

**Aus der Klinik für Unfall-, Hand- und Wiederherstellungschirurgie
der Medizinischen Fakultät der Universität Rostock
Direktor: Prof. Dr. med. Thomas Mittlmeier**

**Ortsaufgelöste Handkraftmessungen
im ersten Jahr nach distaler Radiusfraktur
mit dem Manugraphie-System**

**Inauguraldissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Medizin
der Universitätsmedizin Rostock**

Vorgelegt von

Johannes Bernhard Karnatz | geb. am 29.06.1986 in Hamburg
Rostock | 06.07.2022

Dekan der Universitätsmedizin Rostock: Prof. Dr. med. Emil Reisinger

Gutachter

1. Gutachter: Prof. Dr. med. Thomas Mittlmeier

Einrichtung: Klinik und Poliklinik für Unfall-, Hand- und Wiederherstellungs-
chirurgie der Universitätsmedizin Rostock

2. Gutachter: Prof. Dr. med. Andreas Wree

Einrichtung: Institut für Anatomie der Universitätsmedizin Rostock

3. Gutachter: Prof. Dr. med. Roland Biber

Einrichtung: Klinik für Unfallchirurgie der Kliniken Dr. Erler gGmbH Nürnberg,
Associate Professor der PMU Salzburg

Datum der Verteidigung:

28.02.2023

Für meine Familie

Danksagung

Ohne die Unterstützung von vielen Menschen wäre diese Arbeit nicht zustande gekommen und ich habe bei den vielen Herausforderungen immer geduldige Hilfe erhalten.

Herzlich danken möchte ich Herrn Prof. Dr. med. Thomas Mittlmeier, der mir die Möglichkeit zur Promotion an der Klinik für Unfall-, Hand- und Wiederherstellungschirurgie der Universitätsmedizin Rostock gegeben sowie mit Geduld und Weitsicht meine Arbeit unterstützt hat.

Mein herzlicher Dank gilt ebenfalls Frau Prof. Dr. rer. nat. Dagmar-Christiane Fischer, die mit ausdauernder Unterstützung beim Herausarbeiten der wesentlichen Aspekte und bei der Gestaltung dieser Arbeit geholfen hat.

Auch Herrn Dr. med. Claus Cristoph Harms möchte ich herzlich danken, der mich an dieses Thema herangeführt und bei der Auswertung und der Erstellung dieser Arbeit in vielerlei Hinsicht unterstützt hat.

Mein herzlicher Dank gilt allen Patientinnen und Patienten, die unentgeltlich an den Nachuntersuchungen teilgenommen haben. Diese haben für die Teilnahme zum Teil weite Fahrwege zurückgelegt und ohne ihre Bereitschaft wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Die Dankbarkeit für ihre freiwillige Unterstützung hat mich in der langen Zeit bis zur Fertigstellung dieser Arbeit durch alle herausfordernden Phasen während der Ausarbeitung begleitet, die insgesamt wesentlich länger als geplant gedauert hat.

Für die Bereitstellung des Manugraphie-Systems und der zugehörigen Software sowie die Einführung und bereitwillige Unterstützung bei Fragen und Problemen möchte ich mich bei der Firma Novel AG und insbesondere Herrn Dr. rer. nat. Kalpen herzlich bedanken.

Für die Beratung zur statistischen Auswertung der erhobenen Daten möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Günther Kundt herzlich bedanken.

Die Untersuchungen der Patientinnen und Patientin konnten dankenswerter Weise in den Räumlichkeiten der Ambulanz der Unfall-, Hand- und Wiederherstellungschirurgie stattfinden. Bedanken möchte ich mich in diesem Zusammenhang bei allen Mitarbeitern der Klinik für Unfall-, Hand- und Wiederherstellungschirurgie der Universitätsmedizin Rostock, die mir in allen Situationen geholfen haben.

Eine wichtige Unterstützung war auch mein Freund Daniel Schubert, der mir mit vielen wertvollen Ratschlägen und beim Korrekturlesen geholfen hat. Bei ihm möchte ich mich auch herzlich bedanken.

Meine Freundin Sophie Gehle hat viel Geduld aufgebracht in den letzten Jahren und auch immer wieder Korrektur gelesen. Dafür möchte ich ihr meinen lieben Dank ausdrücken.

Bedanken möchte ich mich auch für die freundliche Genehmigung für die Verwendung einer modifizierten Grafik aus dem Messblatt obere Gliedmaßen der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung.

Viele weitere Menschen haben mich unterstützt, denen ich sehr dankbar bin. Ganz herzlich möchte ich an dieser Stelle meinen Eltern für ihre Unterstützung während meiner gesamten Ausbildungszeit danken!

Johannes Karnatz

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Anatomischer Aufbau und Funktion der Hand	1
1.2	Die distale Radiusfraktur	3
1.3	Häufigkeit und Ursachen distaler Radiusfrakturen	4
1.4	Klassifikation distaler Radiusfrakturen	4
1.5	Behandlung distaler Radiusfrakturen	6
1.6	Heilungsverlauf und Komplikationen distaler Radiusfrakturen	7
1.7	Bestimmung des Funktionsstatus der Hand	8
1.8	Messung der Griffkraft	9
1.9	Erfassung der Kraftverteilung beim Greifen	11
2	Ziel der Arbeit	13
3	Material und Methoden	14
3.1	Studiendesign	14
3.2	Anamnese und Klinische Untersuchungen	16
3.3	Handkraftmessungen mit dem Manugraphie-System	17
3.4	Getrennte Auswertung einzelner Handareale	18
3.5	Statistische Auswertung	19
4	Ergebnisse	21
4.1	Probanden	21
4.2	Erfassung der Finger- und Handbeweglichkeit	23
4.2.1	Bewegungsumfang im Handgelenk	23
4.2.2	Fingerkuppen-Hohlhandabstand (Handsteifigkeit)	23
4.2.3	Handspanne zwischen Daumen- und Kleinfingerkuppe	24
4.3	Auswertung des QuickDASH-Fragebogens	25
4.4	Ergebnisse der Handkraftmessungen	25
4.4.1	Auswertung der Kraftverteilung beim Greifen des Messzylinders	26
4.4.2	Unterscheidung nach Händigkeit	28

4.5	Korrelationsanalysen	30
5	Diskussion	33
5.1	Verteilungsmuster der Griffkraft nach distaler Radiusfraktur	33
5.2	Subjektive und objektive Beurteilungen der Handfunktion nach distaler Radiusfraktur	36
5.2.1	Beurteilung des subjektiven Funktionsstatus mit dem QuickDASH-Fragebogen nach distaler Radiusfraktur	37
5.2.2	Bewegungsumfang und Handsteifigkeit nach distaler Radiusfraktur	38
5.2.3	Handkraftmessung beim Faustschluss nach distaler Radiusfraktur	40
5.3	Limitationen	41
5.4	Ausblick	42
6	Zusammenfassung	43
7	Thesen	45
8	Literaturverzeichnis	46
9	Anhang	61
9.1	QuickDASH-Fragebogen	61
9.2	Handkraftmessungen mit dem großen Zylinder (200 mm Umfang)	62
9.2.1	Auswertung der einzelnen Areale	63
9.2.2	Unterscheidung nach Händigkeit	64
9.2.3	Korrelationsberechnungen	66
9.3	Individuelle Daten für jeden Untersuchungsteilnehmer	68
9.3.1	Patientencharakteristika	68
9.3.2	Subjektive Handfunktion	70
9.3.3	Handgelenks- und Fingerbeweglichkeit	71
9.3.4	Messdaten kleiner Zylinder (150 mm Umfang)	78
9.3.5	Messdaten großer Zylinder (200 mm Umfang)	86
10	Lebenslauf	95
11	Eidesstattliche Versicherung	96

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Darstellung der intrinsischen Handmuskeln und der Sehnen der extrinsischen Handmuskulatur auf der volaren Seite der Hand	3
Abbildung 2:	Schematische Darstellung des Studienprotokolls	15
Abbildung 3 A und B:	Messung der Handspanne (A) und des Fingerkuppen-Hohlhandabstandes (B)	16
Abbildung 4:	Messposition beim Greifen des großen Zylinders (200 mm Umfang). Im Hintergrund auf dem Schrank liegt der kleine Zylinder (150 mm Umfang)	17
Abbildung 5:	Mit dem MaskEditor markierte Handareale einer linken Hand	19
Abbildung 6:	Aufteilung der Patienten in Bezug auf Ein- und Ausschlusskriterien, Einwilligung und Teilnahme	21
Abbildung 7:	Longitudinale Veränderungen des QuickDASH-Scores	25
Abbildung 8 A - E:	Darstellung des relativen Kraftanteiles an der Gesamtkraft	27
Abbildung 9 A und B:	Darstellung der absoluten Kraft bei Fraktur auf der dominanten (A) oder nicht dominanten Seite (B)	28
Abbildung 10 A - D:	Nach Händigkeit differenzierte Darstellung der Quotienten aus den auf die gesunde Seite normierten Kraftanteilen von betroffener und gesunder Hand für die Areale mit signifikanten Differenzen	29
Abbildung 11 A - F:	Darstellung des relativen Kraftanteiles (großer Zylinder)	63

Abbildung 12 A und B:	Darstellung der absoluten Kraft bei Fraktur auf der dominanten (A) oder nicht dominanten Seite (B) für die Messungen mit dem großen Zylinder	64
Abbildung 13 A – G:	Nach Händigkeit differenzierte Darstellung der Quotienten aus den auf die gesunde Seite normierten relativen Kraftanteilen (großer Zylinder)	65
Abbildung 14:	Das Manographie-System	94

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: AO/OTA-Klassifikation 2018 für distale Radiusfrakturen	5
Tabelle 2: Patientencharakteristika	22
Tabelle 3: Medianer Bewegungsumfang relativ zur gesunden Seite	23
Tabelle 4: Maximaler Abstand zwischen Daumen- und Kleinfingerkuppe auf der betroffenen Seite als Differenz von der gesunden Seite	24
Tabelle 5: Die absolute Handkraft in Newton [N] auf der betroffenen und gesunden Seite im Verlauf	26
Tabelle 6: Signifikante Korrelationen zwischen Handkraft, Alter, QuickDASH-Wert, Handspanne und Handsteifigkeit	31
Tabelle 7: Signifikante Korrelationen zwischen der Kraftverteilung sowie Finger- und Handbeweglichkeit	32
Tabelle 8: Übersicht der Meta-Analyse von Stinton et al. und der eigenen Ergebnisse	36
Tabelle 9: QuickDASH-Fragebogen	61
Tabelle 10: A: Absolute Gesamtkraft (in N) – großer Zylinder B: Auf die gesunde Seite normierte Kraft (in %) – großer Zylinder	62
Tabelle 11: Korrelationen zwischen Handkraft (großer Zylinder), Alter, QuickDASH-Wert, Handspanne und Handsteifigkeit	66
Tabelle 12: Korrelationen zwischen der Kraftverteilung (großer Zylinder) und Finger- und Handbeweglichkeit	67
Tabelle 13: Patientencharakteristika	68
Tabelle 14: Ergebnisse des QuickDASH-Fragebogens	70
Tabelle 15: Bewegungsumfang, 1. Messung	71
Tabelle 16: Bewegungsumfang, 2. Messung	72
Tabelle 17: Bewegungsumfang, 3. Messung	73
Tabelle 18: Handspanne	74
Tabelle 19: Fingerkuppen-Hohlhand-Abstand, 1. Messung	75

Tabelle 20: Fingerkuppen-Hohlhand-Abstand, 2. Messung	76
Tabelle 21: Fingerkuppen-Hohlhand-Abstand, 3. Messung	77
Tabelle 22: Handkraft (in N) – kleiner Zylinder (150 mm)	78
Tabelle 23: Kraftanteil 1. Fingerstrahl (in N) – kleiner Zylinder (150 mm)	79
Tabelle 24: Kraftanteil 2. Fingerstrahl (in N) – kleiner Zylinder (150 mm)	80
Tabelle 25: Kraftanteil 3. Fingerstrahl (in N) – kleiner Zylinder (150 mm)	81
Tabelle 26: Kraftanteil 4. Fingerstrahl (in N) – kleiner Zylinder (150 mm)	82
Tabelle 27: Kraftanteil 5. Fingerstrahl (in N) – kleiner Zylinder (150 mm)	83
Tabelle 28: Kraftanteil Thenar (in N) – kleiner Zylinder (150 mm)	84
Tabelle 29: Kraftanteil Hypothenar (in N) – kleiner Zylinder (150 mm)	85
Tabelle 30: Handkraft (in N) – großer Zylinder (200 mm)	86
Tabelle 31: Kraftanteil 1. Fingerstrahl (in N) – großer Zylinder (200 mm)	87
Tabelle 32: Kraftanteil 2. Fingerstrahl (in N) – großer Zylinder (200 mm)	88
Tabelle 33: Kraftanteil 3. Fingerstrahl (in N) – großer Zylinder (200 mm)	89
Tabelle 34: Kraftanteil 4. Fingerstrahl (in N) – großer Zylinder (200 mm)	90
Tabelle 35: Kraftanteil 5. Fingerstrahl (in N) – großer Zylinder (200 mm)	91
Tabelle 36: Kraftanteil Thenar (in N) – großer Zylinder (200 mm)	92
Tabelle 37: Kraftanteil Hypothenar (in N) – großer Zylinder (200 mm)	93

Abkürzungsverzeichnis

DASH	Disabilities of Arm, Shoulder and Hand (-Fragebogen)
gr.	groß
kl.	Klein
M.	Musculus
MCID	Minimal Clinically Important Difference (übersetzt: minimale klinisch bedeutsame Differenz)
Mittelw.	Mittelwert
Min.	Minimum
Max.	Maximum
Mm.	Musculi
N	Newton
AO/OTA	Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen / Orthopedic Trauma Association
PRWE	Patient-Rated Wrist Evaluation (-Fragebogen)
QuickDASH	Kurzfassung des Disabilities of Arm, Shoulder and Hand-Fragebogens
t ₃	Untersuchung nach 3 Monaten
t ₆	Untersuchung nach 6 Monaten
t ₁₂	Untersuchung nach 12 Monaten

1 Einleitung

Unsere Hände tragen einen wichtigen Teil dazu bei, die Welt um uns zu erfassen und zu verändern. Sie sind nicht nur für das Greifen und Halten von Gegenständen von besonderer Bedeutung, sondern auch wesentlicher Bestandteil unserer Kommunikation. Beim Greifen eines Stiftes, von Werkzeugen oder Instrumenten ist das Zusammenspiel der Muskeln, Sehnen und Gelenken fein abgestimmt.

1.1 Anatomischer Aufbau und Funktion der Hand

Grundlage für die feinmotorischen Fähigkeiten der Finger ist der komplexe Aufbau aus ex- und intrinsischen Muskeln, Sehnen und Bändern.

Im proximalen Handgelenk artikulieren die Gelenkfläche des distalen Radius und der Discus ulnocarpalis, der sich distal an die Ulna anschließt, mit den proximalen Handwurzelknochen Os scaphoideum, Os lunatum und Os triquetrum. Die langen Sehnen der extrinsischen Handmuskeln ziehen in bindegewebigen Scheiden auf volarer und dorsaler Seite des Handgelenkes zu den Phalangen und Handwurzel- sowie Mittelhandknochen. Sie ermöglichen die Fingerbeugung und -streckung sowie Bewegungen im Handgelenk. Die intrinsische Handmuskulatur wird von den Thenar- und Hypothenarmuskeln, den Musculi interossei sowie den Musculi lumbricales gebildet. Sie ermöglicht eine präzise Bewegung der Finger zueinander, was insbesondere beim Greifen kleinerer Gegenstände von Bedeutung ist (Schünke et al. 2014).

Mit den Sehnen der extrinsischen Handmuskeln verlaufen auf der volaren Seite des Handgelenkes unter dem Retinaculum musculorum flexorum im Karpaltunnel der Nervus medianus und in einer eigenen bindegewebigen Loge der Nervus ulnaris. Gemeinsam innervieren sie motorisch die für die Flexion verantwortlichen Muskeln am Unterarm. Der Nervus medianus innerviert distal motorisch vor allem die Thenarmuskulatur, der Nervus ulnaris die Hypothenarmuskulatur als auch für Flexion und Adduktion des Daumens zuständige Thenarmuskeln. Die Innervation der Extensoren erfolgt über den Nervus radialis. Dessen Endäste innervieren die Haut des radialeseitigen und die des Nervus ulnaris des ulnarseitigen Handrückens sensibel. Die Handinnenfläche wird gemeinsam vom Nervus ulnaris und medianus innerviert (Schünke et al. 2014).

Die motorischen Nerven können den Impuls einer Bewegung an die Muskeln oder Muskelgruppen weitergeben. Die sensiblen Nerven bündeln Tast- und Schmerzreize sowie den Grad der Muskel- und Sehnenspannung. Durch diese Rückmeldung wird eine Anpassung von Bewegungen ermöglicht (Schünke et al. 2014).

Für die Beugung im proximalen Handgelenk sind der *Musculus flexor carpi radialis* und der *Musculus flexor carpi ulnaris* von Bedeutung, die an Handwurzel- und Mittelhandknochen ansetzen. An der Extension sind die *Musculi extensor carpi radialis longus* und *brevis* sowie der *Musculus extensor carpi ulnaris* maßgeblich beteiligt. Die Radialduktion wird durch den gleichzeitigen Einsatz der drei radialseitigen und die Ulnarduktion durch die beiden ulnarseitigen für Flexion und Extension verantwortlichen Muskeln ermöglicht (Schünke et al. 2014).

Wesentlich für den Faustschluss sind der zur distalen Daumenphalanx ziehende *Musculus flexor pollicis longus* und der *Musculus flexor digitorum*, der mit seinem oberflächlichen Anteil an den mittleren Phalangen sowie mit seinem tiefen Anteil an den distalen Phalangen von Zeige-, Mittel-, Ring und kleinem Finger ansetzt (Abb. 1) (Schünke et al. 2014).

Im Gegensatz zur Bewegung im Handgelenk und dem Faustschluss sind an einem Pinzettengriff vor allem die intrinsischen Handmuskeln beteiligt (Schünke et al. 2014). Der *Musculus opponens pollicis* und die *Musculi lumbricales* ergänzen sich hierbei (Abb. 1). Letztere bewirken neben einer Beugung in den Metacarpo-Phalangeal-Gelenken von Zeige-, Mittel-, Ring- und kleinem Finger durch ihren Ansatz an der dorsalen Aponeurose dieser Finger auch eine Extension im proximalen und distalen Interphalangealgelenk (Schünke et al. 2014).

Die extrinsischen Handmuskeln sind größer und haben durch ihre Länge ein höheres Verkürzungspotential als die intrinsischen Handmuskeln. Dies ermöglicht eine große Kraftentwicklung beim Faustschluss (Schünke et al. 2014). Hierbei stehen nicht nur Körpergröße, Gewicht, Alter und Geschlecht im Zusammenhang mit der ausgeübten Kraft, sondern auch der allgemeine somatische und psychische Gesundheitsstatus (Günther et al. 2008; Mitsionis et al. 2009; Bot et al. 2012b; Klum et al. 2012; Leong et al. 2015; Wichelhaus et al. 2018; Smith et al. 2019).

Verletzungen, die die Gelenk-, Sehnen- oder Muskelfunktion beeinträchtigen oder mit Schmerzen beim Greifen verbunden sind, führen zu einer verminderten Handkraft. Die Messung der Handkraft bietet umgekehrt nach traumatischen Verletzungen eine zuverlässige Möglichkeit, die Handfunktion zu beurteilen (Mafi et al. 2012; Beumer und Lindau 2014).

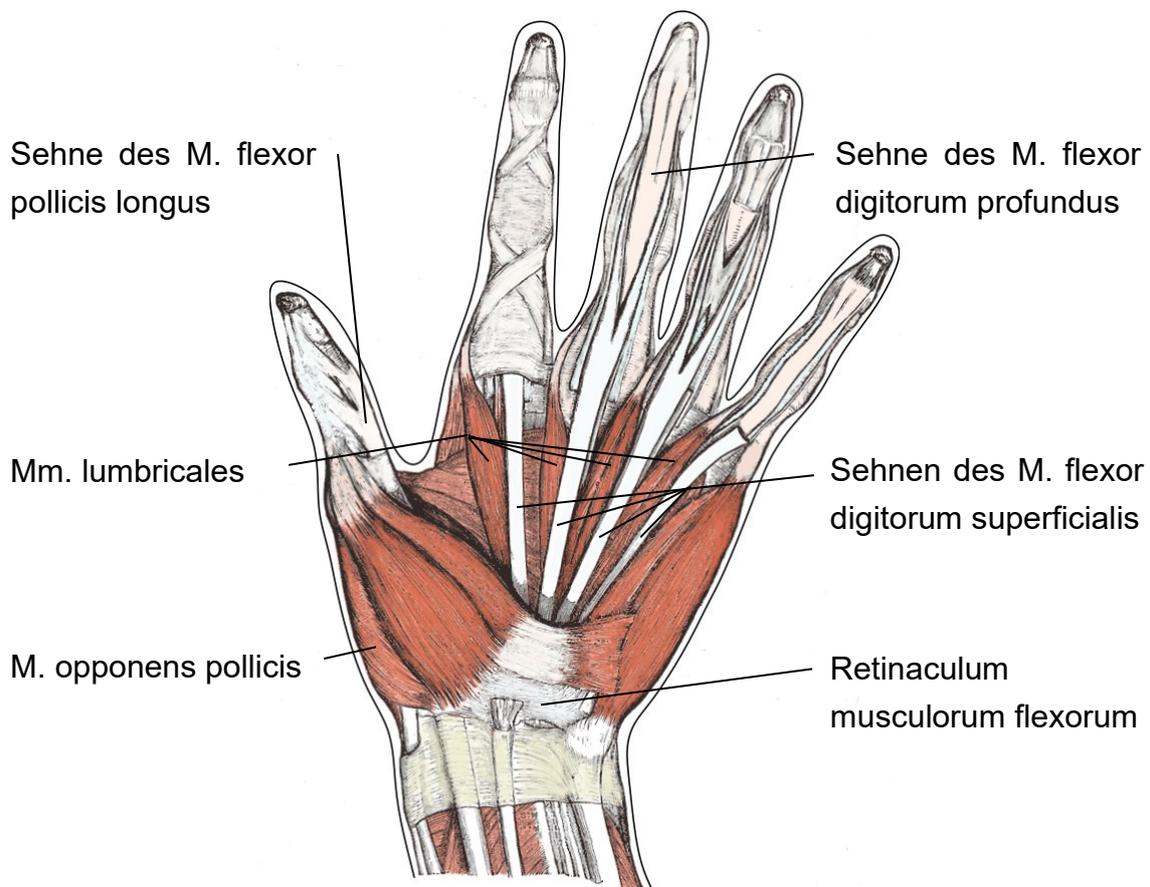


Abb. 1: Darstellung der intrinsischen Handmuskeln und der Sehnen der extrinsischen Handmuskulatur auf der volaren Seite der Hand. Parallel zu den Sehnen der Musculi flexor digitorum profundus und superficialis finden sich die Musculi lumbricales, die gemeinsam mit dem Musculus opponens pollicis für den Pinzettengriff wesentlich sind. Modifiziert nach Grey und Carter 1918.

1.2 Die distale Radiusfraktur

Die distale Radiusfraktur, eine der häufigsten knöchernen Verletzungen, führt durch die Gewebeerletzung sowie die damit einhergehenden Schmerzen zu Einschränkungen der Beweglichkeit und des Greifens (MacDermid et al. 2003; Jerrhag et al. 2017; Stinton et al. 2017). Zur Evaluation der Behandlung werden, neben bildgebenden Verfahren, Messungen der Finger- und Handbeweglichkeit sowie der Handkraft zur objektiven Bestimmung des Funktionsstatus eingesetzt. Genauso wird die subjektive Beurteilung des Therapieerfolges aus der Sicht der Patienten berücksichtigt (Diaz-Garcia und Chung 2012; Egol et al. 2014; Lippisch et al. 2016; Stinton et al. 2017).

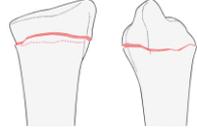
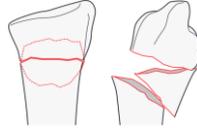
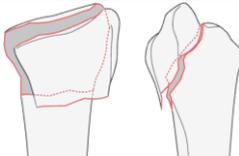
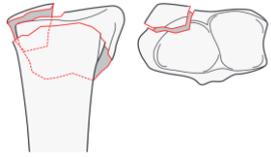
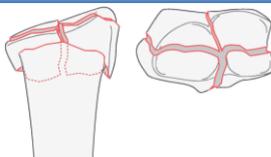
1.3 Häufigkeit und Ursachen distaler Radiusfrakturen

Ein erster Inzidenzgipfel distaler Radiusfrakturen findet sich im Alter von 5-15 Jahren, Jungen sind in dieser Altersspanne etwas häufiger betroffen als Mädchen (Ryan et al. 2010; de Putter et al. 2011; MacIntyre und Dewan 2016). Hier, wie auch im jungen Erwachsenenalter, sind Sportunfälle und Rasanztraumata wichtige Frakturursachen (Pechlaner et al. 2007; MacIntyre und Dewan 2016). Nach einer Spanne mit niedrigerer Inzidenz und ähnlicher Häufigkeit bei Männern und Frauen bis zum Alter von 50 Jahren steigt die Inzidenz danach bis zu einem Maximum bei über 80-Jährigen kontinuierlich an. Frauen sind mit Eintritt der Menopause ungefähr viermal häufiger als Männer im gleichen Alter betroffen, was im Zusammenhang mit der Osteoporoseinzidenz steht (Gay 1974; Thompson et al. 2004; Øyen et al. 2011; Jerrhag et al. 2017).

1.4 Klassifikation distaler Radiusfrakturen

Die Beschreibung distaler Radiusfrakturen mit dorsaler und leichter lateraler Angulation durch den irischen Chirurgen Abraham Colles (1773 – 1843) im Jahre 1814 markiert einen wichtigen Abschnitt in der wissenschaftlichen Betrachtung dieser Fraktur (Diaz-Garcia und Chung 2012; Hove et al. 2014). Colles beschreibt, wie durch eine gute Reposition und Schienung die Handfunktion möglichst gut wiederhergestellt werden kann und grenzt eine distale Radiusfraktur von einer häufig angenommenen traumatischen Dislokation des proximalen Handgelenkes ab (Diaz-Garcia und Chung 2012; Bain 2015). Über siebenzig Jahre später werden die diagnostischen Möglichkeiten durch Röntgenuntersuchungen erweitert und Anfang des 20. Jahrhunderts entwickeln sich erste Klassifikationen von distalen Radiusfrakturen, um Aussagen über Behandlung und Prognose zu präzisieren (Diaz-Garcia und Chung 2012). Ausgehend von den pathophysiologischen Aspekten des Traumas und dem Frakturmuster wurden seitdem eine Vielzahl von Klassifikationssystemen entwickelt (Lippisch et al. 2016). Im deutschsprachigen Raum wird derzeit überwiegend die Klassifikation der Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen (AO/OTA-Klassifikation) angewandt. Diese unterscheidet zwischen extraartikulären Frakturen, Frakturen mit partieller Gelenkbeteiligung und intraartikulären Frakturen (Tab. 1) und bildet die Grundlage für wissenschaftlichen Austausch und Therapieentscheidungen (Müller et al. 1990; Meinberg et al. 2018).

**Tab. 1: AO/OTA-Klassifikation 2018 für distale Radiusfrakturen
- (Lokalisation 2R3) – nach Meinberg et al. 2018**

Typ A		Extraartikuläre Fraktur
A1	Avulsion des Proc. styloideus radii	
A2	Einfache Radiusfraktur	
A3	Mehrfache Radiusfraktur	
Typ B		Partiell intraartikuläre Fraktur
B1	Sagittale Radiusfraktur (Chauffeur-/Hutchinsonfraktur)	
B2	Fraktur des dorsalen Randes (Barton-Fraktur)	
B3	Fraktur des volaren Randes (Reversed-Barton-Fraktur)	
Typ C		Intraartikuläre Fraktur
C1	Einfache artikuläre und einfache metaphysäre Fraktur	
C2	Einfache artikuläre und metaphysäre Mehrfragmentfraktur	
C3	Komplexe (Mehrfragment-) Fraktur	

1.5 Behandlung distaler Radiusfrakturen

Das Ziel der Behandlung distaler Radiusfrakturen ist die bestmögliche Wiederherstellung der Hand- und Fingerfunktion und die Vermeidung von langfristigen Einschränkungen (Diaz-Garcia et al. 2011; Diaz-Garcia und Chung 2012; Rhee et al. 2012; Lippisch et al. 2016).

Zu den konservativen Maßnahmen mit Schienung, welche schon aus dem alten Ägypten und im Corpus hippocraticum berichtet wurden (Hippocrates und Adams 1849; Breasted 1932), kamen um 1900 erste operative Versorgungsmethoden hinzu (Lambotte 1904; Rayhack 1993; Diaz-Garcia und Chung 2012). Diese haben sich aufgrund der häufigeren Fehlheilungen bei konservativ versorgten dislozierten distalen Radiusfrakturen schrittweise in der Frakturversorgung etabliert (Gartland und Werley 1951; Older et al. 1965; Diaz-Garcia und Chung 2012).

Indikationen für eine direkte operative Versorgung sind offene oder nicht reponierbare Frakturen, ein drohender Weichteilschaden sowie eine Gefäß- oder Nervenverletzung (Lippisch et al. 2016). Gelenkflächeninkongruenzen, höhergradige Achsabweichungen und Verkürzungen der Achse sind, wie auch eine dislozierte Flexionsfraktur (Smith-Fraktur), Indikationen für eine Operation innerhalb eines Intervalls von mehreren Tagen (Jupiter 1997; Laino und Tejwani 2012; Mulders et al. 2017).

Die um das Jahr 2000 vorgestellte winkelstabile volare Plattenosteosynthese ist heutzutage die häufigste Form der operativen Fixierung distaler Radiusfrakturen (Orbay 2000; Landgren et al. 2017; Stinton et al. 2017). Sie zeigt, bezogen auf die Handfunktion, auch bei osteoporotischen Frakturen gute Ergebnisse (Orbay 2000; Chaudhry et al. 2015; Franceschi et al. 2015; Landgren et al. 2017; Beyer et al. 2021). Eine operative Versorgung mit Drähten, Schrauben, Radiusnagel und dorsaler Plattenosteosynthese sowie bei ausgeprägtem Weichteilschaden auch vorübergehend mit einem „Fixateur externe“ ergänzen das therapeutische Repertoire (Gradl et al. 2016; Lippisch et al. 2016).

Bei wenig dislozierten und nach geschlossener Reposition stabilen Frakturen ist eine konservative Versorgung mit einem Gips die Therapie der Wahl (Lippisch et al. 2016; Dresing et al. 2021). Eine sekundäre operative Fixierung kann indiziert sein, wenn sich im Verlauf in den Röntgenaufnahmen ein relevanter Repositionsverlust zeigt (Lippisch et al. 2016).

1.6 Heilungsverlauf und Komplikationen distaler Radiusfrakturen

Damit sich die Handfunktion optimal erholt, sollten bei dislozierten Frakturen der ulnare und der dorso-volare Inklinationwinkel des Radius sowie die ulnare Varianz möglichst anatomisch wiederhergestellt werden (Böhler 1953; Jupiter 1997; Jianda et al. 2019). Für die Wiederherstellung spielt bei dislozierten Frakturen die operative Versorgung eine wichtige Rolle und nach volarer Plattenosteosynthese sind verheilte Fehlstellungen eine seltene Komplikation (Diaz-Garcia et al. 2011; Yuan et al. 2018; Chung et al. 2019).

Bei der Behandlung distaler Radiusfrakturen sind neben den durch das Trauma hervorgerufenen Schädigungen auch Gewebeverletzungen durch die Frakturversorgung und eingebrachtes Material zu berücksichtigen (Slutsky und Herman 2005; Lippisch et al. 2016). Nach volarer und dorsaler Plattenosteosynthese werden in der Literatur bei bis zu der Hälfte der Fälle Sehnenirritation beschrieben (Arora et al. 2007; Mathews und Chung 2015; Seigerman et al. 2019). Auch ist die Häufigkeit von Sehnenrupturen mit 1 - 3 % insgesamt höher als nach konservativer Versorgung (Lippisch et al. 2016; Tang 2021). Weiterhin werden neben Einschränkungen der Sehnenfunktion, zu denen auch die Neigung zur Bildung von Dupuytren-Knoten zählt, Funktionsbeeinträchtigungen peripherer Nerven sowie das Auftreten eines chronischen regionalen Schmerzsyndromes (chronic regional pain syndrome Type I, CRPS I) als Komplikationen nach distaler Radiusfraktur beschrieben (Niver und Ilyas 2012; Rhee et al. 2012; Mathews und Chung 2015; Wichelhaus et al. 2015; Lippisch et al. 2016; Chung et al. 2019; Rolls et al. 2020). Der Nervus medianus wird insbesondere durch eine Kompression im Karpalkanal beeinträchtigt, die Inzidenz eines im Verlauf auftretenden Karpaltunnelsyndroms wird von Rhee et al. mit 2 - 8,5 % angegeben (Rhee et al. 2012). Komplikationen des Nervus radialis oder Nervus ulnaris sind nach distaler Radiusfraktur seltener (Rhee et al. 2012; Chung et al. 2019).

Bei komplikationsloser Heilung einer distalen Radiusfraktur haben sich nach einem Jahr die motorischen Fähigkeiten zum großen Teil erholt (Stinton et al. 2017). Obgleich sich auch im weiteren Verlauf Funktionsverbesserungen zeigen lassen, sind die Änderungen im zweiten Jahr nach distaler Radiusfraktur gering und klinisch für die meisten Patienten nicht relevant (Jupiter und Marent-Huber 2010; Stinton et al. 2017; Bobos et al. 2018).

1.7 Bestimmung des Funktionsstatus der Hand

Zur Erfassung des subjektiven Funktionsniveaus werden nach distaler Radiusfraktur häufig der PRWE- (Patient-Rated Wrist Evaluation) und der DASH-Fragebogen (Disabilities of Arm, Shoulder and Hand) eingesetzt, um einen standardisierten wissenschaftlichen Austausch zu ermöglichen (Gabl und Arora 2014; Goldhahn et al. 2014; Stinton et al. 2017).

Der PRWE-Fragebogen setzt sich aus 15 Fragen zusammen, die sich in 5 Fragen zur Häufigkeit und Intensität von Schmerzen, 6 Fragen zu spezifischen Handtätigkeiten und 4 Fragen zu Beschwerden und Einschränkungen im Alltag gliedern. Die Antworten werden auf einer Ordinalskala von 0 bis 10 erfasst und summiert (MacDermid et al. 1998). Der DASH-Fragebogen umfasst 30 Fragen, davon 5 zu Schmerzen und Beschwerden, 16 zu spezifischen Bewegungen oder Tätigkeiten und 9 zu Einschränkungen und Beeinträchtigungen im Alltag, im Beruf und in der Freizeit sowie die Auswirkungen der Beschwerden auf den Schlaf. Für jede Frage erfolgt eine Bewertung auf einer Skala von 1 bis 5, die Antworten werden nach Umrechnung in einem Wert von 0 bis 100 zusammengefasst (Beaton et al. 2005; Institute for Work & Health, Canada 2020). Ein geringerer Wert bedeutet bei beiden Fragenbögen weniger Beschwerden (MacDermid et al. 1998; Beaton et al. 2005). Die Ergebnisse von PRWE- und DASH-Fragebogen korrelieren jeweils gut miteinander (Mehta et al. 2015).

Für den PRWE-Fragebogen konnte in den ersten 6 Monaten nach distaler Radiusfraktur eine etwas höhere Sensitivität für die longitudinale Veränderung von Beschwerden gezeigt werden (MacDermid et al. 2000). Im späteren Verlauf nach distaler Radiusfraktur ergab sich in der Auswertung des DASH-Fragebogens eine größere Sensitivität für Veränderungen, möglicherweise dadurch bedingt, dass der PRWE-Fragebogen einen stärkeren Fokus auf Schmerzen legt (Stinton et al. 2017).

Die vom DASH-Fragebogen abgeleitete Kurzform, der QuickDASH, findet ebenfalls häufig Anwendung und wird häufiger als der DASH-Fragebogen vollständig bearbeitet (Kennedy et al. 2013; Aasheim und Finsen 2014; Tsang et al. 2017). Beide sind in ihrer Aussage miteinander vergleichbar, wobei im direkten Vergleich eine Tendenz zu etwas höheren Werten beim QuickDASH-Score besteht (Beaton et al. 2005; Abramo et al. 2008; Tsang et al. 2017). Der QuickDASH- und der für die Funktion spezifische Abschnitt des PRWE-Fragebogens werden nach distaler Radiusfraktur zur Erhebung des subjektiven Funktionsstatus empfohlen (Goldhahn et al. 2014).

Im Gegensatz zur Erfassung der Einschränkungen aus Patientensicht ermöglichen Messungen der Handkraft, des Bewegungsumfanges im Handgelenk und der Fingerbeweglichkeit eine objektive Beurteilung der Handfunktion. Innerhalb der ersten sechs Monate nach distaler Radiusfraktur erholt sich der Bewegungsumfang im Handgelenk bereits zum großen Teil und insbesondere in der zweiten Hälfte des ersten Jahres ist die Messung der Handkraft sensitiver, um Funktionsverbesserungen zu erfassen (Stinton et al. 2017). Für beide Parameter ließen sich Korrelationen mit dem PRWE- und dem DASH-Fragebogen zeigen (Wilcke et al. 2007; Mehta et al. 2015). Darüber hinaus geht auch eine eingeschränkte Fingerbeugung nach distaler Radiusfraktur mit einer verminderten Handfunktion einher (Egol et al. 2014).

Die Bestimmung des Bewegungsumfanges im Handgelenk und der Fingerbeweglichkeit kann mit einem Goniometer und einem Abstandsmesser erfolgen, für die Handkraftmessung werden hingegen speziell entwickelte Dynamometer eingesetzt (Roberts et al. 2011; Wilcke et al. 2011; Egol et al. 2014).

1.8 Messung der Griffkraft

Die Handkraft wird als aussagekräftiger Parameter zur Beurteilung der Handfunktion nach distaler Radiusfraktur häufig erfasst (Margaliot et al. 2005; Runnquist 2014; Stinton et al. 2017).

Da mehrere Autoren bei gesunden Probanden eine Differenz zwischen der Handkraft der dominanten im Vergleich zur nicht dominanten Seite berichteten, wurde die Handkraft auch nach distaler Radiusfraktur in einem Teil der Arbeiten nach Händigkeit korrigiert (Margaliot et al. 2005). Diese Korrektur kann jedoch nach Ansicht von Autoren umfangreicher Arbeiten bei der Auswertung von Handkraftmessungen vernachlässigt werden, da der Einfluss auf die Handkraft in der Regel gering ist (Margaliot et al. 2005; Günther et al. 2008; Schectman und Sindhu 2015). So lässt sich die gesunde Seite als Vergleichswert für den zu erwartenden gesunden Zustand heranziehen (Margaliot et al. 2005; Beumer und Lindau 2014). Für das Verhältnis zwischen der Kraft auf der betroffenen und der gesunden Seite ließ sich eine stärkere Korrelation mit dem Ergebnis des DASH-Fragebogens zeigen als bei Berücksichtigung der absoluten Kraft der betroffenen Seite (Beumer und Lindau 2014).

Die Handkraft kann über den beim Greifen erzeugten Druck, der zu Kompression von Luft oder Flüssigkeiten, einer Spannungsänderung von Federn oder der Modulation des elektrischen Signals eines Drucksensors führt, erfasst werden. Am einfachsten kann der von den Fingern ausgeübte Druck beim Faustschluss über eine aufgerollte Blutdruckmanschette (Sphygmomanometer) oder einen komprimierbaren Ball (Martin Vigorimeter) gemessen werden (Lee und Gong 2020).

Zu den auf einer Federmechanik basierenden Messgeräten gehören das Smedley- und das Harpenden-Handdynamometer (Innes 1999; Lee und Gong 2020). Weiterhin kann auch der durch das Greifen erzeugte hydraulische Druck gemessen werden (Mathiowetz et al. 1984). Beim häufig verwendeten Jamar[®]-Handdynamometer wird über einen quer zur Fingerlängsachse gehaltenen Griff, der beim Faustschluss gegen den in der Handinnenfläche liegenden Teil des Messinstrumentes verschoben werden kann, ein hydraulischer Druck erzeugt (Mathiowetz et al. 1984). Das Jamar[®]-Handdynamometer ist für zuverlässige Messungen bekannt und wird in der Literatur als Standardmessinstrument für Handkraftmessungen angesehen (Mathiowetz et al. 1984; Roberts et al. 2011; Hogrel 2015).

Sensoren, die Druckänderungen als elektrische Signale ausgeben, haben einen besonderen Stellenwert bei orts aufgelösten Messungen der Handkraft (Wimer et al. 2009; Mühldorfer-Fodor et al. 2014). Es wurden zylinderförmige Messgeräte entwickelt, die über gleichmäßig angeordnete Sensoren eine differenziertere Erfassung von Finger- und Handkraft beim Greifen ermöglichen (Dong et al. 2008; McDowell et al. 2012). Im Vergleich zum Jamar[®]-Handdynamometer ist die gemessene Kraft größer, was darauf zurückgeführt werden kann, dass beim Umfassen eines Messzylinders die Kraft im distalen Fingerbereich mitgemessen wird (McDowell et al. 2012). Zudem steht die gemessene Kraft im Zusammenhang mit der Handlänge und dem Zylinderdurchmesser (McDowell et al. 2012; Mühldorfer-Fodor et al. 2014; Mühldorfer-Fodor et al. 2017). Unter- und oberhalb eines Durchmessers von 3,3, bzw. 3,4 cm (entspricht einem Umfang von 104 – 107 mm) nahm die gemessene Kraft ab (Sancho-Bru et al. 2003; Rossi et al. 2012).

Das Manugraphie-System (Pliance[®], Novel AG, München/Deutschland) verwendet mit Sensormatten ummantelte Zylinder (Mühldorfer-Fodor et al. 2014). Bei paralleler Messung konnten zwischen den mit dem Manugraphie-System und den mit dem Jamar[®]-Handdynamometer gemessenen Handkraftwerten signifikante Korrelationen gezeigt werden (Mühldorfer-Fodor et al. 2014).

1.9 Erfassung der Kraftverteilung beim Greifen

Mit dem Manographie-System lässt sich nicht nur zuverlässig die Handkraft bestimmen, sondern es ermöglicht durch die Auflösung der direkt aneinander grenzenden Sensoren auch eine differenzierte Auswertung der Kraftverteilung (Mühldorfer-Fodor et al. 2017). Hierbei können die Kraftanteile einzelner, frei zu bestimmender Areale miteinander verglichen werden (Mühldorfer-Fodor et al. 2017). Die in mehreren Arbeiten beim Greifen mit maximaler Kraft unter den distalen Phalangen erfasste Kraftverteilung von näherungsweise 1/3 für Zeige- und Mittelfinger, 2/9 für den Ringfinger und 1/9 für den kleinen Finger ließ sich mit dem Manographie-System bestätigen (Freund et al. 2002; Mühldorfer-Fodor et al. 2017). Ein hiervon abweichendes Muster ließ sich bei Messung unter den mittleren Phalangen, ebenfalls beim Greifen mit maximaler Kraft, zeigen (MacDermid et al. 2004). Die gute Übereinstimmung zwischen der Kraftverteilung der unter den distalen Phalangen und der über die gesamte Fingerachse gemessenen Griffkraft lässt sich auch damit in Zusammenhang bringen, dass beim Greifen mit maximaler Griffkraft der größte Kraftanteil von den distalen Phalangen ausgeht (Seo et al. 2007; Mühldorfer-Fodor et al. 2018). Diese Kraftverteilung ändert sich erkennbar bei submaximaler Griffkraft (Mühldorfer-Fodor et al. 2018).

Für die Kraftverteilung beim Greifen mit maximaler Kraft zeigten sich Unterschiede zwischen dominanter und nicht dominanter Hand. Diese waren jedoch mit 1 – 1,5 % gering und betrafen in zwei Arbeiten jeweils unterschiedliche Areale (Mühldorfer-Fodor et al. 2017; Cai et al. 2018).

Die Kraftverteilung ist nach traumatischen Verletzungen oder operativen Eingriffen, im Gegensatz zur häufig erfassten Handkraft, bisher nur Gegenstand einzelner Arbeiten gewesen (Gabl und Arora 2014; Mühldorfer-Fodor et al. 2014; Neumann 2019; Garkisch et al. 2021). Durchschnittlich 9 Wochen nach distaler Radiusfraktur ließ sich bei 25 Patienten, im Vergleich zur gesunden Seite, im Mittel eine Mehrbelastung von Daumen und Zeigefinger zeigen, der Thenar wurde weniger belastet (Neumann 2019). Ein Zusammenhang zwischen frakturbedingten Schmerzen und der Änderung der Kraftverteilung wird hierbei in Betracht gezogen (Neumann 2019).

Die Erfassung der Kraftverteilung ergänzt die Handkraftmessung um wichtige Aspekte der Handfunktion (Neumann 2019; Garkisch et al. 2021). Über die Entwicklung der Kraftverteilung beim Greifen nach distaler Radiusfraktur und die Einflussfaktoren ist bisher wenig bekannt. Daher kann die Erfassung der

Kraftverteilung im Verlauf des ersten Jahres nach distaler Radiusfraktur und eine Bewertung im Zusammenhang mit der Handfunktion dazu beitragen, die Bedeutung der Kraftverteilungsmessung besser zu beurteilen.

2 Ziel der Arbeit

Die motorischen Fähigkeiten der Hände beruhen auf dem fein abgestimmten Zusammenspiel von Gelenken, Bändern und Muskeln. Diese Fähigkeiten werden durch eine distale Radiusfraktur beeinträchtigt. Dies betrifft nicht nur die Beweglichkeit im Handgelenksbereich, auch die Beweglichkeit der Finger ist eingeschränkt, die Griffkraft vermindert und das Griffmuster verändert.

Behandlungsergebnisse distaler Radiusfrakturen werden bevorzugt über Fragebögen zu den subjektiven Beschwerden und durch Messung der objektiven Parameter der Handfunktion, vor allem der Handkraft und Handbeweglichkeit, erfasst.

Ziel dieser Arbeit war es, 3, 6 und 12 Monate nach distaler Radiusfraktur die Handkraft und ihre Verteilung auf die Fingerstrahlen, den Thenar und Hypothenar durch orts aufgelöste Handkraftmessung auf der betroffenen und gesunden Seite mit dem Manugraphie-System zu erfassen. Die gesunde Hand sollte als Referenz für die betroffene Seite dienen. Zur Bestimmung des objektiven Funktionsstatus sollten auch die Handbeweglichkeit im Handgelenk, die Handspanne und eine pathologische Handsteifigkeit beider Hände erfasst werden. Die subjektiv berichteten Beschwerden sollten über den QuickDASH-Fragebogen erhoben werden.

Es sollte geprüft werden, ob die zum Zeitpunkt 9 Wochen nach distaler Radiusfraktur bereits beschriebenen Veränderungen der Kraftverteilung auch im weiteren Verlauf erkennbar sind und, ob Korrelationen zwischen der Kraftverteilung und der Hand- und Fingerbeweglichkeit bestehen.

Es wurden die Hypothesen aufgestellt, dass sich die Veränderungen der Kraftverteilung im Verlauf eines Jahres wieder der gesunden Seite annähern und sie mit einer verminderten Hand- und Fingerbeweglichkeit korrelieren.

Die Hand- und Fingerbeweglichkeit sowie die Handkraft sollten des Weiteren auf Korrelationen miteinander und mit dem QuickDASH-Score geprüft werden.

3 Material und Methoden

3.1 Studiendesign

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem funktionellen Outcome und insbesondere der Entwicklung der Handkraft nach operativer Versorgung einer distalen Radiusfraktur. Die Studie wurde der Ethikkommission der Universität Rostock angezeigt und in Übereinstimmung mit der Deklaration von Helsinki durchgeführt.

Patienten, die zwischen November 2012 und September 2013 aufgrund einer distalen Radiusfraktur in der Abteilung für Unfall-, Hand- und Wiederherstellungschirurgie operativ versorgt wurden, wurden anhand der kodierten Prozeduren und Diagnosen identifiziert, bis 12 Wochen nach Osteosynthese telefonisch kontaktiert und zur Studienteilnahme eingeladen. Dabei galten die folgenden Ein- und Ausschlusskriterien:

Einschlusskriterien:

- Operativ versorgte unilaterale distale Radiusfraktur
- Alter zum Zeitpunkt der Fraktur ≥ 18 Jahre
- Selbstständige Vorstellung der Patienten zur Nachuntersuchung möglich

Ausschlusskriterien:

- Begleitende knöcherner Verletzung am selben oder kontralateralen Arm
- Erneute Osteosynthese bei Dislokation oder fehlender Frakturheilung
- Distale Radiusfraktur während der letzten vier Jahre vor aktueller Fraktur
- Neurologische Störungen mit Beeinträchtigungen der Handfunktion
- Kognitive Einschränkungen mit reduzierter Selbstständigkeit
- Schwere Begleiterkrankungen (u.a. Krebserkrankungen)

Die Studienuntersuchungen erfolgten, mit einer Toleranz von 4 Wochen, 3, 6 und 12 Monate nach operativer Versorgung. Das operative Vorgehen, Befunde der Röntgenuntersuchungen und Informationen zu Vorerkrankungen wurden aus den Patientenakten übernommen.

Das Studienprotokoll ist schematisch in Abbildung 2 dargestellt.

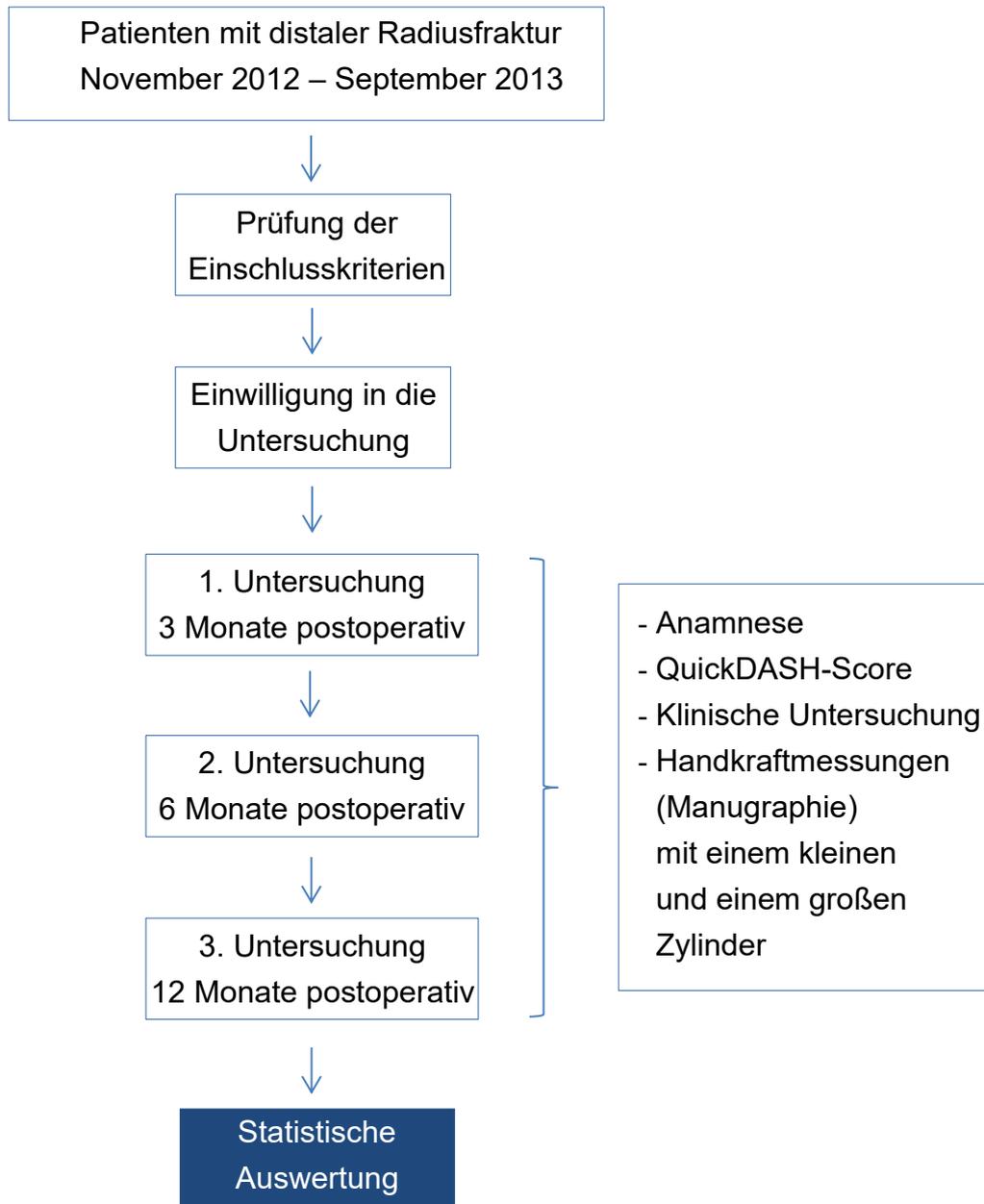


Abb. 2: Schematische Darstellung des Studienprotokolls

3.2 Anamnese und Klinische Untersuchungen

Zu jeder Studienvisite wurden bestehende Einschränkungen und Beschwerden im Zusammenhang mit der distalen Radiusfraktur sowie diesbezügliche Veränderungen erfragt.

Darüber hinaus wurde ein standardisierter Fragebogen (QuickDASH) mit den Patienten ausgefüllt, der die angegebenen Beschwerden und Einschränkungen nach Arm, Schulter und Handverletzungen standardisiert in ein Punktsystem, mit Werten von 0 (keine Beschwerden) bis 100 (schlimmste Beschwerden), überführt (Beaton et al. 2005; Institute for Work & Health, Canada 2020).

Der Bewegungsumfang des Handgelenkes (Extension, Flexion, Radial- und Ulnarduktion), der Finger und des Daumens wurde auf beiden Seiten mit einem Goniometer erfasst.

Die Handspanne, definiert als die größte Distanz zwischen Daumen- und Kleinfingerspitze bei maximaler Spreizung der Hand, sowie die Abstände zwischen den Spitzen von Zeige-, Mittel-, Ring- und kleinem Finger zur Hohlhandfalte wurden mit einem speziellen Lineal (ohne Überstand) gemessen (Abb. 3 A und B).

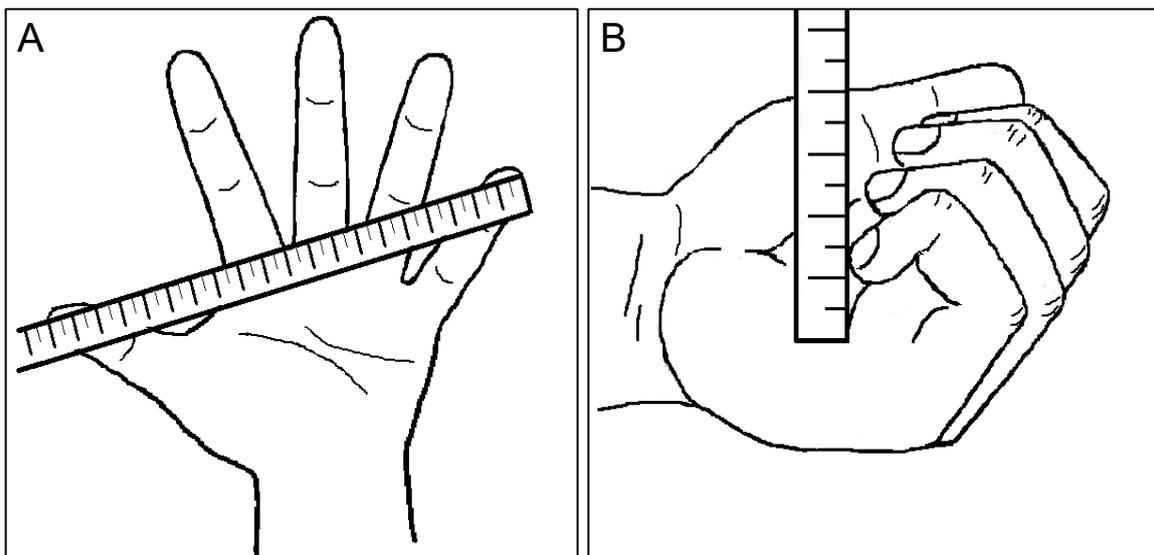


Abb. 3 A und B: Messung der Handspanne (A) und des Fingerkuppen-Hohlhandabstandes (B).

Mit freundlicher Genehmigung modifiziert nach: Messblatt obere Gliedmaßen – F4222 - der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (2017).

3.3 Handkraftmessungen mit dem Manugraphie-System

Mit dem Manugraphie®-System (Novel GmbH, München/Deutschland) wurde die Kraft beim standardisierten Greifen von zwei sensorbeschichteten Zylindern mit einem Umfang von 150 und 200 mm zeit- und orts aufgelöst erfasst. Die Handkraftmessungen wurden in Anlehnung an bereits publizierte Studien durchgeführt (Mühldorfer-Fodor et al. 2014; Mühldorfer-Fodor et al. 2017).

Dazu nahmen die Probanden auf einem Stuhl in aufrechter Position und ohne Kontakt zur Rückenlehne Platz. Der Zylinder wurde mit der Längsachse senkrecht zum Boden und dem im Ellenbogengelenk um 90 ° gebeugten und anliegenden Arm gehalten (Abb. 4). Eine leichte Dorsalextension im Handgelenk bis zu einem Winkel von 30 ° wurde toleriert (Mathiowetz 1990b; Innes 1999; Li 2002; Schectman et al. 2015; Lee und Sechachalam 2016).



Abb. 4: Messposition beim Greifen des großen Zylinders (200 mm Umfang). Im Hintergrund auf dem Schrank liegt der kleine Zylinder (150 mm Umfang).

Weiterhin wurde darauf geachtet, dass die Handoberfläche die Sensormatte gleichmäßig berührte und die Naht der Sensorfolie zwischen Daumen- und Zeigefingerspitze lag. Wenn Daumen und Zeigefinger sich überlagerten, wurde der

Zylinder so gedreht, dass nur der Daumen über der Naht lag. Dies war nur bei Messungen mit dem 150 mm im Umfang messenden Zylinder notwendig.

Vor jeder Messung wurde das System kalibriert. Alle Messungen wurden mit dem kleinen Zylinder (150 mm Umfang) und jeweils der rechten Hand begonnen. Die Patienten wurden gebeten, den Zylinder für 5 Sekunden mit maximaler Kraft zu drücken und anschließend locker zu halten. Diese Untersuchungssequenz wurde im Abstand von 10 Sekunden insgesamt dreimal wiederholt (Mathiowetz et al. 1984; Hamilton et al. 1994; MacDermid et al. 1994). Vor der Messung mit dem großen Zylinder (200 mm Umfang) bestand eine Pause von mehreren Minuten (Trossman und Li 1989; Mathiowetz 1990a).

Die verwendete Software (Pliance®, Novel AG, München/Deutschland) erlaubt bereits während der Messung die graphische und numerische Darstellung der aufbrachten Kräfte. Für die weitere Auswertung wurden vom fünfsekündigen Anspannungsintervall die mittleren drei Sekunden mit dem Programm Cycles (Pliance®, Novel AG, München/Deutschland) ausgewählt und gemittelt (Imrhan 2006). Alle Daten, die an der verletzten Hand erhoben wurden, wurden auf die Ergebnisse der gesunden Seite normiert.

3.4 Getrennte Auswertung einzelner Handareale

Mit dem Programm MultiMask (Pliance®, Novel AG, München/Deutschland) wurden den Fingern sowie Thenar und Hypothenar, anhand von anatomischen Merkmalen, die während des Greifens von diesen Handregionen belasteten Sensorareale zugewiesen. Dafür wurden die Begrenzungen, bzw. Masken für jedes Areal eingezeichnet. Jedes auf diese Weise markierte Areal konnte separat ausgewertet werden. Die Metacarpophalangealgelenke wurden hierbei den Fingern zugeordnet. Die Areale für Daumen, Zeigefinger, Mittelfinger, Ringfinger und kleinem Finger einschließlich der zugehörigen Metacarpophalangealgelenke werden im Folgenden auch als Fingerstrahlen 1 – 5 bezeichnet. Weiterhin wurden für Thenar und Hypothenar jeweils die angrenzenden Bereiche der Handinnenfläche miteinbezogen, so dass die gesamte Handinnenfläche lückenlos den verschiedenen Arealen zugeordnet war.

Eine exemplarische Markierung der sieben zu differenzierenden Handareale findet sich in Abbildung 5.

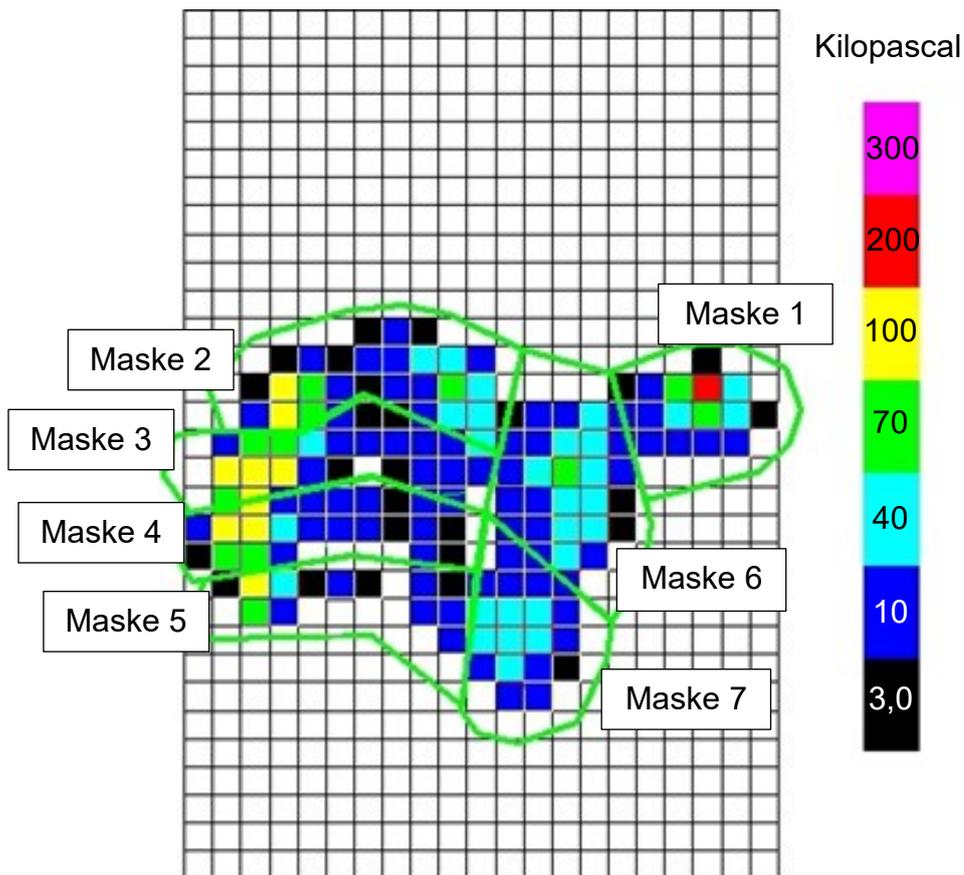


Abb. 5: Mit dem MaskEditor markierte Handareale einer linken Hand.
 Maske 1: Daumen, Maske 2: Zeigefinger, Maske 3: Mittelfinger, Maske 4: Ringfinger, Maske 5: Kleiner Finger, Maske 6: Thenar, Maske 7: Hypothenar.

3.5 Statistische Auswertung

Die Studienergebnisse wurden in Tabellen gespeichert (Calc, LibreOffice Suite Versionen 6.4 und 7.1, The Document Foundation, Berlin/Deutschland; Excel, Microsoft Office-Suite 2010 Microsoft, Washington/USA). Die statistische Auswertung und graphische Darstellung erfolgten mit den Programmen GraphPad Prism (Versionen 9.0.2 bis 9.3.1 GraphPad Software, Kalifornien/USA) Calc und Draw, LibreOffice-Suite (Versionen 6.4 und 7.1 The Document Foundation, Berlin/Deutschland). Zur Bearbeitung von Bildern wurden Inkscape (Version 1.0.2-2, GNU lizenzierte Open Source Software, www.inkscape.org) und Paint (Version unter Windows 7 von Microsoft, Washington/USA) eingesetzt. Die Literaturverweise wurden mit Zotero verwaltet (Versionen 5.0 bis 6.0.8, Corporation for Digital Scholarship, Virginia/USA).

Die Normalverteilung der Daten wurde mit dem Shapiro-Wilk-Test geprüft. Für normalverteilte Daten werden Mittelwert \pm Standardabweichung angegeben, bei nicht-normal verteilten Daten sind es Median und Range (Minimum - Maximum). Unterschiede zwischen abhängigen Variablen wurden mit dem Wilcoxon-Test (gepaarte Proben) bzw. Friedmann-Test (longitudinale Veränderungen) auf Signifikanz geprüft. Gruppenvergleiche erfolgten hierbei mit dem Mann-Whitney-U-Test. Korrelationskoeffizienten wurden nach Spearman-Rank berechnet und sind ab einem Wert von 0,4, bzw. unter -0,4 angegeben. Alle Signifikanztests waren zweiseitig, das Signifikanz-Niveau wurde auf $p < 0,05$ festgelegt.

4 Ergebnisse

4.1 Probanden

Die Auswahl der Patienten ist in Abbildung 6 dargestellt und die Charakteristika der Patienten mit vollständiger Teilnahme sind in Tabelle 2 aufgeführt.

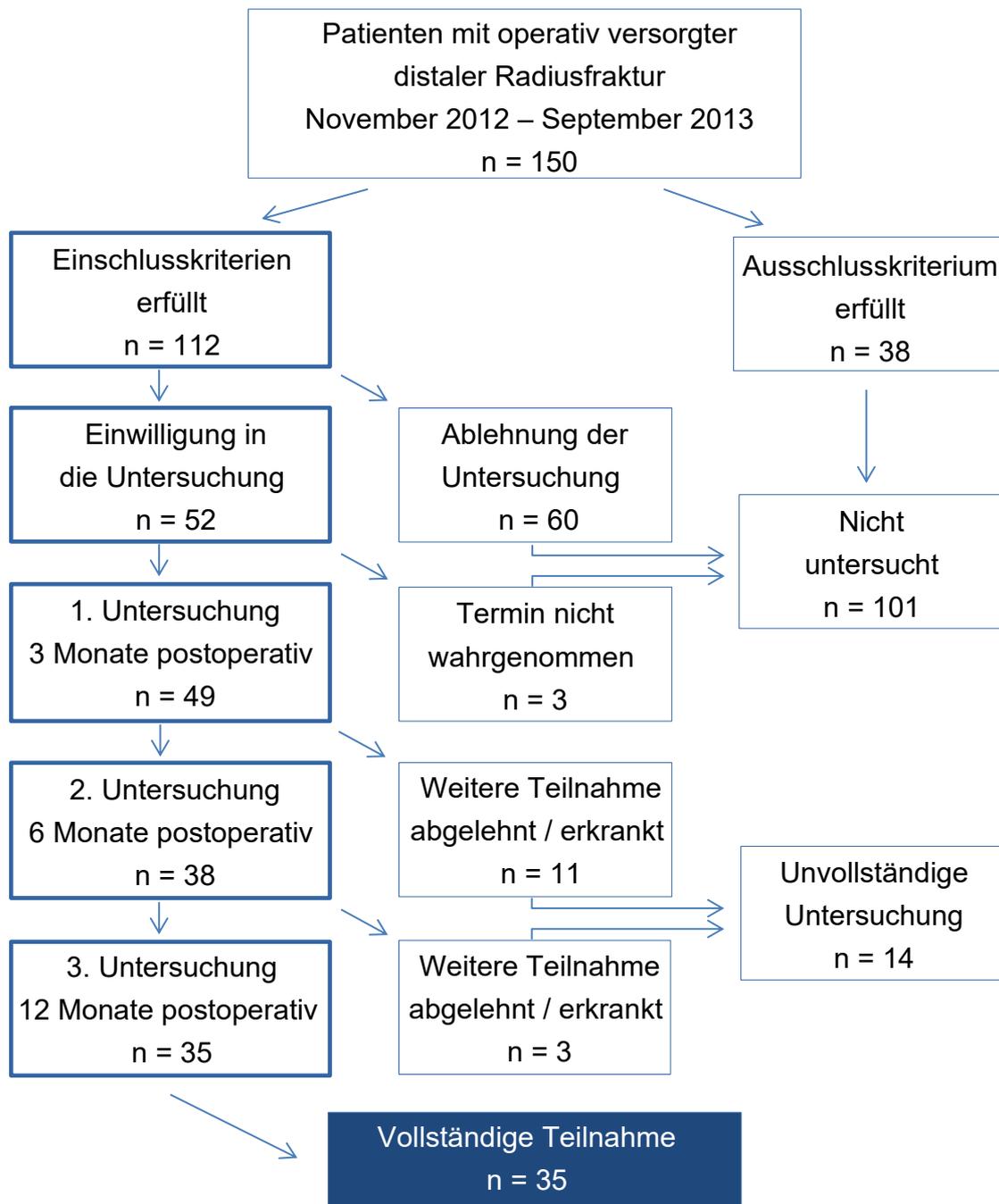


Abb. 6: Aufteilung der Patienten in Bezug auf Ein- und Ausschlusskriterien, Einwilligung und Teilnahme

Tab. 2: Patientencharakteristika

Geschlecht (Frauen / Männer)	30 / 5
Alter (Jahre)	60,3 (26,5 - 79,0)
- Frauen	61,8 (40,8 - 79,0)
- Männer	32,7 (26,5 - 60,3)
Größe (cm)	164 (154 - 194)
- Frauen	163,5 (154 - 179)
- Männer	181 (177 - 194)
BMI (kg/m ²)	25,0 (20,3 - 35,0)
- Frauen	24,8 (20,3 - 35,0)
- Männer	25,2 (21,4 - 29,3)
Dominante Hand (beide / links / rechts)	1 / 2 / 32
Frakturseite (rechts/links)	18 / 17
Klassifikation (nach AO/OTA A/B/C)	23 / 2 / 10
Plattenosteosynthese */ Radiusnagel	32 / 3
Fixateur externe (überbrückend)	1
Unfallart Sturz / Rasantrauma	29 / 6
Redislokation (keine erneute Operation)	1
Metallentfernung innerhalb von 12 Monaten	5
Karpaltunnelsyndrom / Dupuytren-Kontraktur	1 / 1
Sensorisches Defizit nach 12 Monaten	3
Vorbekannte Osteoporose	10
Rheumatoide Arthritis / Fingergelenksarthrose	1 / 4
Vorausgegangene distale Radiusfraktur vor mehr als 4 Jahren (gleiche/andere Seite)	3 / 2
Diabetes mellitus / Hypertonie	3 / 12

* winkelstabile volare Plattenosteosynthese (n = 30), dorsale Plattenosteosynthese (n = 2)

Für Alter, Größe und Body-Mass-Index (BMI) sind Median (Minimum – Maximum) angegeben.

4.2 Erfassung der Finger- und Handbeweglichkeit

4.2.1 Bewegungsumfang im Handgelenk

Der Bewegungsumfang zeigte sich 3 Monate nach Fraktur in allen vier Bewegungsrichtungen erkennbar eingeschränkt, besserte sich im Verlauf aber stetig. 12 Monate nach dem Frakturereignis lagen bei Flexion und Extension noch leichte Einschränkungen vor, Radial- und Ulnarduktion hatten die Werte der gesunden Seite erreicht (Tab. 3).

Tab. 3: Medianer Bewegungsumfang relativ zur gesunden Seite

	t ₃	t ₆	t ₁₂
Flexion	73,3 ^{a, b} (20,0 - 100)	84,6 ^a (47,1 - 100)	92,0 ^b (50,0 - 108)
Extension	84,6 ^{c, d} (27,3 - 100)	92,9 ^c (50,0 - 100)	92,6 ^d (54,5 - 157)
Radialduktion	80,0 ^e (16,7 - 150)	100,0 ^f (50,0 - 133)	100,0 ^{e, f} (50,0 - 167)
Ulnarduktion	87,5 ^g (30,0 - 138)	88,9 ^h (33,3 - 143)	100,0 ^{g, h} (62,5 - 200)

Wilcoxon-Test: ^{a - h} $p < 0,05$

4.2.2 Fingerkuppen-Hohlhandabstand (Handsteifigkeit)

Im Verlauf war bei insgesamt 11 Untersuchungsteilnehmern auf der Frakturseite zu mindestens einem Zeitpunkt ein Fingerkuppen-Hohlhandabstand von mindestens 1 cm messbar, nach 3 Monaten bei 10 Patienten, nach 6 Monaten bei 5 Patienten und nach 12 Monaten bei 6 Patienten. Nach 3 Monaten betrug die maximale Summe aller Abstände 10 cm, nach 6 Monaten 8 cm und nach 12 Monaten 6 cm. Bei einem Untersuchungsteilnehmer zeigte sich erst nach 6 Monaten zum ersten Mal ein Fingerkuppen-Hohlhandabstand von mindestens 1 cm auf der betroffenen Seite.

Bei vier Untersuchungsteilnehmern mit einer Differenz von mindestens 1 cm zwischen einer Fingerkuppe und der Hohlhandfalte auf der betroffenen Seite

war auch auf der gesunden Seite ein Abstand von mindestens 1 cm messbar, davon nur bei einem von mehr als 1 cm. Die maximale Summe lag nach 3 und 6 Monaten bei 5 cm und nach 12 Monaten bei 6 cm.

In einem Fall zeigte sich nach 6 und 12 Monaten auf der gesunden Seite für eine Fingerkuppe ein Abstand von 1 und 2 cm zur Hohlhandfalte, auf der betroffenen Seite bestand hingegen zu keinem Zeitpunkt ein pathologischer Fingerkuppen-Hohlhand-Abstand.

4.2.3 Handspanne zwischen Daumen- und Kleinfingerkuppe

Die medianen Differenzen der Handspannen von betroffener und gesunder Seite nach 3, 6 und 12 Monaten sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tab. 4: Maximaler Abstand zwischen Daumen- und Kleinfingerkuppe auf der betroffenen Seite als Differenz von der gesunden Seite (in cm)

t_3	t_6	t_{12}
Median (Min. – Max.)		
-0,5	-0,5	-0,5
(-3 - 0,5)	(-2 - 1,5)	(-1,5 - 0,5)

Die Handspanne war auf der betroffenen Seite nach 3 Monaten bei 3 Patienten nach 6 Monaten bei 5 Patienten und nach 12 Monaten bei 4 Patienten größer als auf der gesunden Seite.

4.3 Auswertung des QuickDASH-Fragebogens

Der QuickDASH-Score nahm im Verlauf kontinuierlich und signifikant ab (Abb. 7).

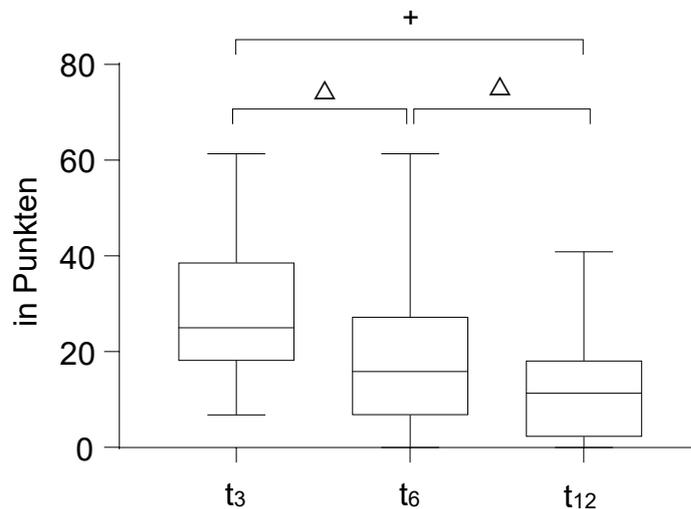


Abb. 7: Longitudinale Veränderungen des QuickDASH-Scores.
Wilcoxon-Test: +, Δ $p < 0,0001$

4.4 Ergebnisse der Handkraftmessungen

Die Handkraft beim Faustschluss wurde mit zwei Zylindern mit einem Umfang von 150 mm und 200 mm gemessen. Für beide Zylinder sind die Ergebnisse vergleichbar und bilden die longitudinalen Veränderungen übereinstimmend ab, wobei die Werte für die absolute Kraft bei Messungen mit dem großen Zylinder jeweils niedriger waren.

Da Messungen mit dem kleineren Zylinder (150 mm Umfang) eine bessere Differenzierung der Handkraft und Kraftverteilung zeigten, werden im Folgenden nur diese Ergebnisse dargelegt. Die mit dem großen Zylinder erzielten Ergebnisse finden sich im Anhang.

Die absolute Handkraft nahm auf der betroffenen Seite im Verlauf signifikant zu, war aber auch nach 12 Monaten noch immer signifikant geringer als auf der gesunden Seite. Die Kraft auf der gesunden Seite blieb unverändert (Tab. 5).

Tab. 5: Die absolute Handkraft in Newton [N] auf der betroffenen und gesunden Seite im Verlauf

	t ₃	t ₆	t ₁₂
	Median (Min. – Max.)		
Betroffene Seite	155 ^{a, c} (55,0 - 572)	194 ^{a, b, d} (51,3 - 756)	226 ^b (93,8 - 666)
Gesunde Seite	241 ^c (115 - 712)	245 ^d (74,1 - 739)	242 (111 - 665)

Wilcoxon-Test: ^{a - d} p < 0,01

Die auf die gesunde Seite normierte Handkraft (relative Handkraft) lag nach 3 Monaten bei 65,9 % (Min. - Max.: 17,8 – 127), nach 6 Monaten bei 78,5 % (Min. - Max.: 39,7 – 133) und nach 12 Monaten bei 93,8 % (Min. - Max.: 63,9 – 130). Die Veränderung der auf die gesunden Seite normierten Kraft war über den gesamten Zeitraum betrachtet signifikant (p < 0,0001).

4.4.1 Auswertung der Kraftverteilung beim Greifen des Messzylinders

Signifikante Abweichungen von der Kraftverteilung der gesunden Seite zeigten sich für den 1., 2. und 4. Fingerstrahl, Thenar und Hypothenar (Abb. 8 A – E). Für den 2. und 5. Fingerstrahl ergaben sich weder zwischen zwei Untersuchungszeitpunkten noch im Seitenvergleich signifikante Unterschiede.

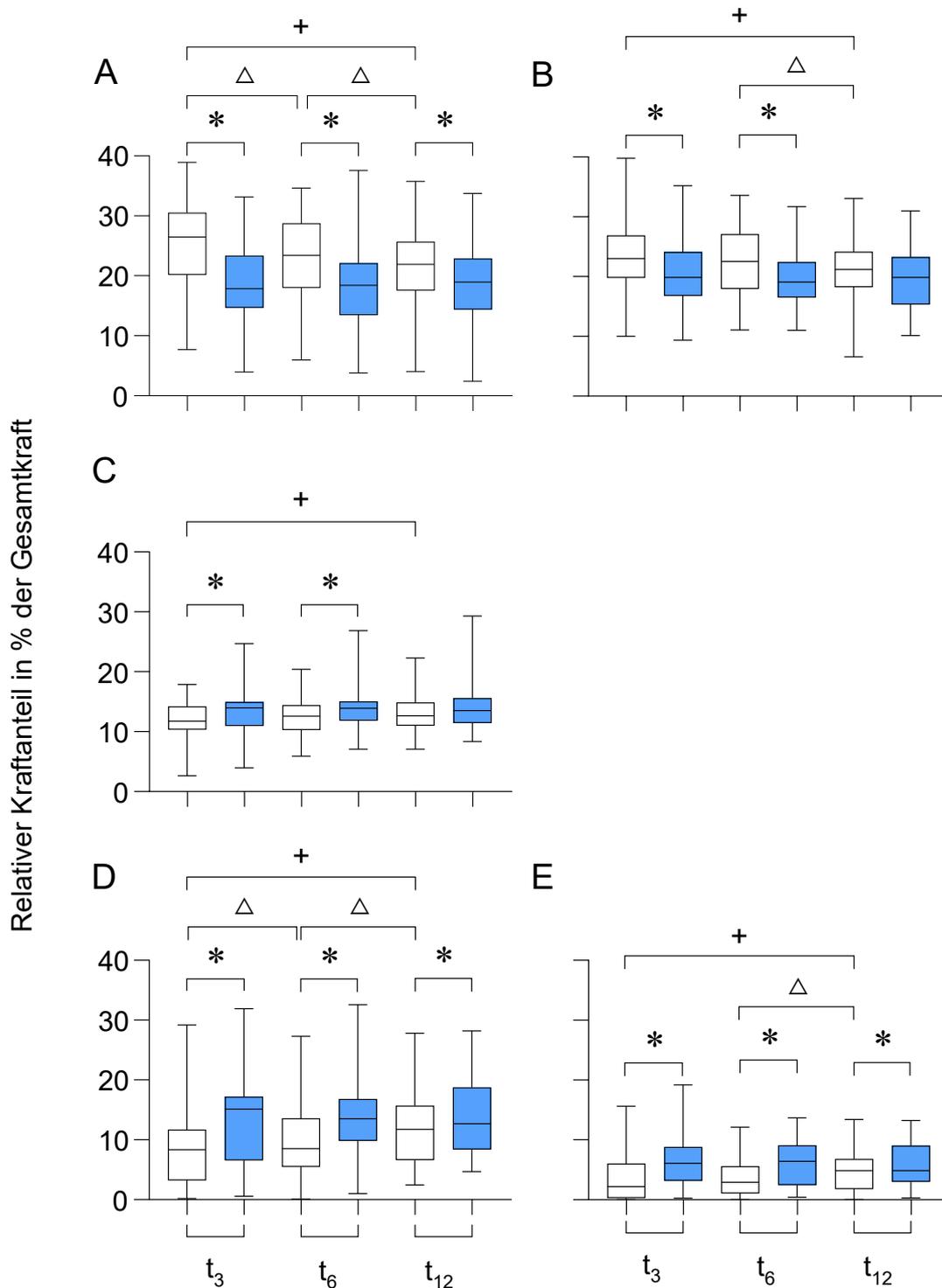


Abb. 8 A - E: Darstellung des relativen Kraftanteiles an der Gesamtkraft.
 A: 1. Fingerstrahl, B: 2. Fingerstrahl, C: 4. Fingerstrahl, D: Thenar,
 E: Hypothenar

□ Betroffene Seite ■ Gesunde Seite

Wilcoxon-Test: +, Δ, * p < 0,05

4.4.2 Unterscheidung nach Händigkeit

Für 17 Patienten mit einer Fraktur auf der dominanten Seite ist die absolute Kraft der betroffenen und gesunden Seite in Abbildung 9 A und für 18 Patienten mit Fraktur auf der nicht dominanten Seite in Abbildung 9 B dargestellt.

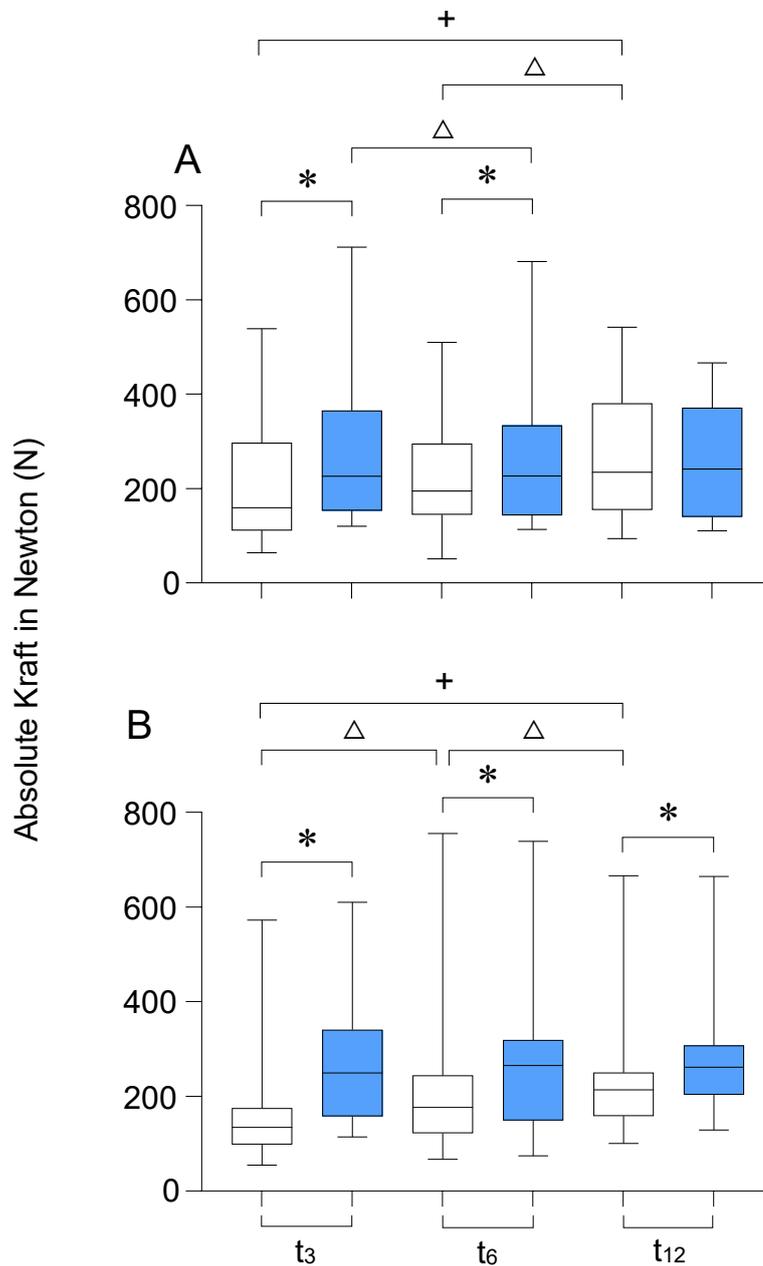


Abb. 9 A und B: Darstellung der absoluten Kraft bei Fraktur auf der dominanten (A) oder nicht dominanten Seite (B).

□ Betroffene Seite ■ Gesunde Seite

Wilcoxon-Test: +, Δ, * p < 0,05

Die auf die gesunde Seite normierte Handkraft unterschied sich zwischen beiden Gruppen nach 12 Monaten signifikant ($p < 0,05$).

In Abbildung 10 A – D ist für beide Patientengruppen der auf die gesunde Seite normierte Kraftanteil an der Gesamtkraft für die Areale mit signifikanten Veränderungen aufgeführt.

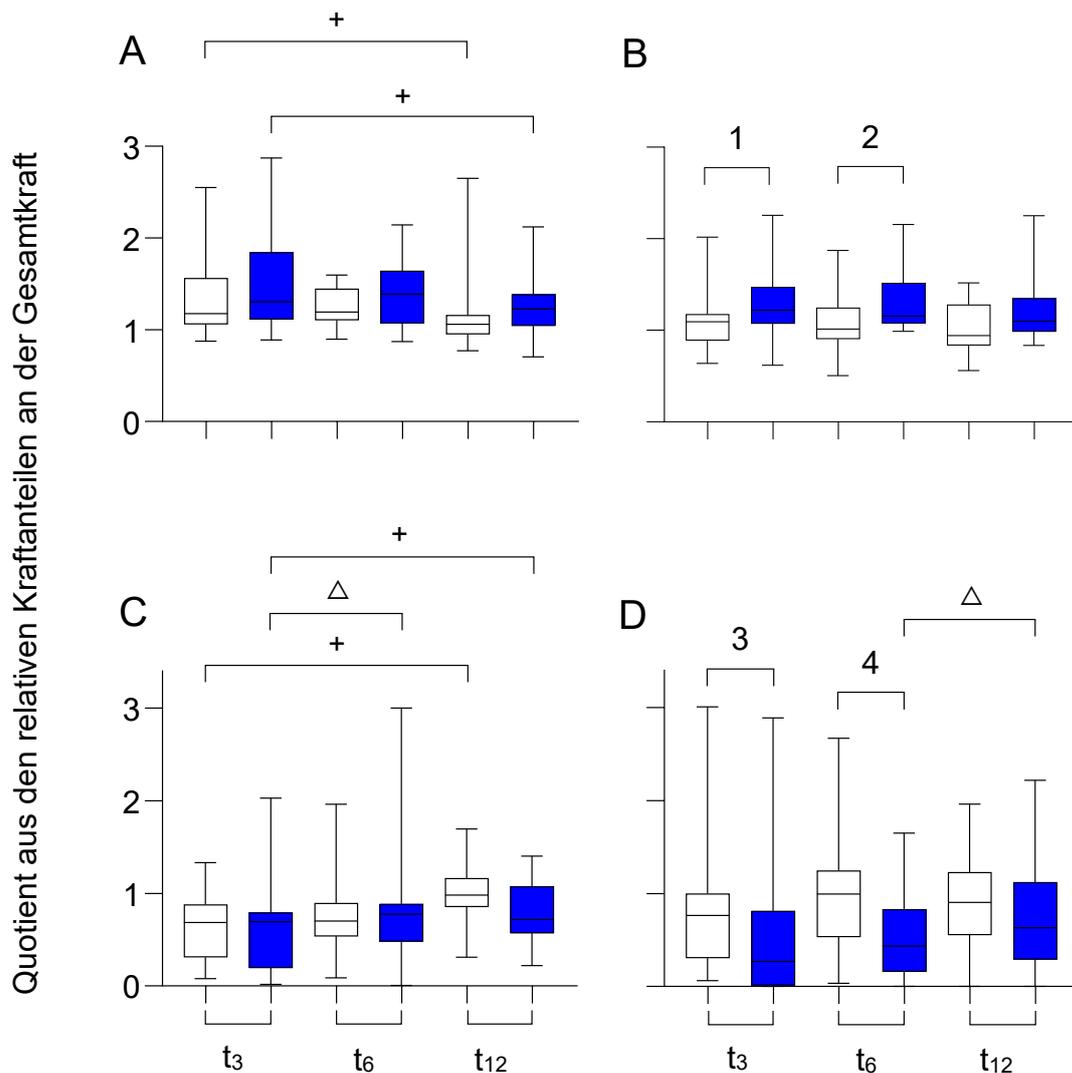


Abb. 10 A - D: Nach Händigkeit differenzierte Darstellung der Quotienten aus den auf die gesunde Seite normierten Kraftanteilen von betroffener und gesunder Hand für die Areale mit signifikanten Differenzen.

A: 1. Fingerstrahl, B: 2. Fingerstrahl, C: Thenar, D: Hypothenar

□ Dominante Seite ■ Nicht dominante Seite

Wilcoxon-Test: +, Δ $p < 0,05$

Mann-Whitney-U-Test: 1-4 $p < 0,05$

4.5 Korrelationsanalysen

Der Bewegungsumfang im Handgelenk wurde mit dem Alter, dem QuickDASH-Score und der Handkraft korreliert.

Der Extensionswinkel der betroffenen Seite korrelierte nach 12 Monaten negativ mit dem Alter ($r = -0,55$; $p < 0,05$). Der Extensionswinkel der gesunden Seite korrelierte nach 6 und 12 Monaten negativ mit dem Alter (jeweils $r = -0,43$; $p < 0,05$).

Der QuickDASH-Score korrelierte nach 3 Monaten negativ mit den auf die gesunde Seite normierten Werten für Ulnardeviation ($r = -0,50$; $p < 0,05$) sowie nach 6 Monaten negativ mit den auf die gesunde Seite normierten Werten für Extension ($r = -0,74$; $p < 0,05$), Flexion ($r = -0,45$; $p < 0,05$) und Ulnardeviation ($r = -0,47$; $p < 0,05$).

Die auf die gesunde Seite normierten Werte für Kraft und Flexion korrelierten nach 3 Monaten positiv ($r = 0,50$; $p < 0,05$). Nach 6 Monaten ergaben sich zwischen den auf die gesunde Seite normierten Werten für Kraft und Extension ($r = 0,50$; $p < 0,05$) sowie Ulnardeviation ($r = 0,42$; $p < 0,05$) signifikante Korrelationen.

Im Weiteren wurden der QuickDASH-Score und die Handkraft auf der betroffenen Seite auf Korrelationen geprüft. Darüber hinaus wurden beide Größen mit dem Alter, einer reduzierten Handspanne und einem erhöhten Fingerkuppen-Hohlhandabstand (Handsteifigkeit) korreliert (Tab. 6).

Tab. 6: Signifikante Korrelationen zwischen Handkraft, Alter, QuickDASH-Wert, Handspanne und Handsteifigkeit

		Alter	Quick-DASH-Wert	Handspanne	Handsteifigkeit
	Quick-DASH-Score			r = -0,56	r = 0,41
t₃	Absolute Kraft - betroffene Seite	r = -0,41	r = -0,68	r = 0,54	r = -0,53
	Relative Kraft		r = -0,61	r = 0,61	r = -0,44
	Quick-DASH-Score	r = 0,47			
t₆	Absolute Kraft - betroffene Seite	r = -0,55	r = -0,61		r = -0,51
	Relative Kraft		r = -0,60		
	Quick-DASH-Score	r = 0,49			
t₁₂	Absolute Kraft - betroffene Seite	r = -0,62	r = -0,62		r = -0,57

Für die in dieser Tabelle aufgeführten Korrelationen gilt jeweils $p < 0,05$

Die Handkraft auf der gesunden Seite korrelierte zu allen Untersuchungszeitpunkten negativ mit dem Alter ($r < -0,50$; $p < 0,05$).

Für die Hand- und Fingerbeweglichkeit, Extension, Flexion, Radial- und Ulnar- duktion sowie die Handspanne und den Fingerkuppen-Hohlhandabstand auf der betroffenen Seite ergaben sich signifikante Korrelationen mit den auf die gesunde Seite normierten, relativen Kraftanteilen einzelner Areale (Tab. 7).

Tab. 7: Signifikante Korrelationen zwischen der Kraftverteilung sowie Finger- und Handbeweglichkeit

		Flexion	Radial- duktion	Ulnar- duktion	Hand- spanne	Hand- steifigkeit
t₃	1. Fingerstrahl	r = -0,58			r = -0,45	
	Thenar	r = 0,47			r = 0,53	
t₆	1. Fingerstrahl	r = -0,44				
	Thenar	r = 0,51			r = 0,48	
t₁₂	1. Fingerstrahl		r = 0,46			
	2. Fingerstrahl			r = 0,58		
	Thenar	r = -0,44				
	Hypothenar					r = -0,40

Für die in dieser Tabelle aufgeführten Korrelationen gilt jeweils $p < 0,05$

Zwischen Extension und der Kraftverteilung ergab sich keine Korrelation mit einem Spearman-Korrelationskoeffizienten $> 0,4$ bzw. $< -0,4$.

5 Diskussion

Durch orts aufgelöste Handkraftmessung konnte gezeigt werden, dass es nach distaler Radiusfraktur zu einer relativen Mehrbelastung der ersten beiden Fingerstrahlen auf der betroffenen Seite kommt. Der Thenar und auch der Hypothenar wurden im Vergleich zur gesunden Seite weniger belastet. Die Kraftverteilung näherte sich innerhalb eines Jahres wieder der gesunden Seite an. Zwischen dieser Änderung der Kraftverteilung und der nach distaler Radiusfraktur verminderten Hand- und Fingerbeweglichkeit ließen sich statistisch signifikante Korrelationen feststellen. Es ist somit anzunehmen, dass die veränderte Kraftverteilung auch Ausdruck der beeinträchtigten Handfunktion ist.

5.1 Verteilungsmuster der Griffkraft nach distaler Radiusfraktur

Auf der Seite der distalen Radiusfraktur wurde die relative Kraftzunahme im Bereich von Daumen und Zeigefinger nicht erwartet. Vielmehr wurde mit einer Verlagerung der Kraftverteilung auf die ulnare Seite gerechnet, da eine Kraftübertragung über die unverletzte ulnare Säule weniger Schmerzen verursacht (Wichelhaus et al. 2012).

Daumen und Zeigefinger sind für die Mehrheit der Greifbewegungen im Alltag essentiell (Sperling und Jacobson-Sollerman 1977; Sollerman 1980; Ejeskär und Örtengren 1981; Sollerman und Ejeskär 1995; Saudabayev et al. 2018). Es ist zu vermuten, dass diese Greifbewegungen auch nach distaler Radiusfraktur bevorzugt geübt werden und daher die radialeseitig gelegenen Fingerstrahlen nachfolgend einen größeren Anteil zur Handkraft beitragen.

Die im Vergleich zur gesunden Seite stärkere Belastung der ersten beiden Fingerstrahlen nach distaler Radiusfraktur findet eine Parallele im Verhältnis zwischen der Kraft beim Pinzettengriff und der Kraft beim Faustschluss. Im Vergleich zur gesunden Hand war die Kraft beim Faustschluss stärker vermindert als die Kraft des Pinzettengriffes (Chung et al. 2006; Synn et al. 2009; Wei et al. 2009).

Es ist anzunehmen, dass die frakturbedingten Entzündungsprozesse die für den Pinzettengriff wichtige intrinsische Handmuskulatur weniger beeinträchtigen (Kozin et al. 1999; Slutsky und Herman 2005; Hohmann et al. 2017). Die Gewebeverletzungen im Rahmen der Fraktur und auch eingebrachtes Osteosyn-

thesematerial können die Ausschüttung von Histamin und Prostaglandinen stimulieren und sekundär die Handfunktion beeinträchtigen (Slutsky und Herman 2005). Über eine erhöhte Gefäßpermeabilität kommt es zur Ausbildung eines proteinreichen Ödems und durch die Umwandlung des enthaltenen Fibrinogens in Fibrin-Netzwerke wird im weiteren Verlauf die Adhäsionsentstehung begünstigt. Zusätzlich kann ein auftretendes Hämatom die Gleitfilmbildung reduzieren (Slutsky und Herman 2005). Durch ihre anatomische Nähe zur Fraktur ist insbesondere die Gleitfähigkeit der langen Sehnen der Unterarmmuskeln betroffen (Slutsky und Herman 2005).

Ein Einfluss des knöchernen Verletzungsmusters auf die Differenz zwischen der auf die gesunde Seite normierten Kraft des Pinzettengriffes und des Faustschlusses wurde bisher nicht gezielt untersucht. Eine Gegenüberstellung distaler Radiusfrakturen mit und ohne Beteiligung der Fossa lunata erbrachte jedoch keinen Unterschied in Bezug auf die Kraft beim Faustschluss (Zhang et al. 2017; Yan et al. 2019).

Ein Einfluss von Schmerzen auf die Kraftverteilung nach distaler Radiusfraktur ist anzunehmen (Neumann 2019). Beim Greifen oder anderen Belastungen der Handfläche sind Schmerzen vor allem in den ersten Monaten besonders ausgeprägt und nehmen über das gesamte erste Jahr kontinuierlich ab (MacDermid et al. 2003). Insbesondere für Thenar und Hypothenar sind durch die Nähe zum Handgelenk und damit dem Frakturbereich Schmerzen als Ursache für die geringere Belastung anzunehmen.

Auch ein Zusammenhang zwischen der Belastung des Thenars und Hypothenars und der Fähigkeit, einen Zylinder gut und eng zu umgreifen ist naheliegend. Für den Thenar zeigten sich nach 3 Monaten Korrelationen mit der Hand- und Fingerbeweglichkeit. Es ist somit anzunehmen, dass eine verminderte Hand- und Fingerbeweglichkeit eine flexible Anpassung, vor allem des Thenars, an das zu greifende Objekt erschweren.

Eine verminderte Belastung des Thenars und eine durchschnittliche Mehrbelastung von erstem und zweitem Fingerstrahl wurden ca. 9 Wochen nach operativer Versorgung distaler Radiusfrakturen bereits berichtet (Neumann 2019). Der relative Kraftanteil des Hypothenars auf der betroffenen Seite war bei 25 untersuchten Patienten hingegen kaum verändert (Neumann 2019). Möglicherweise sind diese divergenten Befunde darauf zurückzuführen, dass die Belastung des Hypothenars drei bis vier Monate nach distaler Radiusfraktur am geringsten ist. Denkbar ist zudem ein Zusammenhang mit dem Alter, welches in dieser Arbeit 60 Jahre und in der Arbeit von Neumann 67 Jahre betrug (Neumann 2019). In

diesem Zusammenhang ist eine altersbedingt verminderte Handbeweglichkeit und damit einhergehend eine geringere Belastung des Hypothenars auch auf der gesunden Seite als Grund für eine geringere Differenz zwischen beiden Seiten denkbar.

In der vorliegenden Arbeit ließ sich bei Frakturen auf der nicht dominanten Seite eine stärkere Änderung des Griffmusters relativ zur gesunden Seite als bei Frakturen auf der dominanten Seite erkennen. Es lässt sich vermuten, dass die dominante Hand durch ihre alltagsrelevanten Fähigkeiten bevorzugt eingesetzt wird und dies zu einer rascheren Normalisierung der Handfunktion beiträgt (Sebastjan et al. 2017). Wollstein et al. konnten für eine Gruppe mit distaler Radiusfraktur der dominanten Hand signifikant bessere Leistungen für einzelne Handfunktionstests im Vergleich zu einer Gruppe mit distaler Radiusfraktur der nicht dominanten Hand zeigen, für die Handkraft ergab sich hingegen kein signifikanter Unterschied (Wollstein et al. 2021). Es bleibt abzuwarten, ob ein ähnlicher Zusammenhang zwischen Händigkeit und der Entwicklung der Kraftverteilung nach distaler Radiusfraktur in zukünftigen Arbeiten gezeigt werden kann. Bei gesunden Probanden war der Einfluss der Händigkeit auf die Kraftverteilung gering (Mühldorfer-Fodor et al. 2017; Cai et al. 2018).

12 Monate nach distaler Radiusfraktur bestanden für den 1. Fingerstrahl, Thenar und Hypothenar weiter signifikante Unterschiede in der Kraftverteilung zwischen betroffener und gesunder Seite. Ein weiteres Angleichen der Kraftverteilung der betroffenen an die gesunde Seite im weiteren Verlauf ist anzunehmen. Für Handkraft und Bewegungsumfang konnten noch Funktionsverbesserungen 2 – 4 Jahre nach distaler Radiusfraktur im Vergleich zur Messung nach 12 Monaten gezeigt werden (Brogren et al. 2011). Auch die Differenz zwischen der auf die gesunde Seite normierten Kraft des Pinzettengriffes und des Faustschlusses zeigte sich abnehmend. Die von Chung et al. und Wei et al. publizierten Werte lassen ein Jahr nach distaler Radiusfraktur Differenzen von 18 und 25 % erkennen (Chung et al. 2006; Wei et al. 2009). Die von Hohmann et al. durchschnittlich 3 Jahre nach distaler Radiusfraktur erhobenen Werten zeigen keine Differenz mehr zwischen den auf die gesunde Seite normierten Werten beider Grifftypen (Hohmann et al. 2017). Signifikante Unterschiede zwischen beiden Seiten bestanden noch für Flexion und Ulnardeviation (Hohmann et al. 2017). Zur Beurteilung der weiteren Entwicklung der Kraftverteilung über das erste Jahr nach distaler Radiusfraktur hinaus sind weitere Untersuchungen sinnvoll.

5.2 Subjektive und objektive Beurteilungen der Handfunktion nach distaler Radiusfraktur

Im ersten Jahr nach distaler Radiusfraktur konnte eine kontinuierliche Besserung der Handfunktion gezeigt werden. Im Vergleich zur Bestimmung nach 3 Monaten hatte der Median des QuickDASH-Fragebogens nach 12 Monaten um mehr als die Hälfte abgenommen. Die initial verminderte Handbeweglichkeit und Handkraft hatten sich nach einem Jahr auf Werte von über 90 % der gesunden Seite gebessert.

Zur Einordnung der in dieser Arbeit erhobenen subjektiven und objektiven Handfunktionsparameter werden diese den von Stinton et al. publizierten Werten einer Meta-Analyse gegenübergestellt (Tab. 8).

Tab. 8: Übersicht der Meta-Analyse von Stinton et al. und der eigenen Ergebnisse

Ergebnisse der Meta-Analyse von Stinton et al.			Eigene Ergebnisse		
nach 3 Monaten	nach 6 Monaten	nach 12 Monaten	nach 3 Monaten	nach 6 Monaten	nach 12 Monaten
DASH-/QuickDASH-Score					
16,3	11,5	7,8	25,0	15,9	11,4
Flexion (in % der gesunden Seite)					
76,4	85,4	89,6	73,3	84,6	92,0
Extension (in % der gesunden Seite)					
81,6	91,2	94,6	84,6	92,9	92,6
Radialduktion (in % der gesunden Seite)					
85,6	92,8	94,4	80,0	100	100
Ulnarduktion (in % der gesunden Seite)					
77,2	82,4	91,2	87,5	88,9	100
Handkraft (in % der gesunden Seite)					
66,4	77	88,1	65,9	78,5	93,8

Obwohl die absoluten Ergebnisse des DASH-/QuickDASH-Fragebogens zwischen dieser und der Arbeit von Stinton et al. deutlich abweichen, so ist doch der Trend in beiden Fällen eine Abnahme um gut 50 % innerhalb von 12 Monaten (Stinton et al. 2017). Weiterhin beschreiben Stinton et al. das Alter und den Frakturtyp nach AO/OTA-Klassifikation nach distaler Radiusfraktur als wichtige Einflussfaktoren für den Bewegungsumfang im Handgelenk und die Handkraft (Stinton et al. 2017).

5.2.1 Beurteilung des subjektiven Funktionsstatus mit dem QuickDASH-Fragebogen nach distaler Radiusfraktur

Der Einfluss des Alters auf das Ergebnis des DASH-Fragebogens wird durch eine 2012 publizierte normative Untersuchung an 750 berufstätigen Personen ohne akute Verletzungen hervorgehoben. Hier zeigte sich ein kontinuierlicher Anstieg des DASH-Scores mit zunehmendem Alter, insbesondere bei vornehmlich manueller Tätigkeit. Es ließ sich pro Lebensjahr ein Anstieg der durchschnittlichen Punktzahl um 0,3 Punkte für Frauen und um 0,2 Punkte für Männer ableiten. Dies steht in Zusammenhang mit den Einschränkungen der oberen Extremität. Im Alter von 60 Jahren sind bei Frauen 13 Punkte und bei Männern 6,5 Punkte als realistischer Ausgangswert zu betrachten (Klum et al. 2012). Auf das eigene Patientenkollektiv bezogen, ergibt sich ein Wert, der dem Ergebnis nach 12 Monaten nahekommt.

Plant et al. berichteten bei Patienten nach distaler Radiusfraktur, die jünger als 50 Jahre waren, einen DASH-Score von 20,2 nach 3 Monaten, 11,8 nach 6 Monaten und 8,8 Punkten nach 12 Monaten. Bei Patienten von über 50 Jahren betrug der DASH-Score 31,2, 21,0 und 11,3 Punkte zu den gleichen Zeitpunkten (Plant et al. 2017). Die Mediane des in der eigenen Arbeit nach 3 und 6 Monaten ermittelten QuickDASH-Scores lassen sich zwischen den Werten dieser beiden Gruppen einordnen. Dies ist vermutlich Ausdruck dafür, dass 77 % der hier untersuchten Patienten das 50. Lebensjahr bereits überschritten hatten.

Die eigenen Ergebnisse zeigen signifikante Korrelationen zwischen dem Alter und dem Ergebnis des QuickDASH-Fragebogens, wie dies auch in Publikationen für den DASH-, bzw. QuickDASH-Score nach distaler Radiusfraktur beschrieben wurde (Abramo et al. 2008; Landgren et al. 2017).

Ebenso finden sich für die Korrelationen zwischen dem Ergebnis des QuickDASH-Fragebogens und den objektiven Handfunktionsparametern Flexion, Ex-

tension, Ulnardeviation und Handkraft in der Literatur vergleichbare Ergebnisse (Wilcke et al. 2007; Bot et al. 2012a; Swart et al. 2012; Yang et al. 2018).

5.2.2 Bewegungsumfang und Handsteifigkeit nach distaler Radiusfraktur

Die von Stinton et al. herausgearbeiteten Einflussfaktoren für den Bewegungsumfang im Handgelenk, Alter und der Frakturtyp nach AO/OTA-Klassifikation, ermöglichen auch eine differenzierte Bewertung von Ergebnissen verschiedener Arbeiten (Stinton et al. 2017).

Bei einem Durchschnittsalter von 55 und 56 Jahren waren die von Hammer et al. publizierten Werte des Bewegungsumfanges geringer und die von Wilcke et al. größer als die eigenen Resultate (Wilcke et al. 2011; Hammer et al. 2019). Wurden nach volarer Plattenosteosynthese in der Arbeit von Hammer et al. nur Patienten mit Typ C-Frakturen (AO/OTA-Klassifikation) untersucht, betrug der Anteil in der Arbeit von Wilcke et al. hingegen nur 21 % (Wilcke et al. 2011; Hammer et al. 2019). In der eigenen Arbeit liegt der Anteil bei 29 %.

Der Zusammenhang zwischen dem Anteil an Typ C-Frakturen nach AO/OTA-Klassifikation und der Handfunktion lässt sich möglicherweise durch die insgesamt größere Frakturschwere und die Gelenkbeteiligung bei diesen Frakturen erklären (Roh et al. 2014; Ferree et al. 2018). Für die Frakturschwere konnte auch unabhängig von der AO/OTA-Klassifikation ein Zusammenhang mit dem Bewegungsumfang gezeigt werden (Roh et al. 2014; Wadsten et al. 2017).

Für die im Vergleich zur eigenen Arbeit besseren Ergebnisse in der Publikation von Wilcke et al. lässt sich, bei nur etwas geringerem Anteil an Typ C-Frakturen (AO/OTA-Klassifikation), auch ein Zusammenhang mit dem jüngeren Durchschnittsalter vermuten (Wilcke et al. 2011).

Die Bedeutung des Alters für die Beweglichkeit im Handgelenk lässt sich auch daran erkennen, dass neben einer rascheren Erholung nach distaler Radiusfraktur auch für die nicht betroffene Seite ein Zusammenhang mit dem Alter dargelegt werden konnte (Lee et al. 2016; Stinton et al. 2017; Johnston und Stewart 2018). Dies lassen auch die eigenen Ergebnisse in Bezug auf die Extension erkennen.

Die eingeschränkte Fingerbeweglichkeit ist insbesondere im Hinblick auf die Greiffunktion ein wesentlicher Aspekt. Eine pathologische Handsteifigkeit nach distaler Radiusfraktur wurde von Egol et al. als ein Abstand einer Fingerkuppe

zur Hohlhandfalte von mindestens 1 cm definiert (Lee et al. 2009; Egol et al. 2014). In der Arbeit von Egol et al. wurde dieses Kriterium bei 19 % der Patienten für eine oder mehrere Fingerkuppen erfüllt (Egol et al. 2014). In der eigenen Arbeit beträgt dieser Anteil 17 %. Die Bedeutung dieses Parameters wird durch die signifikanten Korrelationen mit der Handkraft und dem DASH- bzw. Quick-DASH-Score deutlich (Egol et al. 2014).

Die Handsteifigkeit beschränkt sich jedoch nicht nur auf einen pathologischen Fingerkuppen-Hohlhand-Abstand. Auch wenn stärkere Einschränkungen von Flexion, Extension, Radial- und Ulnarduktion nicht den von Egol et al. vorgeschlagenen Kriterien für eine pathologische Handsteifigkeit entsprechen, werten Mifsud und Drew et al. sie als Anhalt für eine erhöhte Handsteifigkeit (Mifsud und Drew 2015). Sie beschreiben auch den Zusammenhang zwischen zunehmendem Bewegungsumfang und höherer Handkraft (Mifsud und Drew 2015).

Erfasst der Fingerkuppen-Hohlhand-Abstand ein Beugedefizit der Finger, lässt sich durch die Messung der Handspanne ein Streckdefizit erkennen. Eine verminderte Handspanne korrelierte in dieser Arbeit nach 3 Monaten mit dem QuickDASH-Score, was dafür spricht, dass eine Steifigkeit bei der maximalen Streckung auch für die Handfunktion eine Rolle spielt. Für eine Beurteilung der Handfunktion über die ersten Monate nach distaler Radiusfraktur hinaus ist sie jedoch, bei auch zu Beginn nur geringer Differenz zwischen betroffener und gesunder Seite sowie im weiteren Verlauf fehlenden Korrelationen mit den anderen Handfunktionsparametern, vermutlich nicht sensitiv genug. Ein Fingerkuppen-Hohlhand-Abstand von über 1 cm korrelierte zu allen drei Untersuchungszeitpunkten mit der Handkraft. In Bezug auf die Kraftverteilung ließ sich nach 12 Monaten eine Korrelation mit der Belastung des Hypothenars darlegen. Im Vergleich zum Fingerkuppen-Hohlhand-Abstand ist zu berücksichtigen, dass die Messung der Handspanne vor allem durch Achsabweichungen beim Spreizen der Finger und einen fehlenden Fixpunkt anfälliger für Fehlmessungen ist. Aber auch bei der Messung des Fingerkuppen-Hohlhand-Abstandes bergen die Rundungen der Fingerkuppen und die eindrückbare Handfläche ein Risiko für Messungenauigkeiten.

Die Korrelationen der Kraftverteilung nach distaler Radiusfraktur mit Flexions-einschränkungen im Handgelenk und verminderter Handspanne auf der betroffenen Seite lassen einen Zusammenhang zwischen der Kraftverteilung und der Hand- sowie Fingerbeweglichkeit erkennen. Dieser Zusammenhang sollte unter therapeutischen Gesichtspunkten in weiteren Arbeiten beurteilt werden.

5.2.3 Handkraftmessung beim Faustschluss nach distaler Radiusfraktur

Das Alter und die Frakturschwere, für die unabhängig von der AO/OTA-Klassifikation ein Zusammenhang mit der Handfunktion berichtet wurde, sind auch wichtige Aspekte für eine differenzierte Bewertung der Handkraft (Chung et al. 2008; Roh et al. 2014; Cowie et al. 2015; Stinton et al. 2017).

Vergleichbar zu den eigenen Resultaten sind die Ergebnisse einer schwedischen Arbeit, in der über 90 operativ mit Plattenosteosynthese versorgte Patienten mit einem durchschnittlichen Alter von 58 Jahren untersucht wurden (Ydreborg et al. 2014). In dieser wurde die Handkraft der betroffenen Seite mit Referenzwerten einer gesunden Population verglichen und nach 6 Monaten mit 83 % und nach 12 Monaten mit 93 % angegeben (Ydreborg et al. 2014).

Hammer et al. berichteten eine auf die gesunde Seite normierte Handkraft von 65 % nach 3 Monaten, 84 % nach 6 Monaten und 95 % nach 12 Monaten (Hammer et al. 2019). Diese Ergebnisse stimmen ebenfalls gut mit den eigenen Ergebnissen überein. Das Durchschnittsalter war mit 55 Jahren geringer, der Anteil an Typ C-Frakturen (AO/OTA-Klassifikation) mit 100 % größer als in der eigenen Arbeit (Hammer et al. 2019).

Im Vergleich zur eigenen Arbeit geben Wilcke et al., wie auch in Bezug auf den Bewegungsumfang, größere Werte für die auf die gesunde Seite normierte Handkraft an (Wilcke et al. 2011). Der Altersdurchschnitt und der Anteil an Typ C-Frakturen (AO/OTA-Klassifikation) waren etwas geringer als in der eigenen Arbeit (Wilcke et al. 2011).

Erkennbar niedrigere Handkraftwerte finden sich trotz einem Durchschnittsalter von 49 Jahren in der Arbeit von Chung et al. (Chung et al. 2006). Nach 3 Monaten wurde die auf die gesunde Seite normierte Kraft mit 57 %, nach 6 Monaten mit 72 % und nach 12 Monaten mit 79 % angegeben. Der Anteil an Typ C-Frakturen nach AO/OTA-Klassifikation war mit 51 % etwas größer als in der eigenen Arbeit. Im Gegensatz zu den auf die gesunde Seite normierten Handkraftwerten zeigte sich der Bewegungsumfang im Handgelenk, abgesehen von drei Einzelwerten, im Vergleich größer als in der eigenen Arbeit (Chung et al. 2006). Insgesamt spricht dies nicht für eine deutlich schlechtere Handfunktion.

In diesem Zusammenhang ist zu berücksichtigen, dass das Frakturmuster unterschiedlichen Einfluss auf die Handkraft und den Bewegungsumfang haben kann (Zhang et al. 2017; Yan et al. 2019). Es wird aber auch deutlich, dass Alter und Frakturschwere nicht alle Unterschiede erklären können. Es spielen

auch Vorerkrankungen, der Lebensstil und der sozioökonomische Status eine Rolle im Heilungsverlauf und haben Einfluss auf das Ergebnis nach distaler Radiusfraktur (Chung et al. 2007; Paksima et al. 2014; Wilson et al. 2014).

Die Auswertung der eigenen Messungen ergab für die Frakturen auf der dominanten Seite im Vergleich zu den Frakturen auf der nicht dominanten Seite eine nicht signifikant höhere absolute Handkraft. Auf die gesunde Seite normiert, zeigte sich für die Handkraft nach 12 Monaten zwischen beiden Gruppen ein signifikanter Unterschied.

3 Monate nach operativer Versorgung distaler Radiusfrakturen geben sowohl Hosokawa et al. als auch Wollstein et al. jeweils keine signifikante Differenz zwischen den auf die gesunde Seite normierten Handkraftwerten der Patienten mit Frakturen auf der dominanten und der Patienten mit Frakturen auf der nicht dominanten Seite an (Hosokawa et al. 2020; Wollstein et al. 2021). Bei konservativ versorgten Frakturen berichten Hosokawa et al. ebenfalls keinen signifikanten Unterschied (Hosokawa et al. 2020). Wie auch in der Publikation von Hosokawa et al. war in der eigenen Arbeit die absolute Differenz zwischen beiden Gruppen geringer als die minimale klinisch bedeutsame Differenz (MCID) nach Kim et al. (Kim et al. 2014; Hosokawa et al. 2020). Insgesamt ist der Einfluss der Händigkeit auf die Handkraft nach distaler Radiusfraktur als gering einzustufen (Margaliot et al. 2005; Cowie et al. 2015; Hosokawa et al. 2020; Wollstein et al. 2021).

5.3 Limitationen

Die Patientenauswahl bildet nicht den Querschnitt an Patienten mit distaler Radiusfraktur ab. Weite Wegstrecken, finanzielle Probleme, kognitive Einschränkungen, weitere Erkrankungen oder die fehlende Zeit sowie Bereitschaft zur Teilnahme sind als Gründe für eine fehlende Teilnahme vorrangig zu nennen. Mehrere Patienten brachen nach der ersten oder zweiten Nachuntersuchung die weitere Teilnahme an der Studie ab. Auch hier zeigte sich eine Vielzahl an Beweggründen, wie eigene schwere Erkrankungen oder eines Familienmitgliedes, Tod eines Familienmitgliedes, mangelnde Zeit zur Untersuchungsteilnahme, Umzug oder fehlendes Interesse.

Für die Nachuntersuchungen war ein Zeitfenster von vier Wochen ab dem festgelegten Stichtag vorgesehen, somit kam es zu einer zeitlichen Streuung des Untersuchungszeitpunktes. In Einzelfällen wurde der festgelegte Untersu-

chungszeitraum aufgrund von terminlichen Schwierigkeiten seitens der Patienten um wenige Tage überschritten.

Bei der Erfassung des QuickDASH-Scores spielen individuelle Faktoren wie Symptomwahrnehmung und die subjektiv empfundenen Einschränkungen eine Rolle. Bei den Messungen der Finger- und Handbeweglichkeit ist die Anfälligkeit für Messungenauigkeiten zu beachten.

Die Finger- und Handbeweglichkeit konnte nicht für alle Patienten vollständig erfasst werden. Dies gilt fast ausschließlich nur für Messungen nach 12 Monaten, die von Patientenseite zum Teil nicht gewünscht waren oder aus untersuchungstechnischen Gründen ausgesetzt wurden. Wesentliche Veränderungen in den Korrelationsberechnungen konnte bei Verwendung der nach 6 Monaten erhobenen Messwerte für die fehlenden Daten nach 12 Monaten nicht festgestellt werden. Die Bestimmung von Handkraft und QuickDASH-Score war jeweils vollständig.

Im Rahmen regelmäßiger Qualitätskontrollen wurde das Manographie-System gewartet und geeicht, wodurch es zu geringeren Abweichungen der absoluten Kraftwerte kam.

5.4 Ausblick

Die orts aufgelöste Handkraftmessung mit dem Manographie-System zeigt im Vergleich zum Jamar[®]-Handdynamometer eine entsprechende Kraftentwicklung im ersten Jahr nach distaler Radiusfraktur. Die Kraftverteilung ist ein sensibler Parameter der Handfunktion im ersten Jahr nach distaler Radiusfraktur. Sie bietet die Möglichkeit einer individuellen Bewertung des Kraftverteilungsmusters, was auch in einem therapeutischen Kontext genutzt werden kann. Wie bereits von Mühldorfer-Fodor et al. vorgeschlagen, ermöglicht die Erfassung der Kraftverteilung gezielte therapeutische Übungen entsprechend der individuellen Einschränkungen und die Evaluation des Heilungsverlaufes (Mühldorfer-Fodor et al. 2017). Eine besondere Möglichkeit könnte hierbei ein Training mit visueller Rückmeldung einzelner Parameter der Kraftverteilung bieten, was auch die Motivation fördern könne (Mühldorfer-Fodor et al. 2017). Den Effekt eines Einbeziehens von Kraftverteilungsmessungen in die Rehabilitation der Handfunktion gilt es in weiteren Arbeiten zu prüfen.

6 Zusammenfassung

Eine distale Radiusfraktur schränkt die Handfunktion zunächst deutlich ein. In den meisten Fällen erholt diese sich schrittweise im Verlauf eines Jahres wieder.

Die Funktionsbeurteilung erfolgt zum einen über standardisierte Fragebögen, um die Beschwerden und Funktionseinschränkungen aus einer subjektiven Perspektive zu erfassen. Zum anderen werden die Finger- und Handbeweglichkeit sowie die Handkraft gemessen. Dadurch wird eine objektive Beurteilung der Funktionsfähigkeit im Heilungsverlauf ermöglicht. Die Erfassung der Kraftverteilung zwischen frei zu bestimmenden Handarealen kann diese Beurteilung ergänzen, ist jedoch noch nicht in der Funktionsprüfung nach distaler Radiusfraktur etabliert.

Ziel dieser Arbeit war es, nach distaler Radiusfraktur die Handkraft orts aufgelöst beim Greifen zu erfassen und anschließend eine differenzierte Bewertung der Kraftverteilung auf die 5 Fingerstrahlen, den Thenar und den Hypothenar für die betroffene und gesunde Seite zu untersuchen. Zudem wurden die Beweglichkeit im Handgelenk, die Fingerbeweglichkeit und für die Einschätzung der Handfunktion aus Patientensicht der QuickDASH-Score erhoben.

Nach operativer Versorgung einer einseitigen distalen Radiusfraktur wurden bei 35 Patienten (30 Frauen) nach 3, 6 und 12 Monaten mit dem Manugraphie-System orts aufgelöste Handkraftmessungen durchgeführt. Die Medianwerte der auf die gesunde Seite normierten Handkraft betragen 65,9 % nach 3 Monaten, 78,5 % nach 6 Monaten und 93,8 % nach 12 Monaten. Der Bewegungsumfang im Handgelenk war nach 3 Monaten im Seitenvergleich vermindert und besserte sich ebenfalls im Verlauf. Nach 12 Monaten hatten Radial- und Ulnar duktion im Median die Werte der gesunden Seite angenommen sowie Extension und Flexion jeweils von mehr als 90 % des Bewegungsumfanges der gesunden Seite. Der erhobene QuickDASH-Score betrug 25,0 Punkte nach 3 Monaten, 15,9 Punkte nach 6 Monaten und 11,4 Punkte nach 12 Monaten. Eine pathologische Handsteifigkeit, definiert als eine Distanz von mindestens 1 cm zwischen einer Fingerspitze und der Hohlhandfalte, trat bei 17 % auf. Die Handspanne auf der betroffenen Seite war im Median 0,5 cm geringer als auf der gesunden Seite.

Die Handkraft, der Bewegungsumfang im Handgelenk, die Handspanne und die Handsteifigkeit der betroffenen Seite korrelierten mit dem QuickDASH-Score. Die Extension und Handkraft auf der betroffenen Seite korrelierten, wie auch der QuickDASH-Score mit dem Alter der Untersuchungsteilnehmer.

Nach 3 Monaten trugen auf der betroffenen Seite der 1. und 2. Fingerstrahl einen größeren Anteil zur Gesamtkraft bei als auf der gesunden Seite, der Kraftanteil von Thenar und Hypothenar war hingegen geringer. Die Kraftverteilung der betroffenen Seite näherte sich im Verlauf schrittweise wieder der gesunden Seite an. Nach 12 Monaten bestanden für den 1. Fingerstrahl, Thenar und Hypothenar noch signifikante Differenzen zur Kraftverteilung der gesunden Seite. Die Veränderung der Kraftverteilung war weniger stark ausgeprägt und normalisierte sich rascher, wenn die dominante Seite betroffen war.

Die Veränderungen der Kraftverteilung korrelierten in den ersten sechs Monaten nach distaler Radiusfraktur mit einer verminderten Flexion und Handspanne.

Zusammenfassend sprechen die Ergebnisse dafür, dass die Kraftverteilung der Hand nach distaler Radiusfraktur Ausdruck der beeinträchtigten Handfunktion ist und als relevante Komponente in die Funktionsbeurteilung miteinbezogen werden sollte.

7 Thesen

1. Das Manographie-System ist zur Messung der Handkraft im ersten Jahr nach distaler Radiusfraktur geeignet.
2. Die zur Erfassung der subjektiven und objektiven Handfunktion erhobenen Werte des QuickDASH-Fragebogens, des Bewegungsumfangs und der Handkraft korrelieren, insbesondere in den ersten 6 Monaten, miteinander.
3. Auf der betroffenen Seite ist nach 3 Monaten eine relative Mehrbelastung im Bereich des 1. und 2. Fingerstrahles im Vergleich zur gesunden Seite erkennbar, während Thenar und Hypothenar weniger belastet werden.
4. Nach 6 Monaten und 12 Monaten erfolgt bereits eine Annäherung der Kraftverteilung der Frakturseite an die gesunde Seite.
5. 12 Monate nach distaler Radiusfraktur hat sich das Griffmuster noch nicht vollständig der gesunden Seite angeglichen.
6. Die Änderung der Kraftverteilung weicht stärker von der gesunden Seite ab, wenn die nicht dominante Hand betroffen ist.
7. Die eingeschränkte Hand- und Fingerbeweglichkeit korreliert mit dem Kraftverteilungsmuster nach distaler Radiusfraktur.
8. Die Kraftverteilung nach distaler Radiusfraktur ist ein sensitiver Handfunktionsparameter.

8 Literaturverzeichnis

- Aasheim T, Finsen V (2014): The DASH and the QuickDASH instruments. Normative values in the general population in Norway. *J Hand Surg Eur* Vol 39, 140–144
- Abramo A, Kopylov P, Tägil M (2008): Evaluation of a treatment protocol in distal radius fractures. *Acta Orthop* 79, 376–385
- Arora R, Lutz M, Hennerbichler A, Krappinger D, Espen D, Gabl M (2007): Complications following internal fixation of unstable distal radius fracture with a palmar locking-plate. *J Orthop Trauma* 21, 316–322
- Bain G (2015): Abraham Colles oration: 200 years on. *BMC Proc* 9, A33, 1753-6561-9-S3-A33
- Beaton DE, Wright JG, Katz JN (2005): Development of the QuickDASH: Comparison of Three Item-Reduction Approaches. *J Bone Jt Surg* 87, 1038–1046
- Beumer A, Lindau TR (2014): Grip strength ratio: a grip strength measurement that correlates well with DASH score in different hand/wrist conditions. *BMC Musculoskelet Disord* 15, 336
- Beyer J, Wynkop E, Liu J, Ebraheim NA (2021): Interventions for Distal Radius Fractures: A Meta-analysis of Comparison Studies. *J Wrist Surg*
- Bobos P, Nazari G, Lalone EA, Grewal R, MacDermid JC (2018): Recovery of grip strength and hand dexterity after distal radius fracture: A two-year prospective cohort study. *Hand Ther* 23, 28–37
- Böhler L (1953): Technik der Knochenbruchbehandlung. 12. und 13. vollständig neubearbeitete Auflage; Verlag für medizinische Wissenschaften Wilhelm Maudrich, Wien
- Bot AGJ, Souer JS, van Dijk CN, Ring D (2012a): Association between Individual DASH Tasks and Restricted Wrist Flexion and Extension after Volar Plate Fixation of a Fracture of the Distal Radius. *HAND* 7, 407–412

- Bot AGJ, Mulders MAM, Fostvedt S, Ring D (2012b): Determinants of Grip Strength in Healthy Subjects Compared to That in Patients Recovering From a Distal Radius Fracture. *J Hand Surg* 37, 1874–1880
- Breasted JH (1932): Breasted's Translation of the Edwin Smith Surgical Papyrus. *N Engl J Med* 206, 28–29
- Brogren E, Hofer M, Petranek M, Dahlin LB, Atroshi I (2011): Fractures of the distal radius in women aged 50 to 75 years: natural course of patient-reported outcome, wrist motion and grip strength between 1 year and 2–4 years after fracture. *J Hand Surg Eur Vol* 36, 568–576
- Cai A, Pingel I, Lorz D, Beier JP, Horch RE, Arkudas A (2018): Force distribution of a cylindrical grip differs between dominant and nondominant hand in healthy subjects. *Arch Orthop Trauma Surg* 138, 1323–1331
- Chaudhry H, Kleinlugtenbelt YV, Mundi R, Ristevski B, Goslings JC, Bhandari M (2015): Are Volar Locking Plates Superior to Percutaneous K-wires for Distal Radius Fractures? A Meta-analysis: *Clin Orthop* 473, 3017–3027
- Chung KC, Watt AJ, Kotsis SV, Margaliot Z, Haase SC, Kim HM (2006): Treatment of Unstable Distal Radial Fractures with the Volar Locking Plating System: *J Bone Jt Surg* 88, 2687–2694
- Chung KC, Kotsis SV, Kim HM (2007): Predictors of Functional Outcomes After Surgical Treatment of Distal Radius Fractures. *J Hand Surg* 32, 76–83
- Chung KC, Squitieri L, Kim HM (2008): Comparative Outcomes Study Using the Volar Locking Plating System for Distal Radius Fractures in Both Young Adults and Adults Older Than 60 Years. *J Hand Surg* 33, 809–819
- Chung KC, Malay S, Shauver MJ, Kim HM, for the WRIST Group (2019): Assessment of Distal Radius Fracture Complications Among Adults 60 Years or Older: A Secondary Analysis of the WRIST Randomized Clinical Trial. *JAMA Netw Open* 2, e187053
- Cowie J, Anakwe R, McQueen M (2015): Factors Associated with One-Year Outcome after Distal Radial Fracture Treatment. *J Orthop Surg* 23, 24–28

- de Putter CE, van Beeck EF, Looman CWN, Toet H, Hovius SER, Selles RW (2011): Trends in Wrist Fractures in Children and Adolescents, 1997–2009. *J Hand Surg* 36, 1810-1815.e2
- Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV) (2017): Messblatt für obere Gliedmaßen (nach der Neutral - 0 - Methode).
- Diaz-Garcia RJ, Chung KC (2012): The Evolution of Distal Radius Fracture Management: A Historical Treatise. *Hand Clin* 28, 105–111
- Diaz-Garcia RJ, Oda T, Shauver MJ, Chung KC (2011): A Systematic Review of Outcomes and Complications of Treating Unstable Distal Radius Fractures in the Elderly. *J Hand Surg* 36, 824-835.e2
- Dong RG, Wu JZ, Welcome DE, McDowell TW (2008): A new approach to characterize grip force applied to a cylindrical handle. *Med Eng Phys* 30, 20–33
- Dresing K, Stürmer KM, Bonnaire F, Acklin YP, Arigoni M, Bösmüller S, Frosch K-H, Gösling T, Grossterlinden L, Heitmann M, et al. (2021): AWMF-Leitlinie Distale Radiusfraktur des Erwachsenen der Deutschen Gesellschaft für Unfallchirurgie (DGU) - 012-015. Novellierung der S2e-Version 2015. Verfügbar unter: https://www.awmf.org/uploads/tx_szleitlinien/012-015l_S2e_Distale_Radiusfraktur_2021-11_01.pdf [Abgerufen am: 04.03.2022]
- Egol KA, Karia R, Zingman A, Lee S, Paksima N (2014): Hand stiffness following distal radius fractures: who gets it and is it a functional problem? *Bull Hosp Jt Dis* 2013 72, 288–293
- Ejeskär A, Örtengren R (1981): Isolated Finger Flexion Force—a Methodological Study. *Hand* os-13, 223–230
- Ferree S, van der Vliet QMJ, Nawijn F, Bhashyam AR, Houwert RM, Leenen LPH, Hietbrink F (2018): Epidemiology of distal radius fractures in polytrauma patients and the influence of high traumatic energy transfer. *Injury* 49, 630–635
- Franceschi F, Franceschetti E, Paciotti M, Cancilleri F, Maffulli N, Denaro V (2015): Volar locking plates versus K-wire/pin fixation for the treatment of

distal radial fractures: a systematic review and quantitative synthesis. *Br Med Bull* 115, 91–110

Freund J, Toivonen R, Takala E-P (2002): Grip forces of the fingertips. *Clin Biomech* 17, 515–520

Gabl M, Arora R (2014): Outcome Assessment After Distal Radius Fractures. In: Hove LM, Lindau T, Hølmer P (Hrsg.): *Distal Radius Fractures*. Springer, Berlin, Heidelberg, 53–59

Garkisch A, Mittlmeier T, Kalpen A, Mühldorfer-Fodor M, Fischer D-C, Wichelhaus A (2021): Dynamic Manugraphy as a Promising Tool to Assess the Outcome of Limited Aponeurectomy in Patients With Dupuytren's Contracture. *Front Med* 7, 604891

Gartland JJ, Werley CW (1951): Evaluation of healed Colles' fractures. *J Bone Joint Surg Am* 33-A, 895–907

Gay JD (1974): Radial fracture as an indicator of osteoporosis: a 10-year follow-up study. *Can Med Assoc J* 111, 156–157

Goldhahn J, Beaton D, Ladd A, Macdermid J, Hoang-Kim A (2014): Recommendation for measuring clinical outcome in distal radius fractures: a core set of domains for standardized reporting in clinical practice and research. *Arch Orthop Trauma Surg* 134, 197–205

Gradl G, Falk S, Mittlmeier T, Wendt M, Mielsch N, Gradl G (2016): Fixation of intra-articular fractures of the distal radius using intramedullary nailing: a randomized trial versus palmar locking plates. *Injury* 47, 25–30

Grey H, Carter HV (1918): Fig. 427: The muscles of the left hand. Palmar surface. In: Lewis WH (Hrsg.): *Anatomy of the Human Body*. 20th edition; Lea & Febiger, Philadelphia / New York City. Verfügbar unter: <https://www.bartleby.com/107/illus427.html> [Abgerufen am: 02.06.2022]

Günther CM, Bürger A, Rickert M, Crispin A, Schulz CU (2008): Grip Strength in Healthy Caucasian Adults: Reference Values. *J Hand Surg* 33, 558–565

Hamilton A, Balnave R, Adams R (1994): Grip strength testing reliability. *J Hand Ther Off J Am Soc Hand Ther* 7, 163–170

- Hammer O-L, Clementsen S, Hast J, Šaltytė Benth J, Madsen JE, Randsborg P-H (2019): Volar Locking Plates Versus Augmented External Fixation of Intra-Articular Distal Radial Fractures: Functional Results from a Randomized Controlled Trial. *J Bone Jt Surg* 101, 311–321
- Hippocrates, Adams F (1849): *The genuine works of Hippocrates - Translated from the greek with a preliminary discourse and annotations by Francis Adams*. Printed for the Sydenham society, London
- Hogrel J-Y (2015): Grip strength measured by high precision dynamometry in healthy subjects from 5 to 80 years. *BMC Musculoskelet Disord* 16, 139
- Hohmann E, Meta M, Navalgund V, Tetsworth K (2017): The relationship between radiological alignment of united distal radius fractures and functional and patient-perceived outcomes in elderly patients. *J Orthop Surg* 25, 230949901668497
- Hosokawa T, Tajika T, Suto M, Chikuda H (2020): Relationship Between Hand Dominance and Treatment Outcomes for Distal Radius Fractures in the Elderly in the Short-Term. *J Hand Surg Glob Online* 2, 212–216
- Hove LM (2014): A Historical Review of the Distal Radius Fracture. In: Hove LM, Lindau T, Hølmer P (Hrsg.): *Distal Radius Fractures*. Springer, Berlin, Heidelberg, 11–19
- Imrhan SN (2006): Hand Grip Characteristics and Strength. In: Karwowski W (Hrsg.): *International Encyclopedia of Ergonomics and Human Factors*. Band 1; 2. Auflage; Taylor & Francis, CRC, Boca Raton, Florida, USA, 386–389
- Innes E (1999): Handgrip strength testing: A review of the literature. *Aust Occup Ther J* 46, 120–140
- Institute for Work & Health, Canada: QuickDASH - The Disabilities of the Arm, Shoulder and Hand Outcome Measure [Internet]. Verfügbar unter: <http://www.dash.iwh.on.ca/> [Abgerufen am 01.07.2020]

- Jerrhag D, Englund M, Karlsson MK, Rosengren BE (2017): Epidemiology and time trends of distal forearm fractures in adults - a study of 11.2 million person-years in Sweden. *BMC Musculoskelet Disord* 18, 240
- Jianda X, Qu Y, Huan L, Chen Q, Zheng C, Bin W, Pengfei S (2019): The severity of ulnar variance compared with contralateral hand: its significance on postoperative wrist function in patients with distal radius fracture. *Sci Rep* 9, 2226
- Johnston GHF, Stewart SA (2018): Intrarater Reliability of Range of Motion Measurements of the Uninjured Wrist in Women After Distal Radius Fracture. *J Hand Surg* 43, 1–7
- Jupiter JB (1997): Complex Articular Fractures of the Distal Radius: Classification and Management. *J Am Acad Orthop Surg* 5, 119–129
- Jupiter JB, Marent-Huber M (2010): Operative Management of Distal Radial Fractures with 2.4-Millimeter Locking Plates: A Multicenter Prospective Case Series: *J Bone Jt Surg-Am Vol* 92, 96–106
- Kennedy CA, Beaton DE, Smith P, Van Eerd D, Tang K, Inrig T, Hogg-Johnson S, Linton D, Couban R (2013): Measurement properties of the QuickDASH (Disabilities of the Arm, Shoulder and Hand) outcome measure and cross-cultural adaptations of the QuickDASH: a systematic review. *Qual Life Res* 22, 2509–2547
- Kim JK, Park MG, Shin SJ (2014): What is the Minimum Clinically Important Difference in Grip Strength? *Clin Orthop* 472, 2536–2541
- Klum M, Wolf MB, Hahn P, Leclère FM, Bruckner T, Unglaub F (2012): Normative Data on Wrist Function. *J Hand Surg* 37, 2050–2060
- Kozin SH, Porter S, Clark P, Thoder JJ (1999): The contribution of the intrinsic muscles to grip and pinch strength. *J Hand Surg* 24, 64–72
- Laino DK, Tejwani N (2012): Indications for operative fixation of distal radius fractures: a review of the evidence. *Bull NYU Hosp Jt Dis* 70, 35–40

- Lambotte A (1904): Notes sur l'osteosynthese dans les fractures du poignet [Bemerkungen über die Osteosynthese von Frakturen des Handgelenkes]. Ann Soc Med Anvers
- Landgren M, Abramo A, Geijer M, Kopylov P, Tägil M (2017): Similar 1-year subjective outcome after a distal radius fracture during the 10-year-period 2003–2012: A longitudinal register-based study involving 3,666 patients. Acta Orthop 88, 451–456
- Lee J-A, Sechachalam S (2016): The Effect of Wrist Position on Grip Endurance and Grip Strength. J Hand Surg 41, e367–e373
- Lee SH, Gong HS (2020): Measurement and Interpretation of Handgrip Strength for Research on Sarcopenia and Osteoporosis. J Bone Metab 27, 85
- Lee S-J, Park JW, Kang BJ, Lee JI (2016): Clinical and radiologic factors affecting functional outcomes after volar locking plate fixation of dorsal angulated distal radius fractures. J Orthop Sci 21, 619–624
- Lee SK, Paksima N, Lekic N, Zingman A, Walsh MG, Egol K (2009): Finger Stiffness following Distal Radius Fractures: Is it a Functional Problem? J Hand Surg 34, 22
- Leong DP, Teo KK, Rangarajan S, Lopez-Jaramillo P, Avezum A, Orlandini A, Seron P, Ahmed SH, Rosengren A, Kelishadi R, et al. (2015): Prognostic value of grip strength: findings from the Prospective Urban Rural Epidemiology (PURE) study. The Lancet 386, 266–273
- Li Z-M (2002): The influence of wrist position on individual finger forces during forceful grip. J Hand Surg 27, 886–896
- Lippisch R, Lucas B, Schüttrumpf JP, Piatek S, Walcher F (2016): Distale Radiusfraktur. Trauma Berufskrankh 18, 413–420
- MacDermid JC, Kramer JF, Woodbury MG, McFarlane RM, Roth JH (1994): Interrater reliability of pinch and grip strength measurements in patients with cumulative trauma disorders. J Hand Ther Off J Am Soc Hand Ther 7, 10–14

- MacDermid JC, Turgeon T, Richards RS, Beadle M, Roth JH (1998): Patient Rating of Wrist Pain and Disability: A Reliable and Valid Measurement Tool: *J Orthop Trauma* 12, 577–586
- MacDermid JC, Richards RS, Donner A, Bellamy N, Roth JH (2000): Responsiveness of the short form-36, disability of the arm, shoulder, and hand questionnaire, patient-rated wrist evaluation, and physical impairment measurements in evaluating recovery after a distal radius fracture. *J Hand Surg* 25, 330–340
- MacDermid JC, Roth JH, Richards RS (2003): Pain and disability reported in the year following a distal radius fracture: A cohort study. *BMC Musculoskelet Disord* 4, 24
- MacDermid JC, Lee A, Richards RS, Roth JH (2004): Individual finger strength: are the ulnar digits „powerful“? *J Hand Ther* 17, 364–367
- MacIntyre NJ, Dewan N (2016): Epidemiology of distal radius fractures and factors predicting risk and prognosis. *J Hand Ther* 29, 136–145
- Mafi P, Mafi R, Hindocha S, Griffin M, Khan W (2012): A Systematic Review of Dynamometry and its Role in Hand Trauma Assessment. *Open Orthop J* 6, 95–102
- Margaliot Z, Haase SC, Kotsis SV, Kim HM, Chung KC (2005): A Meta-Analysis of Outcomes of External Fixation Versus Plate Osteosynthesis for Unstable Distal Radius Fractures. *J Hand Surg* 30, 1185.e1-1185.e17
- Mathews AL, Chung KC (2015): Management of Complications of Distal Radius Fractures. *Hand Clin* 31, 205–215
- Mathiowetz V (1990a): Effects of three trials on grip and pinch strength measurements. *J Hand Ther* 3, 195–198
- Mathiowetz V (1990b): Grip and pinch strength measurements. In: Amundsen LR (Hrsg.): *Muscle Strength Testing: Instrumented and Non-instrumented Systems*. Churchill Livingstone, New York, 163–177
- Mathiowetz V, Weber K, Volland G, Kashman N (1984): Reliability and validity of grip and pinch strength evaluations. *J Hand Surg* 9, 222–226

- McDowell TW, Wimer BM, Welcome DE, Warren C, Dong RG (2012): Effects of handle size and shape on measured grip strength. *Int J Ind Ergon* 42, 199–205
- Mehta SP, MacDermid JC, Richardson J, MacIntyre NJ, Grewal R (2015): A Systematic Review of the Measurement Properties of the Patient-Rated Wrist Evaluation. *J Orthop Sports Phys Ther* 45, 289–298
- Meinberg E, Agel J, Roberts C, Karam M, Kellam J (2018): Fracture and Dislocation Classification Compendium - 2018. *J Orthop Trauma* 32, 1–10
- Mifsud C, Drew T (2015): Pathomechanics of the wrist following fractures of the distal radius. *Hand Ther* 20, 11–23
- Mitsionis G, Pakos EE, Stafilas KS, Paschos N, Papakostas T, Beris AE (2009): Normative data on hand grip strength in a Greek adult population. *Int Orthop* 33, 713–717
- Mühldorfer-Fodor M, Ziegler S, Harms C, Neumann J, Cristalli A, Kalpen A, Kundt G, Mittlmeier T, Prommersberger KJ (2014): Grip force monitoring on the hand: Manugraphy system versus Jamar dynamometer. *Arch Orthop Trauma Surg* 134, 1179–1188
- Mühldorfer-Fodor M, Ziegler S, Harms C, Neumann J, Kundt G, Mittlmeier T, Prommersberger KJ (2017): Load distribution of the hand during cylinder grip analyzed by Manugraphy. *J Hand Ther* 30, 529–537
- Mühldorfer-Fodor M, Cenik E, Hahn P, Mittlmeier T, van Schoonhoven J, Prommersberger KJ (2018): Influence of Maximal or Submaximal Effort on the Load Distribution of the Hand Analyzed by Manugraphy. *J Hand Surg* 43, 948.e1-948.e9
- Mulders MAM, Rikli D, Goslings JC, Schep NWL (2017): Classification and treatment of distal radius fractures: a survey among orthopaedic trauma surgeons and residents. *Eur J Trauma Emerg Surg* 43, 239–248
- Müller ME, Koch P, Nazarian S, Schatzker J (1990): Radius/Ulna = 2. In: *The Comprehensive Classification of Fractures of Long Bones*. Springer, Berlin, Heidelberg, 86–115

- Neumann J (2019): Messung der Handkraft beim Kraftgriff zur Evaluation eines dynamischen Druckverteilungsmesssystems. Dissertation [E-Publikation]. Universität Rostock. Verfügbar unter: http://rosdok.uni-rostock.de/resolve/id/rosdok_disshab_0000002361 [Abgerufen am 15.07.2020]
- Niver GE, Ilyas AM (2012): Carpal Tunnel Syndrome After Distal Radius Fracture. *Orthop Clin North Am* 43, 521–527
- Older TM, Stabler EV, Cassebaum WH (1965): Colles fracture: Evaluation and selection of therapy. *J Trauma* 5, 469–476
- Orbay JL (2000): The treatment of unstable distal radius fractures with volar fixation. *Hand Surg Int J Devoted Hand Up Limb Surg Relat Res J Asia-Pac Fed Soc Surg Hand* 5, 103–112
- Øyen J, Brudvik C, Gjesdal CG, Tell GS, Lie SA, Hove LM (2011): Osteoporosis as a Risk Factor for Distal Radial Fractures: A Case-Control Study. *J Bone Jt Surg-Am Vol* 93, 348–356
- Paksima N, Pahk B, Romo S, Egol KA (2014): The Association of Education Level on Outcome after Distal Radius Fracture. *HAND* 9, 75–79
- Pechlaner S, Gabl M, Lutz M, Krappinger D, Leixnering M, Krulis B, Ulmer H, Rudisch A (2007): Distale Radiusfrakturen - Ätiologie, Behandlungsmethoden und Ergebnisse. *Handchir · Mikrochir · Plast Chir* 39, 19–28
- Plant CE, Parsons NR, Costa ML (2017): Do radiological and functional outcomes correlate for fractures of the distal radius? *Bone Jt J* 99-B, 376–382
- Rayhack JM (1993): The history and evolution of percutaneous pinning of displaced distal radius fractures. *Orthop Clin North Am* 24, 287–300
- Rhee PC, Dennison DG, Kakar S (2012): Avoiding and Treating Perioperative Complications of Distal Radius Fractures. *Hand Clin* 28, 185–198
- Roberts HC, Denison HJ, Martin HJ, Patel HP, Syddall H, Cooper C, Sayer AA (2011): A review of the measurement of grip strength in clinical and epidemiological studies: towards a standardised approach. *Age Ageing* 40, 423–429

- Roh YH, Lee BK, Noh JH, Oh JH, Gong HS, Baek GH (2014): Factors Delaying Recovery After Volar Plate Fixation of Distal Radius Fractures. *J Hand Surg* 39, 1465–1470
- Rolls C, McCabe C, Llewellyn A, Jones GT (2020): What is the incidence of complex regional pain syndrome (CRPS) Type I within four months of a wrist fracture in the adult population? A systematic review. *Hand Ther* 25, 45–55
- Rossi J, Berton E, Grélot L, Barla C, Vigouroux L (2012): Characterisation of forces exerted by the entire hand during the power grip: effect of the handle diameter. *Ergonomics* 55, 682–692
- Runnquist K (2014): Rehabilitation. In: Hove LM, Lindau T, Hølmer P (Hrsg.): *Distal Radius Fractures*. Springer, Berlin, Heidelberg, 255–262
- Ryan LM, Teach SJ, Searcy K, Singer SA, Wood R, Wright JL, Chamberlain JM (2010): Epidemiology of Pediatric Forearm Fractures in Washington, DC: *J Trauma Inj Infect Crit Care* 69, 200–205
- Sancho-Bru JL, Giurintano DJ, Pérez-González A, Vergara M (2003): Optimum tool handle diameter for a cylinder grip. *J Hand Ther Off J Am Soc Hand Ther* 16, 337–342
- Saudabayev A, Rysbek Z, Khassenova R, Varol HA (2018): Human grasping database for activities of daily living with depth, color and kinematic data streams. *Sci Data* 5, 180101
- Schectman O, Sindhu BS (2015): Grip assessment. In: MacDermid JC, Solomon G, Valdes K (Hrsg.): *Clinical Assessment Recommendations*. 3. Auflage; American Society of Hand Therapists, Mount Laurel, New Jersey, 1–8
- Schünke M, Schulte E, Schumacher U (Hrsg.) (2014): *Prometheus: Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem: LernAtlas der Anatomie*. 4. Auflage; Georg Thieme Verlag, Stuttgart

- Sebastjan A, Skrzek A, Ignasiak Z, Sławińska T (2017): Age-related changes in hand dominance and functional asymmetry in older adults. *PLOS ONE* 12, e0177845
- Seigerman D, Lutsky K, Fletcher D, Katt B, Kwok M, Mazur D, Sodha S, Beredjikian PK (2019): Complications in the Management of Distal Radius Fractures: How Do We Avoid them? *Curr Rev Musculoskelet Med* 12, 204–212
- Seo NJ, Armstrong TJ, Ashton-Miller JA, Chaffin DB (2007): The effect of torque direction and cylindrical handle diameter on the coupling between the hand and a cylindrical handle. *J Biomech* 40, 3236–3243
- Slutsky DJ, Herman M (2005): Rehabilitation of Distal Radius Fractures: A Bio-mechanical Guide. *Hand Clin* 21, 455–468
- Smith L, Firth J, Grabovac I, Koyanagi A, Veronese N, Stubbs B, Soysal P, Yang L, Jackson SE (2019): The association of grip strength with depressive symptoms and cortisol in hair: A cross-sectional study of older adults. *Scand J Med Sci Sports* 29, 1604–1609
- Sollerman C: The use of eight main hand grips in activities of daily living; In *Handens greppfunktion*. Unpublished Thesis. Universitat Gotteborg 1980
- Sollerman C (1980): The use of eight main hand grips in activities of daily living; In *Handens greppfunktion*. Unpublished Thesis. Universitat Gotteborg
- Sperling L, Jacobson-Sollerman C (1977): The grip pattern of the healthy hand during eating. *Scand J Rehabil Med* 9, 115–121
- Stinton SB, Graham PL, Moloney NA, Maclachlan LR, Edgar DW, Pappas E (2017): Longitudinal recovery following distal radial fractures managed with volar plate fixation. *Bone Jt J* 99-B, 1665–1676
- Swart E, Nellans K, Rosenwasser M (2012): The Effects of Pain, Supination, and Grip Strength on Patient-Rated Disability After Operatively Treated Distal Radius Fractures. *J Hand Surg* 37, 957–962

- Synn AJ, Makhni EC, Makhni MC, Rozental TD, Day CS (2009): Distal Radius Fractures in Older Patients: Is Anatomic Reduction Necessary? *Clin Orthop Relat Res* 467, 1612–1620
- Tang JB (2021): Tendon Ruptures After Distal Radius Fracture. In: Jupiter JB, Chammas M, Buijze GA (Hrsg.): *Distal Radius Fractures: Evidence-Based Management*. Elsevier, Amsterdam, 359–369
- Thompson PW, Taylor J, Dawson A (2004): The annual incidence and seasonal variation of fractures of the distal radius in men and women over 25 years in Dorset, UK. *Injury* 35, 462–466
- Trossman PB, Li P-W (1989): The Effect of the Duration of Intertrial Rest Periods on Isometric Grip Strength Performance in Young Adults. *Occup Ther J Res* 9, 362–378
- Tsang P, Walton D, Grewal R, MacDermid J (2017): Validation of the Quick-DASH and DASH in Patients With Distal Radius Fractures Through Agreement Analysis. *Arch Phys Med Rehabil* 98, 1217-1222.e1
- Wadsten M, Buttazzoni G, Sjöden G, Kadum B, Sayed-Noor A (2017): Influence of Cortical Comminution and Intra-articular Involvement in Distal Radius Fractures on Clinical Outcome: A Prospective Multicenter Study. *J Wrist Surg* 06, 285–293
- Wei DH, Raizman NM, Bottino CJ, Jobin CM, Strauch RJ, Rosenwasser MP (2009): Unstable Distal Radial Fractures Treated with External Fixation, a Radial Column Plate, or a Volar Plate: A Prospective Randomized Trial. *J Bone Jt Surg-Am Vol* 91, 1568–1577
- Wichelhaus A, Gradl G, Mittlmeier T (2012): Die distale Radiusfraktur. *Orthop Unfallchirurgie Up2date* 7, 251–271
- Wichelhaus A, Wendt M, Mielsch N, Gradl G, Mittlmeier T (2015): Dupuytrenknotenbildung nach Operation einer distalen Radiusfraktur. *Handchir · Mikrochir · Plast Chir* 47, 38–43
- Wichelhaus A, Harms C, Neumann J, Ziegler S, Kundt G, Prommersberger KJ, Mittlmeier T, Mühldorfer-Fodor M (2018): Parameters influencing hand grip

strength measured with the manugraphy system. BMC Musculoskelet Disord 19, 54

Wilcke MKT, Abbaszadegan H, Adolphson PY (2007): Patient-perceived Outcome after Displaced Distal Radius Fractures. J Hand Ther 20, 290–299

Wilcke MKT, Abbaszadegan H, Adolphson PY (2011): Wrist function recovers more rapidly after volar locked plating than after external fixation but the outcomes are similar after 1 year: A randomized study of 63 patients with a dorsally displaced fracture of the distal radius. Acta Orthop 82, 76–81

Wilson K, Heyde R von der, Sparks M, Hammerschmidt K, Pleimann D, Ranz E, Rector J, Sniezak D (2014): The Impact of Demographic Factors and Comorbidities on Distal Radius Fracture Outcomes. HAND 9, 80–86

Wimer B, Dong RG, Welcome DE, Warren C, McDowell TW (2009): Development of a new dynamometer for measuring grip strength applied on a cylindrical handle. Med Eng Phys 31, 695–704

Wollstein R, Michael D, Harel H, Carlson L (2021): The Influence of Hand Dominance in Wrist Fracture Post-Operative Functional Evaluation. Plast Surg 29, 250–256

Yan B, Chen Y, Yin W (2019): Influence of distal radius fractures involving the intermediate column on forearm rotation. J Orthop Surg 14, 111

Yang Z, Lim PPH, Teo SH, Chen H, Qiu H, Pua YH (2018): Association of wrist and forearm range of motion measures with self-reported functional scores amongst patients with distal radius fractures: a longitudinal study. BMC Musculoskelet Disord 19, 142

Ydreborg K, Engstrand C, Steinvall I, Larsson E-L (2014): Hand Function, Experienced Pain, and Disability After Distal Radius Fracture. Am J Occup Ther 69, 6901290030p1

Yuan ZZ, Yang Z, Liu Q, Liu YM (2018): Complications following open reduction and internal fixation versus external fixation in treating unstable distal radius fractures: Grading the evidence through a meta-analysis. Orthop Traumatol Surg Res 104, 95–103

Zhang X, Zhao Y, Hu C, Yu K, Bai J, Tian D, Xu Y, Zhang B (2017): Comparative study of type B distal radius fractures with and without lunate facet involvement treated by volar locking plate, an observational study. *Int J Surg* 44, 317–323

9 Anhang

9.1 QuickDASH-Fragebogen

Tab. 9: QuickDASH-Fragebogen (Institute for Work & Health, Canada)

Schwierigkeiten mit folgenden Tätigkeiten					
Ein neues oder festverschlossenes Glas öffnen	1	2	3	4	5
Schwere Hausarbeit (z. B Wände abwaschen, Boden putzen)	1	2	3	4	5
Eine Einkaufstasche oder einen Aktenkoffer tragen	1	2	3	4	5
Ihren Rücken waschen	1	2	3	4	5
Ein Messer benutzen, um Lebensmittel zu schneiden	1	2	3	4	5
Einschränkungen bei Freizeitaktivitäten, bei denen auf Ihren Arm, Schulter oder Hand Druck oder Stoß ausgeübt wird (z.B. Golf, Hämmern, Tennis, usw.)	1	2	3	4	5
1 = Keine Schwierigkeiten, 2 = Geringe Schwierigkeiten, 3 = Mäßige Schwierigkeiten, 4 = Erhebliche Schwierigkeiten, 5 = Nicht möglich					
<hr/>					
In welchem Ausmaß haben Ihre Schulter-, Arm-oder Handprobleme Ihre normalen sozialen Aktivitäten mit Familie, Freunden, Nachbarn oder anderen Gruppen während der vergangenen Woche beeinträchtigt?	1	2	3	4	5
1 = Überhaupt nicht, 2 = Ein wenig, 3 = Mäßig, 4 = Ziemlich, 5 = Sehr					
<hr/>					
Waren Sie in der vergangenen Woche durch Ihre Schulter-, Arm- oder Handprobleme in Ihrer Arbeit oder anderen alltäglichen Aktivitäten eingeschränkt?	1	2	3	4	5
1 = Überhaupt nicht, 2 = Ein wenig, 3 = Mäßig, 4 = Ziemlich, 5 = Sehr					
<hr/>					
Schmerzen in Schulter, Arm oder Hand?	1	2	3	4	5
Kribbeln (Nadelstiche) in Schulter, Arm oder Hand	1	2	3	4	5
1 = Keine, 2 = Leichte, 3 = Mäßige, 4 = Starke, 5 = Sehr starke					
<hr/>					
Wie groß waren Ihre Schlafstörungen in der letzten Woche aufgrund von Schmerzen im Schulter-, Arm- oder Handbereich?	1	2	3	4	5
1 = Keine Schwierigkeiten, 2 = Geringe Schwierigkeiten, 3 = Mäßige Schwierigkeiten, 4 = Erhebliche Schwierigkeiten, 5 = Nicht möglich					

$$\left(\left[\frac{\text{Summe der Antwortpunkte}}{\text{Anzahl der beantworteten Fragen}} \right] - 1 \right) \times 25 = \text{QuickDASH-Score}$$

9.2 Handkraftmessungen mit dem großen Zylinder (200 mm Umfang)

Tab. 10 A: Absolute Gesamtkraft (in N) – großer Zylinder

	t ₃	t ₆	t ₁₂
	Median (Min. – Max.)		
Betroffene Seite	121 ^{a, c} (38,8 - 481)	139 ^{a, b, d} (36,4 - 570)	158 ^{b, e} (60,8 - 464)
Gesunde Seite	182 ^c (68,1 - 563)	182 ^d (71,2 - 536)	180 ^e (78,8 - 473)

Wilcoxon-Test: ^{a - e} p < 0,01

Tab. 10 B: Auf die gesunde Seite normierte Kraft (in %) – großer Zylinder

	t ₃	t ₆	t ₁₂
Relative Kraft	72,9 ^f (21,4 - 114)	84,5 ^{f, g} (48,7 - 144)	90,9 ^g (55,1 - 130)

Wilcoxon-Test: ^{f, g} p < 0,001

9.2.1 Auswertung der einzelnen Areale

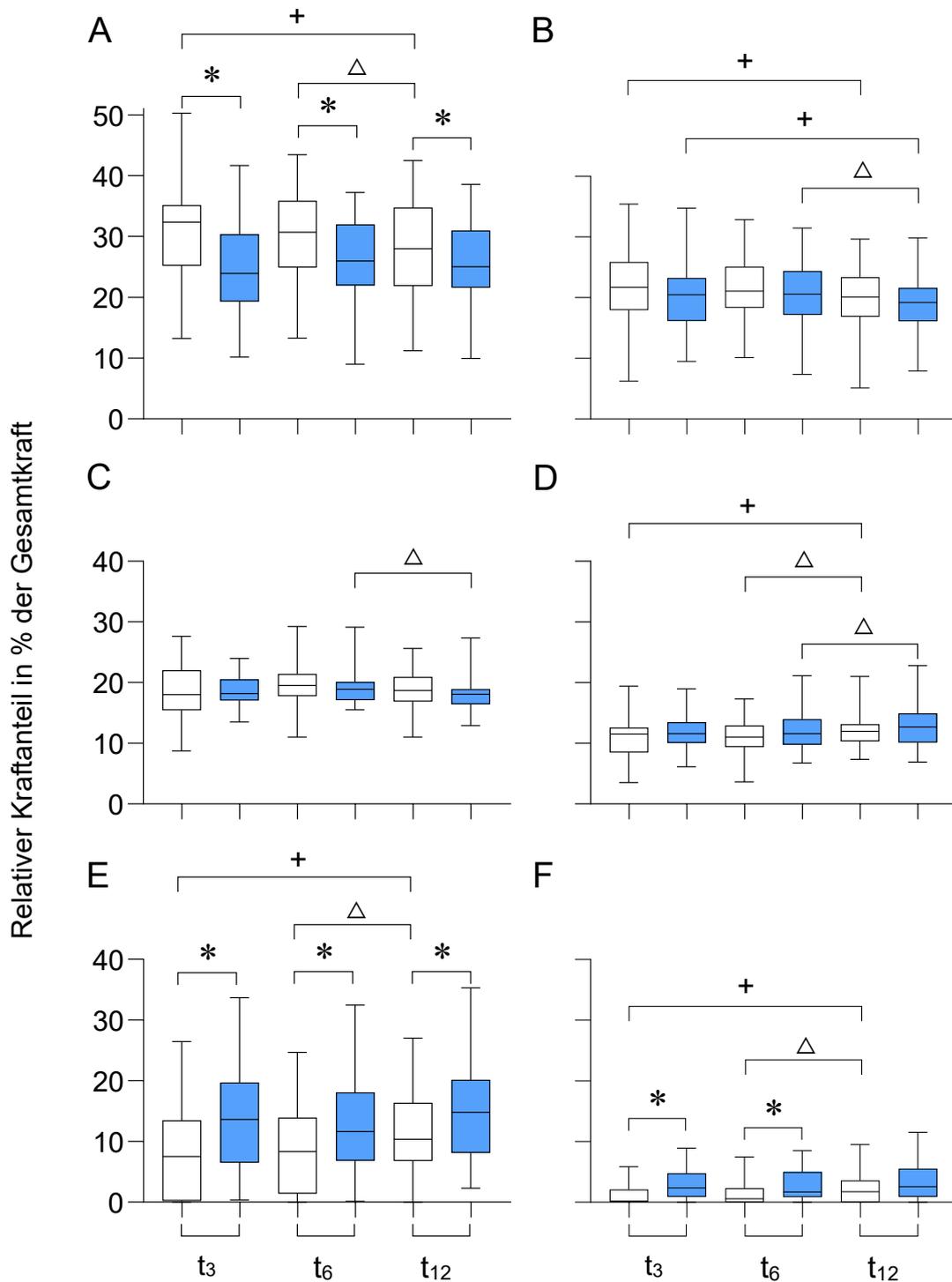


Abb. 11 A - F: Darstellung des relativen Kraftanteiles (großer Zylinder).
 A: 1. Fingerstrahl, B: 2. Fingerstrahl, C: 3. Fingerstrahl, D: 4. Fingerstrahl,
 E: Thenar, F: Hypothenar. 5. Fingerstrahl ohne signifikante Unterschiede.

□ Betroffene Seite ■ Gesunde Seite

Wilcoxon-Test: +, Δ, * p < 0,05

9.2.2 Unterscheidung nach Händigkeit

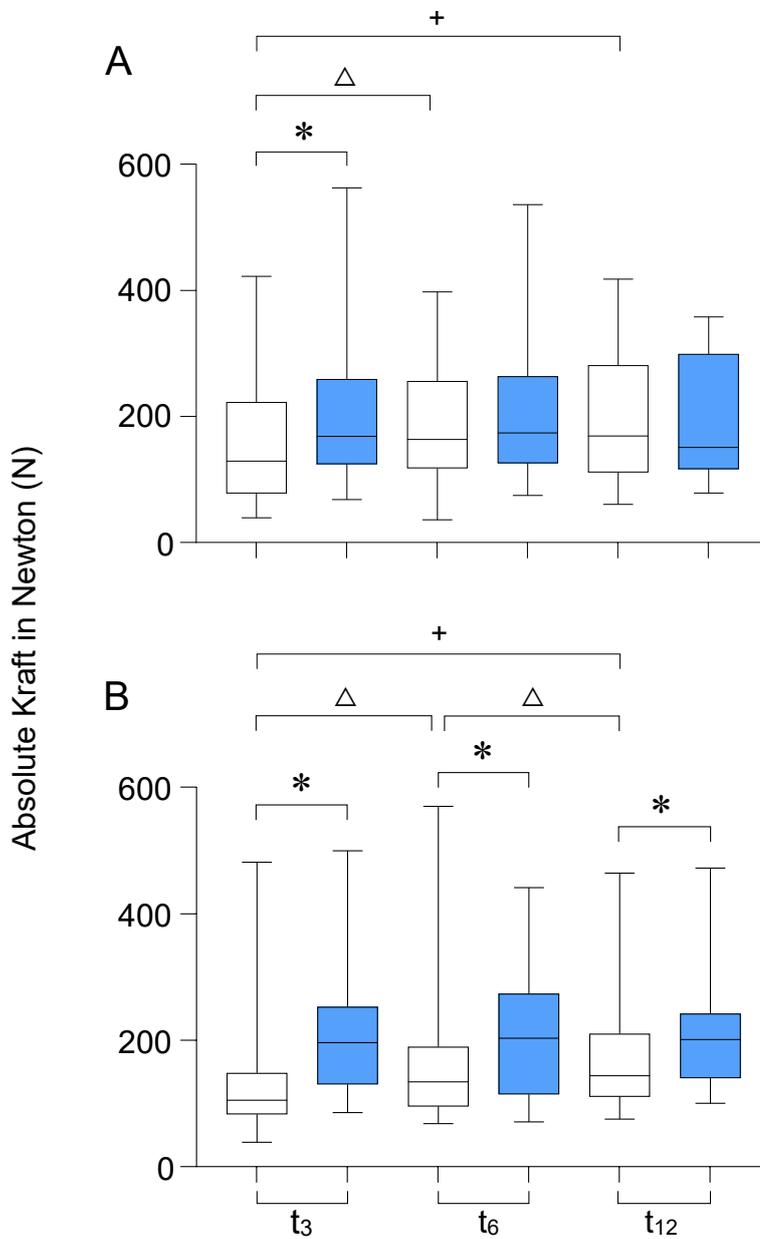


Abb. 12 A und B: Darstellung der absoluten Kraft bei Fraktur auf der dominanten (A) oder nicht dominanten Seite (B) für die Messungen mit dem großen Zylinder.

□ Betroffene Seite ■ Gesunde Seite

Wilcoxon-Test: +, Δ, * p < 0,05

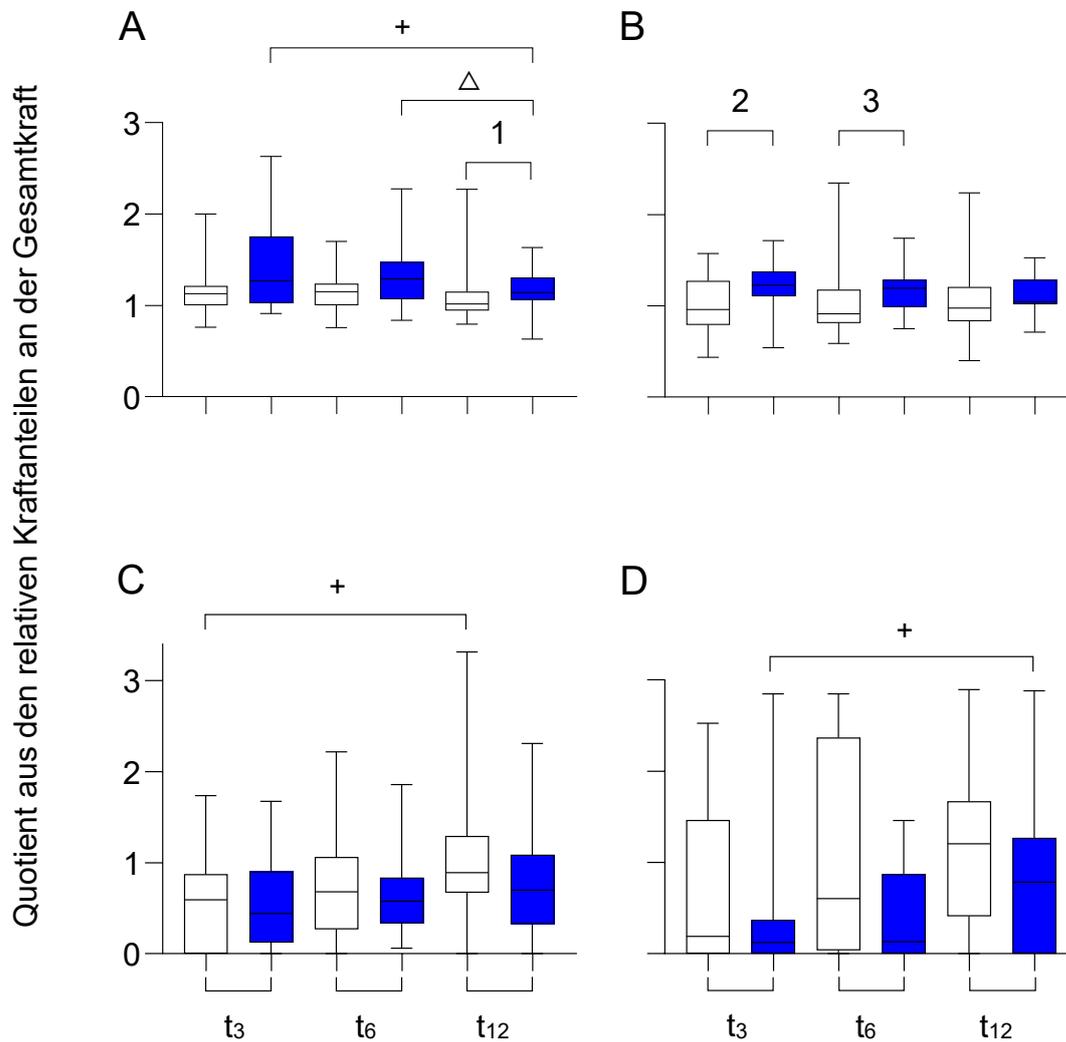


Abb. 13 A – G: Nach Händigkeit differenzierte Darstellung der Quotienten aus den auf die gesunde Seite normierten relativen Kraftanteilen (großer Zylinder).

A: 1. Fingerstrahl, B: 2. Fingerstrahl, C: Thenar, D: Hypothenar

□ Dominante Seite ■ Nicht dominante Seite

Wilcoxon-Test: $^+, \Delta$ $p < 0,05$

Mann-Whitney-U-Test: $^{1, 2, 3}$ $p < 0,05$

9.2.3 Korrelationsberechnungen

Tab. 11: Signifikante Korrelationen zwischen Handkraft (großer Zylinder), Alter, QuickDASH-Wert, Handspanne und Handsteifigkeit

		Alter	Quick-DASH-Score	Handspanne	Handsteifigkeit
	Quick-DASH-Score			r = -0,56	r = 0,41
t₃	Absolute Kraft - betroffene Seite	r = -0,42	r = -0,66	r = 0,52	r = -0,47
	Relative Kraft		r = -0,43	r = 0,66	
	Quick-DASH-Score	r = 0,47			
t₆	Absolute Kraft - betroffene Seite	r = -0,58	r = -0,55		r = -0,50
	Relative Kraft		r = -0,46	r = -0,45	
	Quick-DASH-Score	r = 0,49			
t₁₂	Absolute Kraft - betroffene Seite	r = -0,63	r = -0,45		r = -0,65
	Relative Kraft	r = -0,40			r = -0,52

Für die in dieser Tabelle aufgeführten Korrelationen gilt jeweils $p < 0,05$

Tab. 12: Signifikante Korrelationen zwischen der Kraftverteilung (großer Zylinder) und Finger- und Handbeweglichkeit

		Flexion	Extension	Radial- duktion	Ulnar- duktion	Hand- spanne	Hand- steifig- keit
	1. Finger- strahl	$r = -0,56$				$r = -0,45$	
t₃	Thenar			$r = 0,44$			
	Hypo- thenar					$r = 0,44$	
t₆	Thenar		$r = 0,46$		$r = 0,42$		$r = -0,51$
	1. Finger- strahl						
t₁₂	Thenar			$r = -0,48$			
	Hypo- thenar			$r = -0,51$			

Für die in dieser Tabelle aufgeführten Korrelationen gilt jeweils $p < 0,05$

9.3 Individuelle Daten für jeden Untersuchungsteilnehmer

9.3.1 Patientencharakteristika

Tab. 13: Patientencharakteristika

Patient	Alter bei Fraktur	Domi- nante Seite	Fraktur- Seite	Unfall- ursache	AO/OTA- Klassi- fikation	Ver- sor- gung	Besonderes
1	W 48,8	rechts	rechts	Sturz	A3.1	1	
2	W 67,6	links	links	Sturz	C1.2	1	Osteoporose
3	W 60,3	rechts	rechts	Sturz	A2.2	2	Hypertonus
4	W 76,2	rechts	links	Sturz	A2.3	1	Osteoporose, Hypertonus
5	W 60,2	rechts	rechts	Sturz	A3.1	1	
6	W 62,2	rechts	links	Sturz	C3.1	1	Materialentf.
7	W 60,0	links	rechts	Sturz	C2.2	1	Hypertonus
8	W 71,3	rechts	rechts	Sturz	A2.2	1	Hypertonus
9	M 32,7	rechts	rechts	Rasanz- trauma	C3.2	3a	
10	W 49,2	rechts	links	Sturz	A3.1	1	
11	W 56,0	rechts	rechts	Rasanz- trauma	A2.2	2	Sensibilitäts- störungen, Hypertonus
12	W 59,3	rechts	links	Sturz	C1.1	3	Materialentf.
13	W 56,3	rechts	links	Sturz	A2.2	1	
14	W 79,0	rechts	links	Sturz	A3.1	1	Diabetes mell.
15	W 56,3	rechts	links	Sturz	A2.2	1	Hypertonus
16	W 67,4	rechts	rechts	Sturz	A2.2	1	Fingergelenks- Arthrose, Osteoporose, Redislokation, Materialentf., Karpaltunnel- syndrom, Hypertonus
17	W 40,8	rechts	links	Sturz	A3.2	1	Materialentf.
18	M 60,3	rechts	rechts	Sturz	A2.2	1	Hypertonus

19	W	76,8	beid- händig, eher links	rechts	Sturz	A2.2	2	Osteoporose Sensibilitäts- störung, Hypertonus
20	W	74,2	rechts	links	Sturz	A2.2	1	Diabetes mell., Dupuytren- Kontraktur, Hypertonus
21	W	73,4	rechts	links	Sturz	A3.1	1	Osteoporose
22	M	26,5	rechts	rechts	Rasanz- trauma	A3.3	1	
23	W	59,7	rechts	rechts	Sturz	A3.2	1	Diabetes mell.
24	W	73,3	rechts	rechts	Sturz	C1.2	1	Osteoporose
25	W	57,9	rechts	links	Sturz	C1.3	1	Rhizathrose re.
26	W	74,2	rechts	links	Sturz	A2.3	1	Osteoporose
27	W	63,5	rechts	rechts	Sturz	B2.3	1	Osteoporose, Hypertonus, Scapho-lunäre Dissoziation
28	W	75,2	rechts	links	Sturz	C2.3	4 → 1	Osteoporose, Hypertonus
29	W	42,9	rechts	rechts	Sturz	A3.3	1	
30	M	28,7	rechts	rechts	Rasanz- trauma	A2.3	1	Sensibilitäts- störung
31	W	59,5	rechts	links	Rasanz- trauma	C1.3	1	Materialentf.
32	W	63,5	rechts	links	Sturz	C2.3	1	
33	M	40,4	rechts	links	Rasanz- trauma	A3.3	1	
34	W	61,3	rechts	rechts	Sturz	B3.3	1	Rhizathrose re.
35	W	71,0	rechts	rechts	Sturz	A3.1	1	Fingergelenks- Arthrose

1 = volare winkelstabile Plattenosteosynthese; 2 = Radiusnagel;

3 = dorsale Plattenosteosynthese; 3a = dorsale Doppelplattenosteosynthese;

4 = Fixateur externe (temporär)

Rasanztraumata: Fahrradsturz, Sturz aus einer Höhe von über 2 Metern, Sportunfall beim Fußballspielen oder Schlittschuhlaufen.

9.3.2 Subjektive Handfunktion

Tab. 14: Ergebnisse des QuickDASH-Fragebogens

Patient	t ₃	t ₆	t ₁₂
1	22,73	2,27	0
2	20,45	2,27	0
3	47,73	38,63	29,54
4	18,18	22,73	18,18
5	38,64	18,18	11,36
6	38,64	20,45	18,18
7	18,18	4,45	0
8	27,27	13,63	27,27
9	6,82	2,27	6,82
10	25	2,27	2,27
11	25	11,46	6,82
12	45,45	20,45	15,91
13	15,91	0	2,27
14	25	22,73	18,18
15	18,18	2,27	2,27
16	61,36	61,36	29,55
17	36,36	40,91	18,18
18	25	13,64	13,64
19	9,09	9,09	2,27
20	38,64	25	25
21	29,55	31,82	2,27
22	13,64	6,82	0
23	50	45,45	13,64
24	43,18	47,73	40,91
25	34,09	15,91	11,36
26	18,18	15,91	4,55
27	31,82	18,18	13,64
28	29,55	27,27	27,27
29	15,91	11,36	0
30	11,36	11,36	9,09
31	27,27	27,27	13,64
32	40,91	29,55	13,36
33	6,82	2,27	0
34	13,64	11,36	11,36
35	40,91	38,64	15,91

9.3.3 Handgelenks- und Fingerbeweglichkeit

Tab. 15: Bewegungsumfang, 1. Messung

Pa- tient	Extension		Flexion		Radialduktion		Ulnarduktion	
	Be- troffene Seite	Ge- sunde Seite	Be- troffene Seite	Ge- sunde Seite	Be- troffene Seite	Ge- sunde Seite	Be- troffene Seite	Ge- sunde Seite
1	30	65	35	80	10	10	30	40
2	50	60	65	75	20	20	40	35
3	45	70	55	70	5	30	25	45
4	75	80	50	50	20	30	40	45
5	70	90	70	80	50	50	15	40
6	45	60	35	60	15	25	35	35
7	60	65	45	60	25	25	35	50
8	55	75	45	65	25	30	35	35
9	70	80	65	70	25	30	45	45
10	65	65	70	75	20	25	45	45
11	65	70	45	70	15	25	35	40
12	50	70	15	75	20	25	15	50
13	70	75	60	70	20	25	40	40
14	65	65	55	55	25	25	35	40
15	55	80	40	65	15	20	45	40
16	50	55	50	75	20	25	30	30
17	45	75	40	55	5	10	45	50
18	40	75	40	60	10	25	35	60
19	65	65	60	70	20	20	45	40
20	55	55	65	65	5	5	15	15
21	50	75	60	75	10	10	30	50
22	70	75	60	75	15	20	35	45
23	15	55	35	75	20	30	15	40
24	40	50	40	50	10	15	30	50
25	60	70	40	75	20	30	30	55
26	65	70	65	70	30	20	55	40
27	65	70	60	80	25	25	35	45
28	55	55	40	70	15	20	30	40
29	55	65	50	70	20	30	40	45
30	60	70	70	70	20	20	40	45
31	55	70	45	80	20	20	40	40
32	15	40	30	65	10	25	20	50
33	60	70	55	75	25	25	50	50
34	55	70	50	80	20	30	25	40
35	45	55	35	60	15	25	20	35

Tab. 16: Bewegungsumfang, 2. Messung

Pa- tient	Extension		Flexion		Radialduktion		Ulnarduktion	
	Be- troffene Seite	Ge- sunde Seite	Be- troffene Seite	Ge- sunde Seite	Be- troffene Seite	Ge- sunde Seite	Be- troffene Seite	Ge- sunde Seite
1	70	70	60	75	20	40	30	45
2	50	50	70	75	25	25	45	45
3	50	55	50	80	20	30	30	35
4	70	80	50	60	20	25	35	35
5	80	85	65	75	25	30	50	35
6	45	55	40	45	20	20	40	40
7	65	65	60	70	15	20	35	50
8	65	70	50	70	20	15	25	45
9	75	80	60	70	20	25	45	45
10	70	70	65	65	25	25	45	45
11	65	65	60	70	20	25	35	40
12	50	60	40	70	25	25	25	45
13	70	70	60	70	20	20	40	40
14	50	50	60	70	20	25	35	35
15	70	70	60	85	15	15	40	45
16	40	55	60	65	20	20	25	40
17	40	70	45	65	25	20	35	35
18	50	65	55	65	15	25	45	45
19	60	60	70	70	25	25	45	50
20	35	40	60	60	10	15	30	40
21	50	55	60	80	20	20	20	35
22	70	75	75	75	20	20	40	40
23	30	60	45	75	20	30	15	45
24	40	50	30	45	15	15	25	40
25	65	75	60	80	20	30	40	50
26	70	70	65	70	35	35	45	45
27	70	70	65	75	15	25	35	45
28	55	70	50	70	25	25	30	35
29	60	60	55	65	25	25	40	40
30	65	65	75	75	25	25	40	40
31	55	70	50	80	20	20	35	40
32	30	50	40	85	20	30	25	45
33	70	70	55	70	25	25	40	40
34	60	70	55	80	20	25	35	35
35	50	55	35	60	15	25	20	30

Tab. 17: Bewegungsumfang, 3. Messung

Pa- tient	Extension		Flexion		Radialduktion		Ulnarduktion	
	Be- troffene Seite	Ge- sunde Seite	Be- troffene Seite	Ge- sunde Seite	Be- troffene Seite	Ge- sunde Seite	Be- troffene Seite	Ge- sunde Seite
1	75	80	65	70	25	25	45	45
2	60	60	75	75	25	25	35	35
3	50	65	35	70	20	30	25	25
4	65	75	60	60	20	25	40	40
5	80	80	60	75	20	30	35	35
6	55	55	50	60	20	20	40	40
7	60	65	70	75	20	20	35	45
8	60	65	45	55	25	15	25	40
9	70	70	50	65	25	25	45	45
10	60	65	65	70	25	20	40	40
11	65	65	60	65	20	20	35	35
12	55	75	35	70	25	25	35	40
13	70	75	60	70	20	20	40	40
14	55	35	60	70	25	30	30	15
15	75	75	65	65	20	15	40	40
16	50	60	70	70	15	15	25	30
17	65	70	55	60	25	25	40	40
18	55	65	60	60	20	25	35	40
19	60	60	65	75	25	25	35	40
20	40	35	65	60	10	10	40	40
21	60	70	70	70	20	20	40	40
22	70	70	70	70	25	25	40	40
23	30	55	40	65	15	30	25	40
24	45	55	35	50	15	20	35	40
25	-	-	-	-	-	-	-	-
26	-	-	-	-	-	-	-	-
27	60	70	70	80	25	25	40	40
28	50	70	50	65	25	25	40	40
29	-	-	-	-	-	-	-	-
30	65	65	75	80	20	25	40	40
31	-	-	-	-	-	-	-	-
32	-	-	-	-	-	-	-	-
33	-	-	-	-	-	-	-	-
34	-	-	-	-	-	-	-	-
35	50	60	60	65	20	20	30	35

Tab. 18: Handspanne

Pa- tient	t ₃		t ₆		t ₁₂	
	Betroffe- ne Seite	Gesunde Seite	Betroffe- ne Seite	Gesunde Seite	Betroffe- ne Seite	Gesunde Seite
1	18,5	19	19,5	20	20	20,5
2	19	19	19,5	19,5	19,5	20,5
3	17	18	17,5	18	18	18
4	19,5	19	20,5	20,5	21	20,5
5	20	20	19,5	19,5	19,5	20
6	18	19	18,5	19	18,5	19
7	19	19	19,5	20	20,5	20
8	-	-	19	20	18	19,5
9	23	23	23,5	24	23	24
10	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5
11	20	20	20	20	20	20
12	17	20	20,5	21	20	20,5
13	20,5	21	19	21	21	21,5
14	21	21	21	19,5	21	20,5
15	-	-	20,5	20	21	20,5
16	18	20	17,5	19,5	18	19,5
17	17,5	17,5	17	17,5	17	17,5
18	23,5	24,5	23	24,5	23	24
19	20	20,5	20	20,5	20	20,5
20	20,5	20	21	20	20,5	20,5
21	18,5	20	19	19,5	20	20
22	23	23	23	23	23	23
23	16	18	16,5	18	17	18
24	19,5	20	19	19,5	19,5	20,5
25	18	21	19,5	21,5	-	-
26	21	21,5	21	21	-	-
27	18	19	18	19	18	18,5
28	20,5	22	19,5	21	21,5	21,5
29	20	20,5	21	20	-	-
30	22	22	22	22	22,5	22,5
31	21	21,5	20,5	21,5	-	-
32	20	21,5	20,5	21,5	-	-
33	24	23,5	24	23,5	-	-
34	21,5	22,5	22	22,5	-	-
35	17	19	18	20	18,5	19,5

Tab. 19: Fingerkuppen-Hohlhand-Abstand, 1. Messung

Patient	Finger auf der betroffenen Seite				Finger auf der gesunden Seite			
	II	III	IV	V	II	III	IV	V
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0
7	2	2	5	0	1	0	0	0
8	0	1	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0
12	1	0,5	0,5	0,5	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	1	1	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0
16	2	2	3	3	2	3	2	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0
18	2	2	2	1	0	0	1	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	2	3	0	0	0	0	0
21	0	0	0,5	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0,5	0
25	2	2	2	2	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0,5	0	0	0	0	0	0	0
28	1	0	0	0,5	0	0,5	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0
32	2	2	2	2	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0	0	0
35	2	2	2	1,5	0	0	0	0

Tab. 20: Fingerkuppen-Hohlhand-Abstand, 2. Messung

Patient	Finger auf der betroffenen Seite				Finger auf der gesunden Seite			
	II	III	IV	V	II	III	IV	V
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0
7	1	1	3	0	1	1	1	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	1	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	1	1	2	1
17	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0,5	0	0,5	0	0	0	0,5	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	1	0,5	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0
24	1	1	1,5	0,5	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0,5	0,5	0	0,5	0,5	0,5	0	0,5
29	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0
32	2	2	2	2	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0	0	0
35	1	1	2	1	0	0	0	0

Tab. 21: Fingerkuppen-Hohlhand-Abstand, 3. Messung

Patient	Finger auf der betroffenen Seite				Finger auf der gesunden Seite			
	II	III	IV	V	II	III	IV	V
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	5	0	0	0	0	0
8	0	0	0,5	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	2	0
14	0	0	0,5	0	0	1	1	1
15	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	2	1	2	3	1	0,5
17	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0,5	0,5	0	0	0	0	0,5	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0,5	1	0	0	0,5	0,5	0
21	0	0	0,5	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0
24	2	2	2	0,5	0	0	0,5	0
25	-	-	-	-	-	-	-	-
26	-	-	-	-	-	-	-	-
27	0	0	0	0	0	0	0	0
28	1	0,5	0	0,5	1	0,5	0	0
29	-	-	-	-	-	-	-	-
30	0	0	0	0	0	0	0	0
31	-	-	-	-	-	-	-	-
32	-	-	-	-	-	-	-	-
33	-	-	-	-	-	-	-	-
34	-	-	-	-	-	-	-	-
35	2	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0	0

9.3.4 Messdaten kleiner Zylinder (150 mm Umfang)

Tab. 22: Handkraft (in N) – kleiner Zylinder (150 mm Umfang)

Patient	t ₃		t ₆		t ₁₂	
	Betroffene Seite	Gesunde Seite	Betroffene Seite	Gesunde Seite	Betroffene Seite	Gesunde Seite
1	163,9	282,2	215,1	291,4	353,7	372,4
2	179,1	278,2	205,5	235,8	258,1	246,9
3	115	309,6	141,3	250,7	159,5	155,2
4	128,1	146,2	125,4	142,4	156,4	147,4
5	229,1	209,3	251,7	206,7	297,7	241,6
6	182,3	338,9	242,5	354,8	233,0	364,4
7	107,7	123,7	98,9	74,1	167,4	208,1
8	159,7	209,3	193,9	205,2	150,1	126,8
9	539,2	711,5	510,1	681,0	408,1	419,4
10	290,3	446,1	322,2	365,0	390,7	376,2
11	158,6	240,6	195,2	248,8	266,1	297,2
12	62,5	350,7	264,6	251,5	252,0	303,4
13	154,5	218,3	199,0	278,6	229,4	239,2
14	135,6	216	182,0	225,9	241,8	238,4
15	172,8	242,2	236,0	290,2	259,4	284,9
16	89,2	172	94,0	150,6	134,5	154,6
17	114,4	160,8	91,0	151,7	132,0	190,3
18	306,7	496,9	338,2	375,1	443,5	370,2
19	137,9	161,2	112,2	136,0	138,6	147,8
20	72,8	114,7	67,0	117,0	100,2	129,2
21	106,8	150,5	144,1	244,8	191,9	230,4
22	351,1	421,7	440,1	411,0	541,8	456,2
23	66,2	223	147,8	226,7	226,0	279,2
24	116,5	128,3	51,3	113,3	93,8	113,3
25	55	272,4	171,7	294,2	196,8	287,0
26	171,3	326,1	230,0	307,4	249,2	319,8
27	108,4	129,2	148,7	120,7	162,8	125,4
28	134,3	257	171,6	240,7	158,9	218,4
29	157,9	135,7	169,6	134,7	234,7	186,7
30	415,2	437,6	400,0	387,6	475,0	466,2
31	207,5	347,9	248,6	409,9	220,7	291,0
32	59,4	273,2	164,7	301,4	207,4	287,2
33	572,1	610,5	755,7	738,6	666,2	664,8
34	288,5	226,4	248,0	216,5	169,7	181,7
35	64,5	119,9	54,1	136,2	142,0	110,5

Tab. 23: Kraftanteil 1. Fingerstrahl (in N) – kl. Zylinder (150 mm Umfang)

Patient	t ₃		t ₆		t ₁₂	
	Betroffene Seite	Gesunde Seite	Betroffene Seite	Gesunde Seite	Betroffene Seite	Gesunde Seite
1	41,2	27,8	38,3	37,4	66,2	35,6
2	51	56	54,3	49,2	60,3	57,6
3	35,7	85,6	37,3	55,3	43,6	41,9
4	35,8	26,1	30,2	31,8	40,2	36,3
5	51	49,6	63,1	37,5	40,1	42,1
6	54,2	80,4	60,3	72,4	57,6	78,5
7	27,3	32,5	31,6	26,1	44,8	53,7
8	23,5	27,1	30,9	29,2	17,1	15
9	60,3	67,7	71,1	61,8	66,5	53,3
10	58,7	67,2	51,2	41,1	65,6	44,6
11	59,3	74,5	67,6	73,4	66,5	66,8
12	19,8	61,4	58,4	40,6	59	57,5
13	40,9	36,2	45,8	44	40,4	44,7
14	27,2	48,6	30,9	42,2	37	51,7
15	44,4	49,1	55,3	55,4	57,9	53,5
16	29,5	53,5	31,6	44,4	48,1	51,6
17	30,4	37,6	31,1	42,6	36,9	43,5
18	86,8	61	66,6	69,5	90,9	82,5
19	14,6	14,9	20,2	16,7	26,3	35,2
20	25,5	38	22	44	26,1	24,5
21	35,9	36,3	44,2	44	48,7	47,1
22	58,8	74,3	90,1	83,2	97,3	87,1
23	18,8	40,2	42,5	51,7	43,2	60,2
24	28,5	29,7	15,4	30,1	29,2	32,8
25	21,4	40,5	40,7	39,7	44,6	49
26	23,5	48	33,4	42	39,3	43,2
27	25	19,2	24,6	22,2	28,6	19,8
28	41	27,3	38,2	25	48,7	31,5
29	42,2	27,1	42,6	28,3	55,9	45,1
30	63,9	76,7	69,9	61,9	88,3	80
31	43,1	57,5	54,3	53,7	44,7	31,6
32	18,1	29,5	45,3	50,6	43,8	47
33	43,9	24,1	45,2	28,3	26,8	16,1
34	64,5	45,6	45,7	26,3	50,3	20,3
35	19,8	22,8	17,2	27,1	31,1	20

Tab. 24: Kraftanteil 2. Fingerstrahl (in N) – kl. Zylinder (150 mm Umfang)

Patient	t ₃		t ₆		t ₁₂	
	Betroffene Seite	Gesunde Seite	Betroffene Seite	Gesunde Seite	Betroffene Seite	Gesunde Seite
1	50,3	42,9	58,1	60,1	82,6	70,4
2	49,5	67	56,9	57,5	66,3	49,3
3	27	66,5	31,7	49	37,2	33,6
4	41,9	28,3	34,6	24,8	41	24,9
5	62	56,3	66,3	53,6	54,4	54
6	46,4	38,2	59,3	40,2	53,3	37
7	16	29,8	23,8	16	33,6	50
8	16	32,7	21,5	38,4	9,9	14,9
9	92,4	91,8	91,7	80	67,5	54,4
10	75,9	113,6	87,9	85,5	79,5	82,2
11	63,1	84,7	64,8	75,7	75,3	91,4
12	18,6	61,2	47,3	41,5	41,5	46,6
13	30,6	36,8	33,9	47,9	44,5	47,4
14	29,3	36,3	32,8	32,2	51,3	45,2
15	43,7	50	52,1	55,9	56,1	42,8
16	20,3	34,2	22,4	28	28,6	47,9
17	31,3	36,4	28,8	28,8	34,6	37,9
18	72,1	105,5	63,4	76,5	87,9	86,1
19	27,6	30,3	21,9	25	27,6	28,8
20	23,6	30	22,5	37,1	27,3	32,2
21	24,1	29,5	32,5	48,1	34,9	37,7
22	88,6	88,1	118,9	110,3	135,8	122,4
23	10,1	44,4	18	37,4	34,6	55,1
24	26,6	36,3	7,2	31,4	23,5	30,1
25	11,5	46,1	46,5	59	41,2	57
26	42,9	58,4	54,7	61,5	60,2	70,3
27	13,3	12,1	31,6	13,7	30	15,2
28	30,8	51	53,9	42,2	30,1	48,2
29	36,4	44,7	36,1	30,2	53,9	40,3
30	111,5	120,6	95,8	104,2	113,8	119,6
31	40,9	75,4	46,9	78,3	52,2	55,1
32	12,8	26,8	27,2	33,3	33,6	32,1
33	93,5	92,6	128,9	112,9	100,8	101,8
34	75,3	60,6	66,7	47,9	56,1	43,5
35	10,5	19,9	7,4	19,1	18,8	14,5

Tab. 25: Kraftanteil 3. Fingerstrahl (in N) – kl. Zylinder (150 mm Umfang)

Patient	t ₃		t ₆		t ₁₂	
	Betroffene Seite	Gesunde Seite	Betroffene Seite	Gesunde Seite	Betroffene Seite	Gesunde Seite
1	36	55,2	53,8	53,5	69,1	84,1
2	40	55,9	52,8	56,2	59	62,6
3	18,6	69,3	17,5	55,5	27,8	31,5
4	19,9	41	23,9	34,6	37,7	35,9
5	46,7	44,8	46,5	43,3	63,5	53
6	39,4	73,5	52,4	66,3	48,2	65,9
7	23,7	26,2	24,5	17,8	23,7	47,2
8	42,5	45,6	44	41,8	38,4	31,9
9	76,3	117,2	94,5	126,4	68	96,4
10	54,1	87,2	61,9	68,7	77,7	70
11	28	52,1	34,4	53,2	61,5	67,9
12	8	58,8	57,5	43,3	66,4	61,2
13	46,6	43,2	65,7	53	64,6	36,8
14	30,2	37,8	44	43,3	51	36,2
15	41,9	44,3	56,8	61,2	58,8	72,9
16	27,4	43,3	25,6	38,1	35,9	20
17	17,7	24,5	8,5	25,9	21,7	35,3
18	36,6	107,9	76,5	75,1	92,2	82,1
19	25,7	31,9	17	25,4	20,8	34,2
20	12	31,9	11,8	22	23,2	36,5
21	20,2	29,8	28,5	40,4	38,8	41,7
22	97,6	100,3	99,4	91,1	123,6	109
23	12,8	45	27,4	44,4	50,5	55,7
24	23,5	18,9	13,8	17,8	18	18,2
25	11,6	54,4	34,9	54,3	41,7	55,9
26	45	78,3	55,7	66,9	49,5	56,2
27	16	25,4	28,1	28,9	32,5	25,8
28	24,9	51,2	38,6	48,4	34,4	37,4
29	36,2	21,2	36,2	23,2	46,1	33,1
30	86	75,2	70,4	77,7	79,4	70
31	47,8	63,6	45,4	71,9	35,4	53
32	20,9	69,7	49,9	66,3	58,9	73,3
33	131	122,2	149,1	151,1	135,4	134,3
34	56,1	50,4	54,1	51,7	31,4	39
35	17,1	21,7	12,3	25,9	36,5	20,4

Tab. 26: Kraftanteil 4. Fingerstrahl (in N) – kl. Zylinder (150 mm Umfang)

Patient	t ₃		t ₆		t ₁₂	
	Betroffene Seite	Gesunde Seite	Betroffene Seite	Gesunde Seite	Betroffene Seite	Gesunde Seite
1	10,6	40,3	20,2	36,7	37,7	50,7
2	18,4	34,6	22,2	28	30,4	35,5
3	16,6	44,5	19,1	39,3	24,7	25,9
4	15,1	20,5	18,1	20,6	17,4	22,2
5	26,7	29,3	29,2	28,2	44,2	33,7
6	23,3	62,5	34	70,2	29,4	71,9
7	13,5	13,6	9,4	6,5	20,5	18,4
8	28,5	34,7	39,6	29,9	33,5	26,6
9	56,8	93	52,6	89,5	44,8	61,2
10	35,3	45,3	36,8	49	47,3	57,8
11	4,2	9,5	11,6	22,2	22	26,8
12	6,9	51,4	32,5	36,8	33,5	47,2
13	16,8	33,5	26,4	49,3	31,7	33,5
14	15	36,9	30,2	44,9	34,5	38,5
15	16,7	27,2	24,5	29,5	32,4	38,5
16	6,1	19,6	6,6	22,6	9,5	12,9
17	11,9	15,9	8	17	14,4	20,8
18	36,5	74,2	57,2	52,4	77,5	48,7
19	20,8	23	12,4	18,8	18,2	17,2
20	7,3	10,5	6,3	8,3	10,6	14,8
21	11,4	21,1	18,1	34	28,5	30,3
22	36,3	59,1	33,6	50,1	48,9	47,9
23	9,4	29,2	28,6	31,9	35,1	37
24	12,2	8,8	6,9	12,2	7,5	10,6
25	5,5	29,8	19,1	34	23,7	30,8
26	21,8	45,4	24,9	42,8	28,5	39,7
27	17,9	22,9	18,9	20,9	22,5	19,3
28	20,9	34,2	15,6	33,8	23,9	27,4
29	19,5	13,4	21,7	18,3	29,9	25,1
30	48,9	46,4	51,1	44,2	54,3	42,3
31	30,9	42,8	36,9	59,1	28,2	39,1
32	6,1	50,3	25,9	54,3	38,4	56,7
33	84,8	89,3	107,1	107,5	100,1	105,5
34	41,5	39,2	43,4	42,4	18,7	37,9
35	8,7	29,6	8,4	36,6	25,3	32,4

Tab. 27: Kraftanteil 5. Fingerstrahl (in N) – kl. Zylinder (150 mm Umfang)

Patient	t ₃		t ₆		t ₁₂	
	Betroffene Seite	Gesunde Seite	Betroffene Seite	Gesunde Seite	Betroffene Seite	Gesunde Seite
1	8,9	15,6	4,5	13,5	14,6	19,5
2	15,4	17,6	16,1	18	16,6	13,2
3	14,6	25,4	23,3	21,3	11,3	14,3
4	8,3	6,5	10,5	10,2	5,7	12,2
5	9,6	9,5	11,4	10,9	23,1	16,3
6	10,3	38,3	18,6	49,8	20,9	52,6
7	8,3	10,6	2,2	5,7	21,8	10,3
8	13,5	12,3	17,9	15,6	13,6	12,4
9	47,1	46,9	24,5	44,7	28	14,9
10	15,4	20,3	16,6	18,6	26,4	27,4
11	2,1	6,9	6	9,7	9,9	13,4
12	6	33	13,2	19,6	8,8	17
13	11,7	11,3	8,2	13,9	7,3	14,9
14	6,7	15,4	11,3	21,6	13,4	17,4
15	9,8	12,7	10,8	10,1	15,3	11,7
16	4,5	11	4,8	12,4	9,1	9,4
17	11,3	16	9,3	17,1	8	19,5
18	22,8	25,1	20,5	25,3	32,9	31,6
19	15	15,3	15,1	11,1	15,7	11,9
20	3,6	3	2,2	3,7	4,9	3,5
21	14,3	12,1	19,2	22,7	21,8	25,5
22	12,7	31,8	21,5	18,5	28,3	15,5
23	5,4	11,8	15,4	20,8	17,8	21
24	4,1	5,4	2,2	9,8	8,4	12,4
25	3,3	19,9	10,6	22,4	16,5	20,4
26	3,6	8,9	7,7	14,8	8	21,8
27	12,6	13,1	9,7	11,7	11,7	13,2
28	11,5	22,8	7,5	29	13	22,1
29	5,5	9	8,1	9,3	10,1	9
30	15,3	20,8	21,9	16,8	18,2	21,2
31	11,4	25,5	24,4	33,5	16,3	19,6
32	1,2	15,6	6,1	19	10,3	12
33	22,8	33,4	27,4	34,4	29,4	49,9
34	20,1	13,7	11,7	10,9	6,7	8,8
35	6,7	10,2	6,9	7,5	15,8	7,1

Tab. 28: Kraftanteil Thenar (in N) – kleiner Zylinder (150 mm Umfang)

Patient	t ₃		t ₆		t ₁₂	
	Betroffene Seite	Gesunde Seite	Betroffene Seite	Gesunde Seite	Betroffene Seite	Gesunde Seite
1	17,1	78,4	28,4	57,1	62,1	72
2	3,3	34,4	2,5	21,4	13,7	19,6
3	1,7	13,8	10,2	25,8	12,7	7,3
4	5,3	17	6,9	15,3	8,9	12,2
5	19,1	13,1	21,4	21,6	46,8	26,1
6	7,8	18,9	15,4	27,5	19,6	21,9
7	9	7,2	6	1,5	11,9	20,9
8	18,7	35,7	21	32,3	21,2	12
9	157,3	227	134,2	221,8	113,1	118,2
10	33,9	72,7	48,3	67,3	64,9	52,4
11	1,9	11,6	8,4	12,4	23,9	25
12	3,1	58,6	41	51,8	25,1	47,6
13	5,4	37,5	14	45,1	22,9	45,2
14	21,8	32,7	24,7	33,4	41,2	38
15	12,9	45,8	28,6	57,8	33	53,4
16	1,4	9,4	2,1	5,1	3,3	12
17	12	25	5,3	16,7	16,1	27,9
18	30,6	78,4	19,9	40,7	26,9	23
19	12,8	17,7	16,2	21,1	16,3	13,7
20	0,9	0,7	1,9	1,2	7,6	13,4
21	0,9	13,8	0,1	33,1	8,4	27,2
22	37,2	42,2	54,3	44,6	77,1	60,8
23	5,6	36,6	6,7	22,4	28,7	31,7
24	15,8	21,9	5,6	6,3	7,2	7,2
25	1,8	64,9	16,4	71,9	23,6	60,9
26	20,7	54,7	32	50,2	38,3	51,5
27	18,9	27,6	28,4	16,1	30,1	20,7
28	4,6	50,3	13,9	39,2	7,3	45,4
29	17	19	20,1	22,6	35,3	30
30	69,1	86,2	71,4	74,6	97,6	103,6
31	22	50,8	29,3	60,7	36,3	56
32	0,1	27,9	6,6	37,2	13,8	33,5
33	129,3	192,6	206,5	230,4	185,3	168,5
34	22,2	14,9	18,9	30,9	6,7	23,1
35	0,3	6,9	0,3	8,6	7,3	6,8

Tab. 29: Kraftanteil Hypothenar (in N) – kleiner Zylinder (150 mm Umfang)

Patient	t ₃		t ₆		t ₁₂	
	Betroffene Seite	Gesunde Seite	Betroffene Seite	Gesunde Seite	Betroffene Seite	Gesunde Seite
1	0,8	21,6	10,7	31,2	21,8	39,8
2	1,7	13	1,4	7,3	10	8,1
3	1,2	5,1	2	3,9	1,8	0,9
4	2,1	6,7	1,2	4,6	5,8	3
5	13,4	6,8	13,2	10,9	25,5	17,1
6	1	25,3	1,2	27,8	3,5	35,5
7	9,3	3,7	1,1	0,5	11,1	7,2
8	16	21	18,6	18,4	15,1	14,1
9	50	68,3	41,2	56,5	20,2	20,4
10	17,9	39,3	20,5	34,5	29,3	44,2
11	0,1	0,6	1,7	2,1	6,7	6
12	0,1	26,7	14,8	17,9	16,7	26,6
13	2,5	19,8	4,9	25,1	17,3	16,1
14	5,7	8,5	6,6	8	13,4	11,8
15	3,4	12,3	7,7	18,7	5,5	11,9
16	0,2	1,3	1	0,6	0	0,5
17	0	5,1	0	3,6	0,2	4,9
18	21	44,5	33,9	34,3	34,8	14,8
19	21,6	26,8	8,8	18,6	13,5	6,5
20	0	0,5	0	0,5	0	4
21	0,2	8,1	1,6	22,3	10,9	20,8
22	19,6	23,6	20,3	12,4	29,4	13,9
23	4	15,9	8,4	18	15,4	18,1
24	5,9	7,3	0,1	6	0	1,8
25	0	16,6	3,8	12,7	5,3	13,1
26	13,2	32,7	21,2	29,7	25,1	36,8
27	4,8	8,7	6,9	7,7	7,5	11,3
28	0,4	19,9	4	21,8	1,3	5,9
29	0,7	1,3	4,5	2,7	4,2	3,7
30	21,2	11,2	20	8,1	23,2	26,9
31	11,1	30,6	11,2	51,5	7	35,4
32	0	52,5	3,7	39,5	7,9	33,5
33	65,6	56,4	91,9	73,3	89,3	88,2
34	9,2	2,4	7,2	5,4	0	8,8
35	1,4	8,2	1,5	11,2	7,2	9,2

9.3.5 Messdaten großer Zylinder (200 mm Umfang)

Tab. 30: Handkraft (in N) – großer Zylinder (200 mm Umfang)

Patient	t ₃		t ₆		t ₁₂	
	Betroffene Seite	Gesunde Seite	Betroffene Seite	Gesunde Seite	Betroffene Seite	Gesunde Seite
1	129,4	219,3	177,7	183,7	244,0	270,9
2	139,7	168,6	163,4	194,7	214,7	235,5
3	102,5	221,1	115,5	209,0	124,9	129,8
4	106,2	135,0	104,6	102,8	126,5	145,7
5	185,1	162,3	198,0	137,1	182,2	140,4
6	146,3	245,5	181,1	273,8	179,0	253,4
7	90,5	116,2	68,4	71,2	75,2	109,0
8	134,6	169,7	122,2	128,7	118,4	104,2
9	422,2	562,7	397,7	535,8	318,7	358,2
10	236,6	305,3	277,5	288,6	308,4	311,2
11	119,4	184,5	197,8	182,2	237,6	208,7
12	61,1	252,1	187,6	221,9	230,0	234,5
13	134,2	211,9	139,2	166,5	167,2	205,1
14	104,8	147,9	158,0	171,3	144,1	159,7
15	130,7	212,2	164,5	268,6	178,9	196,9
16	74,1	110,5	88,2	137,5	104,2	151,2
17	99,6	111,7	92,5	100,7	120,5	122,7
18	260,5	298,0	335,7	329,3	417,7	357,3
19	85,6	117,5	76,9	118,6	81,9	100,6
20	74,8	85,7	70,2	81,5	85,4	105,5
21	88,5	137,2	96,8	152,8	110,5	147,7
22	274,4	348,9	320,1	318,2	414,4	357,1
23	78,2	158,7	123,7	173,7	168,9	180,3
24	67,2	85,7	47,2	88,6	60,8	78,8
25	38,8	181,7	120,0	222,2	120,9	219,3
26	161,1	255,5	197,4	273,9	211,0	259,6
27	77,7	105,3	120,1	92,7	96,5	79,1
28	126,6	183,6	112,2	184,8	110,7	156,0
29	121,1	138,0	130,2	123,5	150,1	135,8
30	298,2	376,5	314,0	342,7	323,3	327,0
31	153,5	306,4	195,3	347,8	210,3	238,1
32	71,2	208,5	129,2	244,6	144,2	212,6
33	481,4	499,6	570,0	441,4	464,0	472,5
34	168,5	166,2	170,0	159,8	157,6	150,5
35	39,4	68,1	36,4	74,7	85,0	88,2

Tab. 31: Kraftanteil 1. Fingerstrahl (in N) – gr. Zylinder (200 mm Umfang)

Patient	t ₃		t ₆		t ₁₂	
	Betroffene Seite	Gesunde Seite	Betroffene Seite	Gesunde Seite	Betroffene Seite	Gesunde Seite
1	31,5	35,2	46,1	36,9	60,5	31,1
2	45,6	51,2	48,9	57,2	60,1	59,8
3	36	65,9	38,2	60,1	44,2	44,2
4	37,2	46	33,5	37	32,7	36,5
5	46,9	44,5	55	38,4	53,7	41,1
6	44,1	59,1	55,6	60,2	56,8	54,7
7	29,5	40,2	26,4	26,5	28,9	32,5
8	18,4	30,4	24,4	15,1	15,6	14,9
9	97	98,1	77	72	67,7	49,7
10	62,7	51,2	61,2	45	58,1	50,7
11	49,8	65,2	66,6	67	58,6	64,6
12	25	48,7	55,1	50,1	63,4	60,3
13	43,4	38,5	42,9	45,6	45,4	46,5
14	26,4	40,8	38,9	50,4	31,1	54,5
15	43,2	47,3	49,9	63,4	51,7	45,4
16	32,9	45,9	32,2	42,9	44,3	53,7
17	34,6	34,7	32,9	33,1	42,8	40,3
18	74,3	69,5	83,7	75,3	99,5	80
19	23	28,1	25,3	39,1	26,9	34,9
20	28	33,9	27	27	32,9	36,1
21	34,5	52,1	38,5	41	39,4	50,9
22	67,9	82,3	102,3	82,7	111,3	99,8
23	26,5	45,9	34,7	43,9	48,5	50,9
24	26,9	35,7	20,5	32,2	22,6	30,4
25	19,5	44,4	34,5	30,6	39,8	47,7
26	28,1	42,1	33,9	42,8	39,1	39,5
27	31	21	28,6	29,1	20,4	16,5
28	37,9	20,9	40,2	29,1	41	35,4
29	40,5	38,5	50	39,5	46,5	40,9
30	57,7	87,8	71,6	83,5	61,9	67,6
31	41,3	63,8	61,7	80,1	54,2	55,3
32	24,4	40,9	47,8	54,8	46,3	50,9
33	63,6	50,9	75,6	39,8	52	47,1
34	42,4	37,6	44,2	37,9	34,5	37,7
35	12,1	18,5	15	24,7	29,5	19,1

Tab. 32: Kraftanteil 2. Fingerstrahl (in N) – gr. Zylinder (200 mm Umfang)

Patient	t ₃		t ₆		t ₁₂	
	Betroffene Seite	Gesunde Seite	Betroffene Seite	Gesunde Seite	Betroffene Seite	Gesunde Seite
1	29,6	37,6	51,2	38,4	60,7	31,8
2	42,6	38,1	42,3	38,8	50,1	46,8
3	28,4	50,6	29	48,5	23,7	25,2
4	27,4	28,3	27	22,3	33,1	26,4
5	48,8	42,8	41,8	34,9	33,1	41,9
6	36,1	47,4	42	49,8	44,8	48,7
7	11,8	28	17,8	18,4	11,4	23,2
8	8,4	24,3	12,4	15,3	6,1	13,5
9	81,4	69,7	73	52,2	50,6	38
10	61,2	70,9	61,4	63,1	62	61,3
11	39,2	64,1	52,2	57,3	47,8	48,3
12	13,5	53,6	35,3	42,3	43	41,5
13	24,1	35,5	21,3	33,9	34,5	33,1
14	24	21,6	35,4	26,6	29,8	31,7
15	27,5	34	35,7	47,8	43,4	32,1
16	14	22,6	15,2	10,1	16,4	20,8
17	33,6	23,9	30,4	19	34,4	30,1
18	67	71,6	64,2	69	91,7	76,5
19	20,7	23,4	15,3	24,4	17,4	21,7
20	26,5	24,9	17,4	20,5	25,3	26,4
21	23	20,8	18,7	28,1	18,1	23,8
22	67,3	89,3	99,1	87,3	98,5	87,5
23	12	30,9	16,8	40,3	24,8	29
24	10,6	18,7	8,5	23,1	14,2	17
25	6,2	37,4	25,4	38,2	21,2	37,8
26	44,4	56,4	38,4	60,8	49	57,6
27	11,6	10	17,3	14	8,8	8,9
28	26,5	29,7	29,9	39,9	19,6	27,8
29	24,9	35,5	26	30,9	20,1	25,4
30	64,7	96,2	72,8	104,9	61,1	72,1
31	33,3	57,8	45,4	61,8	42,1	46
32	13,2	24,7	24,6	34,7	32,8	31,7
33	86	74,5	99,2	64,1	78,2	76,6
34	33	33,4	35,3	38,9	39,4	30,4
35	4	11,6	4,4	9,9	15,1	7

Tab. 33: Kraftanteil 3. Fingerstrahl (in N) – gr. Zylinder (200 mm Umfang)

Patient	t ₃		t ₆		t ₁₂	
	Betroffene Seite	Gesunde Seite	Betroffene Seite	Gesunde Seite	Betroffene Seite	Gesunde Seite
1	29,6	46,1	33,4	37,1	45,8	44,8
2	28,6	30,7	41,5	47,8	44,9	46,1
3	11,4	38,6	13,3	39,2	18,3	23,2
4	18,6	25,3	21,5	17,6	19,2	26,4
5	37,7	31,2	36,4	30,2	37,5	26,3
6	25,5	44,6	32,2	53,5	30,8	44
7	16,3	18,4	19,4	11,3	15,9	16,7
8	30,1	34,9	26,2	28,2	25,5	21,3
9	66,1	98,2	74,5	94,2	54	62,5
10	36,2	52,1	57	44,8	57,9	50,3
11	21,3	32,4	33,7	29,7	47,4	43,5
12	9	41,6	39,1	38,2	45,7	43,2
13	30,5	43,5	36,6	31,5	41,8	38,4
14	20,7	23	33,3	30,7	26,1	20,6
15	29,4	36,2	34,6	56	31,6	35,7
16	20,5	20,9	25,8	40,1	26,7	41,4
17	8,7	16,7	10,2	20	13,3	15,9
18	33,8	51,4	72	63,5	77,2	59,1
19	10,7	22,3	10,2	20,2	12,8	15
20	13,9	16,4	15,3	18	16,8	25,3
21	13,7	21	16,9	25,2	23,2	26,7
22	68,6	77,8	61,1	60,3	94,8	65,9
23	12,2	24,6	22,2	28,5	31,3	38,4
24	14,3	15,9	10	16,1	7,6	13
25	7,2	37,5	21,6	44,1	22,4	40,4
26	35,5	49,4	41,7	56,8	39,4	54,2
27	9,8	19,6	23,4	16,3	13	14,2
28	20,3	44	14	32,8	18,8	23,4
29	27	18,7	26,4	19,8	29,6	20,2
30	47,5	63,2	49,3	55,3	48,7	49,2
31	21,9	55,8	26,2	63,6	27,3	40,7
32	18,7	44,5	30,2	48,7	32,3	48,2
33	84	106	102,1	88,7	95,7	85,4
34	31,9	34,1	32,3	30,4	29,1	28,5
35	7,9	11,9	9	14,3	18,6	16

Tab. 34: Kraftanteil 4. Fingerstrahl (in N) – gr. Zylinder (200 mm Umfang)

Patient	t ₃		t ₆		t ₁₂	
	Betroffene Seite	Gesunde Seite	Betroffene Seite	Gesunde Seite	Betroffene Seite	Gesunde Seite
1	16,2	24,5	13,3	23,7	23,8	46,7
2	10,9	18,7	14	25	25,5	29,2
3	12	28,3	13,8	26,2	14,1	20,8
4	13,2	14,7	13,1	11,9	16,3	21,1
5	15,1	17,2	24,3	15,4	19,9	13,9
6	18,2	31,9	20,2	35,9	19,5	35,4
7	11,4	13,5	2,5	6	9,2	7,8
8	26,1	22,7	17	19,7	24,9	13,5
9	41,3	67,1	43,9	71,4	36,2	56,1
10	22,3	30,7	28,3	31	31,9	39,5
11	6,8	11,3	21,4	17,9	42,3	21
12	7,5	21,5	20,2	21,5	19,1	26
13	14,7	30,4	14,7	20,9	21,6	37,6
14	9,1	24,7	14,9	26,7	16,1	20,3
15	15,1	24,5	14,2	26,9	17,7	19,4
16	2,6	11,7	10,4	25,5	7,8	21,1
17	7,9	11,9	7,1	11,2	8,9	11,5
18	29,8	31,8	48,4	37,1	47	36,9
19	6,7	13,6	7,1	11,5	8,1	12,3
20	4,6	6,9	5,9	5,7	7,8	7,3
21	7,2	18,5	9,9	21,5	14,5	22,4
22	23,4	34,3	19,6	28,4	38,3	39,1
23	10,6	23	16,9	18,7	20,2	16,6
24	7,9	7	4,6	8,1	7,3	8,1
25	3,3	16,9	15	20,6	14,5	22,2
26	18,7	37,2	26,2	38,8	29,8	35,2
27	10,6	14,1	20,8	11,9	19,2	13,2
28	14	31,9	13,1	25,8	12,2	21,8
29	14,7	13,7	14,2	13,8	22,4	18,6
30	30,2	32,8	33,1	23,1	40,2	29,8
31	19,4	35,8	25,2	37	25,9	27,4
32	9,7	39,5	16,5	35,9	19,7	31,7
33	66,2	82,9	77	62,7	66	67,8
34	23,1	26,3	28,2	22,2	19,2	29,6
35	5,9	8,5	5	15,8	13,3	20,1

Tab. 35: Kraftanteil 5. Fingerstrahl (in N) – gr. Zylinder (200 mm Umfang)

Patient	t ₃		t ₆		t ₁₂	
	Betroffene Seite	Gesunde Seite	Betroffene Seite	Gesunde Seite	Betroffene Seite	Gesunde Seite
1	9,6	7,3	12,4	17,7	9,6	17,4
2	12,3	11,9	15,9	11,6	11,9	14,1
3	14	21,8	16,4	21,7	13,6	12,4
4	9	17,3	8,4	13	10,6	20,7
5	13,6	13,5	14,4	9,9	13,8	9,8
6	11,7	16,9	14,9	17	14	13,4
7	10,1	9,2	1,8	7,9	6,2	6,7
8	11,3	8	9,8	8	10,7	6,7
9	26,9	22	28	32,8	22	13,4
10	16,7	16,7	8,1	14,3	20	19,9
11	2,6	3,7	12,4	5,5	19,2	12,8
12	5,7	19,4	11,2	13,5	14,3	17,7
13	11,8	11	10,6	9,7	5	9,8
14	4,4	13,4	6,8	17,6	6,6	13,8
15	7,8	20,6	9,3	13,2	13	20,4
16	3,9	8,4	3,4	7	5,5	7
17	11,5	9,1	8,1	8,7	12,6	11,3
18	15,1	22,4	26,9	23,1	23,2	25,6
19	8,4	11,5	8	8,4	6,6	10
20	1,7	2,4	1,6	0,8	2	1,7
21	8,8	17,8	11,5	14,4	10,7	15,9
22	13,4	12,6	14,4	21,9	17	20,7
23	8,3	11,8	15,4	11,4	13,8	10,9
24	5,2	4,3	3,7	9	4,7	6,3
25	2,3	9,2	10,7	14,7	11	19,1
26	4,2	9,8	9	11,9	7,1	8,5
27	8,8	8,7	9,6	7,4	8,9	6,3
28	7,1	13,9	12,7	11,5	16,7	18,7
29	4,4	8,4	7,3	7,3	9,2	6,5
30	15,3	14,1	13,4	9,8	19,5	21,9
31	11,5	13,4	12,3	17,3	17,5	13,8
32	5,5	18	9,1	14,7	12,9	10,6
33	26,5	24,5	34,2	25	33,8	35,2
34	16,1	14,5	9,1	11,3	10,2	9,8
35	9,4	5	3	8,5	8,5	9,5

Tab. 36: Kraftanteil Thenar (in N) – großer Zylinder (200 mm Umfang)

Patient	t ₃		t ₆		t ₁₂	
	Betroffene Seite	Gesunde Seite	Betroffene Seite	Gesunde Seite	Betroffene Seite	Gesunde Seite
1	11,6	55,4	21,5	24	36,5	68
2	0,1	17	0,1	11,7	18,3	30,3
3	0	12,6	2,8	10,5	8,1	3
4	0,2	1,6	0,6	0,6	14,2	12,1
5	21	10,6	20,8	6,5	17,2	4
6	9,6	33,9	15,1	40,2	12,5	43,5
7	6,2	4,9	0,5	1,1	2,9	21,7
8	34,7	44,5	30,1	32,3	24,2	23,9
9	100,6	189,7	87,8	174,1	80	126,4
10	31,9	63,9	55,9	76,5	52,8	67,3
11	0	7,1	6,7	2,9	16,2	15,3
12	0,3	55,5	21	47,7	35,2	35,7
13	8,5	40,3	9,8	20,7	15,5	30
14	18,9	19,7	28,1	16,4	30	14,4
15	7,9	40,1	20,2	48,1	21,4	39,7
16	0	0,4	0,4	11,5	3,2	6,8
17	3,5	13,4	3,7	6,9	8,5	11,9
18	27,2	40,6	24,9	44,8	43,3	58,8
19	15	12,3	10,7	10,1	10,1	5,4
20	0	0,3	2,8	9,5	0,5	8,5
21	1	3,8	1,3	14,9	2,7	5,4
22	20,6	44,2	19,3	32,7	37,7	33,4
23	6,8	19,8	14,5	28,8	21,6	27,3
24	2,1	3,8	0	0,1	4,4	3,8
25	0,1	35,8	10,9	63,2	10,1	49,3
26	20,6	37,6	30,9	42,8	32,8	38,5
27	6	31,1	18,3	13,9	26,1	19,8
28	20,7	33,5	1,6	40,7	2,3	25
29	9,5	23,1	5,9	11,4	20,6	23,5
30	67,9	75,7	63,3	61,9	79,9	77,9
31	23,7	53,7	23,3	64,8	38,5	36,5
32	0	22,6	1,1	34,4	0	24,8
33	127,4	144,5	140,6	138,8	100,7	134,2
34	22,2	18,6	20,5	18,1	25,8	13,7
35	0	10,8	0	0,7	0	7,2

Tab. 37: Kraftanteil Hypothenar (in N) – großer Zylinder (200 mm Umfang)

Patient	t ₃		t ₆		t ₁₂	
	Betroffene Seite	Gesunde Seite	Betroffene Seite	Gesunde Seite	Betroffene Seite	Gesunde Seite
1	1,4	12,6	0,3	6	7,1	30,8
2	0	0,8	0,6	2,9	3,3	8,7
3	0,2	3,5	2,1	2,7	3,1	1,2
4	0,6	1,7	0	0,3	0,5	0,2
5	1,9	2,1	5	2	6	2,2
6	0	11,4	0,4	17,7	0,1	13,2
7	5,1	2,3	0	0,1	0,7	0,5
8	5,8	4,4	2,8	10,1	11,3	10,3
9	8,9	17,4	13,6	37,5	8,5	12,3
10	3,6	19,8	6,1	13,6	26,6	22,2
11	0	0,2	4,6	1,6	5	2,5
12	0,1	12	6	8,3	9,5	10,2
13	0,8	12,5	3,2	4,2	3	5,3
14	1,1	4,5	0,5	2,9	4,3	4,3
15	0	9,9	0,3	13,4	0	4,3
16	0	0,7	0	0,1	0,2	0,2
17	0	1,8	0	1,5	0	1,6
18	13,7	10,3	16,3	16,7	36,7	19,9
19	1,2	6,2	0,5	4,6	0	0,9
20	0,1	0,8	0	0	0	0
21	0	3,1	0	6,7	1,5	2,3
22	12,9	9,8	3,1	5,1	18	10,9
23	1,8	2,6	3,3	2,2	7,9	7
24	0	0,1	0	0,3	0	0
25	0	0,8	1,6	8,6	2,1	2,3
26	9	22,1	14,7	17,1	13,9	25,9
27	0	0,8	0,7	0,2	0,1	0,2
28	0,1	10	0	3,9	0	3,8
29	0	0,3	0,6	0,2	1,6	0,5
30	14,2	7,1	10,6	4,4	11,6	9,2
31	2,6	26	1,2	23,3	4,8	18,2
32	0	18,6	0,1	20,9	0	14,7
33	28,1	15,9	41,3	21,9	37,1	26,1
34	0	0	0	0,7	0	0,5
35	0	1,6	0	0,8	0	9,2



Abb. 14: Das Manographie-System

Von links nach rechts: Kleiner Zylinder (150 mm Umfang), großer Zylinder (200 mm Umfang), Analyzer für die Verbindung zum Computer, Akku für den Analyzer.

10 Lebenslauf (gekürzt)

Name, Vornamen Karnatz, Johannes Bernhard

Geburtsdatum: 29.06.1986

Geburtsort: Hamburg

Geburtsland: Deutschland

10/2008 – 05/2015 Medizinstudium an der Universität Rostock, Abschluss:
Staatsexamen

01/2013 – 06/2022 Promotion an der Klinik für Unfall-, Hand- und
Wiederherstellungschirurgie der Universität Rostock

07/2016 Vorstellung der Ergebnisse der orts aufgelösten Hand-
kraftmessungen mit dem Manugraphie-System auf dem
ESM Kongress in Lissabon, Portugal

11 Eidesstattliche Versicherung

Ich versichere eidesstattlich durch eigenhändige Unterschrift, dass ich die Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen entnommen sind, habe ich als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit ist noch nicht veröffentlicht und ist in gleicher oder ähnlicher Weise noch nicht als Studienleistung zur Anerkennung oder Bewertung vorgelegt worden. Ich weiß, dass bei Abgabe einer falschen Versicherung die Prüfung als nicht bestanden zu gelten hat.

Rostock, den

(Abgabedatum)

(Vollständige Unterschrift)