AUS DER FAKULTÄT FÜR MEDIZIN
DER UNIVERSITÄT REGENSBURG
PROF. DR. MED. SILVAN EISENMANN
PLASTISCHE, HAND- UND WIEDERHERSTELLUNGSCHIRURGIE

Determination der sensiblen Nervenregeneration bei traumatischen Digitalnervenlazerationen

Inaugural – Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin

der
Fakultät für Medizin
der Universität Regensburg

vorgelegt von
Julia Anne Gremer

2026

AUS DER FAKULTÄT FÜR MEDIZIN
DER UNIVERSITÄT REGENSBURG
PROF. DR. MED. SILVAN EISENMANN
PLASTISCHE, HAND- UND WIEDERHERSTELLUNGSCHIRURGIE

Determination der sensiblen Nervenregeneration bei traumatischen Digitalnervenlazerationen

Inaugural – Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin

der
Fakultät für Medizin
der Universität Regensburg

vorgelegt von
Julia Anne Gremer

2026

Dekan:	Prof. Dr. Dirk Hellwig
1. Berichterstatter:	Prof. Dr. Silvan Eisenmann
2. Berichterstatter:	Prof. Dr. Stefan Brunner

Tag der mündlichen Prüfung: 22.10.2026

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung geschlechtsspezifischer Sprachformen verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten für alle Geschlechter.

INHALTSVERZEICHNIS

1 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS 3

2 ZUSAMMENFASSUNG 4

2.1 Deutsche Zusammenfassung 4
2.2 Englische Zusammenfassung (Abstract) 6

3 EINLEITUNG 8

3.1 Anatomische Grundlagen der sensiblen Digitalnerven 8
3.2 Digitalnervendurchtrennungen 11
3.2.1 Inzidenz von Digitalnervendurchtrennungen 11
3.2.2 Einteilung der Digitalnervendurchtrennung nach Seddon 11
3.2.3 Pathophysiologische Folgen einer peripheren Digitalnervendurchtrennung 12
3.2.4 Sozioökonomische Folgen einer Digitalnervendurchtrennung 12
3.2.5 Notwendigkeit einer operativen Versorgung bei Digitalnervendurchtrennungen 12
3.3 Chirurgische Verfahren der peripheren Nervenrekonstruktion an der Hand 13
3.3.1 Primäre Nervenrekonstruktion an der Hand 13
3.3.1.1 Mikrochirurgische Naht 13
3.3.1.2 Nervenkoaptation mittels Fibrinkleber 14
3.4 Faktoren der Nervenregeneration 16
3.5 Historische Betrachtung des Fibrinklebers - Weg vom experimentellen Tierversuch zum klinischen Alltag 17
3.6 Zielsetzung der Arbeit und Fragestellung 17

4 MATERIAL UND METHODEN 18

4.1 Studiendesign 18
4.2 Ethikvotum 18
4.3 Studienkriterien 19
4.4 Patientenakquise 19
4.5 Interventions- und Kontrollgruppe 20
4.6 Erhebung der Daten 21
4.6.1 Erhebung der patientenspezifischen Ausgangsbefunde 22
4.6.2 Nachuntersuchungen 22
4.6.2.1 Informationen und Material für die Studienteilnehmer 22
4.6.2.2 Klinische Untersuchung 23
4.6.2.3 Standardisierte Fragebögen 26
4.6.2.4 3D-Quantifizierung des asensiblen Areals 27
4.6.2.4.1 Das Vectra-System 27
4.6.2.4.2 Erstellung der 3D-Vectra Modelle 28
4.6.2.4.3 Messung der Flächen der 3D-Vectra Modelle 30
4.6.2.5 Ultraschalluntersuchung 12 Monate postoperativ 32

4.7 Qualitätssicherung 32
4.7.1 Rekrutierung der Studienpopulation 33
4.8 Statistische Analyse 34
5 STATISTISCHE AUFARBEITUNG UND ERGEBNISSE 37
5.1 Deskriptive Statistik 37
5.2 Auswertung der standardisierten Fragebögen 41
5.2.1 SMHQ 41
5.2.2 PSFS 42
5.3 Auswertung der Nachuntersuchungen 44
5.3.1 s2PD und d2PD 44
5.3.2 Ten-Test 46
5.3.3 Sp/St-Diskrimination 47
5.3.4 Temperaturempfinden 47
5.3.5 Ultraschalluntersuchung 47
5.3.6 Subjektiver Fortschritt M12 Evaluation 47
5.3.7 3D-Fotogrammetrie 48
5.3.8 Korrelation der 3D-Fotogrammetrie zu etablierten Nachuntersuchungsverfahren 51
5.3.9 Arbeitsunfähigkeit 51
5.3.10 Komplikationen 52
5.3.11 Endgliedatrophie 54
6 DISKUSSION 55
6.1 Studiendesign und Zielsetzung 55
6.2 Studienpopulation und Vergleichbarkeit der Gruppen 55
6.3 Operative Parameter und perioperativer Verlauf 56
6.4 Patientenberichtete Endpunkte 57
6.5 Qualitative Sensibilitätsprüfungen 58
6.6 Quantitative Sensibilitätsmessung mittels 3D-Fotogrammetrie 60
6.7 Komplikationen, Zusatzbefunde und klinische Einordnung 61
6.8 Limitationen und Ausblick 62
7 ABBILDUNGSVERZEICHNIS 63
8 TABELLENVERZEICHNIS 65
9 LITERATURVERZEICHNIS 66
10 ANHANG 73
11 DANKSAGUNG 82
12 LEBENSLAUF 83

1 Abkürzungsverzeichnis

A

AAA ..... *Absolute Asensible Fläche*

C

CRPS ..... *Komplex regionales Schmerzsyndrom*

CSJ ..... *Caritaskrankenhaus St. Josef*

D

d2PD ..... *Dynamische Zweipunktdiskrimination*

DN ..... *Digtalnerv*

M

M12 ..... *Abschlusstermin 12 Monate postoperativ*

M3 ..... *Termin 3 Monate postoperativ*

M6 ..... Termin 6 Monate postoperativ

M9 ..... *Termin 9 Monate postoperativ*

medbo ..... Abteilung der medizinischen Einrichtung des Bezirks Oberpfalz

MHQ ..... Michigan Hand Qestionaire

P

PSFS ..... Patientenspezifische Funktionsskala

Q

QST ..... *Quantitative Sensorische Testung*

R

RAA ..... *Relative asensible Fläche*

S

s2PD ..... *statische Zweipunktdiskriminierung*, *Statische Zweipunktdiskrimination*

SMHQ ..... Short Michigan Hand Outcome Questionaire

Sp/St-Diskrimination ..... *Spitz- und Stumpf-Diskrimination*

U

UKR ..... *Universitätskrankenhaus Regensburg*

W

W2 ..... *Termin 2 Wochen postoperativ*

W6 ..... *Termin 6 Wochen postoperativ*

2 Zusammenfassung

2.1 Deutsche Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war der Vergleich zweier etablierter Operationsverfahren zur primären Nervenkoaptation: der mikrochirurgischen Nervennaht und der Fibrinklebung. Die mikrochirurgische Nervennaht gilt bislang als Goldstandard. In tierexperimentellen Studien konnte die Fibrinklebung jedoch potenzielle Vorteile zeigen. Eine klinische, randomisierte und prospektive Humanstudie zum direkten Vergleich dieser beiden Koaptationsverfahren lag bisher nicht vor. Die vorliegende Arbeit zielt darauf ab, diese Forschungslücke zu schließen.

Zunächst werden die anatomischen und histologischen Grundlagen der Digitalnerven, die Folgen einer Digitalnervendurchtrennung sowie die Wichtigkeit und die Methodik der operativen Versorgung erläutert. Die Studie schloss insgesamt 61 Teilnehmer an zwei Studienzentren (CSJ, UKR) ein, die anhand strenger Einschlusskriterien ausgewählt wurden. Vor der operativen Intervention erfolgte die Randomisierung der Teilnehmer in zwei Behandlungsgruppen (Mikrochirurgische Naht oder Fibrinklebung) über eine Web-Plattform.

Über einen Zeitraum von einem Jahr nach der Operation wurden standardisierte Daten zu sechs verschiedenen Nachuntersuchungszeitpunkten erhoben. Diese beinhalteten die Erfassung der Zweipunktdiskrimination (s2PD) (d2PD), des Ten-Tests (TT), der Spitz-Stumpf-Diskrimination (Sp/St), der Temperaturwahrnehmung, sowie das Ausfüllen des SMHQ (Sensory Measure of Hand Function Questionnaire) und des PSFS (Patient-Specific Functional Scale). Zudem wurde erstmals die 3D-Fotogrammetrie als neues objektives Messverfahren eingesetzt. Dabei wurde an jedem Untersuchungstermin die asensible Fläche des verletzten Fingers markiert und mittels einer 3D-Kamera fotografiert. Anschließend wurde mit dem Vectra-Programm ein 3D-Modell des Fingers erstellt und die Veränderung der asensiblen Fläche im Verhältnis zur Gesamtfläche des Fingers betrachtet. Zum M12 wurde zusätzlich ein retrospektiver Evaluationsbogen ausgefüllt und eine sonographische Untersuchung des verletzten Fingers durchgeführt, um die Nervenheilung zu überprüfen. In der Analyse konnten 31 Studienteilnehmer berücksichtigt werden.

Die Analyse der Ergebnisse zeigte, dass weder bei SMHQ (p = 0,133), PSFS (p = 0,569), 2PD, Ten-Test (12M p = 0,650), Temperaturwahrnehmung (M12 p = 1,000), Arbeitsunfähigkeitsdauer (p=0,069) noch beim neu etablierten 3D-Fotogrammetrie-Verfahren (p = 0,716) signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen festgestellt werden konnten. Dies deutet darauf hin, dass die direkte Nervenkoaptation mittels Fibrinkleber eine gleichwertige Operationsmethode zum Goldstandard der mikrochirurgischen Naht darstellt. Bei der Betrachtung des 3D-Mappings konnte eine signifikante Korrelation zwischen dem neuen Messverfahren und etablierten Verfahren wie dem SMHQ und dem Ten-Test nachgewiesen werden (AAA-Change_6W_3M mit dem 6W SMHQ-Score, p = 0,014; RAA-Change_6W_3M mit dem 6W Ten-Test, p = 0,03; 6W RAA mit dem SMHQ, p = 0,034). Dies legt nahe, dass die 3D-Fotogrammetrie eine objektivierbare Ergänzung für die Verlaufskontrolle sensibler Nervenverletzungen darstellen könnte.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich auf Grundlage der vorliegenden Daten die Nervenkoaptation mittels Fibrinklebung im Vergleich zur mikrochirurgischen Nervennaht erstmals in einer kontrollierten klinischen Studie als mindestens gleichwertig erwiesen hat. Darüber hinaus konnte die 3D-Fotogrammetrie als valider metrischer Parameter zu Erfassung sensibler Nervenregeneration etabliert werden.

2.2 Englische Zusammenfassung (Abstract)

The aim of this study was to compare two established surgical techniques for primary nerve coaptation: microsurgical nerve suturing and fibrin glue repair. Microsurgical nerve suturing is currently regarded as the gold standard. However, animal studies have suggested potential advantages of fibrin glue repair. To date, no randomized, prospective clinical human study directly comparing these two coaptation techniques had been conducted. The present study was designed to address this research gap.

First, the anatomical and histological characteristics of digital nerves, the consequences of digital nerve transection, and the importance and methodology of surgical nerve repair are outlined. The study included a total of 61 participants recruited at two study centers (CSJ and UKR), selected according to strict inclusion criteria. Prior to surgical intervention, participants were randomized via a web-based platform into two treatment groups: microsurgical nerve suturing or fibrin glue repair.

Standardized follow-up assessments were performed at six predefined time points over a one-year postoperative period. Outcome measures included two-point discrimination (s2PD; d2PD), the Ten Test (TT), sharp–dull discrimination, temperature perception, number identification, and the completion of the Sensory Measure of Hand Function Questionnaire (SMHQ) and the Patient-Specific Functional Scale (PSFS). In addition, 3D mapping was applied for the first time as a novel objective assessment method. At each follow-up visit, the insensate area of the injured finger was marked and captured using a 3D camera. Subsequently, a three-dimensional finger model was generated using the Vectra software, allowing evaluation of changes in the insensate area relative to the total finger surface.

At the 12-month follow-up (M12), participants additionally completed a retrospective evaluation questionnaire, and an ultrasound examination of the injured finger was performed to assess nerve healing. A total of 31 participants were included in the final analysis.

Statistical analysis revealed no significant differences between the two groups in SMHQ ($p = 0.133$), PSFS ($p = 0.569$), 2PD, Ten Test (M12 $p = 0.650$), temperature perception (M12 $p = 1.000$), duration of work incapacity ($p = 0.069$), or the newly established 3D mapping method ($p = 0.716$). These findings indicate that direct nerve coaptation using fibrin glue represents an equivalent surgical alternative to the gold standard of microsurgical nerve suturing.

Furthermore, analysis of the 3D mapping data demonstrated significant correlations between this novel assessment method and established outcome measures such as the SMHQ and the Ten Test (AAA change 6W–3M with 6W SMHQ score, $p = 0.014$; RAA change 6W–3M

with 6W Ten Test, p = 0.030; 6W RAA with SMHQ, p = 0.034). These results suggest that 3D mapping may serve as an objective complementary tool for monitoring sensory recovery following nerve injury.

In summary, based on the available data, nerve coaptation using fibrin adhesive has, for the first time, been demonstrated in a controlled clinical study to be at least equivalent to microsurgical neurorrhaphy. Furthermore, three-dimensional photogrammetry has been established as a valid quantitative metric for assessing sensory nerve regeneration.

3 Einleitung

3.1 Anatomische Grundlagen der sensiblen Digitalnerven

Jeder einzelne Finger wird durch je vier Digitalnerven versorgt.

Im Querschnitt erkennt man dorsal liegend die **Nervi digitales dorsales manus**. Sie stellen Abgänge des Nervus radialis (Ramus superficialis) und Nervus ulnaris (Ramus dorsalis) dar. Palmarseitig gelegen sind je Digitus zwei **Nervi digitales palmares proprii**. Diese werden vorrangig vom Nervus medianus, zum kleineren Teil vom Nervus ulnaris versorgt (1).

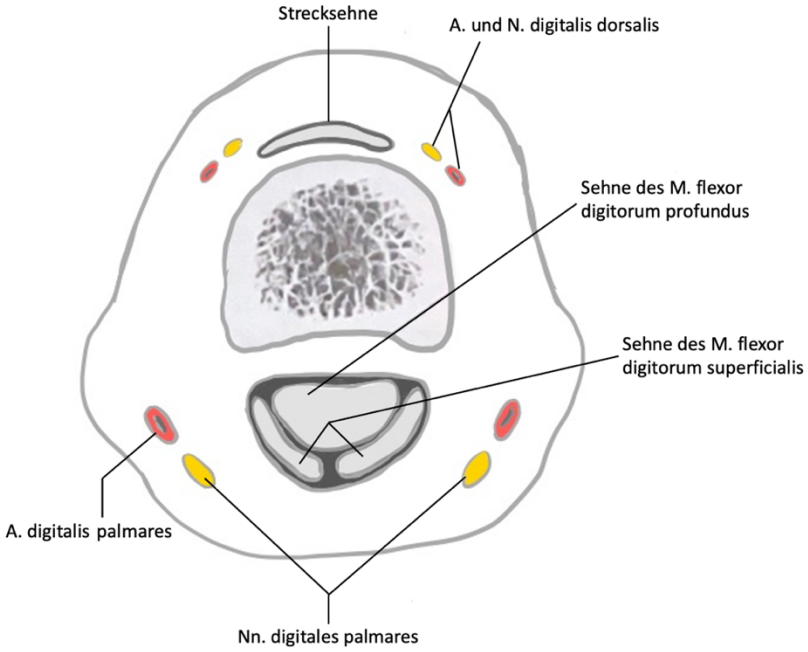

Abbildung 1: Querschnitt Digitus

Vom Autor erstellt

Jeder der vier Digitalnerven verläuft parallel mit der A. digitalis palmaris oder dorsalis (1).

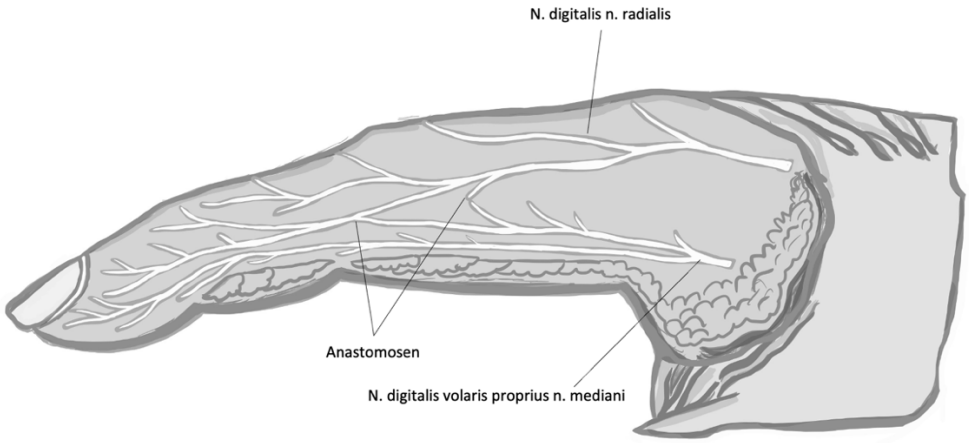

Abbildung 2: Anastomosen der Digitalnerven

Vom Autor erstellt

Zwischen den palmar und dorsal gelegenen Digitalnerven bestehen Anastomosen (2).

Aufbau der Digitalnerven

Eine Nervenfaser besteht aus einem zentralen Axon und seinen umhüllenden Schwann-Zellen.

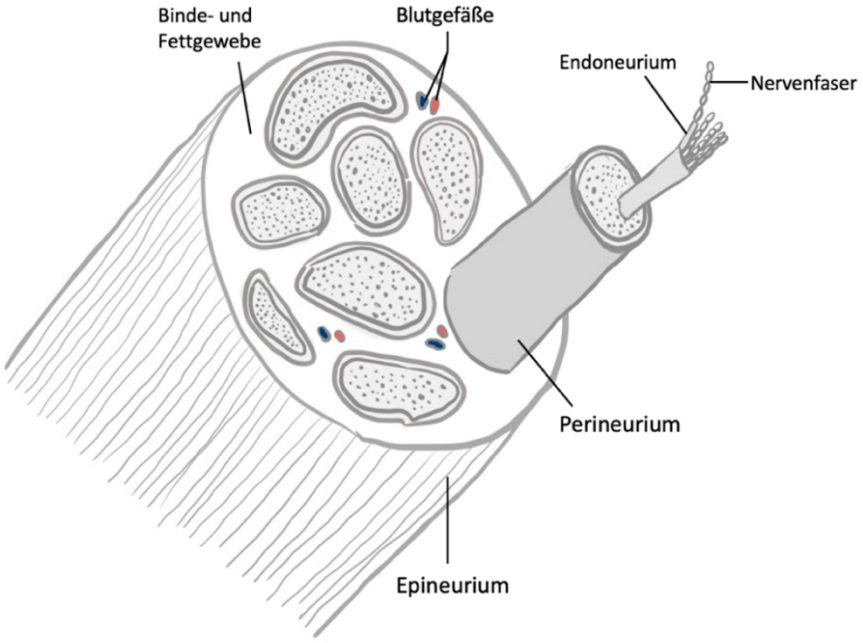

Abbildung 3: Aufbau eines peripheren Nervs

Vom Autor erstellt

Ein einzelner Nerv umfasst zahlreiche Nervenfasern, so besteht ein Digitalnerv aus ca. 1500 Nervenfasern. Es gibt markhaltige und marklose Nervenfasern. Sensible Nerven, wie die Digitalnerven beinhalten beide Arten im Verhältnis 4 : 1 (3). In einer markhaltigen Nervenfaser umhüllt die Myelinscheide und das Neurilemm das Axon. Eine marklose Nervenfaser ist dagegen lose eingebettet in das Zytoplasama mit Schwann-Zellen, die kein Myelin bilden.

Das Endoneurium umschließt eine einzelne Nervenfaser. Eine bestimmte Anzahl von Nervenfasern wird durch das Perineurium zu einem Faszikelbündel zusammengefasst.

Im inneren Epineurium, das den Raum zwischen den Faszikeln füllt, befinden sich die Arterien und Venen des Nervs. Das äußere Epineurium bildet die bindegewebige Hülle eines Nervens. Sie ist locker und fettreich und enthält Kollagenfasern und schützt gegen Zug. So kann das Epineurium die Funktion einer Gleitschicht übernehmen, und so bei Bewegungen der Gliedmaßen mitgleiten um den Zug auf den Nerv zu reduzieren. Das Mesoneurium ist die Verbindung zwischen Nerv und umliegenden Strukturen, es besteht aus lockerem Bindegewebe und ermöglicht ebenfalls das Gleiten des Nervs. Die auf einen Nerv einwirkenden mechanischen Belastungen werden auch durch eine größere Anzahl Faszikel, eine höhere Menge an Fett und elastischen Fasern, an entsprechend belasteten Stellen, ausgeglichen. Die Bindegewebsfasern des Axons haben einen wellenförmigen Verlauf um Zugbelastung auszugleichen (3) (4).



Abbildung 4: Modell Intraneurale Topographie

Vom Autor erstellt

3.2 Digitalnervendurchtrennungen

3.2.1 Inzidenz von Digitalnervendurchtrennungen

Periphere Nervenverletzungen machen in etwa 1,6 % aller traumatologischen Fälle aus (5) (6) (7). Die Inzidenz von Nervenverletzungen der Hand wurde in Schweden mit 13,9 pro 100 000 Einwohner/Jahr ermittelt und dürfte in Deutschland in einem vergleichbaren Rahmen liegen (8) (7).

3.2.2 Einteilung der Digitalnervendurchtrennung nach Seddon

Bereits 1943 teilte Seddon Nervenverletzungen nach anatomischen Gesichtspunkten ein. Diese Einteilung hat bis heute Bestand. Anhand der Seddon-Klassifikation werden drei Arten von Nervenverletzung unterschieden. Die Neurapraxie, die Axonotmesis und die Neurotmesis (9).

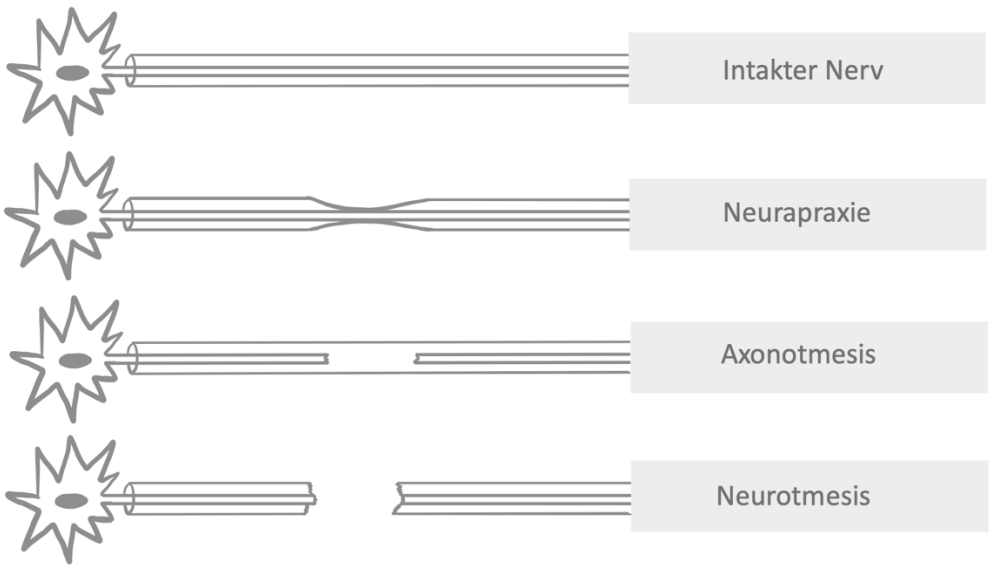

Abbildung 5: Seddon-Klassifikation der Nervenverletzungen

Vom Autor erstellt

Die Neuropraxie ist laut Seddon die schwächste Form der Nervenverletzung. Es ist weder der Nerv, noch die Hüllstrukturen verletzt. Die Funktionsstörung ist vorübergehend und eine spontane Regeneration ist vollständig möglich. Eine solche Nervenschädigung kann zum Beispiel durch Quetschung oder Dehnung auftreten.

Die Axonotomesis beschreibt eine Form der Nervenverletzung bei der eine Durchtrennung des Axons und der Myelinscheiden vorliegt, die Hüllstrukturen (Endo-, Peri- und

Epineurium) sind allerdings noch intakt. Auch hier kann eine spontane Regeneration möglich sein.
Die Neurotmesis bezeichnet die komplette Kontinuitätsunterbrechung des Axons, der Myelinscheiden und der umliegenden Hüllstrukturen (10). Eine spontane Regeneration ist hier nicht mehr möglich (4).

3.2.3 Pathophysiologische Folgen einer peripheren Digitalnervendurchtrennung

Bei einer Durchtrennung eines peripheren Nervs kommt es zu einer sogenannten Waller-Degeneration. Axone und Markscheiden gehen unter und werden phagozytiert. Schwann-Zellen und Bindegewebskomponenten bleiben dagegen bestehen. Nervenfasern haben die Fähigkeit sich zu regenerieren. Dies ist allerdings nur möglich, wenn der distale Stumpf dicht am proximalen Stumpf anschließt. So kann die endoneurale Hüllschicht als Leitschiene für nachwachsende Axone dienen. Für die Wachstumsgeschwindigkeit kann im Mittel von näherungsweise 1mm pro Tag ausgegangen werden (4).

3.2.4 Sozioökonomische Folgen einer Digitalnervendurchtrennung

Eine Digitalnervenverletzung kann langwierige Folgen wie Missempfindungen, Schmerzen und Kälteempfindlichkeit nach sich ziehen. Die Lebensqualität des Individuums, aber auch die Berufsfähigkeit können dadurch stark eingeschränkt sein (3) (11).
In dem im Jahr 2020 veröffentlichten Artikel von Bergmeister et al. wurden die Kosten von über 200 Einzelnervenverletzungen der oberen Extremität in Deutschland analysiert. Die Forscher kamen auf durchschnittliche Kosten von 102.167€ pro Patient (5). Auch wenn diese Zahl von Patient zu Patient stark variiert, aufgrund des Jobprofils, des derzeitigen Alters, der Lebenserwartung, der Schwere der Begleitverletzungen, der Patienten-Compliance und anderen Einflussfaktoren, macht die Größenordnung der Kosten dennoch deutlich, dass Nervenverletzungen der oberen Extremität, wie Digitalnervenverletzungen nicht nur eine immense ökonomische, sondern auch psychosoziale Belastung für Patienten, Gesundheitsdienstleister und Gesellschaft darstellen (11).

3.2.5 Notwendigkeit einer operativen Versorgung bei Digitalnervendurchtrennungen

Wie bereits dargelegt, benötigen nachwachsende Axone Hüllstrukturen als Leitschiene. Dies ist nur gegeben, wenn die beiden Stümpfe dicht aneinander liegen. Liegt allerdings keine solche Leitstruktur in der Nähe des proximalen Stumpfes, kann es zur Bildung eines sogenannten Neuroms kommen. Es handelt sich hierbei um ein knotenförmiges Konvolut

aus Faserregenerat (4). Eine weitere Komplikation ist eine Verdickung des Epineuriums und Einengung des Nervs. Dies kann durch Narbenbildungen oder bei Nervenkompressionen auftreten. Ödeme und Fibrosen können ebenfalls das Nervengleiten verhindern. Eine weitere Gefahr für den Nerv ist eine erhöhte Zugbelastung, vor allem bei Bewegung (3).
So ist es das Ziel einer operativen Versorgung durchtrennter peripherer Nerven eine anatomische Annäherung der Stümpfe ohne Spannung sicherzustellen. Dazu werden die Stümpfe frei präpariert und angefrischt. Die durch das Trauma entstandene Lücke wird durch elastische Retraktion aufgehoben und die Nervenstümpfe koaptiert (12).
Eine spannungsfreie Koaptation ist dabei die Grundvoraussetzung für die Nervenheilung (13).
Eine Nervenkoaptation auf Spannung könnte die fibroblastische und myofibroblastische Proliferation fördern und die axonale Regeneration verhindern (14).
Eine komplette Nervendurchtrennung, also eine Neurotmesis nach Seddon, hat ungünstige Bedingungen für die Regeneration des peripheren Nervs ohne operative Versorgung (15).
In dem im Jahr 2023 veröffentlichten Artikel von Pamuk wurde das klinische Outcome von isolierten Digitalnervenverletzungen mit und ohne operativer Versorgung dokumentiert. Wobei die Gruppe mit operativer Versorgung ein signifikant besseres Ergebnis bei der statischen Zweipunkt-Diskriminierung (s2PD) aufwies (16).

3.3 Chirurgische Verfahren der peripheren Nervenrekonstruktion an der Hand

Die Einteilung von Nervenrekonstruktionsmethoden ist abhängig davon ob die traumatische Kontinuitätsunterbrechung durch posttraumatisch vorhandenes Eigenmaterial überbrückt werden kann (primäre Nervenrekonstruktion) oder ob eine Überbrückung mit Interponat (sekundäre Nervenrekonstruktion) notwendig ist. Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich primäre Nervenrekonstruktionen betrachtet, weshalb im Folgenden nur diese näher erläutert werden.

3.3.1 Primäre Nervenrekonstruktion an der Hand

3.3.1.1 Mikrochirurgische Naht

Die Nervendirektnaht ist vor allem bei Durchtrennungen ohne erheblichen Substanzverlust sinnvoll (4).
Der operative Eingriff findet idealerweise mit Allgemeinanästhesie und in Oberarmblutleere statt. Die Wunde wird erweitert und die Nervenenden werden vorsichtig freigelegt und mobilisiert. Ziel ist eine Annäherung der Nervenstümpfe möglichst ohne Spannung (17). Für

Digitalnervendurchtrennungen ist eine epineurale Naht empfohlen (18). Das Epineurium wird einige Millimeter zurückpräpariert und hervorquellende endoneuralen Gewebeanteile werden gekürzt (17). Für die Nervennaht wird ein feiner monofiler Faden der Stärke (United States Pharmacopeia) (USP) 10-0 verwendet. Es sollten so wenig Einzelknopfnähte wie nötig gemacht werden, aber dennoch genug um die Koaptation zu gewährleisten. Im Gegensatz zur Gefäßnaht ist eine „wasserdichte Naht“ am Nerv nicht angestrebt (9).

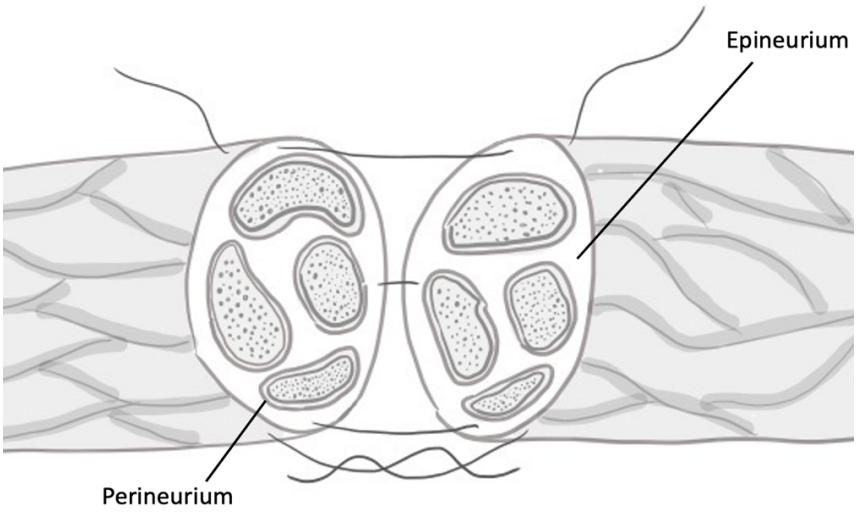

Abbildung 6: Epineurale Nervennaht

Vom Autor erstellt

3.3.1.2 Nervenkoaptation mittels Fibrinkleber

Fibrin ist nicht nur ein Bestandteil des Blutgerinnsels, sondern auch in der Lage biochemische Wachstumsfaktoren zu binden. Diese Wachstumsfaktoren sind wichtig für die Gewebeheilung und können die Migration und Differenzierung von Gewebezellen positiv beeinflussen (19).

Aber nicht nur wachstumsfördernde Eigenschaften, sondern auch die Elastizität des Fibrinklebers macht es zu einem vielversprechendem Operationsmaterial für alle möglichen Rekonstruktionen (19). Zur Herstellung der Koaptation kann Fibrinkleber anstatt oder in Kombination mit der mikrochirurgischen Naht verwendet werden.

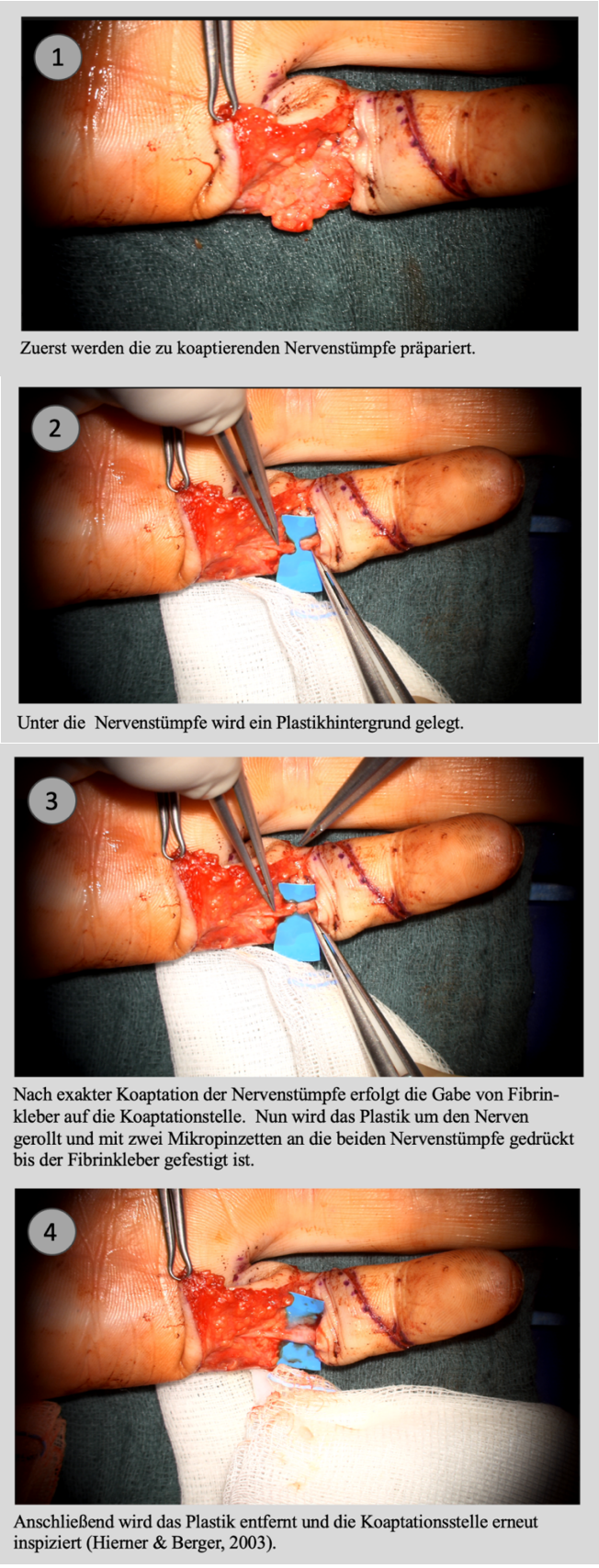

Abbildung 7: Intraoperative Darstellung Nervenkoaptation mittels Fibrinklebung

Grafik vom Autor erstellt (1)

3.4 Faktoren der Nervenregeneration

Es gibt keine operative Technik, die eine Widerherstellung der taktilen Diskrimination der Hand eines Erwachsenen, sicherstellen kann. Nervenregeneration nach einer Verletzung ist ein komplexer, biologischer Prozess, der von verschiedenen Faktoren abhängig ist (3).

So sind das Alter des Patienten, die Art der Verletzung, die Länge des entstandenen Gewebedefekts, die Begleitverletzungen, die operative Versorgung und die Patienten-Compliance wichtige Einflussfaktoren (20) (3).

Bei einem Alter von bis zu 15 Jahren kann von einer nahezu kompletten Widerherstellung der Sensibilität ausgegangen werden. Die Prognose bei Erwachsenen ist deutlich ungünstiger. Aber nicht nur die Prognose nach Nervenverletzung, sondern auch die allgemeine Sensibilität verschlechtert sich mit zunehmendem Alter (7).

Bei der Art der Verletzung hat die glatte Schnittwunde eine günstigere Prognose als Riss- oder Quetschwunden (17).

Wenig verwunderlich ist der Grundsatz, je ausgedehnter die Gewebeschädigung, desto schlechter. So zeigt eine primäre Nervenrekonstruktion von Stumpf-zu-Stumpf ein besseres klinisches Outcome als eine sekundäre Nervenrekonstruktion (21).

Wegen der langen Regenerationszeit und des relativ kurzen Zeitfensters für eine suffiziente Versorgung, ist eine frühe Diagnose (22) und ein möglichst kurzer Zeitabstand zwischen Trauma und operativer Versorgung entscheidend (17).

Natürlich ist das Ergebnis auch von der Qualität der operativen Versorgung abhängig. Dies zeigt sich in einer korrekten, intraoperativen Beurteilung der Nervenstümpfe und einem atraumatisches Vorgehen (17).

Wird die Nervennaht zum Beispiel unter zu großer Spannung angelegt, droht entweder die Ruptur oder eine Fibrose des Nervs, und dadurch ein Wachstumsstopp der Axone. Bleibt eine Lücke zwischen den Nervenstümpfen, kann sich eine Narbe bilden, die ebenfalls das Weiterwachsen der Axone verhindert. Aber auch bei zu großer Freilegung der Nervenenden oder der Faszikel können komprimierende Narben entstehen (17).

Eine adäquate Nachbehandlung und Beübung des Fingernervs ist für den Heilungsprozess unerlässlich. Eine ergotherapeutische oder physiotherapeutische Therapie, aber vor allem ein eigenständiges tägliches Beüben sind für die Heilung förderlich (23).

Nach einer Digitalnervendurchtrennung ist allerdings nicht nur die lokale Heilung des Nervs, sondern auch eine zentrale funktionelle Reorganisation im Kortex notwendig. Um dies optimal gewährleisten zu können und damit keine fehlgeleitete Reinnervation auftritt, sind die zentralen Prozesse in der Nachversorgung nicht zu vernachlässigen (3).

3.5 Historische Betrachtung des Fibrinklebers - Weg vom experimentellen Tierversuch zum klinischen Alltag

Die Verwendung von Fibrinkleber zur experimentellen Nervenreparatur wurde erstmals 1940 von Young (24) beschrieben und 1974 von Kuderna (25) erstmals in der klinischen Praxis eingesetzt.

Die Vorteile von Fibrinklebern sind die hämostatische und adhäsive Wirkung und eine Biostimulation der Wundheilung (26).

Während 1995 in einer experimentellen Studie noch Probleme im Umgang mit Fibrinklebern beschrieben wurden, wie zum Beispiel der korrekten Menge oder der korrekten Stelle für das Auftragen des Klebers (27), konnten im gleichen Jahr in einer anderen Studie am Mäusemodell bereits sehr gute Ergebnisse mit Fibrinkleber zur primären Nervenrekonstruktion erzielt werden (28).

2005 bot in einem Rattenmodell die Nervenreparatur mit Fibrinkleber nach Durchtrennung des Ischiasnervs bessere Bedingungen für die Regeneration als die Naht (29).

Da eine Mikrochirurgische Naht auch ohne Zug auf die Nervenstümpfe, eine fibroblastische und myofibroblastische Proliferation fördert, und so eventuell axonale Regeneration stören kann, stellt die Nervenklebung eine gute Alternative dar (14).

In histomorphometrischen Analysen wurde gezeigt, dass die Stumpf-zu-Stumpf-Reparatur mit Fibrinkleber zu einer Zunahme der Anzahl der Nervenfasern, des Myelins und der Nervenfaserflächen führt (21).

Wahrscheinlich sind diese morphologischen Ergebnisse auf die stabilisierende Wirkung des Klebstoffs zurückzuführen (30).

2022 erschien eine Meta-Analyse, die versuchte die Fragestellung zu beantworten ob Fibrinklebung nun das Mittel der Wahl in der primären Nervenrekonstruktion sei, diese kam zu dem Schluss, dass die meisten Studien an Tiermodellen durchgeführt wurden, und wiesen auf die Notwendigkeit von kontrollierten Humanstudien hin, um die Wirksamkeit von Fibrinkleber für die Reparatur peripherer Nerven im klinischem Umfeld weiter bestätigen zu können (31).

3.6 Zielsetzung der Arbeit und Fragestellung

Bisher konnten die anatomischen und histologischen Grundlagen der Digitalnerven, die Folgen einer Digitalnervendurchtrennung, sowie die Wichtigkeit einer operativen Versorgung und die Methodik der operativen Verfahren, dargelegt werden.

Diese Arbeit hat sich nun zum Ziel gesetzt zwei etablierte Operationsmethoden der primären Nervenkoapatation, die mikrochirurgischen Nervennaht und die Fibrinklebung, in einer klinischen, randomisierten, prospektiven Humanstudie zu vergleichen.
Die Verkleinerung des asensiblen Gebiets, erfasst durch die 3D-Fotogrammetrie, soll erstmals als Messgröße für die Nervenregeneration herangezogen werden, um so dringend benötigte Daten zum Vergleich der Nervenkoapation mittels Fibrinkleber mit dem bisherig vorherrschenden Goldstandard der Mikrochirurgischen Naht in einem klinischen Setting, sammeln zu können.

4 Material und Methoden

4.1 Studiendesign

Es handelt sich um eine einfache, randomisierte, prospektive, kontrollierte, bizentrische, klinische Studie. Die zwei Standorte der Studie umfassen das Universitätskrankenhaus Regensburg (UKR) und das Caritaskrankenhaus St. Josef (CSJ) in Regensburg. Es wurden alle Patienten, die den Studienkriterien entsprechen und im Zeitraum vom 01.09.2020 bis zum 29.10.2022 an diesen beiden Standorten operativ versorgt wurden, rekrutiert.

4.2 Ethikvotum

Die vorliegende Untersuchung wurde in Übereinstimmung mit den aktuellen Bestimmungen der Deklaration von Helsinki durchgeführt und wurde von der Ethikkommission der Universität Regensburg im Rahmen einer berufsrechtlichen Überprüfung genehmigt (Aktenzeichen Nr. 20-1933-101). Die Datenerhebung erfolgte gemäß den Richtlinien für gute klinische Praxis (ICH-GCP) und wurde von qualifizierten und zertifizierten Prüfärzten sowie speziell geschultem medizinischem Personal (einschließlich der Doktoranden der Humanmedizin und studentischen Hilfskräfte im Bereich der Humanmedizin) pseudonymisiert durchgeführt. Das Forschungsprojekt wurde öffentlich im Deutschen Register Klinischer Studien (Referenz DRKS00022894) registriert.

4.3 Studienkriterien

Tabelle 1: Ein- und Ausschlusskriterien der Studie

Einschlusskriterien	Ausschlusskriterien
Totale Digitalnervendurchtrennung	Inkomplette Digitalnervendurchtrennung
Verletzungslokalisation distal des A1-Ringbandes und mindestes 10mm proximal des Eponychiums	Mehr als eine Digitalnervendurchtrennung an einem Digitus
Direkt koaptierbar (Nervennaht oder Nervenklebung)	Indirekt koaptierbar (Nerven-Conduit oder Nerven-Transplantat)
Patienten über 18 Jahren	Relevante Vorerkrankungen für Nervenregeneration
Tage bis operativer Versorgung $\leq$ 21 Tage	Schwangere und Stillende Patienten

4.4 Patientenakquise

Die Patienten wurden an den beiden Erstversorgungsstandorten CSJ und UKR gemäß den Ein- und Ausschlusskriterien der Studie überprüft und erhielten präoperativ sowohl eine mündliche Erklärung über Hintergrund, Inhalt, Risiken und Ablauf der Studie, als auch eine laienverständlich formulierte Studienaufklärung. Nach schriftlich erklärter Einwilligung zur Studienteilnahme wurden die Patienten in Interventions- und Kontrollgruppe blockweise (Blockgröße n= 20) im Verhältnis 1:1 randomisiert. Die Randomisierung wurde durch die Web-Plattform https://www.studyrandomizer.com/ vorgenommen.

Danach erfolgte die operative Versorgung der Patienten. Intraoperativ und postoperativ wurden die Ein- und Ausschlusskriterien der Studie erneut überprüft. Falls diese nicht bestätigt werden konnten, wurde der Patient nachträglich ausgeschlossen.

4.5 Interventions- und Kontrollgruppe

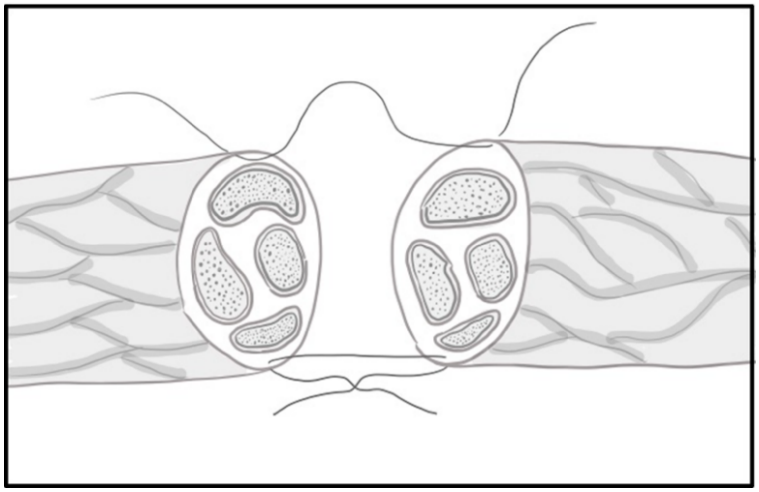

Abbildung 8: Illustration epineurale Naht

Vom Autor erstellt

Die Interventionsgruppe unterscheidet sich von der Kontrollgruppe ausschließlich im Operationsverfahren. Die Interventionsgruppe erhielt eine Nervenkoaptation mittels Fibrinkleber TISSEEL 2ml/4ml der Marke Baxter (32), während die Kontrollgruppe eine Nervenkoaptation mittels epineuraler Naht erhielt.

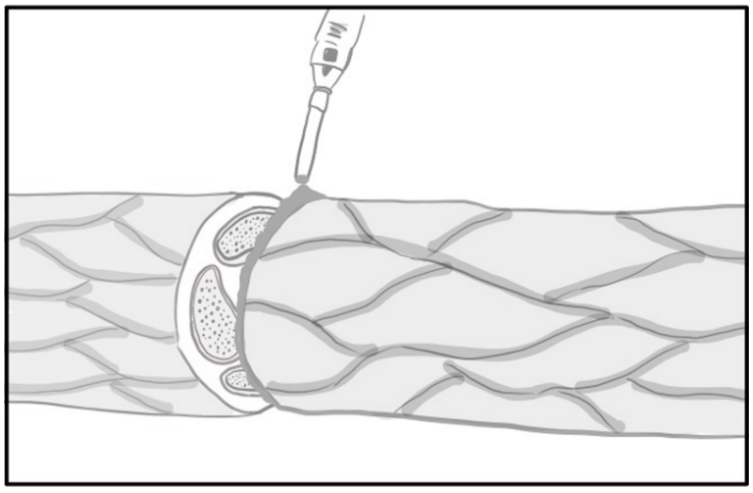

Abbildung 9: Illustration Nervenkoaptation mittels Fibrinkleber

Vom Autor erstellt

Die Nachsorge war in beiden Studiengruppen identisch.

4.6 Erhebung der Daten

Tabelle 2: Timeline der Datenerhebung

Visiten	Diagnose	Tag 0/ OP	W2	W6	M3	M6	M9	M12
Screening **Ein- / Ausschlusskriterien**	x							
Studieninformation / Einwilligung	x							
Randomisierung	x							
Datenerhebung - Demographische Daten (Geschlecht, Alter, Beruf) - Weitere anamnestische Informationen (PY, Dauermedikation, Händigkeit, Verletzte Hand, Verletzungsmuster, Umfeld des Unfalls)	x							
Intraoperative Datenerhebung - Zeit bis zur OP, OP-Dauer, Hospitalisierungs-dauer - Lokalisation der Verletzung, Begleitverletzungen		x						
Reassesement **Ein- / Ausschlusskriterien**		x						
Klinische Untersuchung, pDMS	x		x	x	x	x	x	x
Primärer Endpunkt - 3D-Fotogrammetrie			x	x	x	x	x	x
Sekundäre Endpunkte - s2PD - d2PD - TT - Sp/St - Temperaturwahrnehmung			x	x	x	x	x	x
Komplikationen - Neuropathische Schmerzen - Hyperästhesie - Kälteintoleranz - Wundheilungsstörung - Wundinfektionen			x	x	x	x	x	x
SMHQ Fragebogen			x	x	x	x	x	x
PSFS Fragebogen			x	x	x	x	x	x
M12 Evaluationsbogen								x
Ultraschalldiagnostik								x
QST								x

4.6.1 Erhebung der patientenspezifischen Ausgangsbefunde

Für die Erhebung der Ausgangsbefunde wurden die Anamnesebögen, Operationsberichte, Operationsprotokolle und Arztbriefe herangezogen. Weitere erhobene Daten umfassen die Körpergröße, das Gewicht, die Händigkeit, den Beruf, das Datum des Unfalls, eventuelle Begleiterkrankungen, eventuelle Dauermedikation und den Nikotinkonsum.

Um die Vergleichbarkeit zwischen den beiden Operationsmethoden zu gewährleisten, wurden darüber hinaus detaillierte Informationen zu den Verletzungen und den Operationen erfasst. Dazu gehören Angaben über den Ort der Versorgung, den genauen Verletzungsmechanismus, die Lokalisation des Defekts, die Entfernung zwischen der Koaptationsstelle und dem Eponychium, Informationen zu den Begleitverletzungen (Verletzung der Begleitarterie, der Streck- oder Beugesehnen oder der Knochen), der Zeitraum zwischen der Verletzung, der operativen Versorgung und der Entlassung, die Art der Nervenkoaptation, das Auftreten intraoperativer Komplikationen, die Dauer zwischen Schnitt- und Nahtzeit sowie klinische und apparative Untersuchungsergebnisse.

4.6.2 Nachuntersuchungen

Die Nachuntersuchungen wurden im regelmäßigen Abständen nach der Operation durchgeführt. Diese Nachuntersuchungen umfassten je einen Termin zwei Wochen (W2), sechs Wochen (W6), drei Monate (M3), sechs Monate (M6) , neun Monate (M9) und zwölf Monate (M12) postoperativ.

Die Termine beinhalteten eine mündliche sowie eine schriftliche Anamnese mittels Fragebögen, eine ausführliche, standardisierte klinische Untersuchung mit Hilfe eines Untersuchungsbogens, eine 3D-Fotogrammetrie, sowie eine Ultraschalluntersuchung des koaptierten Nerven zum M12.

Bei den eingeschlossenen Studienteilnehmern wurden alle Messverfahren über den gesamten Nachsorgezeitraum von zwei Doktoranden im Beisein eines Prüfarztes durchgeführt. Um eine untersucherabhängige Dokumentationsverzerrung zu vermeiden, wurden beide Doktoranden zuvor instruiert und beide standartisierten das Messverfahren durch Demonstrationen und Übung in Gegenwart erfahrener Handchirurgen.

4.6.2.1 Informationen und Material für die Studienteilnehmer

Den Studienteilnehmern wurde eine ergotherapeutische Behandlung angeboten und zur Eigenstimulation des koaptierten Nervens angeleitet. Zusätzlich erhielten die Patienten einen Flyer und Alltagsgegenstände, die zur Beübung verwendet werden können.



Abbildung 10: Material für die Studienteilnehmer

4.6.2.2 Klinische Untersuchung

Der eigens für die Studie entwickelte Untersuchungsbogen (s. Anhang 1) diente zur Dokumentation der standardisierten klinischen Untersuchung.

Diese umfasste bei jedem Nachuntersuchungstermin die statische Zweipunktdiskrimination (s2PD), die dynamische Zweipunktdiskrimination (d2PD), den Ten-Test nach Strauch (33), die Unterscheidung von Spitz und Stumpf (Sp/St-Diskrimination), das Auftreten und Fortschreiten des HT-Zeichens (34) und die Wahrnehmung von Temperaturempfindungen. Diese Tests wurden stets in derselben Reihenfolge durchgeführt.

Während der Untersuchung saß der jeweilige Teilnehmer der Studie dem Untersucher gegenüber und legte beide Hände mit den Handflächen nach oben flach auf einen Tisch. Falls die Wundheilung noch nicht abgeschlossen war, wurde eine geeignete Unterlage verwendet. Nach der Inspektion und Palpation der betroffenen Hand und der Dokumentation relevanter Komplikationen auf dem Untersuchungsbogen wurden die Messverfahren erneut erklärt und anhand des gesunden, nicht betroffenen Digitalnervs (DN) der kontralateralen Hand demonstriert und getestet. Zum Beispiel wurde, wenn der linke DN10 betroffen war, zunächst eine Kontrollmessung am rechten, nicht betroffenen DN10 durchgeführt.

Statische Zweipunktdiskrimination

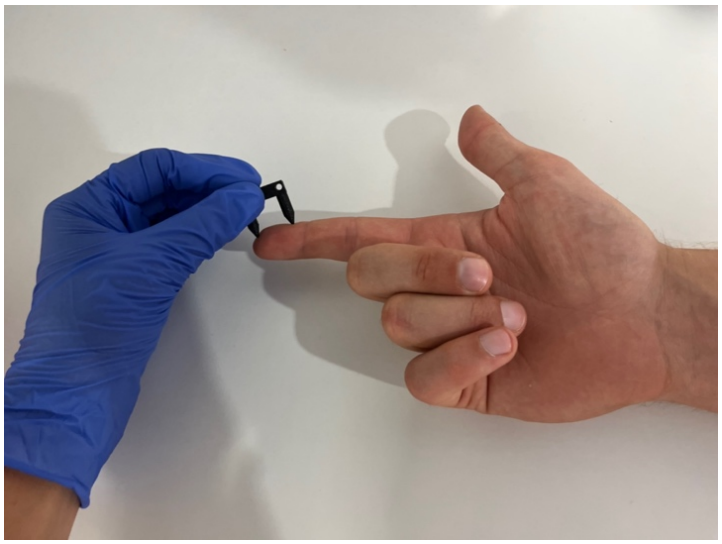

Abbildung 11: Statische Zweipunktdiskriminationstestung mit 12mm-Diskriminator

Die s2PD ist eines der am weitesten verbreiteten Parameter für die Nachuntersuchung von Nervenverletzungen (35).

An den Händen ist das räumliche Auflösungsvermögen sehr hoch (36), diese wird durch die s2PD getestet. Durch diese wird der kleinste Abstand zweier taktiler Reize ermittelt, die noch getrennt wahrgenommen werden können (35).

Die Zweipunktdiskrimination wurde mit Hilfe drei verschiedener Zweipunktdiskriminatoren ermittelt. Diese drei Instrumente wurden in einem 3D-Drucker hergestellt und deckten die Größenabschnitte 2-6 mm, 7-15 mm und <15 mm ab.

Die Messung wurde durchgeführt während die Studienteilnehmer ihre Augen geschlossen hielten. Die Messspitzen wurden in Längsrichtung an der Fingerbeere genau gleichzeitig aufgesetzt, um die gleichzeitige, nicht aufeinanderfolgende Raumwahrnehmung zu erfassen. Der Zweipunktdiskriminator wurde so lange statisch positioniert, bis ein dekapillarisierender Druck aufgebaut war.

Der Untersucher wechselte zufällig zwischen einer oder zwei Messspitzen. Für den Referenznerv wurde der Test mit dem kleinstmöglichen Abstand an der gesunden Hand durchgeführt. Am verletzten Nerv wurde mit dem größten Diskriminator mit dem größten Abstand begonnen und bei korrektem Erkennen, wurde der Abstand schrittweise verringert. Konnten weniger als 7 Reize vom Probanden richtig erkannt werden, wurde der nächstgrößere Größenabschnitt notiert.

Dynamische Zweipunktdiskrimination

Für die Funktion der Hand ist die Wahrnehmung von dynamischen Reizen von hoher Relevanz. Die dynamischen Stimuli werden im ZNS leichter verarbeitet als statische Reize. Dadurch werden nach einer Nervenrekonstruktion dynamische Reize eher wahrgenommen als statische Stimuli (37).
Die dynamische Zweipunktdiskrimination wurde mit den gleichen Messinstrumenten und auf die gleiche Art und Weise wie die statistische Zweipunktdiskrimination durchgeführt. Der einzige Unterschied besteht darin, dass die Diskriminatoren über die Fingerbeere in einer langsamen Bewegung gestrichen wurden, statt sie statisch aufzusetzen.

Ten Test

Der Ten-Test nach Strauch (1999) gibt das subjektive Empfinden im Autonomiegebiet des rekonstruierten Digitalnervs im Vergleich zur unverletzten kontralateralen Seite an (33). In dieser Studie wurde eine 11-stufige Version des Ten-Tests verwendet. Diese inkludiert neben der normalen Likert-Skala von 1-10, die Zahl 0. Die Zahl 0 steht hierbei für die komplette Asensibilität des Autonomiegebiets (38).
Der Ten-Test ist ein Parameter mit guter Reliabilität und Validität (39).
Für die Ermittlung des Ten-Tests wurde eine Kanüle (BD Microlance ™ 3, 0,90x40mm, Nr.1) gleichzeitig mit konstantem, leichten Druck entlang des verletzten Digitalnerves und des gesunden Kontrolldigitalnerves der kontrolateralen Hand geführt. Die Probanden sollten das subjektive Berührungsempfinden des koaptierten Digitalnervs im Vergleich zum Kontroll-Digitalnerv auf einer Skala von 0 bis 10 angeben.

Spitz / Stumpf - Diskrimination

Die Spitz/Stumpf-Diskrimination dient zur Prüfung der Schmerzempfindung (36). Auch diese Untersuchung wurde unter Ausschluss der visuellen Kontrolle des Studienteilnehmers durchgeführt. Dazu wurden bewusst zufällig entweder die Spitze einer Kanüle (BD Microlance ™ 3, 0,90x40mm, Nr.1) oder der stumpfe Deckel dieser Kanüle auf die betroffene halbe Fingerbeere des zu untersuchenden Digitalnervs aufgedrückt. Die Haut sollte dabei nicht punktiert werden. Die Patienten sollten einordnen ob es sich jeweils um einen stumpfen oder spitzen Reiz handelt.

Temperaturwahrnehmung

Die Thermorezeption, also die Wahrnehmung von kalt und warm, werden über spezielle Kalt- und Warmsensoren der Haut vermittelt (36). Die Thermorezeption wurde durch die

Wahrnehmung von Alkoholverdunstungskälte nach Besprühen der Fingerbeerenhälfte mit Desinfektionsspray auf Propanololbasis (Cutasept F., Paul Hartmann AG) überprüft.

Erfassung von Komplikationen

Postoperative Komplikationen und deren Verlauf wurden über den gesamten Nachbehandlungszeitraum erfasst.

Explizit wurde nach dem Auftreten von neuropathischen Schmerzen, einer Kälteintoleranz, Hyperästhesie, eines Komplexes regionales Schmerzsyndrom (CRPS) und Infektionen gefragt. Auch inspektorische Auffälligkeiten wie z.B. auffälliges Narbenbild, Kolorit und Schwellungszeichen wurden erfasst.

4.6.2.3 Standardisierte Fragebögen

Zur standardisierten Befragung der Studienteilnehmer wurde bei jedem Nachuntersuchungstermin der Short Michigan Hand Outcome Questionaire (SMHQ) Fragebogen (40) und die Patientenspezifische Funktionsskala (PSFS) (41) verwendet.

Zum M12 Abschlusstermin wurde darüber hinaus noch ein Abschlussevaluationsbogen vom Patienten ausgefüllt. Die ausgefüllten Fragebögen wurden nach ihrer Digitalisierung dezentral und zugangsbeschränkt aufbewahrt.

Short Michigan Hand Outcome Questionnaire (SMHQ)

Der SMHQ (s. Anhang 2) basiert auf dem Michigan Hand Questionnaire (MHQ), der 1998 von Kevin C. Chung entwickelt wurde und 37 Fragen beinhaltet (40). Der SMHQ stellt eine Kurzform des MHQ dar und wurde entsprechend validiert (42). Der SMHQ umfasst 12 Fragen zu den Bereichen Handfunktion, Schmerz, Arbeitsfähigkeit und der Patientenzufriedenheit mit dem Erscheinungsbild (42). Die Patienten beantworteten diese Fragen durch eine Fünf-Punkte-Skala. In dieser Studie wurde die deutsche Übersetzung des SMHQ verwendet, die 2021 von Knobloch et. al. aus dem Englischen übersetzt und validiert wurde (43).

Patientenspezifische Funktionsskala (PSFS)

Der zweite Fragebogen, der bei jedem Nachsorgetermin verwendet wurde, ist der Patient-Specific Functional Scale (PSFS) (s. Anhang 3). Der PSFS wurde 1995 von Stratford et al. entwickelt (41) um das klinische Outcome durch subjektive Patienteneinschätzung von

Alltagsaktivitäten zu messen (44). Der PSFS wurde 2012 von P. Heldmann et al. ins Deutsche übersetzt und validiert (45).
Hierbei wurde zusammen mit dem Untersucher am ersten Nachsorgetermin W2 drei Alltagstätigkeiten erarbeitet, die dem Studienteilnehmer nicht oder nur schwer möglich waren, auszuüben. Ab dem nächsten Nachsorgetermin W6 wurden diese drei Aktivitäten mit 0 (Ausführung der Aktivität nicht möglich) bis 10 (Ausübung der Aktivität wie vor dem Unfall möglich) bewertet. Diese Benotungen wurden anschließend addiert.

Abschlussevalutationsbogen zum M12

Zum M12 Termin füllte jeder Studienteilnehmer einen, eigens für die Studie entwickelten, Abschlussevaluationsbogen (s. Anhang 4) aus.

4.6.2.4 3D-Quantifizierung des asensiblen Areals

In dieser Studie wurde erstmals die Verkleinerung des asensiblen Gebiets als Parameter für die Nervenregeneration herangezogen und mit Hilfe der 3D-Fotogrammetrie dokumentiert und gemessen.
Zur standardisierten Nachuntersuchung des asensiblen Gebiets am operativ versorgten Finger, wurden also bei jedem Nachsorgetermin ein 3D-Modell des Fingers angefertigt um die Fläche des asensiblen Gebiets sowie die Gesamtfläche des Fingers zu vermessen.

4.6.2.4.1 Das Vectra-System

Zur Aufnahme der Bilder, aus denen die 3D-Modelle manuell zusammengefügt wurden, wurde der mobile 3D-Präzisions-Scanner VECTRA®^{H2} der Firma Canfield Scientific, New Jersey verwendet.
Die folgenden technischen Daten stammen direkt von der Herstellerseite.
Der 3D-Präzisions-Scanner VECTRA®^{H2} hat ein duales Lichtpunkt-Positionierungssystem mit zwei Modi „Gesicht“ und „Körper“. Das Aufnahmevolumen beträgt im Modus Gesicht 320 mm(H) x 180 mm(B) x200 mm (T), Aufnahmen im Modus Körper 700mm(H) x 410mm (B) x 400mm (T). Die Zeit für eine einzelne Aufnahme beträgt weniger als eine Sekunde, die Belichtungszeit der intelligenten Blitzeinheit beträgt 2,0 Millisekunden (46). In dieser Studie wurde die Software VAM (Canfield Scientific, New Jersey) verwendet um die 3D-Modelle manuell zu generieren.

4.6.2.4.2 Erstellung der 3D-Vectra Modelle

Das asensible Gebiet des betroffenen Fingers wurde mit einem Instrument bestrichen und der Übergang zwischen dem sensiblen und asensiblen Gebiets mit einem medizinischen Hautmarker in der Farbe Lila markiert. Die Innenfläche dieses Areals wurde mit mathematischen Minusstrichen markiert. Die restliche Fläche des zu untersuchenden Fingers wurde mit mathematischen Pluszeichen in der Farbe Blau gekennzeichnet.
Als Abgrenzung der Gesamtfingerfläche wurde ein weicher Gummiring auf Höhe der palmaren MCP Beugefalte positioniert.

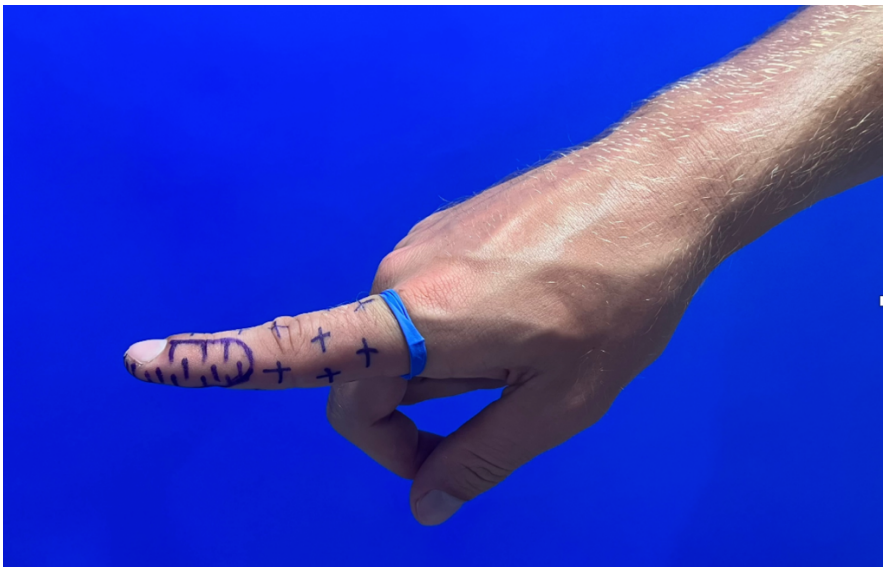

Abbildung 12: Markierter Finger mit Gummiband

Anschließend wurde der Finger mit Hilfe der VECTRA®^{H2} von allen Seiten fotografiert. Der Studienteilnehmer befand sich dabei in einer sitzenden Position mit aufgestütztem Ellbogen und die Hand wurde nach kranial ausgestreckt. Die Position der Hand wurde nicht mehr verändert. Der Untersucher fotografierte den zu beschreibenden Finger und bewegte sich dabei 360° um den Patienten herum, sodass eine fotografische Darstellung der gesamten Fingerfläche gewährleistet war.
Wenn möglich wurde die Hand so fotografiert, dass das asensible Areal vollständig auf einer Aufnahme abgebildet wurde.

Der gewählte Modus der VECTRA®^{H2} war „Gesicht“. Der korrekte Abstand zwischen Kamera und Objekt wurde durch das duale Lichtpunkt-Positionierungssystem der VECTRA®^{H2} sichergestellt. Die zwei leuchtenden Punkte mussten vor dem Abdrücken des Auslösers exakt übereinander ausgerichtet sein.

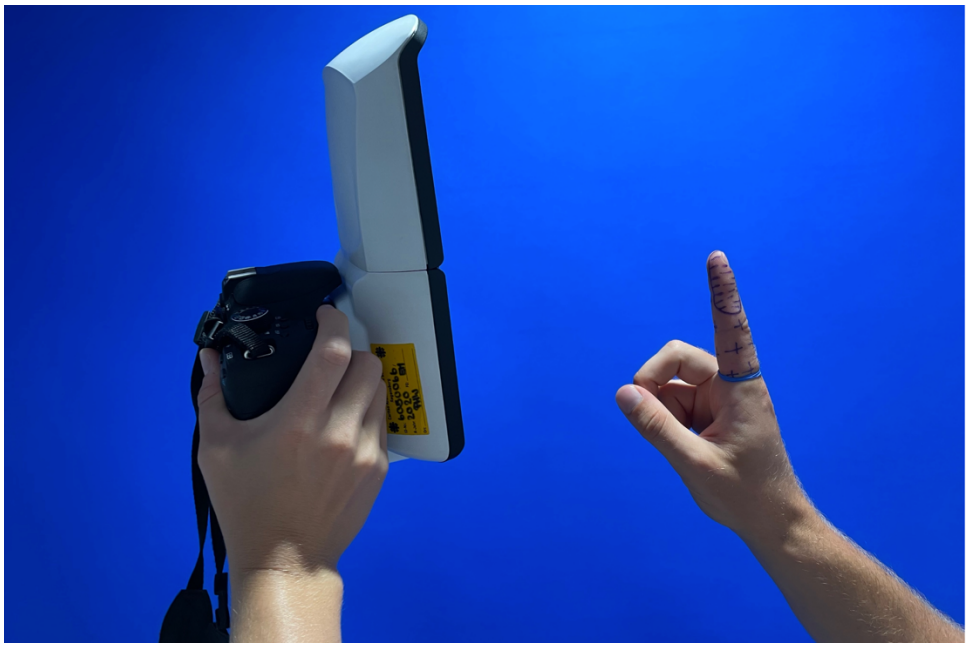

Abbildung 13: VECTRA®H2 im Einsatz

Die angefertigten Fotos wurden dann anonymisiert in die Sofware VAM (Canfield Scientific, New Jersey) überspielt. Die 3D-Modelle wurden nur durch Personen generiert, die zuvor ausgiebig in das Softwaresystem eingearbeitet worden sind.

Die Erstellung des 3D-Modells erfolgte schrittweise. Man wählte zunächst zwei der Bilder aus, die eine ausreichende Überschneidung des abgebildeten Areals aufwiesen aber dennoch möglichst viel von der Gesamtfläche des Fingers abdeckten.

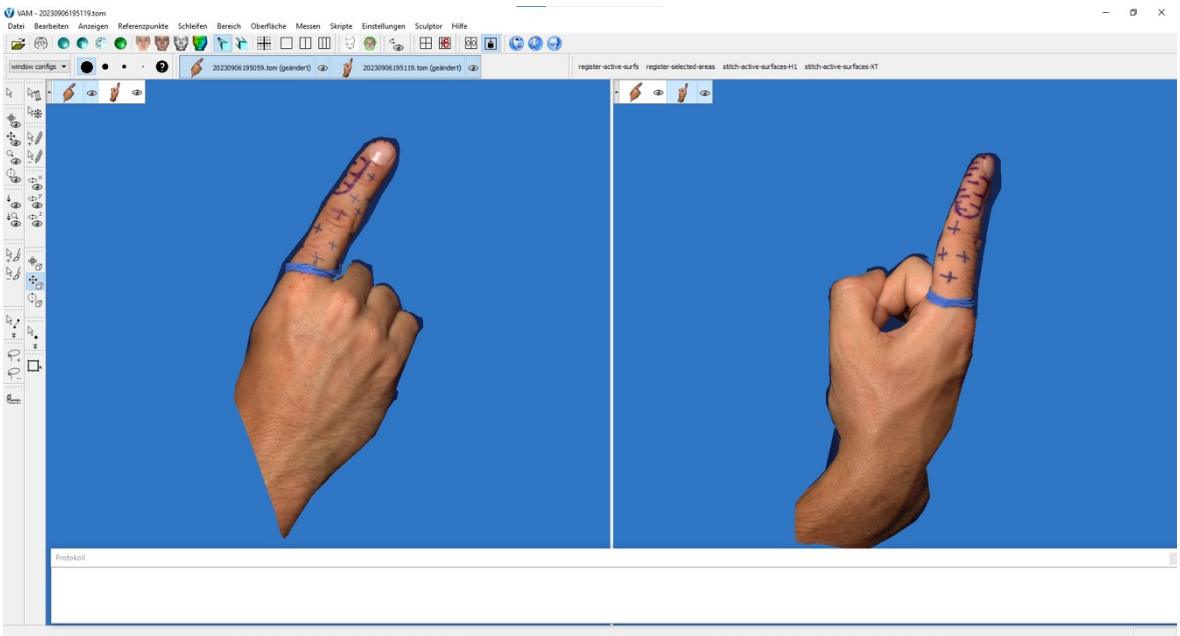

Abbildung 14: Gegenüberstellung zweier ausgewählter Fotos in der Software VAM

Diese beiden Bilder wurden in der Software VAM dann gegenübergestellt und gleiche Punkte händisch auf beiden Fotografien als entsprechende Markierungen gesetzt. Die eingezeichneten Minus- und Pluszeichen dienten hierbei als Markierungsstellen. Nach einer ausreichenden Anzahl von gesetzten Markierungen wurden die beiden Bilder zusammengefügt und das daraus resultierende Modell wurde mit einem erneuten Foto in gleicher Weise zusammengesetzt. Dies wurde solange wiederholt bis ein vollständiges 360°-Modell des Digitus entstand.

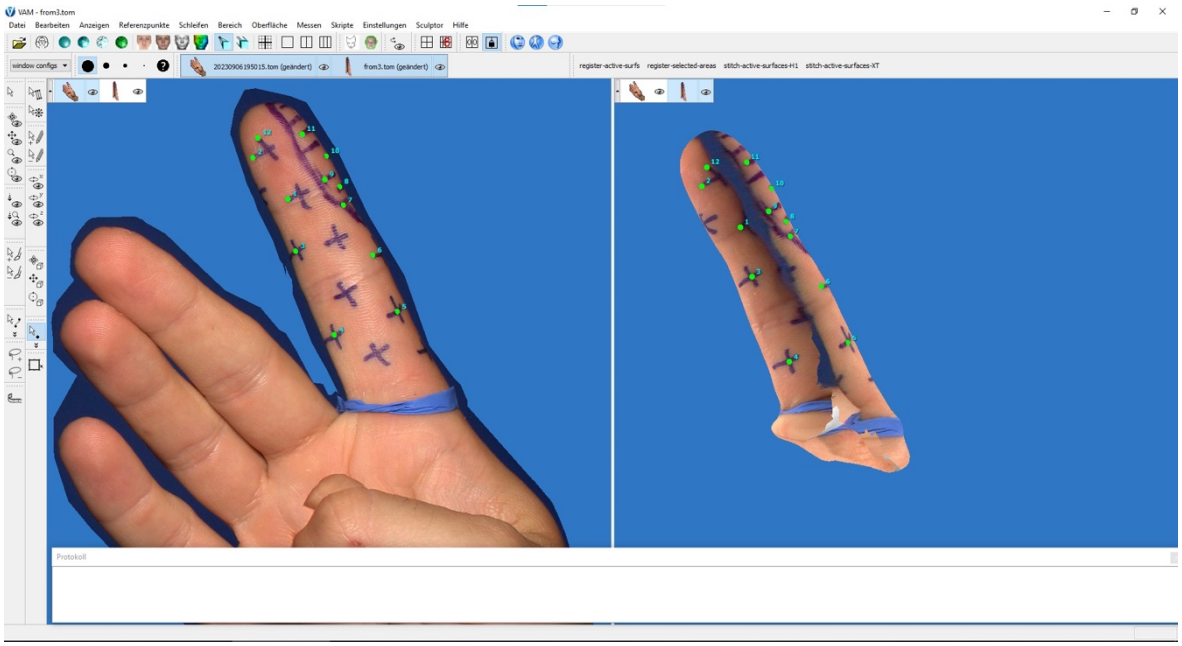

Abbildung 15: Gesetze Markierungen in VAM zur Erstellung eines 3D-Modells

4.6.2.4.3 Messung der Flächen der 3D-Vectra Modelle

Auf dem so entstandenen fertigen 3D-Modell wurde zunächst das eingezeichnete asensible Gebiet markiert und vermessen. Das Programm gab die jeweiligen Flächen in cm^2 an. Anschließend wurde die Gesamtfläche des Fingers inklusive des asensiblen Gebiets bestimmt. Als Standard wurde in dieser Studie zur Vermessung der Areale festgelegt, dass der Fingernagel nicht mit zum asensiblen Gebiet zählte, jedoch zur Gesamtfläche. Die Gesamtfläche erstreckt sich proximal bis auf die Mitte des angebrachten Markierungsbandes.

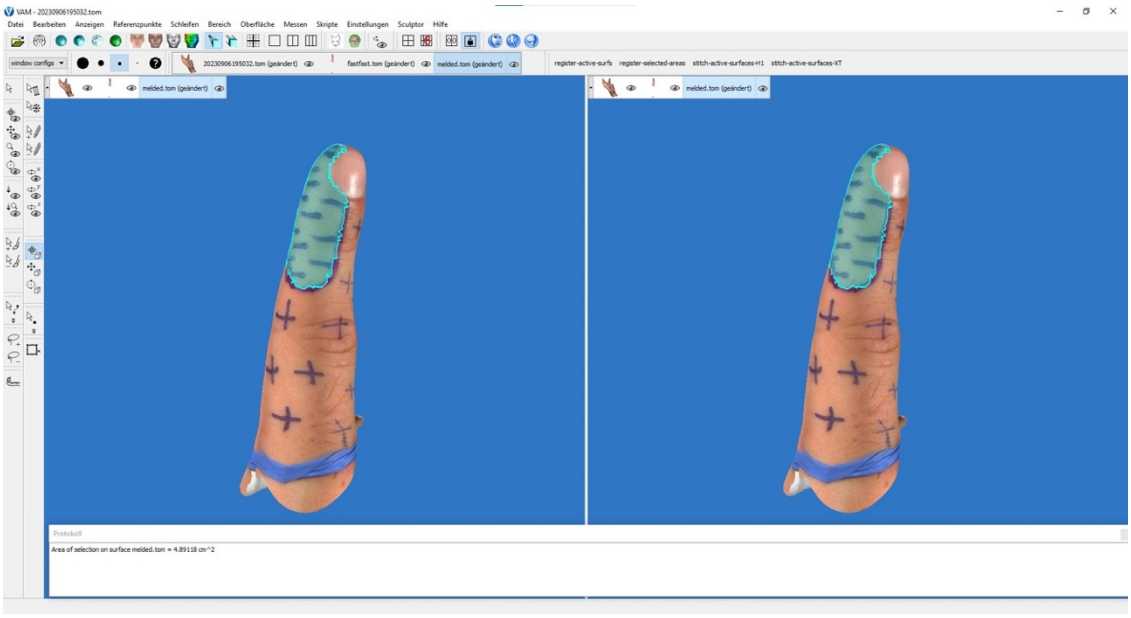

Abbildung 16: Messung des asensiblen Gebiets aus dem 3D-Vectra-Modells

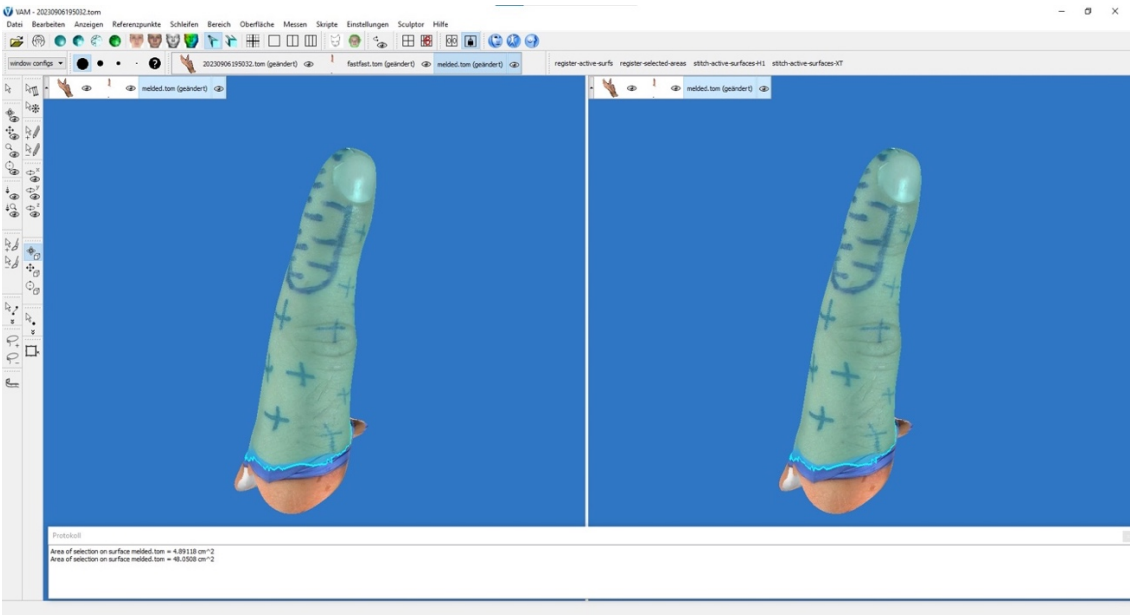

Abbildung 17: Vermessung der Gesamtfingerfläche

4.6.2.5 Ultraschalluntersuchung 12 Monate postoperativ

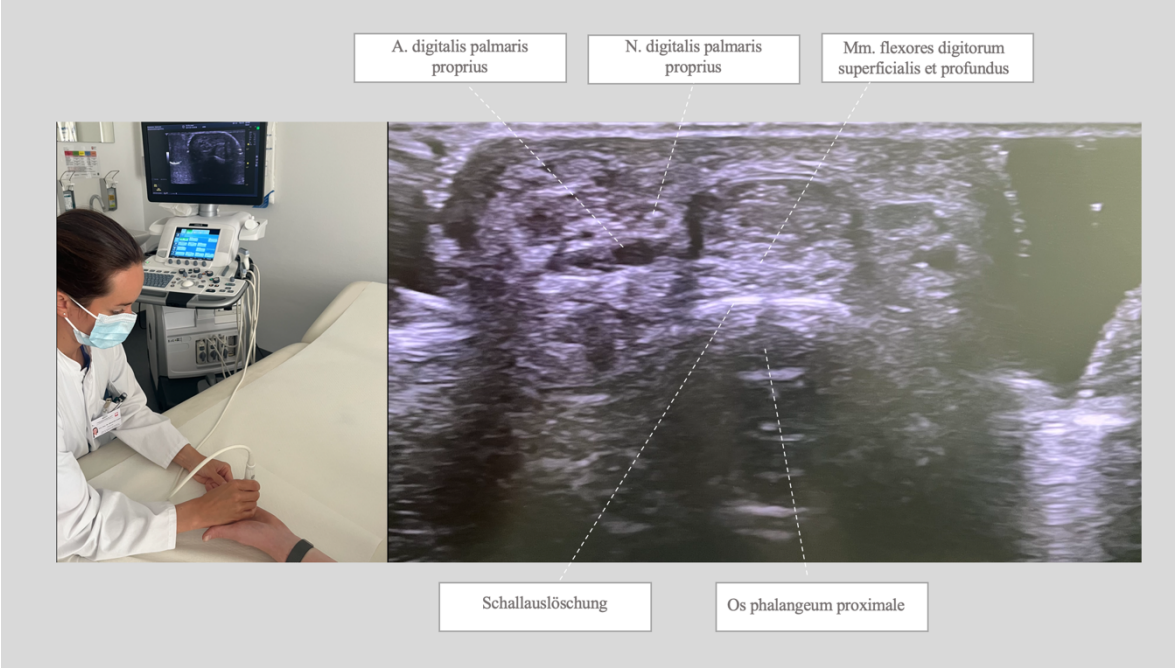

Abbildung 18: Ultraschalluntersuchung der Nervenkoaptation

Am jeweils letzten Nachuntersuchungstermin im Rahmen der Studie, wurde der koaptierte Nerv im Vergleich zum gesunden Nerv der Gegenseite sonographisch auf Durchgängigkeit untersucht (47). Hierfür wurde das Sonographie-Gerät GE Logiq E9 verwendet.
Diese Untersuchung wurde immer von erfahrenen Handchirurgen vorgenommen und sollte die Deskription des klinischen Outcomes durch ein bildgebendes Verfahren vervollständigen.

4.7 Qualitätssicherung

Die Qualitätssicherung während der Datensammlung wurde durch monatliche, interne Forschungsbesprechungen innerhalb der Arbeitsgruppe gewährleistet, bestehend aus Prüfärzten sowie studentischen Hilfskräften und Doktoranden des FinGeRpriNT-Studienvorhabens. Während dieser Besprechungen wurden die Daten auf Vollständigkeit, Richtigkeit und Plausibilität überprüft, und ungültige Datensätze wurden nach Überprüfung entfernt.
Die Erfassung aller Parameter erfolgte auf nicht-invasive Weise und stellte somit keine zusätzlichen Risiken für die Studienteilnehmer dar. Es wurden keine studienbedingten Arztbesuche außerhalb der üblichen klinischen Routine durchgeführt.

Das Studiendesign wurde entsprechend den Empfehlungen der U.S. amerikanischen Agency for Health Care Policy and Research (AHCPR) als Evidenzklasse Ib eingestuft, was darauf abzielte, die direkte Anwendbarkeit der Ergebnisse in der klinischen Praxis zu ermöglichen.

Es gab keine Interessenkonflikte im Rahmen dieser Studie.

4.7.1 Rekrutierung der Studienpopulation

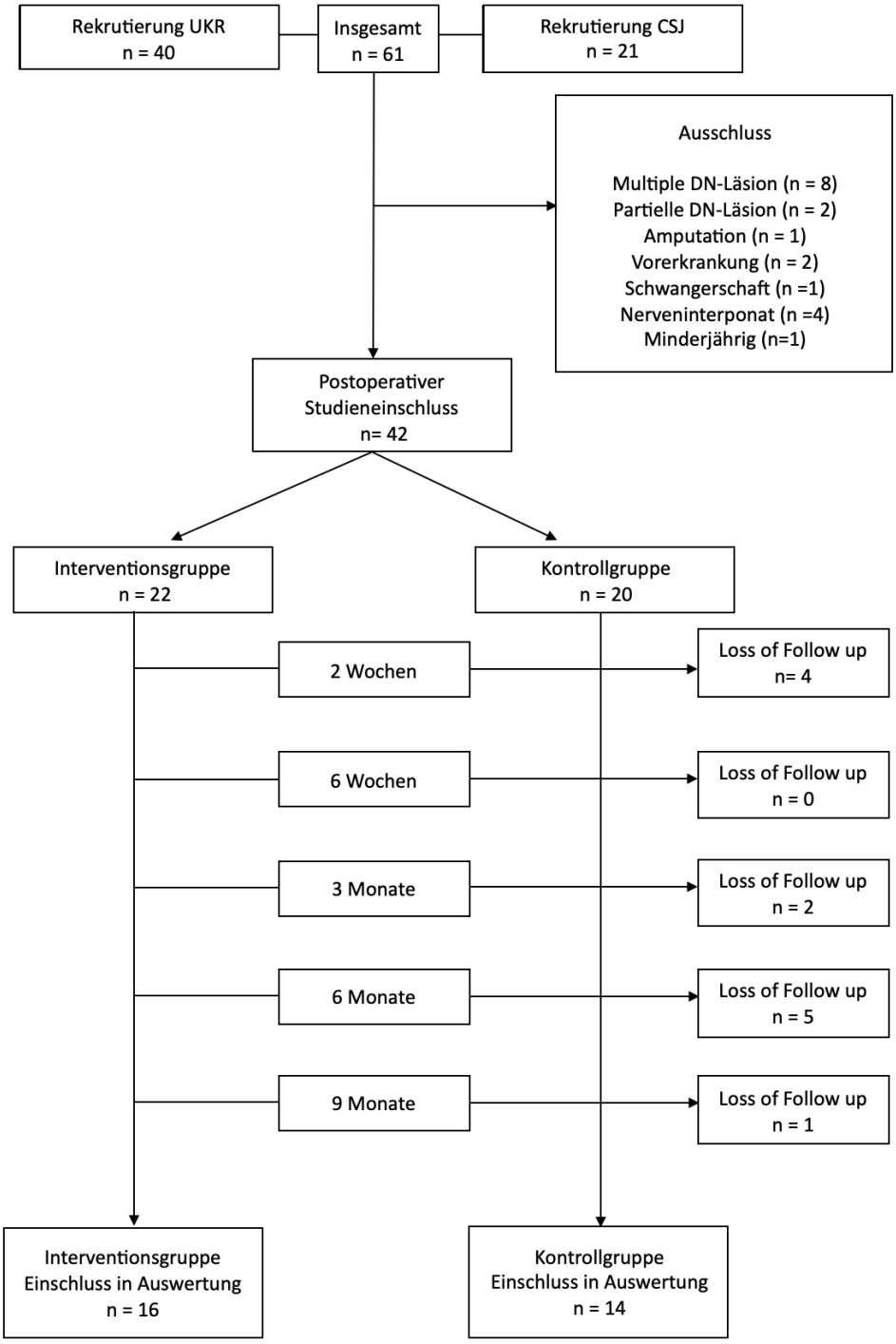

Abbildung 19: Rekrutierung der Studienpopulation

In die Studie konnten im Zeitraum vom 01.09.2020 bis zum 29.10.2022 61 Patienten präoperativ für die Studie rekrutiert werden. Postoperativ konnten nach erneuter intra- und postoperativer Evaluation der individuellen Erfüllung der Studienausschlusskriterien insgesamt 42 Patienten eingeschlossen werden.
Davon gehörten 22 Patienten der Interventionsgruppe und 20 Patienten der Kontrollgruppe an.
Über den jeweiligen Studienzeitraum schieden insgesamt 12 Patienten aus der Studie aus. Gründe für den Loss of Follow up waren unterschiedlich, zumeist aber wurden Umzüge oder ein zu weiter Anfahrtsweg zu den Nachuntersuchungsterminen, angegeben.
Letztendlich können 30 Patientendaten in der vorliegenden Analyse betrachtet werden. Davon gehören 16 Patienten der Interventionsgruppe und 14 Patienten der Kontrollgruppe an.

4.8 Statistische Analyse

Die statistische Auswertung der erhobenen Daten erfolgte mit dem Programm IBM SPSS Statistics (Version 29.0.1.0). Im Folgenden werden die durchgeführten statistischen Analysen einschließlich der zugrunde liegenden Voraussetzungen und der daraus resultierenden Konsequenzen beschrieben.

Deskriptive Statistik

Die Patienten-Charakteristika waren nach Shapiro-Wilk Test überwiegend nicht normalverteilt, weshalb ausschließlich nicht-parametrische Tests eigesetzt wurden. Die Darstellung erfolgte entsprechend mit Median und Interquartil-Range.

Auswertung SMHQ

Für die statistische Auswertung des SMHQ-Fragebogens wurde zunächst eine Umkodierung in einen SMHQ-Gesamtscore vorgenommen, der einen maximalen Wert von 100 Punkten erreicht. Ziel der Analyse war der Vergleich der SMHQ-Werte zwischen zwei unabhängigen Gruppen. Da die Daten gemäß dem Shapiro-Wilk-Test überwiegend nicht normalverteilt waren, wurden für Gruppenvergleiche primär nichtparametrische Testverfahren eingesetzt. Entsprechend wurde der Mann-Whitney-U-Test verwendet, um Unterschiede in der zentralen Tendenz zwischen den beiden unabhängigen Gruppen zu prüfen. Für die Analyse von Messwiederholungen kam zusätzlich eine Mixed-ANOVA zum Einsatz, da dieses Verfahren gegenüber Verletzungen der Normalverteilungsannahme als robust gilt und die

gleichzeitige Modellierung von Intra- und Intergruppeneffekten ermöglicht. Da der Mauchly-Test auf Sphärizität nicht berechnet werden konnte, wurden die p-Werte unter Anwendung der Greenhouse-Geisser-Korrektur interpretiert. Bei paarweisen Gruppenvergleichen wurden die p-Werte mittels Bonferroni-Korrektur angepasst, um eine Alpha-Fehler-Inflation durch multiple Testungen zu vermeiden.

Auswertung PSFS

Zur Analyse der PSFS-Werte wurde ebenfalls der Mann-Whitney-U-Test verwendet, da auch hier die Voraussetzungen für parametrische Tests nicht erfüllt waren. Ziel war der Gruppenvergleich hinsichtlich der PSFS-Ausprägungen.

Zusätzlich wurde eine Kaplan-Meier-Analyse durchgeführt, um die zeitliche Entwicklung bis zum Erreichen des Maximalscores darzustellen. Hierzu wurden die Nachuntersuchungszeitpunkte (6 Wochen, 3 Monate, 6 Monate, 9 Monate, 12 Monate) in Tage umkodiert. Die Kaplan-Meier-Analyse dient der Darstellung der Ereigniszeitverteilung über den Beobachtungszeitraum. Obwohl dieses Verfahren häufig in der Überlebenszeitanalyse eingesetzt wird, bezieht sich das untersuchte Ereignis in der vorliegenden Analyse auf das Erreichen des Maximalscores.

Zur Prüfung, ob sich die Kaplan-Meier-Kurven der beiden Gruppen signifikant unterscheiden, wurde der Log-Rank-Test angewandt. Der Test vergleicht die zeitabhängige Verteilung bis zum Eintritt dieses Ereignisses zwischen den beiden Gruppen unter der Voraussetzung unabhängiger Beobachtungen.

Auswertung s2PD und d2PD

Für die Variablen s2PD und d2PD wurde der Kruskal-Wallis-Test eingesetzt. Dieser nicht-parametrische Test prüft, ob sich mehrere unabhängige Gruppen signifikant voneinander unterscheiden.

Die Anwendung dieses Tests erfolgte, da die Voraussetzungen für eine Varianzanalyse (ANOVA), insbesondere Normalverteilung und Varianzhomogenität, nicht erfüllt waren.

Bei einem signifikanten Gesamtergebnis wurde ein gruppenabhängiger Post-hoc-Test durchgeführt, um festzustellen, zwischen welchen Gruppen signifikante Unterschiede bestehen.

Auswertung Ten-Test

Für den Gruppenvergleich des Ten-Tests wurde der Mann-Whitney-U-Test verwendet, da die Verteilungsannahmen für parametrische Verfahren nicht gegeben waren.

Zusätzlich zu den p-Werten wurde Cohen's r als Maß für die Effektstärke berechnet. Cohen's r beschreibt die Stärke eines Effekts unabhängig von dessen statistischer Signifikanz.
Ein Wert von $r > 0$ weist auf einen positiven Zusammenhang hin, während $r < 0$ einen negativen Zusammenhang beschreibt.

Auswertung Sp/St-Diskrimination

Zur Analyse der Spitz-Stumpf-Diskrimination wurde der exakte Test nach Fisher angewandt. Dieser Test dient der Prüfung, ob zwei kategoriale Variablen statistisch unabhängig sind.
Der Fisher-Test wurde gewählt, da die Voraussetzungen für den Chi-Quadrat-Test, insbesondere ausreichende erwartete Zellhäufigkeiten, nicht erfüllt waren. Zudem eignet sich der Test besonders für kleine Stichproben, wie sie in dieser Untersuchung vorlagen.

Auswertung Temperaturempfinden

Die Analyse des Temperaturempfindens erfolgte ebenfalls mithilfe des exakten Tests nach Fisher, da es sich um kategoriale Daten handelte und die Voraussetzungen alternativer Tests nicht erfüllt waren.

3D-Fotogrammetrie

Zur Analyse der 3D-Mapping-Daten wurde eine Mixed ANOVA durchgeführt. Zur Prüfung der Voraussetzungen dieses Verfahrens wurden mehrere Tests angewandt.
Die Varianzhomogenität wurde mittels Levene-Test überprüft, während der Box-Test zur Prüfung der Gleichheit der Kovarianzmatrizen diente. Da der Mauchly-Test auf Sphärizität signifikant ausfiel und somit die Sphärizitätsannahme verletzt war, wurden Greenhouse-Geisser-korrigierte p-Werte verwendet.
Der Test der Innersubjekteffekte untersuchte die Veränderung der RAA-Werte innerhalb der Gruppen über den Messzeitverlauf.

Korrelation des 3D-Fotogrammetrie zu den etablierten Nachuntersuchungsverfahren Ten-Test, PSFS, SMHQ

Zur Analyse des Zusammenhangs zwischen den Ergebnissen der 3D-Fotogrammetrie und den etablierten Nachuntersuchungsverfahren (Ten-Test, PSFS, SMHQ) wurde die Spearman-Rangkorrelation verwendet.

Dieses nicht-parametrische Korrelationsverfahren wurde gewählt, da keine Normalverteilung der Variablen vorlag und Spearman's Rho monotone Zusammenhänge unabhängig von der Verteilungsform erfasst.

5 Statistische Aufarbeitung und Ergebnisse

5.1 Deskriptive Statistik

Demographische Daten

Tabelle 3: Demographische Darstellung der Studienpopulation - Insgesamt und pro Gruppe

		Gesamt (n=30)	Fibrinkleber (n= 16)	Naht (n=14)	p-Wert
Geschlecht	Weiblich	11/30 (37%)	6/11 (54%)	5/11 (45%)	0,919
	Männlich	19/30 (63%)	10/19 (52%)	9/19 (48%)	
Alter	<40 Jahre	15/30 (50%)	8/15 (53%)	7/15 (47%)	0,929
	>40 Jahre	15/30 (50%)	8/15 (53%)	7/15 (47%)	
BG Fall	Ja	13/30 (43%)	6/13 (46%)	7/13 (53%)	0,713
	Nein	17/30 (56%)	10/17 (58%)	7/10 (42%)	
Handwerker	Ja	11/30 (37%)	4/11 (36%)	7/11 (63%)	0,417
	Nein	19/30 (63%)	12/19 (63%)	7/19 (36%)	
Raucher	Ja	9/30 (30%)	4/9 (45%)	5/9 (55%)	0,694
	Nein	21/30 (70%)	12/21 (57%)	9/21 (42%)	
Dauermedikation	Ja	9/30 (30%)	4/9 (44%)	5/9 (55%)	0,694
	Nein	21/30 (70%)	12/21 (57%)	9/21 (42%)	
Händigkeit	Rechts	29/30 (97%)	15/29 (51%)	14/29 (48%)	1,000
	Links	1/30 (3%)	1/1 (100%)	0/0 (0%)	

Tabelle 4: Demographische Daten der Studienpopulation Gesamt und pro Gruppe - Angabe in Median und (IQR)

	Gesamt (n=30)	Interventions gruppe (n=16)	Kontrollgruppe (n=14)	p-Wert
Alter (y)	40 ±24	40 ±27	40 ±28	0,929
BMI (kg/m^2)	23,95 ±5	23,84 ±6	24,36 ±5	0,286

Bezüglich der Patienten-Charakteristika zeigte sich eine homogene Verteilung zwischen den Gruppen.

Lokalisation der Nervenkoaptation

Tabelle 5: Lokalisation der Nervenkoaptation

		Gesamt (n=30)	Fibrinkleber (n=16)	Naht (n=14)	p-Werte
Verletzte Hand	Rechts	12/30 (40%)	4/12 (33%)	8/12 (66%)	0,073
	Links	18/30 (60%)	12/18 (66%)	6/18(33%)	
Verletzungsmuster	Glatt begrenzt	25/30 (83%)	13/25 (52%)	12/25 (48%)	1,000
	Unscharf begrenzt	5/30 (17%)	3/5 (60%)	2/5 (40%)	
Verletzter Digitalnerv	DN1	4/30 (13%)	3/4 (75%)	1/4 (25%)	0,167
	DN2	7/30 (23%)	5/7 (71%)	2/7 (28%)	
	DN3	4/30 (13%)	1/4 (25%)	3/4 (75%)	
	DN5	4/30 (13%)	0/4 (0%)	4/4 (100%)	
	DN6	1/30 (3%)	1/1 (100%)	0/1 (0%)	
	DN7	1/30 (3%)	1/1 (100%)	0/1 (0%)	
	DN8	2/30 (6%)	2/2 (100%)	0/2 (0%)	
	DN9	2/30 (6%)	1/2 (50%)	1/2 (50%)	
	DN10	5/30 (16%)	2/5 (40%)	3/5 (60%)	
Verletzungshöhe	Grundglied	20/30 (66%)	12/20 (60%)	8/20 (40%)	0,442
	Mittelglied	10/30 (33%)	4/10 (40%)	6/10 (60%)	
	Endglied	0/0 (0%)	0/0 (0%)	0/0 (0%)	
Weitere Verletzungen	Keine	9/30 (30%)	5/9 (55%)	4/9 (44%)	1,000
	Arterie	16/30 (53%)	8/16 (50%)	8/16 (50%)	
	Beugesehnen	13/30 (43%)	8/13 (61%)	5/13 (38%)	
	Knochen	1/30 (3%)	1/1 (100%)	0/1 (0%)	
	Strecksehne	0/30 (0%)	0/0 (0%)	0/0 (0%)	

Die verletzte Hand war in beiden Gruppen überwiegend links. Der häufigste verletzte Digitalnerv in der Gesamtpopulation war DN2, allerdings war der häufigste verletzte Digitalnerv in der Kontrollgruppe DN5. Das Grundglied war die häufigste Verletzungshöhe und die häufigste Begleitverletzung war die Durchtrennung der Begleitarterie in beiden Gruppen.

In der Verteilung der Begleitverletzungen gab es keinen signifikanten Unterschied innerhalb der Gruppen.

Intraoperative erhobene Daten

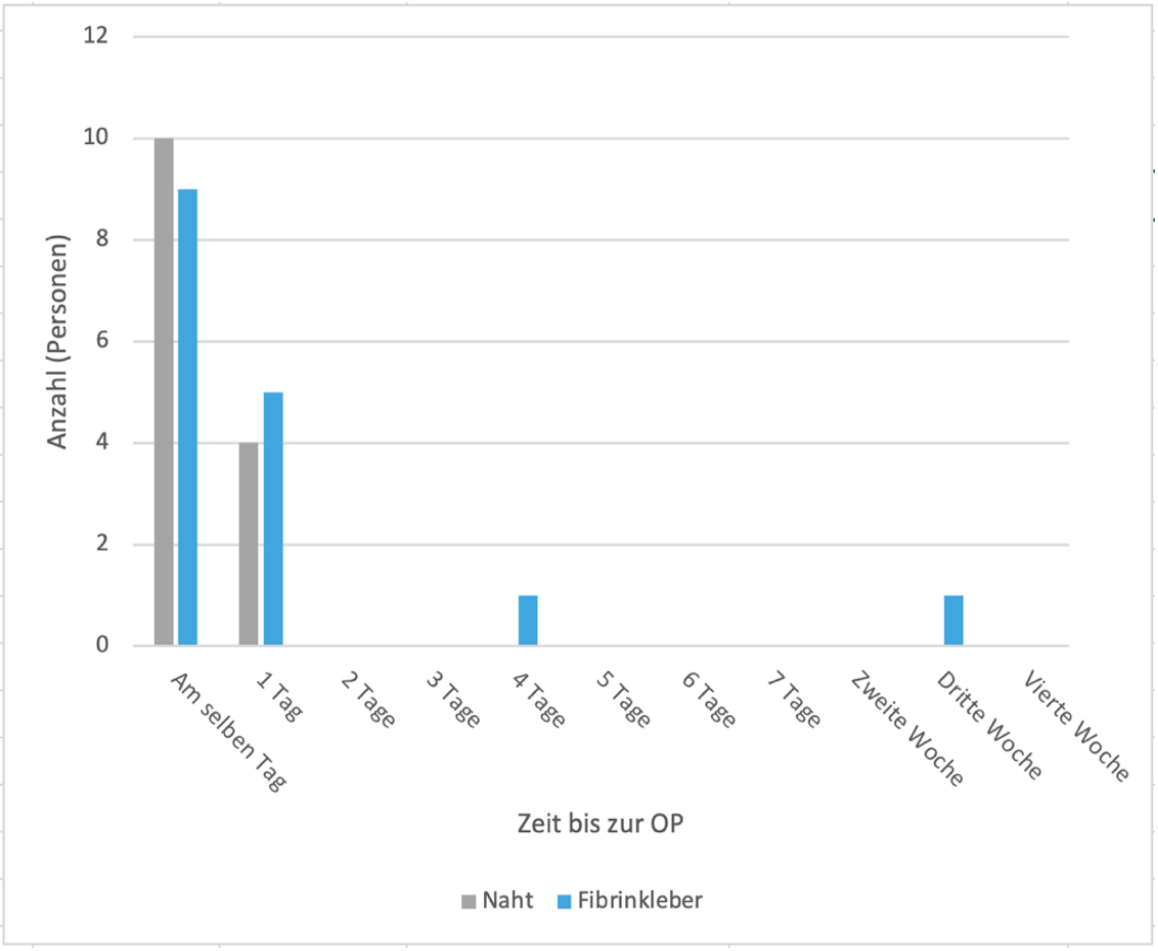

Abbildung 20: Zeit bis zur Operation in Tagen - Kontrollgruppe (grau) Interventionsgruppe (blau)

Die Operationen wurden im Durchschnitt noch am Tag des Unfalls durchgeführt (minimale Zeitspanne: 0 d, maximale Zeitspanne: 18d).

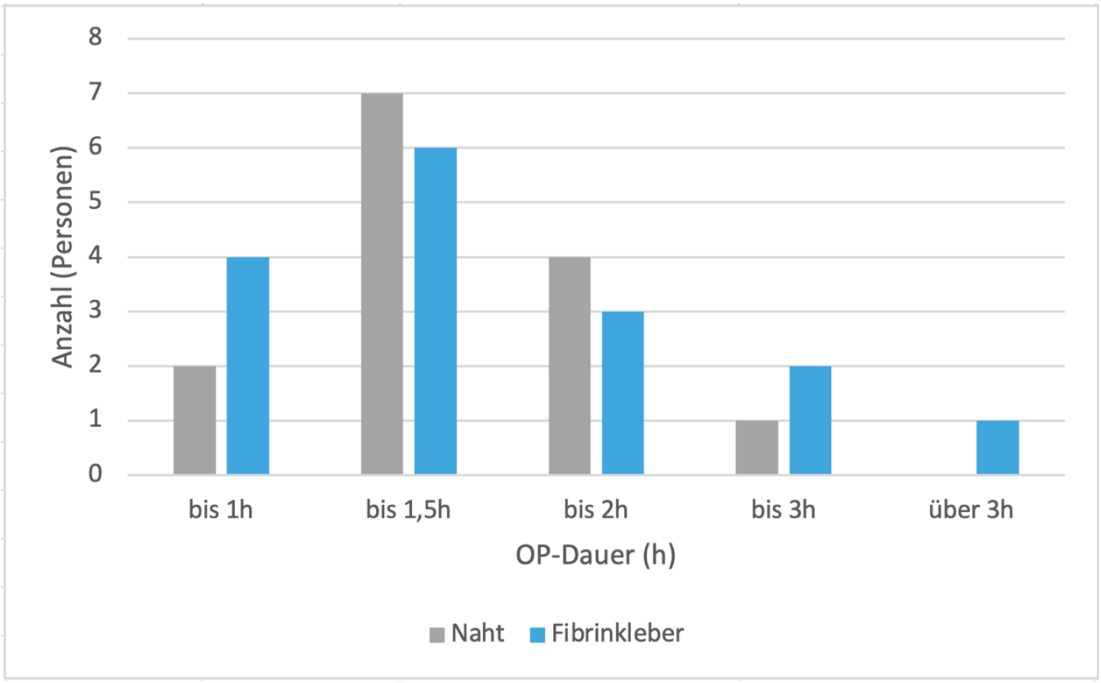

Abbildung 21: Operationsdauer in Stunden (h)

Die durchschnittliche Operationsdauer lag bei 84 ± 40 Minuten mit einer Spanne von 46 Minuten bis zu maximal 417 Minuten.

In der Interventionsgruppe waren es 84 ± 56 Minuten. In der Kontrollgruppe waren es 82 ± 30 Minuten. Es gab zwischen den Gruppen keine signifikanten Unterschiede (Mann-Whitney-U Test p = > 0,001).

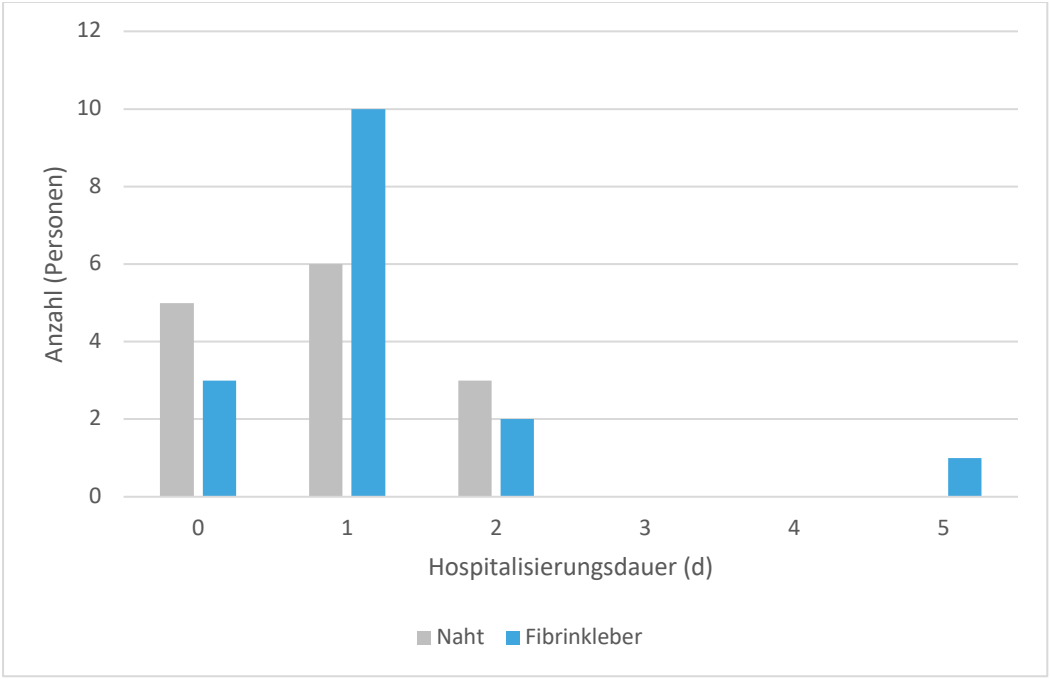

Abbildung 22: Hospitalisierungsdauer in Tagen (d)

Die durchschnittliche Hospitalisierungsdauer betrug einen Tag (Spanne: 0 bis 5 Tage). Ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen der Interventions- und der Kontrollgruppe konnte nicht festgestellt werden.

5.2 Auswertung der standardisierten Fragebögen

5.2.1 SMHQ

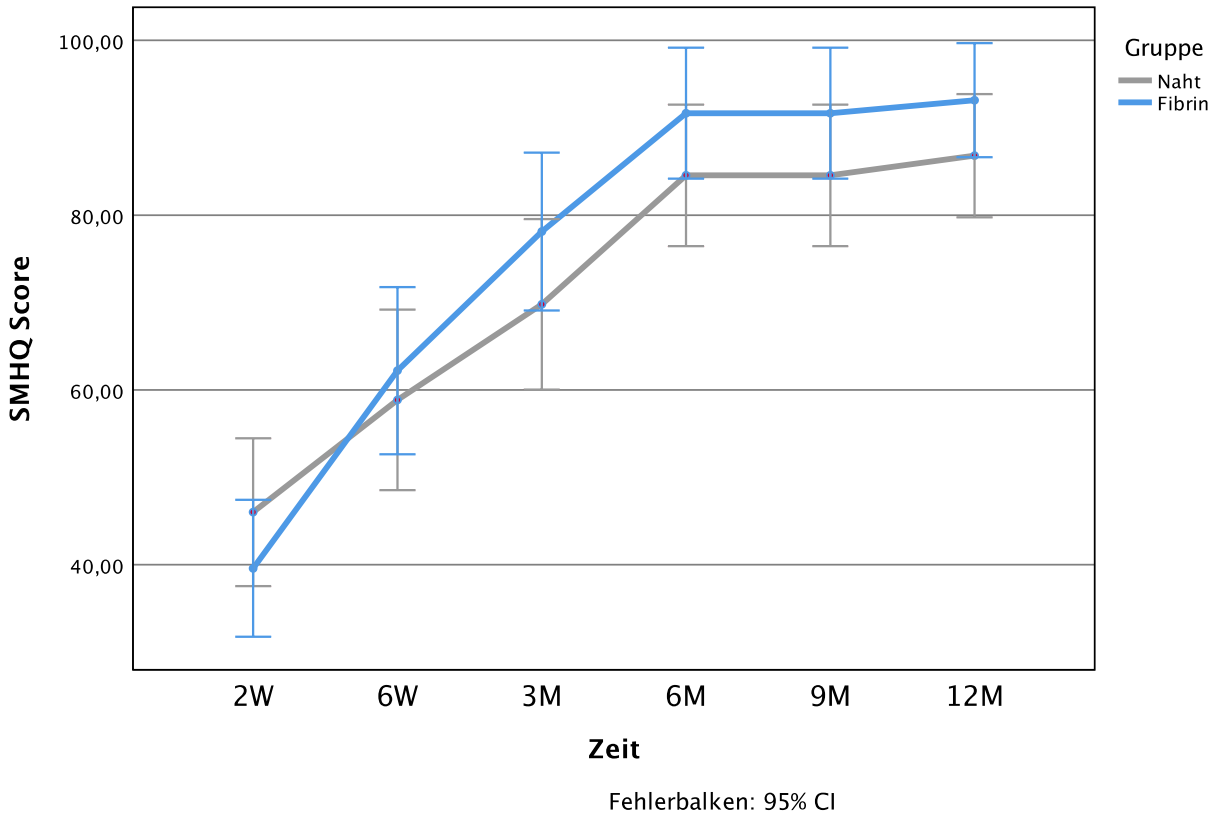

Abbildung 23: Konfidenzintervalle der SMHQ Scores in Abhängigkeit der Gruppen

Der Test der Innersubjekteffekte zeigte keinen signifikanten Unterschied zwischen der Naht- und der Fibringruppe ($p = 0{,}133$). Bei der Berechnung des Mann-Whitney-U-Test gab es ebenfalls kein signifikantes Ergebnis (W2 $p= 0{,}313$; W6 $p= 0{,}847$; M3 $p= 0{,}821$; M6 $p= 0{,}423$; M9 $p= 0{,}423$; M12 $p= 0{,}398$).

Unabhängig vom gewählten Operationsverfahren zeigte sich jedoch in Abhängigkeit der Zeit eine Verbesserung des SMHQ-Scores im Heilungsverlauf. Diese individuelle Verbesserung war über die Messzeitpunkte 2W, 6W und 3M signifikant ausgeprägt ($p < 0{,}001$), während die Werte ab dem Zeitpunkt 6M stagnierten.

Die Normalverteilung der Residuen der Messzeitpunkte wurde visuell überprüft.

5.2.2 PSFS

Tabelle 6: Gesamtscore PSFS nach 6W, 3M, 6M, 9M, 12M

		Gesamt (n=28)	Fibrinkleber (n=15)	Naht (n=13)	p-Werte
PSFS (6W)	Median (IQR)	12(10)	12(9)	12(13)	1,000
	Min-Max	0-30	3-30	0-27	
PSFS (3M)	Median (IQR)	23(7)	23(4)	24(8)	0,892
	Min-Max	9-30	12-30	9-30	
PSFS (6M)	Median (IQR)	29(5)	28(3)	29(7)	1,000
	Min-Max	11-30	18-30	11-30	
PSFS (9M)	Median (IQR)	29(3)	29(3)	29(6)	0,948
	Min-Max	16-30	23-30	16-30	
PSFS (12M)	Median (IQR)	30(2)	30(1)	30(3)	0,589
	Min-Max	18-30	24-30	18-30	

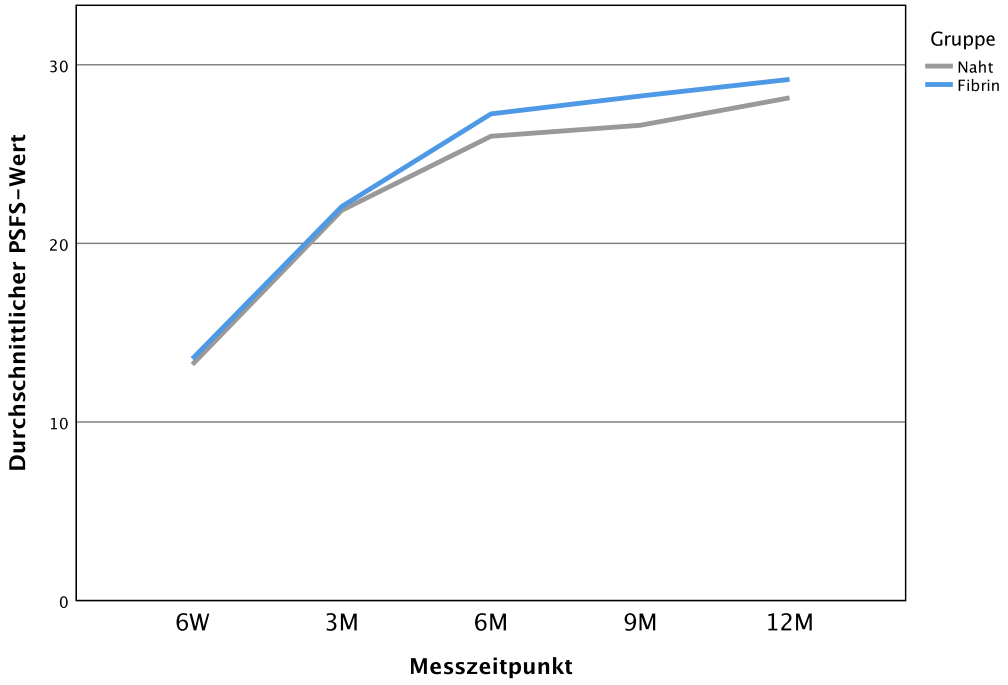

Abbildung 24: PSFS zu den verschiedenen Nachuntersuchungszeitpunkten in Abhängigkeit der Gruppen

Insgesamt erreichten die Studienteilnehmer im Mittel die Maximalpunktzahl von 30 nach 318,05 Tagen (±7,54). In der Naht-Gruppe erreichten die Teilnehmer im Mittel die

Gesamtpunktzahl nach 321,20 Tagen (±10,62). Die Teilnehmer der Fibringruppe erreichten den maximalen Score bereits nach 315,29 Tagen (±10,85).
Im Log-Rank-Test gab es keinen signifikanten Unterschied der Zeitspanne bis zum Erreichen des Maximalscores zwischen Kontroll- und Interventionsgruppe (p=0,569).

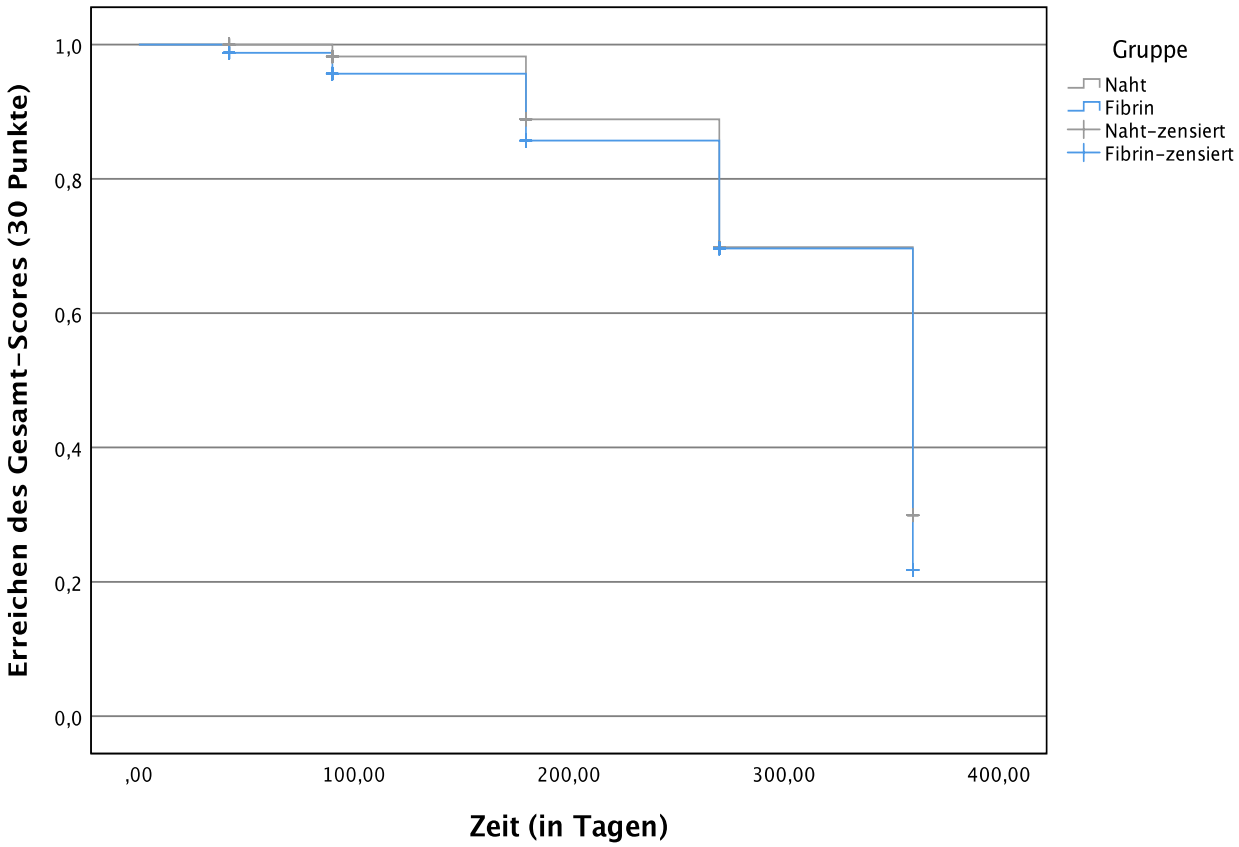

Abbildung 25: Kaplan-Meier-Kurve. Darstellung des Erreichens des Gesamt-Scores (30Pkt.) im Nachuntersuchungszeitraum in Abhängigkeit beider Gruppen.

5.3 Auswertung der Nachuntersuchungen

5.3.1 s2PD und d2PD

s2PD

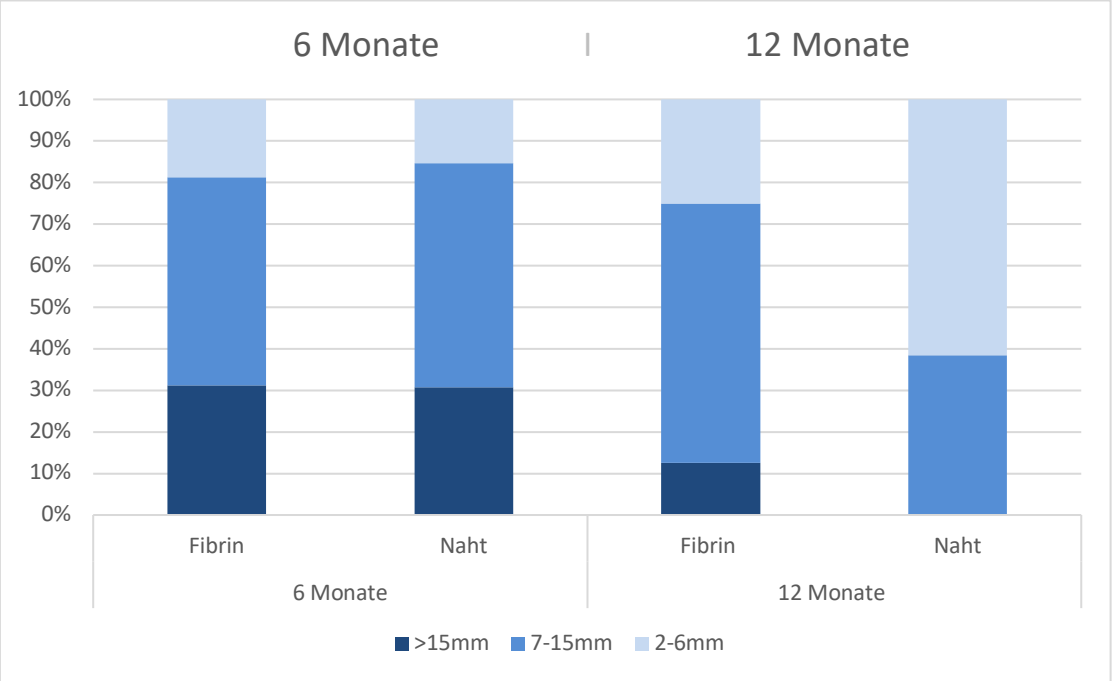

Abbildung 26: Statische Zweipunktdiskrimination im Zweiten Halbjahr

Der Kruskal-Wallis-Test zeigte keinen Einfluss der Rekonstruktionsart auf die Ergebnisse der s2PD nach 6M (p=0,196) und 9M (p=0,286).

Jedoch war das Ergebnis der s2PD bei 12M in der Kontrollgruppe signifikant besser als in der Interventionsgruppe (p=0,034).

Ein gruppenunabhängiger Post-hoc-Test zeigte eine signifikante Verbesserung innerhalb des zweiten Halbjahres zwischen 6M und 12M, jedoch nicht zwischen aufeinanderfolgenden Terminen.

d2PD

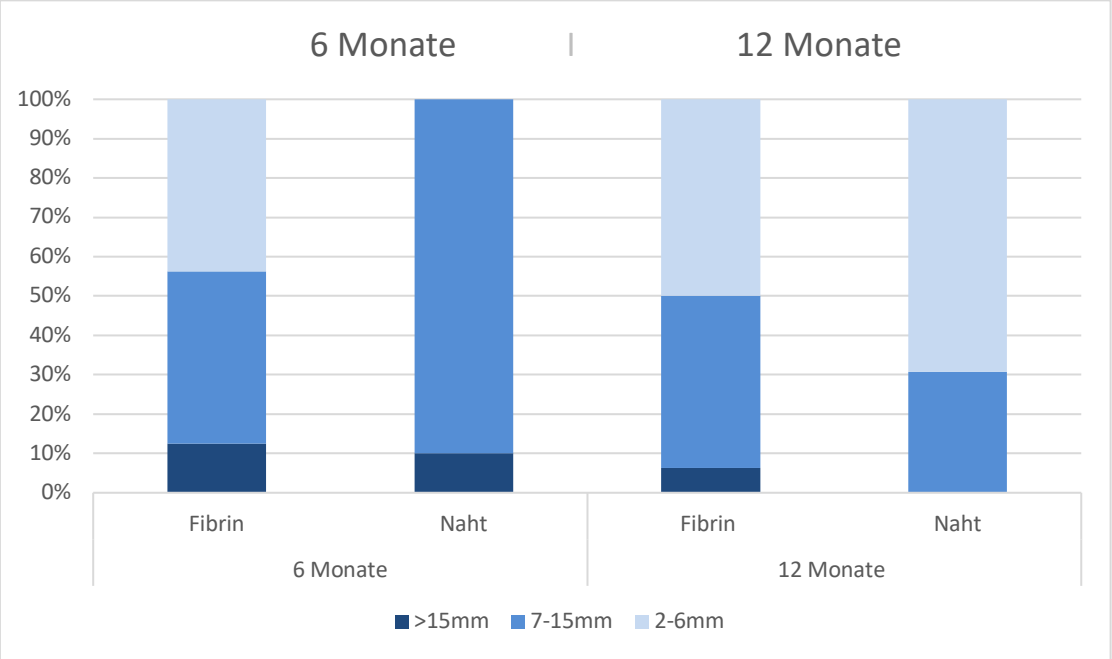

Abbildung 27: Dynamische Zweipunktdiskrimination im zweiten Halbjahr

Ein durchgeführter Kruskal-Wallis-Test zeigte keinen Einfluss der Rekonstruktionsart auf die Ergebnisse der d2PD nach 6M (p=0,072), 9M (p=0,690) und 12M (p=0,264).
Post-hoc-Tests zeigten eine signifikante Verbesserung innerhalb des zweiten Halbjahres zwischen 6M und 12M, jedoch nicht zwischen aufeinanderfolgenden Terminen.

5.3.2 Ten-Test

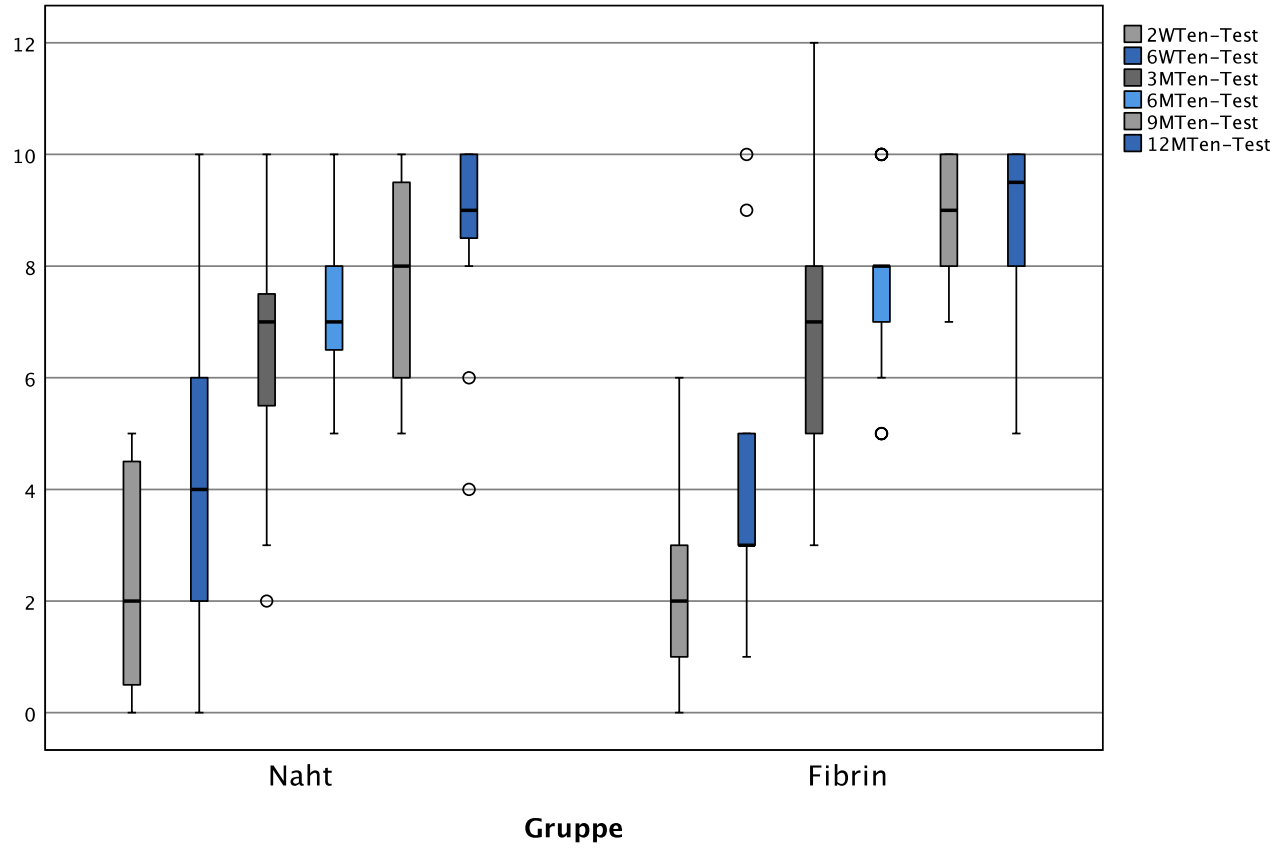

Abbildung 28: Boxplots des Ten-Test zu den verschiedenen Messzeitpunkten in Abhängigkeit der Gruppen

Die Messergebnisse der Ten-Tests im Vergleich der beiden Gruppen zu den jeweiligen Messzeitpunkten unterschieden sich nach dem Mann-Whitney-U-Test nicht signifikant.

Tabelle 7: P-Werte und Cohens R der Messergebnisse des Ten-Test zu den jeweiligen Zeitpunkten

Messzeitpunkte	p-Werte	Cohens R
2W	0,886	-0,03
6W	0,715	-0,07
3M	0,786	-0,05
6M	0,779	-0,05
9M	0,351	-0,18
12M	0,650	-0,09

5.3.3 Sp/St-Diskrimination

Eine Spitz-Stumpf-Diskrimination war zum W2 Termin mit 5/30 Patienten (16%) möglich. Diese verteilten sich auf die Interventionsgruppe mit 3/5 und die Kontrollgruppe 2/5.
Zum M6 waren es bereits 28/29 (96%). Diese verteilten sich auf die Fibringruppe mit 13/28 (46%) und auf die Naht-Gruppe mit 15/28 (53%). Ein Patient in der Fibringruppe hatte zum M12 keine Zweipunktdiskrimination. Dies blieb zum M12 unverändert.
Der Exakte Test nach Fisher in Abhängigkeit der Gruppen war nicht signifikant (W2 (p=1,000) n=30; M6 (p=0,645) n=29; M12 (p=1,000) n=29).

5.3.4 Temperaturempfinden

Zum W2 Termin hatten 7/30 (23%) Patienten ein Temperaturempfinden. Diese verteilten sich auf 3/11 in der Nahtgruppe und 4/16 in der Fibringruppe. Im M6 Termin hatten 24/29 (82%) Patienten ein Temperaturempfinden, diese verteilten sich auf 12/13 in der Nahtgruppe und 12/16 in der Fibringruppe. Zum M12 waren es Gesamt weiterhin 24/29, die sich auf 11/13 in der Nahtgruppe und 13/16 in der Fibringruppe verteilten. Der Exakte Test nach Fischer (W2) p=1,000 n=30 – (M6) p=0,343 n=29 – (M12) p=1,000 n=29 zeigte keine Signifikanz an.

5.3.5 Ultraschalluntersuchung

Bei allen zum M12 mit Sonographie nachuntersuchten Patienten (11/30) konnte zum M12 Termin ein durchgängiger Nerv im Ultraschallbild festgestellt werden (11/11, 100%).
In der Kontrollgruppe waren 6/11 und in der Interventionsgruppe 5/11.

5.3.6 Subjektiver Fortschritt M12 Evaluation

Die besten Fortschritte wurden von den meisten Patienten in beiden Gruppen während der ersten 3 Monate wahrgenommen (14/28 Patienten (50%)). Darauf folgt der Zeitraum M3-M6 mit 10/28 (35%) Patienten. Zwischen M6-M9 nahmen 3/28 (10%) Patienten die meiste Verbesserung wahr und lediglich ein Patient (1/28, 3%) nahm dies für den Zeitraum M9-M12. Es gab keinen signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen.

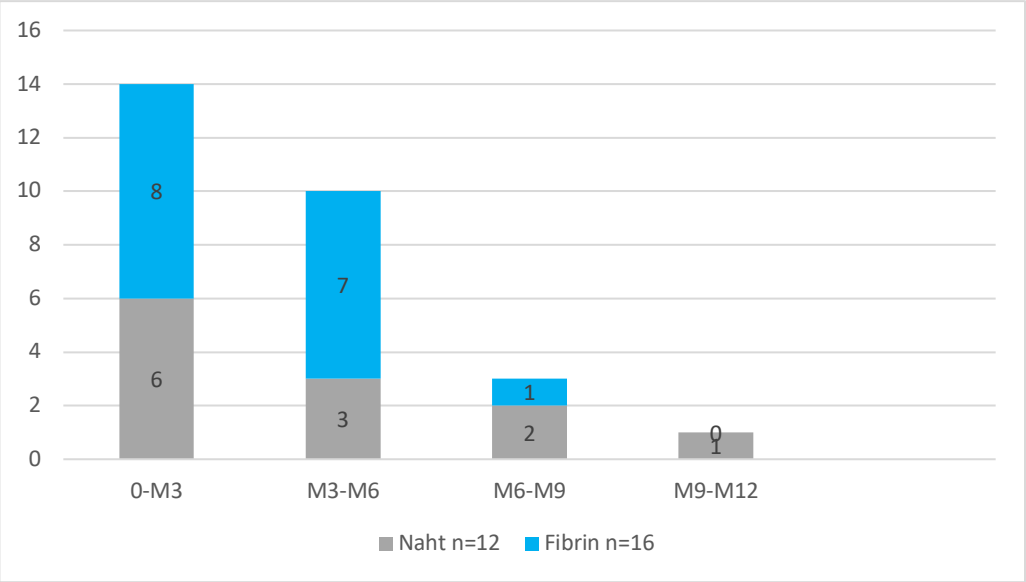

Abbildung 29: Zeitpunkt des größten subjektiven Fortschritts

5.3.7 3D-Fotogrammetrie

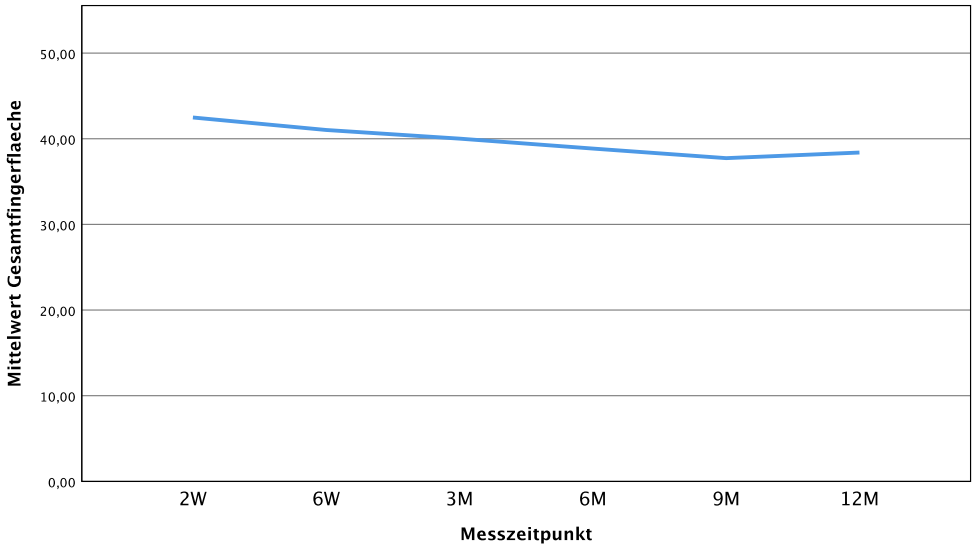

Abbildung 30: Mittelwert der Gesamtfingerfläche im Verlauf

Die Abbildung 30 zeigt, dass die Gesamtfingerfläche im Nachuntersuchungszeitraum leicht zu sinken scheint bis M9. Dies wäre durch postoperative auftretende Schwellung, sowie Schwellung aufgrund motorischer Einschränkungen zu erklären. Zudem kann es auch zu Atrophien im Heilungsverlauf kommen (48).

Um eine Verzerrung solcher Einflüsse möglichst auszuschließen, wurden sowohl die relative asensible Fläche (RAA) als auch die absolute asensible Fläche (AAA) aus den Messwerten berechnet. Die RAA stellt die asensible Fläche in Relation zu einer über alle Messzeitpunkte

gemittelten Gesamtfläche des verletzten Fingers dar, während die AAA die asensible Fläche im Verhältnis zur am jeweiligen Messzeitpunkt erfassten Fingergesamtfläche angibt.

Für die RAA wurde die Normalverteilung der Residuen visuell geprüft. Der Levene-Test auf Gleichheit der Fehlervarianzen war zu allen Messzeitpunkten bis auf den M12 nicht signifikant (2W p=0,111; 6W p=0,589; 3M p=0,416; 6M p=0,849; 9M p=0,210; 12M p=0,023). Der Box-Test auf Gleichheit der Kovarianz-Matrizen war signifikant (p=0,001). Der Mauchly-Test auf Sphärizität war signifikant (p=0,002).
Im Test der Innersubjekteffekte war die Veränderung der RAA der Gruppen im Verlauf der Nachuntersuchung nicht signifikant (p=0,741, $\eta^2 = 0,019$).

Ebenso wurde für die AAA verfahren. Die Normalverteilung der Residuen wurde visuell geprüft. Der Levene-Test auf Gleichheit der Fehlervarianzen war zu allen Messzeitpunkten bis auf den M12 nicht signifikant (2W p=0,072; 6W p=0,556; 3M p=0,375; 6M p=0,930; 9M p=0,164; 12M p=0,026). Der Box-Test auf Gleichheit der Kovarianz-Matrizen war signifikant (p=0,001). Der Mauchly-Test auf Sphärizität war signifikant (p=0,001), deshalb wurden bei der Mixed Anova die Greenhouse-Geisser p-Werte betrachtet.
Im Test der Innersubjekteffekte war die Veränderung der RAA der Gruppen im Verlauf der Nachuntersuchung nicht signifikant (p=0,716, $\eta^2 = 0,020$).
Wie in den Abbildungen 33 und 34 dargestellt, verlaufen die Kurven beider Gruppen über die Zeit hinweg weitgehend parallel, was auf vergleichbare zeitliche Veränderungen ohne differenzielle Dynamik zwischen den Gruppen hindeutet.

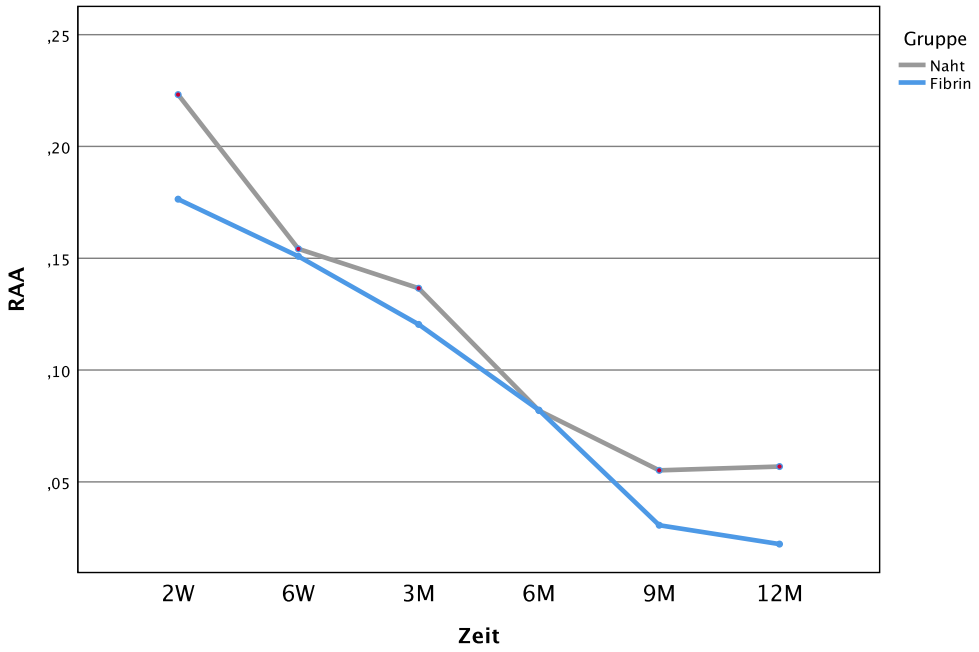

Abbildung 31: RAA an den verschiedenen Messzeitpunkten in Abhängigkeit der Gruppen

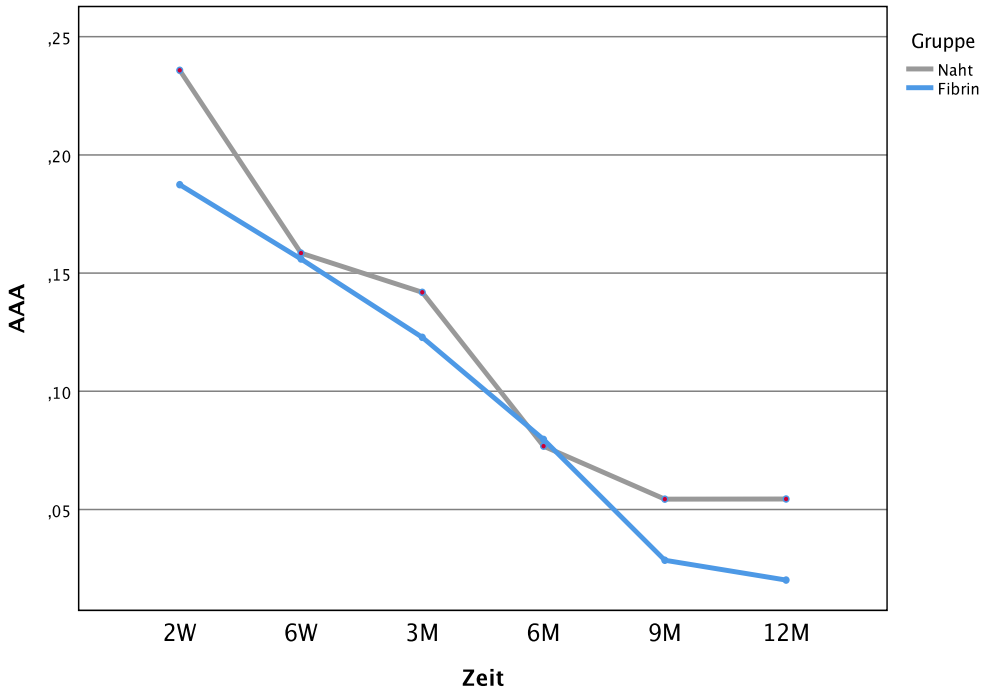

Abbildung 32: AAA an den verschiedenen Messzeitpunkten in Abhängigkeit der Gruppen

5.3.8 Korrelation der 3D-Fotogrammetrie zu etablierten Nachuntersuchungsverfahren

Für die Analyse der Korrelation durch die Spearman-Rangkorrelation (Spearman´s Rho) wurde der Nachuntersuchungszeitpunkt 6 Wochen postoperativ betrachtet (s. Anhang 6). Hier korrelierte der AAA-Change_6W_3M mit dem 6W SMHQ Score (R= 0,494; p=0,014). Ebenso korrelierte der RAA-Change_6W_3M mit dem 6W Ten-Test (R= 0,544; p= 0,03). Ebenso korrelierte die 6 W RAA mit dem SMHQ (R= 0,433, p=0,034). Mit dem PSFS 6W korrelierte kein Parameter der 3D-Fotogrammetrie, allerdings korrelierte der 6W-PSFS mit dem SMHQ (R= 0,700; p=<0,001).

5.3.9 Arbeitsunfähigkeit

Tabelle 8: Dauer der Arbeitsunfähigkeit

		Gesamt (n=28)	**Fibrinkleber (n=15)**	**Naht (n=13)**	**p**
Arbeits-unfähigkeit (d)	Median ±IQR	48,68±85,5	36,25±36	65,25±107	0,069
	Min-Max	0 - 180	0 - 180	0 - 180	

5.3.10 Komplikationen

Hyperästhesie

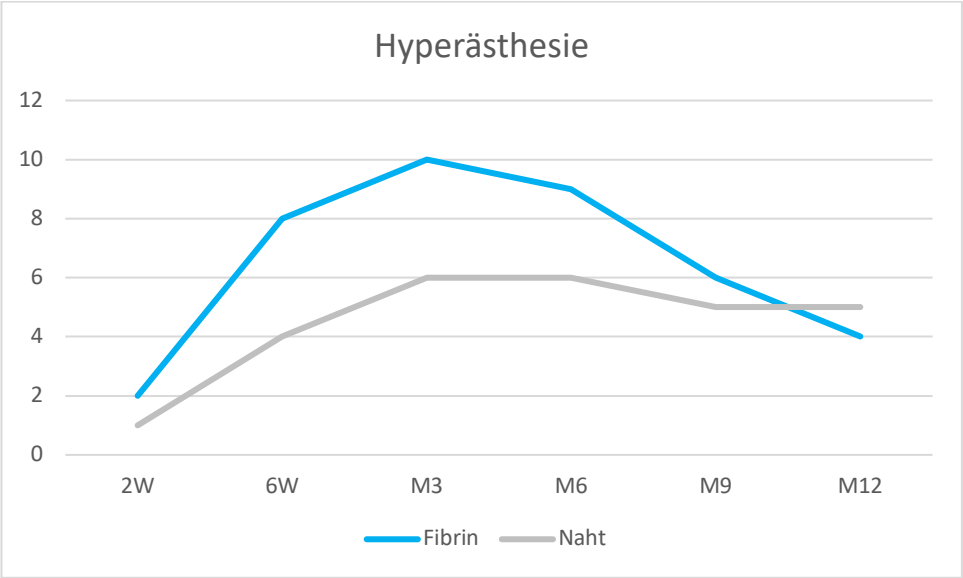

Abbildung 33: Absolute Anzahl der Hyperästhesien in Abhängigkeit der Gruppe im Nachuntersuchungszeitraum

Insgesamt fielen 16/29 Patienten im Verlauf der Nachuntersuchung mit Hyperästhesie Beschwerden auf. Am M3 Termin (16/29) und am M6 Termin (15/29) gipfelte die Häufigkeit. Zum M12 wiesen noch 9/29 Patienten eine Hyperästhesie auf.

Kälteintoleranz

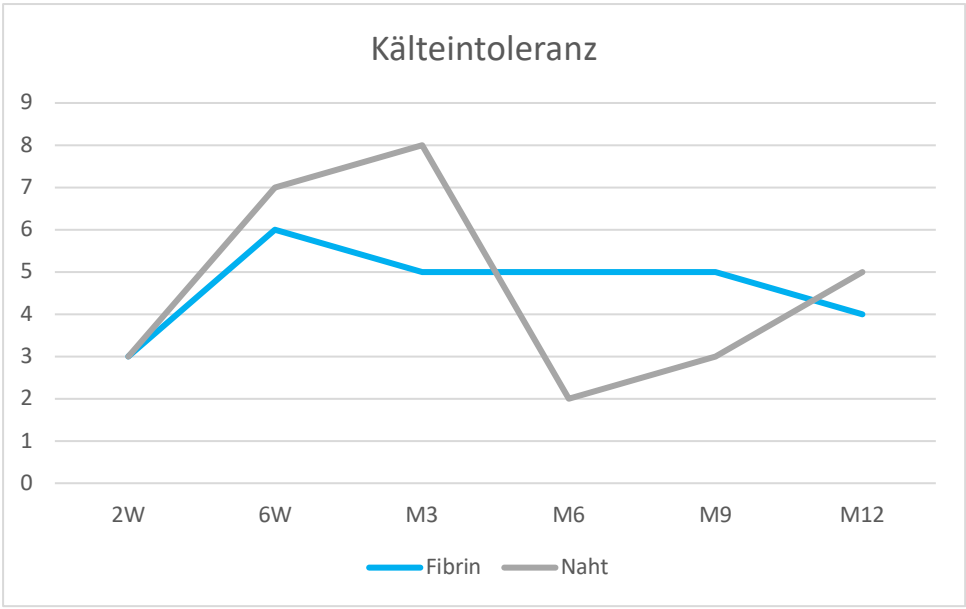

Abbildung 34: Darstellung der absoluten Anzahl der Kälteintoleranzen in Abhängigkeit der Gruppen im Nachuntersuchungszeitraum

Insgesamt trat bei 13/29 Patienten eine Kälteintoleranz auf. Die meisten Patienten (13/29) fielen mit Kälteintoleranz im W6 und M3 Nachuntersuchungstermin auf. Zum M12 Termin hatten noch 9/29 Patienten eine Kälteintoleranz.

Neuropathische Schmerzen

Im Verlauf hatten insgesamt zwei Patienten neuropathische Schmerzen. Bei beiden Patienten waren diese bis zum M12 komplett rückläufig.

Infektion und CRPS

Es trat bei keinem Patienten ein CRPS oder eine Infektion im Heilungsverlauf auf.

Wundheilungsstörungen

Bei zwei Patienten traten im ersten Nachuntersuchungstermin W2 Wundheilungsstörungen auf. Je ein Patient in der Kontroll- und in der Interventionsgruppe. Beide waren bereits zum nächsten Termin W6 reversibel.

5.3.11 Endgliedatrophie

Bei insgesamt 6 Patienten, die zum Teil auch aus der Studie ausgeschlossen wurden, fiel eine Verschmälerung des Endglieds im Verlauf auf. 5/6 Patienten wiesen Begleitverletzungen auf, wobei 4/5 Patienten eine Durchtrennung der Begleitarterie erlitten hatten.

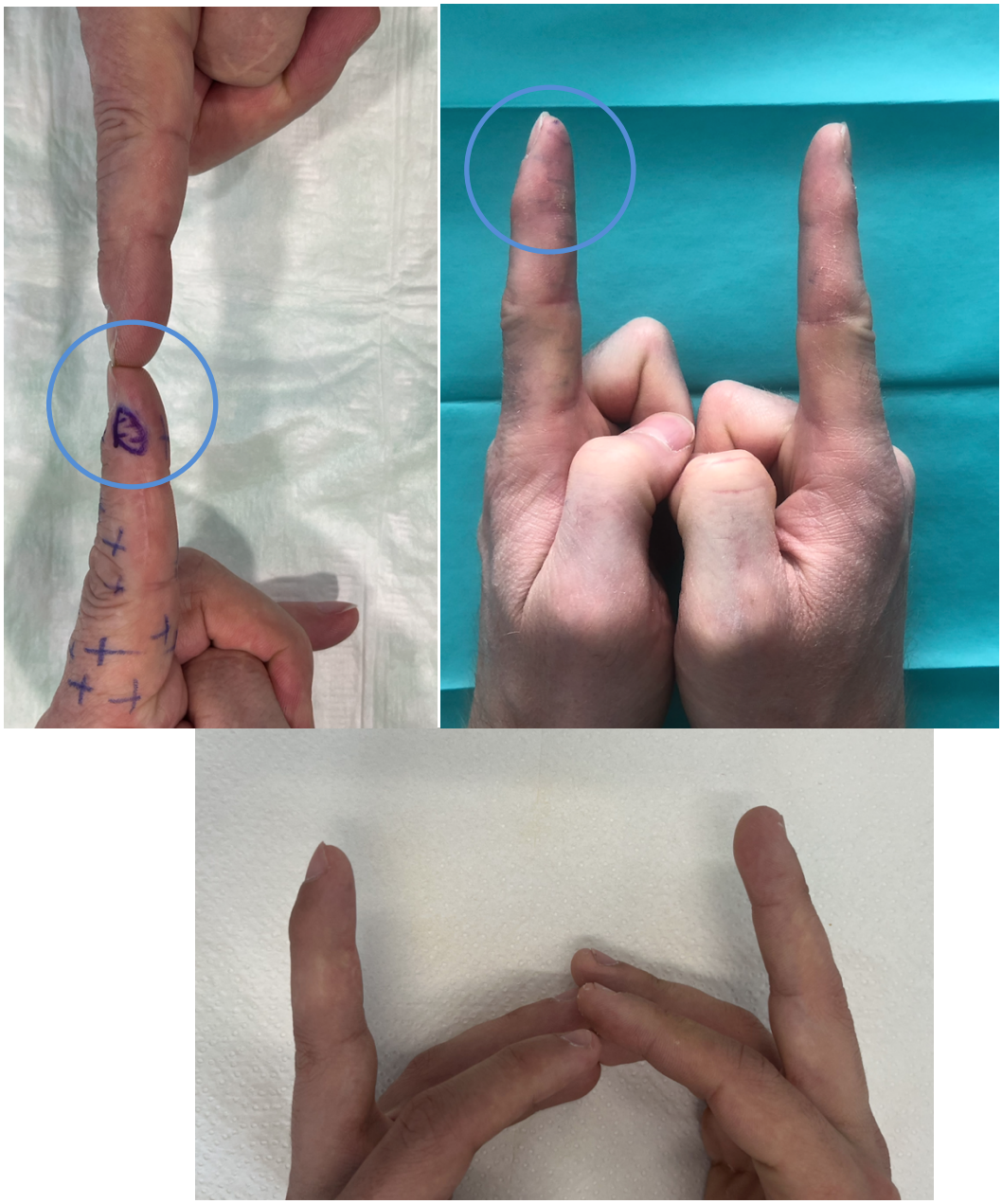

Abbildung 35: Endgliedatrophie

6 Diskussion

6.1 Studiendesign und Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit war, die Wirksamkeit der Fibrinklebung im Vergleich zur mikrochirurgischen Naht in einer klinischen Studie zu bewerten (31).

Bereits frühere Arbeiten hoben die klinischen Vorteile der Fibrinklebung zur Nervenrekonstruktion hervor. So zeigte eine Studie aus dem Jahr 1995, dass die Rekonstruktion peripherer Nerven mit dem Fibrinkleber Tissucol technisch einfacher war und signifikant weniger Zeit benötigte als die Naht (27). Whitlock schlussfolgerte 2010, dass insbesondere in Nerven mit kleinerem Diameter und Verletzungen mit schwierigem Zugang bessere Ergebnisse erzielt werden können als mit der mikrochirurgischen Naht (49). Insgesamt kamen die meisten Studien zu dem Schluss, dass Fibrinkleber der Mikronaht bei der Reparatur peripherer Nerven gleichwertig oder sogar überlegen ist. Allerdings handelt es sich bei der Mehrzahl dieser Arbeiten um Tiermodellstudien, und bislang fehlte eine prospektive kontrollierte Humanstudie zum direkten Vergleich beider Verfahren (30) (31).

6.2 Studienpopulation und Vergleichbarkeit der Gruppen

Die Studienpopulation beinhaltete 36,6 % Frauen, wobei dieser Anteil über den verfügbaren Zahlen des statistischen Bundesamtes lag. Demnach wurden im Jahr 2022 26,2 % der epineuralen Nervennähte (OPS-Code 5-044) bei Frauen durchgeführt (50). Die Geschlechterverteilung in beiden Gruppen wies keine signifikanten Unterschiede auf (p= 0,919).

Das Alter war normalverteilt und in den Gruppen nicht signifikant unterschiedlich. Dies ist elementar, da das Alter einen großen Einfluss auf die Regeneration von Nervengewebe hat und eine ungleiche Altersverteilung in den beiden Gruppen einen Vergleich der Operationsverfahren verzerren könnte (51) (52) (53) (54).

Ein möglicher Einfluss von Rauchen auf die Nervenregeneration ist bei derzeitiger Studienlage nicht vollständig geklärt (35) (54) (55) (54). In der Studienpopulation waren neun Raucher, die sich annähernd gleich auf die beiden Gruppen mit 4/9 und 5/9 verteilten. Auch die Pack Years waren im Bezug auf die Gruppen nicht signifikant unterschiedlich (p = 0,608), sodass auch bei einem möglichen Einfluss des Rauchverhaltens beide Gruppen vergleichbare Voraussetzungen vorwiesen.

Die Anzahl der Studienteilnehmer, die Dauermedikamente einnehmen, lag bei 9/30 und verteilte sich annähernd gleich (44 %, 55 %) auf beide Gruppen. Es gab hierbei keinen signifikanten Unterschied in beiden Gruppen. Eine Vorerkrankung, welche die Nervenregeneration einschränken könnte, wie z. B. Diabetes mellitus, führte zum Ausschluss aus der Studie (56). Andere Dauermedikationen wurden toleriert.

6.3 Operative Parameter und perioperativer Verlauf

Die Operationsdauer war im Vergleich beider Rekonstruktionsmethoden nicht signifikant unterschiedlich. Vorangegangene Studien hatten die Fibrinklebung als schnelleres Verfahren identifiziert (27). So erwies sich die periphere Nervenrekonstruktion bei einer Tierversuchsstudie mit dem Fibrinkleber Tissucol als technisch einfacher und erforderte erheblich weniger Zeit als die epineurale Naht (57). Die Fibrinklebung erfordert vor der Anwendung ein Auftauen des Wirkstoffes, was wiederum mehrere Minuten beansprucht, zudem könnten Unterschiede bei den Begleitverletzungen eine mögliche Zeiteinsparung bei der Fibrinklebung verzerrt haben.

Die Hospitalisierungsdauer betrug im Durchschnitt einen Tag, das Maximum in der Studie waren fünf Tage. In einer Studie des Trauma Zentrums Ludwigshafen lag die durchschnittliche Hospitalisierungsdauer bei sieben Tagen (5). Wobei in dieser Studie nicht nur Digitalnervendurchtrennungen, sondern auch proximalere periphere Nervenverletzungen eingeschlossen waren, sodass die kürzere Hospitalisierungsdauer in dieser Studie im Vergleich verhältnismäßig erscheint.

Die operative Versorgung fand im Durchschnitt noch am Tag des Unfalls statt (minimale Zeitspanne: 0 Tage, maximale Zeitspanne: 18 Tage) und war in den Gruppen nicht signifikant unterschiedlich. 64 % der Patienten wurden noch am Unfalltag operiert, 30 % am Folgetag. Diese Zeitspannen sind vergleichbar mit einer durchgeführten retrospektiven Studie aus einem handchirurgischen Zentrum in Malmö, in der 53 % der Patienten am Unfalltag und 35 % am Folgetag des Unfalls operativ versorgt wurden (58). Neben dem Alter beschreibt die Literatur die Zeit bis zur operativen Versorgung als einen der wichtigsten Prädiktoren für das Outcome nach Nervenrekonstruktion (51) (59). Die S3-Leitlinie zu peripheren Nervenverletzungen gibt an, dass eine benötigte operative Versorgung so schnell wie möglich, allerdings innerhalb von sechs Monaten stattfinden sollte (60).

6.4 Patientenberichtete Endpunkte

Der SMHQ ist ein valides Messinstrument für das Outcome von Handverletzungen (40) (42) (43). In der Studie traten bei einigen Patienten Schwierigkeiten auf, die Fragestellungen, die die gesamte Hand betrafen, auf ihre spezifische Digitalnervenverletzung zu übertragen. Diese Beobachtung wird auch durch eine Studie von Horng et al von 2010 gestützt, deren Aussage ist, dass der Michigan Hand Questionnaire zwar sehr valide ist, aber bei spezifischen Handverletzungen durch psychologische Faktoren beeinflusst werden kann (61). Durch die Unterstützung des Doktoranden oder in Rücksprache mit dem Studienarzt konnten die Fragebögen jedoch zufriedenstellend bearbeitet werden. Bei zukünftigen Studien könnte die Etablierung eines für Digitalverletzungen spezifischen Fragebogens in Betracht gezogen werden, wie zum Beispiel dem FIOS-Score (62).

Beim Test der paarweisen Vergleiche zeigte sich, dass die SMHQ-Ergebnisse der Messzeitpunkte 2W, 6W und 3M zu allen Testzeitpunkten signifikant waren. Die Testzeitpunkte 6M, 9M und 12M waren nur gegenüber den Messzeitpunkten bis 2W, 6W und 3M signifikant. Dies könnte daran liegen, dass ab 6M die Scores der SMHQs bereits so hoch waren, dass keine signifikanten Unterschiede mehr erzielt werden konnten (s. Anhang 5). Diese Annahme wird durch das Liniendiagramm der Abbildung 22 visuell untermauert. Zum anderen beschreibt auch die Studie von Shauver MJ & Chung KC, dass nach Intervention der meisten Handverletzungen eine Plateau des Michigan Hand Outcome Questionnaire im Heilungsverlauf eintritt (63).

Der PSFS ist gut geeignet, um Verbesserungen bei Patienten im individuellen Verlauf zu erkennen. Allerdings weist er, ähnlich wie andere patientenspezifische Messinstrumente, nur eine begrenzte Aussagekraft im Hinblick auf den Vergleich des Verlaufs zwischen verschiedenen Patienten auf (44). Dies resultiert aus der individuellen Festlegung von drei Aktivitäten beim 2W-Termin. Beim Vergleich der PSFS wurde der Mann-Whitney-U-Test durchgeführt, dieser wurde zu keinem Messzeitpunkt signifikant. Zur statistischen Auswertung der Zeit bis zum Erreichen der maximalen Punktzahl wurde die Kaplan-Meier-Analyse herangezogen. Die Umkodierung der Nachuntersuchungszeitpunkte in Tage ist mit einer gewissen Ungenauigkeit verbunden. Zwar erreichten die Studienteilnehmer der Fibringruppe durchschnittlich früher die Maximalpunktzahl, dieser Unterschied war jedoch nicht signifikant ($p = 0{,}569$).

Zusammenfassend lässt sich aus den Ergebnissen des SMHQ und des PSFS schließen, dass sich im untersuchten Nachuntersuchungszeitraum keine signifikanten Unterschiede im patientenberichteten Outcome zwischen der Naht- und der Fibringruppe nachweisen ließen. Beide Rekonstruktionsverfahren zeigten eine vergleichbare, zeitabhängige Verbesserung der funktionellen Ergebnisse, unabhängig von der gewählten Technik. Die Ergebnisse sprechen somit dafür, dass die Fibrinklebung hinsichtlich des subjektiv wahrgenommenen funktionellen Outcomes als gleichwertig zur Naht anzusehen ist. Gleichzeitig verdeutlichen die Befunde die Limitationen patientenberichteter Messinstrumente, insbesondere bei kleinen Stichproben, sowie die Notwendigkeit ergänzender objektiver Messverfahren zur umfassenden Beurteilung des Heilungsverlaufs.

6.5 Qualitative Sensibilitätsprüfungen

Die statische Zweipunktdiskrimination (s2PD) gilt trotz ihrer limitierten Reproduzierbarkeit als etabliertes klinisches Verfahren zur Beurteilung der sensiblen Diskriminationsfähigkeit (64) (65) (66). Ihr Wert liegt vor allem in der einfachen Durchführbarkeit ohne apparativen Aufwand, insbesondere in der Routinediagnostik peripherer Nervenverletzungen (67).

Gleichzeitig weist die 2PD jedoch methodisch relevante Limitationen auf, die ihre Aussagekraft, insbesondere im wissenschaftlichen Kontext, einschränken. Es handelt sich um ein subjektives Testverfahren mit dichotomer Antwortmöglichkeit („ein Punkt“ vs. „zwei Punkte“), wodurch für den Probanden eine Zufallswahrscheinlichkeit von 50 % besteht. Dadurch kann insbesondere bei grenzwertigen Abständen eine Überschätzung der tatsächlichen Diskriminationsfähigkeit erfolgen (68). Zudem ist das Verfahren untersucherabhängig (69) und wird durch Patientenkooperation, Konzentrationsfähigkeit sowie tagesabhängige Schwankungen beeinflusst (67).

Ein weiterer kritischer Aspekt ist der erhebliche Untersuchungsaufwand bei standardisierter Durchführung. Für eine valide Testung werden in der Regel mindestens zehn Einzelreize pro Abstandsgröße und pro untersuchtem Nerv empfohlen. Wird ein potenziell verletzter digitaler Nerv untersucht und zusätzlich ein Vergleich mit einem kontralateralen oder benachbarten intakten Nerv durchgeführt, ergeben sich bereits mindestens 20 Einzeltestungen pro Hand. Bei Verwendung mehrerer Abstandsvariationen steigt der Testumfang entsprechend an. Diese hohe Anzahl an Wiederholungen erhöht einerseits die Reliabilität (70), kann andererseits jedoch zu Ermüdungseffekten und damit zu einer

Verzerrung der Ergebnisse führen (71). Zudem ist der Zeitaufwand im klinischen Alltag nicht unerheblich (72).

Vor diesem Hintergrund ist die Sensitivität der s2PD zur Detektion kleiner Gruppenunterschiede in wissenschaftlichen Vergleichsstudien begrenzt (73). So argumentiert Rosén und Lundborg, dass ein einzelner Sensibilitätstest, wie die Zweipunktdiskrimination nicht ausreicht um das funktionelle Gesamtergebnis valide abzubilden und empfiehlt deshalb ein multimethodisches Asessment (72), wie sie auch in der vorliegenden Arbeit angewandt wurde.

Die vorliegenden Daten zeigten nach 6 und 9 Monaten kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Rekonstruktionsverfahren, was darauf hindeutet, dass die Fibrinklebung der Naht hinsichtlich der sensiblen Regeneration nicht unterlegen ist. Das signifikant schlechtere Abschneiden der Fibrinklebung nach 12 Monaten ($p = 0{,}034$) ist daher mit Vorsicht zu interpretieren. Angesichts der beschriebenen methodischen Limitationen des s2PD, der begrenzten Gruppengröße sowie der wiederholten Testung über mehrere Zeitpunkte mit entsprechend erhöhtem Alpha-Fehler-Risiko erscheint ein Zufallsbefund plausibel.

Aus diesem Grund wurde der s2PD in der vorliegenden Untersuchung durch ergänzende, objektivierbarere Messverfahren erweitert, um eine robustere Bewertung der sensiblen Regeneration zu ermöglichen.

Die dynamische Zweipunktdiskrimination (d2PD) zeigte insbesondere in frühen Nachuntersuchungszeitpunkten eine höhere Sensitivität für Veränderungen der sensiblen Regeneration, was mit bisherigen Befunden übereinstimmt (37) (74). Zu keinem Untersuchungszeitpunkt ließ sich jedoch ein signifikanter Gruppenunterschied nachweisen. Der gruppenunabhängige Post-hoc-Vergleich ergab eine signifikante Verbesserung zwischen 6 und 12 Monaten und spiegelt damit den bekannten zeitabhängigen Verlauf der sensiblen Erholung wider.

Auch der Ten-Test, der in der Literatur als reliabel und praktikabel beschrieben wird (33) (38) (39) (75), bestätigte diesen zeitabhängigen Regenerationsverlauf.

Die hochsignifikante Verbesserung im Zeitverlauf ($p < 0{,}001$) spricht für eine kontinuierliche funktionelle Erholung unabhängig von der Gruppenzugehörigkeit.

Auch die Spitz-Stumpf-Diskrimination sowie das Temperaturempfinden zeigten keine signifikanten Gruppenunterschiede (76).

Zusammenfassend sprechen die Ergebnisse für eine primär zeitabhängige sensorische Erholung, während ein gruppenspezifischer Effekt nicht nachgewiesen werden konnte. Das isolierte signifikante Ergebnis nach 12 Monaten ist unter Berücksichtigung der methodischen Limitationen des s2PD eher als statistischer Zufallsbefund denn als klinisch relevanter Unterschied zu werten.

6.6 Quantitative Sensibilitätsmessung mittels 3D-Fotogrammetrie

Viele der bisher etablierten Messverfahren weisen eine zentrale Limitation auf: Sie sind stark subjektiv geprägt. Entweder basieren sie auf Patientenfragebögen (SMHQ, PSFS), die die Selbstwahrnehmung des Patienten erfordern, oder auf Untersuchungen, bei denen das Patientenfeedback als Endpunkt dient (Ten-Test, 2PD, Spitz-Stumpf-Diskrimination, Temperaturempfinden). Dies erschwert die präzise quantitative Bewertung sensibler Defizite und die Vergleichbarkeit zwischen Patienten oder Studien.

Die quantitative Sensibilitätsmessung mittels 3D-Fotogrammetrie stellt hier einen innovativen Ansatz dar, da sie objektiv messbare Daten liefert. In Übereinstimmung mit der Literatur, die flächenbasierte Messungen asensibler Areale empfiehlt (3), wurde in der vorliegenden Studie die 3D-Fotogrammetrie eingesetzt (77) (78) (79) (80). Dieses Verfahren erlaubt die präzise Vermessung der Größe des asensiblen Areals und der Gesamtfingerfläche und macht es so möglich, die Verkleinerung des Areals im zeitlichen Verlauf als objektiven quantitativen Endpunkt zu verwenden.

Das Verfahren ist bereits durch Ruewe et al. im Jahr 2023 validiert worden. In dieser Studie wurde gezeigt, dass die 3D-Fotogrammetrie die Größe sensibler Defizite zuverlässig und reproduzierbar quantifizieren kann. Zudem konnte in der klinischen Anwendung die Dynamik der Sensibilitätsrückkehr nach digitalen Nervenverletzungen objektiv erfasst werden, was die Übertragbarkeit in die Praxis belegt (81).

In der vorliegenden Untersuchung zeigte die Mixed-ANOVA weder für das absolute noch für das relative asensible Areal signifikante Gruppenunterschiede (AAA $p = 0,1$; RAA $p = 0,716$). Dies deutet darauf hin, dass sich die sensiblen Regenerationsverläufe zwischen den untersuchten Gruppen auch bei Verwendung eines flächenbasierten Messverfahrens nicht unterscheiden und keine gruppenspezifischen Effekte vorliegen.

Signifikante Zusammenhänge mit dem Ten-Test sowie dem SMHQ belegen jedoch, dass die flächenbasierte Reduktion des asensiblen Areals mit der subjektiv wahrgenommenen Sensibilitätsverbesserung korreliert. Dies bestätigt, dass morphometrisch erfassbare Veränderungen tatsächlich funktionell für den Patienten relevant sind.
Demgegenüber zeigte sich keine Korrelation mit dem Patient-Specific Functional Scale (PSFS). Dies ist plausibel, da der PSFS auf komplexe, individualisierte Alltagsaktivitäten fokussiert ist und daher weniger sensitiv für isolierte sensomotorische Veränderungen einzelner Digiti ist. Die fehlende Korrelation stellt somit keinen Widerspruch zur Validität der 3D-Fotogrammetrie dar.
Zusammenfassend stellt die 3D-Fotogrammetrie ein hochgradig objektivierbares und sehr gut reproduzierbares Verfahren dar, das konkrete numerische Flächenwerte des asensiblen Areals liefert. Diese Werte ermöglichen sowohl die Darstellung zeitlicher Veränderungen als auch den quantitativen Vergleich zwischen Gruppen. Die nachgewiesenen Korrelationen mit etablierten Sensibilitäts- und Handfunktionsinstrumenten unterstreichen die wissenschaftliche Relevanz des Verfahrens und positionieren die 3D-Fotogrammetrie als wertvolle Ergänzung bestehender sensibler Outcome-Parameter in der Evaluation von Digitalverletzungen.

6.7 Komplikationen, Zusatzbefunde und klinische Einordnung

Die Analyse der Komplikationen zeigte, dass Hyperästhesie und Kälteintoleranz die häufigsten Beschwerden nach beiden Rekonstruktionsverfahren waren, ohne dass sich signifikante Unterschiede zwischen der Naht- und der Fibringruppe abzeichneten. Dies entspricht den Befunden früherer Studien, die ebenfalls eine vergleichbare Komplikationsrate bei verschiedenen rekonstruktiven Verfahren berichten (82).

Die Beobachtung einer Endgliedatrophie stellt eine bislang nicht beschriebene Komplikation dar. Aufgrund des singulären Auftretens und der geringen Fallzahl lässt sich jedoch derzeit keine kausale Zuordnung zu einem der beiden Verfahren treffen, sodass weitere Studien erforderlich sind, um mögliche Zusammenhänge zu klären.

Die sonographische Kontrolle ergab bei allen Patienten einen anatomisch durchgängigen Nerv. Dies weist darauf hin, dass sowohl die Naht als auch die Fibrinklebung eine anatomisch erfolgreiche Rekonstruktion ermöglichen. Die Ergebnisse stützen damit die

Annahme, dass die Fibrinklebung eine valide Alternative zur Naht darstellt, wie bereits in früheren Arbeiten berichtet (57).

Insbesondere die reproduzierbare Durchgängigkeit des Nervs spricht für die technische Machbarkeit der Klebetechnik und deutet darauf hin, dass die mechanische Stabilität der Rekonstruktion für den betrachteten Zeitraum gewährleistet ist.

Insgesamt legen die Befunde nahe, dass die Fibrinklebung klinisch mit der Naht vergleichbar ist, sowohl im Hinblick auf Komplikationen als auch auf die anatomische Integrität des Nervs. Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse die Notwendigkeit einer Betrachtung seltener oder neuartiger Komplikationen.

6.8 Limitationen und Ausblick

Trotz der gewonnenen Erkenntnisse weist die vorliegende Studie mehrere Limitationen auf, die die Generalisierbarkeit der Ergebnisse einschränken.

Die relativ kleine Stichprobengröße (n=30) stellt dabei die wichtigste Limitation dar. Sie schränkt nicht nur die Erfassung seltener Komplikationen ein, sondern verringert auch den generellen Aussagewert der statistischen Ergebnisse.

Die Nachbeobachtungsdauer von 12 Monaten erlaubt eine gute Einschätzung der frühen und mittelfristigen Ergebnisse, könnte aber durch eine einmalige Kontrolle nach mehreren Jahren in zukünftigen Studien ergänzt werden, um Langzeiteffekte und seltene Spätkomplikationen zu erfassen.

Zudem ist die 3D-Fotogrammetrie, obwohl objektiv und reproduzierbar, derzeit noch aufwendig und kostenintensiv, was insbesondere für größere Studien an mehreren Standorten eine Herausforderung darstellt. Eine technische Vereinfachung der Methodik wäre daher wünschenswert, um die Routineanwendung und multizentrische Nutzung zu erleichtern.

Die Studie legt nahe, dass die Fibrinklebung dem bisherigen Goldstandard bei Digitalnervenläsionen nicht unterlegen ist (49). Ergänzend könnten Subgruppenanalysen nach Verletzungsgrad oder Patientendemografie weitere Hinweise auf situationsabhängige Vorteile der Fibrinklebung liefern.

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Querschnitt Digitus 8
Abbildung 2: Anastomosen der Digitalnerven 9
Abbildung 3: Aufbau eines peripheren Nervs 9
Abbildung 4: Modell Intraneurale Topographie 10
Abbildung 5: Seddon-Klassifikation der Nervenverletzungen 11
Abbildung 6: Epineurale Nervennaht 14
Abbildung 7: Intraoperative Darstellung Nervenkoaptation mittels Fibrinklebung 15
Abbildung 8: Illustration epineurale Naht 20
Abbildung 9: Illustration Nervenkoaptation mittels Fibrinkleber 20
Abbildung 10: Material für die Studienteilnehmer 23
Abbildung 11: Statische Zweipunktdiskriminationstestung mit 12mm-Diskriminator 24
Abbildung 12: Markierter Finger mit Gummiband 28
Abbildung 13: VECTRA®H2 im Einsatz 29
Abbildung 14: Gegenüberstellung zweier ausgewählter Fotos in der Software VAM 29
Abbildung 15: Gesetze Markierungen in VAM zur Erstellung eines 3D-Modells 30
Abbildung 16: Messung des asensiblen Gebiets aus dem 3D-Vectra-Modells 31
Abbildung 17: Vermessung der Gesamtfingerfläche 31
Abbildung 18: Ultraschalluntersuchung der Nervenkoaptation 32
Abbildung 19: Rekrutierung der Studienpopulation 33
Abbildung 20: Zeit bis zur Operation in Tagen - Kontrollgruppe (grau) Interventionsgruppe (blau) 39
Abbildung 21: Operationsdauer in Stunden (h) 40
Abbildung 22: Hospitalisierungsdauer in Tagen (d) 40
Abbildung 23: Konfidenzintervalle der SMHQ Scores in Abhängigkeit der Gruppen 41
Abbildung 24: PSFS zu den verschiedenen Nachuntersuchungszeitpunkten in Abhängigkeit der Gruppen 42
Abbildung 25: Kaplan-Meier-Kurve. Darstellung des Erreichens des Gesamt-Scores (30Pkt.) im Nachuntersuchungszeitraum in Abhängigkeit beider Gruppen 43
Abbildung 26: Statische Zweipunktdiskrimination im Zweiten Halbjahr 44
Abbildung 27: Dynamische Zweipunktdiskrimination im zweiten Halbjahr 45
Abbildung 28: Boxplots des Ten-Test zu den verschiedenen Messzeitpunkten in Abhängigkeit der Gruppen 46

Abbildung 29: Zeitpunkt des größten subjektiven Fortschritts 48
Abbildung 30: Mittelwert der Gesamtfingerfläche im Verlauf 48
Abbildung 31: RAA an den verschiedenen Messzeitpunkten in Abhängigkeit der Gruppen 50
Abbildung 32: AAA an den verschiedenen Messzeitpunkten in Abhängigkeit der Gruppen 50
Abbildung 33: Absolute Anzahl der Hyperästhesien in Abhängigkeit der Gruppe im Nachuntersuchungszeitraum 52
Abbildung 34: Darstellung der absoluten Anzahl der Kälteintoleranzen in Abhängigkeit der Gruppen im Nachuntersuchungszeitraum 52
Abbildung 35: Endgliedatrophie 54

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ein- und Ausschlusskriterien der Studie 19
Tabelle 2: Timeline der Datenerhebung 21
Tabelle 3: Demographische Darstellung der Studienpopulation - Insgesamt und pro Gruppe 37
Tabelle 4: Demographische Daten der Studienpopulation Gesamt und pro Gruppe - Angabe in Median und (IQR) 37
Tabelle 5: Lokalisation der Nervenkoaptation 38
Tabelle 6: Gesamtscore PSFS nach 6W, 3M, 6M, 9M, 12M 42
Tabelle 7: P-Werte und Cohens R der Messergebnisse des Ten-Test zu den jeweiligen Zeitpunkten 46
Tabelle 8: Dauer der Arbeitsunfähigkeit 51

9 Literaturverzeichnis

1. Duale Reihe Anatomie. Anatomie. 2., überarb. Aufl. Stuttgart: Thieme; 2010. XVI, 1218 S. (Duale Reihe).

2. Ender J, Krotscheck H, Simon-Weidner R. Bau und Funktion der Hand. In: Die Chirurgie der Handverletzungen [Internet]. Vienna: Springer Vienna; 1956 [zitiert 26. Oktober 2023]. S. 1–18. Verfügbar unter: http://link.springer.com/10.1007/978-3-7091-7856-0_1

3. Waldner-Nilsson B. Periphere Nervenläsionen. In: Breier S, Diday-Nolle AP, Eigenheer AR, Saur I, Waldner-Nilsson B, Herausgeber. Handrehabilitation: Für Ergotherapeuten und Physiotherapeuten Band 2: Verletzungen [Internet]. Berlin, Heidelberg: Springer; 2013 [zitiert 26. Oktober 2023]. S. 389–540. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1007/978-3-540-38919-4_8

4. Berchtold R, Bruch HP, Trentz O, Herausgeber. 41.3.3 Trauma peripherer Nerven. In: Chirurgie: mit 224 Tabellen, 120 Praxisfragen und Antworten ; [kommentierte Examensfragen]. 4., überarb. und erw. Aufl., [Nachdr.]. München: Urban & Fischer; 2003. S. 1180–5.

5. Bergmeister KD, Große-Hartlage L, Daeschler SC, Rhodius P, Böcker A, Beyersdorff M, u. a. Acute and long-term costs of 268 peripheral nerve injuries in the upper extremity. PloS One. 2020;15(4):e0229530.

6. Taylor CA, Braza D, Rice JB, Dillingham T. The incidence of peripheral nerve injury in extremity trauma. Am J Phys Med Rehabil. Mai 2008;87(5):381–5.

7. Lohmeyer JA, Hülsemann W, Mann M, Schmauß D, Machens HG, Habenicht R. [Return of sensitivity after digital nerve reconstruction in children: how does age affect outcome?]. Handchir Mikrochir Plast Chir Organ Deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft Handchir Organ Deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft Mikrochir Peripher Nerven Gefasse Organ V. Oktober 2013;45(5):265–70.

8. Asplund M, Nilsson M, Jacobsson A, von Holst H. Incidence of traumatic peripheral nerve injuries and amputations in Sweden between 1998 and 2006. Neuroepidemiology. 2009;32(3):217–28.

9. Towfigh H, Hierner R, Langer M, Friedel R. Handchirurgie. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2011. 1 Online-Ressource. (Handchirurgie).

10. Seddon HJ. THREE TYPES OF NERVE INJURY. Brain. 1943;66(4):237–88.

11. Aman M, Zimmermann KS, Thielen M, Thomas B, Daeschler S, Boecker AH, u. a. An Epidemiological and Etiological Analysis of 5026 Peripheral Nerve Lesions from a European Level I Trauma Center. J Pers Med. 8. Oktober 2022;12(10):1673.

12. Platzer W, Firbas W, Herausgeber. Nervenverletzungen- Ziele und Methoden. In: Chirurgische Operationslehre 9: Schädel, Haltungs- und Bewegungsapparat: Schultergürtel, obere Extremität / hrsg von W Platzer . Bearb von W Firbas . Zeichn von P Haller. Stuttgart New York: Thieme; 1995.

13. Slutsky DJ, Herausgeber. The art of microsurgical hand reconstruction. New York Stuttgart: Thieme; 2013. 481 S.

14. Merolli A, Herausgeber. 9.3 Glue versus stitches. In: Biomaterials in hand surgery. Milan London: Springer; 2009.

15. Matos Cruz AJ, De Jesus O. Neurotmesis. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2023 [zitiert 31. Oktober 2023]. Verfügbar unter: http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK559108/

16. Pamuk Ç. Digital nerve injury: to repair or not? Ir J Med Sci 1971 -. 1. Oktober 2023;192(5):2235–41.

17. Martini AK. Nerven. In: Martini AK, Daecke W, Herausgeber. Traumatologische Handchirurgie [Internet]. Berlin, Heidelberg: Springer; 2011 [zitiert 26. Oktober 2023]. S. 133–40. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1007/978-3-642-00988-4_8

18. Slutsky DJ, Herausgeber. 9 Digital Nerve Repair. In: The art of microsurgical hand reconstruction. New York Stuttgart: Thieme; 2013. S. 83–7.

19. Merolli A, Herausgeber. 2.5.2 Fibrin. In: Biomaterials in hand surgery. Milan London: Springer; 2009.

20. Zhang Y, Hou N, Zhang J, Xie B, Liang J, Chang X, u. a. Treatment options for digital nerve injury: a systematic review and meta-analysis. J Orthop Surg. 12. September 2023;18:675.

21. Félix SP, Pereira Lopes FR, Marques SA, Martinez AMB. Comparison between suture and fibrin glue on repair by direct coaptation or tubulization of injured mouse sciatic nerve. Microsurgery. September 2013;33(6):468–77.

22. Dahlin LB. The role of timing in nerve reconstruction. Int Rev Neurobiol. 2013;109:151–64.

23. Blumenthal-Friedrich K, Zboril A. Aspekte der Begleit – und Nachbehandlung von Verletzungen der Hand. In: Martini AK, Daecke W, Herausgeber. Traumatologische Handchirurgie [Internet]. Berlin, Heidelberg: Springer; 2011 [zitiert 26. Oktober 2023]. S.

141–52. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1007/978-3-642-00988-4_9

24. Young JZ, Medawar PB. FIBRIN SUTURE OF PERIPHERAL NERVES: MEASUREMENT OF THE RATE OF REGENERATION. The Lancet. 3. August 1940;236(6101):126–8.

25. Matras H. Fibrin seal: the state of the art. J Oral Maxillofac Surg Off J Am Assoc Oral Maxillofac Surg. August 1985;43(8):605–11.

26. Pascone M, Dioguardi D. Fibrin Sealant in Plastic Surgery of the Head. In: Schlag G, Holle J, Herausgeber. Fibrin Sealing in Surgical and Nonsurgical Fields. Berlin, Heidelberg: Springer; 1995. S. 11–5.

27. Boeckx W, Stockmans F, Guelinckx P. Tissucol in Peripheral Nerve Repair: An Experimental Study in the Rat. In: Schlag G, Holle J, Herausgeber. Fibrin Sealing in Surgical and Nonsurgical Fields. Berlin, Heidelberg: Springer; 1995. S. 43–50.

28. Povlsen B, Danielsson P, Nylander G. Outcome of Axonal Regeneration Following Rat Sciatic Nerve Transection Treated with End-to-End Microsuture or Fibrin Seal. In: Schlag G, Holle J, Herausgeber. Fibrin Sealing in Surgical and Nonsurgical Fields. Berlin, Heidelberg: Springer; 1995. S. 58–66.

29. Martins RS, Siqueira MG, Da Silva CF, Plese JPP. Overall assessment of regeneration in peripheral nerve lesion repair using fibrin glue, suture, or a combination of the 2 techniques in a rat model. Which is the ideal choice? Surg Neurol. 2005;64 Suppl 1:S1:10-16; discussion S1:16.

30. Sameem M, Wood TJ, Bain JR. A systematic review on the use of fibrin glue for peripheral nerve repair. Plast Reconstr Surg. Juni 2011;127(6):2381–90.

31. Koopman JE, Duraku LS, de Jong T, de Vries RBM, Michiel Zuidam J, Hundepool CA. A systematic review and meta-analysis on the use of fibrin glue in peripheral nerve repair: Can we just glue it? J Plast Reconstr Aesthetic Surg JPRAS. März 2022;75(3):1018–33.

32. Baxter [Internet]. [zitiert 6. November 2023]. TISSEEL [Fibrinkleber] für die operative Versorgung. Verfügbar unter: https://www.baxter.de/de/medizinische-fachkraefte/surgical-care-operative-versorgung/tisseel-fibrinkleber-fuer-die-operative

33. Strauch B, Lang A, Ferder M, Keyes-Ford M, Freeman K, Newstein D. The ten test. Plast Reconstr Surg. April 1997;99(4):1074–8.

34. Ho T, Braza ME. Hoffmann Tinel Sign. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2023 [zitiert 11. September 2023]. Verfügbar unter: http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK555934/

35. Dunlop RLE, Wormald JCR, Jain A. Outcome of surgical repair of adult digital nerve injury: a systematic review. BMJ Open. 13. März 2019;9(3):e025443.

36. Birbaumer NP. Biologische Psychologie. 7., überarb. und erg. Aufl. Berlin: Springer; 2010. 1 Online-Ressource. (Springer-Lehrbuch).

37. Dellon AL. The moving two-point discrimination test: clinical evaluation of the quickly adapting fiber/receptor system. J Hand Surg. September 1978;3(5):474–81.

38. Berger MJ, Regan WR, Seal A, Bristol SG. Reliability of the „Ten Test“ for assessment of discriminative sensation in hand trauma. J Plast Reconstr Aesthetic Surg JPRAS. Oktober 2016;69(10):1411–6.

39. Durrant N. The Reliability and Validity of the Ten Test and Exploring a New, Visual Version. In 2014 [zitiert 4. November 2023]. Verfügbar unter: https://www.semanticscholar.org/paper/The-Reliability-and-Validity-of-the-Ten-Test-and-a-Durrant/5a4224a0ce7715f244054f2fced2eb860681138c

40. Chung KC, Pillsbury MS, Walters MR, Hayward RA. Reliability and validity testing of the Michigan Hand Outcomes Questionnaire. J Hand Surg. Juli 1998;23(4):575–87.

41. P. Stratford, C. Gill, M. Westaway, J. Binkley. Assesing disability and change on individual patients: a report of a patient specific measure. Fall 1995;Physiotherapy Canada(Vol. 47, No. 4).

42. Waljee JF, Kim HM, Burns PB, Chung KC. Development of a Brief, 12-Item Version of the Michigan Hand Questionnaire: Plast Reconstr Surg. Juli 2011;128(1):208–20.

43. Karsten Knobloch, Robert Kraemer, M.D., Stephan Papst, M.D. German Version of the Brief Michigan Hand Outcomes Questionnaire: Implications for Early Quality of Life following Collagenase Injection in Dupuytren Contracture. Mai 2012;Plastic and Reconstructive Surgery(May 2012).

44. Stratford PW, Kennedy DM, Wainwright AV. Assessing the Patient-Specific Functional Scale’s Ability to Detect Early Recovery Following Total Knee Arthroplasty. Phys Ther. 1. Juni 2014;94(6):838–44.

45. Heldmann P, Schöttker-Königer T, Schäfer A. Cross-cultural Adaption and Validity of the “Patient Specific Functional Scale” / Kulturelle Adaption und Validierung der deutschen Version der “Patient Specific Functional Scale”. Int J Health Prof. 1. Juni 2015;2(1):73–82.

46. VECTRA H2 3D Imaging System | Canfield Scientific [Internet]. [zitiert 11. September 2023]. Verfügbar unter: https://www.canfieldsci.com/imaging-systems/vectra-h2-3d-imaging-system/

47. Kluge S. Ultraschalldiagnostik der Hand. Berlin: Springer; 2015. 1 Online-Ressource (XVII, 294 S.).

48. Sulaiman W, Gordon T. Neurobiology of Peripheral Nerve Injury, Regeneration, and Functional Recovery: From Bench Top Research to Bedside Application. Ochsner J. 2013;13(1):100–8.

49. Whitlock EL, Kasukurthi R, Yan Y, Tung TH, Hunter DA, Mackinnon SE. Fibrin glue mitigates the learning curve of microneurosurgical repair. Microsurgery. 2010;30(3):218–22.

50. Statistisches Bundesamt [Internet]. [zitiert 12. März 2025]. Statistischer Bericht - Fallpauschalenbezogene Krankenhausstatistik (DRG-Statistik) - Operationen und Prozeduren der vollstationären Patientinnen und Patienten in Krankenhäusern (4-Steller) - 2023. Verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Gesundheit/Krankenhaeuser/Publikationen/Downloads-Krankenhaeuser/statistischer-bericht-operationen-prozeduren-5231401237015.html

51. Paprottka FJ, Wolf P, Harder Y, Kern Y, Paprottka PM, Machens HG, u. a. Sensory Recovery Outcome after Digital Nerve Repair in Relation to Different Reconstructive Techniques: Meta-Analysis and Systematic Review. Plast Surg Int. 30. Juli 2013;2013:1–17.

52. Cheng AS. Use of early tactile stimulation in rehabilitation of digital nerve injuries. Am J Occup Ther Off Publ Am Occup Ther Assoc. 2000;54(2):159–65.

53. Altissimi M, Mancini GB, Azzarà A. Results of Primary Repair of Digital Nerves. J Hand Surg. Oktober 1991;16(5):546–7.

54. al-Ghazal SK, McKiernan M, Khan K, McCann J. Results of clinical assessment after primary digital nerve repair. J Hand Surg Edinb Scotl. April 1994;19(2):255–7.

55. Fakin RM, Calcagni M, Klein HJ, Giovanoli P. Long-term clinical outcome after epineural coaptation of digital nerves. J Hand Surg Eur Vol. Februar 2016;41(2):148–54.

56. Stolarczyk A, Sarzyńska S, Gondek A, Cudnoch-Jędrzejewska A. Influence of diabetes on tissue healing in orthopaedic injuries. Clin Exp Pharmacol Physiol. Juli 2018;45(7):619–27.

57. Smahel J, Meyer VE. Fibrin Glueing of Peripheral Nerves. In: Schlag G, Holle J, Herausgeber. Fibrin Sealing in Surgical and Nonsurgical Fields. Berlin, Heidelberg: Springer; 1995. S. 67–72.

58. Thorsén F, Rosberg HE, Steen Carlsson K, Dahlin LB. Digital nerve injuries: epidemiology, results, costs, and impact on daily life. J Plast Surg Hand Surg. September

2012;46(3–4):184–90.

59. Ruijs ACJ, Jaquet JB, Kalmijn S, Giele H, Hovius SER. Median and Ulnar Nerve Injuries: A Meta-Analysis of Predictors of Motor and Sensory Recovery after Modern Microsurgical Nerve Repair: Plast Reconstr Surg. August 2005;116(2):484–94.

60. S3-Leitlinie 005/010: Versorgung peripherer Nervenverletzungen [Internet]. [zitiert 12. März 2025]. Verfügbar unter: https://register.awmf.org/assets/guidelines/005-010l_S3_Versorgung-peripherer-Nervenverletzungen_2023-12.pdf

61. Horng YS, Lin MC, Feng CT, Huang CH, Wu HC, Wang JD. Responsiveness of the Michigan Hand Outcomes Questionnaire and the Disabilities of the Arm, Shoulder, and Hand questionnaire in patients with hand injury. J Hand Surg. März 2010;35(3):430–6.

62. Jerome JTJ, Malshikare VA. Fingertip Injuries Outcome Score. Plast Reconstr Surg Glob Open. 16. Juni 2022;10(6):e4386.

63. Shauver MJ, Chung KC. The Michigan Hand Outcomes Questionnaire (MHQ) after 15 years of field trial. Plast Reconstr Surg. Mai 2013;131(5):779e–87e.

64. Jain A, Dunlop R, Hems T, Tang JB. Outcomes of surgical repair of a single digital nerve in adults. J Hand Surg Eur Vol. Juli 2019;44(6):560–5.

65. Bulut T, Akgun U, Ozcan C, Unver B, Sener M. Inter- and intra-tester reliability of sensibility testing in digital nerve repair. J Hand Surg Eur Vol. Juli 2016;41(6):621–3.

66. Jerosch-Herold C. Assessment of sensibility after nerve injury and repair: a systematic review of evidence for validity, reliability and responsiveness of tests. J Hand Surg Edinb Scotl. Juni 2005;30(3):252–64.

67. Novak CB, Mackinnon SE, Williams JI, Kelly L. Establishment of Reliability in the Evaluation of Hand Sensibility. Plast Reconstr Surg. August 1993;92(2):311.

68. Johnson KO, Phillips JR. Tactile spatial resolution. I. Two-point discrimination, gap detection, grating resolution, and letter recognition. J Neurophysiol. Dezember 1981;46(6):1177–92.

69. Wolny T, Linek P. Reliability of two-point discrimination test in carpal tunnel syndrome patients. Physiother Theory Pract. April 2019;35(4):348–54.

70. KALLIO PK, VASTAMÄKI M. An Analysis of the Results of Late Reconstruction of 132 Median Nerves. J Hand Surg. 1. Februar 1993;18(1):97–105.

71. Craig JC. Grating orientation as a measure of tactile spatial acuity. Somatosens Mot Res. 1. Januar 1999;16(3):197–206.

72. Rosén B, Lundborg G. A model instrument for the documentation of outcome after nerve repair. J Hand Surg. Mai 2000;25(3):535–43.

73. Li XM, Yang Y, Hou Y, Yang JT, Qin BG, Fu G, u. a. Diagnostic accuracy of three sensory tests for diagnosis of sensory disturbances. J Reconstr Microsurg. Januar 2015;31(1):67–73.

74. Dellon AL, Mackinnon SE, Crosby PM. Reliability of two-point discrimination measurements. J Hand Surg. September 1987;12(5 Pt 1):693–6.

75. Sun HH, Oswald TM, Sachanandani NS, Borschel GH. The „Ten Test“: application and limitations in assessing sensory function in the paediatric hand. J Plast Reconstr Aesthetic Surg JPRAS. November 2010;63(11):1849–52.

76. Rubin G, Orbach H, Rinat B, Shay R, Rozen N. The Utility of Diagnostic Tests for Digital Nerve Injury. Ann Plast Surg. Januar 2020;84(1):73–5.

77. Thalmann-Degen P. Die Stereophotogrammetrie, ein diagnostisches Hilfsmittel in der Kieferorthopädie. Buchdruckerei Bündner Tagblatt; 1944. 39 S.

78. Karatas OH, Toy E. Three-dimensional imaging techniques: A literature review. Eur J Dent. Januar 2014;8(1):132–40.

79. Li Y, Yang X, Li D. The Application of Three-Dimensional Surface Imaging System in Plastic and Reconstructive Surgery. Ann Plast Surg. Februar 2016;77 Suppl 1:S76-83.

80. Koban KC, Schenck T, Metz PM, Volkmer E, Haertnagl F, Titze V, u. a. Auf dem Weg zur objektiven Evaluation von Form, Volumen und Symmetrie in der Plastischen Chirurgie mittels intraoperativer 3D Scans. Handchir · Mikrochir · Plast Chir. April 2016;48(2):78–84.

81. Ruewe M, Eigenberger A, Klein SM, von Riedheim A, Gugg C, Prantl L, u. a. Precise Monitoring of Returning Sensation in Digital-Nerve Lesions by Three-Dimensional Imaging: A Proof-of-Concept Study. Plast Reconstr Surg. 1. Oktober 2023;152(4):670e–4e.

82. Sallam A, Eldeeb M, Kamel N. Autologous Fibrin Glue Versus Microsuture in the Surgical Reconstruction of Peripheral Nerves: A Randomized Clinical Trial. J Hand Surg. Januar 2022;47(1):89.e1-89.e11.

10 Anhang

ANHANG 1: UNTERSUCHUNGSBOGEN FÜR DIE KLINISCHE UNTERSUCHUNG 74

ANHANG 2: SMHQ – SHORT MICHIGAN HAND OUTCOME QUESTIONNAIRE SMHQ – SHORT MICHIGAN HAND OUTCOME QUESTIONNAIRE..... 75

ANHANG 3: PSFS – PATIENTENSPEZIFISCHE FUNKTIONSSKALA..... 77

ANHANG 4: ABSCHLUSSEVALUATIONSBOGEN M12 ABSCHLUSS ABSCHLUSSEVALUATIONSBOGEN M12..... 78

ANHANG 5: PAARWEISE VERGLEICHE DER SMHQ SCORES 80

ANHANG 6: KORRELATIONSTABELLE 3D MAPPING, TEN-TEST, SMHQ, PSFS ZUM ZEITPUNKT W6 ……..81

Anhang 1: Untersuchungsbogen für die klinische Untersuchung

HOCHSCHULZENTRUM
PLASTISCHE UND ÄSTHETISCHE HAND- & WIEDERHERSTELLUNGSCHIRURGIE

ABTEILUNG FÜR PLASTISCHE, HAND- UND WIEDERHERSTELLUNGSCHIRURGIE
Leiter: Prof. Dr. Dr. med. Lukas Prantl
Telefon: 0941 944-6763
Fax: 0941 944-6948
Leitstelle Ambulanz: 0941 944-6930

Krankenhaus St. Josef
Kooperations- und Lehrkrankenhaus der Universität Regensburg

Universitätsklinikum Regensburg

Name:

Geburtsdatum:

Datum

Untersuchung:
- ☐ Ausgangsbefund
- ☐ 2 Wo.
- ☐ 6 Wo.
- ☐ 3 Mo.
- ☐ 6 Mo.
- ☐ 9 Mo.
- ☐ 12 Mo.

Referenz (N__)
Hand: ☐L ☐R

Ten: __/10
Sp/St: ☐j ☐n
2PD:☐2-6 ☐7-15 ☐>15
HT: __ mm dist. Epony.
Temp: ☐j ☐n

N9 ☐
Ten: __/10
Sp/St: ☐j ☐n
2PD:☐2-6 ☐7-15 ☐>15
HT prox.: __ mm dist. Epony.
HT distal: __
HT stärker: __
Temp: ☐j ☐n.

N10 ☐
Ten: __/10
Sp/St: ☐j ☐n
2PD:☐2-6 ☐7-15 ☐>15
HT prox.: __ mm dist. Epony.
HT distal: __
HT stärker: __
Temp: ☐j ☐n

N8 ☐
Ten: __/10
Sp/St: ☐j ☐n
2PD:☐2-6 ☐7-15 ☐>15
HT prox.: __ mm dist. Epony.
HT distal: __
HT stärker: __
Temp: ☐j ☐n

N7 ☐
Ten: __/10
Sp/St: ☐j ☐n
2PD:☐2-6 ☐7-15 ☐>15
HT prox.: __ mm dist. Epony.
HT distal: __
HT stärker: __
Temp: ☐j ☐n.

N6 ☐
Ten: __/10
Sp/St: ☐j ☐n
2PD:☐2-6 ☐7-15 ☐>15
HT prox.: __ mm dist. Epony.
HT distal: __
HT stärker: __
Temp: ☐j ☐n

N5 ☐
Ten: __/10
Sp/St: ☐j ☐n
2PD:☐2-6 ☐7-15 ☐>15
HT prox.: __ mm dist. Epony.
HT distal: __
HT stärker: __
Temp: ☐j ☐n

N4 ☐
Ten: __/10
Sp/St: ☐j ☐n
2PD:☐2-6 ☐7-15 ☐>15
HT prox.: __ mm dist. Epony.
HT distal: __
HT stärker: __
Temp: ☐j ☐n

N3 ☐
Ten: __/10
Sp/St: ☐j ☐n
2PD:☐2-6 ☐7-15 ☐>15
HT prox.: __ mm dist. Epony.
HT distal: __
HT stärker: __
Temp: ☐j ☐n

N2 ☐
Ten: __/10
Sp/St: ☐j ☐n
2PD:☐2-6 ☐7-15 ☐>15
HT prox.: __ mm dist. Epony.
HT distal: __
HT stärker: __
Temp: ☐j ☐n

N1 ☐
Ten: __/10
Sp/St: ☐j ☐n
2PD:☐2-6 ☐7-15 ☐>15
HT prox.: __ mm dist. Epony.
HT distal: __
HT stärker: __
Temp: ☐j ☐n

Komplikationen:
- ☐ Hyperästhesie
- ☐ Neuropathische Schmerzen
- ☐ Schmerzmedikation ⇧, Ko-Analgetika ⇧?
- ☐ Kälteintoleranz
- ☐ CRPS-Symptome
- ☐ Neurom-Symptome
- ☐ Infektionen
- ☐ Fremdkörperreaktionen
- ☐ Iatrogene Verletzungen
- ☐ Andere Komplikationen

Verletzt: ☐ rechts ☐ links
Dominant: ☐ rechts ☐ links

Sonst. Inspektion (Narbe, Kolorit, Schwellungszeichen, etc):
Sonst. Auffälligkeiten:
Ergo?
Compliance?

Anhang 2: SMHQ – Short Michigan Hand Outcome Questionnaire

SMHQ – Short Michigan Hand Outcome Questionnaire Seite 1

HOCHSCHULZENTRUM
PLASTISCHE UND ÄSTHETISCHE, HAND- & WIEDERHERSTELLUNGSCHIRURGIE

Krankenhaus St. Josef
caritas
Kooperations- und Lehrkrankenhaus der Universität Regensburg

UKR
Universitätsklinikum Regensburg

Patientenetikett
Name, Vorname:
Geburtsdatum:
Wohnort:

ABTEILUNG FÜR PLASTISCHE, HAND- UND WIEDERHERSTELLUNGSCHIRURGIE
Leiter: Prof. Dr. Dr. med. Lukas Prantl

Telefon: 0941 944-6763
Fax: 0941 944-6948

Leitstelle Ambulanz: 0941 944-6930

Michigan Hand Outcome Questionnaire (SMHQ)

Datum: _____

In diesem Fragebogen möchten wir Sie zu Ihrer Meinung bezüglich Ihrer Hände und ihrer Gesundheit befragen. Diese Informationen werden uns helfen zu verstehen, wie Sie sich fühlen und wie gut Sie Tätigkeiten des täglichen Lebens durchführen können.
Bitte beantworten Sie alle Fragen, indem Sie die zutreffende Antwort ankreuzen.

Falls Sie sich bei der Beantwortung der Fragen unsicher sein sollten, geben Sie bitte die **am ehesten zutreffende Antwort** an. Bitte beantworten Sie jede Frage, auch wenn Sie keine Beschwerden mit der Hand oder dem Handgelenk haben. Einige Fragen beziehen sich auf die Fähigkeit bestimmte Aufgaben durchzuführen. Wenn Sie die entsprechende Tätigkeit nicht durchführen, schätzen Sie bitte, welche Schwierigkeiten Sie haben würden, wenn sie diese Tätigkeit durchführen würden. Fragen welche die Arbeit betreffen, beziehen sich auf den Beruf, die Hausarbeit sowie Schularbeiten. **Bitte kreuzen sie bei jeder Frage nur eine Antwort an.**

		Sehr gut	*Gut*	*Mittelmäßig*	*Schlecht*	*Sehr schlecht*
1	Wie gut beurteilen Sie die allgemeine Funktion Ihrer Hand (Hände) in der letzten Woche?					
2	Wie war das Gefühl/Empfinden Ihrer Hand (Hände) in der letzten Woche?					
3	Wie schwierig war es für Sie in der letzten Woche eine Bratpfanne zu halten?					
4	Wie schwierig war es für Sie in der letzten Woche ein Hemd oder eine Bluse zu zuknöpfen?					

		Sehr schwach	*Schwach*	*Mäßig*	*Stark*	*Sehr stark*
8	Bitte beschreiben Sie die Schmerzen in Ihrer Hand (Händen) oder Ihrem Handgelenk (Handgelenken) in der letzten Woche?					

SMHQ – Short Michigan Hand Outcome Questionnaire Seite 2

		Immer	*Oft*	*Manchmal*	*Selten*	*Nie*
5	Wie oft waren Sie in den letzten 4 Wochen unfähig Ihrer Arbeit aufgrund von Beschwerden mit der Hand (Händen) oder dem Handgelenk (Handgelenken), nachzukommen?					
6	Wie häufig haben Sie in den letzten 4 Wochen für die Verrichtung Ihrer Arbeit länger benötigt aufgrund von Beschwerden mit der Hand (Händen) oder dem Handgelenk (Handgelenken)?					
7	Wie häufig haben Schmerzen in Ihrer Hand (Händen) oder Handgelenk (Handgelenken) Sie bei der Verrichtung Ihrer täglichen Aufgaben (wie z.B. essen oder baden) in der letzten Woche beeinträchtigt?					

		Ich stimme vollständig zu	*Ich stimme zu*	*Ich stimme weder zu noch dagegen*	*Ich stimme nicht zu*	*Ich stimme überhaupt nicht zu*
9	Ich bin mit dem Erscheinungsbild meiner Hand (Hände) zufrieden.					
10	In der letzten Woche hat das Erscheinungsbild meiner Hand (Hände) die Verrichtung meiner täglichen Aufgaben beeinträchtigt.					

		Sehr zufrieden	*Zufrieden*	*Weder zufrieden noch unzufrieden*	*Unzufrieden*	*Sehr unzufrieden*
11	Wie zufrieden waren Sie in der letzten Woche mit der Beweglichkeit Ihrer Finger?					
12	Wie zufrieden waren Sie in der letzten Woche mit der Beweglichkeit Ihrer Handgelenke?					

Vielen Dank für Ihre Teilnahme.

Referenz: Knobloch K, Krämer R, Papst S, Sorg H, Vogt PM. (Plastische, Hand- und Wiederherstellungschirurgie, Medizinische Hochschule Hannover)

Universitätsklinikum Regensburg (AöR) Vorstand: Ärztlicher Direktor: Prof. Dr. Oliver Kölbl (Vorsitzender) • Kaufmännische Direktorin: Sabine Lange, MBA • Pflegedirektor: Dipl.-Kfm. (FH) Alfred Stockinger • Dekan der Fakultät für Medizin: Prof. Dr. med. Dipl. – Phys. Dirk Hellwig
Universitätsklinikum Regensburg • Franz-Josef-Strauß-Allee 11 • 93053 Regensburg • T: 0941 944-0 • info@ukr.de • www.ukr.de

Anhang 3: PSFS – Patientenspezifische Funktionsskala

HOCHSCHULZENTRUM
PLASTISCHE UND ÄSTHETISCHE, HAND- & WIEDERHERSTELLUNGSCHIRURGIE

Krankenhaus St. Josef
caritas
Kooperations- und Lehrkrankenhaus der Universität Regensburg

UKR
Universitätsklinikum Regensburg

Patientenetikett
Name, Vorname:
Geburtsdatum:
Wohnort:

ABTEILUNG FÜR PLASTISCHE, HAND- UND WIEDERHERSTELLUNGSCHIRURGIE
Leiter: Prof. Dr. Dr. med. Lukas Prantl

Telefon: 0941 944-6763
Fax: 0941 944-6948

Leitstelle Ambulanz: 0941 944-6930

Die patientenspezifische Funktionsskala (PSFS)

Dieser nützliche Fragebogen kann dazu verwendet werden, Aktivitätseinschränkungen zu quantifizieren und das funktionelle Ergebnis bei Patientinnen und Patienten mit jeder Art von orthopädischen Krankheitsbildern zu messen.

Erste Untersuchung: Bitte identifizieren Sie drei wichtige Aktivitäten, welche Sie aufgrund Ihrer Fingernervenverletzung nicht ausführen können oder bei welchen Sie Schwierigkeiten bei der Ausführung haben.

Aktivität:

1. _____

2. _____

3. _____

Nun bewerten Sie anhand der Skala (Punkte 0-10) wie gut Sie diese drei Aktivitäten ausführen können:

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Unfähig, die Aktivität auszuführen

Kann die Aktivität auf dem gleichen Niveau wie vor der Verletzung ausführen

Datum						
Aktivität	2W postop:	6W postop:	3M postop:	6M postop:	9M postop:	12M postop:
1.						
2.						
3.						
Gesamtwert						

Referenzen:
PSFS developed by: Stratford, P., Gill, C., Westaway, M., & Binkley, J. (1995). Assessing disability and change on individualpatients: a report of a patient specific measure. Physiotherapy Canada, 47, 258-263.© P. Stratford 1995, reprinted with permission. © Kulturelladaptiert ins Deutsche: P. Heldmann 2012, HAWK Hildesheim.

Universitätsklinikum Regensburg (AöR) Vorstand: Ärztlicher Direktor: Prof. Dr. Oliver Kölbl (Vorsitzender) • Kaufmännische Direktorin: Sabine Lange, MBA • Pflegedirektor: Dipl.-Kfm. (FH) Alfred Stockinger • Dekan der Fakultät für Medizin: Prof. Dr. med. Dipl. – Phys. Dirk Hellwig
Universitätsklinikum Regensburg • Franz-Josef-Strauß-Allee 11 • 93053 Regensburg • T: 0941 944-0 • info@ukr.de • www.ukr.de

Anhang 4: Abschlussevaluationsbogen M12
Abschluss Abschlussevaluationsbogen M12 Seite 1

Fingerprint-Studie: Abschluss Evaluation

1. Wie viele Tage waren Sie wegen Ihrer Finger-Verletzung krankgeschrieben?
_____(Tage)

2. Wie lange haben Sie Ergotherapie bekommen? Wie oft pro Woche?
_____

3. Wie lange haben Sie Krankengymnastik gemacht? Wie oft pro Woche?
_____

4. Wann haben Sie subjektiv den größten Fortschritt bei der Regeneration der Sensibilität bemerkt? Ca. _____ Monate nach der Verletzung

5. Wie gut würden sie die Fingersensibilität im Vergleich zu vor dem Unfall einschätzen?

_____% (100% vor dem Unfall)

6. Wie stark wurden Sie durch folgende Punkte im Alltag oder in der Arbeit eingeschränkt?

		Nicht genutzt	Gar nicht	Wenig	Mittel-mäßig	Ziemlich	Sehr
1	Bewegungseinschränkung	0	1	2	3	4	5
2	Herabgesetzte Sensibilität	0	1	2	3	4	5
3	Übersteigerte Sensibilität	0	1	2	3	4	5
4	Narbe (Verhärtung, Kontraktion)	0	1	2	3	4	5
5	Schmerzen	0	1	2	3	4	5

7. Inwiefern haben Sie von Tipps der jeweiligen Gruppen zur Verbesserung der Sensibilität profitiert? (Wenn Sie beispielsweise kein Infomaterial zur Nervenregeneration genutzt haben, machen Sie bitte ein Kreuz in der ersten Spalte „*Nicht genutzt*“)

		Nicht genutzt	Gar nicht	Wenig	Mittel-mäßig	Ziemlich	Sehr
1	Ärztliche Betreuung	0	1	2	3	4	5
2	Ergotherapie	0	1	2	3	4	5
3	Infomaterial (Flyer, etc.)	0	1	2	3	4	5

Abschluss Abschlussevaluationsbogen M12 Seite 2

4	Eigene Recherche (z.B. Internet)		0	1	2	3	4	5

8. Was war Ihre Lieblingsübung? _____

9. Wie zufrieden waren Sie mit folgenden Parametern? (Bitte nur die Klinik bewerten, an der Sie betreut wurden. Wenn Sie an beiden Standorten betreut wurden bitte beide bewerten.)

			Gar nicht	Wenig	Mittel-mäßig	Ziemlich	Sehr
1	Wartezeit	St. Josef	1	2	3	4	5
2		UKR	1	2	3	4	5
3	Dauer der Untersuchung	St. Josef	1	2	3	4	5
4		UKR	1	2	3	4	5
5	Organisation	St. Josef	1	2	3	4	5
6		UKR	1	2	3	4	5
7	Betreuung durch das ärztliche	St. Josef	1	2	3	4	5
8	Team	UKR	1	2	3	4	5

10. Bitte zeichnen Sie in der Abbildung möglichst genau ein, WO die Sensibilität im Vergleich zu vor dem Unfall WIE verändert ist und beschriften sie diese. *(Bsp.: Wo spühren Sie nichts? Wo Kribbelt es? Wo nehmen Sie normale Reize als unangenehm wahr? Gibt es eine Stelle, an der stechender Schmerz ausgelöst werden kann? Sonstiges?)*

11. Möchten Sie über Studienergebnisse benachrichtigt werden? Dann benötigen wir Ihre Mail-Adresse: _____

12. Möchten Sie uns abschließend noch etwas mitteilen?

_____

Vielen Dank!

Anhang 5: Paarweise Vergleiche der SMHQ Scores

Paarweise Vergleiche

Maß: MASS_1

		Mittelwertdifferenz			95% Konfidenzintervall für Differenz[b]	
(I) Zeit	(J) Zeit	(I-J)	Std.-Fehler	Sig.[b]	Untergrenze	Obergrenze
1	2	-17,733*	2,644	<,001	-26,349	-9,117
	3	-31,163*	2,986	<,001	-40,893	-21,433
	4	-45,312*	3,506	<,001	-56,737	-33,888
	5	-45,312*	3,506	<,001	-56,737	-33,888
	6	-47,185*	3,329	<,001	-58,032	-36,338
2	1	17,733*	2,644	<,001	9,117	26,349
	3	-13,430*	2,580	<,001	-21,837	-5,023
	4	-27,579*	3,229	<,001	-38,102	-17,057
	5	-27,579*	3,229	<,001	-38,102	-17,057
	6	-29,452*	3,285	<,001	-40,157	-18,747
3	1	31,163*	2,986	<,001	21,433	40,893
	2	13,430*	2,580	<,001	5,023	21,837
	4	-14,149*	2,549	<,001	-22,454	-5,845
	5	-14,149*	2,549	<,001	-22,454	-5,845
	6	-16,022*	2,570	<,001	-24,396	-7,648
4	1	45,312*	3,506	<,001	33,888	56,737
	2	27,579*	3,229	<,001	17,057	38,102
	3	14,149*	2,549	<,001	5,845	22,454
	5	,000	,000	.	,000	,000
	6	-1,873	1,246	1,000	-5,931	2,186
5	1	45,312*	3,506	<,001	33,888	56,737
	2	27,579*	3,229	<,001	17,057	38,102
	3	14,149*	2,549	<,001	5,845	22,454
	4	,000	,000	.	,000	,000
	6	-1,873	1,246	1,000	-5,931	2,186
6	1	47,185*	3,329	<,001	36,338	58,032
	2	29,452*	3,285	<,001	18,747	40,157
	3	16,022*	2,570	<,001	7,648	24,396
	4	1,873	1,246	1,000	-2,186	5,931
	5	1,873	1,246	1,000	-2,186	5,931

Basiert auf geschätzten Randmitteln

*. Die Mittelwertdifferenz ist in Stufe ,05 signifikant.

b. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Bonferroni.

Anhang 6: Korrelationstabelle 3D Mapping, Ten-Test, SMHQ, PSFS zum Zeitpunkt W6

Korrelationen

			MHQ6WScore	6WTen-Test (x/10)	RAA_6W	AA_6W	GF_6W	Normierte relative asensible Fläche nach 6 Wochen	Abs_RAA_Change_6W_3M	Rel_NRAA_Change_6W_3M	Abs_NRAA_Change_6W_3M	6W-PSFS-Gestamtwert ...
Spearman-Rho	MHQ6WScore	Korrelationskoeffizient	--									
		Sig. (2-seitig)	.									
		N	29									
	6WTen-Test (x/10)	Korrelationskoeffizient	,264	--								
		Sig. (2-seitig)	,166	.								
		N	29	29								
	RAA_6W	Korrelationskoeffizient	-,208	-,067	--							
		Sig. (2-seitig)	,278	,730	.							
		N	29	29	29							
	AA_6W	Korrelationskoeffizient	-,266	-,152	,936**	--						
		Sig. (2-seitig)	,162	,430	<,001	.						
		N	29	29	29	29						
	GF_6W	Korrelationskoeffizient	-,114	-,226	-,081	,222	--					
		Sig. (2-seitig)	,556	,238	,675	,248	.					
		N	29	29	29	29	29					
	Normierte relative asensible Fläche nach 6 Wochen	Korrelationskoeffizient	-,433*	-,276	,989**	,926**	-,130	--				
		Sig. (2-seitig)	,034	,192	<,001	<,001	,546	.				
		N	24	24	24	24	24	24				
	Abs_RAA_Change_6W_3M	Korrelationskoeffizient	,163	-,544**	-,336	-,287	,185	-,166	--			
		Sig. (2-seitig)	,417	,003	,087	,147	,356	,438	.			
		N	27	27	27	27	27	24	27			
	Rel_NRAA_Change_6W_3M	Korrelationskoeffizient	-,494*	,309	,217	,173	-,130	,204	-,647**	--		
		Sig. (2-seitig)	,014	,141	,309	,419	,546	,338	<,001	.		
		N	24	24	24	24	24	24	24	24		
	Abs_NRAA_Change_6W_3M	Korrelationskoeffizient	,389	-,462*	-,031	-,038	,070	-,019	,954**	-,660**	--	
		Sig. (2-seitig)	,060	,023	,885	,859	,747	,929	<,001	<,001	.	
		N	24	24	24	24	24	24	24	24	24	
	6W-PSFS-Gestamtwert (0-30)	Korrelationskoeffizient	,700**	,320	-,006	-,168	-,438*	-,203	-,150	-,119	,155	--
		Sig. (2-seitig)	<,001	,090	,974	,384	,017	,342	,456	,581	,471	.
		N	29	29	29	29	29	24	27	24	24	29

*. Die Korrelation ist auf dem 0,05 Niveau signifikant (zweiseitig).

**. Die Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant (zweiseitig).

11 Danksagung

Ich bedanke mich bei meinen Doktorvater Prof. Dr. med. Silvan Eisenmann für die exzellente Betreuung, das entgegengebrachte Vertrauen und das Gefühl jeder Zeit auf offene Türen zu stoßen.
Ich bedanke mich beim gesamten Fingerprint-Team:
Bei Prof. Dr. med. Alexandra Anker für ihre Expertise, die fachkundige Betreuung der Fingerprint-Patienten, die Korrekturen und ihre zwischenmenschliche Wärme. Nicht nur ihre Patienten haben sich im St. Josef Krankenhaus zu jeder Zeit gut aufgehoben gefühlt.
Bei PD Dr. med. Marc Rüwe für sein statistisches und technisches Know-How, seine Zeit, seine Geduld und seinen Humor während der Datenauswertung und Korrektur.
Bei Dr. med. Marco Zimny für die hervorragende Betreuung von vielen Fingerprint-Patienten in jeder noch so vollen Sprechstunde.
Zudem danke ich den oben genannten Personen und dem Abteilungsleiter Herr Prof. Dr. Dr. Lukas Prantl für die Möglichkeit während der Zeit der Datenerhebung als studentische Hilfskraft tätig zu sein.
Bei Dr. med. Antonia von Riedheim möchte ich mich für die gute Übergabe der Patienten bedanken und dafür, dass du als Ansprechpartnerin immer mit Rat und Tat zur Seite stand.
Bei cand. med. Isabel Schwarzmann für die Weiterführung der Studie.
Beim gesamten restlichen St. Josef Team, ärztlicher und organisatorischer Seite, ohne sie wäre die Nachuntersuchung der Patienten nicht möglich gewesen.
Und bei allen Studienteilnehmern, ohne die eine klinische prospektive Studie schlichtweg nicht möglich wäre.

Und Danke an meinen Bruder Felix Gremer und an meine Freunde Cornelia Krinner und Benedikt Heß für eure Zeit und euren Input. Danke an Thomas Frischhut, der sich als Handmodell zur Verfügung gestellt hat.
Und last but not least Danke an meine Eltern, Ingrid und Heiner Gremer.

12 Lebenslauf

Schulische Laufbahn	2001-2006 Grundschule Altenburgblick Stegaurach 2005-2013 Maria-Ward-Gymnasium Abschluss: Allgemeine Hochschulreife
Akademische Laufbahn	2015-2018 LMU Studium der Veterinärmedizin 2018-2020 Otto-von-Guericke Universität Magdeburg - Studium der Humanmedizin- Vorklinischer Abschnitt Ab Herbst 2020 Universität Regensburg - Studium der Humanmedizin - Klinischer Abschnitt 2024-2025 PJ Tertiale (Plastische Chirurgie – CSJ Regensburg, Chirurgie – George Hospital, Südafrika, Innere Medizin – Kantonspital Luzern, Schweiz) 2025 Abschluss Medizinstudium
Wissenschaftliche Laufbahn	Ab Februar 2022 Doktorandin in der Fingerprint-Studie der Plastischen Chirurgie St. Josef und Uniklinikum Regensburg
Sonstiges	Deutsch (Muttersprache), Englisch (fließend) , Spanisch (Grundkenntnisse) Führerschein Klasse B