

# Versorgungsstrategie von Nervenverletzungen bei schwerem Weichteilschaden



Konsensus-Statement der Deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft für Mikrochirurgie der peripheren Nerven und Gefäße

## Strategies on the treatment of nerve injuries accompanied by severe soft tissue damage

Consensus statement of the German-Speaking Society for Microsurgery of Peripheral Nerves and Vessels

### Autoren

Leila Harhaus<sup>1</sup>, Christoph Hirche<sup>1</sup>, Riccardo E. Giunta<sup>2</sup>, Oskar Aszmann<sup>3</sup>, Frank Siemers<sup>4</sup>, U. Kneser<sup>1</sup>, Marcus Lehnhardt<sup>5</sup>

### Institute

- 1 Klinik für Hand-, Plastische und Rekonstruktive Chirurgie, Schwerbrandverletzententrum, Klinik für Hand- und Plastische Chirurgie der Universität Heidelberg, BG Klinik Ludwigshafen, Ludwigshafen
- 2 Abteilung für Handchirurgie, Plastische Chirurgie und Ästhetische Chirurgie am Klinikum der Universität München (LMU)
- 3 Abteilung für Plastische und Wiederherstellende Chirurgie, Medizinische Universität Wien
- 4 Klinik für Plastische und Handchirurgie / Brandverletzententrum, BK Klinikum Bergmannstrost Halle, Merseburger Str. 165, 06112 Halle (Saale)
- 5 Klinik für Plastische Chirurgie und Schwerbrandverletzte, Handchirurgiezentrum, BG-Universitätsklinik Bergmannsheil Bochum, Ruhr-Universität Bochum

### Schlüsselwörter

Nervenverletzung, Weichteilschaden, Trauma, Versorgung, Konsensusempfehlungen, Deutschsprachige Arbeitsgemeinschaft für Mikrochirurgie der peripheren Nerven und Gefäße (DAM)

### Key words

nerve injury, soft tissue injury, trauma, consensus statements, German-speaking Community for Microsurgery of the Peripheral Nerves and Vessels (DAM)

### Bibliografie

DOI <https://doi.org/10.1055/s-0043-111408>  
Handchir Mikrochir Plast Chir  
© Georg Thieme Verlag KG Stuttgart · New York  
ISSN 0722-1819

### Korrespondenzadresse

PD Dr. Leila Harhaus  
BG Unfallklinik Ludwigshafen  
Klinik für Hand-, Plastische und Rekonstruktive Chirurgie  
Ludwig-Guttman-Str.13  
67071 Ludwigshafen  
Tel.: 0621-6810-8933  
Fax: 0621-6810-3476  
[leila.harhaus@bgu-ludwigshafen.de](mailto:leila.harhaus@bgu-ludwigshafen.de)

### ZUSAMMENFASSUNG

Nervenverletzungen mit schwerem Weichteilschaden sind selten und bedürfen einer komplexen, individualisierten Behandlungsstrategie, um die resultierenden medizinischen und sozioökonomischen Folgen möglichst gering zu halten. Da bisher eine einheitliche systematische Evidenz fehlt, werden abhängig vom individuellen Erfahrungstand der versorgenden Mikrochirurgen uneinheitliche Therapiestandards angewendet. Um beste Voraussetzungen für deren weiteren Heilungsverlauf zu schaffen, wurden in einem Konsensusworkshop der 38. Jahrestagung der Deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft für Mikrochirurgie der peripheren Nerven und Gefäße (DAM) Konsensusempfehlungen von einer Expertengruppe erarbeitet. Diese beinhalten die Aspekte Zeitpunkt der Nerven- und Weichteilversorgung, Versorgungsstrategien, sowie Rehabilitation und Heilverfahrenssteuerung.

### ABSTRACT

Nerve injuries with severe soft tissue damage are rare and demand a complex and individualized treatment approach, in order to limit medical and socioeconomic consequences. Since uniform systematic evidence so far is lacking, inconsistent therapy standards are implemented depending on individual experiences and background of respective microsurgeons.

In order to provide best conditions for further healing, basic expert consensus statements were developed in a workshop on the 38th Annual Meeting of the German-speaking Community for Microsurgery of the Peripheral Nerves and Vessels (DAM).

Statements were consented in regard of the aspects: timing of nerve and soft tissue repair, techniques of nerve repair, as well as rehabilitation and healing process control.

## Einleitung

Nervenverletzungen, die in Kombination mit einem schweren Weichteilschaden entstehen, sind insgesamt relativ selten. Dabei hat die Nervenverletzung oft den Charakter einer Begleitverletzung, während z. B. im Rahmen einer Polytraumatisierung andere Verletzungsfolgen im Vordergrund stehen.

Die Inzidenz von peripheren Nervenverletzungen bei Traumata der oberen oder unteren Extremität wird mit 1.64 % – 2.8 % angegeben [1, 2]. Die Crush und Strech-Traction (Dehnungs)-Verletzung weist dabei die höchste Inzidenz von begleitenden Nervenverletzungen mit 1.91 % auf. Mit offenen Wunden assoziierte Nervenverletzungen der oberen Extremität sind mit 1.85 % angegeben, der unteren Extremität mit 1.09 % [1].

Das Behandlungsergebnis nach chirurgischer Versorgung der Nervenverletzung ist zu wesentlichen Anteilen abhängig von dem Zustand und der Qualität des umgebenden Weichgewebes. Weist das Wundbett eine starke Verschmutzung, eine kompromittierte Gefäßversorgung oder einen sehr dünnen verbliebenen Hautweichteilmantel auf, ist die Regenerationskapazität deutlich eingeschränkt [3, 4].

Insbesondere jüngere, männliche Patienten erleiden Nervenverletzungen: das mittlere Alter beträgt 28–35 Jahre [2, 5–8]. Das Verhältnis männlich zu weiblich beträgt 2,4: 1 [5].

Zudem verursachen Nervenverletzungen überdurchschnittlich hohe Behandlungskosten [8, 9]. Dies liegt vor allem an der langen Regenerationszeit der Nerven, welche zu langen Ausfallszeiten im Erwerbsleben, zu hohen Rehabilitationskosten und sonstigen Folgekosten führt. So verursacht eine Läsion des N. medianus oder des N. ulnaris im Durchschnitt Kosten von 46 267 €, wovon 87 % auf Produktionsausfälle durch fortbestehende Arbeitsunfähigkeit entfallen [8]. Die durchschnittliche Arbeitsunfähigkeit wird mit 210 Tagen beschrieben, was signifikant höher liegt als beispielsweise bei Sehnenverletzungen.

Die sich daraus ergebende Dringlichkeit zur Wiederherstellung der Nervenkontinuität steht bei schweren Weichteilverletzungen häufig in Diskrepanz zum tatsächlichen Alltag. Aus der Perspektive der plastisch-rekonstruktiven Chirurgie werden Patienten mit Nervenläsionen als Begleitverletzung weiterer Komplexverletzungen (z. B. Polytrauma) oder schwerer Weichteilschäden oft erst verzögert vorgestellt. Nicht selten sind sie hinsichtlich der begleitenden Frakturen und Weichteilschäden bereits ausversorgt und die Chance zur primären Nervenversorgung ist dann nicht mehr gegeben.

Sowohl die medizinische, als auch die sozioökonomische Komplexität und Relevanz von Nervenverletzungen bei schwerem Weichteilschaden erfordern daher einen Expertenkonsens mit Empfehlungen zur Strategie der Versorgung, um den ohnehin schon prolongierten Heilungsverlauf von Beginn an optimal gestalten zu können.

## Methode

Der im Folgenden dargestellte Konsens als Empfehlung für die Aspekte Zeitpunkt, Strategie und Rehabilitation/ Heilverfahrenssteuerung der Versorgung von Nervenverletzungen bei schwerem Weichteilschaden wurde von Experten des Konsensusworkshops der 38. Jahrestagung der Deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft für Mikrochirurgie der peripheren Nerven und Gefäße (DAM) erstellt. Es ist jedoch anzumerken, dass es sich nicht um eine evidenzbasierte Leitlinie, sondern um einen rein auf Expertenmeinung basierten Konsens unter Berücksichtigung der aktuellen Datenlage und Evidenz handelt.

## Konsensusstatements

### Behandlungszeitpunkt („Timing“)

In der Literatur finden sich unterschiedlichste Definitionen und Empfehlungen zum richtigen Zeitpunkt der Versorgung von peripheren Nervenverletzungen.

Die AWMF-Leitlinie „Versorgung peripherer Nervenverletzungen (005/010 S3)“ nennt hier die Primärversorgung, bei der eine primäre Nervenkoaptation am Unfalltag bzw. innerhalb von 8–24 Stunden, in geeigneten Fällen auch bis max. 10 Tage nach dem Trauma durchgeführt werden kann. Eine Sekundärversorgung, auch als „delayed repair“ bezeichnet, ist durch eine Versorgung bei reizlosem, nicht infiziertem Revisionsbereich und guter Vaskularisierung innerhalb von 3–6 Wochen, spätestens innerhalb von 6 Monaten, gekennzeichnet. Gründe hierfür können eine unterlassene oder nicht indizierte Primärversorgung (unter anderem im Rahmen von schwereren im Vordergrund stehenden Begleitverletzungen) sein [10].

Chuang teilt dagegen in insgesamt fünf Versorgungszeitpunkte ein: die „Sofort-Versorgung“, welche innerhalb von 2 Tagen erfolgt, die „Früh-Versorgung“ innerhalb von einem Monat, die „verzögerte Versorgung“ innerhalb von 5 Monaten, die „Spät-Versorgung“ in einem Zeitraum zwischen 6 und 12 Monaten nach der Verletzung und die „chronische Versorgung“ nach mehr als einem Jahr seit der Läsion vergangener Zeit [11]. Rosenfield definiert die Primärversorgung innerhalb von 1 Woche, die Sekundärversorgung nach einer Woche [3].

Es besteht Konsens darüber, dass unabhängig von der Schwere der Nervenverletzung (Sunderland I-V) eine möglichst zeitnahe Versorgung nach Unfall erfolgen sollte. Die langsame Regenerationszeit insbesondere nach höhergradigen Verletzungen, sowie die limitierte Reinnervationszeit der Muskulatur als Zielorgan sind die Gründe hierfür. Bei einer frühen Versorgung innerhalb von 72 Stunden begünstigen die lokal noch erhaltenen neurotrophen Substanzen an der Läsionsstelle die Regeneration. Daher definiert das Panel eine Versorgung innerhalb dieser 72 Stunden als optimalen

► **Tab. 1** Einteilung der Versorgungsarten von Nervenverletzungen hinsichtlich ihres Versorgungszeitpunktes.

Versorgungsart	Zeit bis zur Versorgung
Primärversorgung	Innerhalb von 72 Stunden
Verzögerte Primärversorgung	72 Stunden – 1 Woche
Sekundärversorgung	>1 Woche

Zeitpunkt innerhalb des Fensters der Primärversorgung. Eine Versorgung innerhalb eines Zeitraumes von 72 Stunden bis 1 Woche wird als verzögerte Primärversorgung bezeichnet und sollte insbesondere bei schweren begleitenden Weichteilschäden in Betracht kommen, um die Demarkationsphase abzuwarten und die Nervenversorgung und gegebenenfalls Rekonstruktion in sicher durchblutetem Gewebe durchzuführen. Versorgungen nach einem Zeitraum von mehr als einer Woche werden als Sekundärversorgung definiert und sollten im Rahmen komplexer Verletzungen oder erschwerender Versorgungsumstände berücksichtigt werden, bei denen lebensbedrohliche Begleitverletzungen oder ein unklarer Extremitätenerhalt zunächst im Vordergrund stehen und weitergehende Therapieentscheidungen aufgeschoben werden müssen.

### Strategie („Taktik“)

Die chirurgische Strategie bei kombinierten Verletzungen richtet sich nach den in das Verletzungsmuster einbezogenen Strukturen. Hier gibt die AWMF-Leitlinie [10] eine klare Versorgungsreihenfolge vor. Bei bestehenden Frakturen als Begleitverletzung sind diese als erstes zu stabilisieren, um durch spätere Repositionsmanöver nicht die Versorgung von Weichteilstrukturen zu gefährden. Im zweiten Schritt der Notfallversorgung ist dann die Rekonstruktion von verletzten Gefäßen durchzuführen, um eine möglichst zeitnahe Wiederherstellung der Perfusion sicherzustellen. Bei Verletzungen mit bedrohlichem Blutverlust muss die Gefäßversorgung in Ausnahmefällen auch vorgezogen werden. Im dritten Schritt kann dann die Exploration der Nerven erfolgen und eine Entscheidung hinsichtlich der Versorgung (primäre Rekonstruktion versus Rekonstruktion im Intervall) getroffen werden [12]. Das Kompartiment-Syndrom stellt einen Sonderfall dar und erfordert eine individuelle Entscheidung.

Hinlänglich bekannt sind die operativen Techniken zur Versorgung von Nervenverletzungen. Diese beinhalten die primäre End-zu-End-Koaptation, die Rekonstruktion entweder durch körpereigene Nerveninterponate oder durch synthetische Nervenröhrchen („Conduits“), sowie komplexe rekonstruktive Verfahren, wie Nerven-transfers („Neurotisationen“) [3, 13]. Auf eine ausführliche Beschreibung dieser Techniken sei daher an dieser Stelle verzichtet, vielmehr soll deren Anwendung und Auswahl im Rahmen der Versorgungsstrategie bei schwerem Weichteiltrauma beleuchtet werden.

## Allgemeine Aspekte

### Sicherung des Nervenschadens

Bei begleitendem Weichteilschaden ist häufig eine dem sonstigen Standard entsprechende Diagnostik erschwert. Die offene Wund-

situation verhindert in den meisten Fällen eine neurologische Untersuchung mit elektrophysiologischen Maßnahmen. Eine wichtige Rolle kommt der Nervenonographie als relativ einfach anzuwendendes, sicheres und valides Diagnostikum zu, welches wertvolle Hinweise auf den Zustand der nervalen Strukturen liefern kann. Sie ist daher oft bildgebendes Verfahren der ersten Wahl. Technisch kommen in erster Linie hochfrequente Linearschallköpfe >12 MHz zum Einsatz [14]. Entscheidend sind die Verfügbarkeit in der Notfallsituation und die Erfahrung des Untersuchers. Limitierend in dieser frühen Phase für alle bildgebenden Verfahren sind sicherlich das Begleitödem, Hämatom und Suffusionen, welche die Untersuchung technisch wie interpretativ schwierig gestalten können. Lediglich der Kontinuitätsverlust kann mit großer Wahrscheinlichkeit zu diesem Zeitpunkt festgestellt werden.

Die Möglichkeit zur Neuro-MRT-Untersuchung ist derzeit noch nicht flächendeckend verfügbar, oftmals mit langen Wartezeiten verbunden und bei komplexen Verletzungen mit einliegenden Implantaten bisher nicht validiert, bei Fixateur externe Systemen nicht realisierbar. Somit kann eine definitive Festlegung des Schadensmaßes einer Nervenläsion in solchen Situationen nur durch eine orientierende klinische Untersuchung und die anschließende operative Exploration erfolgen. Diese sollte möglichst in Blutleere zur Bestätigung und ausreichenden Beurteilung des Nervenschadens durchgeführt werden. Entscheidend ist hierbei, den Nerven nicht nur über das offene Wundbett umschrieben zu inspizieren, sondern ihn soweit als „erweiterte Freilegung“ darzustellen, bis gesunde Nervenanteile einschließlich gesundem Weichteilgewebe erreicht sind. Je nach Zeitpunkt dieser Exploration können zudem wertvolle Hinweise hinsichtlich der Funktionsfähigkeit des Nervs gewonnen werden, wenn dieser mit einem Nervenstimulator aktiviert und untersucht wird. Bei anliegender Blutsperre ist eine Nervenstimulation jedoch nur innerhalb eines Zeitfensters von ca. 20 Minuten möglich, bevor eine durch die Blutsperre selbst induzierte temporäre Neurapraxie eintritt [15]. Dieser Mechanismus kann bei Nichtbeachten zu falsch-negativen Ergebnissen führen. Bei der Durchführung einer Nervenstimulation muss immer bedacht werden, dass auch bei intakter Nervenstruktur eine Neurapraxie vorliegen kann. Die intraoperativ erhaltenen Befunde müssen exakt dokumentiert werden. Findet sich bei der Exploration eine Kontinuitätsunterbrechung eines Nerven, die nicht primär versorgt werden kann, ist eine Fadenmarkierung der Nervenstümpfe zu empfehlen, um diese bei späteren Eingriffen leichter wieder auffinden zu können.

Nur auf Basis einer solchen umfassenden Inspektion kann die richtige Entscheidung hinsichtlich der Versorgungsstrategie für die Nervenverletzung getroffen werden.

### Versorgungsstrategien

#### Erhaltene Kontinuität

Zeigt sich bei der Exploration, dass der Nerv in seiner Kontinuität erhalten, strukturell nicht massiv geschädigt und er je nach Zusammensetzung elektrisch zu stimulieren ist, kann die Situation so belassen werden. Im Falle von Einengungen, Vernarbungen oder anderen intraneuralen Auffälligkeiten sollte auf jeden Fall eine epineurale Neurolyse, bei Einblutungen oder anderen intraneuralen Auffälligkeiten zusätzlich auch eine umschriebene interfaszikuläre Neurolyse erfolgen [16]. Von einer langstreckigen interfazikulären Neurolyse

kulären Neurolyse ist abzusehen, um sich austauschende Faszikel nicht zu verletzen [17]. Um Vernarbungen des Nerven selbst nach dem „iatrogenen Trauma“ der Neurolyse als auch durch den begleitenden Weichteilschaden zu minimieren, ist im Anschluss eine Ummantelung des Nerven mit Fibrinkleber [18] oder Nervetubes [19] beschrieben. Dies hat in der eigenen Praxis in der Regel gute Resultate gezeigt.

### Unterbrochene Kontinuität

Zeigt die Exploration eine vollständige Durchtrennung des Nerven oder eine Defektverletzung, sind Techniken zur Kontinuitätswiederherstellung anzuwenden. Hierzu zählt auch ein Nervenschaden, bei dem Anteile vielleicht in ihrer Kontinuität noch erhalten, aber so stark geschädigt sind, dass die Läsion einer funktionellen Durchtrennung gleichkommt, was bei Nerven mit motorischen Anteilen durch die Verwendung des Nervenstimulators bestätigt werden kann.

Die optimale Behandlung mit dem bestmöglichen Langzeitergebnis ist eine spannungsfreie, primäre Nervenkoaptation innerhalb von 72 Stunden [20, 33]. Es besteht Einigkeit darüber, dass eine direkte Koaptation der Nervenenden dann durchgeführt werden kann, wenn die Nervenstümpfe spannungsfrei aneinander liegen und die Wunde nicht verunreinigt ist. Sollte eine primäre Koaptation nicht möglich sein, kommen hier bereits die Techniken einer Rekonstruktion über körpereigene Nerveninterponate (z. B. Suralisgrafts) oder Conduits in Betracht. Jedoch muss die Indikation dafür im Primäreingriff umsichtig gestellt werden, da das autologe Spendermaterial nur limitiert zur Verfügung steht. Die Rekonstruktion im Intervall, nach Erreichen von sauberen und gut durchbluteten Wundverhältnissen ist der Primärversorgung in solchen Fällen vorzuziehen.

Kommerzielle Nervenconduits werden inzwischen von zahlreichen Herstellern angeboten. Im Wesentlichen unterscheiden sich in ihren Zusammensetzungen und können aus Kollagen, aus Milchsäureverbindungen, aus Polyglykolkewebe oder Chitosanen bestehen. Sie dienen alle der Überbrückung von Nervendefekten mit dem Ziel, die Hebmorbidity eines autologen Nerveninterponates zu vermeiden [21,22]. Im Falle von Nervendefekten im Rahmen von begleitendem Weichteilschaden kann die Verwendung z. B. von körpereigenen Venen jedoch dem Gebrauch von Fremdmaterial aufgrund einer möglichen höheren Infektionsgefahr vorzuziehen sein, jedoch nur bei limitierter Defektstrecke.

Bei der Kalkulation der nötigen Länge ist immer auch das vollständige Bewegungsausmaß der betroffenen Gelenke mit einzu beziehen [23].

Im Falle von begleitenden Weichteilverletzungen müssen mehrere Voraussetzungen vorhanden sein oder geschaffen werden, um eine primäre Nervenversorgung durchführen zu können. So darf kein nekrotisches oder minderperfundiertes Gewebe im Wundbett mehr vorhanden sein, ebenso müssen die Weichteile sauber und frei von jeglicher Kontamination oder von Infektionszeichen sein. Es können zunächst auch chirurgische Wundsanierungsmaßnahmen erforderlich sein. Über serielle chirurgische Etappendebridements kann schließlich ein adäquater Wundgrund erzielt werden. Zur temporären Defektdeckung können während dieser Phase auch Unterdruckogverbände (Vakuumentherapie) oder feuchte Schaumstoffauflagen (z. B. Coldex) angewendet werden. Die Débridementphase muss jedoch vor definitiver Versorgung der Nervenverletzung abgeschlossen sein, was den Zeitpunkt der Nervenkoaptation oder-

rekonstruktion deutlich verschieben kann. Weichteildefekte sollten zur Vermeidung der Entstehung irreversibler Schäden an den exponierten Neurovaskulären Strukturen schnellstmöglich adäquat rekonstruiert werden. Der Einsatz o. g. Verbandssysteme sollte nicht länger als maximal 3–5 Tage betragen.

Zudem kann die Positionierung des Nerven in einer Gleitschicht (Muskelfaszie, Septum) das Risiko von Vernarbungen reduzieren und sollte, wo immer möglich, angestrebt werden, um eine sicher vaskularisierte Bedeckung für die Regeneration zu erreichen.

Die Vorteile einer solchen Primärversorgung sind ein frühestmöglicher Beginn der Reinnervationszeit und damit verbunden eine möglichst kurze Denervationszeit der sensiblen und motorischen Zielorgane. Auch ist in den meisten Fällen bei der Primärversorgung die elektrische Stimulation des (motorischen) distalen Stumpfes noch möglich, was wertvolle Hinweise für die Orientierung der Nervenstümpfe bei der Koaptation geben kann. Die Narbenbildung ist weniger ausgeprägt. Nicht zuletzt ist natürlich ein einzeitiges Vorgehen auch weniger belastend für den Patienten.

### Weichteilrekonstruktion

Ist ein primärer Wundverschluss nicht zu erreichen, muss eine zügige Rekonstruktion des Weichteilmantels angestrebt werden. Hierfür ist nach abgeschlossener Debridementphase auf das gesamte Armamentarium der Plastischen- und Mikrochirurgie zurückzugreifen. Ein sicherer, suffizienter Wundverschluss mit einer ausreichenden Weichteilbedeckung ist oft nicht mittels einer einfachen Hauttransplantation zu erreichen, vielmehr sind je nach Lokalisation und Wundgröße gefäßgestielte oder noch häufiger freie Lappenplastiken an den Extremitäten bei kombinierten Verletzungen erforderlich. Nicht selten kann auch die definitive Nervenversorgung erst im Rahmen der mikrochirurgischen Weichteilrekonstruktion erfolgen, was einen hohen chirurgischen Aufwand und Zeitaufwand erfordert.

### Spezialisiertes Zentrum

Grundsätzlich sollen derartige komplexe Nervenverletzungen mit begleitendem Weichteilschaden von einem spezialisierten und hochqualifizierten Behandlungsteam, welches zudem über eine ausreichende mikrochirurgische Ausstattung verfügt, behandelt werden. Dies trifft insbesondere für die Läsion von Stammnerven zu. In entsprechenden Fällen sollte daher die frühe Verlegung eines solchen Patienten zur definitiven Versorgung des Weichteilschadens und der Nervenverletzung in ein Zentrum erwogen werden. Die primäre Weichteilbedeckung kann bis dahin über eine temporäre Wundversiegelung erreicht werden.

### Amputationsverletzungen – ein Sonderfall der Nervenverletzung mit schwerer Weichteilverletzung

Einen Sonderfall stellen Nervenverletzungen im Rahmen von Amputationsverletzungen dar, bei denen eine Replantation angestrebt werden soll. Hier ist in besonderem Maße die Weichteilsituation als kritisch einzuschätzen. Gegebenenfalls kann hier durch eine Verkürzung des zu replantierenden Extremitätenteils eine sichere Wundbedeckung der Nerven erzielt werden. Sind die Nerven selbst langstreckig durch das Trauma oder durch Verschmutzungen lädiert, sollte ein Ersatz mittels Nerveninterponaten, zu einem späteren Zeitpunkt, großzügig indiziert werden.

## Schussverletzungen

Eine besonders komplexe Form kombinierter Nervenverletzungen mit Weichteilschaden stellen Schussverletzungen dar, welche im Panel aufgrund des kombinierten thermomechanischen „Hochsanz-Mechanismus“ mit weitläufiger Nervenschädigung und Schädigung der umgebenden Weichteile als eigene Entität gesehen werden. Diese sollten zunächst einer sicheren Wundkonsolidierung zugeführt werden und eher sekundär hinsichtlich ihrer Nervenläsion rekonstruiert werden.

## Frakturen als Begleitverletzung

1.49% aller Frakturen der oberen Extremität und 1.77% aller Frakturen der unteren Extremität sind mit Nervenverletzungen vergesellschaftet [1]. Gerade bei Crush-Injuries muss bei der Erstversorgung eine osteosynthetische Versorgung der Fraktur erfolgen. Das Vorgehen zur Versorgung der begleitenden Nervenverletzung kann problematisch sein. Die AWMF Leitlinie empfiehlt: „Falls bei knöcherner Verletzung in Nervnähe eine offene Osteosynthese notwendig ist, sollte eine sichere Nervendarstellung und entsprechende Befunddokumentation vorgenommen werden.“ [10]. Dem schließt sich das Panel uneingeschränkt an. Die primäre Versorgung des dargestellten Nervenschadens ist aus oben dargelegten Gründen nicht immer möglich. Umso wichtiger ist jedoch neben der Nervendarstellung und Schadensdokumentation auch die Markierung der Nervenenden (z. B. mit blauem Nahtmaterial), um in den weiteren Eingriffen das Wiederauffinden der Stümpfe zu vereinfachen. Ist bei begleitenden Frakturen nach der Osteosynthese ein suffizienter Wundverschluss möglich und stehen keine anderen vital gefährdenden Aspekte im Raum, sollte auch die Primärversorgung der Nervenverletzung in diesem Eingriff erfolgen. Sind zunächst wundkonditionierende Schritte erforderlich, sollte die Versorgung der Nervenverletzung erst nach Erreichen eines ausreichend sauberen und durchbluteten Wundbettes geplant werden.

## Nicht mehr zu rekonstruierende Nervenverletzungen

Immer wieder gibt es auch Situationen, bei denen eine direkte lokale Rekonstruktion einer Nervenverletzung nicht möglich ist. Gründe hierfür können ein schwerster Weichteilschaden mit Nichtauffindbarkeit der Nervenstümpfe oder andere im Vordergrund stehende Verletzungen (z. B. Nervenverletzung bei begleitendem Abriss der A. und V. subclavia und Pleuraverletzung) sein. In solchen Fällen ist dann eine sekundäre lokale Exploration sehr gefahrenträchtig und sollte vermieden werden. Des Weiteren kann eine kritische Gesamtsituation eines Patienten, die nur einen zügigen Weichteilverschluss ohne aufwändige rekonstruktive Maßnahmen zulässt, die Nervenversorgung unmöglich machen. In solchen Fällen kann es sinnvoll sein, auf eine proximale Nervenrekonstruktion zu verzichten und stattdessen distale Techniken, wie Neurotisationen oder motorische Ersatzplastiken anzuwenden.

Generell stellen Neurotisationen eine sehr gute Methode dar, um eine schnellere und funktionell gute Reinnervation zu erzielen. Sie haben den Vorteil, dass sie eine proximale Nervenläsion in eine distale Läsion überführen und somit die Reinnervationsstrecke und -zeit signifikant verkürzen [15]. Im Vergleich zu Sehnen-transfers ermöglichen sie zudem eine differenzierte Ansteuerung der Originalmuskulatur. Des Weiteren können sie in End-zu-Seit Technik auch augmentierend, sozusagen als „Babysitter“ verwen-

det werden, wenn eine spätere Reinnervation von proximal noch zu erwarten ist [24]. Nicht zuletzt bieten Neurotisationen auch die Möglichkeit einer sensiblen Reinnervation, was für die Gebrauchsfähigkeit der Hand von entscheidendem Nutzen sein kann. Bisher dienten nur lokale sensible Lappenplastiken der Wiedererlangung der Sensibilität insbesondere die zugewandten Seiten von Daumen und Zeigefinger [25]. ► **Abb. 1** verdeutlicht eine solche Situation.

Bei nicht möglicher Nervenrekonstruktion, augmentierend bei zu erwartender Teil-Reinnervation oder im Falle ausbleibender Reinnervation nach Rekonstruktion können motorische Ersatzplastiken sichere und gute Ergebnisse liefern. Unter einer motorischen Ersatzplastik ist der Ersatz funktionsloser Muskelgruppen durch gesunde Muskel-Sehnen-Einheiten zu verstehen, die jeweils umgelagert werden. Dabei wird entweder nur einer der Ansatzpunkte des gesunden Spendermuskels auf den erkrankten Muskel umgelagert oder die gesamte Muskel-Sehnen-Einheit mit den versorgenden Nerven und Blutgefäßen in das Zielgebiet transplantiert [26]. Somit kann zumindest eine Teilverbesserung der Funktion bei überschaubarem Operationsrisiko erreicht werden. ► **Abb. 2** zeigt beispielhaft einen Latissimus-dorsi-Transfer als Ersatzplastik für eine ausgefallene Bizepsfunktion.

### WICHTIGSTE KONSENSUS-STATEMENTS

- Das Schadensausmaß einer komplexen Nervenläsion kann in der Frühphase nur durch die operative Exploration bestimmt werden.
- Die intraoperativ erhaltenen Befunde sollen exakt dokumentiert werden.
- Ein sauberer, gut durchbluteter Wundgrund mit und ausreichender Weichteilbedeckung ist Voraussetzung für die definitive Nervenversorgung.
- Die Débridementphase soll vor definitiver Versorgung der Nervenverletzung abgeschlossen sein.
- Ein suffizienter Wundverschluss bei begleitendem Weichteilschaden ist oft nur mit mikrochirurgischen Lappenplastiken möglich.
- Zeigt der Nerv sich in seiner Kontinuität erhalten, kann bei adäquater Weichteildeckung eine reine Freilegung bzw. epineurale oder auch interfaszikuläre Neurolyse ausreichen. (siehe oben)
- Bei Kontinuitätsunterbrechung ist die optimale Behandlung mit dem bestmöglichen Langzeitergebnis eine spannungsfreie, primäre Nervenkoaptation innerhalb von 72 Stunden.
- Es besteht Einigkeit darüber, dass eine direkte Koaptation der Nervenenden dann durchgeführt werden kann, wenn die Nervenstümpfe spannungsfrei aneinander liegen und die Wunde nicht verunreinigt ist.
- Die Vorteile einer Primärversorgung sind ein frühestmöglicher Beginn der Reinnervationszeit und eine möglichst kurze Denervationszeit der sensiblen und motorischen Zielorgane.
- Der Nachteil der frühen Exploration/Rekonstruktion kann eine nicht ausreichend klare Demarkation des Nervenschadens sein.

- Falls eine primäre Koaptation nicht möglich ist, soll eine Rekonstruktion über Nerveninterponate oder Conduits erfolgen.
- Komplexe Nervenverletzungen mit begleitendem Weichteilschaden sollten von einem spezialisierten und hochqualifizierten Behandlungsteam, welches über eine ausreichende mikrochirurgische Ausstattung verfügt, behandelt werden. Die frühe Verlegung eines solchen Patienten zur definitiven Versorgung des Weichteilschadens und der Nervenverletzung in ein Zentrum sollte daher in Erwägung gezogen werden.
- Wenn eine Nervenrekonstruktion nicht möglich ist oder die Reinnervation ausgeblieben ist, können als Rettungseingriffe sowohl Neurotisationen, als auch motorische Ersatzplastiken gute Ergebnisse liefern.

## Nachbehandlung

### Frühe Nachbehandlung

Unter einer adäquaten physikalischen [27] und ergo-physiotherapeutischen Behandlung kann das Bewegungsausmaß erhalten und ein Maximum an motorischer Funktion und Reinnervation der Muskulatur erzielt werden. Die funktionelle Nachbehandlung dieser schweren Verletzungsmuster sollte an der oberen Extremität von spezialisierten und ggf. zertifizierten Handtherapeuten durchgeführt werden.

Die Nachbehandlung umfasst je nach Art des verletzten Nervs mehrere Aspekte. Hinsichtlich der funktionellen Sensibilität nach peripheren Nervenverletzungen finden sich in der Literatur Belege [28,29] für eine Verbesserung des Gesamtergebnisses unter Anwendung spezieller rehabilitativer Techniken. Insbesondere fokussiert sich die Nachbehandlung aber auf die funktionell motorischen Aspekte, welche entsprechend der jeweiligen Heilungsphasen mit unterschiedlichen Techniken durchgeführt wird [30]. Unterstützend können spezifisch angepasste Schienen eingesetzt werden, die der Stabilisierung, Korrektur, Lagerung und Funktionsverbesserung eines Extremitätenabschnitts und seiner Gelenke dienen [31].

Es besteht Konsens darüber, dass eine frühe Freigabe der Beweglichkeit bei Nervenverletzungen im Hinblick auf ein möglichst gutes funktionelles Langzeitergebnis anzustreben ist. Gerade bei schweren Begleitverletzungen und Weichteilschäden kann dies jedoch nicht oder nur verzögert möglich sein. Um die Nervennähte zu schützen, sollte innerhalb der ersten 3 Wochen nach Maßgabe des Operateurs eine Limitation von extremen Bewegungsausmaßen erfolgen, jedoch keine dauerhafte Ruhigstellung. Eine kurzfristige Ruhigstellung kann für die Ödemrückbildung in der akuten postoperativen Inflammationsphase von Vorteil sein. Essentieller Baustein der frühen postoperativen Therapie ist eine gezielte, stufenangepasste analgetische Therapie. Neben der Abdeckung der Operationsschmerzen dient diese auch der Prophylaxe von neuropathischen Schmerzzuständen.

Im stationären Aufenthalt können solche komplexen Unfallfolgen mit der „Komplexbehandlung Hand“ gemäß G-DRG und entsprechenden Kodes aus dem OPS-Verzeichnis als Möglichkeit zur

frührehabilitativen Behandlung erfolgen. Ein engmaschiger Austausch zwischen Therapeuten und Ärzten ist hierbei wesentlich.

### Rehabilitation und Heilverfahrenssteuerung

Nervenverletzungen gehen mit vielschichtigen klinischen Symptomen einher, die den Nerven selbst, die zumindest temporär denervierte Zielmuskulatur, aber auch die betroffenen Gelenke beinhalten. Schnell führen sie auch zu Anschlussbeschwerden eigentlich nicht betroffener Körperareale. Zudem ist deren Heilungsprozess sehr langwierig. Diese Aspekte machen eine gezielte Rehabilitation zu einem essentiellen Baustein in der multiprofessionellen Versorgung von Nervenläsionen. Eine solche Rehabilitationsmaßnahme fokussiert nicht nur die medizinischen Aspekte dieser Verletzungen, sondern beinhaltet auch weitreichende Maßnahmen zur Reintegration in das soziale Umfeld und zur beruflichen Wiedereingliederung. Hier haben gesetzlich unfallversicherte Patienten (BG für Deutschland, AUVA für Österreich und SUVA für die Schweiz) einen breiteren Zugang zu rehabilitativen Maßnahmen. Ein praktikabler Standard in der Rehabilitation von Nervenverletzungen für Patienten anderer Versicherungsträger fehlt sowohl für den ambulanten, als auch für den stationären Bereich.

Im Panel wurden daher grundlegende Charakteristika für solche Rehabilitationskonzepte definiert.

Generell sollte eine auf Nervenverletzungen spezialisierte Rehabilitationsmaßnahme von einem multiprofessionellen Team durchgeführt werden, welches neben der ärztlichen (handchirurgischen) Leitung, Psychologen, Schmerztherapeuten, Physiotherapeuten, Ergotherapeuten, medizinische Bademeister, Sporttherapeuten, Neurologen, Sozialdienstmitarbeiter und Reha-Manager der jeweiligen Kostenträger umfassen sollte. Eine regelmäßige differenzierte Befunderhebung ist zur Dokumentation des Heilungsprozesses und des Rehabilitationserfolges wichtig.

Zur Rehabilitation der sensiblen Defizite nach Nervenverletzungen finden sich in der wissenschaftlichen Literatur viele Belege für die Wirksamkeit unterschiedlichster Techniken [28,29]. Insbesondere nach Fingernervenläsionen können diese zu einer Verbesserung der funktionellen Sensibilität der Hand führen. Hierzu zählen Sensibilisierungstrainings, Lokalisationstrainings, Diskriminationstrainings, Desensibilisierungstrainings, Graded Motor Imagery Programme (GMIP) inklusive Spiegeltherapie, kognitiv-therapeutische Übungen (nach Perfetti) und Koordinationstrainings.

Zur Verbesserung der muskulären Funktion liegt der Fokus auf Muskelfunktionstrainings, Koordinationstrainings wie Propriozeptive Neuromuskuläre Fazilitation (PNF), Belastungstrainings in der Medizinische Trainingstherapie, Belastungstrainings mit Realitäts- und Belastungsbezug, sowie der Rehabilitationsphase angepassten kontrollierte Eigenübungsprogrammen.

Wenn diverse Nerventransfers zur Anwendung gekommen sind, ist eine dem Regenerationsfortschritt angepasste EMG-getriggerte Neurorehabilitation sinnvoll. Dies ermöglicht es dem Patienten die neue ungewohnte cognitive Landschaft zu erkunden und frühzeitig in Funktion umzusetzen.

Je nach Behandlungsphase stehen bei der Rehabilitation von Nervenverletzungen unterschiedliche Aspekte im Vordergrund. Das Training soll dem Patienten eine weitgehend eigenständige Lebensführung entsprechend dem jeweiligen Stadium des Heilungsverlaufes ermöglichen [30].



► **Abb. 1** a–c: Pat. männl. 58 J., offene Luxationen Ellenbogengelenk links mit Zerreißung des Nervus radialis und weiteren Handgelenksverletzungen (diese bleiben an dieser Stelle unerwähnt), welche eine primäre Nervenrekonstruktion zunächst nicht zuließen. d–e: Erste Versorgungs- Gelenkreposition, Debridement, Markierung der Strukturen ohne Rekonstruktion des Nervus radialis, Wundverschluss und Anlage Fixateur externe. Nach Weichteilkonsolidierung Wechsel auf Bewegungsfixateur, Spalthauttransplantation der Weichteildefekte. f–h: Nach 4 Wochen Durchführung einer Neurotisation: Flexor digitorum superficialis (FDS)-Ast auf Extensor carpi radialis brevis (ECRB)-Ast, Flexor carpi radialis (FCR)-Ast auf Nervus interosseus posterior (NIP) sowie Nervus cutaneus antebrachii lateralis auf Ramus superficialis nervi radialis (RSNR). [Sup. = Supinatorast des N. radialis].



► **Abb. 2** a–b: Pat., männl. 55 J. Polytrauma mit subtotaler Weichteilamputation linker Oberarm (Abriss Arteria brachialis, Nervus musculocutaneus, Musculus biceps brachii, Musculus brachialis, Décollementverletzung). Zudem traumatisches Subduralhämatom, Subarachnoidalblutung, Kalottenoccipitalfraktur mit Einstrahlung in das Foramen Magnum, Prellung und Decollement Unterschenkel, Knie und Fuß links als weitere, im Vordergrund stehende Verletzungen. Im erstversorgenden Krankenhaus erfolgte hinsichtlich der Verletzung des Armes daher nur eine Revascularisation durch Naht der A. brachialis und ein temporärer Wundverschluss. c–d: Nach Verlegung in unsere Klinik wurde zunächst der sichere Wundverschluss über mehrere VA-Instill-Wechsel und schließlich eine Spalthauttransplantation angestrebt. e–g: 3 Monate nach Trauma: funktioneller Bizepsersatz mittels gestieltem Latissimus dorsi Transfer zur Rekonstruktion der ausgefallenen Ellenbogenbeugung.



In der *akuten Phase* müssen in den ersten Wochen unter Schutz der Wunde und der Nervennaht selbst mehrere Ziele erreicht werden. Die Schmerzprophylaxe bzw. -reduktion steht dabei im Vordergrund, welche durch eine schmerztherapeutische Kombinationstherapie mit unterschiedlichen Substanzklassen (NSAR, Antidepressiva, Neuroleptika, Versatispflaster etc.) erreicht werden kann. Eine Ödemreduktion sollte zunächst über entstauende Lymphdrainage und später mit einer erhaltenden Kompressionstherapie über maßangefertigte Kompressionsversorgungen behandelt werden. Neben der passiven Mobilisation der Gelenke zur Kontrakturprophylaxe spielt trotz fehlender Evidenz die Strombehandlung der zu reinnervierenden Muskulatur eine große Rolle in der Rehabilitation von Nervenverletzungen. Von Beginn an müssen auch Sensibilitätstraining bzw. Desensibilisierungstraining fester Bestandteil der Therapie sein.

Die mittlere Phase beinhaltet schwerpunktmäßig die Narbenbildung und -reifung und setzt nach 3–4 Wochen ein. Hier stehen insbesondere die Narbenbehandlungen mit all ihren Komponenten im Vordergrund. Sie sollte von der Narbenmassage über die Narbenpflege mit geeigneten, pflegenden Externa bis gegebenenfalls zu apparativen Techniken wie Vakuumtherapie (Endermologiegeräte, Saug-Druck-Geräte) reichen. Für die Narbenbehandlung essentiell ist zum einen die Kompressionstherapie, die über maßangefertigte Versorgungen mit unterschiedlichen Materialien erfolgen sollte und zum zweiten die Behandlung mit Silikon. Dieses kann sowohl über silikonhaltige Externa, bei kleinen Narbenarealen über Silikonpflaster, aber auch über nach dem Gipsabdruckverfahren maßangefertigte Silikonauflagen und Silikonputties erfolgen. Mit der Narbenbildung zusammenhängend ist dann auch die passive und aktive Gelenkmobilisation, die manuelle Therapie und falls erforderlich auch Fazilitationstechniken wie die Propriozeptive Neuromuskuläre Fazilitation (PNF). Die in der akuten Phase begonnenen Maßnahmen sollen fortgeführt werden. Die Reinnervation der einzelnen Muskelgruppen kann durch gezieltes sensomotorisches Training und durch Spiegeltherapie unterstützt werden. Im Falle von durchgeführten Nerventransfers oder auch motorischen Umlagerungsplastiken ist die Adaptation des motorischen Kortex an die neuen Bewegungsmuster zur Erreichung der Zielbewegung zu unterstützen. Spezifische Trainingseinheiten zum Wiedererlernen der Alltagsaktivitäten (ADL-Training – Activities of daily life) können überbrückend wertvolle Hilfen geben.

Langfristige Ziele sind natürlich die vollständige Wiederherstellung der Funktion. Sollte diese nur eingeschränkt zurückkehren, ist der größtmögliche aktive und passive Erhalt der Beweglichkeit, der Erhalt sensomotorischer Funktionen, der Kraft, der Ausdauer und der Koordination anzustreben.

Zum Abschluss der Rehabilitationsphase rücken dann berufsorientierte Maßnahmen in den Vordergrund. Die berufliche Reintegration muss geplant werden. Dafür kann es erforderlich sein, berufsspezifische Funktionen gezielt zu trainieren, wie es beispielsweise in einer sogenannten Tätigkeitsorientierten Rehabilitation (TOR) im Rahmen des berufsgenossenschaftlichen Heilverfahrens erfolgt. Auch die Anpassung von spezifischen Heil- und Hilfsmitteln, wie Versorgung mit Arbeitshandschuhen, Griffverdickungen etc. muss in dieser Phase geprüft werden. Sollte das ursprüngliche berufliche Profil nicht mehr erreicht werden, können Leistungsprofile erstellt [32] und entsprechende weiterqualifizierende Maßnahmen und

Umschulungen eingeleitet werden. Eine wesentliche Rolle kommt in dieser Phase dem Reha Management der Unfallversicherungs-träger und dem Sozialdienst zu, die diese Schritte in die Wege leiten. Eine enge Zusammenarbeit zwischen dem Behandlungsteam und diesen Berufsgruppen ist entscheidend, um für jeden Patienten eine individuell angepasste Lösung zu finden.

## Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Nervenverletzungen mit begleitendem Weichteilschaden stellen eine besondere Herausforderung für den versorgenden Chirurgen dar und sollten in spezialisierten Zentren behandelt werden. Die für eine bestmögliche Reinnervation notwendige saubere, gut durchblutete und mit einer suffizienten Weichteilbedeckung versehene Wundsituation muss häufig erst durch vorgeschaltete Débridementschritte und plastisch rekonstruktive Maßnahmen erreicht werden. Eine spannungsfreie Primärkoaptation ist nach wie vor der Goldstandard. Ist diese nicht möglich, kommen defektüberbrückende Techniken, wie Nerveninterponate oder Conduits in Betracht. Häufig ist aufgrund der Schwere des Weichteilschadens eine lokale Rekonstruktion nicht möglich oder der Reinnervationserfolg bleibt aus, sodass als Rettungsoperationen distale Nerventransfers oder motorische Ersatzplastiken durchgeführt werden müssen. Unabhängig von der gewählten Versorgungsform ist eine frühe, spezialisierte Rehabilitation unabdingbar. Eine Ruhigstellung sollte nur kurzweilig über wenige Tage erfolgen und vor allem extreme Bewegungsausmaße abfangen.

## Interessenkonflikt

Prof. Dr. U. Kneser erhielt Forschungsgelder von der Firma MEDOVENT zur Durchführung einer prospektiven randomisierten klinischen Studie mit Reaxon Nerve Guides.

## Über die Autoren



### PD Dr. Leila Harhaus-Wähler

ist Geschäftsführende Oberärztin der Klinik für Hand-Plastische und Rekonstruktive Chirurgie – Schwerbrandverletzentzentrum der Berufsgenossenschaftlichen Unfallklinik Ludwigshafen und vertritt das Fach Plastische Chirurgie an der Universität Heidelberg in Forschung und Lehre. Sie studierte Medizin an der Universität Mainz und

Freiburg. Ihre Facharztausbildung absolvierte sie am Klinikum Mönchengladbach, an der Universitätsklinik Göttingen und an der Berufsgenossenschaftlichen Unfallklinik Ludwigshafen. Es schloss sich ein einjähriges mikrochirurgisches Fellowship am Chang Gung Memorial Hospital in Taipeh, Taiwan an. Ihre klinischen Schwerpunkte sind die Handchirurgie, die rekonstruktive Mikrochirurgie, die periphere Nerven Chirurgie und die Rehabilitation von Handverletzten sowie Verbrennungspatienten. Wissenschaftlich beschäftigt sie sich mit der Verbesserung der osteoporotischen Frakturheilung durch verschiedene klinische und experimentelle Therapieansätze sowie mit der künstlichen Generierung von vaskularisiertem Knorpelersatzgewebe. Außerdem wertet sie auch die Effektivität und die Effizienz der Verbrennungsrehabilitation wissenschaftlich aus.

## Literaturverzeichnis

- [1] Taylor CA, Braza D, Rice JB et al. The incidence of peripheral nerve injury in extremity trauma. *Am J Phys Med Rehabil* 2008; 87: 381–385
- [2] Noble J, Munro CA, Prasad VS et al. Analysis of upper and lower extremity peripheral nerve injuries in a population of patients with multiple injuries. *J Trauma* 1998; 45: 116–122
- [3] Rosenfield J, Paksima N. Peripheral nerve injuries and repair in the upper extremity. *Bull Hosp Jt Dis* 2002; 60: 155–61
- [4] Matejčík V. Surgical treatment of peripheral nerve injuries in upper extremities. *Acta Chir Plast* 2002; 44: 80–5
- [5] Eser F, Aktekin LA, Bodur H et al. Etiological factors of traumatic peripheral nerve injuries. *Neurol India* 2009; 57: 434–437
- [6] Kouyoumdjian JA. Peripheral nerve injuries: a retrospective survey of 456 cases. *Muscle Nerve* 2006; 34: 785–788
- [7] Wee AS, Truitt NR, Smith LD. Type and frequency of peripheral nerve injuries encountered in a clinical neurophysiology laboratory. *J Miss State Med Assoc* 2006; 47: 67–71
- [8] Rosberg HE, Carlsson KS, Hojgard S et al. Injury to the human median and ulnar nerves in the forearm – Analysis of costs for treatment and rehabilitation of 69 patients in southern Sweden. *J Hand Surg Br* 2005; 30: 35–39
- [9] Lad SP, Nathan JK, Schubert RD et al. Trends in median, ulnar, radial and brachioplexus nerve injuries in the United States. *Neurosurgery* 2010; 66: 953–60
- [10] AWMF. 005/010 S3-Leitlinie: Versorgung peripherer Nervenverletzungen aktueller Stand: 06/2013
- [11] Chuang DC. Debates to personal conclusion in peripheral nerve injury and reconstruction: A 30-year experience at Chang Gung Memorial Hospital. *Indian J Plast Surg* 2016; 49: 144–150
- [12] Hosalkar HS, Matzon JL, Chang B. Nerve palsies related to pediatric upper extremity fractures. *Hand Clin* 2006; 22: 87–98
- [13] Trehan SK, Model Z, Lee SK. Nerve Repair and Nerve Grafting. *Hand Clin* 2016; 32: 119–25
- [14] Schwarz D, Pedro MT, Brand C et al. Radiologe; DOI:10.1007/s00117-017-0207-1
- [15] Mackinnon S. *Nerve Surgery*. New York: Thieme; 2015
- [16] Mazal PR, Millesi H. Neurolysis: is it beneficial or harmful? *Acta Neurochir Suppl* 2005; 92: 3–6
- [17] Millesi H, Berger A, Meissl G. The interfascicular nerve grafting of the median and ulnar nerves. *J Bone Jt Surg* 1972; 54: 722–50
- [18] Sameem M, Wood TJ, Bain JR. A systematic review on the use of fibrin glue for peripheral nerve repair. *Plast Reconstr Surg* 2011; 127: 2381–90
- [19] Neubrech F, Heider S, Otte M et al. Nerve Tubes for the Repair of Traumatic Sensory Nerve Lesions of the Hand: Review and Planning Study for a Randomised Controlled Multicentre Trial. *Handchir Mikrochir Plast Chir* 2016; 48: 148–54
- [20] Dornseifer U, Matiasek K, Fichter MA et al. Surgical therapy of peripheral nerve lesions: current status and new perspectives. *Zentralbl Neurochir* 2007; 68: 101–110
- [21] Lohmeyer JA, Kern Y, Schmauss D et al. Prospective clinical study on digital nerve repair with collagen nerve conduits and review of literature. *J Reconstr Microsurg* 2014; 30: 227–234
- [22] Mackinnon SE. Technical use of synthetic conduits for nerve repair. *J Hand Surg Am* 2011; 36: 183
- [23] Millesi H, Zoch G, Rath T. The gliding apparatus of peripheral nerve and its clinical significance. *Ann Chir Main Memb Super* 1990; 9: 87–97
- [24] Baltzer H, Woo A, Oh C et al. Comparison of Ulnar Intrinsic Function following Supercharge End-to-Side Anterior Interosseous-to-Ulnar Motor Nerve Transfer: A Matched Cohort Study of Proximal Ulnar Nerve Injury Patients. *Plast Reconstr Surg* 2016; 138: 1264–1272
- [25] Wilhelmi BJ, Lee WPA. Neurosensory free flaps. In: Slutzky DJ, Helmtz VR (eds.) *Peripheral nerve surgery*. Churchill Livingstone; 2006
- [26] Gohritz A, Fridén J, Herold C et al. Ersatzoperationen bei Ausfall motorischer Funktionen an der Hand. *Unfallchirurg* 2007; 110: 759–776
- [27] Bond TJ, Lundy J. Physical therapy following peripheral nerve surgeries. *Clin Pediatr Med Surg* 2006; 23: 651–6
- [28] Oud T, Beelen A, Eijffinger E et al. Sensory re-education after nerve injury of the upper limb: a systematic review. *Clin Rehabil* 2007; 21: 483–494
- [29] Rinkel WD, Huisstede BM, van der Avoort DJ et al. What is evidence based in the reconstruction of digital nerves? A systematic review. *J Plast Reconstr Aesthet Surg* 2013; 66: 151–64
- [30] Skirven T, Callahan A. Therapist’s Management of peripheral nerve injuries. In: Hunter, Mackin, Callahan (Hrsg) *Rehabilitation of the hand and upper extremity*. Mosby; 2002
- [31] Koesling C. Schienenbehandlung, in: Scheepers C, Steding-Albrecht U, Jehn P (Hg) *Ergotherapie – Vom Behandeln zum Handeln: Lehrbuch für die theoretische und praktische Ausbildung*. Stuttgart: Thieme; 2007
- [32] Meiners PM, Coert JH, Robinson PH et al. Impairment and employment issues after nerve repair in the hand and forearm. *Disability and Rehabilitation* 2005; 27: 617–623
- [33] Krug C, Holzbach T, Giunta RE. *Periphere Nervenverletzungen*. *Handchirurgie Scan* 2015; 1: 57–69