Universitätsklinikum Ulm
Klinik für Unfall-, Hand-, Plastische und Wiederherstellungschirurgie
Ärztlicher Direktor: Univ. Prof. Dr. med. Florian Gebhard

Prospektiv randomisierte Studie zur Nachbehandlung von Beugesehnennähten in Zone II an der Hand - Vergleich von klassischer Physiotherapie und Nachbehandlung mit einem Exoskelett

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Medizin
der Medizinischen Fakultät der Universität Ulm

vorgelegt von David Christopher Gulkin
aus München
2017

Amtierender Dekan:	Prof. Dr. rer. nat. Thomas Wirth
1. Berichterstatter:	PD Dr. med. Joachim Gülke
2. Berichterstatter:	PD Dr. med. Eberhard Barth
Tag der Promotion:	19. Mai 2017

Die Widmung wurde aus Gründen des Datenschutzes entfernt.

Inhaltsverzeichnis I

Abkürzungsverzeichnis III

1. Einleitung 1

1.1 Stand der Behandlung 1
1.2 Bedeutung der Physiotherapie 3
1.3 Gebrauch von Bewegungsschienen 4
1.4 Zielsetzung und Nullhypothese 4

2. Patienten und Methodik 6

2.1 Patientenkollektiv 6
2.2 OP-Technik 7
2.3 Nachbehandlung 9
2.4 Nachbehandlungsgruppen 12
2.5 TUB-Exoskelett 13
2.6 Nachuntersuchung und Statistik 15

3. Ergebnisse 18

3.1 Komplikationen 18
3.2 Beweglichkeit 19
3.3 Kraft 24
3.4 DASH-Score 26
3.5 Behandlungsdauer 27

4. Diskussion 28

4.1 Nachbehandlungsverfahren 28
4.2 Funktion und Rerupturen 30
4.3 DASH-Score 33
4.4 Behandlungsdauer 34
4.5 Bewegungsschienen 35
4.6 Limitationen 36
4.7 Schlussfolgerung 37

5. Zusammenfassung 38

6. Literaturverzeichnis 39

7. Anhang 48

7.1 Strickland-Score 48
7.2 DASH-Score 49
7.3 Einwilligungserklärung 50
7.4 Zertifikat 52

Danksagung 53

Lebenslauf 54

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
al.	alii
DASH	Disabilities of the Arm, Shoulder and Hand
DIP	distales Interphalangealgelenk (Fingerendgelenk)
GNB	Gefäß-Nerven-Bündel
IG	Interventionsgruppe
M.	Morbus
MCP	Metacarpophalangealgelenk (Fingergrundgelenk)
MW	Mittelwert
OP	Operation
PDS	Polydioxanon
PIP	proximales Interphalangealgelenk (Fingermittelgelenk)
ROM	Range of Motion (Bewegungsumfang)
SD	Standard Deviation (Standardabweichung)
SG	Standardgruppe
Tab.	Tabelle
TAM	Total Active Motion (Gesamtbewegungsumfang)
TEP	totale Endoprothese
TUB	Technische Universität Berlin
Z.n.	Zustand nach

1. Einleitung

1.1 Stand der Behandlung

Die Durchtrennung der Beugesehnen eines Fingers stellt noch immer eine oftmals schwere und komplizierte Verletzung dar und führt nicht selten zu einer Funktionseinschränkung des betroffenen Fingers bzw. sogar der ganzen Hand.[4; 9; 30; 31] Historisch gesehen traten immer wieder neue Faktoren auf, die die Versorgung durchtrennter Beugesehnen erschwerten. Ein großes Problem war die relativ hohe Rate an Rerupturen, da die verwendeten Sehnennähte nur einen Bruchteil der Kraft aushielten, die bei der aktiven Beugung des Fingers auf die Sehne wirkt.[54; 57] Man entschied sich deshalb dafür, den Finger nach dem chirurgischen Eingriff für längere Zeit ruhig zu stellen. Hierbei zeigte sich jedoch, dass speziell die Beugesehnenverletzungen in Zone II der Hand, trotz operativer Versorgung und postoperativer Ruhigstellung, besonders schlechte funktionelle Ergebnisse nach sich zogen.[55; 63] Aufgrund dieser Tatsache, sowie der sehr hohen Herausforderung für den Operateur, hielt sich bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts der Begriff des sogenannten "Niemandslandes" (no-man's-land), da die Beugesehnen in Zone II oftmals nicht mehr chirurgisch versorgt wurden. Zone II erstreckt sich vom A1-Ringband bis zum distalen Ansatz der Flexor-digitalis-superior-Sehne (Abb. 1).

In Verlauf der 60er und 70er Jahre fand man heraus, dass vor allem die postoperative Immobilisierung des betroffenen Fingers über mehrere Wochen zu Adhäsionen der genähten Sehne mit dem umgebenden Gewebe führte und somit die Bewegung der Sehne in ihrem fibro-ossären Kanal in Zone II behinderte.[23–25; 39]



Abb. 1: orange unterlegt: Zone II der Beugesehnen an den Langfingern der Hand

Kein Thema der Handchirurgie wurde daher so intensiv und kontrovers in den letzten Jahren und Jahrzehnten diskutiert wie die Versorgung und Nachbehandlung von Beugesehnenverletzungen.[2; 33; 36; 57] Die vom Operateur verwendete Nahttechnik ist zweifellos ein sehr wichtiger Faktor und nach wie vor fester Bestandteil der aktuellen Forschung.[37] Auch wenn eine Tendenz auszumachen ist, die Anzahl der Kernnähte auf vier, sechs oder sogar acht zu erhöhen, wird noch immer überwiegend eine Technik mit zwei Kernnähten in Kombination mit einer epitendinösen Adaptationsnaht verwendet.[10; 57] In den vergangenen Jahren wurde jedoch immer deutlicher, dass die Weiterbehandlung im Anschluss an die operative Versorgung einen entscheidenden Einfluss auf das funktionelle Ergebnis hat. Es zeigte sich, dass die bereits erwähnten Adhäsionen durch eine funktionelle Behandlung reduziert werden können. So lösten verschiedene Bewegungsprogramme die Immobilisierung im Anschluss an die operative Versorgung ab. Es galt fortan eine Balance zu finden zwischen

Ruhigstellung zur Heilung und Bewegung zur Verbesserung der Funktion.[10; 14; 34; 40–42; 45; 66]

Im Laufe der Zeit wurden deshalb nicht nur neue Operationstechniken vorgestellt, sondern auch verschiedene Varianten der Nachbehandlung entwickelt und modifiziert. Hier setzten sich Programme mit früher, dynamischer Nachbehandlung durch und lösten solche mit zwischenzeitlicher Immobilisierung der betroffenen Finger ab.[44] Die Bewegung der genähten Sehnen beugt Verwachsungen vor und hat damit maßgeblichen Anteil am funktionellen Endergebnis.[67] Hierbei wird durch die Bewegung Zug auf die Sehne ausgeübt, was den intrinsischen Heilungsprozess im verletzten Sehnenabschnitt durch eine Längsausrichtung der Kollagenfasern verbessert. Einige Autoren bevorzugen eine Nachbehandlung mit kontrollierter, frühzeitig aktiver Beugung und Streckung. Dies bedeutet jedoch auch eine deutliche Mehrbelastung der Beugesehne, was folglich zur Entwicklung von Mehr-Strang-Kernnähten geführt hat, welche größerer Belastung stand halten sollen.[19; 35; 57; 60; 61]

Einen größeren Schutz für genähte Beugesehnen bietet jedoch die Nachbehandlung nach Kleinert und ihre Modifikationen.[10; 18; 25] Hierbei wird unter Verwendung einer dorsalen Unterarmschiene die Beugesehne des betroffenen Fingers geschützt, idem mit Hilfe eines Gummizügels der Finger passiv gebeugt, aktiv jedoch lediglich gestreckt werden darf. Obwohl schon aggressivere Nachbehandlungsarten entwickelt wurden und zu guten Ergebnissen führten, ist die Nachbehandlung nach Kleinert vor allem im mitteleuropäischen und deutschsprachigen Raum immer noch der Goldstandard.[15; 26; 28; 29; 47; 49]

1.2 Bedeutung der Physiotherapie

Unabhängig davon ob mit früher aktiver oder früher passiver Mobilisierung begonnen wird, ist in den meisten mitteleuropäischen und westlichen Ländern die

postoperative Behandlung von Beugesehnenverletzungen durch eine regelmäßige physiotherapeutische Betreuung Standard.[17; 18; 20; 59] Ziel ist es, durch Beüben und Anleiten der Patienten von professionellen Therapeuten noch bestehende Streckdefizite im Mittel- und Endgelenk zu beheben, sowie die komplette Beugung des Fingers bis hin zum Faustschluss zu ermöglichen. Hierbei liegt der Fokus vor allem auf Lymphdrainagen zur Abschwellung sowie auf speziellen Bewegungsübungen, um so schnell wie möglich die volle Beweglichkeit des Fingers wieder zu erlangen.

1.3 Gebrauch von Bewegungsschienen

Passive Bewegungsschienen sind nach bestimmten Operationen am Knie- bzw. Schultergelenk schon seit einigen Jahren im Einsatz und genießen hohe Akzeptanz, wenn es darum geht, so schnell wie möglich eine freie Funktion des betroffenen Gelenks zu erreichen. Auch für die Hand wurden bereits Bewegungsschienen entwickelt und getestet.[46; 64] Bis heute konnte sich jedoch keines der Modelle entscheidend durchsetzen, obwohl schon Gelberman et al. zeigten, dass durch den zusätzlichen Einsatz einer Bewegungsschiene in der Nachbehandlung von Beugesehnenverletzungen eine bessere Beweglichkeit erzielt werden kann, als ohne.[16]

1.4 Zielsetzung und Nullhypothese

Ziel der Versorgung muss es sein, die Patienten so schnell wie möglich mit einem zufriedenstellenden funktionellen Ergebnis wieder in den beruflichen Alltag zu integrieren. Hierzu ist es nötig die Stärken der postoperativen Behandlung weiter auszubauen, sowie neue Ansätze auszuprobieren. In der vorliegenden Arbeit wurde der Prototyp einer Bewegungsschiene für die Hand in Form eines Exoskeletts eingesetzt, speziell konzipiert und hergestellt für das postoperative

Beüben von dreigliedrigen Fingern nach Beugesehnenverletzungen. Die Ergebnisse wurden beobachtet und im Vergleich zur Standardtherapie mit physio-therapeutischer Betreuung evaluiert. Die Nullhypothese lautete, dass durch die Nachbehandlung mit einer Bewegungsschiene (Exoskelett) keine Verbesserung des funktionellen Ergebnisses nach Verletzung und Naht beider Beugesehen in Zone II der Hand im Vergleich zur Standardnachbehandlung durch eine Physiotherapie erzielt werden kann.

2. Patienten und Methodik

2.1 Patientenkollektiv

Das Kollektiv umfasste 62 Patienten (44 Männer, 16 Frauen) mit einem Durchschnittsalter von 29,9 Jahren ± 11,8 Jahre (18 – 60 Jahre). Bezüglich der Dominanz wurden 50 Rechtshänder und 12 Linkshänder während des Untersuchungszeitraums eingeschlossen, wobei 54 Finger der jeweils nicht-dominanten Hand verletzt waren. Alle Patienten wurden nach der operativen Versorgung gemäß den Vorgaben der Ethikkommission von ärztlicher Seite ausführlich über die Studie aufgeklärt und willigten schriftlich in die Teilnahme ein (Genehmigung der Ethikkommission Nr. 254/10).

Tab. 1: Kollektiv der Patienten mit operativ versorgter, isolierter Beugesehnenverletzung in Zone II der Hand am Universitätsklinikum Ulm zwischen 2008 und 2012 (D2: Zeigefinger; D3: Mittelfinger; D4: Ringfinger)

Patientenkollektiv			
Finger	rechts	links	gesamt
D2	14	25	39
D3	3	6	9
D4	5	9	14
gesamt	22	40	62

Einschlusskriterium war eine glatte, komplette Durchtrennung beider Beugesehnen in Zone II entweder am Zeige-, Mittel- oder Ringfinger. Als Verletzungsursache wurden ausschließlich Stich- bzw. Schnittverletzungen aufgenommen. Die Verletzung höchstens eines der beiden begleitenden Gefäß-Nerven-Bündels war erlaubt und wurde im Rahmen der Sehnennaht mitversorgt. In Tabelle 2 finden sich die detaillierten Einschlusskriterien wieder, während Tabelle 3 alle Kriterien auflistet, die zum Ausschluss aus der Studie führten.

Tab. 2: Einschlusskriterien der Studie

Einschlusskriterien
komplette Durchtrennung der tiefen und oberflächlichen Beugesehne eines Fingers
die Verletzung liegt in Zone II der Hand
Verletzungsmuster: glatte Schnitt- oder Stichverletzung der Beugesehnen (z.B. mit Teppichmesser)
operative Versorgung: die Beugesehne kann mit der Nahttechnik nach Kirchmayer-Kessler versorgt werden

Tab. 3: Ausschlusskriterien der Studie (M.: Morbus; Z.n.: Zustand nach)

Ausschlusskriterien
Daumen oder Kleinfinger (Exoskelett kann nicht angelegt werden)
Beugesehnenverletzungen an mehreren Fingern
Alter des Patienten < 18 Jahre bzw. > 60 Jahre
Verletzungsmuster: Defektverletzung der Beugesehnen (z.B. Kreissägen- oder Flexverletzung)
Nebendiagnosen (für Heilung relevant): Diabetes mellitus; Durchblutungsstörungen; Z.n. Chronisch regionalem Schmerzsyndrom (z.B. M. Sudeck)
Begleitverletzung (für Heilung bzw. Nachbehandlung relevant): Läsion beider palmaren Arterien; extensiver Weichteil- bzw. Hautdefekt
Unwilligkeit bzw. Unfähigkeit zur Einhaltung der Übungsprogramme
Lokale Infektion; Reruptur der Beugesehne

2.2 OP-Technik

Die Wunde wurde wenn nötig mit Zick-Zack-förmigen Brunner-Inzisionen erweitert um die Sehnenenden zu lokalisieren. Alle Sehnennähte wurden grundsätzlich mit resorbierbaren Fäden aus Polydioxanon durchgeführt. Die tiefe Beugesehne wurde in der Technik nach Kirchmayer-Kessler genäht, bestehend zum einen aus einer 2-

Strang-Kernnaht mit Fäden der Stärke 4-0 PDS, zum anderen aus einer zirkulären, epitendinösen Adaptationsnaht mit Fäden der Stärke 6-0 PDS (Abb. 2). War die Verletzung im distalen Teil von Zone II lokalisiert, wurden die beiden Schenkel der oberflächlichen Beugesehne mit Z-Nähten (4-0 PDS) versorgt, ansonsten analog zur tiefen.

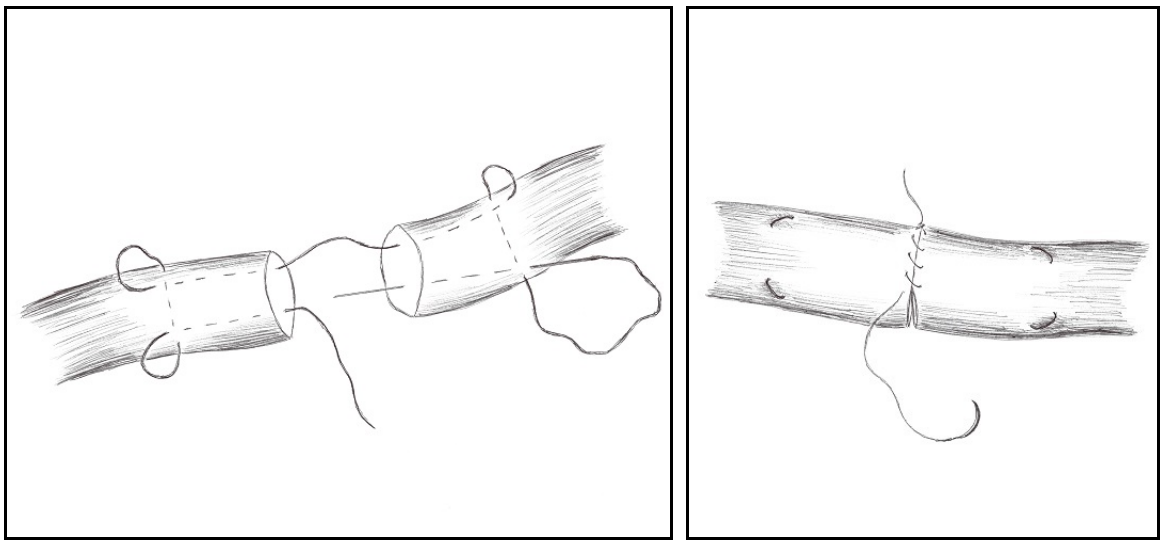


Abb. 2 (links): 2-Strang Kernnaht nach Kirchmayer-Kessler; **(rechts):** epitendinöse Adaptationsnaht

Bei Mitbeteiligung eines begleitenden GNBs, wurden Arterien und Nerven grundsätzlich mikrochirurgisch genäht, hatten jedoch keinerlei Auswirkung auf die anschließende Nachbehandlung. In fünf Fällen war eine A2-Ringbandplastik zur Vermeidung eines Bogensehnenphänomens nötig. Eine detaillierte Auflistung der versorgten Begleitverletzungen ist in Tabelle 4 dargestellt. Die Haut wurde im Anschluss mit Einzelknopfnähten (4-0 Resolon) verschlossen. Unmittelbar postoperativ wurde die Hand verbunden und eine dorsale Unterarmschiene aus Kunststoff angepasst. Das Handgelenk war hierbei 30° gebeugt, die Metacarpophalangealgelenke 70°. Die Interphalangealgelenke werden erst in voller Extension geblockt. Alle Operationen wurden in Regional- oder Allgemeinanästhesie, unter Lupenbrillensicht und Oberarmblutleere von einem erfahrenen Chirurgen mit der Zusatzbezeichnung Handchirurgie am Universitätsklinikum Ulm durchgeführt.

Tab. 4: Häufigkeiten der beobachteten Begleitverletzungen der Patienten mit isolierter Beugesehnenverletzung in Zone II der Hand am Universitätsklinikum Ulm zwischen 2008 und 2012 (GNB: Gefäß-Nerven-Bündel; SG: Standardgruppe; IG: Interventionsgruppe)

Begleitverletzungen			
Verletzungstyp	Häufigkeit		
	SG	IG	gesamt
Ein GNB	8	10	18
Ein Nerv	8	4	12
Zwei Nerven	1	0	1
Eine Arterie	1	1	2
A2-Ringband	2	3	5

2.3 Nachbehandlung

Für alle Patienten teilte sich die Nachbehandlung in drei Phasen auf, die für beide Nachbehandlungsformen identisch sind und im Folgenden erklärt werden. Die gruppenspezifischen Programme werden im Anschluss erläutert. Unabhängig von der Gruppenzugehörigkeit wurde jedem Patienten vom Operateur Instruktionen im Sinne einer Basis-Behandlung gegeben, die im Folgenden erklärt werden.

Nachbehandlungsphasen

Phase 1 (0-6 Wochen postoperativ)

Alle Patienten wurden mit der dynamischen Nachbehandlung nach Kleinert über sechs Wochen behandelt. Jede Kleinert-Schiene wurde in der Regel am 2. postoperativen Tag aus thermoplastischem Material maßgefertigt und angelegt. Bei dieser dorsalen Unterarmschiene ist das Handgelenk in 30° gebeugt, während die Streckung der Fingergrundgelenke bei 70° Beugung limitiert wird. Die Mittel- und Endgelenke können bis zur vollen Streckung bewegt werden. Dem verletzten Finger wird eine Lasche auf den Fingernagel geklebt, die mit einer Feder

verbunden wird. Diese Feder wird über eine Umlenkung im Bereich der Hohlhand mit dem proximalen Teil der Schiene verbunden und hält somit alle drei Fingergelenke passiv gebeugt (Abb. 3). Die nicht verletzten Finger werden nicht mit dieser Vorrichtung versorgt.

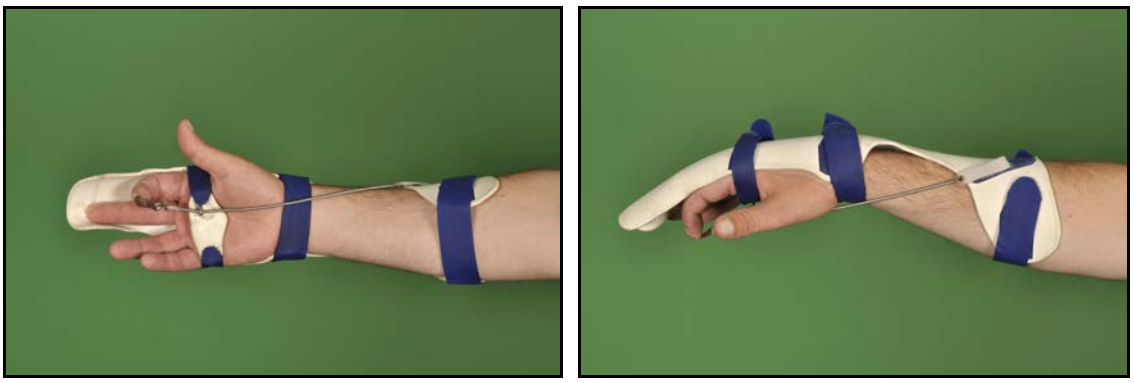


Abb. 3: Kleinert-Schiene bei einem Patienten mit Beugesehnenverletzung in Zone II am rechten Zeigefinger

Folgendes Übungsprogramm wurde für diese Phase vom Operateur mitgegeben. Der Patient soll tagsüber zehnmal pro Stunde den Finger in der Schiene bewegen. Der Finger soll dabei aktiv gestreckt werden bis hin zur vollen Extension im Mittel- und Endgelenk. Ist eine komplette Streckung aktiv nicht möglich, soll diese passiv durch Hilfe mit der gesunden Hand das Bewegungsziel erreicht werden. Im Anschluss wird der Finger passiv, ausschließlich durch den Zug der Feder wieder gebeugt. Eine aktive Beugung muss zu diesem Zeitpunkt unterlassen werden. Mit Hilfe der gesunden Hand sollte der betroffene Finger aber vollständig eingerollt werden. Die gesunden Finger dürfen immer frei bewegt werden.

Zwei Tage nach dem Fadenzug, in der Regel 14 Tage postoperativ, darf der Patient zusätzlich mit intensiver Narbenpflege beginnen. Hierbei wird fünfmal täglich jede Stelle der Narbe mit der gesunden Hand für eine Minute bis in die Tiefe des Gewebes massiert und anschließend mit einer Handsalbe eingecremt. Unabhängig davon werden dreimal täglich zehn-minütige, warme Kamillenbäder aus der Schiene heraus durchgeführt, in denen der Finger erneut aktiv vollständig

gestreckt und passiv, mit Hilfe der gesunden Hand, vollständig gebeugt werden darf.

Phase 2 (7-12 Wochen postoperativ)

Ab der 7. Woche postoperativ wurde die Kleinert-Nachbehandlung beendet und die Übungen erfolgten ab sofort funktionell, jedoch ohne Belastung. Die Patienten bekamen erneut vom Operateur ein Programm, um selber zu üben.

Der Finger soll weiterhin tagsüber mindestens zehnmal pro Stunde bewegt werden. Inzwischen darf der Finger jedoch sowohl aktiv gestreckt als auch aktiv gebeugt werden. Das gesetzte Ziel ist eine freie Bewegung, d.h. volle Extension und volle Flexion. Falls die aktive Bewegung endgradig noch eingeschränkt sein sollte, darf sie passiv durch die gesunde Hand unterstützt werden.

Die intensive Narbenpflege mit Massieren und Eincremen der Narbe, sowie den Kamillenbädern, in denen nun auch aktiv bewegt werden darf, wird wie in Phase 1 fortgeführt.

Phase 3 (ab 13. Woche postoperativ)

Ab der 13. Woche dürfen die Patienten sukzessive mit dem Belastungsaufbau beginnen. Hierzu gibt es kein festes Übungsschema, alle Tätigkeiten des alltäglichen Lebens dürfen beschwerdeabhängig durchgeführt werden. Es wurde kein Zeitpunkt festgelegt, bis zu dem die Vollbelastung wiederhergestellt sein sollte und deshalb wurde auf ein spezielles Muskelaufbautraining verzichtet.

2.4 Nachbehandlungsgruppen

Um eine bessere Balanciertheit der beiden Behandlungsgruppen gewährleisten zu können, wurden alle Patienten prospektiv mit Hilfe der Block-Randomisierung in die folgenden Gruppen eingeteilt.

2.4.1 Standardgruppe (SG)

Dieser Gruppe wurden 31 Patienten (24 Männer, 7 Frauen) mit einem Durchschnittsalter von 29,8 Jahren ± 11,9 Jahre (18 – 60 Jahre) zugeteilt. Die verletzten Beugesehnen verteilten sich auf 19 Zeigefinger (11 links, 8 rechts), 5 Mittelfinger (3 links, 2 rechts) und 7 Ringfinger (5 links, 2 rechts). 4 der verletzten Finger befanden sich an der jeweils dominanten Hand.

Ab der 2. postoperativen Woche erhielten die Patienten zusätzlich zu oben genannter Basis-Behandlung eine physiotherapeutische Betreuung (Standardtherapie). Von ärztlicher Seite wurde manuelle Therapie dreimal pro Woche rezeptiert. Auf die Auswahl der Physiotherapeuten wurde kein Einfluss genommen, um Selektionseffekte zu vermeiden. Die Patienten sollten jedoch die vom Operateur aufgetragenen Übungen an den jeweiligen Therapeuten weitergeben. Es war keine feste Behandlungsdauer vorgesehen. Stattdessen wurde die Physiotherapie entweder beendet, sobald eine freie Funktion vom untersuchenden Arzt festgestellt wurde, oder, wenn der Patient das funktionelle Ergebnis als zufriedenstellend empfand.

2.4.2 Interventionsgruppe (IG)

Auch der Interventionsgruppe wurden 31 Patienten (22 Männer, 9 Frauen) zugeteilt. Das Durchschnittsalter betrug 30,0 Jahre ± 11,9 Jahre (18 – 56 Jahre) und die Verletzungen verteilten sich auf 20 Zeigefinger (14 links, 6 rechts), 4

Mittelfinger (3 links, 1 rechts) und 7 Ringfinger (5 links, 2 rechts). 4 der verletzten Finger befanden sich an der jeweils dominanten Hand.

Diese Patienten wurden ab der 2. postoperativen Woche mit dem Exoskelett dreimal pro Woche für 30 Minuten behandelt. Das Exoskelett wird ausführlich im nachfolgenden Text vorgestellt. In einem Pilotprojekt zeigte sich, dass die Ansprüche der Patienten an die Behandlung sehr unterschiedlich waren. Deshalb wurde hier bewusst auf ein festes Behandlungsschema verzichtet und die Anwendung individuell auf jeden Patienten abgestimmt. So wurde z.B. bei eher ängstlichen Patienten zu Beginn nur das Grundgelenk bewegt, bevor Schritt für Schritt die beiden distalen Gelenke mit eingebunden wurden. Zu Beginn jeder Übungseinheit wurde die aktive ROM der drei Fingergelenke mit dem Goniometer gemessen, das Exoskelett auf Funktionstüchtigkeit überprüft, dem betroffenen Finger angepasst und angelegt. Ziel einer 30-minütigen Einheit war es an jedem Gelenk mit Bewegungseinschränkung diese um fünf Grad zu verbessern. Auch in dieser Gruppe wurde die Behandlung so lange fortgesetzt, bis entweder der untersuchende Arzt ein freie Funktion festgestellt hat, oder der Patient mit dem Ergebnis zufrieden war.

2.5 TUB-Exoskelett

Das TUB-Exoskelett ist der Prototyp einer Bewegungsschiene, die an der Technischen Universität Berlin unter der Mithilfe der Sektion Hand-, Plastische und Mikrochirurgie des Universitätsklinikums Ulm entwickelt wurde. Das Exoskelett wurde für die Benutzung an einem dreigliedrigen Finger konzipiert und ist nach dem Medizinproduktgesetz (MPG §20 Abs. 1 Nr. 6, MPG §12 Abs. 2 mit Hinweis auf 93/42/EWG Anhang VIII Abs. 3.2) zertifiziert.

Jedes Gelenk kann unabhängig von den anderen über einen eigenen Motor bewegt werden, eine Bewegung von allen drei Gelenken gleichzeitig ist ebenfalls möglich.

Zusätzlich lässt sich der Bewegungsumfang für jedes Gelenk separat einstellen, hierbei können etwaige Beuge- oder Streckdefizite berücksichtigt werden. Die Geschwindigkeit der Bewegung ist in allen Gelenken gleich, kann jedoch insgesamt variiert werden. Diese Einstellungen können über einen angeschlossenen Computer mit speziell für das Gerät entwickelter Software vorgenommen werden (Abb. 4).

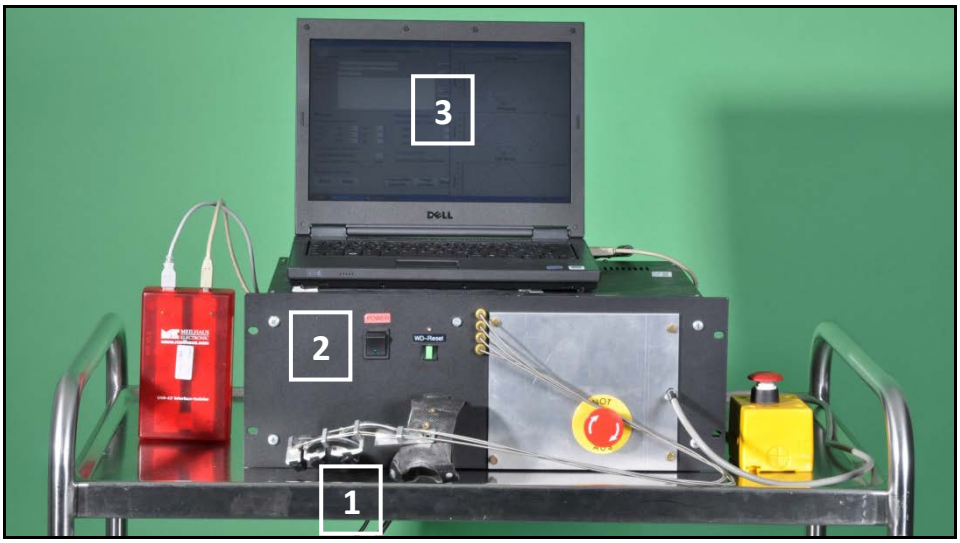


Abb. 4: 1. TUB-Exoskelett, 2. Steuereinheit, 3. Laptop (TUB: Technische Universität Berlin)

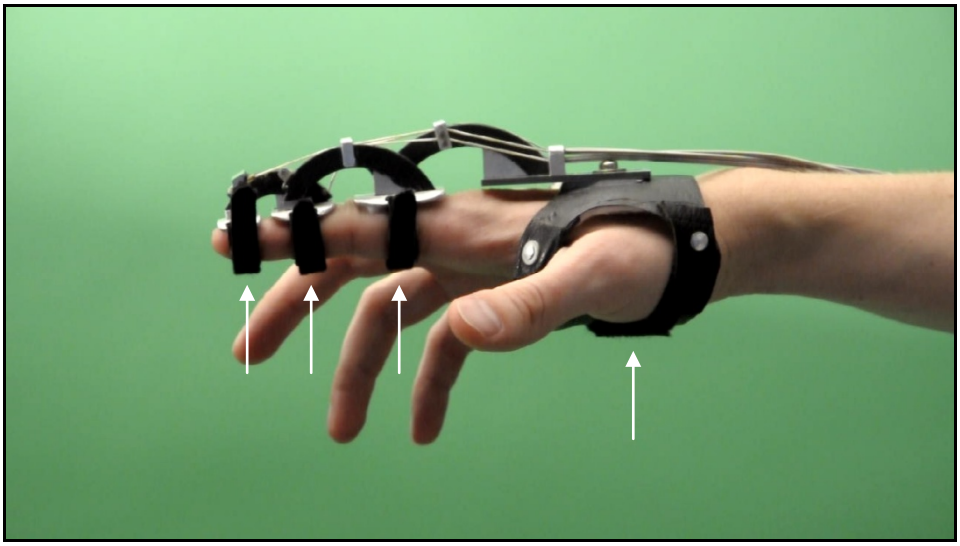


Abb. 5: am Zeigefinger angelegtes Exoskelett mit allen Gelenken in 0 Grad Beugung; die weißen Pfeile zeigen auf die Klettverschlüsse zur Befestigung

Das Exoskelett wird mit vier Klettverschlüssen zum einen auf Höhe der Mittelhand, zum anderen an jedem der drei Fingerglieder befestigt (Abb. 5). Es kann, bis zu einem gewissen Grad, an verschieden lange Finger, über ein eingebautes Schienen-System, angepasst werden. Die zur Bewegung notwendigen Motoren sind in ein Gehäuse ausgelagert und entfalten ihre Kraft über Bowdenzüge an der Schiene. Der Aufbau erlaubt einen problemlosen Einsatz an Zeige-, Mittel- und Ringfinger eines Erwachsenen. Die Anordnung der kreisförmigen Hebelarme direkt dorsal über den Fingergelenken ermöglichen eine nahezu senkrechte Kraftübertragung auf die Fingerglieder (Abb. 6). Daraus resultiert, bei praktisch nicht vorhandenen Scherkräften und idealer Ausrichtung, ein sehr hoher Anwendungskomfort.

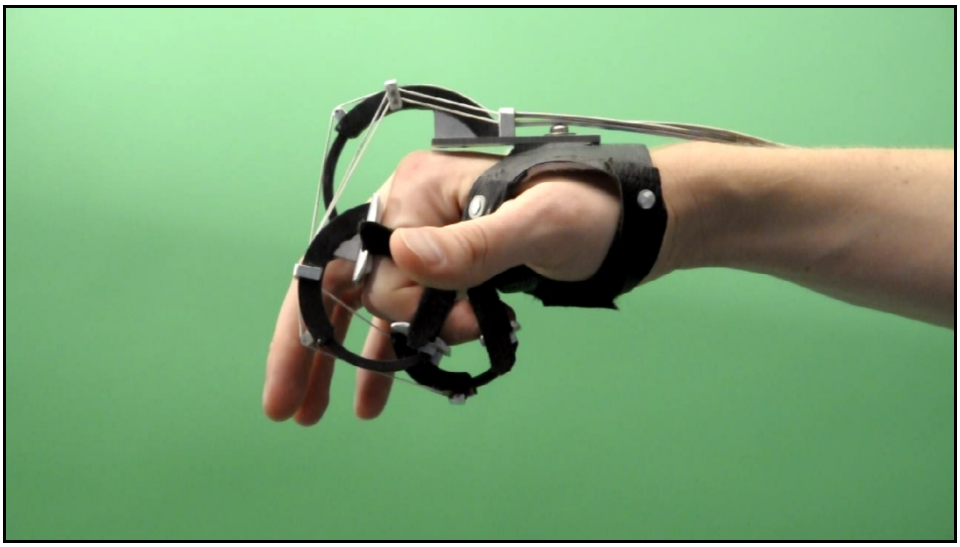


Abb. 6: am Zeigefinger angelegtes Exoskelett mit 85 Grad Beugung im Grundgelenk, 85 Grad im Mittelgelenk und 40 Grad im Endgelenk

2.6 Nachuntersuchung und Statistik

Die Untersuchungen dieser Arbeit erstreckten sich über den Zeitraum von 2008 bis 2012 und fanden in der Sprechstunde der Sektion Hand-, Plastische und Mikrochirurgie des Universitätsklinikums Ulm statt.

Die Nachuntersuchungen der Patienten erfolgten 6, 12 und 18 Wochen nach Operation. Dabei wurden die in Tabelle 5 aufgelisteten Parameter erhoben. Die

Bewegungsumfänge wurden mit einem Goniometer nach der Neutral-Null-Methode gemessen. Die Kraft wurde beim Kraftgriff mit dem Jamar-Dynamometer in sitzender Position mit angelegtem Oberarm sowie 90° Beugung im Ellenbogen und beim Spitzgriff mit einem Fingerdynamometer gemessen.

Tab. 5: erhobene Untersuchungsparameter (DASH-Score: Disabilities of the Arm, Shoulder and Hand)

Untersuchungsparameter		
6. Woche	12. Woche	18. Woche
Beweglichkeit: betroffener Finger	**Beweglichkeit:** betroffener Finger **subjektive Funktion:** DASH-Score	**Beweglichkeit:** betroffener Finger gesunde Gegenseite **subjektive Funktion:** DASH-Score **Kraftgriff:** betroffene Hand gesunde Gegenseite **Spitzgriff:** betroffener Finger gesunde Gegenseite

Die Beurteilung des funktionellen Ergebnisses durch den Patienten wurde mit Hilfe des DASH-Fragebogens erfasst. Der DASH-Score stellt ein international anerkanntes Instrument zur Einschätzung der subjektiven Funktionalität der oberen Extremität dar. Entwickelt wurde der DASH-Score von der American Academy of Orthopedic Surgeons (AAOS), dem Council of musculoskeletal Specialty Society (COMSS), sowie dem Institute for Work and Health, Toronto. Der DASH-Score ermittelt inwieweit sich der Patient beim Ausführen alltäglicher einfacher Tätigkeiten selbst eingeschränkt fühlt. Der Patient kann das für ihn empfundene Maß der Beeinträchtigung in fünf Stufen einteilen. Beginnend von

keinerlei Problemen bei der entsprechenden Tätigkeit bis zur kompletten Unfähigkeit die Tätigkeit auszuführen. Je nach angegebenen Maß der Einschränkung werden für jede Frage somit 1 bis 5 Punkte vergeben. Insgesamt erfragt der Score 30 unterschiedliche Tätigkeiten oder Aspekte des täglichen Lebens. Die Punkte der jeweiligen Fragen werden auf einen Rohwert summiert. Diese Rohwerte werden mit Hilfe einer Formel auf eine Skala von 0 bis 100 konvertiert, wobei 100 Punkte einen höchsten Grad an Einschränkung, 0 Punkte keine Einschränkung reflektieren.

Nach Abschluss der Behandlung wurde die Gesamtbehandlungsdauer berechnet.

Die statistische Auswertung erfolgte deskriptiv sowie mit dem Wilcoxon-Rangsummentest zum Vergleich beider Gruppen und dem Vorzeichenrangtest zum Vergleich der verschiedenen Zeitpunkte. Zur weiteren Auswertung wurde das Statistikprogramm SAS (SAS Institute Inc., Cary, North Carolina, USA, Version 9.2) verwendet. Das Signifikanzniveau wurde mit $p < 0,05$ festgelegt.

3. Ergebnisse

3.1 Komplikationen

In der Standardgruppe erlitt eine Patientin (Ringfinger links, nicht-dominante Hand) eine Reruptur in der vierten postoperativen Woche. Bei angelegter Kleinert-Schiene wollte sie im Reflex ein herabfallendes Glas fangen. Die Patientin wurde erneut operiert, mit einer zweizeitigen Beugesehnenrekonstruktion mit Sehnenverpflanzung versorgt und aus der Studie ausgeschlossen. Ein anderer Patient (Zeigefinger rechts, nicht-dominante Hand) musste ausgeschlossen werden, da er nicht zu den Nachuntersuchungsterminen nach 12 bzw. 18 Wochen erschienen ist.

In der Interventionsgruppe entwickelte ein Patient (Mittelfinger links, nicht-dominante Hand) einen M. Sudeck und wurde aus der Studie ausgeschlossen. Zwei Patienten in der Interventionsgruppe (Zeigefinger links bzw. Mittelfinger rechts, beides nicht-dominante Hand) zeigten temporär Anzeichen eines beginnenden Weichteilinfekts mit leichter Rötung und Schwellung. Beide Fälle konnten konservativ behandelt werden und mussten deshalb nicht ausgeschlossen werden.

Tab. 6: Kollektiv der Patienten mit operativ versorgter, isolierter Beugesehnenverletzung in Zone II der Hand am Universitätsklinikum Ulm zwischen 2008 und 2012, nach Ausschluss der Komplikationen (D2: Zeigefinger; D3: Mittelfinger; D4: Ringfinger; SG: Standardgruppe; IG: Interventionsgruppe)

	Patientenkollektiv						
	D2		D3		D4		gesamt
	links	rechts	links	rechts	links	rechts	
SG	11	7	3	2	4	2	29
IG	14	6	2	1	5	2	30
gesamt	25	13	5	3	9	4	59

Somit ergaben sich das in Tabelle 6 dargestellte Patientenkollektiv bzw. die in Tabelle 7 dargestellte Altersverteilung der Standardgruppe und der Interventionsgruppe.

Tab. 7: mittleres Alter der Patienten mit operativ versorgter, isolierter Beugesehnenverletzung in Zone II der Hand am Universitätsklinikum Ulm zwischen 2008 und 2012, (SG: Standardgruppe; IG: Interventionsgruppe; MW: Mittelwert; SD: Standardabweichung)

Alter [Jahre]			
SG		IG	
MW	SD	**MW**	SD
29,8	± 12,0	**29,3**	± 11,5

3.2 Beweglichkeit

Der vielleicht offensichtlichste Faktor zur Einschätzung des funktionellen Endergebnisses ist die Beweglichkeit. Einen Überblick über die gemessenen Werte des jeweiligen Bewegungsumfangs bieten Abbildung 7 und Abbildung 8. In beiden Gruppen ist sechs Wochen nach OP noch eine deutliche Bewegungseinschränkung, besonders im Mittel- und Endgelenk, zu sehen. Es zeigt sich weiterhin, dass dieses Defizit in beiden Gruppen im weiteren Verlauf stetig abnimmt und 18 Wochen postoperativ eine annähernd freie Beweglichkeit im betroffenen Finger erzielt wurde.

In Zahlen ausgedrückt erreichte die Standardgruppe einen mittleren Gesamtbewegungsumfang von 237° ± 32° (170° – 275°), bzw. die Interventions-gruppe einen Gesamtbewegungsumfang von 250° ± 24° (170° – 280°). Der Unterschied zwischen der Standardgruppe und der Interventionsgruppe im Bewegungsumfang des DIP sechs Wochen nach OP war zwar statistisch signifikant ($p < 0,046$), jedoch klinisch nicht relevant (Effektstärke -0,499). Die restlichen Unterschiede zwischen beiden Gruppen waren zu keinem Untersuchungszeitpunkt signifikant.

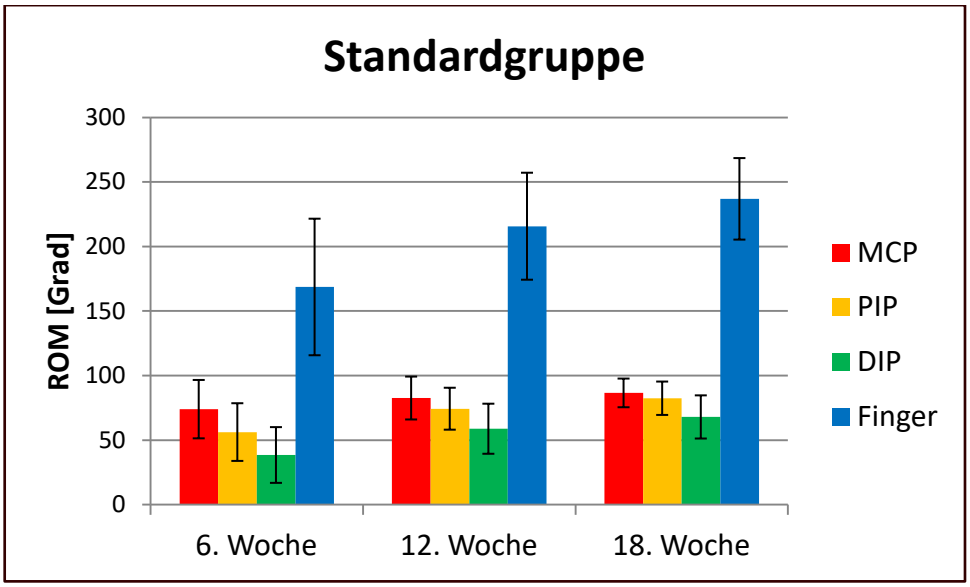


Abb. 7: mittlere Beweglichkeit der einzelnen Fingergelenke und des gesamten Fingers in der Standardgruppe nach operativ versorgter, isolierter Beugesehnenverletzung in Zone II der Hand am Universitätsklinikum Ulm zwischen 2008 und 2012 (ROM: Bewegungsumfang; MCP: Fingergrundgelenk; PIP: Fingermittelgelenk; DIP: Fingerendgelenk)

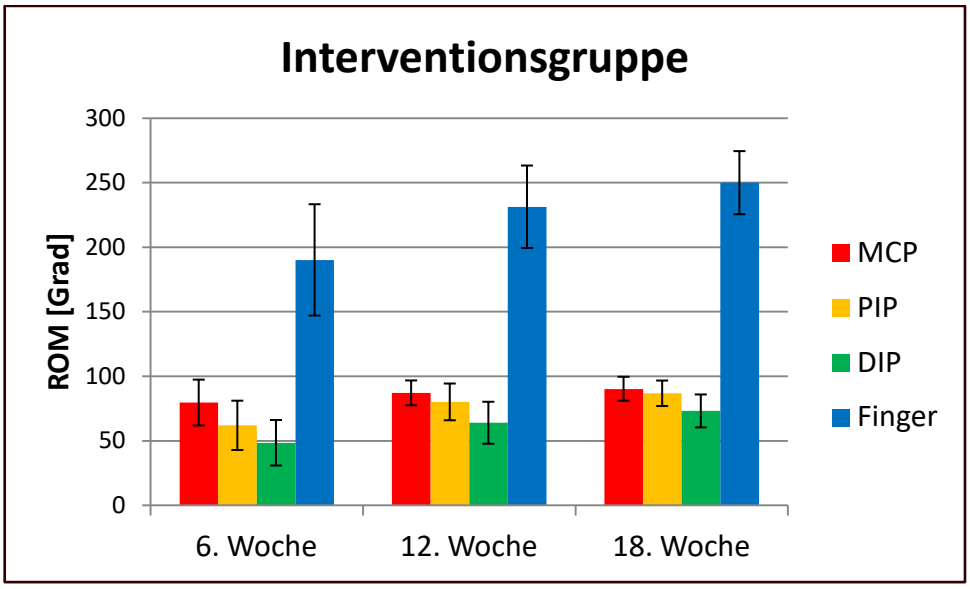


Abb. 8: mittlere Beweglichkeit der einzelnen Fingergelenke und des gesamten Fingers in der Interventionsgruppe nach operativ versorgter, isolierter Beugesehnenverletzung in Zone II der Hand am Universitätsklinikum Ulm zwischen 2008 und 2012 (ROM: Bewegungsumfang; MCP: Fingergrundgelenk; PIP: Fingermittelgelenk; DIP: Fingerendgelenk)

Ein oftmals beobachtetes Problem nach Beugesehnennaht ist das Auftreten von Beugekontrakturen. Hiervon ist normalerweise besonders das Fingermittelgelenk betroffen. Wie in Tabelle 8 und Tabelle 9 dokumentiert, war in beiden Gruppen sechs Wochen postoperativ die Fingerstreckung, vor allem im Mittelgelenk eingeschränkt. Diese konnte jedoch im Verlauf bis zur 18. postoperativen Woche in beiden Gruppen signifikant verbessert werden ($p < 0,05$).

Tab. 8: mittleres Streckdefizit der einzelnen Fingergelenke in der Standardgruppe nach operativ versorgter, isolierter Beugesehnenverletzung in Zone II der Hand am Universitätsklinikum Ulm zwischen 2008 und 2012 (MCP: Fingergrundgelenk; PIP: Fingermittelgelenk; DIP: Fingerendgelenk; MW: Mittelwert; SD: Standardabweichung)

	Streckdefizit Standardgruppe [Grad]					
	6. Woche		12. Woche		18. Woche	
	MW	SD	**MW**	SD	**MW**	SD
MCP	**6,4**	± 11,1	**3,8**	± 7,4	**2,4**	± 5,6
PIP	**19,1**	± 12,4	**12,2**	± 10,8	**7,9**	± 9,0
DIP	**8,6**	± 7,8	**4,5**	± 6,2	**2,4**	± 4,4

Tab. 9: mittleres Streckdefizit der einzelnen Fingergelenke in der Interventionsgruppe nach operativ versorgter, isolierter Beugesehnenverletzung in Zone II der Hand am Universitätsklinikum Ulm zwischen 2008 und 2012 (MCP: Fingergrundgelenk; PIP: Fingermittelgelenk; DIP: Fingerendgelenk; MW: Mittelwert; SD: Standardabweichung)

	Streckdefizit Interventionsgruppe [Grad]					
	6. Woche		12. Woche		18. Woche	
	MW	SD	**MW**	SD	**MW**	SD
MCP	**6,3**	± 9,2	**2,3**	± 4,7	**1,3**	± 3,7
PIP	**16,8**	± 12,0	**6,5**	± 7,3	**2,2**	± 4,5
DIP	**6,8**	± 6,2	**7,3**	± 4,7	**1,0**	± 3,3

Die Patienten der Interventionsgruppe schnitten tendenziell etwas besser ab und erreichten eine annähernd komplett freie Streckung des gesamten Fingers. Die

Unterschiede zwischen beiden Gruppen waren jedoch zu keinem Untersuchungszeitpunkt statistisch signifikant.

Eine Methode zur Beurteilung des funktionellen Endergebnisses ist der Vergleich des Bewegungsumfangs des verletzten Fingers mit dem gesunden Finger der anderen Hand, wie in Tabelle 9 und Tabelle 10 grafisch dargestellt. Dieser Vergleich zeigt in der Standardgruppe nach 18 Wochen nur noch leichte Defizite am betroffenen Finger. Die mittlere ROM des Fingergrundgelenkes der verletzten Finger betrug 94% der gesunden Gegenseite, die des Mittelgelenkes 89% und die des Endgelenkes 83%. Die mittlere Beweglichkeit des gesamten Fingers betrug 89% der gesunden Gegenseite.

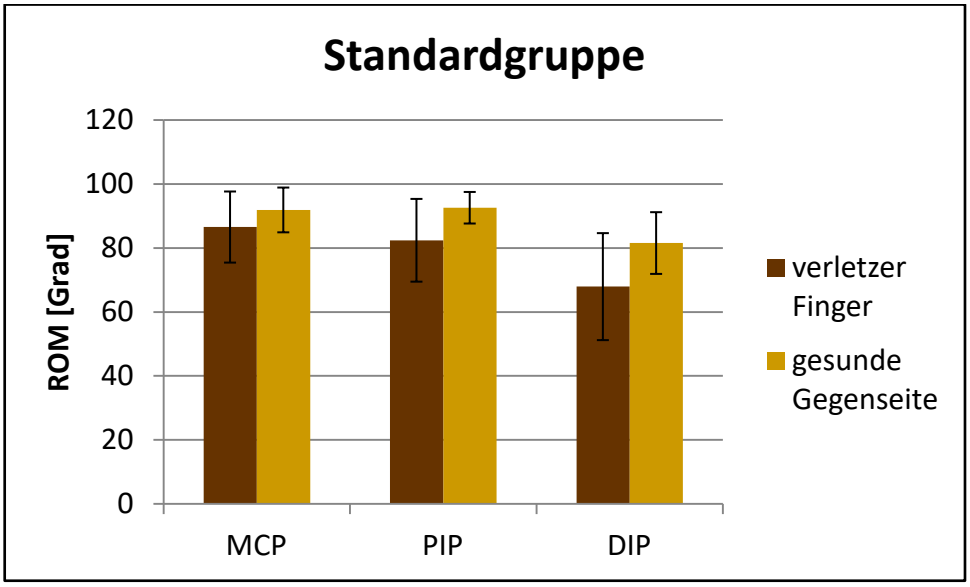


Abb. 9: mittlere Beweglichkeit der einzelnen Gelenke des betroffenen Fingers und der gesunden Gegenseite in der Standardgruppe 18 Wochen nach operativ versorgter, isolierter Beugesehnenverletzung in Zone II der Hand am Universitätsklinikum Ulm zwischen 2008 und 2012 (ROM: Bewegungsumfang; MCP: Fingergrundgelenk; PIP: Fingermittelgelenk; DIP: Fingerendgelenk)

In der Interventionsgruppe fiel der Unterschied zur gesunden Gegenseite nach 18 Wochen noch geringer aus. Bei der Betrachtung der einzelnen Gelenke zeigte sich für das Grundgelenk der verletzten Finger ein relativer Bewegungsumfang von 99%, für das Mittelgelenk 94% und für das Endgelenk 88% der gesunden

Gegenseite. Die mittlere ROM des gesamten Fingers betrug 94% der gesunden Gegenseite. Die Unterschiede zwischen beiden Gruppen waren statistisch nicht signifikant.

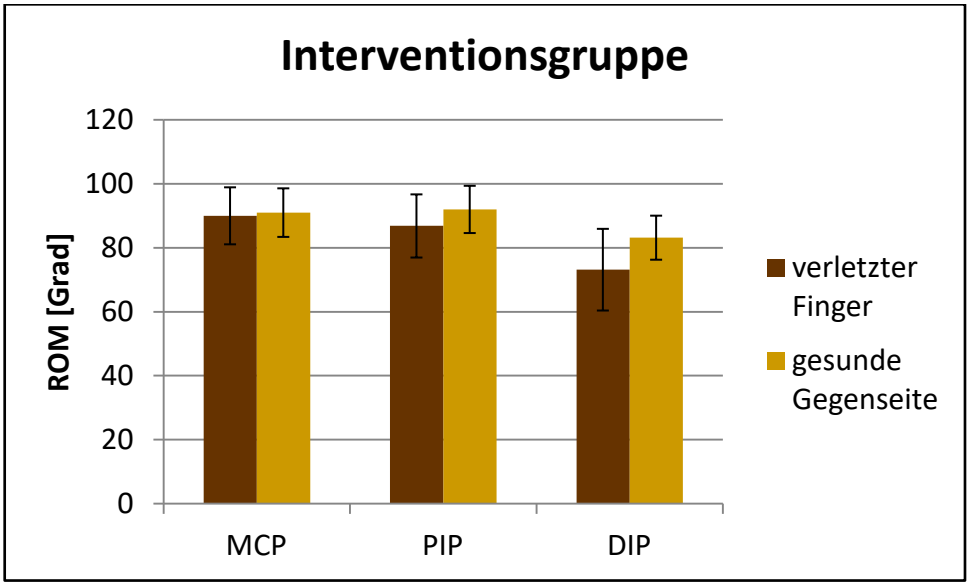


Abb. 10: mittlere Beweglichkeit der einzelnen Gelenke des betroffenen Fingers und der gesunden Gegenseite in der Interventionsgruppe 18 Wochen nach operativ versorgter, isolierter Beugesehnenverletzung in Zone II der Hand am Universitätsklinikum Ulm zwischen 2008 und 2012 (ROM: Bewegungsumfang; MCP: Fingergrundgelenk; PIP: Fingermittelgelenk; DIP: Fingerendgelenk)

Zur weiteren Bewertung der Beweglichkeit wurde zusätzlich der Strickland-Score berechnet und die Ergebnisse nach den Kriterien in Tabelle 10 eingeordnet. Es gab über das gesamte Kollektiv kein schlechtes funktionelles Ergebnis, 12% erreichten laut dieser Einteilung ein mäßiges Ergebnis. Die Standardgruppe erzielte 79% gute bis sehr gute Ergebnisse, die Interventionsgruppe sogar 97% gute bis sehr gute Ergebnisse. Der Unterschied zwischen beiden Gruppen war statistisch nicht signifikant ($p < 0,694$).

Tab. 10: Einteilung der Fingerbeweglichkeit nach dem originalen Strickland-Score 18 Wochen nach operativ versorgter, isolierter Beugesehnenverletzung in Zone II der Hand am Universitätsklinikum Ulm zwischen 2008 und 2012 (SG: Standardgruppe; IG: Interventionsgruppe)

	Strickland-Score			
	Ergebnis			
	sehr gut	**gut**	mäßig	schlecht
SG	**18**	**5**	6	0
IG	**24**	**5**	1	0

3.3 Kraft

Großen Anteil an ihrer Funktionstüchtigkeit hat auch die Kraft der gesamten Hand, bzw. der einzelnen Finger. Da mit dem Belastungsaufbau des Fingers erst drei Monate nach OP begonnen wird, wurden die Kraftmessungen nur am letzten Untersuchungstermin (18. Woche) durchgeführt. Tabelle 11 zeigt ein deutlich niedrigeres Kraftniveau im Vergleich zur gesunden Gegenseite bei beiden Gruppen.

Tab. 11: mittlere Kraft beim Kraftgriff der betroffenen Hand und der gesunden Gegenseite 18 Wochen nach operativ versorgter, isolierter Beugesehnenverletzung in Zone II der Hand am Universitätsklinikum Ulm zwischen 2008 und 2012 (SG: Standardgruppe; IG: Interventionsgruppe; MW: Mittelwert; SD: Standardabweichung)

	Kraftgriff [Kilogramm]			
	verletzte Hand		Gegenseite	
	MW	SD	**MW**	SD
SG	**32,9**	± 12,2	**43,7**	± 12,8
IG	**31,9**	± 12,2	**41,0**	± 12,4

In der Standardgruppe erreichten die Patienten 75% der Gegenseite, in der Interventionsgruppe 78%. Dieses Ergebnis relativiert sich etwas durch die Tatsache, dass sich lediglich sieben Patienten (drei in der Standardgruppe; vier in

der Interventionsgruppe) an der dominanten Hand verletzten und so bei allen anderen Patienten von einem anderen Grundkraftniveau ausgegangen werden muss. Die Unterschiede zwischen beiden Gruppen waren statistisch nicht signifikant ($p < 0{,}838$).

Um die Kraftverhältnisse etwas genauer darstellen zu können, wurde zusätzlich die maximale Kraft beim Spitzgriff zwischen dem verletzten Finger und dem Daumen, sowie erneut im Vergleich mit der gesunden Gegenseite, mit einem Fingerdynamometer gemessen (Tab. 12). Auch hier spiegelt sich ein deutlich herabgesetztes Kraftniveau in beiden Gruppen wider. Die relative Kraft beim Spitzgriff in der Standardgruppe betrug 65%, in der Interventionsgruppe 64%. Erneut gilt es hier, wie schon beim Kraftgriff, die Dominanz der Hände zu berücksichtigen. Die Unterschiede zwischen beiden Gruppen waren statistisch nicht signifikant ($p < 0{,}538$).

Tab. 12: mittlere Kraft beim Spitzgriff des betroffenen Fingers und der gesunden Gegenseite 18 Wochen nach operativ versorgter, isolierter Beugesehnenverletzung in Zone II der Hand am Universitätsklinikum Ulm zwischen 2008 und 2012 (SG: Standardgruppe; IG: Interventionsgruppe; MW: Mittelwert; SD: Standardabweichung)

	Spitzgriff [Kilogramm]			
	verletzter Finger		Gegenseite	
	MW	SD	**MW**	SD
SG	**5,0**	± 1,9	**7,7**	± 2,3
IG	**4,7**	± 1,7	**7,4**	± 2,1

3.4 DASH-Score

Der DASH-Score zur Einschätzung der Beschwerden im Alltagsleben zeigte bereits nach zwölf Wochen eine gute Funktionsfähigkeit in beiden Gruppen (14,3 ± 10,6 in der Standardgruppe; 11,5 ± 8,1 in der Interventionsgruppe). Diese Werte konnten bis zur 18. Woche nach OP noch einmal signifikant verbessert werden ($p < 0,0001$). Bei der letzten Untersuchung konnten beide Gruppen im Mittel einen einstelligen Wert aufweisen (Abb. 11). Die Unterschiede zwischen beiden Gruppen waren zu keinem Untersuchungszeitpunkt statistisch signifikant.

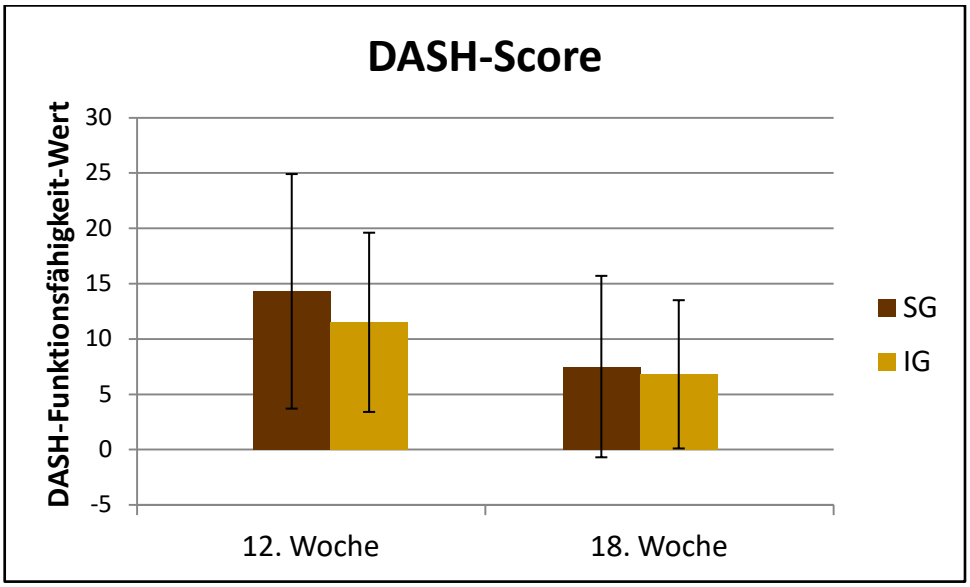


Abb. 11: mittlerer DASH-Funktionsfähigkeit-Wert der Patienten nach operativ versorgter, isolierter Beugesehnenverletzung in Zone II der Hand am Universitätsklinikum Ulm zwischen 2008 und 2012 (DASH: Disabilities of the Arm, Shoulder and Hand; SG: Standardgruppe; IG: Interventionsgruppe)

3.5 Behandlungsdauer

Als Behandlungsdauer wurde die Zeit definiert, die zwischen dem Tag der operativen Versorgung und dem Zeitpunkt der letzten physiotherapeutischen Anwendung für die Standardgruppe, bzw. dem letzten Übungstermin mit dem Exoskelett für die Interventionsgruppe, verging (Abb. 12). Hier zeigte sich eine deutliche Tendenz zu Gunsten der Interventionsgruppe. Die Patienten in der Standardgruppe benötigten durchschnittlich 12,6 Wochen ± 4,5 Wochen (6 – 23 Wochen), die Patienten der Interventionsgruppe 9,7 Wochen ± 3,4 Wochen (4 – 16 Wochen). Während in der Interventionsgruppe alle Patienten bis zum Ende der 16. postoperativen Woche die Nachbehandlung beendet hatten, benötigten sechs Patienten der Standardgruppe bis zur 17. Woche oder darüber hinaus noch weitere physiotherapeutische Betreuung. Der Unterschied zwischen beiden Gruppen war statistisch signifikant ($p < 0{,}021$).

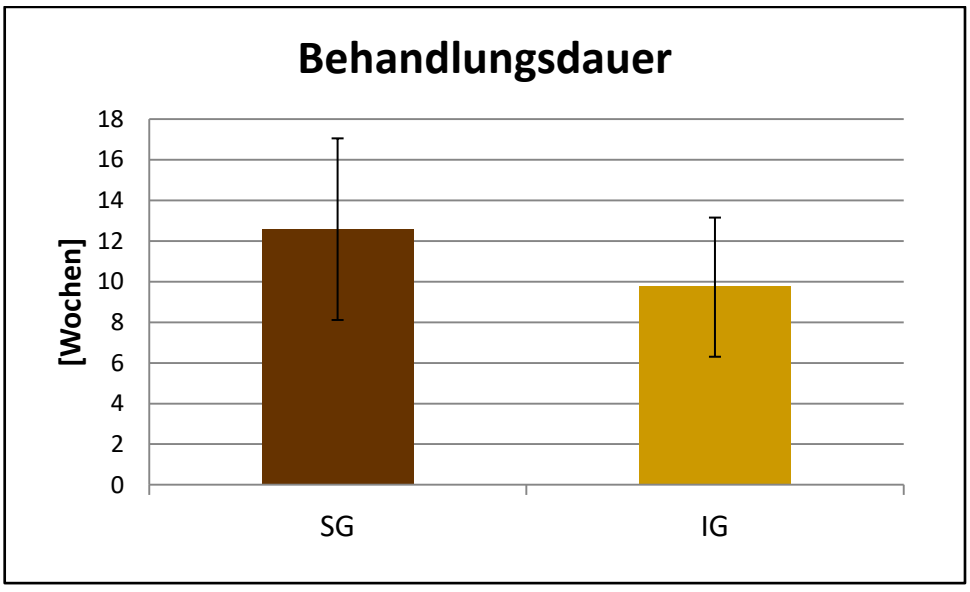


Abb. 12: mittlere Nachbehandlungsdauer der Patienten nach operativ versorgter, isolierter Beugesehnenverletzung in Zone II der Hand am Universitätsklinikum Ulm zwischen 2008 und 2012 (SG: Standardgruppe; IG: Interventionsgruppe)

4. Diskussion

4.1 Nachbehandlungsverfahren

Die erfolgreiche Behandlung von Beugesehnenverletzungen an der Hand in Zone II ist nach wie vor eine große Herausforderung für den behandelnden Chirurgen.[10; 23; 43] Nichtsdestoweniger haben sich im Laufe der letzten vier Jahrzehnte die Erfolge nach Beugesehnennaht stark erhöht. Ein Grund dafür ist die Verwendung von Nachbehandlungsschemata mit frühzeitiger Mobilisierung, wodurch Adhäsionen und Gelenkversteifungen vermieden werden.[56] Es hat sich gezeigt, dass die Bewegung im Fingermittelgelenk bzw. -endgelenk zu einer Auslenkung der Sehne um 1,3 mm respektive 0,3 mm pro 10° Bewegung führt. Das Bewegen des Fingergrundgelenks führt zu keiner Auslenkung der Beugesehne.[51; 65]

Fokus der jüngeren Forschung waren häufig Nachbehandlungsprogramme, die auf früher, aktiver Bewegung basieren.[10] Der derzeitige Goldstandard wird als so genannte early passive movement bezeichnet, bei der initial eine aktive Beugung des verletzten Fingers verboten ist. Im deutschsprachigen Raum hat sich die dynamische Nachbehandlung nach Kleinert, mit verschiedenen Modifikationen durchgesetzt.[24; 25; 27; 51; 65] Auch bei kombinierten Sehnen- und Nervenverletzungen gilt die dynamische Nachbehandlung als Mittel der Wahl, wobei hier die Dauer der Ruhigstellung um ca. vier Tage verlängert wird, um der Nervennaht etwas mehr Schutz zu bieten.[28]

In den letzten 10 Jahren zeigten sich die frühen aktiven Bewegungsprogramme auf dem Vormarsch, wobei auch hier hauptsächlich auf eine aktive Extension der Fingermittel- und -endgelenke geachtet wird und nur sekundär mit entsprechender Vorsicht aktiv gebeugt werden soll. Zum Beispiel werden die Patienten angeleitet in den ersten 2 – 3 Wochen aktiv nur zu 2/3 zu beugen und darüber hinaus passiv mit der gesunden Hand zu unterstützen. Die aktive Beugung soll bis zur 8. Woche widerstandsadaptiert maximal durchgeführt werden.[56]

Die Heilungsprozesse der Sehne dauern jedoch teilweise bis zur 16. postoperativen Woche an.[51] Zudem gehen widerstandsadaptierte und ständig wechselnde Nachbehandlungsschemata mit einer schlechteren Patientencompliance einher. Der Patient kann die Ursache eines zunehmenden Widerstandes (z.B. Hängenbleiben der aufgetriebenen Sehne an einem Ringband) bei der aktiven Beugung nur schwer einschätzen und riskiert so früh nach der Operation ggf. eine Reruptur.

Arbeiten der Cochrane Collaboration und von Chesney et al. versuchen einen Überblick über die Vor- bzw. Nachteile der gängigen Nachbehandlungsschemata zu geben.[10; 58] Thien et al. untersuchten hierbei ausschließlich randomisierte Interventionsstudien in den gängigen elektronischen Datenbanken zwischen 1966 und Oktober 2002. Hierbei erfüllten nur sechs Publikationen die sehr streng gewählten Einschlusskriterien, wovon drei zum damaligen Zeitpunkt Abstracts waren. Die Schlussfolgerung der Autoren war, dass postoperativ kontrollierte Mobilisierung weitgehend eingesetzt wird. Es ließen sich jedoch keine ausreichenden Beweise für ein überlegenes Nachbehandlungsprogramm finden.[58] Da der Großteil der Publikationen Beobachtungsstudien sind, wurden evtl. relevante klinische Informationen nicht berücksichtigt.

Chesney et al. schlossen Beobachtungsstudien mit ein und untersuchten englischsprachige Publikationen aus den elektronischen Datenbanken im Zeitraum von 1970 bis 2009. 15 Studien erfüllten die Einschlusskriterien. Es zeigte sich, dass die Nachbehandlungsprogramme mit kontrollierter passiver Bewegung bzw. mit passiver Beugung/aktiver Streckung kombiniert mit früher aktiver Bewegung den Programmen die ausschließlich mit passiver Beugung/aktiver Streckung bzw. ausschließlich kontrollierter passiver Bewegung arbeiten, hinsichtlich Rerupturraten und ROM überlegen sind.[10]

Eine Studie zu den verwendeten Nachbehandlungsverfahren von Physiotherapeuten im mittleren Westen der USA verdeutlicht zusätzlich die

Verbreitung der Nachbehandlungsschemata nach Kleinert, Duran sowie deren weiterentwickelte Formen. Im Mittel wird 5,2 Wochen nach operativer Versorgung die Schiene entfernt, eine Woche später wird mit Übungen gegen Widerstand begonnen.[18] In der Literatur wird der Beginn der aktiven Flexion nach 28 Tagen empfohlen.[11; 13]

Nach der von Chesney et al. verwendeten Einteilung der Nachbehandlungsverfahren sind sowohl die Standardgruppe als auch die Interventionsgruppe den Programmen mit kontrollierter passiver Bewegung kombiniert mit passiver Beugung/aktiver Streckung zuzuordnen.[10]

4.2 Funktion und Rerupturen

Bei der Beweglichkeit wird sowohl dem Gesamtbewegungsumfang eines Fingers, als auch dem Ausmaß des Streckdefizits die größte Bedeutung beigemessen. Das Strickland-System (original und modifiziert) hat sich neben dem Buck-Gramcko-System und dem System, das von der American Society for Surgery of the Hand unterstützt wird, als überwiegend genutztes Instrument zur Beurteilung der Fingerbeweglichkeit nach Beugesehnenruptur in Zone II bewiesen. Der originale Strickland-Score gilt als präzises System und ist relativ leicht anzuwenden.[10; 52]

In den Studien, die das originale Strickland-System nutzten, zeigte sich ein statistisch signifikanter Unterschied ($p < 0{,}001$) zwischen den verwendeten Nachbehandlungsverfahren.[3; 5; 8; 12; 16; 22; 38; 47; 50] Die Gruppen mit ausschließlich passiver Beugung/aktiver Streckung schnitten mit nur 67% guten bis sehr guten Ergebnissen bei insgesamt 123 Fingern deutlich schlechter ab, als die Gruppen mit kontrollierter passiver Bewegung kombiniert mit passiver Beugung/aktiver Streckung (73% gut – sehr gut, 205 Finger).[1; 6–8; 12; 16; 32; 47; 50; 53] Die besten Ergebnisse zeigten die Gruppen mit früher aktiver Bewegung (94% gut – sehr gut, 127 Finger).[3; 5; 22; 38; 48] Die Ergebnisse der Standardgruppe (79% gut – sehr gut, 29

Finger) sind vergleichbar mit denen der Gruppen mit kontrollierter passiver Bewegung kombiniert mit passiver Beugung/aktiver Streckung. Die Ergebnisse der Interventionsgruppe (97% gut – sehr gut, 30 Finger) liefern sogar vergleichbare Ergebnisse mit den Gruppen mit früher aktiver Bewegung.[10] Zudem zeigte sich, dass es unter der physiotherapeutischen Betreuung durch zertifizierte Handtherapeuten zu besseren Beweglichkeiten mit weniger Beugekontrakturen kommt.[62]

Die Häufigkeit des Auftretens von Rerupturen während des Beobachtungszeitraums ist eindeutig von essentieller Bedeutung, da bei erneuter operativer Versorgung meist eine zweizeitige Beugesehnenrekonstruktion mit Sehnenverpflanzung notwendig wird, was das Endergebnis maßgeblich beeinflusst. Chesney et al. berichten in ihrer Übersichtsarbeit in Abhängigkeit von den verwendeten Nachbehandlungsverfahren von Rerupturraten zwischen 2,3% und 7,1%. Es zeigte sich hierbei keine Korrelation zur Anzahl der bei der Operation verwendeten Kernnähte.[10] Die Rate der Rerupturen in dieser Studie hingegen betrug über das gesamte Kollektiv 1,6%, bzw. 3,2% in der Standardgruppe und 0% in der Interventionsgruppe und liegt damit auf einem sehr niedrigen Niveau. Eine Ursache hierfür ist die Tatsache, dass nur glatte Beugesehnenverletzungen ohne Substanzdefekt in die Studie eingeschlossen wurden.

Eine Untersuchung zur Einschätzung eines quantitativen Unterschiedes bei früher passiver Bewegung zeigte eine signifikant bessere Beweglichkeit, nach mittlerem Follow-up von 10,8 Monaten, in der Gruppe, die die passiven Übungen während ersten 6 Wochen nach Operation 12-mal öfter durchführte.[16] Hier scheint also das Sprichwort "viel hilft viel" angebracht zu sein. Die vielleicht größte Schwierigkeit in der Einschätzung verschiedener Nachbehandlungsschemata ist und bleibt jedoch die Tatsache, dass nicht allein das Übungsprogramm entscheidend für das funktionelle Endergebnis ist. Ebenso wichtige Rollen spielen die verwendete

Nahttechnik, die chirurgische Expertise des Operateurs sowie die Compliance des Patienten.

Ein weiteres Merkmal für die Funktion eines Fingers bzw. der gesamten Hand ist die Kraft, die beim Spitzgriff bzw. Kraftgriff aufgewendet werden kann. Da eine volle Belastung nach zwölf Wochen aus unserer Sicht ein noch zu großes Risiko für eine Reruptur darstellt, wurde die Kraftmessung ausschließlich nach 18 Wochen durchgeführt und mit der gesunden Gegenseite verglichen.

Die geringe Zahl der Studien, die den Kraftgriff als Instrument zur Messung der Funktion einer Hand nutzen, lässt einen Vergleich nur bedingt zu, weshalb es sinnvoll scheint zusätzlich das Verhältnis zur Kraft der gesunden Gegenseite des Patienten zu betrachten.

Adolfsson et al. beobachteten unter anderem den Kraftgriff zum Ende ihrer Untersuchungen. Es wurden verschiedene Arten der postoperativen Mobilisierung miteinander verglichen, es zeigten sich jedoch in beiden Studien keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Kraft zwischen den jeweiligen Gruppen.[1]

Yen et al. berichteten von signifikant besseren Ergebnissen hinsichtlich des Kraftgriffs bei der Nachbehandlung mit früher aktiver Mobilisierung im Vergleich zur passiven Mobilisierung. Hier wurde jedoch keine randomisierte Verteilung vorgenommen, die Kontrollgruppe wurde sogar retrospektiv betrachtet.[68] Deshalb, und aufgrund der sehr kleinen Fallzahl, ist eine fundierte Aussage nur schwer möglich.

Die Patienten der Standardgruppe erreichten 75% der gesunden Gegenseite, die der Interventionsgruppe sogar 78%. In der Literatur finden sich Ergebnisse zwischen 78% und 89%. Bei diesen Werten wurde jedoch ein Korrekturfaktor verwendet, wobei davon ausgegangen wird, dass die nicht-dominante Hand ca. 10% weniger Kraft aufwenden kann als die dominante.[21] Wird diese Regel auf

unsere Daten angewandt, so ergeben sich Werte von 83% in der Standardgruppe bzw. 85% in der Interventionsgruppe. Dadurch sind unsere Werte durchaus auf einem vergleichbaren Niveau zu sehen.

Ein zusätzliches Werkzeug zur noch differenzierteren Betrachtung der Funktionalität stellt der Spitzgriff dar. Der Spitzgriff ermöglicht es nämlich, die Kraft nach einer Verletzung unabhängig von den unverletzten Nachbarfingern zu betrachten.

Es zeigte sich ein deutlich niedrigeres relatives Kraftniveau im Vergleich zur gesunden Gegenseite, wobei erneut auf die hohe Anzahl an Verletzungen der nicht-dominanten Hand verwiesen werden muss. Hier ist bisher noch kein Korrekturfaktor in Gebrauch, sodass wir lediglich die Rohdaten betrachten können. Die Unterschiede zwischen den beiden Gruppen (65% in der Standardgruppe bzw. 64% in der Interventionsgruppe) waren nicht signifikant. Die Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass bei isolierten Verletzungen an einem Finger die gesunden Nachbarfinger, insbesondere beim Kraftgriff, den Kraftverlust des verletzten Fingers auffangen können.

4.3 DASH-Score

Neben den traditionell gemessenen Größen zur objektiven Einschätzung der Funktion einer Hand stellt auch die subjektive Zufriedenheit und Alltagsbewältigung einen wichtigen Faktor der gesamten Behandlung dar.[10] Zur Beurteilung der Lebensqualität bietet sich der DASH-Fragebogen an, der speziell für Verletzungen an Hand, Arm bzw. Schulter entwickelt wurde. Die Patienten füllten diesen Bogen 12 bzw. 18 Wochen nach der operativen Versorgung aus, um sowohl einen Vergleich zwischen den Gruppen als auch eine zeitliche Dynamik zu überprüfen.

Es zeigten sich in beiden Gruppen bereits initial relativ niedrige Werte, die darauf zurückzuführen waren, dass bei lediglich sieben Patienten ein Finger der dominanten Hand verletzt war und einige Items des Fragebogen nach Tätigkeiten fragten, die mit einer Hand durchzuführen waren. Die DASH-Werte beider Gruppen verbessern sich im zeitlichen Vergleich statistisch signifikant ($p < 0,0001$), was mit den übrigen Untersuchungsgrößen durchaus korreliert und sich in der aktuellen Studienlage wiederspiegelt, in der sich zeigt, dass sich die DASH-Werte nach sechs Monaten wieder dem Basiswert vor der Verletzung annähern.[53; 62]

4.4 Behandlungsdauer

Das Durchschnittsalter des Gesamtkollektivs von 29,5 Jahren zeigt, dass sich hauptsächlich junge Erwachsene im erwerbsfähigen Alter eine Beugesehnen-verletzung an der Hand zuziehen. Direkt gekoppelt daran ist ein gewisser volkswirtschaftlicher Verlust, da praktisch alle Patienten für mehrere Wochen arbeitsunfähig sind. Es muss also neben der funktionellen Wiederherstellung des Fingers auch auf eine zügige Wiedereingliederung in den Arbeitsalltag geachtet werden, ohne dabei das Risiko einer Reruptur zu vernachlässigen.

Auch wenn die funktionellen Endergebnisse beider Gruppen durchaus vergleichbar sind, zeigte sich bei der Behandlungsdauer der Interventionsgruppe ein signifikant besseres Ergebnis im Vergleich zur Standardgruppe. Die Patienten der Interventionsgruppe konnten im Durchschnitt fast drei Wochen früher die Behandlung abschließen und dementsprechend früher wieder ihre Arbeit aufnehmen.

Andere Autoren berichten über Arbeitsunfähigkeitsbescheinigungen zwischen 11 und 18 Wochen.[12; 62] In diesem Bereich bewegen sich auch die Werte der Standardgruppe. Somit zeigt sich die Nachbehandlung mit dem Exoskelett auch im

Vergleich zu anderen Studien bezüglich der Dauer der Arbeitsunfähigkeit überlegen.

4.5 Bewegungsschienen

Bewegungsschienen sind in der postoperativen Versorgung an anderen Gelenken schon seit Jahrzehnten in Gebrauch. Selbst wenn deren Nutzen Gegenstand aktueller Forschung ist, gehören sie zur Zeit noch zur standardmäßigen Nachsorge an Knie- und Schultergelenk nach bestimmten Operationen. So wird zum Beispiel diskutiert, dass die oftmals verwendeten Motorschienen nach Knie-TEP lediglich bei der Beugung des Kniegelenkes den gewünschten Übungseffekt haben und die Streckung auf Grund der mangelnden Fixierung am Bein des Patienten nur unzureichend unterstützen. Durch die Konstruktionsweise unseres Exoskeletts, bei dem jedes einzelne Fingerglied mit Hilfe von Klettverschlussriemen fest mit der Bewegungsschiene verbunden ist, wird sowohl die passive Beugung als auch die passive Streckung in jedem einzelnen Fingergelenk unabhängig ermöglicht.

Auch mit Bewegungsschienen im Bereich der Finger wurden bereits einige Versuche durchgeführt. So entstanden Schienen, die alle Langfinger der Hand im Grund-, Mittel- und Endgelenk gleichzeitig beugen. Dies ermöglichte natürlich keine differenzierte Beübung eines einzelnen Gelenkes eines Fingers. Diese Möglichkeit jedoch ist unserer Meinung nach entscheidend um bei der Beugesehnenverletzung in Zone II Kontrakturen und Streckdefizite vor allem im Mittelgelenk zu verhindern. Auch hier kann das Exoskelett, mit der Möglichkeit ein einzelnes Gelenk separat zu beüben, punkten.

Ein nicht zu vernachlässigender Faktor ist die Akzeptanz der Bewegungsschiene durch den Patienten. Jeder Teilnehmer der Interventionsgruppe empfand die Therapie angenehm und komfortabel. Kein Patient hatte das Gefühl der Unsicherheit oder Gefahr während der Sitzungen. Alle Patienten befürworteten

die eventuelle Möglichkeit eine tragbare Variante des Exoskeletts zu Hause zur Unterstützung der Nachbehandlung zu verwenden. Insgesamt lässt sich also eine hohe Akzeptanz durch die Patienten verzeichnen.

4.6 Limitationen

In dieser Studie wurde kein festes Übungsprogramm für die physiotherapeutische Behandlung der Standardgruppe vorgegeben. Obwohl damit keine standardisierte Nachbehandlung durchgeführt wurde, vermochte diese Vorgehensweise jedoch den klinischen Alltag wiederzugeben, in dem die Physiotherapeuten ebenfalls keine strengen Vorgaben durch den Operateur erhalten. Zudem ist eine regelmäßige physiotherapeutische Betreuung auf Grund des Fachkräftemangels nicht immer gegeben.

Ein kritisch zu beleuchtender Aspekt ist die derzeit begrenzte Anwendungsmöglichkeit der Schiene. Da es sich um einen Prototyp handelt, mussten die Patienten zu jeder Behandlung in unsere Klinik kommen, was teilweise mit längeren Anfahrten verbunden war. Zudem kann das Exoskelett derzeit nur an Zeige-, Mittel- und Ringfinger angelegt werden. Nicht selten sind jedoch die Beugesehnen an Daumen oder Kleinfinger verletzt. Auch Beugesehnenverletzungen an mehreren Fingern einer Hand konnten nicht in die Studie eingeschlossen werden, da beim An- und Ablegen des Exoskeletts sowie der Beübung teilweise aktive Bewegungen der benachbarten Finger notwendig sind. Die Bowdenzüge zur Kraftübertragung zwischen Motor und Finger stellen noch eine Schwachstelle dar, da die einliegenden Seile sich aufreiben und schließlich reißen können. Hier bedarf es einer technischen Verbesserung des Exoskeletts um einerseits eine einfache Anwendung zu Hause zu ermöglichen, andererseits alle Finger einer Hand einzeln bzw. mehrere Finger derselben Hand gleichzeitig beüben zu können.

Das kleine Patientenkollektiv sowie die relativ kurze Nachuntersuchungsdauer müssen als Limitationen genannt werden. Es handelt sich jedoch hier um eine vollkommen neue Behandlungsmethode mit einem Prototyp einer Bewegungsschiene, die zum ersten Mal unter klinischen Bedingungen eingesetzt wurde. Zweifelsohne werden weitere Studien mit größeren Kollektiven sowie eine Erhebung von Langzeitwerten notwendig sein, um noch präzisere Aussagen treffen zu können.

4.7 Schlussfolgerung

Insgesamt zeigt sich, dass mit einer Kombination aus erfahrenem Operateur, ausgereifter Operationstechnik, intensiver postoperativer Nachbehandlung und engmaschiger Betreuung durch Spezialisten gute Ergebnisse zu erzielen sind. Weiterhin wird deutlich, dass die Anwendung einer Bewegungsschiene in der Nachbehandlung von Beugesehnenverletzungen ergänzend zur ambulanten Physiotherapie als wertvoll einzuschätzen ist.

Mittelfristig sollte es das Ziel sein, den Patienten ein Exoskelett für zu Hause zur Verfügung zu stellen. Die Physiotherapeuten könnten das Exoskelett in Ihre Behandlung einbinden. Die Anwendungen könnten dadurch mehrfach täglich erfolgen, die Anfahrt zur Behandlung würde teilweise wegfallen. Langfristiges Ziel muss es jedoch weiterhin sein, die operative Versorgung und postoperative Nachbehandlung zu optimieren, um Rerupturen zu minimieren und schlechte funktionelle Ergebnisse zu vermeiden. Hierfür sind weitere, groß angelegte klinische Studien notwendig.

5. Zusammenfassung

Beugesehnenverletzungen in Zone II der Hand zählen weiterhin zu den kompliziertesten Verletzungen der Finger, die ein hohes Maß an funktionellen Einschränkungen nach sich ziehen können. Heutzutage verfügen Operateure und Physiotherapeuten über das Wissen und die Instrumente um zufriedenstellende Ergebnisse zu ermöglichen.

Diese Arbeit untersuchte den postoperativen Therapieverlauf über 17 Wochen und verglich den Goldstandard der Physiotherapie mit einem neu konzipierten Nachbehandlungsprogramm, das um den Einsatz einer passiven Bewegungsschiene entworfen wurde. Die Patienten wurden nach operativer Versorgung am Universitätsklinikum Ulm mit Hilfe der Block-Randomisierung in die Nachbehandlungsgruppen eingeteilt. Es wurden sowohl objektiv messbare Größen, wie Bewegungsumfang und Kraft, als auch subjektive Größen, wie Lebensqualität und Bewältigung des Alltags erfasst. Beide Gruppen konnten signifikante Verbesserungen über alle Größen während des Untersuchungszeitraums erzielen. Hierbei zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Nachbehandlungsgruppen.

Ein weiterer Fokus lag auf der möglichst raschen beruflichen Wiedereingliederung und dem damit verbundenen volkswirtschaftlichen Faktor. Die Interventionsgruppe erreichte deutlich früher ein zufriedenstellendes Ergebnis und konnte dementsprechend zügiger wieder aus der Arbeitsunfähigkeit entlassen werden, ohne dabei einer größeren Gefahr von Rerupturen ausgesetzt zu sein.

Schlussendlich lässt sich sagen, dass die Anwendung einer passiven Bewegungsschiene in der Nachbehandlung von Beugesehnenverletzungen in Zone II der Hand eine gute Ergänzung zur ambulanten Physiotherapie darstellen kann.

6. Literaturverzeichnis

1 Adolfsson, L; Söderberg, G; Larsson, M; Karlander, LE (1996): The effects of a shortened postoperative mobilization programme after flexor tendon repair in zone 2. *Journal of hand surgery (Edinburgh, Scotland)* 21, 67–71.

2 Amadio, P; An, KN; Ejeskär, A; Guimberteau, JC; Harris, S; Savage, R et al. (2005): IFSSH Flexor Tendon Committee report. *Journal of hand surgery (Edinburgh, Scotland)* 30, 100–116.

3 Baktir, A; Türk, CY; Kabak, S; Sahin, V; Kardaş, Y (1996): Flexor tendon repair in zone 2 followed by early active mobilization. *Journal of hand surgery (Edinburgh, Scotland)* 21, 624–628.

4 Baskies, MA; Tuckman, DV; Paksima, N (2008): Management of flexor tendon injuries following surgical repair. *Bulletin of the NYU hospital for joint diseases* 66 , 35–40.

5 Braga-Silva, J; Kuyven, CRM (2005): Early active mobilization after flexor tendon repairs in zone two. *Chirurgie de la main* 24, 165–168.

6 Bullon, A; Novo, A (1988): Primary repair of flexor tendons in the hand with early passive mobilization. *International orthopaedics* 12, 61–67.

7 Cetin, A; Dinçer, F; Keçik, A; Cetin, M (2001): Rehabilitation of flexor tendon injuries by use of a combined regimen of modified Kleinert and modified Duran techniques. *American journal of physical medicine & rehabilitation / Association of Academic Physiatrists* 80, 721–728.

8 Chai, SC; Wong, CW (2005): Dynamic traction and passive mobilization for the rehabilitation of zone II flexor tendon injuries: a modified regime. *The Medical journal of Malaysia* 60 Suppl. C, 59–65.

9 Chan, TK; Ho, CO; Lee, WK; Fung, YK; Law, YF; Tsang, CY (2006): Functional outcome of the hand following flexor tendon repair at the 'no man's land'. *Journal of orthopaedic surgery (Hong Kong)* 14, 178–183.

10 Chesney, A; Chauhan, A; Kattan, A; Farrokhyar, F; Thoma, A (2011): Systematic review of flexor tendon rehabilitation protocols in zone II of the hand. *Plastic and reconstructive surgery* 127, 1583–1592.

11 Chow, JA; Thomes, LJ; Dovelle, S; Milnor, WH; Seyfer, AE; Smith, AC (1987): A combined regimen of controlled motion following flexor tendon repair in "no man's land". *Plastic and reconstructive surgery* 79, 447–455.

12 Chow, JA; Thomes, LJ; Dovelle, S; Monsivais, J; Milnor, WH; Jackson, JP (1988): Controlled motion rehabilitation after flexor tendon repair and grafting. A multi-centre study. *The Journal of bone and joint surgery. British volume* 70, 591–595.

13 Collins, DC; Schwarze, L (1991): Early progressive resistance following immobilization of flexor tendon repairs. *Journal of hand therapy : official journal of the American Society of Hand Therapists* 4, 111–116.

14 Farzad, M; Layeghi, F; Asgari, A; Ring, DC; Karimlou, M; Hosseini, SA (2014): A prospective randomized controlled trial of controlled passive mobilization vs. place and active hold exercises after zone 2 flexor tendon repair. *Hand surgery : an international journal devoted to hand and upper limb surgery and related research : journal of the Asia-Pacific Federation of Societies for Surgery of the Hand* 19, 53–59.

15 Frueh, FS; Kunz, VS; Gravestock, IJ; Held, L; Haefeli, M; Giovanoli, P; Calcagni, M (2014): Primary flexor tendon repair in zones 1 and 2: early passive mobilization versus controlled active motion. *The Journal of hand surgery* 39, 1344–1350.

16 Gelberman, RH; Nunley, JA; Osterman, AL; Breen, TF; Dimick, MP; Woo, SL (1991): Influences of the protected passive mobilization interval on flexor tendon healing. A prospective randomized clinical study. *Clinical orthopaedics and related research*, 189–196.

17 Griffin, M; Hindocha, S; Jordan, D; Saleh, M; Khan, W (2012): An overview of the management of flexor tendon injuries. *The open orthopaedics journal* 6, 28–35.

18 Groth, GN (2005): Current practice patterns of flexor tendon rehabilitation. *Journal of hand therapy : official journal of the American Society of Hand Therapists* 18, 169–174.

19 Hoffmann, GL; Büchler, U; Vögelin, E (2008): Clinical results of flexor tendon repair in zone II using a six-strand double-loop technique compared with a two-strand technique. *The Journal of hand surgery, European volume* 33, 418–423.

20 Hung, LK; Pang, KW; Yeung, PLC; Cheung, L; Wong, JMW; Chan, P (2005): Active mobilisation after flexor tendon repair: comparison of results following injuries in zone 2 and other zones. *Journal of orthopaedic surgery (Hong Kong)* 13, 158–163.

21 Kitis, PTA; Buker, N; Kara, IG (2009): Comparison of two methods of controlled mobilisation of repaired flexor tendons in zone 2. *Scandinavian journal of plastic and reconstructive surgery and hand surgery / Nordisk plastikkirurgisk forening [and] Nordisk klubb for handkirurgi* 43, 160–165.

22 Kitsis, CK; Wade, PJ; Krikler, SJ; Parsons, NK; Nicholls, LK (1998): Controlled active motion following primary flexor tendon repair: a prospective study over 9 years. *Journal of hand surgery (Edinburgh, Scotland)* 23, 344–349.

23 Kleinert, HE; Kutz, JE; Ashbell, TS; Martinez, T (1967): Primary repair of lacerated flexor tendons in "no man's land". *The Journal of bone and joint surgery. American volume* 49, 577–584.

24 Kleinert, HE; Kutz, JE; Atasoy, E; Stormo, A (1973): Primary repair of flexor tendons. *The Orthopedic clinics of North America* 4, 865–876.

25 Kleinert, HE; Meares, A (1974): In quest of the solution to severed flexor tendons. *Clinical orthopaedics and related research*, 23–29.

26 Lalonde, DH (2011): An evidence-based approach to flexor tendon laceration repair. *Plastic and reconstructive surgery* 127, 885–890.

27 Lister, GD; Kleinert, HE; Kutz, JE; Atasoy, E (1977): Primary flexor tendon repair followed by immediate controlled mobilization. *The Journal of hand surgery* 2, 441–451.

28 Lohmeyer, JA; Siemers, F; Mailänder, P (2010): Therapiestandards nach Beugesehnen- und Nervenverletzungen der Hand. Ergebnisse einer Umfrage zur Immobilisationsdauer unter deutschen handchirurgischen Zentren. *Der Unfallchirurg* 113, 203–209.

29 Lotter, O; Vogel, D; Stahl, S; Pfau, M; Schaller, HE (2011): Primärversorgung komplizierter Beugesehnenverletzungen an der Hand. *Der Unfallchirurg* 114, 517–527.

30 Lutsky, KF; Giang, EL; Matzon, JL (2015): Flexor tendon injury, repair and rehabilitation. *The Orthopedic clinics of North America* 46, 67–76.

31 Maki, Y (2014): Primary flexor tendon repair and early mobilization. *Hand surgery : an international journal devoted to hand and upper limb surgery and related research : journal of the Asia-Pacific Federation of Societies for Surgery of the Hand* 19, 327–328.

32 May, EJ; Silfverskiöld, KL; Sollerman, CJ (1992): Controlled mobilization after flexor tendon repair in zone II: a prospective comparison of three methods. *The Journal of hand surgery* 17, 942–952.

33 Mehling, IM; Arsalan-Werner, A; Sauerbier, M (2014): Evidence-based flexor tendon repair. *Clinics in plastic surgery* 41, 513–523.

34 Moriya, K; Yoshizu, T; Maki, Y; Tsubokawa, N; Narisawa, H; Endo, N (2015): Clinical outcomes of early active mobilization following flexor tendon repair using the six-strand technique: short- and long-term evaluations. *The Journal of hand surgery, European volume* 40, 250–258.

35 Navali, AM; Rouhani, A (2008): Zone 2 flexor tendon repair in young children: a comparative study of four-strand versus two-strand repair. *The Journal of hand surgery, European volume* 33, 424–429.

36 Neumeister, MW; Amalfi, A; Neumeister, E (2014): Evidence-based medicine: Flexor tendon repair. *Plastic and reconstructive surgery* 133, 1222–1233.

37 Okçesiz, IE; Ege, A; Turhan, E; Songür, M; Bayar, A; Keser, S (2011): The longer pull-out suture as a transmission suture for early active motion of repaired flexor tendon at the proximal zone-2. *Archives of orthopaedic and trauma surgery* 131, 573–580.

38 Osada, D; Fujita, S; Tamai, K; Yamaguchi, T; Iwamoto, A; Saotome, K (2006): Flexor tendon repair in zone II with 6-strand techniques and early active mobilization. *The Journal of hand surgery* 31, 987–992.

39 Pulos, N; Bozentka, DJ (2015): Management of complications of flexor tendon injuries. *Hand clinics* 31, 293–299.

40 Rajappa, S; Menon, PG; Kumar, MM; Raj, DG (2014): Early active motion protocol following triple Kessler repair for flexor tendon injury. *Journal of orthopaedic surgery (Hong Kong)* 22, 96–99.

41 Rrecaj, S; Martinaj, M; Murtezani, A; Ibrahimi-Kaçuri, D; Haxhiu, B; Zatriqi, V (2014): Physical therapy and splinting after flexor tendon repair in zone II. *Medical archives (Sarajevo, Bosnia and Herzegovina)* 68, 128–131.

42 Saini, N; Kundnani, V; Patni, P; Gupta, S (2010): Outcome of early active mobilization after flexor tendons repair in zones II-V in hand. *Indian journal of orthopaedics* 44, 314–321.

43 Saldana, MJ; Chow, JA; Gerbino, P; Westerbeck, P; Schacherer, TG (1991): Further experience in rehabilitation of zone II flexor tendon repair with dynamic traction splinting. *Plastic and reconstructive surgery* 87, 543–546.

44 Sammer, DM; Chung, KC (2014): Advances in the healing of flexor tendon injuries. *Wound repair and regeneration : official publication of the Wound Healing Society [and] the European Tissue Repair Society* 22 Suppl. 1, 25–29.

45 Savage, R; Pritchard, MG; Thomas, M; Newcombe, RG (2005): Differential splintage for flexor tendon rehabilitation: an experimental study of its effect on finger flexion strength. *Journal of hand surgery (Edinburgh, Scotland)* 30, 168–174.

46 Schabowsky, CN; Godfrey, SB; Holley, RJ; Lum, PS (2010): Development and pilot testing of HEXORR: hand EXOskeleton rehabilitation robot. *Journal of neuroengineering and rehabilitation* 7, 36.

47 Schenck, RR; Lenhart, DE (1996): Results of zone II flexor tendon lacerations in civilians treated by the Washington regimen. *The Journal of hand surgery* 21, 984–987.

48 Silfverskiöld, KL; May, EJ (1994): Flexor tendon repair in zone II with a new suture technique and an early mobilization program combining passive and active flexion. *The Journal of hand surgery* 19, 53–60.

49 Stephan, C; Saalabian, A; van Schoonhoven, J; Prommersberger, KJ (2008): Die primäre Naht der Fingerbeugesehnen. *Operative Orthopädie und Traumatologie* 20, 44–54.

50 Strickland, JW (1985): Results of flexor tendon surgery in zone II. *Hand clinics* 1, 167–179.

51 Strickland, JW (2005): The scientific basis for advances in flexor tendon surgery. *Journal of hand therapy : official journal of the American Society of Hand Therapists* 18, 94-111.

52 Strickland, JW; Glogovac, SV (1980): Digital function following flexor tendon repair in Zone II: A comparison of immobilization and controlled passive motion techniques. *The Journal of hand surgery* 5, 537–543.

53 Su, BW; Solomons, M; Barrow, A; Senoge, ME; Gilberti, M; Lubbers, L et al. (2005): Device for zone-II flexor tendon repair. A multicenter, randomized, blinded, clinical trial. *The Journal of bone and joint surgery. American volume* 87, 923–935.

54 Tang, JB (2005): Clinical outcomes associated with flexor tendon repair. *Hand clinics* 21, 199–210.

55 Tang, JB (2006): Tendon injuries across the world: treatment. *Injury* 37, 1036–1042.

56 Tang, JB (2007): Indications, methods, postoperative motion and outcome evaluation of primary flexor tendon repairs in Zone 2. *The Journal of hand surgery, European volume* 32, 118–129.

57 Tang, JB; Chang, J; Elliot, D; Lalonde, DH; Sandow, M; Vögelin, E (2014): IFSSH Flexor Tendon Committee report 2014: from the IFSSH Flexor Tendon Committee (Chairman: Jin Bo Tang). *The Journal of hand surgery, European volume* 39, 107–115.

58 Thien, TB; Becker, JH; Theis, JC (2004): Rehabilitation after surgery for flexor tendon injuries in the hand. *The Cochrane database of systematic reviews*, S. CD003979.

59 Toker, S; Oak, N; Williams, A; Ipaktchi, K; Ozer, K (2014): Adherence to therapy after flexor tendon surgery at a level 1 trauma center. *Hand (New York, N.Y.)* 9, 175–178.

60 Tolerton, SK; Lawson, RD; Tonkin, MA (2014): Management of flexor tendon injuries - Part 1: Australian contributions. *Hand surgery : an international journal devoted to hand and upper limb surgery and related research : journal of the Asia-Pacific Federation of Societies for Surgery of the Hand* 19, 297–303.

61 Tolerton, SK; Lawson, RD; Tonkin, MA (2014): Management of flexor tendon injuries - Part 2: current practice in Australia and guidelines for training young surgeons. *Hand surgery : an international journal devoted to hand and upper limb surgery and related research : journal of the Asia-Pacific Federation of Societies for Surgery of the Hand* 19, 305–310.

62 Trumble, TE; Vedder, NB; Seiler, JG; Hanel, DP; Diao, E; Pettrone, S (2010): Zone-II flexor tendon repair: a randomized prospective trial of active place-and-hold therapy compared with passive motion therapy. *The Journal of bone and joint surgery. American volume* 92, 1381–1389.

63 Verdan, CE (1972): Half a century of flexor-tendon surgery. Current status and changing philosophies. *The Journal of bone and joint surgery. American volume* 54, 472–491.

64 Wang, J; Li, J; Zhang, Y; Wang, S (2009): Design of an exoskeleton for index finger rehabilitation. *Conference proceedings : … Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Annual Conference* 2009, 5957–5960.

65 Werdin, F; Schaller, HE (2008): Kombinierte Beugesehnen- und Nervenverletzungen der Hand. *Der Orthopäde* 37, 1202–1209.

66 Wong, JKF; Peck, F (2014): Improving results of flexor tendon repair and rehabilitation. *Plastic and reconstructive surgery* 134, 913e–925.

67 Xie, RG; Cao, Y; Xu, XF; Zhu, B (2008): The gliding force and work of flexion in the early days after primary repair of lacerated flexor tendons: an experimental study. *The Journal of hand surgery, European volume* 33, 192–196.

68 Yen, CH; Chan, WL; Wong, JWC; Mak, KH (2008): Clinical results of early active mobilisation after flexor tendon repair. *Hand surgery : an international journal devoted to hand and upper limb surgery and related research : journal of the Asia-Pacific Federation of Societies for Surgery of the Hand* 13, 45–50.

7. Anhang

7.1 Strickland-Score

Die Total Active Motion (TAM) wird berechnet, indem man die Range Of Motion (ROM) von PIP und DIP addiert. Die ROM beschreibt den Winkel in Grad zwischen maximaler, aktiver Extension und maximaler, aktiver Flexion eines Gelenkes. Die TAM wird ins Verhältnis zu 175° gesetzt, was etwa 100% des normalen Bewegungsumfangs in PIP und DIP entspricht.

Hieraus ergibt sich folgende Formel:

$$\frac{(\text{Flexion PIP} + \text{Flexion DIP}) - (\text{Streckdefizit PIP} + \text{Streckdefizit DIP})}{175°} \text{ x } 100\% = \% \text{ der normalen Bewegung}$$

Der Strickland-Score ordnet die Ergebnisse in folgende Skala ein:

Tab. 13: Einteilung des relativen Normalbewegungsumfangs nach Strickland

Ergebnis	Prozentbereich
sehr gut	85 – 100%
gut	70 – 84%
mäßig	50 – 69%
schlecht	0 – 49%

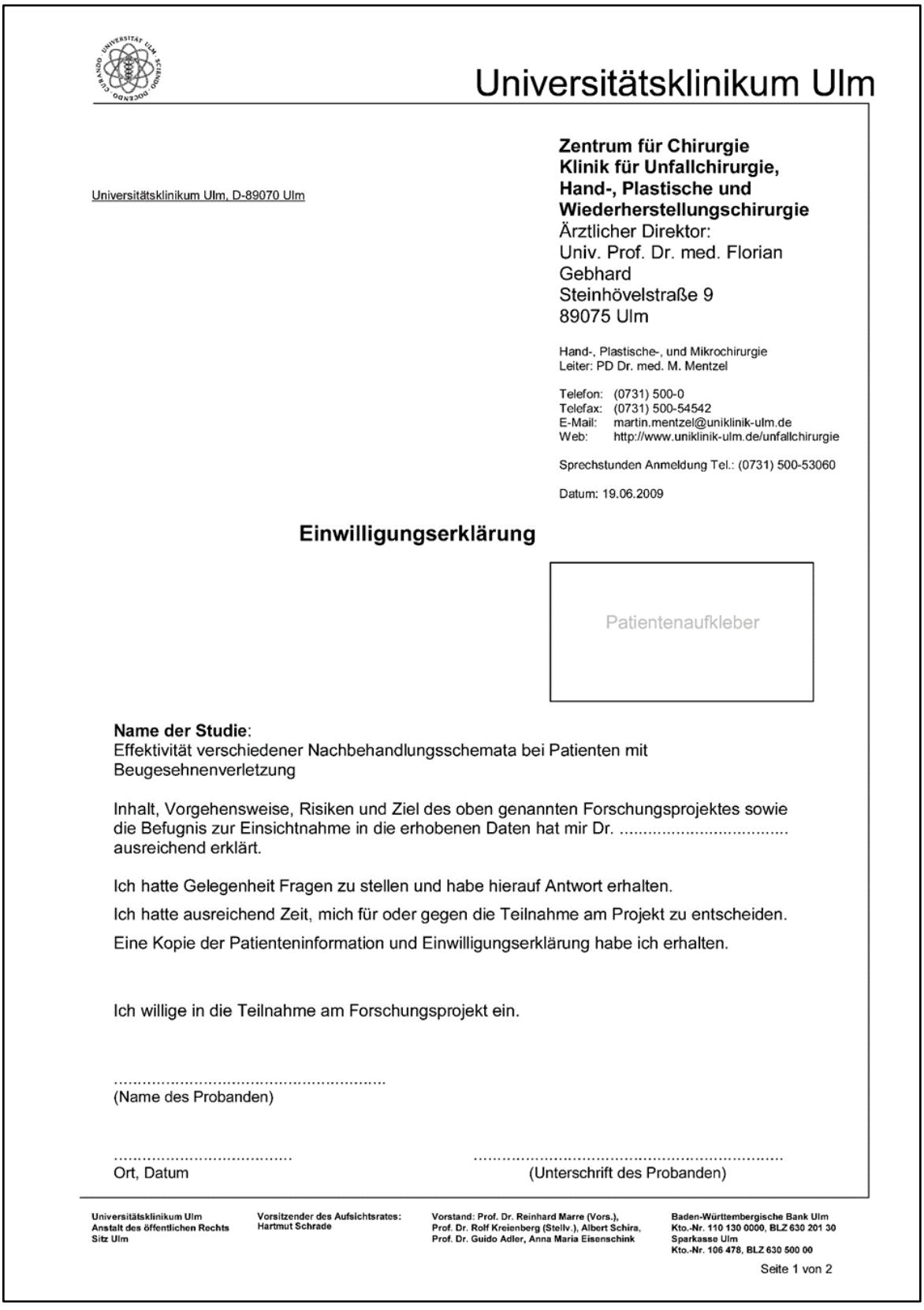
7.2 DASH-Score

Die Auswertung des DASH-Scores erfolgt indem man die Antwortpunkte der 30 Fragen addiert. Hieraus ergibt sich ein Rohwert zwischen minimal 30 Punkten und maximal 150 Punkten, der Streubereich liegt daher bei 120 Punkten. Anschließend werden die Rohwerte in eine Skala von 0 bis 100 Punkte konvertiert, wobei 0 Punkte für keine Einschränkung steht und 100 Punkte höchste Einschränkung bedeuten.

Der Rohwert wird mit folgender Formel in den DASH-Funktionsfähigkeit-Wert umgerechnet:

$$\frac{(\text{Rohwert} - 30)}{1{,}2} = \text{DASH} - \text{Wert}$$

7.3 Einwilligungserklärung



Universitätsklinikum Ulm

Universitätsklinikum Ulm, D-89070 Ulm

Zentrum für Chirurgie
Klinik für Unfallchirurgie, Hand-, Plastische und Wiederherstellungschirurgie
Ärztlicher Direktor:
Univ. Prof. Dr. med. Florian Gebhard
Steinhövelstraße 9
89075 Ulm

Hand-, Plastische-, und Mikrochirurgie
Leiter: PD Dr. med. M. Mentzel

Telefon: (0731) 500-0
Telefax: (0731) 500-54542
E-Mail: martin.mentzel@uniklinik-ulm.de
Web: http://www.uniklinik-ulm.de/unfallchirurgie

Sprechstunden Anmeldung Tel.: (0731) 500-53060

Datum: 19.06.2009

Einwilligungserklärung

Patientenaufkleber

Name der Studie:
Effektivität verschiedener Nachbehandlungsschemata bei Patienten mit Beugesehnenverletzung

Inhalt, Vorgehensweise, Risiken und Ziel des oben genannten Forschungsprojektes sowie die Befugnis zur Einsichtnahme in die erhobenen Daten hat mir Dr. ..... ausreichend erklärt.

Ich hatte Gelegenheit Fragen zu stellen und habe hierauf Antwort erhalten.

Ich hatte ausreichend Zeit, mich für oder gegen die Teilnahme am Projekt zu entscheiden.

Eine Kopie der Patienteninformation und Einwilligungserklärung habe ich erhalten.

Ich willige in die Teilnahme am Forschungsprojekt ein.

.....
(Name des Probanden)

....
Ort, Datum (Unterschrift des Probanden)

Universitätsklinikum Ulm
Anstalt des öffentlichen Rechts
Sitz Ulm

Vorsitzender des Aufsichtsrates:
Hartmut Schrade

Vorstand: Prof. Dr. Reinhard Marre (Vors.), Prof. Dr. Rolf Kreienberg (Stellv.), Albert Schira, Prof. Dr. Guido Adler, Anna Maria Eisenschink

Baden-Württembergische Bank Ulm
Kto.-Nr. 110 130 0000, BLZ 630 201 30
Sparkasse Ulm
Kto.-Nr. 106 478, BLZ 630 500 00

Seite 1 von 2

Abb. 13: Einwilligungserklärung Seite 1

INFORMATION UND EINWILLIGUNGSERKLÄRUNG ZUM DATENSCHUTZ

Bei wissenschaftlichen Studien werden persönliche Daten und medizinische Befunde über Sie erhoben. Die Speicherung, Auswertung und Weitergabe dieser studienbezogenen Daten erfolgt nach gesetzlichen Bestimmungen und setzt vor Teilnahme an der Studie folgende freiwillige Einwilligung voraus:

1. Ich erkläre mich damit einverstanden, dass im Rahmen dieser Studie erhobene Daten / Krankheitsdaten auf Fragebögen und elektronischen Datenträgern aufgezeichnet und ohne Namensnennung verarbeitet werden
2. Außerdem erkläre ich mich damit einverstanden, dass eine autorisierte und zur Verschwiegenheit verpflichtete Person (z.B.: des Auftraggebers, der Universität) in meine erhobenen personenbezogenen Daten Einsicht nimmt, soweit dies für die Überprüfung des Projektes notwendig ist. Für diese Maßnahme entbinde ich den Arzt von der ärztlichen Schweigepflicht.

.....
(Name des Probanden)

.....
Ort, Datum

.....
(Unterschrift des Probanden)

Abb. 14: Einwilligungserklärung Seite 2

7.4 Zertifikat



BERLIN CERT Prüf- und Zertifizierstelle für Medizinprodukte GmbH an der Technischen Universität Berlin

BERLIN CERT

CERTIFICATE

Zertifikat-Registrier-Nr.: Z – 08 – 231 – MP

Berlin Cert
Prüf- und Zertifizierstelle für Medizinprodukte GmbH
an der Technischen Universität Berlin

bescheinigt der

Technischen Universität Berlin

Einsteinufer 17, D-10587 Berlin

mit diesem Zertifikat, dass das folgende Produkt bei bestimmungsgemäßer Verwendung sicherheitstechnisch unbedenklich im Sinne des MPG §20 Abs. 1 Nr. 6 ist und alle Anforderungen gemäß MPG §12 Abs. 2 mit Hinweis auf 93/42/EWG Anhang VIII Abs. 3.2 erfüllt.
Das Prüfmuster darf nur durch entsprechend eingewiesene und autorisierte Personen angewendet werden.

Produkt: **Fingerexoskelett**

Die Beurteilung erfolgte in Anlehnung an:

DIN EN 60601-1:1996
Medizinische elektrische Geräte
Teil 1: Grundlegende Anforderungen an die Sicherheit

Richtlinie 93/42/EWG
Des Rates vom 14. Juni 1993 über Medizinprodukte
Anhang I und VII

Die durchgeführten Prüfungen sind in den Protokollen P-08-231-MP-PA095-E, P-08-231-MP-PA096 und P-08-231-MP-PA097 dokumentiert.

Dieses Zertifikat ist kein Nachweis für die Erfüllung der gesetzlichen Anforderungen des Medizinproduktegesetzes sowie der Richtlinie 93/42/EWG

Ausgestellt am: **2008-08-26**

Prüf- und Zertifizierstelle für Medizinprodukte GmbH an der TU Berlin BERLIN CERT

Dipl.-Ing. Thorsten Ehlers
Unterschrift Bevollmächtigter

BERLIN CERT Dovestraße 6 D.10587 Berlin Tel. +49(0)30.314 251 11 Fax. +49(0)30.314 237 19 www.berlincert.de

Abb. 15: Exoskelett-Medizinproduktezertifikat

Die Danksagung wurde aus Gründen des Datenschutzes entfernt.

Der Lebenslauf wurde aus Gründen des Datenschutzes entfernt.