im Literaturvergleich im Allgemeinen und in Abhängigkeit von Komplikations- bzw. Indikationsgruppen im Speziellen ab. Zusätzlich wurde eine radiologische Bildgebung (Röntgen, $n = 12$ Patienten bzw. Angio-MRT $n = 10$) zum Nachuntersuchungstermin durchgeführt, um eine erstmalige Beurteilbarkeit der Knochentransplantatvitalität im Langzeitergebnis anhand angiographischer, kontrastmittelgestützter MRT-Bildgebung und auf dessen mögliche Korrelation mit ggf. aufgetretenen Spätkomplikationen zu überprüfen. Die Fragestellung bezweckte hierbei eine erstmalige Machbarkeitsüberprüfung und Anwendbarkeit des BHS auf magnetresonanztomographische Bildgebung. Im Studienverlauf konnte in Zusammenarbeit mit dem Institut für Radiologie und Neuroradiologie ein eigenes MRT-Bewertungsschema mit 8 Items als Befundungsleitfaden klassifiziert werden.

Nachfolgend werden zunächst die klinischen Ergebnisse unter Berücksichtigung der subjektiven Patientenzufriedenheit, der subjektiven muskuloskelettalen Funktionalität und der objektiven klinischen Funktionsparameter dargestellt. Dabei werden jeweils sowohl die Ergebnisse für die Gesamtstudiengruppe diskutiert als auch eine spezifische Betrachtung der Indikations- und Komplikationsgruppen vorgenommen. Im sich anschließenden Abschnitt werden analog die radiologischen Ergebnisse betrachtet

6.2 Diskussion der klinischen Ergebnisse

Insgesamt ist bei der Diskussion der hier vorliegenden klinischen Studienergebnisse zu berücksichtigen, dass eine FVFT an der oberen Extremität nicht nur die Rekonstruktion der anatomischen Verhältnisse, sondern auch deren Funktionalität zum Ziel hat [14]. Meist ist dabei die Rekonstruktion aufgrund eines komplexen Verletzungsmusters unter Beteiligung motorisch-funktionaler Einheiten erschwert.

Eine weitere Schwierigkeit stellen in Hinblick auf die Vergleichbarkeit die unterschiedlichen Empfängerregionen einer freien, vaskularisierten Fibula dar. In der Literatur finden sich eine Vielzahl an Veröffentlichungen, jedoch umfasst das Patientengut in den häufigsten Fällen keine ausschließlichen Rekonstruktionen an der oberen Extremität (z.B. DE BOER und WOOD (1989) mit oberer bzw. unterer Extremität, ERDMANN et al. (2004) mit Mandibula und oberer bzw. unterer Extremität, HOUDEK et al. (2017) mit oberer bzw. unterer Extremität [12,39,48]). Dies ist unter anderem auch auf die insgesamt geringeren Fallzahlen von FVFT in dieser Region zurückzuführen, da dort laut ASMUS et al. (2018) rekonstruktive Therapien seltener durchgeführt werden [151]. Auch im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnten mit $n = 24$ Patienten über einen Zeitraum von rund 16,5 Jahren (Unfallkrankenhaus Berlin und Universitätsmedizin Greifswald) nur eine begrenzte Fallzahl identifiziert werden. Unter Berücksichtigung der ausschließlichen Fokussierung auf die obere Extremität können die hier vorliegenden Ergebnisse - trotz fehlender Signifikanz (Signifikanzniveau $p = 0,05 \%$) bedingt durch die begrenzten Studiengröße - die bestehende Literatur jedoch bereichern bzw. ergänzen.

Studien, die sich ausschließlich auf Patienten mit der Empfängerregion an der oberen Extremität stützen, wenden darüber hinaus in zahlreichen Fällen verschiedene Rekonstruktionsmethoden innerhalb der Studiengruppe an (z.B. HIRAYAMA et al. (1985) und WOOD (1987) vorwiegend mit Carpanna-Technik unter Verwendung eines zusätzlichen nicht-vaskularisierten Knochenauto- bzw. allografts, MINAMI et al. (1993) und HÖPFNER (2003) mit Fibula- und Beckenkammtransplantaten [11,17,47,67]). Dabei erfolgt die Darstellung der Studienergebnisse häufig über die gesamte Studiengruppe, sodass differenzierte Ergebnisse für die obere Extremität und bei gleichzeitiger Verwendung einer freien, vaskularisierten Fibula nicht entnommen werden können. In der vorliegenden Studie wurden im Gegensatz hierzu ausschließlich Fibulaautografts (ggf. unter Hinzunahme von Beckenkammspongiosa) an der oberen Extremität transplantiert. Die Studienlage bei EISENSCHENK et al. (1998) sowie bei HÖPFNER (2003) unter Berücksichtigung der radiologischen Ergebnisse (ossäre

Integrationsrate, Hypertrophieverhalten) legt, wenn auch bei eingeschränkter Vergleichbarkeit, eine nach Empfängerregion differenzierte Betrachtung auch der klinischen Gesichtspunkte nahe.

Darüber hinaus bestehen Einschränkungen aufgrund teilweise deutlich abweichender Indikationsverteilungen, wobei der Schwerpunkt häufig auf einer rein onkologischen Indikationsstellung beruht (z.B. ENNEKING et al. (1980), KÜHNER et al. (2001), BERND et al. (2003), ROSE et al. (2005), HOUDEK et al. (2017) [9,12,13,59,79]). EISENSCHENK et al. (1998) zeigte, dass die Tumorgruppe ein besseres knöchernes Einheilungsergebnis als die Trauma- bzw. kongenitale Tibiapseudarthrosegruppe aufwies [66]. Somit ist auch in der vorliegenden Studie (35,7 % Osteomyelitis, 50 % Pseudarthrose, 7,1 % Tumor, 7,1 % Arthrose bzw. infektiöse Indikation 35,7 % und nicht-infektiöse Indikation 64,3 %) ein differenzierter Vergleich mit einer Studienpopulation unter ähnlicher Indikationsverteilung anzustreben, um die eingeschränkte direkte Vergleichbarkeit aufgrund von Indikationsvariabilität möglichst gering zu halten.

Unter Berücksichtigung der ausschließlichen Fokussierung auf die obere Extremität, einer weitestgehend einheitlichen Rekonstruktionsmethodik und einer expliziten Berücksichtigung der Indikationsverteilung in der Diskussion können die hier vorliegenden Ergebnisse - trotz fehlender Signifikanz ($p = 0,05$ %) aufgrund der begrenzten Studiengröße und der retrospektiven Datenerhebung mit einem Dropout bzw. lost to follow-up bzw. investigator-caused discontinuation von $n = 11$ Patienten - die bestehende Literatur jedoch bereichern bzw. ergänzen.

Eine Besonderheit der hier vorliegenden Studie stellt zudem die Gegenüberstellung der subjektiven Patientenzufriedenheit mit objektiven klinischen Ergebnissen dar sowie eine differenzierte Beurteilung, ob und inwiefern sich eine präoperative Infektindikation bzw. das Auftreten postoperativer Komplikationen negativ auf das funktionelle Outcome auswirken.

Der Erfolg von FVFTs wurde bislang in der Literatur häufig nur in radiologischem Zusammenhang mit Einheilungs- bzw. Refrakturraten dargestellt. Insbesondere weisen die Ergebnisse in der vorliegenden Studie darauf hin, dass das Vorliegen eines präoperativen Infekts kein grundsätzlich schlechteres Outcome hinsichtlich Funktionalität und Patientenzufriedenheit nach sich zieht.

6.2.1 Diskussion der klinischen Angaben zur Studiengruppe

Eine dem Empfängergebiet (nur OEX) unter ausschließlicher Verwendung freier, vaskularisierter Fibulatransplantate entsprechenden Studiengruppe findet sich bei NOAMAN (2013). Hierbei wurden im Zeitraum von 2001 bis 2009 $n = 16$ Patienten (Indikationen: 5x infizierte Non-union Radius und Ulna, 4x infizierte Non-union Radius, 4x posttraumatischer Knochenverlust Radius, 3x Humerusschaft-Tumor) einer Nachuntersuchung unterzogen. Insgesamt wurden aufgrund einer fehlgeschlagenen Transplantation $n = 17$ Fibulae transplantiert. Das Geschlechterverhältnis $m : w$ zeigte mit $2,2 : 1$ ein ähnliches Verhältnis wie die vorliegende eigene Studie ($m : w = 2,5 : 1$). Alle Transplantate (mediane Transplantatlänge 8 cm, vorliegende eigene Studie 7,5 cm) wurden ebenfalls plattenosteosynthetisch stabilisiert.

Wie EISENSCHENK (1996) belegen konnte, ist das Einheilungsverhalten altersabhängig (Studiengruppe 35 Jahre - 60 Jahre mit herabgesetzter ossärer Integration), sodass das mediane Alter zum OP-Zeitpunkt bei der Auswahl einer vergleichbaren Studie als Einschlusskriterium berücksichtigt werden muss (vorliegende Studie 40 Jahre, NOAMAN (2013) 35,2 Jahre [14]). Ein weiteres Einschlusskriterium stellte darüber hinaus ein vergleichbarer medianer Follow-up-Zeitraum dar (vorliegende Studie 8,5 Jahre, NOAMAN (2013) 7 Jahre [14]). EISENSCHENK et al. (1998) zeigte, dass sich Knocheneinheilungsraten zwischen infektiöser und nicht-infektiöser Patientengruppe nach ≥ 2 Jahre zunehmend annäherten [66]. Der Anteil infektiöser Indikationen beträgt dabei bei NOAMAN (2013) 56,3 %, der nicht-infektiöser Indikationen 43,8 %. Die beiden Einschlusskriterien (vergleichbares Alter zum OP-Zeitpunkt, vergleichbarer medianer Follow-up-Zeitraum) sind damit in der Studie von NOAMAN (2013) erfüllt [14].

Bei Betrachtung der ossären Konsolidierung zeigten sich bei NOAMAN (2013) zum Nachuntersuchungszeitpunkt 93,8 % ($n = 15$) der Fibulatransplantate konsolidiert. In der vorliegenden eigenen Studie wurde eine Rate von 57,1 % ($n = 8$) erzielt, wobei für einen weiteren Patienten ($n = 1$) der Follow-up-Zeitraum mit 3 Monaten noch unter dem bei NOAMAN (2013) genannten medianen Konsolidierungszeitraum von 3,5 Monaten lag. Für die genannten $n = 8$ Patienten betrug der mediane Zeitraum für die ossäre Integration 3,4 Monate. Folglich zeigt sich ein vergleichbarer Konsolidierungszeitraum für beide Studiengruppen bei Abweichung der Gesamtkonsolidierungsrate um 39,1 % gegenüber NOAMAN (2013). Als möglicher Einflussfaktor kommt hierbei die leicht abweichende Indikationsverteilung (NOAMAN (2013) infektiös = 56,3 %, vorliegende eigenen Studie 35,7 % [14]) vermutlich nicht zum Tragen, da wie oben erwähnt anzunehmen ist, dass sich die Einheilungsraten nach \geq

2 Jahren zwischen infektiöser und nicht-infektiöser Patientenindikationsgruppe zunehmend angleichen [66]. Bei Interpretation der abweichenden Konsolidierungsraten sollte berücksichtigt werden, dass in keiner der beiden Studien eine Kategorisierung der Patienten anhand von Schweregraden durchgeführt wurde, sodass über die durchschnittliche Fallschwere als mögliche Begründung (auch aufgrund mangelnder Angaben z.B. zur Anzahl prä- und postoperativer Eingriffe nach FVFT bei NOAMAN (2013) [14]) nur spekuliert werden kann.

In der eigenen Studienpopulation findet sich im Empfängergebiet insgesamt eine Komplikationsrate bei 35,7 % der Patienten ($n = 5$), wobei als Komplikation ein postoperativ nach FVFT aufgetretener Plattenbruch, eine Pseudarthrose bzw. ein bakterieller Infekt definiert wurde. Bei NOAMAN (2013) beläuft sich die Komplikationsrate auf 12,5 % ($n = 2$ Patienten mit wiederholter Fibulatransplantation bzw. Arthrodeese) und korreliert mit einer bei genanntem Autor vorliegenden deutlich höheren ossären Integrationsrate [14]. Die Rate postoperativer bakterieller Infektionen beträgt trotz der deutlich höheren Patientenzahl mit präoperativer Infektindikation gegenüber NOAMAN (2013) 0 % [14]. Schlussfolgernd ist zu vermuten, dass eine Infektindikation keine signifikante Erhöhung des postoperativen Komplikationsrisikos bezogen auf eine wiederholte Infektion darstellt.

Hervorzuheben ist jedoch die signifikante Erhöhung postoperativer Infektionen bei Verwendung von Spalthaut an der Empfängerregion (exakter Test nach Fisher, $p = 0,03$). Hiervon waren ausschließlich Patienten ($n = 3$) mit präoperativer Infektfreiheit (Gruppe NI) betroffen. Da ein primär infiziertes Spalthauttransplantat aufgrund von intraoperativ durchgeführter Hautantiseptik unwahrscheinlich ist, stellt die ein Spalthauttransplantat indizierende vergrößerte Wundfläche hierbei vermutlich die entscheidende postoperative Eintrittspforte für bakterielle Infekte dar. Diesem Aspekt sollte in der postoperativen Nachsorge nach FVFT verstärkte Aufmerksamkeit zukommen.

Die Refrakturrate im Empfängergebiet beträgt sowohl bei NOAMAN (2013) als auch in der vorliegenden eigenen Studienpopulation 0 % [14]. Da sich laut DE BOER und WOOD (1989) Refrakturen aufgrund der fehlenden nervalen Innervierung als klinisch stumm präsentieren können und sich die meisten Studienpatienten bereits außerhalb eines regulären klinischen Nachuntersuchungsprogramms befanden, wurde in der vorliegenden Studie zum sicheren Ausschluss ein natives Röntgenbild zum jeweiligen Nachuntersuchungszeitpunkt angefertigt [39]. Es zeigten sich in keinem der Fälle (0 %) eine radiologisch diagnostizierbare Refraktur. Bei DE BOER und WOOD (1989) finden sich ausschließlich für diesen Aspekt eine gesonderte

Darstellung für die obere Extremität (n = 15). Es zeigten sich für das Empfängergebiet an Humerus, Radius bzw. Ulna ebenfalls eine Refrakturnrate von 0 %, wobei der mediane Follow-up-Zeitraum mit 2,5 Jahren deutlich unter dem bei NOAMAN (2013) und dem in der vorliegenden Studie lag [14,39].

Im Spendergebiet lag die Komplikationsrate in der vorliegenden Studie bei 0 % und somit unter der bei HAN et al. (1992) genannten Prävalenz von 8 % und deutlich unter der bei ANTHONY et al. (1995) bzw. BABOVIC et al. (2000) genannten Prävalenz von 17 % bzw. 36 % [104,105]. Zu berücksichtigen ist hierbei, dass die meisten Komplikationen transient nach erfolgtem Eingriff auftreten. Aufgrund des langen Nachuntersuchungszeitraums in der vorliegenden Studie wurden zusätzlich zur Patientenbefragung auch die Klinikdokumentation herangezogen, wobei auch hier postoperativ keine Spendergebiet-Komplikationen (Stressfrakturen, Kontrakturen des M. flexor hallucis longus, M. peroneus-Schwächung, Einschränkung In-/Eversion im Sprunggelenk, Instabilitäten, chronische Schmerzen) dokumentiert wurden. Ein bei BISHOP (2005) vermuteter später Symptombeginn schmerzhafter Zustände erscheint auf Grundlage des vergleichsweise langen Nachuntersuchungszeitraums von mehr als den herangezogenen 5 Jahren (schmerzhafte Zustände in 8,9 % gegenüber 3,6 % nach 3 Monaten) eher unwahrscheinlich [34]. Möglicherweise wirkt sich der am UKB durchgeführte frühe schmerzadaptierte Belastungsbeginn protektiv auf die Entwicklung von Spendergebiet-Komplikationen aus.

6.2.2 Diskussion der subjektiven Patientenzufriedenheit

Im Gegensatz zu bisherigen veröffentlichten Studien zum Outcome freier, vaskularisierter Fibulatransplantationen an der oberen Extremität wurde in der vorliegenden Arbeit auch die subjektive Patientenzufriedenheit - ausgedrückt durch die subjektive physische und psychische Lebensqualität - miterfasst. Der Einbezug eines Messinstruments zur Erfassung gesundheitsbezogener Lebensqualität in Form des SF-36-Fragebogens spiegelt dabei den Wandel der Medizin weg von einer reinen Fokussierung auf klinische Biomarker bzw. einer objektiven Datenerhebung hin zur subjektiven Patienteneinschätzung hinsichtlich des Outcomes einer Behandlung wider [131].

Bei Betrachtung der physischen und psychischen Gesamtscores für die komplette Studiengruppe (n = 14) lässt sich ein gegenüber dem psychischen Score (51 Punkte) um 17,8

% erniedrigter physischer Score (41,87 Punkte) feststellen. Der physische Normwert des SF-36 liegt dabei in der bundesdeutschen Gesamtpopulation bei 51,4 Punkten, korrigiert auf das in der Studienpopulation inhomogene Geschlechterverhältnis von 2,5 : 1 läge der bundesdeutsche Normwert bei 51,7 Punkten. Es ergibt sich für die Studienpopulation eine um 9,8 Punkt bzw. 19 % reduzierte physische Lebensqualität gegenüber dem korrigierten bundesdeutschen Normwert. Der psychische Normwert beträgt 49,3 Punkte, korrigiert 49,8 Punkte, womit sich das Patientenkollektiv der vorliegenden Studie durch eine um 1,2 Punkte bzw. 2,3 % erhöhte psychische Lebensqualität gegenüber dem korrigierten bundesdeutschen Normwert auszeichnet [152]. Dabei können LAUCIS et al. (2015) übereinstimmend mit den Ergebnissen der vorliegenden Studie zeigen, dass ein niedriges physisches ein höheres psychisches Ergebnis im Messinstrument bedingt [131]. Eine erhöhte Einschränkung auf physischer gegenüber der psychischen Zufriedenheit erscheint dabei aufgrund des orthopädisch-unfallchirurgischen Patientenguts nachvollziehbar.

Die gegenüber der Normpopulation leicht erhöhte psychische Lebensqualität (+ 2,3 %) kann in veränderten Bewältigungsstrategien und einer veränderten Anspruchshaltung der postoperativ von Komplikationen betroffenen Patienten nach einem derart komplexen Eingriff wie der FVFT begründet sein.

Hierbei zeigt sich, dass die postoperativ komplikationsbehaftete Gruppe K (52,5 Punkte) sogar eine höhere psychische Lebensqualität gegenüber der komplikationsfreien Gruppe NK (49,9 Punkte) aufweist, wobei die Arbeitsfähigkeit in der Gruppe K mit 80 % (Dauer der Arbeitsunfähigkeit im Median 4,1 Jahre) deutlich über der der Gruppe NK mit 44,4 % (Dauer der Arbeitsunfähigkeit im Median 7,5 Monate) liegt. Gleiches gilt ebenfalls für die physische Lebensqualität (Gruppe K 44,4 Punkte > Gruppe NK 40,5 Punkte).

Bei Gegenüberstellung der präoperativ infektbehafteten Indikationsgruppe I (49,9 Punkte) und der nicht-infektbehafteten Indikationsgruppe NI (52 Punkte) zeigt sich ein differenzierteres Bild. In Bezug auf die physische Lebensqualität erreicht die Gruppe I (44,4 Punkte) eine höhere Lebensqualität als Gruppe NI (40,5 Punkte), auf psychischer Ebene die Gruppe NI (52 Punkte) eine höhere Lebensqualität als die Gruppe I (49,9 Punkte). Somit scheint sich eine präoperative Infektindikationsstellung positiv auf die physische, aber negativ auf die psychische auszuwirken. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Patienten aus Gruppe I im Median deutlich mehr Operationen erhalten haben (n = 8) als Patienten aus Gruppe NI (n = 5).

Bei differenzierter Betrachtung der physischen Subskalen über die gesamte Studiengruppe zeigt sich, insbesondere für die körperliche Rollenfunktion (67,5 Punkte) und die Subskala körperliche Schmerzen (63 Punkte), eine deutliche Abweichung (- 22,9 % bzw. - 17,3 %) vom korrigierten bundesdeutschen Normwert (87,6 % bzw. 76,2 %). Im Bereich der psychischen Subskalen liegt das Studienkollektiv hinsichtlich der Subskala Vitalität (45 Punkte) deutlich (- 28,1 %) unter dem korrigierten Normwert der bundesdeutschen Bevölkerung (62,5 Punkte). Hinsichtlich sowohl der körperlichen (87,5 Punkte) als auch der emotionalen Rollenfunktion (100 Punkte) erzielen die FVFT-Patienten höhere Werte als die der Normpopulation (83,1 Punkte bzw. 87,2 Punkte), was vermutlich ebenfalls auf alltagspraktische bzw. psychische Adaptationsmechanismen zurückzuführen sein könnte.

6.2.3 Diskussion der subjektiven muskuloskelettalen Funktionalität

DASH

In Bezug auf die subjektive Patienteneinschätzung der muskuloskelettalen Funktionalität stellt der DASH-Fragebogen das einzige Messinstrument dar, in dem die obere Extremität als Einheit betrachtet wird [131]. Über die gesamte Studiengruppe wurde ein medianer Punktwert von 24,4 Punkten (Maximalpunktzahl 100 Punkte) erzielt, wobei ein Ergebnis von 0 Punkten eine gute Funktionalität, ein Ergebnis von 100 Punkten eine sehr hohe Einschränkung abbildet [127]. Wenn auch mit begrenzter Vergleichbarkeit erzielen GUMMESSON et al. (2003) in einer Studie zum postoperativen muskuloskelettalen Outcome von n = 109 Patienten mit einer Vielzahl unterschiedlicher Erkrankungen der oberen Extremität ebenfalls einen medianen Score von 24 Punkten [117]. HUNSAKER et al. (2002) erhoben für die US-amerikanische allgemeine Normpopulation einen Score von 10,1 Punkten, womit sich eine Differenz von 14,3 Gesamtpunkten (Differenz Rohsummenwert 17,2 Punkte) eigenen Studiengruppe ergibt [153]. GUMMESSON et al. (2003) konnten dabei zeigen, dass eine Differenz um 10 Punkte im Rohsummenwert eine minimale Funktionsveränderung darstellt.

Bei differenzierter Betrachtung der Studienuntergruppen erreicht die postoperativ komplikationsbehaftete Gruppe K (22,5 Punkte) und die präoperativ infektionsbehaftete Gruppe I (22,5 Punkte) subjektiv den besten Funktionszustand. Es zeigt sich ein vergleichbarer Trend zur physischen Lebensqualität auf Grundlage des SF-36. Der Punktwert der Gruppe NK (25,8 Punkte) liegt hierbei jedoch nur um 3,3 Punkte (Rohsummenwert 4 Punkte) über dem

Punktwert der Gruppe K, der der Gruppe NI (29,3 Punkte) um 6,8 Punkte (Rohsummenwert 8,2 Punkte) über dem Punktwert der Gruppe I. Somit sind die erhöhten Scoree bei Berücksichtigung der jeweiligen Rohsummenwerte (< 10 Rohsummenpunkte) in Gruppe NK und I nach GUMMESSON et al. (2003) nicht als minimale Verschlechterung der Funktion zu bewerten [117].

MSTS-Enneking-Score

Im Rahmen des MSTS-Enneking-Scores erzielte die Gesamtstudiengruppe einen medianen Score von 73,3 % (15 % - 100 %) für die obere Extremität gemessen an der Maximalpunktzahl von 30 Punkten. Enneking et al. (1993) können zeigen, dass im Allgemeinen Patienten mit Operationen an der oberen Extremität einen durchschnittlichen Wert von 68 % erzielen, womit das hier vorgestellte Patientenkollektiv einen um + 7,9 % höheren Score erreicht [135]. Bei differenzierter Betrachtung der Untergruppen ist hervorzuheben, dass die Gruppe K bessere Ergebnisse (+ 9,5 %) gegenüber der Gruppe NK erzielte, die Gruppe I jedoch schlechtere Ergebnisse verglichen mit Gruppe NI (-8,7 %). Diese Tendenz spiegelt sich - im Gegensatz zu den Ergebnissen des DASH - am ehesten im Item psychische Lebensqualität im SF-36 wider, wobei hier ebenfalls die Patienten aus den Untergruppen K und NI die höchste Zufriedenheit angaben.

Für die untere Extremität wurden gruppenübergreifend mit Werten über 90 % sehr gute Scoreergebnisse erzielt, was auch durch die objektiv erhobene ideale Komplikationsrate im Spenderbereich von 0 % unterstützt wird.

6.2.4 Diskussion der objektiven klinischen Funktionsparameter

6.2.4.1 Parameter Motorik

In Bezug auf das objektive motorische Outcome der vorliegenden Studiengruppe wurde insgesamt ein prozentual im Vergleich zur nicht-operierten Gegenseite erhobenes Bewegungsausmaß von 74,6 % ($ROM_1 = \text{Dorsalextension} + \text{Palmarflexion} + \text{Radialabduktion} + \text{Ulnaabduktion}$ im proximalen Handgelenk) erzielt. GATES et al. (2016) konnten zeigen, dass an der oberen Extremität für die Bewältigung der ADLs (activities of daily life) eine ROM_1 von mindestens 144 Grad (entspricht 84,7 % dem in der vorliegenden Studie zugrunde gelegten

Normwert von 170 Grad) notwendig ist. Das vorliegende Studienkollektiv liegt somit bei vergleichsweise hoher subjektiver Patientenzufriedenheit im DASH im Median 11,9 % unter dem von GATES et al. (2016) geforderten Mindestwert [154].

Bei differenzierter Betrachtung der Studienuntergruppen sind in der postoperativ komplikationsfreien Gruppe NK (100 %; Gruppe K - 28,6 %) und in der präoperativ infektfreien Gruppe NI (77,8 %; Gruppe I -8,2 %) das größte Bewegungsausmaß feststellbar. Zu berücksichtigen ist hierbei die insgesamt deutlich breitere Streuung der Ergebnisse in Gruppe NK. Die Ergebnisse zeigen sich insgesamt als gegenläufig zum Trend des SF-36 und DASH, bei dem subjektiv Gruppe K und Gruppe I physisch jeweils die besten Ergebnisse erzielten. Hierbei könnte als möglicher Einflussfaktor die Fragestellung im DASH herangezogen werden, die keine explizite Ausführung der genannten Tätigkeiten mit der operierten Extremität oder in einem festgelegten Bewegungsmuster fordert, sodass kompensatorisch gearbeitet werden kann.

Im Vergleich zur ROM₁ zeigt sich eine deutliche Reduzierung der Gelenkbeweglichkeit (- 56,6 %) im Hinblick auf die ROM₂ (32,4 %; Pro- und Supination im proximalen und distalen Radioulnargelenk). Der von GATES et al. (2016) geforderte Mindestwert der ROM₂ zur Bewältigung der ADLs beträgt hier 66° (entspricht 38,8 % dem in der vorliegenden Studie zugrunde gelegten Normwert von 170°). Das vorliegende Studienkollektiv liegt somit bei vergleichsweise hoher subjektiver Patientenzufriedenheit im DASH im Median 16,7 % unter dem von GATES et al. (2016) geforderten Mindestwert [154].

Das mit 44,4 % höchste Bewegungsausmaß in der Pro- und Supination (ROM₂) im Vergleich zur nicht-operierten Gegenseite erzielt dabei die postoperativ komplikationsfreie Gruppe NK. Gegenüber der Gruppe K (14,3 %) lag das erzielte Ergebnis damit ausgesprochen deutlich über dem der Gruppe NK. Einschränkend findet sich hier ebenfalls für die Gruppe NK eine sehr breite Streuung der Ergebnisse.

Patientenübergreifend wurde der Eingriff bei insgesamt n = 8 Patienten an der jeweils dominanten, bei n = 6 Patienten an der nicht-dominanten Hand vorgenommen. Dabei erreicht das Gesamtstudienkollektiv an der operierten Extremität 39,4 % der Faustschlusskraft (Dynamometer) gemessen an der nicht-operierten Gegenseite. Gruppe K und I erzielt hierbei mit jeweils 41,7 % das höchste Kraftausmaß. Es zeigt sich ein gleichläufiger Trend zu den Ergebnissen im SF-36 und DASH, wobei das Kraftausmaß indirekt einen Einflussfaktor auf die Einschätzung von Lebensqualität bzw. muskuloskelettaler Funktionalität darstellen könnte.

Hinsichtlich der Kraft im Schlüsselgriff (Pinchmeter) erlangt die Gesamtstudiengruppe im Vergleich zur nicht-operierten Gegenseite mit 67,6 % ein deutlich höheres Kraftausmaß als im Faustschluss. Die postoperativ komplikationsfreie Gruppe NK erreicht dabei mit 73,9 % bei sehr breiter Streuung der Ergebnisse den höchsten Wert.

Diskutiert werden muss darüber hinaus die Frage, welchen Einfluss Rechts- und Linkshändigkeit auf die Studienergebnisse nehmen könnten. SERAFIN et al. (2014) erhoben bei 1214 Probanden für Ziehen, Greifen und Drehen die erreichbaren Maximalkräfte. Sie konnten zeigen, dass in allen Kraftfällen rechtsdominante Männer und Frauen ein höheres Kraftmaß rechtsseitig erzielten. Linksdominante Männer und Frauen wiesen trotz höherem Kraftmaß linksseitig einen deutlich schwächeren Seitenunterschied auf [155]. Folglich können Untergruppen mit einem höheren Anteil an Rechtshändern, die an der dominierten Hand operiert wurden per se ein geringeres Kraftausmaß erzielen. In Gruppe K und I finden sich dabei jeweils 60 % der Rechtshänder mit einem Eingriff an der rechten dominanten Hand. In Bezug auf die Maximalkraft im Faustschluss erreichen die Gruppen K und I jedoch die höchste Maximalkraft. Der Einfluss der Händigkeit ist somit als eher gering anzusehen.

Hervorzuheben ist, dass die Patienten aus Gruppe I zum Nachuntersuchungszeitpunkt zu 100 % einen vollständigen Grobgriff ausführen konnten (Gruppe NI 88,9 % bzw. 77,8 %). Neben dem vergleichsweise hohen Kraftausmaß im Vergleich zur Gegenseite (41,5 %, siehe oben) und den guten funktionalen Ergebnissen im DASH und einer hohen subjektiven funktionellen Zufriedenheit im SF-36 (siehe oben) deuten die hier vorliegenden Ergebnisse trotz eingeschränkter Ergebnisse hinsichtlich ROM₁ und ROM₂ auf kein grundsätzlich schlechteres postoperatives Outcome bei präoperativer Infektanamnese hin. Auch die Arbeitsunfähigkeit nach FVFT in der Gruppe I, die mit 25 % deutlich unter der Gruppe NI (50 %) liegt, könnte einen weiteren Beleg für eine bessere Langzeitprognose - als bisher in der Literatur für präoperative Infektpatienten angenommen - darstellen.

6.2.4.2 Parameter Sensorik

Auf sensorischer Ebene erzielt die Gesamtstudiengruppe im Rosén-Lundborg-Score insgesamt sehr hohe Ergebnisse von über 80 %. Die komplikationsbehaftete Gruppe K sowie die präoperative Infektgruppe I mit 94,4 % erreicht den höchsten Score, wobei die Infektgruppe I mit + 13,8 % gegenüber der infektfreien Gruppe NI (81,4 %) deutlich besser abschneidet.

6.2.4.3 Parameter Schmerz

In der Kategorie Schmerz zeigt sich für die Gesamtstudiengruppe im Rosén-Lundborg-Score mit einem Ergebnis von 100 % eine vollständige Schmerzfreiheit, die sich auch über alle Untergruppen weiterführt.

Auf Grundlage der visuellen Analogskala (VAS) gibt das Gesamtstudienkollektiv eine vollständige Schmerzfreiheit (0 Punkte) sowohl in Belastung bzw. in Ruhe für das Spendergebiet als auch in Ruhe für die Empfängerregion an. Das Ergebnis deckt sich hierbei mit dem von KÜHNER et al. (2001), die eine 100 %-ige Schmerzfreiheit in der Spenderregion angeben [13]. Das bei BISHOP (2005) angegebene Langzeitergebnis von 8,9 % schmerzhafter Zustände an der Spenderstelle (ohne Sprunggelenk) nach 5 Jahren postoperativ kann hier nicht unterstützt werden [34].

Bei Belastung in der Empfängerregion beträgt der mediane Score des Schmerzes in der vorliegenden Studie 2,5 Punkte. Dabei weist die postoperativ komplikationsbehaftete Gruppe K einen etwas geringeren Punktwert auf (VAS 2 Punkte) als die komplikationsfreie Gruppe NK (VAS 3 Punkte). FARRAR et al. (2001) geben an, dass ein um ca. 30 % erniedrigter Wert im NRS einen klinisch bedeutsamen Unterschied darstellt [156]. Somit besteht schlussfolgernd zwischen Gruppe K und Gruppe NK eine klinisch zu beachtende Differenz hinsichtlich des Schmerzausmaßes bei Belastung in der Empfängerregion. Zu berücksichtigen ist dabei jedoch der in Gruppe K höhere Anteil von Analgetika-Medikation (40 %) gegenüber der Gruppe NK, der als ursächlich für die genannte Differenz angenommen werden kann.

6.3 Diskussion der radiologischen Ergebnisse

Im nachfolgenden Kapitel werden neben der Bedeutung des Knochenvitalitätserhalts nach FVFT durch suffiziente Fibularisanastomosen die vorliegenden Studienergebnisse zur ossären Integration, Anastomosedurchgängigkeit, Hypertrophie- und Refrakturrate denen der Literatur gegenübergestellt und eingeordnet. Es folgt eine Diskussion des röntgenologischen BHS in Gegenüberstellung zu den Ergebnissen des MRT-gestützten BHS sowie eine Einordnung der erzielten Weiland-Scoree. Darauf aufbauend wird abschließend eine Einschätzung des Stellenwerts postoperativer Angio-MRT-Bildgebung vorgenommen.

6.3.1 Stellenwert suffizienter Gefäßstielanastomosen

Die Verwendung freier, vaskularisierter Fibulatransplantate als Knochenersatz der Wahl bei langen Defektstrecken beruht - wie in Kapitel 2.2 dargestellt - auf einer hiermit verbundenen schnelleren und einer geringeren Rate ausbleibender Knocheneinheilung sowie von Ermüdungsfrakturen und postoperativen Infektionen bedingt durch die Aufrechterhaltung der Blutzirkulation innerhalb des Transplantats. Die Bedeutung der Fragestellung suffizienter Gefäßstielanastomosen spiegelt sich zudem in den Studienergebnissen von SIEGERT und WOOD (1987) wider, die belegen, dass postoperativ thrombosierte freie, vaskularisierte Fibulatransplantate eine insgesamt geringere Revitalität als avaskuläre Knochengrafts im Tiermodell aufweisen [141]. WEILAND et al. (1984) konnten eine Unterlegenheit avaskulärer gegenüber vaskularisierten Transplantaten hinsichtlich der mechanischen Stabilität zeigen [57]. Eine erhöhte Komplikationsrate bei Verwendung avaskulärer Knochengrafts finden sich bei SCHUIND et al. (1988), EBINGER et al. (2003), BISHOP (2005) und MURAMATSU et al. (2014) [9,42,54,61]. Bei postoperativer Thrombosierung der Gefäßstielanastomose entsteht aus einem vaskularisierten allerdings in Folge vielmehr ein avaskuläres Transplantat mit dementsprechend verbundenen Nachteilen. Allen voran die creeping substitution, die ein erhöhtes Risiko für delayed oder Non-union und auch Jahre nach der FVFT auftretende Ermüdungsfrakturen aufgrund mechanischer Transplantatschwächung nach 6 – 12 Monaten und Infektionen bedingt [10,34,46,55]. Rund die Hälfte der lamellaren Knochenstrukturen verbleiben dabei laut ENNEKING et al. (1980) langfristig avaskulär-nekrotisch, wobei BERGGREN et al. (1982) hierfür ursächlich das die Neovaskularisation behindernde nekrotische Weichteilgewebe annehmen [59,157]. An dieser Stelle sei jedoch hervorgehoben, dass SIEGERT und WOOD bereits 1987 sogar die Unterlegenheit sekundär avaskulären (postoperativ thrombosierten) Transplantaten (!) gegenüber primär avaskulärer Knochengrafts bedingt durch eine verzögerte Neovaskularisation zeigen [158]. Dieser Aspekt unterstreicht damit den herausragenden Stellenwert einer dauerhaft suffizienten, da durchgängigen Gefäßstielanastomose und der Wahl eines geeigneten Monitoringverfahrens, auch um den technisch und zeitlich sehr anspruchsvollen Eingriff in Bezug auf die postoperative Prognose für den Patienten zu rechtfertigen.

6.3.2 Diskussion der Ergebnisse zur Anastomosedurchgängigkeit und zur ossären Integration

In der vorliegenden Studie zeigte sich in keinem (0 %) der angio-magnetresonanztomographisch untersuchten $n = 9$ Fälle eine postoperative Thrombosierung des Gefäßstiels. Da für den Vitalitätserhalt laut KAMEI et al. (2001) eine intakte arterielle Anastomose eine größere Rolle spielt als eine intakte venöse Anastomose, wurde die MR-angiographische Bildgebung in der arteriellen Kontrastmittelphase durchgeführt [159]. Ein Kontrastmittel-Signalabbruch mit einem davon abzweigenden kontrastierten arteriellen Gefäß stellte dabei das das Transplantat versorgende Gefäßbündel dar, wobei ein Patient ($n = 1$) mit nicht nach diesem Prinzip detektierbaren Anastomose eine frühe venöse Kontrastierung zeigte. Diese kann aufgrund der physiologischen Blutflussrichtung (Arterie - Transplantat - Vene) und der Abwesenheit paraossärer Flüssigkeitsakkumulation als Beleg für eine arterielle Durchgängigkeit gewertet werden.

Die eingriffsspezifische Thrombosierungsrate von 0 % liegt damit deutlich unter den Literaturangaben von 3 - 10 %. Bei der Bewertung der hier gezeigten 100 %-igen Anastomosedurchgängigkeit muss einschränkend das kleine Patientenkollektiv berücksichtigt werden, welches statistisch maximal einen Thrombosierungsfall erwarten ließe. Jedoch konnte hier erstmalig die Anastomosedurchgängigkeit langfristig (medianer Follow-up-Zeitraum 8,8 Jahre) und sicher, da durch die Gefäßstieldarstellung zwingend auf die Transplantatdurchblutung rückschließbar, anhand der Angio-MRT-Bildgebung nachgewiesen werden.

Die von EL-SHERBINY (2008) postulierte These, dass eine belegte Knocheneinheilung mit erhaltender Transplantatvitalität gleichgesetzt werden könne, kann anhand der vorliegenden Ergebnisse zumindest nicht widerlegt werden [160]. Im Umkehrschluss konnte aber für das vorliegende Patientenkollektiv gezeigt werden, dass die Konsolidierung - widersprechend der Publikation von EROL et al. (2015) - bei erhaltener Knochenvitalität nicht innerhalb von 12 Monaten erfolgen muss [161]. 50 % ($n = 5$) der Studienteilnehmer mit gleichzeitig erfolgter Angio-MRT-Bildgebung erzielten eine röntgenologisch gesicherte Einheilung innerhalb des 1. postoperativen Jahres, bei weiteren 30 % ($n = 3$) konnte jedoch trotz nachgewiesener Vitalität des Knochengrafts keine vollständige ossäre Integration trotz eines medianen Follow-up-Zeitraums von 2,4 Jahren nachgewiesen werden. Ein Patient ($n = 1$) erzielte eine späte Einheilung nach 2 Jahren, ein weiterer Patient ($n = 1$) konnte nicht in die Wertung

einbezogen werden, da der Follow-up-Zeitraum mit 3 Monaten unter den geforderten 12 Monaten lag. Beachtenswert sind jedoch die guten funktionellen Ergebnisse und der hohe Grad an subjektiver Patientenzufriedenheit, die auch die Patienten mit mangelhafter Konsolidierung erzielten und dies aus einer patientenzentrierten ärztlichen Perspektive heraus möglicherweise als gewichtiger gegenüber den reinen radiologischen Ergebnissen zu betrachten sind.

Betrachtet man das Gesamtstudienkollektiv ($n = 14$), konnte bei 57,1 % der Patienten ($n = 8$) zum Nachuntersuchungszeitpunkt eine gesicherte ossäre Integration des Fibulatransplantats in der Empfängerregion innerhalb eines medianen Konsolidierungszeitraums von 3,4 Monate (3,1 Monate - 2 Jahre). festgestellt werden. Damit liegt die Konsolidierungsrate deutlich unter den bei NOAMAN (2013) publizierten 93,8 % und einer medianen ossären Integrationsdauer von 3,5 Monaten, dessen Studienkollektiv (siehe Kapitel 6.2.1) aufgrund der reinen Fokussierung auf die obere Extremität und einer ähnlichen Indikationsverteilung am ehesten vergleichbar ist. Ein vermutbarer Einfluss der Weichteillager-Situation (vorbestehend infizierte Empfängerregion vor FVFT) auf den Konsolidierungserfolg zum Nachuntersuchungszeitpunkt lässt sich anhand der Ergebnisse in der vorliegenden Studiengruppe (Gruppe I mit 60 % bzw. Gruppe NI mit 55,6 % erfolgreicher Konsolidierung). nicht unterstützen. Auch die Anzahl der erfolgten Voroperationen vor FVFT als möglicher Faktor für ein zusätzlich geschädigtes Weichteilbett in der Empfängerregion erwies sich als nicht haltbar (Voroperationen konsolidierte Patientengruppe im Median 4,5, nicht- konsolidierte Patientengruppe 2,5). Darüber hinaus betrug das mediane Alter zur FVFT in der Gruppe der konsolidierten Patienten 36,5 Jahre, in der der nicht-konsolidierten Patienten 46,5 Jahre. Das Patientenalter als kausalen Grund für den hohen Anteil an nicht-konsolidierter Transplantate erscheint - trotz einer Differenz von 10 Jahren - als unwahrscheinlich, da EISENSCHENK (1996) in einer groß angelegten Studie zeigen konnte, dass ausschließlich ein Alter von unter 18 Jahre zum transplantierenden Eingriff als positiver Einflussfaktor ausschlaggebend war [162]. Als ursächlich für die fehlende ossäre Integrationsrate von 42,9 % könnte somit eine unterschiedliche individuelle Ausprägung der Fallschweren-Verteilung in Betracht gezogen werden, die aufgrund von Ermangelung eines Klassifikationsschemas für diese Patientenkollektive an dieser Stelle nicht berücksichtigt werden können. Diese These kann unter anderem dadurch unterstützt werden, dass sich die mediane Konsolidierungsdauer für Patienten mit erfolgter knöcherner Einheilung mit 3,4 Monaten (eigenes Patientenkollektiv) bzw. 3,5 Monaten (NOAMAN (2013)) auf nahezu identische Werte belaufen [14]. Zudem sind auch zusätzlich bestehende kardiovaskuläre Vorerkrankungen (z.B. Hypertronie,

Arteriosklerose, Diabetes mellitus) als Einflussfaktoren auf die Knocheneinheilung denkbar, die jedoch in der vorliegenden Studie nicht erfasst wurden.

Eine Unterscheidung zwischen primärer und sekundärer ossärer Integration wurde - im Gegensatz zu zahlreichen anderen themenfeldbezogenen Publikationen (u.a. SUN et al. (2010), HOUDEK et al. (2017)) - von NOAMAN (2013) dabei nicht vorgenommen [12,14,15]. In Ermangelung dieser Datenlage wurde in der vorliegenden Arbeit ebenfalls auf eine Differenzierung verzichtet, da ein Vergleich mit anderen Autoren insbesondere aufgrund des Einsatzes an multiplen Empfängerregionen bzw. bei deutlich unterschiedlichen Indikationsstellungen mit damit verbundenen stark voneinander abweichenden Einheilungsprognosen - wie z.B. BISHOP (2005) belegt - bzw. ohne anschließende Ergebnisdifferenzierung (u.a. KÜHNER et al. (2001)) als nicht sinnvoll erscheint [13,34].

Abschließend soll eine differenzierte Betrachtung der Patientenuntergruppen in der vorliegenden Studie hinsichtlich der Konsolidierung vorgenommen werden. Das präoperative Vorliegen eines Infekts im Empfängergebiet (Gruppe I) wirkte sich im Vergleich mit der infektfreien Gruppe NI weder auf die Ein-Jahres- noch auf die Gesamteinheilungsrate zum Nachuntersuchungszeitpunkt aus (20 % bzw. 22,2 % sowie 60 % bzw. 55,6 %). Dass höhere Integrationsraten eher bei negativer Infektanamnese vorliegen - wie von EISENSCHENK et al. (1998) postuliert - kann resultierend in der vorliegenden Studie nicht beschrieben werden [66]. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass sich laut genanntem Autor auch ein jüngeres Patientenalter positiv auf die Prognose auswirkt. Da sich das mediane Alter zum Operationszeitpunkt für die Gruppe NI auf 43,5 Jahre, für die Gruppe I jedoch auf 28 Jahre beläuft, ist das deutlich abweichende Altersspektrum als nicht zu vernachlässigender Einflussfaktor auf die vergleichsweise guten Einheilungsergebnisse bei Infektindikation in Betracht zu ziehen.

Bei Auftreten postoperativer Komplikationen (Gruppe K) wurden bezüglich der Ein-Jahres-Integrationsrate deutlich geringere Ergebnisse gegenüber der komplikationsfreien Gruppe (NK) erlangt (20 % vs. 37,5 %), wobei sich die Ergebnisse zum medianen Nachuntersuchungszeitpunkt nach 8,5 Jahren nahezu angleichen (40 % bzw. 44 %). Dies erscheint insofern plausibel, da in der Komplikationsgruppe gegenüber Gruppe NK doppelt so viele post-FVFT-Operationen erfolgten.

6.3.3 Diskussion der Ergebnisse zur Hypertrophie- und Refrakturrate

Wie EISENSCHENK et al. (1998) an der oberen Extremität zeigen können, beläuft sich die mediane Hypertrophierate auf Grundlage des röntgenologisch gestützten Knochenhypertrophie-Index nach DE BOER und WOOD (1989) auf 0 %, die mit einer Rate von 1 % in der hier vorliegenden Studie ebenfalls als sehr gering bewertet werden kann [39,66]. Neben der geringeren Gewichtsbelastung der oberen Extremität und einer damit verbundenen niedrigeren Knochenwachstumsstimulation, die in geringeren Hypertrophieraten resultiert, zeigt EISENSCHENK (1996) hier ebenfalls einen Alterszusammenhang auf, wobei Patienten in der Altersgruppe > 35 Jahren die geringsten Hypertrophieergebnisse aufweisen [162]. Hiermit ließe sich die starke Schwankungsbreite der Hypertrophieergebnisse - insbesondere in den negativen Bereich (bis - 24 %) bei einem medianen Alter von 46,5 Jahre - erklären. Der jüngste Patient der Studie (Alter zur FVFT 10 Jahre, Alter zum Nachuntersuchungszeitpunkt 21 Jahre) erzielte mit einem Hypertrophie-Index von + 41 % das beste Ergebnis.

Die Refrakturrate nach freier, vaskularisierter Fibulatransplantation beläuft sich laut Literaturangaben bei MINAMI et al. (1993) auf 25,7 %, bei HOUDEK et al. (2017) auf 21,6 % übergreifend über verschiedene Empfängerlokalisationen und Indikationsstellungen [12,67]. Bei Transplantation an Humerus, Ulna oder Radius treten bei DE BOER und WOOD (1989) zu 0 % Refrakturen auf, während Tibia- und Femurpatienten zu 25 % von Refrakturen betroffen sind [39]. Auch in der vorliegenden Studie trat bei keinem der Patienten (0 %) eine Refraktur auf. Dies legt die Schlussfolgerung nahe, dass trotz stark verminderter Hypertrophierate gegenüber der unteren Extremität die geringere Gewichtsbelastung das Risiko für Refrakturen minimiert.

6.3.4 Diskussion der Ergebnisse zum BHS

Das Ziel der vorliegenden Arbeit bestand unter anderem in der Überprüfung der Anwendbarkeit des tierexperimentell von GIESSLER et al. (2009) entwickelten röntgenologischen BHS auf die Bildgebung per Magnetresonanztomographie [49]. Einschränkend vorangestellt sei hier insbesondere die begrenzte Studienpatientenzahl ($n = 10$), bei der zum Zweck der Vergleichbarkeit beider Score-Erhebungsmethoden sowohl eine röntgenologische als auch eine MRT-gestützte Bildgebung erfolgen konnte. Jedoch kann im Rahmen der hier vorliegenden

Studie erstmalig die Übertragung des Schemas (Machbarkeit) auf die Magnetresonanztomographie als bildgebendes Verfahren belegt werden.

Hinsichtlich der Aussagekraft des BHS kann gezeigt werden, dass der im Median erzielte MR-BHS-Gesamtscore (n = 10) von 69,2 % hier gegenüber dem Röntgen-BHS beachtenswert in höherem Maß (+ 9,1 %) mit dem ähnlich hohen MSTS-Enneking-Scoreergebnis (n = 14) von 73,3 % korreliert, wobei beide Werte im oberen Drittel der Streubreite zwischen 0 % und 100 % liegen. Eine ähnliche Korrelation findet sich mit 24,4 % (unteres Drittel) auch im Hinblick auf die Ergebnisse des DASH-Scores (n = 14), da hier eine gegenläufige Gewichtung (0 % bildet das bestmöglich zu erzielende Ergebnis ab) vorgenommen wird. Dies könnte - trotz Einschränkung der nicht exakt deckungsgleichen Patientengruppen - Bedeutung bei der (prognostischen) Interpretation der MR-Bildgebung hinsichtlich der motorisch-funktionellen Fähigkeiten zusätzlich zukünftige Bedeutung finden. Auch im Hinblick auf die Patientenuntergruppen K und NK und die von beiden Gruppen erzielten stark ähnlichen motorisch-funktionellen Ergebnisse (DASH bzw. MSTS-Enneking-Score) spiegeln sich im MR-BHS stärker als im Röntgen-BHS wider (vgl. Kapitel 5.6.3.1 bzw. 5.6.4).

Weitere Anwendungsstudien mit einem größeren Patientenkollektiv sind indiziert, um den hier gezeigten Trend einer besseren Abbildung des MR- gegenüber des Röntgen-BHS hinsichtlich des motorisch-funktionellen Outcomes möglicherweise weiter zu verifizieren. Besonderes Augenmerk sollte dabei auf einer möglicherweise stärkeren Gewichtung der distalen Transplantatbewertung bei Anwendung der Magnetresonanztomographie (in der vorliegenden Studie + 21,4 %) gegenüber der Röntgendiagnostik liegen. Dies könnte insofern von Bedeutung sein, da EISENSCHENK et al. (1998) zeigen können, dass die distale gegenüber der proximalen Knocheneinheilung verzögert verläuft [66]. Daher könnte dieser Aspekt einen besonderen Stellenwert für die radiologische Diagnostik - insbesondere innerhalb der ersten 12 postoperativen Monate - einnehmen.

6.3.5 Diskussion der Ergebnisse zum Weiland-Score

Die Existenz zweier verschiedener Weiland-Scores resultiert aus der Modifizierung des ursprünglich von WEILAND et al. (1984) publizierten röntgenologischen Bewertungsschemas zugunsten des Einbezugs der Knochenhypertrophie und der sicheren Knocheneinheilung im proximalen und distalen bzw. einer möglichen Kortikalisverdickung im zentralen

Transplantatbereich durch HÖPFNER et al. (2003) [47,51]. Darüber hinaus werden spezifische Anpassungen für die Befundung an Radius und Ulna als Empfängerregion vorgenommen. Aufgrund der bereits präoperativ bestehenden nahezu gleichen Kaliberstärke insbesondere im Bereich des proximalen Radius und der distalen Ulna wird daher auf eine Befundung in diesen Bereichen verzichtet. Die diesbezügliche Fragestellung in der hier vorliegenden Arbeit zielte auf einen erstmaligen Vergleich zwischen konventionellem und modifiziertem Score und eine anschließende Einordnung im Literaturvergleich ab.

Für die Gesamtstudiengruppe zeigte sich bezüglich des modifizierten Weiland-Scores ein medianes Ergebnis von 85,7 %. Verglichen mit HÖPFNER (2003; 93,3 %) erzielte die Studiengruppe hiermit ein um 8,1 % erniedrigtes Ergebnis. Hierbei ist jedoch die abweichende Empfängerlokalisierung und die differente Zusammensetzung der Indikationsstellungen zu berücksichtigen, da bei ausschließlichem Einbezug der Ergebnisse für die obere Extremität bei HÖPFNER (2003) ein medianer Score von 88,3 % erreicht wird [47]. Somit wurden nahezu gleiche Ergebnisse erzielt.

Darüber hinaus ergab sich im direkten Vergleich ein um 13,7 % erhöhter medianer Score-Wert für das modifizierte gegenüber dem konventionellen Weiland-Schema als Ausdruck eines besseren Transplantatzustands. Eine differenzierte Bewertung nach konventionellem Schema wurde bei HÖPFNER (2003) nicht vorgenommen, sodass ein direkter interschematischer Vergleich an dieser Stelle nicht möglich ist.

Ferner erzielte die komplikationsfreie Patientengruppe NK gegenüber Gruppe K einen um 35,3 % (modifiziert) bzw. 18,2 % (konventionell) erhöhten medianen Score. Diese starke Diskrepanz lässt anhand der zugehörigen DASH-Ergebnisse keine motorisch-funktionellen Rückschlüsse zu. Anzuführen ist jedoch, dass die Gruppe NK mit 66,7 % einen deutlich höheren Anteil vollständig konsolidierter Transplantate zum Nachuntersuchungszeitpunkt gegenüber Gruppe K mit 40 % aufwies, sodass dies als Begründung für die oben genannte Diskrepanz angeführt werden könnte. Bei Betrachtung der ROM₁ und ROM₂ zeigt sich zudem insbesondere für die Gruppe K eine Reduzierung der Pro- und Supination (ROM₂) um 67,8 % gegenüber der Patientengruppe NK sowie für die Gruppe K eine Reduzierung der ROM₁ (Dorsalextension/ Palmarflexion/ Ulna-/ Radialabduktion im Handgelenk) um 28,6 % gegenüber der Patientengruppe NK. Unter einschränkender Berücksichtigung des kleinen Patientenkollektivs könnten die Kriterien Resorption und Hypertrophie des Weiland-Scores über die

röntgenologischen Kriterien hinaus prognostisch einen Hinweis auf die motorisch-funktionelle Gelenkbeweglichkeit beinhalten.

6.3.6 Diskussion des Stellenwerts postoperativer Angio-MRT-Bildgebung

Abschließend stellt sich die Frage nach dem klinischen Stellenwert postoperativer Angio-MR-Bildgebung nach erfolgter freier, vaskularisierter autologer Fibulatransplantation. Da SIEGERT und WOOD (1987) zeigen können, dass ein ursprünglich vaskularisiertes, aber postoperativ thrombosiertes Transplantat sogar einen primär avaskulären unterlegen ist, steht die Notwendigkeit der postoperativen Kontrolle der Knochengraftvitalität außer Frage [158].

Betrachtet man die methodenspezifischen Vor- und Nachteile kontinuierlicher Verfahren wie der Farb-Doppler-Sonographie, besticht diese Methode durch ihre Röntgenstrahlungsfreiheit, Kostengünstigkeit und gute Handhabbarkeit im klinischen Alltag, wobei sich eine starke Untersucherabhängigkeit und mögliche falsch-positive Ergebnisse durch Interferenzen umliegender Gefäße oder postoperative Ödeme als nachteilig erweisen können [34,65,109,163–166]. Die Anwendbarkeit auf FVFTs zeigen unter anderem SCHÖN et al. (2003) [167].

Als weiteres kontinuierliches Instrument bietet sich eine Monitor-Hautinsel an, die zugleich den Vorteil einer gleichzeitigen Weichteildefektdeckung mit sich bringt, was insbesondere bei traumatischer Indikationsstellung häufig angezeigt ist. Als Nachteile sind jedoch die Subjektivität bei der Interpretation der Hautinselvitalität und die begrenzte Gefäßstiellänge bei der Hebung zu nennen. BUYUKDERELI (2006) führt zudem einschränkend an, dass ein vitaler Hautlappen nicht zwingenderweise auf ein vitales Transplantat rückschließen lässt [109]

Im Rahmen der diskontinuierlichen Verfahren dominieren die Szintigraphie sowie die Angiographie. Die Szintigraphie birgt dabei als größten Nachteil neben der Radionukleotidbelastung laut CANOSA et al. (1994) und SHAFFER et al. (1987) das Risiko falsch-positiver Ergebnisse nach freier, vaskularisierter Knochentransplantation bzw. insbesondere bei der Verwendung von zusätzlicher Spongiosa im Empfängergebiet. Die von einigen Autoren publizierten einschränkenden Ergebnisse, dass eine Szintigraphie innerhalb der ersten 2 bis 10 postoperativen Tage auf eine Gefäßdurchgängigkeit rückschließen lasse, verhindert jedoch eine mittel- bis langfristige Anwendung zur Vitalitätsüberwachung [34,60,65,66,71,109].

Werden per Angiographie laut EISENSCHENK et al. (1998) eine gute Erhebbarkeit des Anastomosezustandes gewährleistet und laut SCHWETLICK et al. (1988) hiermit zufriedenstellende Ergebnisse erzielt, liegen die Nachteile dieser Methode in der Invasivität des Verfahrens sowie insbesondere in dem Risiko einer Endothelschädigung bzw. Läsion der mikrochirurgischen Gefäßstielanastomose [66,168–170]. Die von einigen Autoren wie PLIEFKE et al. (2009) angeführte Einsatzlimitation durch eine Gefäßdurchmesser-Mindestgröße spielt hier eine untergeordnete Rolle, da für die Anastomosierbarkeit bereits präoperativ eine Mindestgefäßgröße vorliegen muss [109]. Zudem ist auch hier aufgrund der Strahlungsbelastung keine unbegrenzte Wiederholung des Verfahrens möglich.

Auf Grundlage der vorangegangenen Darstellung zeigt sich das Potential, dass in einer MR-gestützten Vitalitätsüberwachung, aber auch in der magnetresonanztomographisch gestützten Score-Erfassung beruht. Die tierexperimentelle Anwendbarkeit von MR-Bildgebung zur Beurteilung vaskularisierter Fibulagrafts zeigte LOMASNEY et al. (1994) [171]. Auch die Detektierung von akuten Durchblutungsveränderungen des Knochenmarks nach arteriellen Verschlüssen anhand von MR-Bildgebung ist durch COVA et al. (1991) im Tiermodell belegt [172]. Das MR-angiographische Verfahren bietet neben der Non-Invasivität und den allgemeinen Vorteil der Schnittbilddarstellung im Gegensatz zur Sonographie die Möglichkeit einer retrospektiven Beurteilung. Darüber hinaus liegt trotz Kostenintensivität des Verfahrens der bedeutende Mehrwert einer MRT-Bildgebung auf der gleichzeitigen Evaluationsmöglichkeit des umliegenden Weichgewebes bzw. des Knochenmarks (T_1 -Gewichtung) bzw. der Diagnostik möglicher entzündlicher Prozesse oder Ödeme im Empfängergebiet (T_2 -Gewichtung) [116]. Neben einer quantitativen Bestimmung fibröser Verbindungen bei Pseudarthrosen dient das Verfahren laut KUNER et al. (1996) zur frühen und zuverlässigen Diagnostik ausbleibender ossärer Integration [18]. Zudem zeigt sich gegenüber der Angiographie der Vorteil des reduzierten Auslösungsrisikos von Vasospasmen bzw. Thrombosen [60]. Der Beleg der Anastomosedurchgängigkeit anhand von MRT-Bildgebung bietet in Kombination mit Röntgendiagnostik insbesondere für Patienten mit Revisionsoperationen Potential hinsichtlich der Entscheidung, wann mit Gewichtsbelastung begonnen werden kann.

Limitationen des Verfahrens finden sich neben der Anwenderabhängigkeit auch in patientenbedingten Ausschlusskriterien für diese Methodik (z.B. Herz-Kreislauf-Erkrankungen, nicht-MR-geeignete Herzschrittmacher, multiple Allergien, Asthma bronchiale,

bekannte Kontrastmittelunverträglichkeit, vorbestehende Nierenfunktionsbeeinträchtigungen, aber auch psychische Faktoren wie Klaustrophobie).

Dass eine akkurate Abbildung der Gefäße und der Anastomosenlokalisierung, wie von HAW et al. (1978) angeführt, nicht sichergestellt werden kann, kann anhand der vorliegenden Studie und dem zu 100 % erfolgten Rückschluss auf das Anastomosegebiet widerlegt werden. Die Minderung der Aufnahmequalität durch Artefaktbildung - wie u.a. bei SHELLOCK und CURTIS (1991), SHELLOCK et al. (1993) und TEITELBAUM et al. (1988) angeführt - insbesondere anhand von eingebrachtem Osteosynthesematerial zeigte sich in der vorliegenden Studie [173–175]. Es kann jedoch abschließend festgestellt werden, dass eine Befundung anhand der Kriterien des BHS trotzdem möglich ist. Da die radiologische Bewertung von MR-angiographischen Aufnahmen mit einem hohen fachlichen Anspruch verbunden ist, kann mit der vorliegenden Arbeit zur erleichterten klinischen Einschätzung ein Schema mit an die Hand gegeben werden, welches die Kriterien Kortikalisdurchgängigkeit, ossäre Durchbauung proximal und distal, Fettsignal im Markraum proximal und distal, Gefäßstieldurchgängigkeit arteriell und venös sowie das Auftreten eines möglichen paraossalen Flüssigkeitssignals bewertet. Hier sind weitere Anwendungsstudien hinsichtlich eines Ergebnis- und Sensitivitätsvergleichs indiziert. Darüber hinaus stellt sich auch die Frage einer möglicherweise indizierten unterschiedlichen Kriteriengewichtung innerhalb des Scores.

7 ZUSAMMENFASSUNG

Bezüglich der muskuloskelettalen Funktionalität scheint die autologe Transplantation einer freien, vaskularisierten Fibula an der oberen Extremität im Langzeitergebnis nur einen minimalen negativen subjektiven Funktionsunterschied (DASH) gegenüber der Normpopulation zu bewirken. Patienten mit indikationsstellender präoperativer Infektsituation erzielten weder ein grundsätzlich schlechteres postoperatives motorisches Outcome gegenüber der präoperativ infektfreien Patientengruppe noch konnte eine signifikante Erhöhung des postoperativen Komplikationsrisikos (insbesondere für wiederholte Infekte) dokumentiert werden. Es zeigte sich einschränkend in der objektiven motorischen Bewertung patientenübergreifend ein reduziertes Bewegungsausmaß der Pro- und Supination bei verbliebener reduzierter Faustschlusskraft gemessen an der nicht-operierten Gegenseite.

Im Gegensatz zu anderen vorliegenden Arbeiten wurde im vorgestellten Patientenkollektiv eine vollständige Abwesenheit postoperativer Komplikationen im Spendergebiet erzielt, wobei die Komplikationsrate im Empfängergebiet deutlich über den in der Literatur publizierten Ergebnissen lag. Hinsichtlich einer besseren künftigen Vergleichbarkeit ist hier die Entwicklung eines für diesen Eingriff spezifischen Klassifizierungsschemas nach Fallschwere zu fordern. Zu betonen ist das völlige Ausbleiben von Transplantatermüdungsfrakturen in der vorliegenden Studiengruppe. Eine Schmerzbehaftung betraf ausschließlich das Empfängergebiet bei Belastung.

Bei Betrachtung der subjektiven Lebensqualität (SF-36) zeigte sich auf physischer Ebene nur mäßig gegenüber dem korrigierten bundesdeutschen Durchschnitt reduziert. Das Vorliegen postoperativer Komplikationen nahm hierbei weder auf die physische noch auf die psychische Lebensqualität zusätzlich negativen Einfluss.

Klinisch hervorzuheben ist eine statistisch signifikante Erhöhung des postoperativen Infektionsrisikos bei Verwendung von Spalthaut an der Empfängerregion bedingt durch eine

Wundflächenvergrößerung. Diesem Aspekt sollte in der postoperativen Nachsorge nach freier, vaskularisierter Fibulatransplantation verstärkte Aufmerksamkeit zukommen.

Im Hinblick auf die radiologischen Ergebnisse konnte im Literaturvergleich eine deutlich reduzierte röntgenologisch gesicherte Konsolidierungsrate der Fibulatransplantate festgestellt werden. Weder die Anzahl der Voroperationen, das Patientenalter zum Operationszeitpunkt noch eine präoperativ vorliegende Infektsituation zeigte sich hierbei als prognostisch ausschlaggebender Faktor auf die ausbleibende Knocheneinheilung. Die Hypertrophierate zeigte sich für die obere Extremität wie anhand der Literatur zu erwarten gegen null tendierend.

Besonderen Stellenwert nimmt die in dieser Arbeit gezeigte erstmalige Übertragung des Bone-Healing-Scores (Machbarkeit) auf die Magnetresonanztomographie als bildgebendes Verfahren ein. Dabei konnte belegt werden, dass der mediane BHS-Gesamtscore mit den motorisch-funktionellen Ergebnissen (DASH, MSTS-Enneking) korreliert. Bei Anwendung des modifizierten Weiland-Scores konnten gegenüber dem konventionellen Schema höhere Werte als Ausdruck eines besseren Transplantatzustandes erreicht werden.

Da die radiologische Bewertung von MR-angiographischen Aufnahmen mit einem hohen fachlichen Anspruch verbunden ist, wurde mit der vorliegenden Arbeit zur erleichterten klinischen Einschätzung ein Schema mit an die Hand gegeben, welches die Kriterien Kortikalisdurchgängigkeit, ossäre Durchbauung proximal und distal, Fettsignal im Markraum proximal und distal, Gefäßstieldurchgängigkeit arteriell und venös sowie das Auftreten eines möglichen paraossalen Flüssigkeitssignals bewertet. Hier sind weitere Anwendungsstudien hinsichtlich eines Ergebnis- und Sensitivitätsvergleichs sowie einer möglichen differenzierten Kriteriengewichtung indiziert. Eine Unterscheidung der Hypertrophieformen periostal vs. endostal konnte anhand von MR-Bildgebung nicht gezeigt werden. Die anastomosierten Gefäße präsentierten sich mit einer 100%igen Durchgängigkeit aller untersuchten Gefäßstiele. Obwohl aufgrund der ausnahmslosen Durchgängigkeit keine differenzierten Rückschlüsse zwischen Vitalitätserhalt und Spätkomplikationen wie Transplantatfraktur, persistierende Osteomyelitis oder Pseudarthrose zu ziehen war, konnte in der vorliegenden Arbeit der langfristige Vitalitätserhalt bei Anastomosendurchgängigkeit erstmals MR-angiographisch gezeigt werden.

8 ANHANG

DASH-Score

Dieser Fragebogen beschäftigt sich sowohl mit Ihren Beschwerden als auch mit Ihren Fähigkeiten, bestimmte Tätigkeiten auszuführen. Bitte beantworten Sie alle Fragen gemäß Ihrem Zustand in der vergangenen Woche, indem Sie einfach die entsprechende Zahl ankreuzen. Wenn Sie in der vergangenen Woche keine Gelegenheit gehabt haben, eine der unten aufgeführten Tätigkeiten durchzuführen, so wählen Sie die Antwort aus, die Ihrer Meinung nach am ehesten zutreffen würde. Es ist nicht entscheidend, mit welchem Arm oder welcher Hand Sie diese Tätigkeiten ausüben. Antworten Sie Ihrer Fähigkeit entsprechend, ungeachtet, wie Sie die Aufgaben durchführen konnten.

Antwortmöglichkeiten:

- 1 – Keine Schwierigkeiten
- 2 – Geringe Schwierigkeiten
- 3 – Mäßige Schwierigkeiten
- 4 – Erhebliche Schwierigkeiten
- 5 – Nicht möglich

Bitte schätzen Sie Ihre Fähigkeit ein, wie Sie folgende Tätigkeiten in der vergangenen Woche durchgeführt haben, indem Sie die entsprechende Zahl ankreuzen (1. – 21. Frage).

1. Ein neues oder festverschlossenes Glas öffnen
2. Schreiben
3. Einen Schlüssel umdrehen
4. Eine Mahlzeit zubereiten
5. Eine schwere Tür aufstoßen

6. Einen Gegenstand über Kopfhöhe auf ein Regal stellen
7. Schwere Hausarbeit (z.B. Wände abwaschen, Boden putzen)
8. Garten- oder Hofarbeit
9. Betten machen
10. Eine Einkaufstasche oder Aktenkoffer tragen
11. Einen schweren Gegenstand tragen (über 5 kg)
12. Eine Glühbirne über Ihrem Kopf auswechseln
13. Ihre Haare waschen oder fönen
14. Ihren Rücken waschen
15. Einen Pullover anziehen
16. Ein Messer benutzen, um Lebensmittel zu schneiden
17. Freizeitaktivitäten, die ein wenig körperliche Anstrengung verlangen (z.B. Karten spielen, Stricken usw.)
18. Freizeitaktivitäten, bei denen auf Ihren Arm, Schulter oder Hand Druck oder Stoß ausgeübt wird (z.B. Golf, Hämmern, Tennis)
19. Freizeitaktivitäten, bei denen Sie ihren Arm frei bewegen (z.B. Badminton, Frisbee)
20. Mit Fortbewegungsmitteln zu Recht kommen (um von einem Platz zum anderen zu gelangen)
21. Sexuelle Aktivität
22. In welchem Ausmaß haben Ihre Schulter-, Arm- oder Handprobleme Ihre normalen sozialen Aktivitäten mit der Familie, Freunden, Nachbarn oder anderen Gruppen während der vergangenen Woche beeinträchtigt?
23. Waren Sie in der vergangenen Woche durch Ihre Schulter-, Arm- oder Handprobleme in Ihrer Arbeit oder anderen alltäglichen Aktivitäten eingeschränkt?

Bitte schätzen Sie die Schwere der folgenden Beschwerden während der letzten Woche ein (24.

- 28. Frage):

24. Schmerzen in Schulter, Arm oder Hand
25. Schmerzen in Schulter, Arm oder Hand während der Ausführung einer bestimmten Tätigkeit
26. Kribbeln (Nadelstiche) in Schulter, Arm oder Hand
27. Schwächegefühl in Schulter, Arm oder Hand
28. Steifheit in Schulter, Arm oder Hand

29. Wie groß waren Ihre Schlafstörungen in der letzten Woche aufgrund von Schmerzen im Schulter-, Arm- oder Handbereich?
30. Aufgrund meiner Probleme im Schulter-, Arm- oder Handbereich empfinde ich meine Fähigkeiten als eingeschränkt, ich habe weniger Selbstvertrauen oder ich fühle, dass ich mich weniger nützlich machen kann.

SF-36

In diesem Fragebogen geht es um die Beurteilung Ihres Gesundheitszustandes. Der Bogen ermöglicht es, im Zeitverlauf nachzuvollziehen, wie Sie sich fühlen und wie Sie im Alltag zurechtkommen. Bitte beantworten Sie jede Frage, indem Sie bei den Antwortmöglichkeiten die Zahl ankreuzen, die am besten an Sie zutrifft.

1. Wie würden Sie Ihren Gesundheitszustand im Allgemeinen beschreiben?

Antwortmöglichkeiten:

- 1 – Ausgezeichnet
- 2 – Sehr gut
- 3 – Gut
- 4 – Weniger gut
- 5 – Schlecht

2. Im Vergleich zum vergangenen Jahr, wie würden Sie ihren derzeitigen Gesundheitszustand beschreiben?

Antwortmöglichkeiten:

- 1 – Derzeit viel besser
- 2 – Derzeit etwas besser
- 3 – Etwa wie vor einem Jahr
- 4 – Derzeit etwas schlechter
- 5 – Derzeit viel schlechter

Im Folgenden sind einige Tätigkeiten beschrieben, die Sie vielleicht an einem normalen Tag ausüben. Sind Sie durch Ihren derzeitigen Gesundheitszustand bei diesen Tätigkeiten eingeschränkt? Wenn ja, wie stark?

- 3.a anstrengende Tätigkeiten, z. B. schnell laufen, schwere Gegenstände heben
anstrengenden Sport treiben
- 3.b mittelschwere Tätigkeiten, z. B. einen Tisch verschieben, staubsaugen, kegeln, Golf
spielen
- 3.c Einkaufstaschen heben oder tragen
- 3.d mehrere Treppenabsätze steigen
- 3.e einen Treppenabsatz steigen
- 3.f sich beugen, knien, bücken
- 3.g mehr als 1 Kilometer zu Fuß gehen
- 3.h mehrere Straßenkreuzungen weit zu Fuß gehen
- 3.i eine Straßenkreuzung weit zu Fuß gehen
- 3.j sich baden oder anziehen

Antwortmöglichkeiten:

- 1 – Ja, stark eingeschränkt
- 2 – Ja, etwas eingeschränkt
- 3 – Nein, überhaupt nicht eingeschränkt

Hatten Sie in den vergangenen 4 Wochen aufgrund Ihrer körperlichen Gesundheit irgendwelche Schwierigkeiten bei der Arbeit oder anderen alltäglichen Tätigkeiten im Beruf oder zu Hause?

- 4.a Ich konnte nicht so lange wie üblich tätig sein
- 4.b Ich habe weniger geschafft als ich wollte.
- 4.c Ich konnte nur bestimmte Dinge tun.
- 4.d Ich hatte Schwierigkeiten bei der Ausführung.

Antwortmöglichkeiten:

- 1 – Ja
- 2 – Nein

Hatten Sie in den vergangenen 4 Wochen aufgrund seelischer Probleme irgendwelche Schwierigkeiten bei der Arbeit oder anderen alltäglichen Tätigkeiten im Beruf bzw. zu Hause (z. B. weil Sie sich niedergeschlagen oder ängstlich fühlten)?

- 5.a Ich konnte lange wie üblich tätig sein.
- 5.b Ich habe weniger geschafft als ich wollte.
- 5.c Ich konnte nicht so sorgfältig wie üblich arbeiten.

Antwortmöglichkeiten:

- 1 – Ja
- 2 – Nein

6. Wie sehr haben Ihre körperliche Gesundheit oder seelischen Probleme in den vergangenen 4 Wochen Ihre normalen Kontakte zu Familienangehörigen, Freunden, Nachbarn oder zum Bekanntenkreis beeinträchtigt?

Antwortmöglichkeiten:

- 1 – Überhaupt nicht
- 2 – Etwas
- 3 – Mäßig
- 4 – Ziemlich
- 5 – Sehr

7. Wie stark waren Ihre Schmerzen in den vergangenen 4 Wochen?

Antwortmöglichkeiten:

- 1 – Keine
- 2 – Sehr leicht
- 3 – Leicht
- 4 – Mäßig
- 5 – Stark
- 6 – Sehr stark

8. Inwieweit haben die Schmerzen Sie in den vergangenen 4 Wochen bei der Ausübung Ihrer Alltagstätigkeiten zu Hause und im Beruf behindert?

Antwortmöglichkeiten:

- 1 – Überhaupt nicht
- 2 – Ein bisschen
- 3 – Mäßig
- 4 – Ziemlich
- 5 – Sehr

In diesen Fragen geht es darum, wie Sie sich fühlen und wie es Ihnen in den vergangenen 4 Wochen gegangen ist. (Bitte kreuzen Sie in jeder Zeile die Zahl an, die Ihrem Befinden am ehesten entspricht).

Wie oft waren Sie in den vergangenen 4 Wochen...

- 9.a ... voller Schwung?
- 9.b ... sehr nervös?
- 9.c ... so niedergeschlagen, dass Sie nichts aufheitern konnte?
- 9.d ... ruhig und gelassen?
- 9.e ... voller Energie?
- 9.f ... entmutigt und traurig?
- 9.g ... erschöpft?
- 9.h ... glücklich?
- 9.i ... müde?

Antwortmöglichkeiten:

- 1 – Immer
- 2 – Meistens
- 3 – Ziemlich oft
- 4 – Manchmal
- 5 – Selten
- 6 – Nie

10. Wie häufig haben Ihre körperliche Gesundheit oder seelischen Probleme in den vergangenen 4 Wochen Ihre Kontakte zu anderen Menschen (Besuche bei Freunden, Verwandten usw.) beeinträchtigt?

Antwortmöglichkeiten:

- 1 – Immer
- 2 – Meistens
- 3 – Manchmal
- 4 – Selten
- 5 – Nie

Inwieweit trifft jede der folgenden Aussagen auf Sie zu?

- 11.a Ich scheine etwas leichter als andere krank zu werden.
- 11.b Ich bin genauso gesund wie alle anderen, die ich kenne.
- 11.c Ich erwarte, dass meine Gesundheit nachlässt.
- 11.d Ich erfreue mich ausgezeichneter Gesundheit.

Antwortmöglichkeiten:

- 1 – Trifft ganz zu
- 2 – Trifft weitgehend zu
- 3 – Weiß nicht
- 4 – Trifft weitgehend überhaupt nicht zu
- 5 – Trifft überhaupt nicht zu

MSTS-Enneking-Score

Bewertung für die untere Extremität

Schmerz

Antwortmöglichkeiten:

5 – Kein

4 –

3 – Mäßig

2 –

1 – Bescheiden

0 – Schwer

Funktion

Antwortmöglichkeiten:

5 – Keine Einschränkung

4 –

3 – Eingeschränkte Freizeitgestaltung

2 –

1 – Teilweise behindert

0 – Vollständige Behinderung

Emotionale Akzeptanz

Antwortmöglichkeiten:

5 – Begeistert

4 –

3 – Zufrieden

2 –

1 – Akzeptanz

0 – Unzufrieden

Hilfsmittel

Antwortmöglichkeiten:

5 – Keine

4 –

3 – Orthese

2 –

1 – 1 Gehstütze

0 – 2 Gehstützen

Laufen

Antwortmöglichkeiten:

5 – Uneingeschränkt

4 –

3 – Limitiert

2 –

1 – Nur drinnen

0 – Nicht ohne Hilfe

Gangart

Antwortmöglichkeiten:

5 – Normal

4 –

3 – Gering kosmetisch störend

2 –

1 – Deutlich kosmetisch störend, geringes Handicap

0 – Deutliches Handicap

Bewertung für die obere Extremität

Schmerz

Antwortmöglichkeiten:

5 – Kein

4 –

3 – Mäßig

2 –

1 – Bescheiden

0 – Schwer

Funktion

Antwortmöglichkeiten:

5 – Keine Einschränkung

4 –

3 – Eingeschränkte Freizeitgestaltung

2 –

1 – Teilweise behindert

0 – Vollständige Behinderung

Emotionale Akzeptanz

Antwortmöglichkeiten:

5 – Begeistert

4 –

3 – Zufrieden

2 –

1 – Akzeptanz

0 – Unzufrieden

Positionieren der Hand

Antwortmöglichkeiten:

- 5 – Uneingeschränkt
- 4 –
- 3 – Nicht über Schulterhöhe, keine Pro/ Sup
- 2 –
- 1 – Nicht über Hüfthöhe
- 0 – Lähmung

Fingerfertigkeit/ Geschicklichkeit

Antwortmöglichkeiten:

- 5 – Normal
- 4 –
- 3 – Verlust der Feinmotorik
- 2 –
- 1 – Verlust Pinchgriff
- 0 – Verlust Grobmotorik

Fähigkeit zum Anheben

Antwortmöglichkeiten:

- 5 – Normal
- 4 –
- 3 – Eingeschränkt
- 2 –
- 1 – Nur mit Hilfe
- 0 – Nicht fähig

Messblatt für obere Gliedmaßen

Name:

Aktenzeichen:

Untersuchungstag:

Rechtshänder Linkshänder

Messblatt für obere Gliedmaßen (nach der Neutral - 0 - Methode)

Schultergelenke:

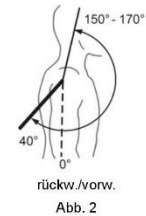
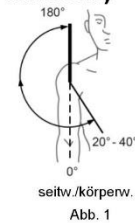
Arm seitwärts / körperwärts (Abb. 1)

Arm rückwärts / vorwärts (Abb. 2)

Arm auswärts / einwärts drehen (Oberarm anliegend) (Abb. 3)

Arm kopfwärts / fußwärts (Oberarm 90° seitwärts abgehoben) (Abb. 4)

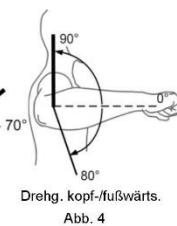
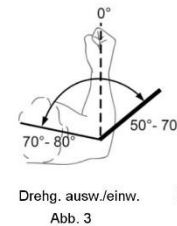
Rechts					Links				



Ellenbogengelenke:

Streckung / Beugung (Abb. 5)

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--



Unterarmdrehung:

auswärts / einwärts (Abb. 6)

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Handgelenke:

handrückenwärts / hohlhandwärts (Abb. 7)

speichenwärts / ellenwärts (Abb. 8)

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Fingergelenke:

Abstände in cm:

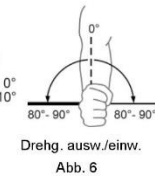
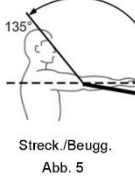
Fingerkuppe von der queren

Hohlhandbeugefalte (Abb. 9)

Fingerkuppe von der verlängerten

Handrückenebene (Abb. 10)

II	III	IV	V	II	III	IV	V



Daumengelenke:

Streckung / Beugung:

Grundgelenk

Endgelenk

Ab spreizung (Winkel zwischen 1. und 2. Mittelhandknochen)

In der Handebene (Abb. 11)

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

0				0			
---	--	--	--	---	--	--	--

Rechtwinklig zur Handebene (Abb. 12)

II	III	IV	V	II	III	IV	V

Ankreuzen, welche Langfingerkuppen mit der Daumenspitze erreicht werden können

Handspanne:

Größter Abstand in cm zwischen Daumen- und Kleinfingerkuppe

--	--	--	--	--	--	--	--

Umfangmaße in cm:

(Hängender Arm)

15 cm oberhalb äußerem Oberarmknorren

Ellenbogengelenk

10 cm unterhalb äußerem Oberarmknorren

Handgelenk

Mittelhand (ohne Daumen)

Armlänge in cm:

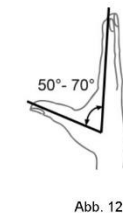
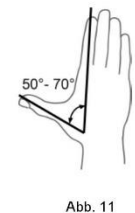
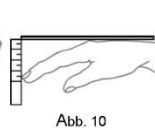
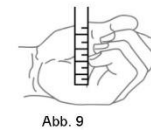
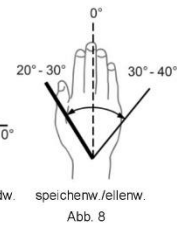
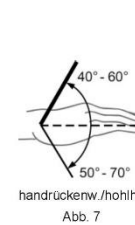
Schulterhöhe / Speichenende

--	--	--	--	--	--	--	--

Stumpflängen in cm:

Schulterhöhe / Stumpfende

Äußerer Oberarmknorren / Stumpfende



Messblatt für untere Gliedmaßen

Name:

Aktenzeichen:

Untersuchungstag:

Standbein: rechts links

Messblatt für untere Gliedmaßen (nach der Neutral - 0 - Methode)

Hüftgelenke:

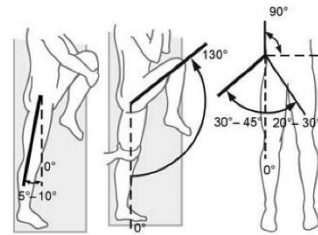
Streckung / Beugung (Abb. 1 a und 1 b)

Abspreizen / Anführen (Abb. 2)

Drehung auswärts / einwärts (Hüftgelenk 90° gebeugt) (Abb. 3)

Drehung auswärts / einwärts (Hüftgelenk gestreckt) (Abb. 4)

Rechts		Links	

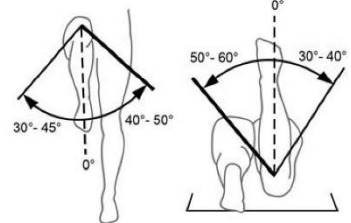


Kniegelenke:

Streckung / Beugung (Abb. 5)

--	--	--	--	--	--

Streck./Beugg. Abb. 1a Abb. 1b Abspreiz./Anführen Abb. 2



Obere Sprunggelenke:

Heben / Senken des Fußes (Abb. 6)

--	--	--	--	--	--

Drehg. ausw./einw. Abb. 3 Drehg. ausw./einw. Abb. 4

Untere Sprunggelenke:

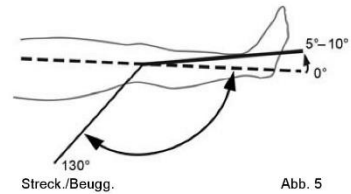
Gesamte Beweglichkeit (Fußaußenrand heben Abb. 7 a / senken Abb. 7 b) (in Bruchteilen der normalen Beweglichkeit)

--	--

Zehngelenke:

(in Bruchteilen der normalen Beweglichkeit)

--	--



Umfangmaße in cm:

20 cm ob. innerer Knie-Gelenkspalt

10 cm ob. innerer Knie-Gelenkspalt

Kniescheibenmitte

15 cm unterhalb innerer Gelenkspalt

Unterschenkel, kleinster Umfang

Knöchel

Rist über Kahnbein

Vorfußballen

Streck./Beugg. Abb. 5

Beinlänge in cm:

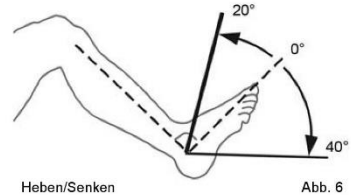
Vorderer oberer Darmbeinstachel - Außenknöchelspitze

--	--

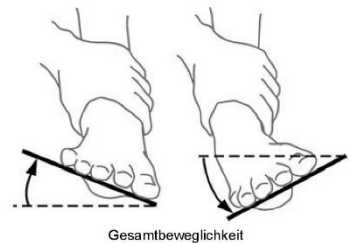
Stumpflänge in cm:

Sitzbein - Stumpfende

Innerer Knie-Gelenkspalt - Stumpfende



Heben/Senken Abb. 6



Gesamtbeweglichkeit Abb. 7 a Außenrand heben Abb. 7 b Außenrand senken

Messblatt Finger

Name: _____ Aktenzeichen: _____

Untersuchungstag: _____

Rechtshänder Linkshänder

Messblatt Finger (nach der Neutral - 0 - Methode)

A. Streckung / Beugung

Daumen

Grundgelenk (Abb. 1 a)

Endgelenk (Abb. 1 b)

Rechts				Links			

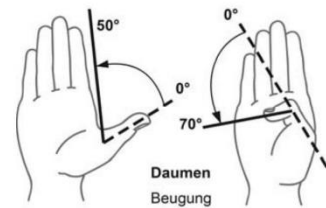


Abb. 1 a

Abb. 1 b

Abspreizung (Winkel zwischen 1. und 2. Mittelhandknochen

in der Handebene (Abb. 2)

rechtwinklig zur Handebene (Abb. 3)

Rechts				Links			
0				0			
0				0			

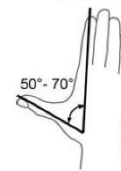


Abb. 2

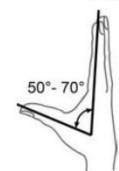


Abb. 3

B. Streckung / Beugung (Abb. 4 bis 6)

Langfinger

II. Grundgelenk Zeigefinger

II. Mittelgelenk Zeigefinger

II. Endgelenk Zeigefinger

Rechts				Links			



Streckung Grundgelenk

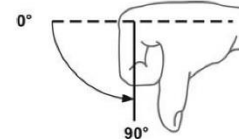
Abb. 4

III. Grundgelenk Mittelfinger

III. Mittelgelenk Mittelfinger

III. Endgelenk Mittelfinger

Rechts				Links			



Beugung Grundgelenk

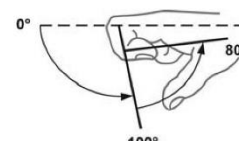
Abb. 5

IV. Grundgelenk Ringfinger

IV. Mittelgelenk Ringfinger

IV. Endgelenk Ringfinger

Rechts				Links			



Beugung Mittelgelenk Endgelenk

Abb. 6

V. Grundgelenk Kleiner Finger

V. Mittelgelenk Kleiner Finger

V. Endgelenk Kleiner Finger

Rechts				Links			

C. Abstand Fingerkuppen

von der queren Hohlhandbeugefalte in cm (Abb. 7)

von der verlängerten Handrückenebene in cm (Abb. 8)

Ankreuzen, welche Langfingerkuppen mit der Daumenspitze erreicht werden können

II.	III.	IV.	V.	II.	III.	IV.	V.



Abb. 7



Abb. 8

Rosén- und Lundborg-Score

Bereich Sensorik

Innervation: Semmes-Weinstein-Monofilamente, Minikit, Ergebnis = 0 - 15

Medianus: Phalanx distalis D1, Phalanx proximalis und distalis D2

Ulnaris: Phalanx proximalis und distalis D5, ulnar-palmare Handfläche

0 – Nicht durchführbar

1 – Filament 6,65

2 – Filament 4,56

3 – Filament 4,31

4 – Filament 3,61

5 – Filament 2,83

Normal Medianus = 15

Normal Ulnaris = 15

2-Punkt-Diskrimination (D2 bzw. D5), Ergebnis = 0 - 3 Punkte

0 – ≥ 16 mm

1 – 11 - 15 mm

2 – 6 - 10 mm

3 – ≤ 5 mm

Normal = 3

STI-Test (D2 und D5), taktile Identifikation von 3 Gegenständen unterschiedlicher Oberflächenstruktur, Ergebnis = 0 - 6 Punkte

0 – Gegenstand nicht erkannt

1 – Gegenstand erkannt

Normal = 6

Fingerfertigkeit: Sollermann-Handfunktionstest, 3 Aufgaben (5 Münzen unterschiedlicher Größe aus Geldbörse per Spitzgriff entnehmen und auf den Tisch legen, 3 Knöpfe unterschiedlicher Größe per Spitz- und Schlüsselgriff öffnen, 3 Muttern unterschiedlicher Größe auf die jeweilige Schraube per Schlüsselgriff drehen), Ergebnis = 0 - 12 Punkte

- 0 – Aufgabe kann nicht ausgeführt werden
- 1 – Aufgabe kann nur teilweise innerhalb von 60 Sekunden ausgeführt werden
- 2 – Aufgabe mit großer Schwierigkeit ausgeführt bzw. Aufgabe nicht innerhalb von 40 Sekunden, aber innerhalb von 60 Sekunden ausgeführt oder Aufgabe nicht im entsprechenden Handgriff ausgeführt
- 3 – Aufgabe mit geringer Schwierigkeit ausgeführt bzw. Aufgabe nicht innerhalb von 20 Sekunden, aber innerhalb von 40 Sekunden ausgeführt werden bzw. Aufgabe mit entsprechendem Handgriff bei leichter Abweichung ausgeführt
- 4 – Aufgabe ohne jegliche Schwierigkeit innerhalb von 20 Sekunden mit dem entsprechenden Handgriff ohne Abweichungen ausgeführt

Normal = 12

Bereich Motorik

Innervation: Manueller Muskel-Test 0 - 5, Ergebnis Medianus = 0 - 5 bzw. Ulnaris = 0 - 15

Medianus: Palmarabduktion

Ulnaris: Abduktion D2 und D5

Adduktion D5

- 0 – Keine Muskelkontraktion sichtbar
- 1 – Sicht- oder tastbare Muskelkontraktion
- 2 – Bewegung ohne Gravitationseinfluss bei vollem Bewegungsausmaß
- 3 – Bewegung unter Gravitationseinfluss bei vollem Bewegungsausmaß
- 4 – Bewegung gegen leichten Widerstand bei vollem Bewegungsausmaß
- 5 – normale Muskelkraft

Normal Medianus = 5

Normal Ulnaris = 15

Griffstärke: Jamar Dynamometer, Durchschnitt aus 3 Messungen rechts und links

Normal = Ergebnis der unverletzten Hand

Bereich Schmerz

Kälteempfindlichkeit: Patienteneinschätzung über vorliegende Einschränkung, Ergebnis

= 0 - 3

0 – Funktion behindert

1 – Störend

2 – Gemäßigt

3 – Keine

Normal = 3

Hyperästhesie: Patienteneinschätzung über vorliegende Einschränkung, Ergebnis = 0 - 3

0 – Funktion behindert

1 – Störend

2 – Gemäßigt

3 – Keine

Normal = 3

9 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

A	Patientenuntergruppe Indikationsgruppe Arthrose
A.	Arteria/ Arterie
AAOS	American Academy of Orthopedic Surgeons
ADL	Activities of daily life
AG	Analgetika einnehmende Patientenuntergruppe
ANOVA	Analysis of Variance (einfaktorielle Varianzanalyse)
BHS	Bone Healing Score
BI	Patientenuntergruppe Komplikationsgruppe bakterielle Infektion
BMP	bone morphogenetic protein
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
cm	Zentimeter
COMSS	Council of Musculokeletal Speciality Societies
d.h.	das heißt
DASH	Disabilities of the Arm, Shoulder and Hand
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
et al.	et alii/ et aliae = und andere
F 4220 0816	Messblätter für die Finger (Neutral-Null-Methode)
F 4222 0117	Messblätter für die oberen Gliedmaßen (Neutral-Null-Methode)
F 4224 0816	Messblätter für die unteren Gliedmaßen (Neutral-Null-Methode)
FVFT	freie, vaskularisierte Fibulatransplantation
GFR	glomeruläre Filtrationsrate
ggf.	gegebenenfalls
HiRes	High Resolution

I	Präoperativ infektbehaftete Patientenuntergruppe
ISOLS	International Symposium on Limb Salvage
K	Postoperativ komplikationsbehaftete Patientenuntergruppe
Lig.	Ligamentum/ Ligament
M.	Musculus/ Muskel
Max.	Maximum
MdE	Minderung der Erwerbsfähigkeit
Min	Minimum
MIP	Maximum Intensitätsprojektionen
ml	Milliliter
mm	Millimeter
MOS	Medical Outcome Study
MR-	Magnetresonanz-
MRA	Magnetresonanz-Angiographie
MRT	Magnetresonanz-Tomographie
ms	Millisekunden
MSTS	Musculoskeletal Tumor Society
N.	Nervus/ Nerv
NA	Analgetikafreie Patientenuntergruppe
neg.	negativ
NI	Präoperativ nfektionsfreie Patientenuntergruppe
NK	Postoperativ komplikationsfreie Patientenuntergruppe
Nm	Newtonmeter
OEX	obere Extremität
OM	Patientenuntergruppe Indikationsgruppe Osteomyelitis
OP	Operation
P	Patientenuntergruppe Komplikationsgruppe Pseudarthrose
PA	Patientenuntergruppe Indikationsgruppe Pseudarthrose
PB	Patientenuntergruppe mit Plattenbruch
postop.	postoperativ
präop.	präoperativ
p-Wert	Probability = (Überschreitungs)wahrscheinlichkeit, Signifikanz
RefScan	Reference Scan

RLS	Rosén-Lundborg-Score
ROM ₁	Range of Motion
ROM ₂	Range of Motion
SF-36	Short-Form 36
sog.	sogenannte(r/s)
SPSS	Statistical Package für Social Sciences (Statistik-Software)
STIR	short time inversion recovery
STI-Test	Shape/ Texture Identification Test
T	Patientenuntergruppe Indikationsgruppe Tumor
T ₁	Hypointense MR-Kontrastdarstellung von wasserhaltigen Strukturen
T ₂	Hyperintense MR-Kontrastdarstellung von wasserhaltigen Strukturen
T ₃	Trijodthyronin (Schilddrüsenhormon)
T ₄	Thyroxin (Schilddrüsenhormon)
Tc-99m	Technetium-99m (Radioisotop)
TRH	Thyrotropin Releasing Hormone
TSE	Turbo Spin Echo
t-Test	Statistischer Test auf Normalverteilung (triangular = Dreiecksform)
u.a.	unter anderem
UEX	untere Extremität
UKB	Unfallkrankenhaus Berlin
USA	United States of America
vs.	Versus
usw.	und so weiter
V.	Vena/ Vene
VAS	Visuelle Analogskala
Vv.	Venae/ Venen
WHO	World Health Organization
z.B.	zum Beispiel

10 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

- Abbildung 1:** Planung des Operationsfeldes mit Unterteilung der Fibula in Fünftel (mit freundlicher Unterstützung durch Fr. Dorothea Scheurlen, ukb) Seite 17
- Abbildung 2:** Hautschnitt über die mittleren 3 Fünftel entlang der Hautinselvorderkante (mit freundlicher Unterstützung durch Fr. Dorothea Scheurlen, ukb) Seite 18
- Abbildung 3:** Identifikation des Fettstreifens zwischen M. soleus und M. peroneus longus (mit freundlicher Unterstützung durch Fr. Dorothea Scheurlen, ukb) Seite 18
- Abbildung 4:** Präparation des Septum intermusculare laterale mit Darstellung der perforierenden Gefäße (Pfeile) der geplanten Hautinsel (*) (mit freundlicher Unterstützung durch Fr. Dorothea Scheurlen, ukb) Seite 19
- Abbildung 5:** Darstellung der Fibula mit muskulärem Mantel (mit freundlicher Unterstützung durch Fr. Dorothea Scheurlen, ukb) Seite 20
- Abbildung 6:** Proximale Osteotomie der Fibula mithilfe der oszillierenden Säge (mit freundlicher Unterstützung durch Fr. Dorothea Scheurlen, ukb) Seite 21

- Abbildung 7:** Dissektion des M. tibialis posterior unter Außenrotation der Fibula (mit freundlicher Unterstützung durch Fr. Dorothea Scheurlen, ukb) Seite 21
- Abbildung 8:** Mobilisation der Fibula aus dem Transplantatbett (mit freundlicher Unterstützung durch Fr. Dorothea Scheurlen, ukb) Seite 22
- Abbildung 9:** Vollständig gehobenes Fibulatransplantat mit dargestelltem peronealen Gefäßstiel (Pfeil) und Hautinsel mit Perforatorgefäßen (*) (mit freundlicher Unterstützung durch Fr. Dorothea Scheurlen, ukb) Seite 23
- Abbildung 10:** Spülung der Spendergefäße mit Heparinlösung (mit freundlicher Unterstützung durch Fr. Dorothea Scheurlen, ukb) Seite 23
- Abbildung 11:** Hautverschluss unter Spalthauttransplantatverwendung (mit freundlicher Unterstützung durch Fr. Dorothea Scheurlen, ukb) Seite 24
- Abbildung 12:** Präpariertes Empfängergebiet mit Gefäßanschlingungen per Loops (mit freundlicher Unterstützung durch Fr. Dorothea Scheurlen, ukb) Seite 25
- Abbildung 13:** Einpassung des Transplantates im Empfängergebiet (mit freundlicher Unterstützung durch Fr. Dorothea Scheurlen, ukb) Seite 25
- Abbildung 14:** Intraoperative Drainageneinlage und Hautverschluss (links) sowie 1. postoperativer Tag (rechts) (mit freundlicher Unterstützung durch Fr. Dorothea Scheurlen, ukb) Seite 26
- Abbildung 15:** Flussdiagramm zur Zusammensetzung der Studiengruppe, n = Patientenzahl Seite 32

Abbildung 16: Box-Plot-Darstellung der Ergebnisse der SF-36-Parameter (Subskalen) körperliche Funktionsfähigkeit, körperliche Rollenfunktion, körperliche Schmerzen und allgemeiner Gesundheitszustand sowie des Parameters Score physische Gesundheitskomponenten (Gesamtscore der Subskalen) (X-Achse). Angabe von Absolutwerten (Spannweite 0 – 100 Punkte) (Y-Achse). Darstellung von Minimum, 25. Perzentile, Median, 75. Perzentile und Maximum.

Seite 52

Abbildung 17: Box-Plot-Darstellung der Ergebnisse der SF-36-Parameter (Subskalen) Vitalität, soziale Funktionsfähigkeit, emotionale Rollenfunktion und psychisches Wohlbefinden sowie des Parameters Score psychische Gesundheitskomponenten als Gesamtscore der Subskalen (X-Achse). Angabe von Absolutwerten (Y-Achse). Spannweite 0 - 100 Punkte. Darstellung von Minimum, 25. Perzentile, Median, 75. Perzentile und Maximum

Seite 53

Abbildung 18: Box-Plot-Darstellung des Parameters Motorik (X-Achse) anhand des ROM₁ (Handgelenk Dorsalextension/ Palmarflexion/ Ulna-/ Radialabduktion; Mann-Whitney-U-Test $p = 0,19$) und ROM₂ (Handgelenk Pronation/ Supination; $p = 0,04$) sowie des Rosén-Lundborg-Scores RLS (Untermodul Motorik; $p = 0,3$) und der Kraft anhand Pinchmeter (Schlüsselgriff; $p = 0,64$) und Dynamometer (Faustschluss; $p = 0,19$). Prozentuale Angaben (Y-Achse) im Vergleich zur nicht-operierten Gegenseite (Spannweite 0 – 100 %). Darstellung von Minimum, 25. Perzentile, Median, 75. Perzentile und Maximum.

Seite 55

Abbildung 19: Box-Plot-Darstellung der proximalen und distalen Ergebnisse sowie des Gesamtscores des BHS (X-Achse) auf Grundlage röntgenologischer Bildgebung (Parameter: periostale Reaktion, Kallusumbau, Osteotomiedurchbau, Transplantataspekt). Prozentuale Angaben (Y-Achse) gemessen am Maximalwert von 13 Punkten (proximal; Mann-Whitney-U-Test $p = 0,15$ bzw. distal; $p = 0,04$) bzw. 26

Seite 58

Punkten (Gesamtscore; $p = 0,04$). Spannweite 0 – 100 %. Darstellung von Minimum, 25. Perzentile, Median, 75. Perzentile und Maximum.

Abbildung 20: Box-Plot-Darstellung der Ergebnisse des konventionellen bzw. modifizierten Weiland-Scores (X-Achse) auf Grundlage röntgenologischer Bildgebung (Parameter: Resorptionsverhalten bzw. Knocheneinheilung, Knochenhypertrophie). Prozentuale Angaben (Y-Achse) gemessen am Maximalwert von 18 Punkten (konventionell; Mann-Whitney-U-Test $p = 0,1$) bzw. 14 Punkten (modifiziert; $p = 0,15$) im Vergleich zur nicht-operierten Gegenseite. Spannweite 0 – 100 %. Darstellung von Minimum, 25. Perzentile, Median, 75. Perzentile und Maximum.

Seite 58

Abbildung 21: Darstellung des Kriteriums Kortikalisdurchgängigkeit (siehe Pfeil) des entwickelten MR-angiographischen Bewertungsschemas (MR-BHS). Aufnahme aus vorliegender Studiengruppe (mit freundlicher Unterstützung des Instituts für Radiologie und Neuroradiologie, ukb).

Seite 59

Abbildung 22: Darstellung des Kriteriums ossäre Durchbauung (siehe Pfeil) des entwickelten MR-angiographischen Bewertungsschemas (MR-BHS). Aufnahme aus vorliegender Studiengruppe (mit freundlicher Unterstützung des Instituts für Radiologie und Neuroradiologie, ukb).

Seite 61

Abbildung 23: Darstellung des Kriteriums Fettsignal Markraum (siehe Pfeile) des entwickelten MR-angiographischen Bewertungsschemas (MR-BHS). Schnitthöhe Bild rechts siehe horizontale Schnittlinie links. Aufnahme aus vorliegender Studiengruppe (mit freundlicher Unterstützung des Instituts für Radiologie und Neuroradiologie, ukb).

Seite 61

Abbildung 24: Darstellung des Kriteriums Anastomosedurchgängigkeit (siehe Pfeil, mit Artefakt durch Gefäßclip bei distal durchgängigen Gefäßtransplantat) des entwickelten MR-angiographischen Bewertungsschemas (MR-BHS). Aufnahme aus vorliegender

Seite 62

Studiengruppe (mit freundlicher Unterstützung des Instituts für Radiologie und Neuroradiologie, ukb).

Abbildung 25: Box-Plot-Darstellung der Ergebnisse des röntgenologisch und MRT-gestützten BHS (X-Achse) (Parameter: periostale Reaktion, Kallusumbau, Osteotomiedurchbau, Transplantataspekt). Prozentuale Angaben (Y-Achse) gemessen am Maximalwert von 13 (proximal bzw. distal) bzw. 26 Punkten (gesamt). Spannweite 0 – 100 %. Darstellung von Minimum, 25. Perzentile, Median, 75. Perzentile und Maximum. Mann-Whitney-U-Test (MRT proximal) $p = 0,27$, (MRT distal) $p = 0,09$, (MRT gesamt) $p = 0,18$.

Seite 63

Abbildung 26: Box-Pot-Darstellung der Ergebnisse des konventionellen bzw. modifizierten Weiland-Scores (X-Achse) auf Grundlage röntgenologischer Bildgebung für die MRT-Referenzgruppe $n = 10$ (Parameter: Resorptionsverhalten bzw. Knocheneinheilung, Knochenhypertrophie). Prozentuale Angaben (Y-Achse) gemessen am Maximalwert von 18 Punkten (konventionell; Mann-Whitney-U-Test $p = 0,1$) bzw. 14 Punkten (modifiziert; $p = 0,15$). Spannweite 0 – 100 %. Darstellung von Minimum, 25. Perzentile, Median, 75. Perzentile und Maximum.

Seite 64

Abbildung 27: Box-Plot-Darstellung der SF-36- Parameter (Subskalen) Funktionsfähigkeit, Rollenfunktion, Schmerzen differenziert nach postoperativer Komplikationsgruppe (K) und postoperativ komplikationsfreier Patientengruppe (NK) (X-Achse). Angabe von Absolutwerten bei einer Spannweite von 0 – 100 Punkten (Y-Achse). Darstellung von Minimum, 25. Perzentile, Median, 75. Perzentile und Maximum.

Seite 66

Abbildung 28: Box-Plot-Darstellung der SF-36-Parameter (Subskalen) Vitalität, soziale Funktionsfähigkeit, emotionale Rollenfunktion und psychisches Wohlbefinden differenziert nach postoperativer

Seite 66

Komplikationsgruppe (K) und postoperativ komplikationsfreier Patientengruppe (NK) (X-Achse). Angabe von Absolutwerten (Spannweite 0 - 100 Punkte) (Y-Achse). Darstellung von Minimum, 25. Perzentile, Median, 75. Perzentile und Maximum.

Abbildung 29: Box-Plot-Darstellung des Parameters Motorik (X-Achse) anhand des ROM₁ (Handgelenk Dorsalextension/ Palmarflexion/ Ulna-/ Radialabduktion; Mann-Whitney-U-Test $p = 0,8$) und ROM₂ (Handgelenk Pronation/ Supination; $p = 0,04$) sowie des Rosén-Lundborg-Scores RLS (Unterm modul Motorik; $p = 0,3$) und der Kraft anhand Pinchmeter (Schlüsselgriff; $p = 0,7$) und Dynamometer (Faustschluss; $p = 0,8$) differenziert nach postoperativer Komplikationsgruppe (K) und postoperativ komplikationsfreier Patientengruppe (NK). Prozentuale Darstellung (Y-Achse) im Vergleich zur nicht-operierten Gegenseite (Spannweite 0 - 100 %). Darstellung von Minimum, 25. Perzentile, Median, 75. Perzentile und Maximum.

Seite 68

Abbildung 30: Box-Plot-Darstellung der proximalen und distalen Ergebnisse sowie des Gesamtscores des röntgenologisch gestützten BHS differenziert nach postoperativer Komplikationsgruppe (K) und postoperativ komplikationsfreier Patientengruppe (NK) (Parameter: periostale Reaktion, Kallusumbau, Osteotomiedurchbau, Transplantataspekt) (X-Achse). Prozentuale Angaben (Y-Achse) gemessen am Maximalwert von 13 Punkten (proximal; Mann-Whitney-U-Test $p = 0,76$ bzw. distal; $p = 0,34$) bzw. 26 Punkten (Gesamtscore; $p = 0,43$). Spannweite 0 – 100 %. Darstellung von Minimum, 25. Perzentile, Median, 75. Perzentile und Maximum.

Seite 71

Abbildung 31: Box-Plot-Darstellung der proximalen und distalen Ergebnisse sowie des Gesamtscores des MRT-gestützten BHS differenziert nach postoperativer Komplikationsgruppe (K) und postoperativ komplikationsfreier Patientengruppe (NK) (Parameter: periostale Reaktion, Kallusumbau, Osteotomiedurchbau,

Seite 71

Transplantataspekt) (X-Achse). Prozentuale Angaben (Y-Achse) gemessen am Maximalwert von 13 Punkten (proximal; Mann-Whitney-U-Test $p = 1$ bzw. distal; $p = 0,76$) bzw. 26 Punkten (Gesamtscore; $p = 0,76$). Spannweite 0 – 100 %. Darstellung von Minimum, 25. Perzentile, Median, 75. Perzentile und Maximum.

Abbildung 32: Box-Plot-Darstellung der Ergebnisse des konventionellen bzw. modifizierten Weiland-Scores auf Grundlage röntgenologischer Bildgebung differenziert nach postoperativer Komplikationsgruppe (K) und postoperativ komplikationsfreier Patientengruppe (NK) (Parameter: Resorptionsverhalten bzw. Knocheneinheilung, Knochenhypertrophie) (X-Achse). Prozentuale Angaben (Y-Achse) gemessen am Maximalwert von 18 Punkten (konventionell; Mann-Whitney-U-Test $p = 0,34$) bzw. 14 Punkten (modifiziert; $p = 0,41$). Spannweite 0 – 100 %. Darstellung von Minimum, 25. Perzentile, Median, 75. Perzentile und Maximum.

Seite 72

Abbildung 33: Box-Plot-Darstellung der SF-36- Parameter (Subskalen) Funktionsfähigkeit, Rollenfunktion, Schmerzen und allgemeiner Gesundheitszustand differenziert nach (infektiöser) Indikationsgruppe Osteomyelitis (I) und nicht-osteomyelitisbedingter (infektfreier) Indikationsgruppe (NI) (X-Achse). Angabe von Absolutwerten (Spannweite 0 - 100 Punkte) (Y-Achse). Darstellung von Minimum, 25. Perzentile, Median, 75. Perzentile und Maximum.

Seite 75

Abbildung 34: Box-Plot-Darstellung der SF-36- Parameter (Subskalen) Vitalität, soziale Funktionsfähigkeit, emotionale Rollenfunktion und psychisches Wohlbefinden differenziert nach (infektiöser) Indikationsgruppe Osteomyelitis (I) und nicht-osteomyelitisbedingter (infektfreier) Indikationsgruppe (NI) (X-Achse). Angabe von Absolutwerten (Spannweite 0 – 100 Punkte) (Y-Achse). Darstellung von Minimum, 25. Perzentile, Median, 75. Perzentile und Maximum.

Seite 76

Abbildung 35: Box-Plot-Darstellung des Parameters Motorik (X-Achse) anhand des ROM₁ (Handgelenk Dorsalextension/ Palmarflexion/ Ulna-/ Radialabduktion; Mann-Whitney-U-Test $p = 0,45$) und ROM₂ (Handgelenk Pronation/ Supination; $p = 0,54$) sowie des Rosén-Lundborg-Scores RLS (Untermotul Motorik; $p = 0,37$) und der Kraft anhand Pinchmeter (Schlüsselgriff; $p = 0,64$) und Dynamometer (Faustschluss; $p = 0,45$) differenziert nach (infektiöser) Indikationsgruppe Osteomyelitis (I) und nicht-osteomyelitisbedingter (infektfreier) Indikationsgruppe (NI). Prozentuale Angaben im Vergleich zur nicht-operierten Gegenseite (Y-Achse) (Spannweite 0 – 100 %). Darstellung von Minimum, 25. Perzentile, Median, 75. Perzentile und Maximum.

Seite 78

Abbildung 36: Box-Plot-Darstellung der proximalen und distalen Ergebnisse sowie des Gesamtscores des röntgenologisch gestützten BHS differenziert nach (infektiöser) Indikationsgruppe Osteomyelitis (I) und nicht-osteomyelitisbedingter (infektfreier) Indikationsgruppe (NI) (Parameter: periostale Reaktion, Kallusumbau, Osteotomiedurchbau, Transplantataspekt) (X-Achse). Prozentuale Angaben (Y-Achse) gemessen am Maximalwert von 13 Punkten (proximal; Mann-Whitney-U-Test $p = 0,76$ bzw. distal; $p = 0,34$) bzw. 26 Punkten (Gesamtscore; $p = 0,43$). Spannweite 0 – 100 %. Darstellung von Minimum, 25. Perzentile, Median, 75. Perzentile und Maximum.

Seite 80

Abbildung 37: Box-Plot-Darstellung der proximalen und distalen Ergebnisse sowie des Gesamtscores des MRT-gestützten BHS differenziert nach (infektiöser) Indikationsgruppe Osteomyelitis (I) und nicht-osteomyelitisbedingter (infektfreier) Indikationsgruppe (NI) (Parameter: periostale Reaktion, Kallusumbau, Osteotomiedurchbau, Transplantataspekt) (X-Achse). Prozentuale Angaben (Y-Achse) gemessen am Maximalwert von 13 Punkten (proximal; Mann-Whitney-U-Test $p = 1$ bzw. distal; $p = 0,67$) bzw. 26 Punkten (Gesamtscore; $p = 0,76$). Spannweite 0 – 100 %. Darstellung von Minimum, 25. Perzentile, Median, 75. Perzentile und Maximum.

Seite 81

Abbildung 38: Box-Plot-Darstellung der Ergebnisse des konventionellen bzw. modifizierten Weiland-Scores auf Grundlage röntgenologischer Bildgebung (X-Achse) differenziert nach (infektiöser) Indikationsgruppe Osteomyelitis (I) und nicht-osteomyelitisbedingter (infektfreier) Indikationsgruppe (NI) (Parameter: Resorptionsverhalten bzw. Knocheneinheilung, Knochenhypertrophie). Prozentuale Angaben (Y-Achse) im Median gemessen am Maximalwert von 18 Punkten (konventionell; Mann-Whitney-U-Test $p = 0,34$) bzw. 14 Punkten (modifiziert; $p = 0,41$). Spannweite 0 – 100 %. Darstellung von Minimum, 25. Perzentile, Median, 75. Perzentile und Maximum.

Seite 72

11 TABELLENVERZEICHNIS

- Tabelle 1:** Bone Healing Score. Röntgenologisches Bewertungsschema nach Giessler et al. (2009) [49], Giessler GA, Friedrich PF, Shin RH, Bishop AT. Einheilung vaskularisierter Knochenallotransplantate: Optimierung durch Kurzzeit-Immunsuppression und der empfängerbasierten Neovaskularisation. Der Unfallchirurg 2009;112:479–486. Seite 45
- Tabelle 2:** Modifizierter Weiland-Score für den Unterarm nach Höpfner [47], Höpfner J-I. Klinische und radiologische Langzeitergebnisse nach freier, vaskularisierter Knochentransplantation zur Überbrückung großer Defekte der langen Extremitätenknochen. Berlin; 2003. Seite 47
- Tabelle 3:** Darstellung der medianen Scoree für die MSTS-Enneking-Items für die obere Extremität OEX (Schmerz, Funktion, emotionale Akzeptanz, Positionieren der Hand, Fingerfertigkeit/ Geschicklichkeit, Fähigkeit zum Anheben) und die untere Extremität UEX (Schmerz, Funktion, emotionale Akzeptanz, Hilfsmittel, Laufen, Gangart) gemessen an der Gesamtpunktzahl von jeweils 5 Punkten. Spannweite 0 % bis 100 %. Angabe von Minimum und Maximum in Klammern. Seite 54

Tabelle 4: Multifaktorielles MRT-Bewertungsschema unter Kontrastmittelanwendung (Parameter: Kortikalisdurchgängigkeit, ossäre Durchbauung proximal bzw. distal, Fettsignal im Markraum proximal bzw. distal, fehlendes paraossales Flüssigkeitssignal, Gefäßstieldurchgängigkeit arteriell bzw. venös). Darstellung des erzielten positiven Kriteriumanteils („ja“) in der Referenzgruppe je Item in %.

Seite 60

Tabelle 5: Gegenüberstellung der proximalen, distalen und Gesamt-Ergebnisse des MRT- und röntgenologisch gestützten BHS (Parameter: periostale Reaktion, Kallusumbau, Osteotomiedurchbau, Transplantataspekt). Angabe des jeweiligen Anteils des BHS^{MRT} am BHS^{Röntgen} in %.

Seite 63

Tabelle 6: Vergleichende Darstellung der medianen Scoree für die MSTS-Enneking-Items für die obere Extremität OEX (Schmerz, Funktion, emotionale Akzeptanz, Positionieren der Hand, Fingerfertigkeit/ Geschicklichkeit, Fähigkeit zum Anheben) und die untere Extremität UEX (Schmerz, Funktion, emotionale Akzeptanz, Hilfsmittel, Laufen, Gangart) gemessen an der Gesamtpunktzahl von jeweils 5 Punkten für die Gruppen K und NK. Spannweite 0 % bis 100 %. Angabe von Minimum und Maximum in Klammern.

Seite 69

Tabelle 7: Multifaktorielles Bewertungsschema nach Mutze auf Grundlage MR-angiographischer Bildgebung unter Kontrastmittelanwendung (Parameter: Kortikalisdurchgängigkeit, ossäre Durchbauung proximal bzw. distal, Fettsignal im Markraum proximal bzw. distal, fehlendes paraossales Flüssigkeitssignal, Gefäßstieldurchgängigkeit arteriell bzw. venös). Darstellung des erzielten positiven Kriteriumanteils („ja“) differenziert nach postoperativer Komplikationsgruppe (K) und postoperativ komplikationsfreier Patientengruppe (NK) je Item in %.

Seite 73

Tabelle 8: Vergleichende Darstellung der medianen Scoree für die MSTS-Enneking-Items für die obere Extremität OEX (Schmerz, Funktion, emotionale Akzeptanz, Positionieren der Hand, Fingerfertigkeit/ Geschicklichkeit, Fähigkeit zum Anheben) und die untere Extremität UEX (Schmerz, Funktion, emotionale Akzeptanz, Hilfsmittel, Laufen, Gangart) gemessen an der Gesamtpunktzahl von jeweils 5 Punkten für die Gruppen I und NI. Spannweite 0 % bis 100 %. Angabe von Minimum und Maximum in Klammern.

Seite 79

Tabelle 9: Multifaktorielles Bewertungsschema nach Mutze auf Grundlage MR-angiographischer Bildgebung unter Kontrastmittelanwendung (Parameter: Kortikalisdurchgängigkeit, ossäre Durchbauung proximal bzw. distal, Fettsignal im Markraum proximal bzw. distal, fehlendes paraossales Flüssigkeitssignal, Gefäßstieldurchgängigkeit arteriell bzw. venös). Darstellung des erzielten positiven Kriteriumanteils („ja“) differenziert nach infektiöser Indikationsgruppe (I) und nicht-infektiöser Indikationsgruppe (NI) je Item in %.

Seite 82

12 FORMELVERZEICHNIS

- Formel 1:** Transformierung des Basis-DASH-Scores auf eine lineare Skalierung zwischen 0 und 100 Seite 35
- Formel 2:** Transformierung des DASH-Scores Arbeit bzw. Sport auf eine lineare Skalierung zwischen 0 und 100 Seite 35
- Formel 3:** Berechnung des z-Wertes des SF-36 Seite 37
- Formel 4:** Allgemeine Formel des Knochenhypertrophie-Index nach De Boer und Wood Seite 46
- Formel 5:** Formel Index¹ des Knochenhypertrophie-Index nach De Boer und Wood Seite 46
- Formel 6:** Formel Index² des Knochenhypertrophie-Index nach De Boer und Wood Seite 46

13 LITERATURVERZEICHNIS

1. Mody GM, Brooks PM. Improving musculoskeletal health: global issues. Best practice & research. *Clinical rheumatology* 2012;26:237–249.
2. Woolf AD, Erwin J, March L. The need to address the burden of musculoskeletal conditions. Best practice & research. *Clinical rheumatology* 2012;26:183–224.
3. Fuchs J, Rabenberg M, Scheidt-Nave C. Prävalenz ausgewählter muskuloskelettaler Erkrankungen: Ergebnisse der Studie zur Gesundheit Erwachsener in Deutschland (DEGS1). *Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz* 2013;56:678–686.
4. Statistische Bundesamt. Die 50 häufigsten Operationen der vollstationären Patientinnen und Patienten in Krankenhäusern; 2017. http://www.gbe-bund.de/oowa921-install/servlet/oowa/aw92/dboowasys921.xwdevkit/xwd_init?gbe.isgbetol/xs_start_neu/&p_aid=i&p_aid=58529467&nummer=666&p_sprache=D&p_indsp=-&p_aid=3531343 (accessed 02. August 2018).
5. Sengezer M, Öztürk S, Deveci M, Odabaşı Z. Long-Term Follow-Up of Total Penile Reconstruction with Sensate Osteocutaneous Free Fibula Flap in 18 Biological Male Patients. *Plastic and reconstructive surgery* 2004;114:439–450.
6. Hentsch S (ed). *Psyhyrembel Orthopädie und Unfallchirurgie*. Berlin u.a.: de Gruyter; 2013.
7. Bühler M, Schmidt H. Knochentransplantation; 2017. <http://www.lexikon-orthopaedie.com/pdx.pl?dv=0&id=00906> (accessed 02. August 2018).
8. Allieu Y, Gomis R, Yoshimura M, Dimeglio A, Bonnel F. Congenital pseudarthrosis of the forearm - Two cases treated by free vascularized fibular graft. *The Journal of Hand Surgery* 1981;6:475–481.
9. Bernd L, Sabo D, Zahlten-Hinguranage A, Niemeyer P, Daecke W, Simank HG. Erfahrungen mit der gefässgestielten Fibula in der Rekonstruktion von ossären Defekten bei primär malignen Knochentumoren. *Der Orthopäde* 2003;32:983–993.

10. Ebinger T, Katzmaier P, Wachter NJ, Merk S, Kinzl L, Mentzel M. Die Rekonstruktion eines Knochendefekts nach Explantation einer Handgelenkprothese mit einem vaskularisierten Fibulatransplantat. *Der Unfallchirurg* 2003;106:172–175.
11. Hirayama T, Suematsu N, Inoue K, Baitoh C, Takemitsu Y. Free vascularised bone grafts in reconstruction of the upper extremity. *The Journal of Hand Surgery: Journal of the British Society for Surgery of the Hand* 1985;10:169–175.
12. Houdek MT, Wagner ER, Bishop AT, Shin AY, Rose PS, Sim FH, et al. Complications and Long-Term Outcomes of Free Fibula Reconstruction following Resection of a Malignant Tumor in the Extremities. *Plastic and Reconstructive Surgery*. 2017;139:510e-519e.
13. Kühner C, Simon R, Bernd L. Die vaskularisierte Fibulatransplantation in der orthopädischen Onkologie: Eigene Erfahrungen und Literaturübersicht. *Der Orthopäde* 2001;30:658–665.
14. Noaman HH. Management of upper limb bone defects using free vascularized osteoseptocutaneous fibular bone graft. *Annals of plastic surgery* 2013;71:503–509.
15. Sun Y, Zhang C, Jin D, Sheng J, Cheng X, Liu X, et al. Free vascularised fibular grafting in the treatment of large skeletal defects due to osteomyelitis. *International orthopaedics* 2010;34:425–430.
16. Taylor GI, Corlett RJ, Ashton MW. The Evolution of Free Vascularized Bone Transfer: A 40-Year Experience. *Plastic and reconstructive surgery* 2016;137:1292–1305.
17. Wood MB. Upper extremity reconstruction by vascularized bone transfers: Results and complications. *The Journal of Hand Surgery* 1987;12:422–427.
18. Kuner EH, Berwarth H, Lücke SV. Behandlungsprinzipien bei aseptischen Pseudarthrosen. *Orthopäde* 1996;25:394–404.
19. Henne-Bruns D, Barth E. *Chirurgie: 292 Tabellen*. 4th ed. Duale Reihe. Stuttgart: Thieme; 2012.
20. Anderson LD, Sisk D, Tooms RE, Park WI. Compression-plate fixation in acute diaphyseal fractures of the radius and ulna. *The Journal of bone and joint surgery. American volume* 1975;57:287–297.
21. Ross ER, Gourevitch D, Hastings GW, Wynn-Jones CE, Ali S. Retrospective analysis of plate fixation of diaphyseal fractures of the forearm bones. *Injury* 1989;20:211–214.
22. Wei SY, Born CT, Abene A, Ong A, Hayda R, DeLong WG. Diaphyseal forearm fractures treated with and without bone graft. *The Journal of trauma* 1999;46:1045–1048.

23. Wright RR, Schmeling GJ, Schwab JP. The necessity of acute bone grafting in diaphyseal forearm fractures: a retrospective review. *Journal of orthopaedic trauma* 1997;11:288–294.
24. Dodge HS, Cady GW. Treatment of fractures of the radius and ulna with compression plates. *The Journal of bone and joint surgery. American volume* 1972;54:1167–1176.
25. Hadden WA, Reschauer R, Seggl W. Results of AO plate fixation of forearm shaft fractures in adults. *Injury* 1983;15:44–52.
26. Garrel T v., Gotzen L. Allogene Knochentransplantation und Knochenbanking. *Der Unfallchirurg* 1998;101:713–727.
27. Older J. *Bone Implant Grafting*. 1st ed. Springer-Verlag London; 1992.
28. Nussbaum V. Ueber die Behandlung unglücklicher Vorkommnisse nach einfachen und complicirten Beinbrüchen, insbesondere über Knochentransplantationen. *Ärztliches Intelligenzblatt* 1875.
29. Ollier L. *Traite Experimental Et Clinique de La Regeneration Des OS Et de La Production Artificielle Du Tissu Osseux*. Victor Masson et Fils; Vols 1 and 2 Paris:412–457.
30. Barth A. Histologische Untersuchungen über Knochentransplantationen. *Beitr. z. pathol. Anat. u. z. allg. Pathol.* 1895.
31. Hahn E. Eine Methode Pseudarthrose der Tibia mit großem Knochendefekt zur Heilung zu bringen. *Zentr Chir* 1884:337–341.
32. Codivilla A. Über die Behandlung der Pseudarthrosen und der ausgedehnten diaphysären Koninuitätstrennung. *Arch Klin Chir* 1910:452.
33. Nylén CO. An oto-mikroskop. *Acta oto-laryng* 1923.
34. Green DP, Pederson WC, Hotchkiss RN, Wolfe SW. *Green's operative hand surgery*. - 5th ed. references. 5th ed. Philadelphia: Elsevier Churchill Livingstone; 2005.
35. Taylor GI, Miller GD, Ham FJ. The free vascularized bone graft. A clinical extension of microvascular techniques. *Plastic and reconstructive surgery* 1975;55:533–544.
36. Ueba, Y., Fujikawa, S. nine years follow up of a vascularized fibular graft in neurofibromatosis.: A case report and literature review. *Orthop Trauma Surg* 1983:595.
37. Wood MB, Cooney WP, Irons GB. Skeletal reconstruction by vascularized bone transfer: Indications and results. *Mayo Clinic Proceedings* 1985;60:729–734.
38. Pho R., Patterson M., Kour A., Kumar V. Free vascularised epiphyseal transplantation in upper extremity reconstruction in upper extremity reconstruction. *The Journal of Hand Surgery: Journal of the British Society* 1988;13:440–447.

39. Boer HH de, Wood MB. Bone Changes in the Vascularised Fibular Graft. *Journal of Bone and Joint Surgery* 1989;71-B:374–378.
40. Gerwin M, Weiland AJ. Vascularized bone grafts to the upper extremity. Indications and technique. *Hand Clinics* 1992;8:509–523.
41. Eisenschenk A, Lehnert M, Weber U. Die freie, gefäßgestielte Fibulatransplantation zur Überbrückung von Knochendefekten. *Operative Orthopädie und Traumatologie* 1994;6:107–118.
42. Millesi H, Piza-Katzer H. Freie Transplantation einer Fibula mit Epiphyse. *Handchirurgie* 1978;10:115–119.
43. Helferich H. Versuche ueber die Transplantation des intermediaer knorpelwachsenden Roehrenknochen. *Deut Z Chir* 1899:564–573.
44. Jupiter JB, Gerhard HJ, Guerrero J, Nunley JA, Levin LS. Treatment of segmental defects of the radius with use of the vascularized osteoseptocutaneous fibular autogenous graft. *The Journal of bone and joint surgery. American volume* 1997;79:542–550.
45. Stock W, Hierner R, Wolf K, Huber R, Remberger K, Saleh M. The longitudinally split vascularized fibula with a vascularized periosteal flap for the reconstruction of large segmental bone defects of the tibia. *European Journal of Plastic Surgery* 1991;14:181–191. <https://doi.org/10.1007/BF00734423>.
46. Muramatsu K., Hashimoto T., Tominaga Y., Taguchi T. Vascularized Bone Graft for Oncological Reconstruction of the Extremities: Review of the Biological Advantages. *Anticancer Research* 2014;34:2701–2707.
47. Höpfner J-I. Klinische und radiologische Langzeitergebnisse nach freier, vaskularisierter Knochentransplantation zur Überbrückung großer Defekte der langen Extremitätenknochen. Berlin; 2003.
48. Erdmann D, Giessler GA, Bergquist GEO, Bruno W, Young H, Heitmann C, et al. Freier Fibulatransfer. Analyse einer Serie von 76 konsekutiven mikrochirurgischen Operationen und Literaturübersicht. *Der Chirurg. Zeitschrift für alle Gebiete der operativen Medizin* 2004;75:799–809.
49. Giessler GA, Friedrich PF, Shin RH, Bishop AT. Einheilung vaskularisierter Knochenallotransplantate: Optimierung durch Kurzzeit-Immunsuppression und der empfängerbasierten Neovaskularisation. *Der Unfallchirurg* 2009;112:479–486.
50. Bishop AT, Pelzer M. Vascularized bone allotransplantation: current state and implications for future reconstructive surgery. *The Orthopedic clinics of North America* 2007;38:109-22, vii.

51. Weiland AJ, Phillips TW, Randolph MA. Bone grafts: A radiologic, histologic, and biomechanical model comparing autografts, allografts, and free vascularized bone grafts. *Plastic and reconstructive surgery* 1984;74:368–379.
52. Brunelli G, Vigasio A, Battiston B, Di Rosa F. Free microvascular fibular versus conventional bone grafts. *International surgery* 1991;76:33–42.
53. Enneking WF, Mindell ER. Observations on massive retrieved human allografts. *The Journal of bone and joint surgery. American volume* 1991;73:1123–1142.
54. Mankin HJ, Gebhardt MC, Tomford WW. The use of frozen cadaveric allografts in the management of patients with bone tumors of the extremities. *The Orthopedic clinics of North America* 1987;18:275–289.
55. Schuind FA, Burny F, Lejeune FJ. Microsurgical free fibular bone transfer: A technique for reconstruction of large skeletal defects following resection of high-grade malignant tumors. *World Journal of Surgery* 1988;12:310–317.
56. Arata MA, Wood MB, Cooney WP. Revascularized segmental diaphyseal bone transfers in the canine. An analysis of viability. *Journal of Reconstructive Microsurgery* 1984;1:11–19.
57. Mankin HJ, Gebhardt MC, Jennings LC, Springfield DS, Tomford WW. Long-term results of allograft replacement in the management of bone tumors. *Clinical Orthopaedics and Related Research* 1996:86–97.
58. Chacha PB. Vascularised pedicular bone grafts. *International orthopaedics* 1984;8:117–138.
59. Enneking WF, Eady JL, Burchardt H. Autogenous cortical bone grafts in the reconstruction of segmental skeletal defects. *The Journal of bone and joint surgery. American volume* 1980;62:1039–1058.
60. Schuind FA, Schoutens A, Noorbergen M, Burny F. Is early bone scintigraphy a reliable method to assess the viability of vascularized bone transplants. *Journal of Reconstructive Microsurgery* 1993;9:399–403.
61. Houdek MT, Wagner ER, Wyles CC, Nanos GP, Moran SL. New options for vascularized bone reconstruction in the upper extremity. *Seminars in plastic surgery* 2015;29:20–29.
62. Hankiss J, Holdenried M. Möglichkeiten und Ergebnisse der (freien) vaskularisierten Knochentransplantation im Ober- und Unterarmbereich. *Obere Extremität* 2011;6:177–188.
63. Buckwalter JA. Skeletal reconstruction following tumor surgery: vascularized bone grafts. *Progress in clinical and biological research* 1983;132D:399–405.

64. Enneking WF, Burchardt H, Puhl JJ, Piotrowski G. Physical and biological aspects of repair in dog cortical-bone transplants. *The Journal of bone and joint surgery. American volume* 1975;57:237–252.
65. Hierner R, Täger G, Nast-Kolb D. Die vaskularisierte Knochentransplantation. *Der Unfallchirurg* 2009;405-418.
66. Eisenschenk A, Lautenbach M, Rohlmann A. Freie, vaskularisierte Knochentransplantation im Bereich der Extremitäten. *Der Orthopäde* 1998;27:491–500.
67. Minami A, Kimura T, Matsumoto O, Kutsumi K. Fracture through united vascularized bone grafts. *Journal of Reconstructive Microsurgery* 1993;9:227–232.
68. Klein L, Stevenson S, Shaffer JW, Davy D, Goldberg VM. Bone mass and comparative rates of bone resorption and formation of fibular autografts: comparison of vascular and nonvascular grafts in dogs. *Bone* 1991;12:323–329.
69. Malizos KN, Dailiana ZH, Innocenti M, Mathoulin CL, Mattar R, Sauerbier M. Vascularized bone grafts for upper limb reconstruction: Defects at the distal radius, wrist, and hand. *The Journal of Hand Surgery* 2010;35:1710–1718.
70. Han CS, Wood MB, Bishop AT, Cooney WP. Vascularized Bone Transfer. *The Journal of bone and joint surgery. American volume* 1992;74:1441–1449.
71. Taylor GI. The current status of free vascularized bone grafts. *Clinics in Plastic Surgery* 1983;10:185–209.
72. Brunelli GA, Vigasio A, Brunelli GR. Microvascular fibular grafts in skeleton reconstruction. *Clinical Orthopaedics and Related Research* 1995:241–246.
73. Weiland AJ, Moore JR, Daniel RK. Vascularized bone autografts. Experience with 41 cases. *Clinical Orthopaedics and Related Research* 1983:87–95.
74. Beris AE, Lykissas MG, Korompilias AV, Vekris MD, Mitsionis GI, Malizos KN, et al. Vascularized fibula transfer for lower limb reconstruction. *Microsurgery* 2011;31:205–211.
75. Anthony JP, Foster RD, Sharma AB, Kearns GJ, Hoffman WY, Pogrel MA. Reconstruction of a complex midfacial defect with the folded fibular free flap and osseointegrated implants. *Annals of plastic surgery* 1996;37:204–210.
76. Chang MC, Lo WH, Chen CM, Chen TH. Treatment of large skeletal defects in the lower extremities using double-strut, free vascularized fibular bone grafting. *Orthopedics* 1999;22:739–744.
77. O'Brien BM, Gumley GJ, Dooley BJ, Pribaz JJ. Folded free vascularized fibula transfer. *Plastic and reconstructive surgery* 1988;82:311–318.

78. Yajima H, Tamai S. Twin-barrelled vascularized fibular grafting to the pelvis and lower extremity. *Clinical Orthopaedics and Related Research* 1994;178–184.
79. Rose PS, Shin AY, Bishop AT, Moran SL, Sim FH. Vascularized Free Fibula Transfer for Oncologic Reconstruction of the Humerus. *Clinical Orthopaedics and Related Research* 2005;438:80–84.
80. Chun-Yi L, Yiing-Feng H, Hua-Tzu H, Chang-Sheng L. Lung cancer with solitary bone metastasis in the radius. *Clinical nuclear medicine* 2009;34:684–685.
81. Freyschmidt J/4, Freyschmidt J, Jundt G, Ostertag H. *Knochtumoren mit Kiefertumoren*. Springer Berlin Heidelberg; 2010.
82. Kumta SM, Leung PC, Griffith JF, Kew J, Chow LT. Vascularised bone grafting for fibrous dysplasia of the upper limb. *The Journal of bone and joint surgery. British volume* 2000;82:409–412.
83. Cao L, Guo C, Chen J, Chen Z, Yan Z. Free Vascularized Fibular Grafting Improves Vascularity Compared With Core Decompression in Femoral Head Osteonecrosis: A Randomized Clinical Trial. *Clinical Orthopaedics and Related Research* 2017;475:2230–2240.
84. Ligh CA, Nelson JA, Fischer JP, Kovach SJ, Levin LS. The Effectiveness of Free Vascularized Fibular Flaps in Osteonecrosis of the Femoral Head and Neck: A Systematic Review. *Journal of Reconstructive Microsurgery* 2017;33:163–172.
85. Bauer AS, Singh AK, Amanatullah D, Lerman J, James MA. Free vascularized fibular transfer with langenskiöld procedure for the treatment of congenital pseudarthrosis of the forearm. *Techniques in hand & upper extremity surgery* 2013;17:144–150.
86. Innocenti M, Delcroix L, Romano GF. Epiphyseal transplant: Harvesting technique of the proximal fibula based on the anterior tibial artery. *Microsurgery* 2005;25:284–292.
87. Innocenti M, Ceruso M, Manfrini M, Angeloni R, Lauri G, Capanna R, et al. Free vascularized growth-plate transfer after bone tumor resection in children. *Journal of Reconstructive Microsurgery* 1998;14:137–143.
88. Dell PC, Sheppard JE. Vascularized bone grafts in the treatment of infected forearm nonunions. *The Journal of Hand Surgery* 1984;9:653–658.
89. Manktelow R. *Mikrovaskuläre Wiederherstellungschirurgie*. Springer Berlin Heidelberg; 1988.
90. Mankin HJ, Doppelt S, Tomford W. Clinical experience with allograft implantation. The first ten years. *Clinical Orthopaedics and Related Research* 1983:69–86.

91. Jones NF, Dickinson BP, Hansen SL. Reconstruction of an entire metacarpal and metacarpophalangeal joint using a fibular osteocutaneous free flap and silicone arthroplasty. *The Journal of Hand Surgery* 2012;37:310–315.
92. Cho BC, Kim SY, Park JW, Baik BS. Blood supply to osteocutaneous free fibula flap and peroneus longus muscle: prospective anatomic study and clinical applications. *Plastic and reconstructive surgery* 2001;108:1963–1971.
93. Bayne CO, Bishop AT, Shin AY. Technique of harvest of the free vascularized fibula. *Techniques in hand & upper extremity surgery* 2014;18:181–188.
94. Oxford L., Ducic Y. Use of Fibula-Free Tissue Transfer With Preoperative 2-Vessel Runoff to the Lower Extremity. *Archives of facial plastic surgery* 2005;7:261–264.
95. Lippert H, Pabst R. Arterial variations in man: Classification and frequency. München: J. F. Bergmann; 1985.
96. Lutz BS, Wei FC, Ng SH, Chen IH, Chen SH. Routine donor leg angiography before vascularized free fibula transplantation is not necessary: A prospective study in 120 clinical cases. *Plastic and reconstructive surgery* 1999;103:121–127.
97. Disa JJ, Cordeiro PG. The current role of preoperative arteriography in free fibula flaps. *Plastic and reconstructive surgery* 1998;102:1083–1088.
98. Kim D, Orron DE, Skillman JJ. Surgical significance of popliteal arterial variants. A unified angiographic classification. *Annals of surgery* 1989;210:776–781.
99. Young DM, Trabulsi PP, Anthony JP. The need for preoperative leg angiography in fibula free flaps. *Journal of Reconstructive Microsurgery* 1994;10:283-7; discussion 287-9.
100. Smith RB, Thomas RD, Funk GF. Fibula free flaps: the role of angiography in patients with abnormal results on preoperative color flow Doppler studies. *Archives of otolaryngology--head & neck surgery* 2003;129:712–715.
101. Gilbert A. Vascularized transfer of the fibular shaft. *Int. J. Microsurg.* 1979;100.
102. Ekkernkamp A, Muhr G, Josten C. Die infizierte Pseudarthrose. *Der Unfallchirurg* 1996;99:914–924.
103. Shamma RL, Avashia YJ, Farjat AE, Catanzano AA, Levin LS, Eward WC, et al. Vascularized Fibula-Based Physis Transfer: A Follow-Up Study of Longitudinal Bone Growth and Complications. *Plastic and reconstructive surgery* 2017;5:1-8.
104. Babovic S, Johnson CH, Finical SJ. Free fibula donor-site morbidity: the Mayo experience with 100 consecutive harvests. *Journal of Reconstructive Microsurgery* 2000;16:107–110.

105. Anthony JP, Rawnsley JD, Benhaim P, Ritter EF, Sadowsky SH, Singer MI. Donor leg morbidity and function after fibula free flap mandible reconstruction. *Plastic and reconstructive surgery* 1995;96:146–152.
106. De Boer. Free ascularized fibular transfer. PhD thesis. Leiden; 1988.
107. Wei FC, El-Gammal TA, Lin CH, Ueng WN. Free fibula osteoseptocutaneous graft for reconstruction of segmental femoral shaft defects. *The Journal of trauma* 1997;43:784–792.
108. Weiland AJ, Weiss AP, Moore JR, Tolo VT. Vascularized fibular grafts in the treatment of congenital pseudarthrosis of the tibia. *The Journal of bone and joint surgery. American volume* 1990;72:654–662.
109. Pliefke J, Rademacher G, Zach A, Bauwens K, Ekkernkamp A, Eisenschenk A. Postoperative monitoring of free vascularized bone grafts in reconstruction of bone defects. *Microsurgery* 2009;29:401–407.
110. Hölzle F, Rau A, Swaid S, Loeffelbein DJ, Nolte D, Wolff K-D. Simultanes nichtinvasives Monitoring mit Laser-Doppler-Flussmessung und Gewebespektrometrie bei fasziokutanen Radialislappen und osteokutanen Fibulatransplantaten. *Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie : MKG* 2005;9:290–299.
111. Heller L, Levin LS, Klitzman B. Laser Doppler flowmeter monitoring of free-tissue transfers: blood flow in normal and complicated cases. *Plastic and reconstructive surgery* 2001;107:1739–1745.
112. Hirigoyen MB, Urken ML, Weinberg H. Free flap monitoring: a review of current practice. *Microsurgery* 1995;16:723-6; discussion 727.
113. Disa JJ, Cordeiro PG, Hidalgo DA. Efficacy of conventional monitoring techniques in free tissue transfer: an 11-year experience in 750 consecutive cases. *Plastic and reconstructive surgery* 1999;104:97–101.
114. Liss AG, Liss P. Use of a modified oxygen microelectrode and laser-Doppler flowmetry to monitor changes in oxygen tension and microcirculation in a flap. *Plastic and reconstructive surgery* 2000;105:2072–2078.
115. Buyukdereli G, Guney IB, Ozerdem G, Kesiktas E. Evaluation of vascularized graft reconstruction of the mandible with Tc-99m MDP bone scintigraphy. *Annals of nuclear medicine* 2006;20:89–93.
116. Elschner C. Analyse der knöchernen Einheilung von Biomaterialien mit der Magnetresonanztomographie. Dresden; 2016.

117. Gummesson C, Atroshi I, Ekdahl C. The disabilities of the arm, shoulder and hand (DASH) outcome questionnaire: longitudinal construct validity and measuring self-rated health change after surgery. *BMC Musculoskeletal Disorders* 2003;4:11.
118. Hudak PL, Amadio PC, Bombardier C. Development of an upper extremity outcome measure: the DASH (disabilities of the arm, shoulder and hand) corrected. The Upper Extremity Collaborative Group (UECG). *American journal of industrial medicine* 1996;29:602–608.
119. Atroshi I, Gummesson C, Andersson B, Dahlgren E, Johansson A. The disabilities of the arm, shoulder and hand (DASH) outcome questionnaire: reliability and validity of the Swedish version evaluated in 176 patients. *Acta orthopaedica Scandinavica* 2000;71:613–618.
120. Veehof MM, Slegers EJA, van Veldhoven, Nicolette H M J, Schuurman AH, van Meeteren, Nico L U. Psychometric qualities of the Dutch language version of the Disabilities of the Arm, Shoulder, and Hand questionnaire (DASH-DLV). *Journal of hand therapy : official journal of the American Society of Hand Therapists* 2002;15:347–354.
121. Offenbacher M, Ewert T, Sangha O, Stucki G. Validation of a German version of the 'Disabilities of Arm, Shoulder and Hand' questionnaire (DASH-G). *Zeitschrift fur Rheumatologie* 2003;62:168–177.
122. Fayad F, Lefevre-Colau M-M, Macé Y, Fermanian J, Mayoux-Benhamou A, Roren A, et al. Validation of the French version of the Disability of the Arm, Shoulder and Hand questionnaire (F-DASH). *Joint, bone, spine : revue du rhumatisme* 2008;75:195–200.
123. Mousavi SJ, Parnianpour M, Abedi M, Askary-Ashtiani A, Karimi A, Khorsandi A, et al. Cultural adaptation and validation of the Persian version of the Disabilities of the Arm, Shoulder and Hand (DASH) outcome measure. *Clinical rehabilitation* 2008;22:749–757.
124. Lee J-Y, Lim J-Y, Oh JH, Ko Y-M. Cross-cultural adaptation and clinical evaluation of a Korean version of the disabilities of arm, shoulder, and hand outcome questionnaire (K-DASH). *Journal of shoulder and elbow surgery* 2008;17:570–574.
125. Lee EWC, Lau JSY, Chung MMH, Li APS, Lo SK. Evaluation of the Chinese version of the Disability of the Arm, Shoulder and Hand (DASH-HKPWH): cross-cultural adaptation process, internal consistency and reliability study. *Journal of hand therapy : official journal of the American Society of Hand Therapists* 2004;17:417–423.

126. Alotaibi NM. The cross-cultural adaptation of the disability of arm, shoulder and hand (DASH): a systematic review. *Occupational therapy international* 2008;15:178–190.
127. Institute for Work & Health, Günter Germann, Angela Harth, Gerhard Wind, Erhan Demir. Der DASH-Fragebogen; 2018. http://www.dash.iwh.on.ca/sites/dash/public/translations/DASH_German_2012.pdf (accessed 26. Juli 2018).
128. Institute for Work & Health 2006-2013. About the DASH | DASH; 2018. <http://www.dash.iwh.on.ca/about-dash> (accessed 26. Juli 2018).
129. Institute for Work & Health, Günter Germann, Angela Harth, Gerhard Wind, Erhan Demir. German DASH and QuickDASH scoring instructions; 2018. http://www.dash.iwh.on.ca/sites/dash/public/translations/Scoring_DASH_German.pdf (accessed 26. Juli 2018).
130. Ellert U, Kurth B-M. Methodische Betrachtungen zu den Summenscores des SF-36 anhand der erwachsenen bundesdeutschen Bevölkerung. *Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz* 2004;47:1027–1032.
131. Laucis NC, Hays RD, Bhattacharyya T. Scoring the SF-36 in Orthopaedics: A Brief Guide. *The Journal of bone and joint surgery. American volume* 2015;97:1628–1634.
132. Renneberg B, Hammelstein P. *Gesundheitspsychologie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2006.
133. Ware JE. SF-36 Health Survey Update. *Spine* 2000;25:3130–3139.
134. Bullinger M, Kirchberger I. SF-36: Fragebogen zum Gesundheitszustand; 2006. <http://www.lexikon-orthopaedie.com/images/logo.jpg> (accessed 27. Juli 2018).
135. Enneking WF, Dunham W, Gebhardt MC, Malawar M. A system for the functional evaluation of reconstructive procedures after surgical treatment of tumors of the musculoskeletal system. *Clinical Orthopaedics and Related Research* 1993:241–246.
136. Schomacher J. Gütekriterien der visuellen Analogskala zur Schmerzbewertung. *physioscience* 2008;4:125–133. <http://www.mt-omt.de/site/wp-content/uploads/JS-VAS-physioscience-4-2008.pdf>.
137. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. DGUV: Formtexte Ärzte; 2018. <https://www.dguv.de/formtexte/aerzte/index.jsp> (accessed 30. Juli 2018).
138. Rosén B, Lundborg G. A model instrument for the documentation of outcome after nerve repair. *The Journal of Hand Surgery* 2000;25:535–543.
139. Rosén B, Lundborg G. A new model instrument for outcome after nerve repair. *Hand Clinics* 2003;19:463–470.

140. Salis-Soglio GF von. Die Neutral-0-Methode. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2015.
141. Sollerman C, Ejeskär A. Sollerman Hand Function Test: A Standardised Method and its Use in Tetraplegic Patients. <http://www.swisswuff.ch/images/adl/adl-pdf/sollermann1995handfunctiontest.pdf>.
142. Mathiowetz V, Weber K, Volland G, Kashman N. Reliability and validity of grip and pinch strength evaluations. *The Journal of Hand Surgery* 1984;9:222–226.
143. Weishaupt D, Köchli VD, Marincek B. Wie funktioniert MRI? Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2014.
144. Kahl-Scholz M, Vockelmann C. Basiswissen Radiologie. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2017.
145. Roberts DR, Lindhorst SM, Welsh CT, Maravilla KR, Herring MN, Braun KA, et al. High Levels of Gadolinium Deposition in the Skin of a Patient With Normal Renal Function. *Investigative radiology* 2016;51:280–289.
146. Jost G, Lenhard DC, Sieber MA, Lohrke J, Frenzel T, Pietsch H. Signal Increase on Unenhanced T1-Weighted Images in the Rat Brain After Repeated, Extended Doses of Gadolinium-Based Contrast Agents: Comparison of Linear and Macrocyclic Agents. *Investigative radiology* 2016;51:83–89.
147. Boyken J, Frenzel T, Lohrke J, Jost G, Pietsch H. Gadolinium Accumulation in the Deep Cerebellar Nuclei and Globus Pallidus After Exposure to Linear but Not Macrocyclic Gadolinium-Based Contrast Agents in a Retrospective Pig Study With High Similarity to Clinical Conditions. *Investigative radiology* 2018;53:278–285.
148. Giessler GA, Zobitz M, Friedrich PF, Bishop AT. Transplantation of a vascularized rabbit femoral diaphyseal segment: mechanical and histologic properties of a new living bone transplantation model. *Microsurgery* 2008;28:291–299.
149. Taira H, Moreno J, Ripalda P, Forriol F. Radiological and histological analysis of cortical allografts: an experimental study in sheep femora. *Archives of orthopaedic and trauma surgery* 2004;124:320–325.
150. Vossen M, Majzoub RK, Edelstein J, Perez-Abadia G, Voor M, Maldonado C, et al. Bone quality in swine composite tissue allografts: effects of combination immunotherapy. *Transplantation* 2005;80:487–493.
151. Asmus A, Kim S, Höpfner JI, Vogel A, Vogel K, Eichenauer F, et al. Technik und Ergebnisbeurteilung der freien Fibulatransplantation am Beispiel der knöchernen Rekonstruktion an der oberen Extremität.

152. Ellert U, Kurth BM. Gesundheitsbezogene Lebensqualität bei Erwachsenen in Deutschland: Ergebnisse der Studie zur Gesundheit Erwachsener in Deutschland (DEGS1). *Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz* 2013;56:643–649.
153. Hunsaker FG, Cioffi DA, Amadio PC, Wright JG, Caughlin B. The American academy of orthopaedic surgeons outcomes instruments: normative values from the general population. *The Journal of bone and joint surgery. American volume* 2002;84:208–215.
154. Gates DH, Walters LS, Cowley J, Wilken JM, Resnik L. Range of Motion Requirements for Upper-Limb Activities of Daily Living. *The American journal of occupational therapy : official publication of the American Occupational Therapy Association* 2016;70:7001350010p1-7001350010p10.
155. Serafin P, Mühlemeyer C, Levchuk I, Gebhardt H, Klußmann A. Auswirkungen der Handpräferenz auf die isometrische Maximalkraft bei ausgewählten Kraftfällen. *Zbl Arbeitsmed* 2015;65:5–11.
156. Farrar JT, Young JP, LaMoreaux L, Werth JL, Poole RM. Clinical importance of changes in chronic pain intensity measured on an 11-point numerical pain rating scale. *Pain* 2001;94:149–158.
157. Berggren A, Weiland AJ, Ostrup LT. Bone scintigraphy in evaluating the viability of composite bone grafts revascularized by microvascular anastomoses, conventional autogenous bone grafts, and free non-revascularized periosteal grafts. *The Journal of bone and joint surgery. American volume* 1982;64:799–809.
158. Siegert JJ, Wood MB. Thrombosed vascularized bone graft: Viability compared with a conventional bone graft. *Journal of Reconstructive Microsurgery* 1987;3:99–103.
159. Kamei Y, Aoyama H, Yokoo K, Hayashi Y, Fujii K, Kondo C, et al. Possibility of venous return through bone marrow in the free fibular osteocutaneous flap. *Annals of plastic surgery* 2001;47:450–452.
160. El-Sherbiny M. Reconstruction of the proximal humerus after wide resection of tumors: comparison of three reconstructive options. *Journal of the Egyptian National Cancer Institute* 2008;20:369–378.
161. Erol B, Basci O, Topkar MO, Caypinar B, Basar H, Tetik C. Mid-term radiological and functional results of biological reconstructions of extremity-located bone sarcomas in children and young adults. *Journal of pediatric orthopedics. Part B* 2015;24:469–478.

162. Eisenschenk A. Tierexperimentelle und klinische Untersuchungen der Knochenheilung vaskularisierter Knochentransplantate in Abhängigkeit verschiedener Einflussgrößen. Habilitationsschrift. Berlin; 1996.
163. Akin S, Basut O. A new flap design for monitoring the circulation of a buried free radial forearm flap in pharyngoesophageal reconstruction. *Journal of Reconstructive Microsurgery* 2002;18:591–594.
164. Jones BM, Greenhalgh RM. The use of the ultrasound Doppler flowmeter in reconstructive microvascular surgery. *British journal of plastic surgery* 1983;36:245–253.
165. Solomon GA, Yaremchuk MJ, Manson PN. Doppler ultrasound surface monitoring of both arterial and venous flow in clinical free tissue transfers. *Journal of Reconstructive Microsurgery* 1986;3:39–41.
166. Karkowski J, Buncke HJ. A simplified technique for free transfer of groin flaps, by use of a Doppler Probe. *Plastic and reconstructive surgery* 1975;55:682–686.
167. Schön R, Schramm A, Gellrich N-C, Maier W, Düker J, Schmelzeisen R. Color duplex sonography for the monitoring of vascularized free bone flaps. *Otolaryngology--head and neck surgery : official journal of American Academy of Otolaryngology-Head and Neck Surgery* 2003;129:71–76.
168. Palestro CJ. Radionuclide imaging after skeletal interventional procedures. *Seminars in nuclear medicine* 1995;25:3–14.
169. Berding G, Bothe K, Gratz KF, Schmelzeisen R, Neukam FW, Hundeshagen H. Bone scintigraphy in the evaluation of bone grafts used for mandibular reconstruction. *European journal of nuclear medicine* 1994;21:113–117.
170. Schwetlick G, Klingmüller V. Welche Bedeutung hat die superselektive Angiographie des Hüftgelenkes bei der Hüftkopfnekrose des Erwachsenen vor und nach Versorgung mit dem gefäßgestielten Beckenspan? *Handchirurgie, Mikrochirurgie, plastische Chirurgie : Organ der Deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft für Handchirurgie : Organ der Deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft für Mikrochirurgie der Peripheren Nerven und Gefässe*: 1988;20:195–197.
171. Lomasney LM, Madden JF, Rizk WS, Hedlund LW, Martinez S, Coleman RE, et al. Dynamic contrast-enhanced MR imaging assessment of vascularized free fibular grafts. *Journal of magnetic resonance imaging : JMRI* 1994;4:441–449.

172. Cova M, Kang YS, Tsukamoto H, Jones LC, McVeigh E, Neff BL, et al. Bone marrow perfusion evaluated with gadolinium-enhanced dynamic fast MR imaging in a dog model. *Radiology* 1991;179:535–539.
173. Shellock FG, Curtis JS. MR imaging and biomedical implants, materials, and devices: an updated review. *Radiology* 1991;180:541–550.
174. Shellock FG, Morisoli S, Kanal E. MR procedures and biomedical implants, materials, and devices: 1993 update. *Radiology* 1993;189:587–599.
175. Teitelbaum GP, Bradley WG, Klein BD. MR imaging artifacts, ferromagnetism, and magnetic torque of intravascular filters, stents, and coils. *Radiology* 1988;166:657–664.

14 EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Dissertation selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

Die Dissertation ist bisher keiner anderen Fakultät, keiner anderen wissenschaftlichen Einrichtung vorgelegt worden.

Ich erkläre, dass ich bisher kein Promotionsverfahren erfolglos beendet habe und dass eine Aberkennung eines bereits erworbenen Doktorgrades nicht vorliegt.

Ort und Datum

Unterschrift Lisa Eckstein

15 LEBENSLAUF

16 DANKSAGUNG

Herrn Prof. Dr. med. Andreas Eisenschenk danke ich für die thematische Vergabe und insbesondere für die finanzielle Ermöglichung der Studiendurchführung sowie für die Betreuung und Unterstützung bei der Erstellung der vorliegenden Dissertation.

Ein ganz besonderer Dank gebührt meinen fachlichen Betreuern am Unfallkrankenhaus Berlin und an der Universitätsmedizin Greifswald: Frau Dr. med. Ariane Asmus, die mir unermüdlich bei allen auftretenden fachlichen sowie praktisch-organisatorischen Fragen und Problemen zur Seite stand. Ohne ihre fantastische Unterstützung wäre die vorliegende Arbeit in dieser Form nicht möglich gewesen. Herrn Dr. med. Simon Kim danke ich insbesondere für die Unterstützung bei Erstellung und Einreichung des Ethikantrags und für die Beratung und Hilfestellung bei rechtlichen Grundlagen und der statistischen Auswertung sowie die stets sehr zeitnahe und zuverlässige Bearbeitung meiner Anliegen.

Herzlichst bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. med. Sven Mutze als Leiter des Instituts für Radiologie und Neuroradiologie für die hervorragende Unterstützung bei der radiologischen Auswertung sowie seinem gesamten Team, insbesondere Fr. Dr. Tittel, Frau Gölz und Frau Przybylowicz, für die zuverlässige Zusammenarbeit hinsichtlich der radiologischen Bildgebung.

Der Deutschen Gesellschaft für Handchirurgie (DGH), allen voran Herrn Prof. Dr. med. Jörg van Schoonhoven, danke ich für die großzügige Vergabe eines Reisestipendiums, welches mir die Kongressteilnahme am 74th Annual Meeting of the ASSH in Las Vegas, Nevada (USA) und die dortige Präsentation meiner radiologischen Ergebnisse in Form eines Posters ermöglicht hat.

Insbesondere meinen Patienten gebührt allergrößter Dank für die kooperative Zusammenarbeit und die von ihnen aufgewendete Zeit und Geduld, die diese Arbeit überhaupt erst ermöglicht haben.

Bei Frau Katrin Wulfert in ihrer Funktion als Bibliothekarin am Unfallkrankenhaus Berlin bedanke ich mich für die ausdauernde Mithilfe bei der Literaturrecherche.

Herrn Dipl.-Psych. Claas Güthoff danke ich insbesondere für die Unterstützung bei der statistischen Auswertung des SF-36 und seine beratende Funktion hinsichtlich statistischer Fragestellungen.

Ich bedanke mich herzlich bei Frau Dorothea Scheurlen für ihre zuverlässige und zeitnahe Unterstützung durch intra- und postoperatives Bildmaterial.

Danken möchte ich an dieser Stelle auch dem gesamten Team der Abteilung für Hand-, Replantations- und Mikrochirurgie für die herzliche Aufnahme in das Team und die stetige Bereitschaft zur Hilfestellung bei Fragen aller Art.

Bei meiner Freundin Wiebke Mensing bedanke ich mich für den außerordentlich wertvollen gegenseitigen Austausch und die Unterstützung.

Und ein ganz besonderer Dank geht an meine Lehrerin Frau Annemarie Rasche, die an mich geglaubt und mir damit meinen akademischen Weg erst ermöglicht hat sowie Herrn Dr. med. Thorsten Bröker, der meine Leidenschaft für die Medizin geweckt und mich für diesen Beruf begeistert hat.

Abschließend möchte ich allen danken, die im Hintergrund an dem Gelingen der Arbeit beteiligt waren.