

Traumatische Läsionen Peripherer Nerven - Fallorientiert

Indikationen, Techniken, Timing

Prof. Dr. Thomas Kretschmer

Direktor Universitätsklinik für Neurochirurgie –
Evangelisches Krankenhaus Oldenburg (Old)

INHALTSVERZEICHNIS

LERNZIELE	3
EINLEITUNG	3
VORKOMMEN UND RELEVANZ	3
VERLETZUNGSTYPEN	4
DIAGNOSTIK UND VERLETZUNGSABHÄNGIGE PROGNOSE	5
ANAMNESE UND UNTERSUCHUNG	5
GERÄTEDIAGNOSTIK	5
VERLETZUNGSARTEN	7
NERVABHÄNGIGE PROGNOSE	11
OPERATIONSINDIKATIONEN	11
INDIKATIONEN FÜR EINE OPERATIVE VERSORGUNG	12
KOMPLETTER AUSFALL	12
INKOMPLETTER AUSFALL	13
CHIRURGISCH BEHANDELBARE NEUROGENE SCHMERZEN	14
TIMING EINER OPERATION	16
OPERATIONSVERFAHREN	18
FREILEGUNG	18
INTRAOPERATIVE DIAGNOSTIK	18
DEKOMPRESSION UND NEUROLYSE	19
END-ZU-END NAHT	19
TRANSPLANTATION	20
TEILTRANPLANTATION (SPLIT REPAIR)	20
KOMBINATIONSVERFAHREN BEI PLEXUSLÄSIONEN	20
NACHBEHANDLUNG UND ERGEBNISSE	21
KASUISTIKEN ZUM VERDEUTLICHEN DER PRINZIPIEN	21
TRANSAXILLÄRE REKONSTRUKTION DES N. AXILLARIS ÜBER KOMBINIERT VENTRALEN UND DORSALEN ZUGANG MIT 2 x 15 CM SURALISINTERPONAT,	21
REKONSTRUKTION DES N. RADIALIS AM LINKEN OBERARM NACH HUMERUSFRAKTUR	23
LÄSION DES N. ULNARIS IN KONTINUITÄT INFOLGE DISLOZIERTER UNTERARMFRAKTUR MIT AUSBLEIBENDER FUNKTIONELLER REGENERATION	24
FRÜH SEKUNDÄRE REKONSTRUKTION DES N. ULNARIS NACH STUMPFER ZERMALMUNG AUF ELLENBOGENHÖHE.	25
KOMBINIERTE NERVENVERLETZUNG MIT DURCHTRENNUNG DES N. MEDIANUS UND TEILDURCHTRENNUNG DES N. ULNARIS AUF HÖHE DER ELLENBEUGE NACH GLASVERLETZUNG	27
DEKOMPRESSION UND EXTERNE NEUROLYSE DES N. PERONEUS COMMUNIS BEI AKUTER TRAUMATISCHER LÄSION MIT KOMPLETTAUSFALL	28
ZUSAMMENFASSUNG	30
LITERATUR	31
ABBILDUNGEN	34

Lernziele

- Vorkommen & Relevanz
- Verletzungstypen/-Mechanismen
- Diagnostik & verletzungsabhängige Prognose
- Operationsindikationen
- Timing einer Operation
- Operationsverfahren

Einleitung

Das Ausmaß des Nervenschadens bestimmt das Potential für eine spontane Erholung. Die Einschätzung des Verletzungsausmaßes ist somit wesentlich für die adäquate weitere Behandlung. Häufig wird die **Indikation** für eine notwendige **operative Versorgung** nicht oder sehr spät gestellt. Bei der **Einschätzung** ist es wesentlich den **Verletzungstypus**, den Mechanismus und die objektivierbaren klinischen Befunde zu erkennen. Je genauer die Zusammenschau dieser Befunde erfolgt, um so korrekter ist die Verletzung und deren Tiefe einzuschätzen. Das **Timing** im Falle einer notwendigen **operativen Versorgung** ist ein wesentlicher Faktor für eine gute funktionelle Wiederherstellung. Aufgrund von Unsicherheiten bei der Einschätzung von Verletzungen wird zu häufig abgewartet und eine notwendige Operation verhindert oder hinausgezögert. Dies geht auf Kosten des möglichen Funktionsgewinns. Die präoperative und intraoperative Evaluierung und **geeignete Auswahl mikrochirurgischer und diagnostischer Techniken** sind wesentliche Elemente des Rüstzeuges eines mikrochirurgisch tätigen Nervenoperators. Dies gilt vor allem bei den diagnostisch schwierig einzuschätzenden **Läsionen in Kontinuität mit komplettem oder inkomplettem Funktionsausfall**. Der Nervenchirurg wägt hier oftmals während einer Operation zwischen der Notwendigkeit einer Dekompression und externen **Neurolyse**, internen Neurolyse, Nervenrückschnitten mit **Transplantation** oder auch einer **Teiltransplantation** -ab (split repair). Manchmal bleibt auch nur die Möglichkeit eines Nerventransfers.

Vorkommen und Relevanz

Nervenverletzungen sind nicht selten und betreffen meist jüngere Patienten zwischen 32-35 Jahren; Männer sind häufiger betroffen (Eser, Aktekin, Bodur, &

Atan, 2009; Kouyoumdjian, 2006; Noble, Munro, Prasad, & Midha, 1998; Wee, Truitt, & Smith, 2006). Es existieren vergleichsweise wenige epidemiologische Daten über periphere Nervenverletzungen; ein grundsätzliches Problem besteht darin, dass viele der Verletzungen primär nicht erkannt werden und so den Statistiken der Unfallversicherer entgehen. Sie werden mit Inzidenzen zwischen 1,6 und 2% innerhalb einzelner Verletzungsstatistiken geführt. Prävalenzen von 2,8% innerhalb einer kanadischen Population von Unfallopfern mit multiplen Verletzungen wurden beschrieben (Campbell, 2008; Noble et al., 1998): In 75% waren die oberen Extremitäten von der Nervenverletzung betroffen. Der N. radialis war mit 36% der am häufigsten betroffene Nerv insgesamt und der N. peroneus mit 24% der am häufigsten betroffene Nerv der unteren Extremitäten. Bei Arbeits-, Sport- und Freizeit Unfällen ist die obere Extremität und hierbei die Nn. ulnaris und medianus häufiger betroffen (Eser et al., 2009; Scholz et al., 2009).

Der Funktionsverlust ist oft erheblich und beeinträchtigt die Patienten häufig derart, dass die weitere Berufsausübung gefährdet ist. Operative Verfahren sind in der Lage Funktion wieder herzustellen. Nicht immer – aber viel häufiger und besser als gemeinhin angenommen wird!

Ein Hauptziel der Behandlung sollte darin bestehen die Patienten wieder in ihren ursprünglichen oder einen anderen Beschäftigungsprozess zurück zu führen(Kretschmer et al., 2009b).

Verletzungstypen

Die Art und das Ausmaß der Verletzung sind wesentlich bei der Entscheidung, ob eine operative Maßnahme indiziert ist. Oftmals wird bei genauer Aufarbeitung des Verletzungstyps klar, dass eine spontane Erholung nicht zu erwarten ist. Nervendurchtrennungen stellen klare Operationsindikationen dar. Scharfe nicht kontaminierte Nervendurchtrennungen (z.B. durch Messer) profitieren davon, wenn sie unmittelbar operativ versorgt werden. Stumpfe Durchtrennungen beinhalten meist einen Mechanismus, welcher den Nerv längerstreckig geschädigt hat. Die Nervenenden wandeln sich entsprechend neuromatös um. Hier empfiehlt sich der besseren Beurteilbarkeit wegen im Intervall von 2-3 Wochen zu versorgen.

Am schwierigsten sind Läsionen zu beurteilen die trotz schwerwiegendem Ausfall noch in Kontinuität erhalten sind. Hier gilt es einzuschätzen, ob eine realistische Chance auf spontane Erholung besteht oder nicht.

Diagnostik und verletzungsabhängige Prognose

Die richtige Einschätzung der verletzungsabhängigen Prognose ist damit entscheidend. Sie gründet auf der systematischen körperlichen Untersuchung (Ausfallschwere, Läsionshöhe, betroffene Nervenäste) und Anamneseerhebung (Unfallmechanismus, Verlauf des Ausfalles, Besserungstendenzen, Begleitverletzungen). Je unklarer ein Fall ist, um so bedeutender wird die begleitende Gerätediagnostik.

Anamnese und Untersuchung

Die systematische Befragung zur Vorgeschichte, dem Unfallmechanismus, dem zeitlichen Verlauf etwaiger Regenerationsvorgänge, nach Schmerzsymptomen und der aus Patientensicht wesentlichen Beeinträchtigung gibt Hinweise für die Beurteilung des vorhandenen Nervenschadens. Die körperliche Untersuchung beschränkt sich nicht auf die unmittelbaren Ausfälle durch den Nervenschaden, sondern nimmt auch die Begleit- und Folgeschäden mit auf (z.B. Gelenkbeweglichkeit). Besonders wichtig ist dies zum Beispiel bei den Verletzungen des Plexus brachialis, denn diese haben meist auch tiefgreifende Veränderungen im Schultergelenk zur Folge.

Eine anatomisch orientierte systematische Untersuchungsweise und Dokumentation hilft dabei, komplette von inkompletten Läsionen zu unterscheiden und die Läsionshöhe am Nerv einzugrenzen. Eine Foto und Videodokumentation ist bei Verlaufsuntersuchungen sehr hilfreich.

Trickbewegungen sind durch entsprechende Provokationsmanöver zu verhindern (z.B. angedeutete Fingerspreizung-Ulnarisfunktion durch Einsatz der radialisversorgten Streckermuskulatur bei komplettem Ulnarisausfall).

Gerätediagnostik

Elektrophysiologie

Die elektrophysiologische Untersuchung hilft Befunde zu objektivieren indem sie funktionelle Aussagen macht, u.a über:

Nervenleitung, Nervenleitungsgeschwindigkeit, Amplitude der Antwortpotentiale, (distale motorische Latenz als Vergleichszeitdauer über eine definierte Strecke eher bei Kompressionssyndromen von Bedeutung), Kontraktionsantworten und Muster von Muskel bei der Nadelableitung in Ruhe und während der versuchten willkürlichen Kontraktion, Spontanaktivität als Zeichen der Denervierung, aber auch als Hinweis auf noch vorhandenen vs. fettig degenerierten Muskel.

Der fokale Leitungsblock ist eine elektrophysiologische Diagnose. Liegt ein solcher vor, bestehen beste Aussichten für eine sehr gute spontane Regeneration. Bessert sich ein solcher nicht innerhalb von 6 Wochen, ist die Wahrscheinlichkeit sehr hoch, dass kein Leitungsblock vorlag, sondern eine höhergradige Schädigung vorliegt. Damit sind die Chancen auf eine spontane Erholung, ohne Nervenoperation deutlich reduziert.

Für die Beurteilung der Prognose vorhandener motorische Ausfälle ist vor allem das Elektromyogramm hilfreich. Durch ein solches sind sowohl geringe willkürliche Restaktivitäten, als auch subtile Verbesserungen der Reinnervation gut darstellbar. Bei voran schreitender Reinnervation werden die durch willkürliche Muskelkontraktionen ausgelösten Wellen im Beobachtungszeitraum immer dichter, bis schließlich ein dichtes „Band“ um die Nulllinie entsteht; das sogenannte Interferenzmuster.

Die EMG Untersuchung lässt sich auch im Stadium einer kompletten Parese sehr gut für die Verbesserung der Trainingsmotivation im Sinne eines Feedback-Mechanismus nutzen, wenn dem Patienten dieser einfach zu vermittelnde Zusammenhang erklärt wird.

Bildgebende Diagnostik

Die Bedeutung der bildgebenden Diagnostik für die Nerventraumatologie nimmt zu. Dies betrifft die Kernspintomographie und den Nervenultraschall (Neurosonographie). Vor allem bei unklaren Befunden kann mittlerweile häufig eine eindeutige Läsion im Nervenverlauf dargestellt werden. Leider ist die Interpretation und Aussagekraft der Untersuchungen sehr vom Untersucher abhängig. Im Hinblick auf die Kernspintomographie kommt es so zum Beispiel darauf an die geeigneten Sequenzen und eine geringe Schichtdicke auf Höhe und in der Region der vermuteten Nervenläsion zu wählen. Dies setzt sehr genaue Kenntnisse über den Nervenverlauf voraus. Eine Nervendurchtrennung

und Neurome im Verlauf des Nervs lassen sich so sehr genau darstellen. Auch die Muskulatur zeigt vor Ablauf von 2 Wochen nach dem Trauma eine Ödemvermittelte Signalerhöhung bei ausgeprägter Denervierung. Die Darstellung von längeren Nervenstrecken ist aufwendiger und setzt manchmal den Einsatz mehrerer Spulen voraus. Damit sind solche Untersuchungen dann auch zeitaufwendiger.

Die Neurosonographie ist eine vom Prinzip einfache Untersuchung, die in der Lage ist einen ganzen Nervenverlauf darzustellen. Im Wesentlichen kommt es darauf an, die Befunde richtig interpretieren zu können. Die setzt entsprechende anatomische Kenntnisse voraus. Die Auflösung von speziell für die Nervendarstellung geeigneten hochauflösenden Schallköpfen (hohe Frequenz) ist mittlerweile so gut, dass die Faszikelstruktur von Nerven erkannt werden kann. Dementsprechend ist es auch möglich ein Neurom von durchgehenden Faszikeln abzugrenzen, eine Durchtrennung eindeutig darzustellen, oder auch eine Teilläsion darzustellen (z.B. Teildurchtrennung des Nervs). Auch das Monitoring einer sich wieder entwickelnden Faszikelstruktur nach durchgeführter Nerven transplantation ist möglich. Je tiefer ein Nerv gelegen ist, um so schwieriger ist es eine eindeutige Darstellung zu erreichen (z.B. der N. ischiadicus auf Gesäßhöhe).

Sowohl beim Ultraschall, als auch bei der Kernspintomographie wird die Darstellung durch in unmittelbarer Nachbarschaft des Nervs liegende Metallimplantate erschwert und mehr oder weniger deutlich eingeschränkt.

Verletzungsarten

Offen versus geschlossen

Bei offenen Verletzungen mit deutlichem Gewebeschaden, dislozierten Frakturen und komplettem Nerven ausfall ist die Chance auf spontane Erholung prinzipiell geringer. Eine Nervrekonstruktion mit Transplantaten wird nur unter sauberen Wundverhältnissen erfolgreich sein. Potentiell kontaminierte Nervenverletzungen werden deswegen erst im Intervall versorgt.

In Kontinuität versus durchtrennt/zerrissen

Die Frage einer Nervdurchtrennung muss schnellstmöglich geklärt werden. Wenn dies nicht schon bei einer direkten Inspektion (z.B. im Rahmen der

primären unfallchirurgischen Versorgung) deutlich wurde, sollte eine möglichst frühzeitige Bildgebung diesen Sachverhalt klären.

Stumpfe versus scharfe Durchtrennung

Wurde ein Nerv scharf durchtrennt, wird der Patient von einer sofortigen Rekonstruktion mit End-zu-End Naht profitieren. Voraussetzungen hierfür sind saubere Wundverhältnissen und ein mikrochirurgisches, gewebeschonendes Vorgehen. Manchmal sind minimale Nervenrückschnitte (millimeterbereich) notwendig. Keinesfalls aber, darf eine solche Koaptation unter Spannung durchgeführt werden. Ein bloßes Aneinandernähen der Nervenenden in nicht mikrochirurgischer Technik wird den traumatischen Schaden vergrößern und eine scharfe Verletzung in eine stumpfe umwandeln. Dadurch entsteht an der Stelle der Wiedervereinigung eine neue neuromatöse Auftreibung die ein Durchwachsen der Axone über die Koaptationsstelle hinweg verhindert. Die konsekutive Ausbildung einer neuen Faszikelstruktur ist so nicht möglich. Ist keine spannungsfreie Koaptation möglich wird interfazikulär transplantiert. Als Interponat wird autologer sensibler Nerv verwendet.

Besteht der Verdacht auf eine stumpfe Durchtrennung wartet man die Ausbildung der Stumpfneurome ab und rekonstruiert den Nerv 2-3 Wochen nach dem Unfall. Die Wahrscheinlichkeit, dass dann eine Transplantation notwendig wird ist nach diesem Zeitraum deutlich höher, da zwischen den Nervenenden eine Lücke entsteht. Dies ist der Fall, weil zum einen Retraktionskräfte an beiden Nervenenden wirken, zum anderen auch unterschiedlich lange Stumpfneurome entstehen, die exzidiert werden müssen. Die neuromatöse Veränderung kann in Abhängigkeit vom Traumamechanismus mehrere Zentimeter lang sein. Sie ist am proximalen Stumpf meist ausgeprägter. Der proximale Nervenstumpf ist kolbig aufgetrieben. Vor einer interfazikulären Transplantation ist ein Rückschnitt erforderlich, bis wieder „normale“ Faszikelstruktur erkennbar ist.

Dehnungsschäden

Dehnungsschäden sind häufig. Sie sind meist mit einer zusätzlichen kontusionellen Schädigungskomponente vergesellschaftet (s.u.). Nerven sind so aufgebaut, dass sie 10 -15% Dehnung vertragen (u.a. durch undulierende Kollagenfaserschichten). Dies ist notwendig, um die normalen

Bewegungsumfänge zu gewährleisten. Um diese Bewegungen zu ermöglichen liegen Nerven in physiologischen Gleitschichten. Werden Extremitäten mit hoher Geschwindigkeit und Beschleunigung über ihren normalen Bewegungsumfang hinaus ausgelenkt, werden auch Nerven überdehnt. Beispiele hierfür sind Kniegelenksluxationen, Schulterverletzungen und dislozierte Frakturen der langen Röhrenknochen. Ein häufig betroffener Nerv ist der N. peroneus in seinem Verlauf vom Ober- zum Unterschenkel, der N. radialis am Oberarm oder Anteile des Plexus brachialis: der N. peroneus wird beispielsweise durch seinen Verlauf und seine Aufzweigung hinter dem Fibulaköpfchen stärker in seiner Position fixiert als andere Nerven. Kniegelenksluxationen können ihn deutlich überdehnen. Um irreversibel geschädigt zu werden muss ein Nerv nicht auseinander gerissen werden. Eine plötzliche vehemente Dehnung über ca. 15 % der natürlichen Länge des Nerven genügt um den Nerv, bei erhaltener äußerer Hüllstruktur (Epineurium) „innerlich zu zerreißen“. Die Nervinnenstruktur kann so durchgreifend geschädigt werden, dass sich an einer Stelle des Nerven innerhalb des äußerlich intakten Epineuriums eine komplette Narbe ausbildet, die keine geordnete und somit funktionstüchtige Faszikel- und Axonstruktur mehr aufweist. Diese „Narbe“, besteht aus stark verdichtetem Bindegewebe ist deutlich härter als normaler Nerv und führt meist zu einer Auftreibung an der betroffenen Stelle. Ein solches traumatisch ausgelöstes Bindegewebekonglomerat am Nerv wird Neurom genannt. Einzelne sogenannte Minifaszikel die der Neuropathologe an Präparaten von Exzisionen erkennen kann sind typisch für traumatische Neurome; sie können jedoch keine zur Funktion führende Leitfähigkeit herstellen, sind aber Ausdruck eines frustrierten Sprossvorgangs. Neurome entstehen somit nicht nur an den Enden durchtrennter Nerven („Stumpfneurome“), sondern auch nach Dehnungs- und Quetschungsschäden in Form von verhärteten Auftreibungen eines Nervenabschnittes. Man bezeichnet sie als Kontinuitätsneurome. An einer solchen Stelle, weist der Nerv eine fusiforme-, bisweilen auch exzentrische Verdickung auf. Diese entspricht dem neuromatösen Bereich. Er ist im Neurombereich deutlich härter zu tasten als der gesunde proximale Nervenanteil.

Kontusion und Quetschung

Dies sind ebenso häufige Schädigungsursachen. Prinzipiell handelt es sich um Verletzungen die infolge eines Anpralles, Druck durch einen Gegenstand oder Instrument, durch Dislokation körpereigener Knochenfragmente oder durch Anbringung von Implantaten entstanden sind. In vielen Fällen sind diese auch mit einer zusätzlichen Dehnungskomponente assoziiert gewesen und der Einfluss der einzelnen Komponenten lässt sich nicht voneinander trennen (z.B. nach Verkehrsunfällen).

Im Hinblick auf die Wirkung entsteht das gleiche Resultat wie nach einer Dehnung: in Abhängigkeit von der wirkenden Kraft und Dauer der Krafteinwirkung entsteht ein Binnenschaden bis zur kompletten Neuombildung. Potentiell ist das betroffene Segment des Nervs jedoch umschriebener und kürzer als nach einer massiven Dehnungsläsion.

Seltenere Mechanismen

Schussverletzungen, Granatverletzungen, Injektionsschäden, thermische Verletzungen und Stromverletzungen sind in Deutschland sehr seltene Ursachen traumatischer Nervenläsionen. Schussverletzungen werden zunächst im Verlauf beobachtet, wenn es nicht aufgrund des verwendeten Geschosses zu massiven Weichgewebsdestruktionen gekommen ist und eine notfallmäßige Primärversorgung der Begleitverletzungen notwendig wird (Kline, 1989; Roganovic, 2005; Stewart & Birch, 2001). Bei Injektionsschäden ist zwischen direkten Nadelstichverletzungen oder Folgen von Paravasaten mit neurotoxischen Substanzen zu unterscheiden. Die schlechteste Variante ist eine Kombination hiervon. Bei neurotoxischen Agenzien, massiven Ausfällen und Schmerzen ist eine notfallmäßige Exploration und Spülung zu erwägen.

Iatrogene Verletzungen

Unter iatrogenen Nervenschäden, versteht man diejenigen die durch ärztliches Handeln ausgelöst wurden. In entsprechenden Nervenzentren, mit einem hohen Anteil an Nervenrekonstruktionen/-transplantationen machen diese bis zu ein Fünftel der Nervenrekonstruktionen aus (Khan & Birch, 2001; Kretschmer, Antoniadis, Braun, Rath, & Richter, 2001; Kretschmer, Heinen, Antoniadis, Richter, & König, 2009a; Wilbourn, 1998). Meist wird ihre spontane Regenerationsfähigkeit überschätzt und die Patienten werden zu lange im

Verlauf beobachtet. Bezüglich der operativen Versorgung gelten die gleichen Prinzipien wie für andere Nervenverletzungen. Der zugrunde liegende Mechanismus spielt eine entscheidende Rolle.

Nervabhängige Prognose

Die Prognose von Nervenverletzungen hängt von sehr vielen Faktoren ab. Entscheidend sind der Mechanismus und die Wucht des auslösenden Traumas, die Läsionshöhe (stammnah vs stammfern), vorhandene Begleitverletzungen (z.B. Knochenbrüche oder Gefäßverletzungen), daraus resultierende Beeinträchtigungen der vaskulären Versorgung und das Lebensalter. Ein weiterer sehr wesentlicher Faktor ist jedoch auch die unterschiedliche Regenerationsfähigkeit einzelner Nerven. Die des N. radialis unterhalb der Trizepsastabgänge ist z.B. sehr gut nach einer Transplantationsoperation (Abb.1). Wurde diese adäquat durchgeführt, können sehr gute funktionelle Resultate erwartet werden. Für den N. ulnaris auf Oberarmhöhe sieht dies jedoch anders aus (Ruijs, Jaquet, Kalmijn, Giele, & Hovius, 2005). Analog hierzu ist am Bein die Funktion eines zu transplantierenden N. peroneus schwieriger wieder herzustellen (D. H. Kim, Murovic, Tiel, & Kline, 2004; Seidel, Koenig, Antoniadis, Richter, & Kretschmer, 2008), als die des N. tibialis.

Operationsindikationen

Prinzipiell sollten Patienten mit schwerwiegenden traumatischen Nervenläsionen frühzeitig bei einem in der Rekonstruktion von Nerven erfahrenen Chirurgen vorgestellt werden (Dolan, Butler, Hynes, & Cronin, 2012; Fu & Gordon, 1995a). In unklaren Fällen hat dieser dann die Möglichkeit sich selbst ein Bild über den Verlauf zu machen, ohne dass im Operationsfall wertvolle Zeit verloren ging.

Ein Patient bei dem eine Operation notwendig ist profitiert, wenn diese so früh wie möglich durchgeführt werden kann. Dies gilt insbesondere wenn eine Transplantation notwendig wird. Je rückenmarksnäher eine nicht spontan erholungsfähige Nervenläsion liegt umso zeitkritischer wird die Transplantatrekonstruktion. Dies liegt an den vielen betroffenen Ebenen einer solchen Verletzung: Veränderungen an Gehirn, Rückenmark, Nerv und den Zielorganen, z.B. der Muskulatur. Besonders gut untersucht wurden in den letzten Jahrzehnten die durch eine anhaltende Nervdurchtrennung hervor

gerufenen Veränderungen an der Muskulatur (z.B. Atrophie und verminderte Axoneinsprossung durch fibrotischen Umbau des Perimysiums) und den Nervenzellkörpern (Stichwort „Neuronentod-Apoptose“ nach Nervdurchtrennung) (Fu & Gordon, 1995b; 1995a; 1997; Hart, Terenghi, & Wiberg, 2008; Terenghi, Hart, & Wiberg, 2011).

Indikationen für eine operative Versorgung

- Schwere Lähmung im Zusammenhang mit einer Wunde über einem Hauptnerv oder nach einer Injektion in Nähe eines solchen Nervs
- Schwere Lähmung nach einer Operation, die einen Nerv betrifft der in unmittelbarer Nähe zum Operationssitus verläuft (iatrogene Nervenläsion)
- Schwere Lähmung nach einem geschlossenen Dehnungsschaden des Plexus brachialis
- Eine Nervenläsion die mit einer arteriellen Verletzung assoziiert ist („Hochenergie-Transfer Verletzung“, z.B. Hochgeschwindigkeitsläsion)
- Nervenverletzung die mit einer Fraktur oder Dislokation assoziiert ist, welche eine umgehende Reposition und interne Fixierung erforderlich macht
- Die Verschlechterung einer Nervenläsion im Beobachtungsintervall
- Das Versagen/Ausbleiben einer funktionellen Besserung innerhalb eines erwarteten Zeitintervalls
- Ausbleiben von Besserungszeichen nach Ablauf von 6 Wochen bei einem diagnostizierten „Leitungsblock“
- Das Ausbleiben von Regenerationszeichen im erwarteten Zeitintervall nach einer geschlossenen Verletzung die anfänglich als Axonotmesis eingestuft wurde
- Anhaltender Schmerz
- Behandlung eines schmerzhaften Neuroms

Kompletter Ausfall

Liegt ein kompletter Ausfall vor wird schnellstmöglich eine komplette Durchtrennung ausgeschlossen, da diese eine operative Versorgung bedingt. Die Bildgebung per Neurosonographie oder Kernspintomographie kann eine

solche meist nachweisen. Bei scharfer Durchtrennung und sauberer Wunde wird die sofortige Rekonstruktion angestrebt (mikrochirurgische End-zu-End Naht). Bei einem stumpfen Durchtrennungsmechanismus ist vor allem das proximale Nervenende noch langstreckiger in proximaler Richtung geschädigt, als dies initial erkennbar wäre. Deswegen wird die Neuromformation abgewartet und die Versorgung erfolgt nach einem Intervall von 2-3 Wochen. Aufgrund der notwendigen Rückschnitte am Nerv (Ausschneiden des neuromatös, das heißt narbig-fibrös veränderten Nervenanteils) und der am Nerv nach Durchtrennung wirkenden Retraktionskräfte entsteht eine Lücke zwischen den Nervenenden. Diese wird mit körpereigenen Nerveninterponaten überbrückt (s.u.). Falls der Nerv in seiner Kontinuität erhalten ist, wird zunächst der Verlauf beobachtet. Stellt sich bei ausbleibender klinischer und elektrophysiologischer Besserung in der Neurosonographie ein sogenanntes Kontinuitätsneurom ohne Faszikelstruktur dar, ist davon auszugehen, dass dieses nur aus Narbe besteht. Damit besteht eine Indikation zur Exzision des neuromatösen Segmentes und Rekonstruktion mit autologen Transplantaten. Eine Indikation zur Transplantation besteht ebenso, wenn die Kontinuität lediglich durch eine schmale Bindegewebsbrücke zwischen den Nervenenden aufrecht erhalten wird.

Inkompletter Ausfall

Bei inkompletten Verletzungen sollte man neben dem Verletzungsmechanismus und der Elektrophysiologie auch bildgebende Verfahren mit in Betracht ziehen, um eine Entscheidung für oder gegen eine weitere Verlaufsbeobachtung vs operative Freilegung treffen zu können. Liegt eine Dehnung und oder Kontusion zugrunde und es kann kein ausgeprägtes Kontinuitätsneurom dargestellt werden wird eine Verlaufsbeobachtung wahrscheinlicher. Bei Nachweis einer Teildurchtrennung kann trotz noch vorhandener Teilfunktion eine Indikation zur Operation gestellt werden. Inkomplette Ausfälle sind schwieriger zu beurteilen, da eine spontane funktionelle Besserung möglich ist. Dennoch gibt es Patienten die ebenso von einer operativen Maßnahme profitieren können. So kann beispielsweise nur ein Teil des Nervquerschnittes so geschädigt sein, dass er sich komplett narbig umwandelt (Teilneurom). Dieser Teil kann durch eine mikrochirurgische, interfaszikuläre Exzision des betroffenen Abschnittes

und eine Teilrekonstruktion mit Transplantaten wieder hergestellt werden (sog. „split repair“). Die Prognose nach einer Teilrekonstruktion ist meist sehr gut.

„Kompletter Teilausfall“:

Ist nur ein Ast des betroffenen Nervs oder ein Teil des Nervquerschnittes von einem irreversiblen Schaden betroffen kann die noch vorhandene Teilfunktion manchmal ebenso als vorhandenes Regenerationspotential missinterpretiert werden. War beispielsweise der N. peroneus communis initial komplett ausgefallen, weil ein Leitungsblock am Ramus superficialis bestand, sich aber ein den gesamten Nervquerschnitt einnehmendes Kontinuitätsneurom am Ramus profundus ausgebildet hat besteht eine Indikation zur interfaszikulären Transplantation des R. profundus. Würde der Spontanverlauf zu lange abgewartet minderten sich die Chancen auf funktionell wirksame Wiederherstellung insbesondere bei diesem Nerv deutlich.

Kompletter Funktionsausfall oder sistierende Regeneration bei anhaltender externer Kompression;

Ein sehr gute Prognose besteht, wenn ein Nerv deswegen nicht mehr funktioniert, weil er durch eine ihn umgebende Narbe von extern eingeeengt wird, ohne dass sich seine Binnenstruktur in ein Neurom umgewandelt hat. Vom Prinzip besteht, daher bei noch vorhandener Faszikelstruktur ein „fokaler Leitungsblock“ (dies ist an sich ein elektrophysiologischer, funktionsbeschreibender Begriff). Wird eine solche Narbe nicht entfernt, kann sich der Nerv nicht oder nur schlecht erholen (Abb.2). Nach einer Dekompression und externen Neurolyse wird sich in einem solchen Fall intraoperativ meist eine fortgeleitete elektrophysiologische Leitfähigkeit bei Messung der Nervenaktionspotentiale demonstrieren lassen. Nach einer solchen Operation ist eine klinische Besserung dann viel schneller zu erwarten als nach einer Transplantation (innerhalb mehrerer Wochen). Teilweise bemerken die Patienten auch unmittelbar nach dem Eingriff bereits eine Besserung.

Chirurgisch behandelbare neurogene Schmerzen

Schmerzen durch verletzte Nerven und Nerventeilläsionen können sehr stark die Lebensqualität beeinträchtigen. Im Hinblick auf die chirurgische Behandelbarkeit bestehen deutliche Unterschiede. Nicht alle verletzungsbedingten Nervenschmerzen haben eine schlechte Prognose.

Schmerzen im Zusammenhang mit Nervenläsionen die rekonstruiert werden können sind teilweise gut durch einen solchen Eingriff zu mildern oder - beseitigen. Hingegen sind so genannte neuropathische Schmerzsyndrome, welche aufgrund von durchtrennten sensiblen Nerven mit oberflächlich liegenden Stumpfneuromen erzeugt wurden, regelhaft schwer behandelbar. Patienten die unter ausgeprägten chronischen Neuropathien durch schmerzhafte Stumpfneurome leiden, weisen unter Umständen auch eine gesteigerte und autonom einsetzende Erregbarkeit von Axonen innerhalb dieser Neurome auf. Neben einer ektopen Hyperaktivität an der Läsionsstelle und innerhalb der schmerzhaften Neurome, die höchstwahrscheinlich im Zusammenhang mit einer fokalen Fehlverteilung und Überexpression von Natriumkanalrezeptoren am Nervenstumpf steht, gibt es vielfältige weitere Mechanismen auf Rückenmarks- und Hirnebene. Diese können die Schmerzempfindung unabhängig von der Ursache und ursprünglichen Läsionsstelle unterhalten (Kretschmer, England, et al., 2002a; Kretschmer, Nguyen, et al., 2002b; Taylor, Anastakis, & Davis, 2009). Zusätzlich werden unterschiedliche Ausprägungen der Schmerzwahrnehmung und -Verarbeitung diskutiert.

Nervenschmerzen die im Zusammenhang mit neurotoxischen Substanzen oder Verbrennungen von Nerven z. B. im Rahmen von Fehlinjektionen oder Kontakt mit aushärtendem wärmeentwickelndem Knochenzement (exotherme radikalische Polymerisation von PMMA mit Temperaturen bis zu 70 Grad C) erzeugt wurden, sind ein therapeutisches Dilemma.

Auch bei schweren und bereits lange bestehenden Schmerzsyndromen sollte nicht nur ein konservativer Behandlungsversuch erwogen werden. Bei einigen Patienten die unter neuropathischen Schmerzen leiden, liegt eine extra- und binnenstrukturelle Ursache vor, die operativ behandelt werden kann. Eine genaue Anamneseerhebung und Untersuchung unter Zuhilfenahme der Bilddiagnostik kann häufig den Läsionsmechanismus identifizieren und die aktuell vorliegende Verletzung charakterisieren.

Beschwerden die keinem umschriebenen Versorgungsareal eines bestimmten Nervs zuzuordnen sind, können durch eine Nervenoperation meist nicht positiv beeinflusst werden. Ein umschriebener Schmerzpunkt und ein deutlicher und wiederholt an gleicher Stelle vorhandener Triggerpunkt sowie dem Nerv

zuordenbare Defizite und die Blockierbarkeit des Schmerzes durch Infiltration durch Infiltration mit einem Lokalanästhetikum am Punkt der stärksten Auslösbarkeit sprechen eher für einen operativ angehbaren Nervenschmerz. Nervenverletzungen verursachen teilweise stärkere Schmerzen als komplette Durchtrennungen. Transplantatteilrekonstruktionen im Sinne eines split repair des geschädigten Bereichs können einen neuropathischen Schmerzzustand häufig bessern. Deswegen ist es wichtig zu überprüfen ob prinzipiell eine Situation vorliegt in der noch eine Rekonstruktion durchgeführt werden kann.

Bei Nervenläsionen in Kontinuität kann mitunter die Dekompression und mikrochirurgische Neurolyse eine Besserung herbei führen.

Falls die auf Beseitigung des ursächlichen Zustandes zielenden Maßnahmen nicht indiziert sind oder keinen Erfolg brachten kommen die konservativen Maßnahmen voll zum Tragen. Sind diese ebenso ausgeschöpft können eventuell adjuvante Verfahren, wie zum Beispiel die periphere Nervenstimulation, Flächenstimulation oder rückenmarksnahe Stimulationsverfahren (SCS = spinal cord stimulation) eine Linderung herbei führen.

Timing einer Operation

Es sollte so schnell wie möglich entschieden werden, ob eine sofort zu versorgende Verletzung vorliegt (Kretschmer & Birch, 2011). Falls dies nicht der Fall ist, wird differenziert ob eine rekonstruktive Versorgung in Wochenfrist zu planen ist, oder ob eine Verlaufsbeobachtung die geeignete Maßnahme darstellt. Eine Verlaufsbeobachtung von mehr als drei Monaten erfolgt nur dann, wenn der beobachtbare Funktionsgewinn deutlich voran schreitet. Als primäre Ansprechpartner sollten Nervenchirurgen dienen, die ausreichend Erfahrung mit der Nervenrekonstruktion besitzen.

Sofort

- *Scharfe Durchtrennungen* sind so schnell wie möglich zu versorgen. Lassen es die Umstände und der Allgemeinzustand des Patienten zu wird somit eine primäre Rekonstruktion durchgeführt. Ist die Wunde initial unsauber wird früh sekundär nach 2-3 Wochen bzw. sobald wie möglich versorgt.
- *Scharfe Teildurchtrennungen* werden sofort rekonstruiert.

- Besteht eine Indikation zur primären Versorgung ist aber lokal kein rekonstruktiv tätiger *Nervenchirurg* verfügbar, erfolgt die *Kontaktaufnahme* mit einem solchen um die schnellst mögliche Weiterbehandlung sicher zu stellen.

Wochenfrist

- *Durchtrennungen mit ausgeprägt stumpfem Mechanismus und Dehnungsläsionen* werden früh sekundär nach 2-3 Wochen rekonstruiert.
- *Stumpfe Läsionen in Teilkontinuität* werden nach 2-3 Wochen rekonstruiert.
- *Massive Zerstörungen* der Nervbinnenstruktur werden auch bei erhaltener Kontinuität baldigst rekonstruiert. Dies kann beispielsweise mit einer guten Neurosonographie festgestellt werden.

Monatsfrist

- *Unklare Läsionen in Kontinuität mit komplettem Funktionsausfall* werden initial auch bildtechnisch aufgearbeitet um massive strukturelle Läsionen auszuschliessen. Sind diese vorhanden besteht eine Operationsindikation, der Verlauf wird nicht weiter abgewartet.
- *Unklare Läsionen in Kontinuität mit inkomplettem Funktionsausfall* werden engmaschig im Verlauf kontrolliert. Initial erfolgt ebenso eine Bilddiagnostik um auch Teilquerschnittsläsionen ausschließen zu können. Liegt eine komplette Teilquerschnittsläsion vor wird rekonstruiert.
- Verbessert sich die Funktion bei einem Nerv nicht, besteht eine Indikation zur Freilegung. Dies gilt auch für bildmorphologisch unauffällige, elektrophysiologisch aber beeinträchtigte Nerven.
- Es ist kaum notwendig bei unklaren Läsionen ohne funktionelle Besserung länger als 3 Monate abzuwarten.
- *Eine indizierte Rekonstruktionsoperation ist so früh wie möglich durchzuführen*; nach Möglichkeit sollten deutlich weniger als drei Monate zwischen Trauma und Operation liegen.

Aufgrund ihrer Komplexität sind Plexusläsionen sehr viel schwieriger zu beurteilen, insbesondere wenn es um die Frage von Verlaufsbeobachtungen geht. Sie sollten so früh wie möglich in einer Klinik bzw. einem Zentrum

vorgestellt werden, welches regelmäßig Plexusrekonstruktionen durchführt. Eine Beurteilung außerhalb solcher Kliniken wird die Frage nach den operativen Möglichkeiten nicht adäquat beantworten können. Es ist zu beobachten, dass gerade bei Plexusverletzungen mit kompletten Ausfällen bestimmter Nervenanteile die Prognose zu schlecht beurteilt wird und deswegen Patienten mitunter auch gar nicht erst an entsprechenden Kliniken zur Frage der Plexusrekonstruktion vorgestellt werden.

Operationsverfahren

Freilegung

Prinzipiell werden traumatische Läsionen so freigelegt, dass man sich der Läsion vom proximal und distal Gesunden Nervenbereich aus nähert. Dadurch wird vermieden sich präparatorisch in einer Narbe zu verlieren und eventuell intakte Nervenanteile zusätzlich zu schädigen. Ist der Nerv freigelegt, wird die vorliegende Situation erneut evaluiert und die Entscheidung bezüglich der geeigneten Maßnahme getroffen. Dies ist insbesondere bei noch in Kontinuität bestehenden Nerven wichtig. Hierzu dient neben der mikroskopgestützten Inspektion, auch die Palpation. In Abhängigkeit vom vorliegenden Schaden ist auch die Bestimmung von Nervenaktionspotentialen oder ein intraoperativer Ultraschall sehr hilfreich (Koenig et al., 2011) und im Falle von verlaufsbeobachteten unklaren Kontinuitätsneuromen die Bestimmung von Nervenaktionspotentialen. Hierzu wird mit einer Hakenelektrode proximal des verletzten Bereichs ein Reiz gesetzt und distal der Läsion abgeleitet. Auch wenn noch keine Reizleitung bis zum Zielorgan-Muskel möglich ist, kann bei regenerierenden Nervverletzungen über die Läsion hinweg ein selbständig fortgeleitetes Antwortpotential registriert werden (Kline, Tasker, & Kim, 2008).

Intraoperative Diagnostik

Auch während der Operation wird teilweise noch „Diagnostik“ betrieben. Der intraoperative Ultraschall mit speziellen Hochfrequenzsonden, kann beispielsweise neuromatöse Anteile des Nerven von Faszikelstruktur unterscheiden, bevor der Nerv mikrochirurgisch eröffnet wird.

Elektrophysiologische Verfahren wie die direkte Nervenstimulation, eine intraoperative EMG, oder im Falle einer noch nicht bis zum Zielorgan voran geschrittenen Regeneration die Nervenaktionspotentialbestimmung über die

Läsion hinweg, geben meist einen guten Hinweis darüber, ob ein verletztes Nervensegment bereits wieder leitfähig ist und damit die Operation auf eine Dekompression und externe Neurolyse zu beschränken ist.

Dekompression und Neurolyse

Unter Dekompression versteht man, eine den Nerv einengende Struktur zu entfernen. In der Regel ist dies Bindegewebe, eine verdickte oder scharfkantige Faszie, ein Ligament oder im Falle von Verletzungen eine Narbenplatte.

Unter **externer Neurolyse** verstehen wir hingegen eine mikrochirurgische, direkt am Nerv durchgeführte Entfernung von Narbe die jedoch das Epineurium nicht überschreitet und intakt lässt (Abb.2).

Die **interne oder innere Neurolyse** (Endoneurolyse) findet innerhalb der Nervbinnenstruktur, im inneren Epineurium statt. Ihr Ziel ist die Entfernung fibröser Veränderungen im Sinne von Neuromanteilen. Sie setzt somit eine Epineuriotomie voraus. Sie ist deswegen auch nur indiziert, wenn ein Teil der Nervbinnenstruktur fibrös oder neuromatös umgewandelt ist. Dies ist bei einer Transplantation der Fall. Eine interne Neurolyse ist explizit nur mikrochirurgisch durchzuführen (z.B. unter Anwendung einer Vergrößerungshilfe mit starker Lichtquelle, z.B. OP Mikroskop) und ihre Indikation ist eng zu stellen. Nicht adäquat durchgeführt haben Versuche einer internen Neurolyse ein sehr hohes nervschädigendes Potential.

End-zu-End Naht

Die End-zu-End Naht hat die möglichst exakte Kopplung der korrespondierenden Faszikelgruppen zum Ziel (Abb.3). Dies ist auch nach dem regelmäßig noch notwendigen geringen Rückschnitt der Stümpfe möglich (sogenanntes „Anfrischen“ im Millimeterbereich). Die beiden Nervenstümpfe werden entsprechend ausgerichtet und mit epineuralen Nähten in Einzelknopftechnik koaptiert. Wir verwenden hierfür nicht resorbierbares Nahtmaterial der Stärke 10-0. Eine End-zu-End Naht sollte nur durchgeführt werden, wenn dies spannungsfrei möglich ist. Hierbei muss auch die Gelenkstellung beachtet werden, damit auch in den unterschiedlichen Positionen der Extremität keine Spannung auf die Nerven-naht wirkt.

Transplantation

Bei diesem Verfahren wird die Defektstrecke zwischen zwei Nervenstümpfen durch Interposition körpereigenen Nervs überbrückt. Die Nervenstümpfe werden hierzu bis auf die normale, d.h. nicht vernarbte Faszikelstruktur zurück geschnitten. Dieser Vorgang wird als „Anfrischen“ bezeichnet (Abb.4 obere Reihe). Dieser Rückschnitt erfolgt mikrochirurgisch. Durch die Verwendung entsprechend scharfer Klingen ist eine stumpfe Traumatisierung der dann sukzessive hervortretenden „angefrischten Faszikel“ während des Rückschnittes zu vermeiden. Die so entstehenden Stümpfe werden möglichst in ihrem gesamten Querschnitt mit den Transplantaten abgedeckt. Die Interponate liegen dabei spannungsfrei in Überlänge zwischen den zu verbindenden Nervenstümpfen (Abb.4 untere Reihe). Millesi wies auf die absolute Priorität dieses als „tensionless repair“ bezeichneten Prinzips für die erfolgreiche Nervenrekonstruktion hin. Die Transplantate werden korrespondierenden Faszikelgruppen zugeordnet, torsionsfrei ausgerichtet und in ihrer Position durch Naht oder Klebung gesichert (Abb. 5).

Teiltransplantation (split repair)

Hierbei wird in interfaszikulärer Technik der gesunde Anteil vom läsierten Nervenanteil separiert, bevor der neuromatöse Anteil reseziert wird (Abb. 6). Die Defektstrecke wird dann mit autologem Transplantat in interfaszikulärer Technik überbrückt. Eine Ruhigstellung ist aufgrund des „schiennenden“ gesunden Nervenanteils meist nicht nötig.

Kombinationsverfahren bei Plexusläsionen

Bei Plexusverletzungen wird das gesamte Armamentarium der Rekonstruktionsverfahren eingesetzt. Die Aufarbeitung der Patienten, ihre Operation und Nachbehandlung ist komplex und langwierig. Wesentlich ist es, vor einer Operation Wurzelaustritte am Rückenmark ausgeschlossen bzw. nachgewiesen zu haben. Diese Wurzeln stehen dann nicht mehr für eine Rekonstruktion, d.h. Transplantation im eigentlichen Sinn zur Verfügung. Ein funktioneller Zugewinn kann dann durch eine Kombination mit Nerventransfers erreicht werden. Hierunter versteht man den Einsatz eines nicht verletzten Nervs als Axonspender indem dieser durchtrennt und sein proximaler Stumpf mit dem Zielnerv (Axonempfänger) verbunden wird.

Nachbehandlung und Ergebnisse

Wurde keine Transplantation durchgeführt ist der Patient umgehend zu mobilisieren. Regelhaft ist eine Immobilisierung nur nach einer Transplantatrekonstruktion notwendig. Auch diese Phase halten wir kurz. Sie überschreitet drei Wochen nicht. Wurde nicht gelenküberschreitend transplantiert sind häufig auch kürzere Immobilisierungsphasen von 10-14 Tagen möglich. Die unmittelbare Rückkopplung mit dem Operateur hilft eventuell bestehende Unsicherheiten im Hinblick auf eine Phase der Immobilisierung zu beseitigen. Um Klarheit über die Vorgeschichte, den Befund und die exakt durchgeführten Maßnahmen zu verschaffen stellen wir deswegen gerne den Operationsbericht zur Verfügung. Ein solcher Operationsbericht enthält auch die relevanten Hinweise im Hinblick auf die unmittelbare Nachbehandlung.

Besondere Ansprüche an die Nachbehandlung sind an die Wiederherstellung nach Verletzungen des Plexus brachialis zu stellen.

Wir ein transplantationsbedürftige Nervenverletzung adäquat und möglichst frühzeitig mikrochirurgisch versorgt sind erstaunlich gute funktionelle Ergebnisse zu erwarten. Natürlich variieren die Resultate individuell sehr stark. Dennoch ist meist eine deutliche Verbesserung der Funktionalität zu erzielen.

Merke

- Gute klinische Beurteilung ist entscheidend
- Evaluierung und Versorgung so früh wie möglich anstreben
- Die Entscheidung zur Freilegung kann meist sehr früh getroffen werden, wenn alle diagnostischen Hinweise ausreichend berücksichtigt werden
- Frühe Explorationen sollte eher die Regel, nicht die Ausnahme sein
- Individuelle Entscheidungen treffen

Kasuistiken zum Verdeutlichen der Prinzipien

Transaxilläre Rekonstruktion des N. axillaris über kombiniert ventralen und dorsalen Zugang mit 2 x 15 cm Suralisinterponat,

- Prinzip der Transplantation und Tunnellierung von Spendernerven

Anamnese

Die Patientin verunfallte 7 Monate vor der Operation mit dem Motorrad im Sinne eines Anpralltraumas. Sie rutschte unter eine Leitplanke und knallte an die li. Schulter bei

anliegendem Arm. Die initiale Behandlung erfolgte an einer Universitätsklinik im Ausland für 4 Tage ohne weitere Maßnahmen. Nach dem Rücktransport wurde eine unfallchirurgische Versorgung mit Verplattung der Klavikula bei lateraler Mehrfragmentfraktur durchgeführt. Zusätzlich war die Verplattung einer Radiusfraktur notwendig. Bereits initial war die Schulterabduktion ausgefallen und keine Armbeugung möglich. Die Fingerbeugung war nur diskret beeinträchtigt. Mit Ausnahme der aktiven Schulterabduktion erholten sich die ausgefallenen Funktionen rasch. Vor der Operation ist nur ansatzweise der Beginn einer Armabduktionsbewegung im Schultergelenk möglich. Dies wird unter Einsatz der anderen Schultermuskeln und des M. pectoralis ohne Funktion des M. deltoideus erreicht. Überkopfarbeiten sind nicht möglich und einfache Vorgänge wie z. B. das Wischen einer Platte ist kaum durchführbar.

Befund

Kein Horner Zeichen, Trizepssehnenreflex und Bizepssehnenreflex erhalten, deutliche Atrophie des M. deltoideus und des Schultergürtelreliefs, gute passive Schultergelenksbeweglichkeit li. bis 90° ohne Mitrotation der Skapula. Dysästhesie am ulnaren Unterarm, initial Anästhesie jetzt Hyp- bis Anästhesie im Axillarisautonombereich und C5 Areal. Keine eindeutige Schmerzsymptomatik. Motorisch: Die N.-radialis-versorgte Muskulatur kontrahiert jeweils mit Kraftgrad 5/5, leichte Schwäche des M. latissimus dorsi im Seitenvergleich mit Kraftgrad 4-5/5. M. supraspinatus im Seitenvergleich li. diskret eingeschränkt mit Kraftgrad 4-5/5, desgleichen der M. infraspinatus. M. biceps brachii mit Kraftgrad 5/5, die N.-medianus- und N.-ulnaris-versorgte Handinnenmuskulatur mit Kraftgrad 5/5, ebenfalls der M. pectoralis minor und major. Mm. rhomboidei Kraftgrad 5/5.

Kompletter Ausfall des M. deltoideus mit KG 0/5.

Ausgeführte Operation

Leicht angedrehte Rückenlagerung, bewegliche Lagerung des li. Armes, Vorbereiten des li. Beines zur Suralisentnahme. Anzeichnen eines infraklavikulären Hautschnittes unter Übernahme der alten Narbe, da auch eine Plattenentfernung vorgesehen wird. Anzeichnen eines zusätzlichen Hautschnittes für einen dorsalen Zugang zum Spatium quadrilaterale zwischen M. trizeps und M. deltoideus. Zunächst Eingehen von ventral infraklavikulär. Hautschnitt bis auf die Clavicula, dann Entfernen der Platte. Dann Darstellen des M. pectoralis major, Spalten desselben im Faserverlauf. Entwickeln des M. pectoralis minor, Anschlingen desselben, Retraktion medialwärts. Eingehen auf dessen lateraler Seite, Darstellung des Fasciculus lateralis und der A. axillaris und des N. musculocutaneus. Es fällt auf, dass bereits der Fasciculus lateralis diskret narbig verändert ist mit minimalen petechialen Einblutungen vor allem an seiner klavikulawärts gelegenen Seite. Bei Stimulation des Fasciculus lateralis lassen sich uneingeschränkte Kontraktionen der abhängigen Muskulatur auslösen. Klavikulaseitig des Fasciculus lateralis stößt man in Richtung auf den zu erwartenden Fasciculus posterior auf Narbengewebe. Unter Einsatz des Operationsmikroskopes lässt sich in der Tiefe der Fasciculus posterior und seine Trifurkation in N. radialis, N. axillaris sowie N. thoracodorsalis darstellen. Bei Stimulation des N. axillaris ergibt sich im Gegensatz zu den anderen genannten Nerven des Fasciculus posterior keine Muskelkontraktion. Der Nerv wird nun in seinem Verlauf bis in die Achsellücke verfolgt. Er verdickt sich direkt nach seinem Abgang aus dem Fasciculus und verläuft langstreckig neuromatös aufgetrieben und verhärtet. Das Ende der neuromatösen Veränderung ist nicht auszumachen. Es besteht somit eine eindeutige Indikation zur Rekonstruktion. Es wird zusätzlich ein dorsaler Zugang zum N. axillaris angelegt. Mit einer gebogenen stumpfen Kornzange wird entlang des Axillarisverlaufs bis zum spatium quadrilaterale getunnelt und das Ende der Zange transkutan von dorsal getastet bevor der Hautschnitt angelegt wird. Hautschnitt und Eingehen zwischen Trizeps und Deltoideus. Die Arterie und die Deltoideusäste sind im Spatium quadrilaterale identifizierbar. Nun wird der Spendernerv gehoben und für die Tunnelierung vorbereitet. Hierfür Entnahme des N. suralis vom li. Bein in einer Gesamtlänge von 36 cm. Vor dem Absetzen Infiltration mit lang anhaltendem Lokalanästhetikum, dann Absetzen und Koagulation des proximalen Stumpfes, so dass sich dieser in das Weichgewebe retrahieren kann. Nach „Säuberung“ des Spendernervs von anhaftenden Bindegewebsschichten wird dieser in zwei Anteile zu 15 cm durchtrennt. Die Transplantate werden transaxillär getunnelt und für die folgende Koaptation vorgelegt. Hierzu wird ein Vessel-Loop durch die Achsellücke von infraklavikulär bis zum Austritt in das Spatium quadrilaterale auf der Oberarmrückseite durchgezogen. Die vorbereiteten Suralisnerven werden mit dem Vessel-Loop vernäht und durch die Achsellücke gezogen. Die Fixierung zwischen Nerv und Loop wird anschließend exzidiert. Unter Einsatz des Operationsmikroskops wird nunmehr der proximale N. axillaris durch Rückschnitt bis auf neuromfreie faszikuläre Struktur und interfaszikuläre Präparation von „Faszikelfingern“ für die Aufnahme der Interponate vorbereitet. Die zwei Nerveninterponate werden nun in der Länge

angepasst. Dann wird ihre Lage im Situs optimiert: es besteht keine Torsion entlang der Interponatlängsachse, es liegt reichlich redundante Länge vor, die Interponate haften aufgrund der Kohäsionskräfte spontan an den Empfängerfasziken. Die Koaptation wird mittels jeweils einer 10/0-Nervennaht gesichert und im lateralen Bereich durch eine dünne Schicht Fibrinkleber verstärkt. Nun erfolgt die Koaptation der Transplantate im dorsalen Zugangsbereich. Der vordere und hintere Axillarisast wird vom Neurom diskonnektiert, aus der Achsellücke herausluxiert und mit den beiden Suralisenden derart koaptiert, dass der untere verklebt und der obere mit zwei 10/0-Nervennahten gesichert wird. Kontrolle auf Blutungsruhe, dann Wundverschluss jeweils mit Fasciennaht, infraklavikulär mit Readaptation des M. pectoralis major, Subkutannaht, resorbierbare Einzelknopfintrakutannaht, Anbringen von Steristrips und Kompressenverbänden.

Nachbehandlung

Ruhigstellung in Armbeugstellung für 3 Wochen mit initial Gilchrist oder Dreieckttuch. Nach 10-14 Tagen sollen Pendelbewegungen im Schultergelenk durchgeführt werden. Extreme passive Bewegungen im Schultergelenk sind für 3 Wochen zu vermeiden. Nach 3 Wochen progrediente krankengymnastische Beübung. Unterstützendes Schwimmtraining sehr zu empfehlen. Halbjährliche EMG Kontrollen wünschenswert, erste Wiedervorstellung beim Operateur nach 6 Monaten.

Ergebnis

Die Patientin kann nach 6 Monaten eine Besserung feststellen, nach 12 Monaten ist bereits ein für Sie sehr zufriedenstellendes funktionelles Resultat erreicht. Der Arm ist in alle Richtungen über die Horizontale zu bewegen und auch für Überkopfarbeiten einzusetzen. Eine kaum eingeschränkte Bewegung des Armes im Raum ist möglich („Bewegungsketten“). Die grobe Kraft des M. Deltoideus liegt bei 5/5 ist jedoch schwächer als auf der gesunden Seite; die Reinnervation ist im EMG objektivierbar. Die laterale Seite des Schulterreliefs ist noch asymmetrisch. Eine weitere Kräftigung im Verlauf von 3 Jahren nach OP ist zu erwarten.

Rekonstruktion des N. radialis am linken Oberarm nach Humerusfraktur

- **Prinzip der Nervenrekonstruktion mit Transplantatinterposition, Koaptation mit Nervennaht (Abb.1)**

Anamnese

Der Patient zog sich im Rahmen eines Fußballspieles eine Humerusfraktur links zu welche langstreckig mit einer Platte versorgt wurde. Seither bestand eine Plegie mit Ausfall der Radialis-Funktion distal der Trizepsäste, ohne dass sich in den darauffolgenden Monaten eine Besserungstendenz abzeichnete. Der Befund wurde ohne Konsequenz 12 Monate im Verlauf beobachtet.

Befund

Bei Aufnahme fand sich ein muskelkräftiger, durchtrainierter Patient, der eine Hypästhesie am Handrücken und radialen Unterarm linksseitig angab. Motorisch bestand eine Plegie der abhängigen Muskulatur distal des Trizeps: M. brachioradialis, M. extensor carpi ulnaris und radialis, M. extensor digitorum und extensor pollicis, M. opponens pollicis brevis und longus, extensor pollicis.

Auch wenn aufgrund des vergangenen langen Zeitraumes nach dem Trauma die Prognose eingeschränkt erscheint, bestand eine klare Indikation zur Darstellung des N. radialis am Oberarm und zur Rekonstruktion mittels Transplantation.

Ausgeführte Operation

Moderate Halbseitenlage unter Elevation und Auflegen des linken Unterarmes auf den Brustkorb. Eingehen über den alten posterioren Zugang am linken Oberarm. Präparation der etwas vernarbten Subcutis und Eröffnung der Muskelfascie. Die Muskulatur wird in Faserrichtung separiert und abgeschoben, bis die Platte am Humerus dargestellt werden kann. Im proximalen Bereich wird der N. radialis im gesunden dargestellt. Er verläuft zwischen Knochen und Platte. Der distale Nervenanteil lässt sich noch am Humerus vor Durchtritt durch das Septum intermusculare darstellen. Die Platte und Schrauben werden entfernt. Der Anteil des N. radialis, welcher unter der Platte verlief, ist erheblich abgeplattet und neuromatös verhärtet. Distal dieser Läsion lässt sich mit dem Nervenreizgerät keine Muskelkontraktion an Unterarm oder Hand auslösen, auch Nervenaktionspotentiale sind über die Läsion hinweg nicht auslösbar. Bei Reizung des proximalen N. radialis Anteiles wird eine Trizepskontraktion ausgelöst. Der N. radialis wird nun proximal und distal freigelegt um Rückschnitte für die nachfolgende Transplantation zu ermöglichen. Als autologes Interponat wird der N. suralis vom linken Unterschenkel gehoben. Am Oberarm wird unter Zuhilfenahme des Operationsmikroskopes die eigentliche Rekonstruktion durchgeführt. Nach Exzision des Kontinuitätsneuroms und sequenziellen Rückschnitten distal und proximal zeigt sich schließlich

unvernarbte, glänzende und aus der Schnittebene hervor tretende Faszikelstruktur. Es werden einzelne Faszikelgruppen durch interfaszikuläre Präparation kreiert. In Streck- und Beugestellung des Armes wird nun die zu überbrückende Distanz ausgemessen und zusätzlich Reservelänge addiert um ein spannungsfreies Einpassen der Interponate zu ermöglichen. Der von Bindegewebe gesäuberte Suralis wird in situ in fünf Transplantate entsprechender Länge aufgeteilt. Die ersten drei Transplantate werden mit jeweils einer 10-0 Einzelknopfnahm koaptiert. Das vierte und fünfte Transplantat kann nach sorgfältigem Einpassen allein mit Hilfe von Fibrinkleber gesichert werden. Nach Kontrolle auf sichere Koaptation wird die Muskulatur readaptiert und die Faszie geschlossen. Auf die Einlage einer Drainage wird bewusst verzichtet. Hautverschluß mit Subcutan und Einzelknopfnahm. Auf dem OP Tisch wird ein Gilchrist-Verband angelegt.

Nachbehandlung

Der Arm wird für zwei Wochen mit 90° Beugung im Ellenbogengelenk ruhig gestellt. Anschließend wird die Bewegung im Ellenbogengelenk für 20 Grad in jede Richtung frei gegeben. Nach drei Wochen wird die Ruhigstellung komplett aufgehoben.

Ergebnis

Der Patient zeigt 9 Monate nach der Transplantation eine gute Kontraktion des M. brachioradialis und eine beginnende Handgelenkstreckung. 12 Monate nach der Operation ist bereits eine gute Fingerstreckung mit KG 3-4/5 möglich. Dieses funktionelle Resultat stellt sich ein obwohl ein weiterer Sturz mit Refraktur mehrere Monate nach der Transplantation eine erneute Osteosynthese im transplantierten Bereich notwendig macht. 18 Monate nach der Transplantation ist die Fingerstreckung komplett möglich.

Läsion des N. ulnaris in Kontinuität infolge dislozierter Unterarmfraktur mit ausbleibender funktioneller Regeneration

- **Beispiel für Rolle der frühzeitigen Neurosonographie, die Bedeutung einer explorativen Freilegung, intraoperativen Elektrophysiologie, Dekompression und externen Neurolyse (Abb. 2)**

Anamnese

Die 12 Jahre alte Patientin verunfallte mit dem Fahrrad und zieht sich hierbei eine geschlossene, dislozierte Unterarmfraktur mit deutlicher Fehlstellung des Unterarmes zu (Abb. 2 erste zwei Bilder). Die Fraktur wird direkt am Unfallort reponiert und umgehend osteosynthetisch mittels intramedullärer Nägel in Radius- und Ulnaschaft versorgt. Bereits am Unfallort besteht ein kompletter Ausfall der distalen Ulnarisfunktionen. Im Verlauf zeigt sich keinerlei Besserung bei Komplettausfall der ulnarisversorgten Handbinnenmuskulatur sowie Hyp- bis Anästhesie im Ulnarisgebiet. Ausgespart bleibt lediglich der ulnare Handrücken. Dann stellen sich auch deutliche Atrophien mit beginnender Fehlstellung im Sinne einer Krallenhand ein und es besteht ein gestörtes Kälte- und Wärmeempfinden. Die zu lange Verlaufsbeobachtung betrug mehrere Monate. Die Patientin ist Rechtshänderin.

Befund

Deutliche Atrophie der Handbinnenmuskulatur mit Krallenhandstellung und Hypothenar- sowie Interdigitalatrophie (Abb. 2 erste Bildreihe, letzte zwei Bilder). *Keine trophischen Störungen bei intakter Sudomotorik.* Uneingeschränkte Beweglichkeit der Ellenbogenbeugung, der Pro- und Supination. Die Handgelenksexension und -beugung ist mechanisch durch die intramedullären Nägel eingeschränkt. Deutliche Hypästhesie am Klein- und ulnaren Ringfinger sowie am Hypothenar. Ausgespart ist der Bereich am dorsalen ulnaren Handrücken. Motorisch zeigen sich Paresen vom Kraftgrad 0/5 der ulnaren Seite des FDP an Finger IV und V, des M. interosseus dorsalis I, der Mm. lumbricalis III und IV, des Adductor pollicis, des Abductor digiti minimi bei intakter Funktion des FCU mit Kraftgrad 5/5. Uneingeschränkte Funktion der durch den N. medianus und radialis versorgten Muskulatur.

Die Neurosonographie zeigt eine deutliche Auftreibung des Nervs im distalen Unterarmbereich. Im aktualisierten EMG ergibt sich bei Ableitung aus der abhängigen Handbinnenmuskulatur kein Hinweis auf Reinnervation.

Die aktuellen Röntgenaufnahmen zeigen eine sehr gute Reposition bei in situ liegenden Marknägeln. Auf den Aufnahmen vom Unfalltag vor der Marknagelung zeigte sich eine grobe Fehlstellung mit Angulation um ca. 20° und Versatz auf der Radiusseite um Schaftbreite.

Operation

In Rückenlagerung, Auslagern des re. Armes auf dem Armtisch, Vorbereiten des re. Beines zur etwaigen Suralisentnahme. Anzeichnen eines Hautschnittes unter Korrelation mit der auf den Röntgenbildern erkennbaren Frakturstelle. Gerader Hautschnitt, Eröffnen der Unterarmfascie, Darstellen des M. flexor carpi ulnaris, Lateralisieren desselben und Darstellen des N. ulnaris

proximal und distal vom Gesunden aus. Es zeigt sich ein ca. 8 -10 mm langer Bereich mit einer narbigen Einziehung auf Höhe der Frakturstelle (Abb. 2, zweite Bildreihe). Hier wird zunächst dekomprimiert und extern neurolysiert. Die Narbe hat den Nerv deutlich von extern konstringiert. Nach zirkumferenzieller externer mikrochirurgischer Neurolyse ist die Einschnürung des Nervs noch erkennbar. Unter Spülung gewinnt der Nerv an dieser Stelle zunehmend wieder an Kaliber. Unter Mikroskopsicht zeigt sich keine eindeutige Verletzung der Nervinnenstruktur. Nunmehr erfolgt die elektrophysiologische Testung des Nervs. Bereits bei direkter Stimulation mit der bipolaren Reizpinzette zeigen sich Kontraktionen im Hypothenar. Die erhaltene Leitungsfähigkeit des Nervs über die Läsionsstelle hinweg wird mit Nervenaktionspotentialen verifiziert. Es zeigt sich ein eindeutiges Antwortpotential mit einer Nervenleitgeschwindigkeit von ca. 35-45 m/sec. bei noch deutlich reduzierter Amplitude. Zusammenfassend besteht somit eine sehr gute Aussicht auf funktionell wirksame Regeneration. Nach Kontrolle auf Blutungsruhe erfolgt ein schichtweiser Wundverschluss.

Nachbehandlung

Keinerlei Ruhigstellung. Die Beübung setzt unmittelbar postoperativ ein. Eine intensive Handtherapie unter kombiniertem Einsatz physiotherapeutischer und ergotherapeutischer Methoden ist von vorrangiger Bedeutung. Die Handtherapie dient auch dazu einzelne Übungen zu erlernen und selbständig zu trainieren.

Ergebnis

Wie aufgrund des intraoperativen Befundes zu erwarten hat sich eine sehr gute funktionelle Erholung eingestellt. Die Hand wird wieder normal ohne jegliches Vermeidungsverhalten eingesetzt. Feinmotorische Bewegungen und Griffe inklusive des Schreibens sind wieder hergestellt. Die auf den Abbildungen 6 Monate nach dem Eingriff noch erkennbare Binnenmuskelatrophie (z.B. M. interosseus dorsali I) ist im weiteren Verlauf wieder ausgeglichen (Abb. 2 unterste Bildreihe).

Fallkommentar

Mit einer frühzeitig durchgeführten Neurosonographie kann deutlich werden, dass eine erhebliche narbige Konstriktion eines Nervs vorliegt. Damit ist selbst bei elektrophysiologisch diskreten Hinweisen auf Reinnervation eine Indikation zur Freilegung zu stellen, denn die Regeneration wird ohne die Beseitigung der starken mechanischen Barriere nicht vollständig sein. Meist bleibt sie in solchen Fällen komplett aus oder auf sehr niedrigem Niveau stehen. Die Neurosonographie kann nicht immer zwischen einem Kontinuitätsneurom und einer externen den Nerv komprimierenden Narbe unterscheiden. Dennoch kann mit einem derartigen sonographischen Befund eine Indikation zur Freilegung und externen Neurolyse und gegebenenfalls Rekonstruktion gestellt werden.

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein in der Rekonstruktion erfahrener Nerven Chirurg einen solchen Nerv zusätzlich schädigt ist verschwindend gering. Die Wahrscheinlichkeit, dass eine Funktionsbesserung resultiert sehr viel höher.

Früh sekundäre Rekonstruktion des N. ulnaris nach stumpfer Zermalmung auf Ellenbogenhöhe.

- **Läsion in Diskontinuität vom proximalen Sulcus bis in den Kubitaltunnel re mit schmaler Bindegewebsbrücke (Abb. 4)**

Anamnese

Der Patient leidet aufgrund von Abnutzungserscheinungen, Osteophyten und einem freien Gelenkkörper seit vielen Jahren unter Gelenkschmerzen am rechten Ellenbogengelenk. Er unterzieht sich einer Arthroskopie bei der auch ein Gelenkshaver eingesetzt wird. Postoperativ fällt sofort eine schwere Ulnarisläsion auf. Der Operateur leitet umgehend eine umfassende Diagnostik ein, veranlasst die weitergehende Behandlung inklusive Elektrophysiologie, MRT, Neurosonographie und Vorstellung bei einem rekonstruktiv tätigen Nerven Chirurgen. Der neurosonographische Befund lässt auf eine schwere strukturelle Läsion mit zumindest Teildiskontinuität schließen. Klinisch besteht eine Taubheit am kleinen und ulnaren Ringfinger, am ulnaren Handballen sowie auch an der ulnaren Handkante. Die Feinmotorik ist eingeschränkt, der Faustschluss kaum möglich, das Fingerspreizen kaum mehr möglich. Die "Deodose" gleite beim Halteversuch weg. Tippen an der Tastatur und Schreiben sei eingeschränkt. Weiterhin besteht eine starke Überempfindlichkeit für Berührungen am Eingang in den Kubitaltunnel. Dadurch werden ausstrahlende elektrisierende Missempfindung bis in den Klein- und Ringfinger ausgelöst. Es wird ein als "dumpf-brennend" empfundener Grundschmerz beschrieben mit einzeln aufgepfropften stechenden Schmerzempfindungen. VAS maximal bis 7,

minimal 0.

Befund

Bei der Untersuchung zeigt sich eine bisher nur sehr diskrete aber dennoch beginnende Krallenstellung am kleinen und Ringfinger. Die Finger adduktion und –abduktion ist im Vergleich zur gesunden Hand deutlich eingeschränkt. Ausgeprägt ist dies am Klein- und Ringfinger erkennbar. Die rechte Hand ist bei dem muskelkräftigen Rechtshänder noch hypertropher als links ausgebildet. Es zeigt sich noch kein Hinweis auf eine trophische Störung, die Sudomotorik ist auf der ulnaren Handseite noch vorhanden. Es findet sich eine Hyp- bis Anästhesie am kleinen und ulnaren Ringfinger, am ulnaren Handballen und an der ulnaren Handkante, weniger ausgeprägt auch am ulnaren Handrücken. Der Unterarm zeigt eine nahezu nicht beeinträchtigte Sensibilität. Es lässt sich ein deutliches Hoffmann-Tinel-Zeichen am distalen Sulcus ulnaris auslösen. Proximal des Sulcus ist ein solches nicht auslösbar. Die Wunden der beiden Ports für die Arthroskopie sind reizlos abgeheilt. Motorik: FCU 5/5, FDP am kleinen und Ringfinger Kraftgrad 0/5, Interosseus dorsalis 1 fraglich 0-1/5, Abductor digiti minimi 0/5, Interossei dorsalis/palmaris 0/5; keine Einschränkung der Medianusfunktion, FDS 5/5, APB 5/5.

In Zusammenschau der Befunde, insbesondere auch des neurosonographischen, ist von einer substantiellen Läsion auszugehen, bei der zumindest ein großer Anteil in Diskontinuität ist. Formal handelt es sich also um eine „*stumpfe Durchtrennung*“ infolge Zermalmung des N. ulnaris. Es besteht damit die Indikation zur Exploration und Rekonstruktion. Diese wird 3 Wochen nach dem Trauma durchgeführt.

Ausgeführte Operation

- Freilegung und Dekompression, Mikrochirurgische autologe Transplantation des rechten N. ulnaris auf Ellenbogenhöhe mit 6 x 5 cm Nerveninterponat, submuskuläre Volarverlagerung des transplantierten N. ulnaris auf ein gestieltes „Fettbett“.
- Intraoperative Nervenaktionspotentialbestimmung.

Rückenlagerung, Auslagern des rechten Armes auf den Armtisch. Markieren des über den Sulcus gezogenen Hautschnittes vom distalen Oberarm bis zum proximalen Unterarm. Zunächst Darstellen des N. ulnaris im distalen Gesunden durch einen transmuskulär separierenden Zugang. Dann Darstellen des N. ulnaris proximal im Gesunden. Unter Zuhilfenahme des Operationsmikroskopes zupräparieren auf die verletzte Region von proximal und distal und scharfes auspräparieren der Nervenanteile aus der Narbe. Der Nerv ist bis auf eine sehr schmale bindegewebige Brücke nicht mehr in Kontinuität. Um eine Restleitung in dieser Bindegewebsbrücke auszuschließen, werden Nervenaktionspotentiale über die Läsion hinweg bestimmt. Es lassen sich keinerlei Potentiale ableiten. Der N. cutaneus antebrachii medialis ist in die Narbe eingebunden, aber strukturell intakt. Er wird bis zum Oberarm getunnelt entfernt und zusammen mit dem gehobenen N. suralis als freies Transplantat verwendet. Um eine bessere Transplantatlage zu ermöglichen wird eine submuskuläre Volarverlagerung vorbereitet. Hierzu wird die Flexor-ponator-Muskelmassse am Epicondylus medialis abgesetzt. Dann wird ein gestieltes Fettlappen aus dem Subkutangewebe kreiert um ein gleitfähiges Nervenbett in der neuen Position herzustellen. Der gestielte Fettlappen wird mit Einzelknopfnähten fixiert. Nun wird die eigentliche Rekonstruktion vorgenommen. Unter Mikroskopsicht wird der proximale und distale Stumpf bis in neuromfreies Areal auf Faszikelstruktur zurück geschnitten (Abb. 4, obere Reihe). Es werden im proximalen und distalen Empfängerstumpf jeweils sechs Faszikelgruppen interfaszikulär präpariert um jeweils einen Transplantatstrang damit verbinden zu können. Die sechs Transplantate werden zugeordnet, positioniert, torsionsfrei ausgerichtet und in eine angemessene, redundante Länge gekürzt und koaptiert (Abb. 4, untere Reihe). Die Koaptation erfolgt proximal und distal mit jeweils einer 10/0-Nervennaht pro Faszikel. Teilweise wird die Koaptation mit Fibrinkleber augmentiert. Um auf ausreichende Transplantatredundanz und Sicherheit der Koaptation zu überprüfen wird der Arm vor der Muskelnahnt gebeugt und gestreckt. Muskelreadaption in Beugstellung des Armes. Die Flexor-ponator-Muskelmassse wird vorsichtig readaptiert. Nach Kontrolle auf Blutungsruhe, Subkutannaht, Intrautannaht, Steristrips, Anwickeln von elastischen Binden am Bein und am Arm. Der Arm wird in Beugstellung mit einem Dreieckstuch am Thorax fixiert.

Nachbehandlung

Immobilisation im Dreiecktuch für 3 Wochen, Bewegungen der Hand und -Finger direkt postoperativ. Leichtes Beugen und Strecken im Ellenbogengelenk für 20-30° im Dreiecktuch nach 2 Wochen. Nach 3 Wochen unter krankengymnastischer Anleitung vorsichtiges progredientes Aufdehnen des Armes um wieder in die Streckung zu gelangen.

Ergebnis

Die neuropathische Schmerzsymptomatik ist bereits im frühen postoperativen Verlauf deutlich gebessert. Das funktionelle sensomotorische Ergebnis ist noch nicht beurteilbar, nach 6 Monaten haben sich jedoch erste Reinnervationszeichen eingestellt.

Kombinierte Nervenverletzung mit Durchtrennung des N. medianus und Teildurchtrennung des N. Ulnaris auf Höhe der Ellenbeuge nach Glasverletzung

- **Prinzipien der kompletten Rekonstruktion im Vergleich zur Teilrekonstruktion, Aufsuchen von läsierten Nerven im Gesunden (Abb. 6)**

Anamnese

Der Patient wurde bei einer tätlichen Auseinandersetzung durch eine Glasscheibe gestoßen und zog sich hierbei eine tiefe und spritzende Schnittverletzung zu, welche notfallmäßig mit End-zu-End Naht der durchtrennten A. brachialis und V. basilica versorgt werden musste. Im weiteren Verlauf wurde ein kompletter Ausfall der Nn. ulnaris und medianus offensichtlich.

Befund

Drei Monate nach dem Unfall zeigt sich bei reizlosen Wundverhältnissen eine „trockene“ und „weiße“ Hand im Bereich der Palma mit aufgehobener Sudomotorik der Handfläche im Sinne einer kompletten N. ulnaris- und N. medianus Verletzung. Keinerlei Willkürmotorik der durch den N. ulnaris und N. medianus versorgten Handinnenmuskulatur. Ebenfalls aufgehobene Sensibilität. Die Hand- und Ellenbogengelenke sind frei beweglich. Der Puls ist tastbar. Es lässt sich ein ausgeprägtes Hoffmann-Tinelsches Zeichen beim Beklopfen am proximalen Ellenbogen im Bereich über dem N. medianus auslösen. Der N. ulnaris ist bereits vor dem Eintritt in den Sulcus ausgesprochen berührungsempfindlich; ein Beklopfen ist kaum möglich. Die präoperative elektrophysiologische Untersuchung bestätigt den Verdacht eines kompletten Ausfalls. Bei der Neurographie lässt sich kein Aktionspotential über dem N. medianus und N. ulnaris links ableiten. Im EMG aus dem M. abductor pollicis brevis und abductor digiti minimi findet sich pathologische Spontanaktivität ohne Hinweise auf Willküraktivität.

Ausgeführte Operation

- Freilegung des N. medianus- und ulnaris vom distalen Oberarm bis zum proximalen Unterarm. Rekonstruktion des N. medianus mit 4 x 8 cm N. suralis über die Ellenbeuge hinweg.
- Teilnervenrekonstruktion des N. ulnaris mit 4 x 3-4 cm N. cutaneus antebrachii lateralis („split repair“).

In Rückenlage Auslagern des linken Armes auf dem Armtisch. Übernahme des vorbestehenden doppel-T-förmigen Hautschnittes. Dann geschwungene Verlängerung des Schnittes am Unterarm im Sinne eines anteromedialen Zuganges nach McCulloch. Zunächst aufsuchen des N. medianus distal im Gesunden. Dies wird aufgrund der Vernarbungen zunächst transmuskulär dann in typischer Lage unterhalb des M. flexor digitorum superficialis durchgeführt. Verfolgen des Medianus nach proximal bis der distale Stumpf kurz unterhalb der Ellenbeuge aufgefunden werden kann. Dann Aufsuchen des proximalen Stumpfes. Dieser wurde von den Voroperateuren, zum besseren Auffinden bewußt mit Prolene markiert. Nunmehr weitergehende Mobilisation proximalwärts bis in gesundes Gewebe. Dann Darstellung des N. ulnaris im Gesunden durch separierend transmuskuläres Vorgehen durch den Flexor carpi ulnaris. Verfolgen des N. ulnaris nach proximal in die Ulnarisrinne. Entdachen derselben und des Kubitaltunnels. Die weitere Präparation erfolgt unter Mikroskopsicht. Der Nerv ist hier in massives Narbengewebe eingebettet und auf das doppelte seines normalen Kalibers verdickt. Er ist nicht nur aufgetrieben, sondern auch an mehreren Stellen lazeriert und neuromatös verändert. Der Nerv befindet sich in Kontinuität, weist aber eine schwere Teilquerschnittsläsion auf. Er wird proximal und distal zirkumferenziell dargestellt, um Nervenaktionspotentiale

bestimmen zu können: hierzu proximal Stimulation und distale Ableitung über eine Distanz von zunächst 4, dann 10 cm. Es zeigt sich bei Stimulation bis zu maximal 20 mA bei sehr gut reproduzierbarem Stimulationsartefakt keinerlei Reizantwort. Es erfolgt darauf eine mikrochirurgische interfaszikuläre Präparation der Ulnarisläsion. Letztlich besteht nur noch 1/5 des Querschnittes aus einem nicht neuromatös veränderten Faszikelstrang. Der Rest des Querschnittes wird nach Exzision der neuromatös veränderten Anteile für die interfaszikuläre Teilnervenquerschnittstranplantation vorbereitet (Abb. 6). Dann werden ebenso die Stümpfe des N. medianus nach Rückschnitt auf gesunde Faszikelstruktur interfaszikulär dergestalt präpariert, dass einzelne „Faszikelfinger“ zur Transplantataufnahme entstehen. Für den N. medianus und den - ulnaris werden die durch Transplantate zu überbrückenden Distanzen bestimmt. Medianusrekonstruktion: N. suralis wird vom linken Bein entnommen und mikrochirurgisch aufgearbeitet. Die zurechtgeschnittenen Interponate werden mit 10-0 Nervennaht proximal und distal an den N. medianus koaptiert. Die Interponatlänge beträgt jeweils um die 8 cm, wobei die Koaptation bewusst in diskret unterschiedlicher Anschlußhöhe durchgeführt wird.

Ulnarisrekonstruktion: als Tranplantat wird N. cutaneus antebrachii lateralis gehoben. Die notwendigen Interponatlängen liegen zwischen 3 und 4 cm. Es werden vier Interponate eingelegt und mit Fibrinkleber gesichert, ein Interponat wird zusätzlich mit einer Naht koaptiert. Nach Kontrolle auf Blutungsruhe wird der Arm zur Prüfung der Koaptationssicherheit vorsichtig im Ellenbogengelenk bewegt. Wundverschluss und Anlage eines Gilchrist-Verbandes.

Nachbehandlung

Der Ellenbogen wird strikt für drei Wochen im Gilchrist Verband immobilisiert dann ist eine progrediente Beübung unter schrittweise zunehmenden Bewegungsexkursionen im Ellenbogengelenk möglich. Die Finger- und Handgelenke können in der Schlinge nach 14 Tagen beübt werden, ebenso die Schulter.

Ergebnis

Sechs Monate nach der Operation wurde bereits eine sehr gute funktionelle Verbesserung erreicht. Der Patient konnte die Hand bereits wieder einsetzen und feststellen wie sich sukzessive wieder eine, Temperaturempfindung, Berührungsempfindung und allgemeine Sensibilität einstellte. Für den Untersucher ist neben der augenscheinlichen motorischen Reinnervation auch die Veränderung der Hauttrophik erkennbar. Die ehemals weißlich demarkierten trockenen Anteile der Hand sind nun nicht mehr auszumachen. Im weiteren Verlauf ist von einer weiter voranschreitenden sehr ausgeprägten Restitution auszugehen.

Dekompression und externe Neurolyse des N. peroneus communis bei akuter traumatischer Läsion mit Komplettausfall

- **Bsp. für eine sich nicht erholende traumatische Nervenläsion in Kontinuität aufgrund eines zusätzlich vorliegenden anatomischen Engpasses, Rolle der Exploration und Dekompression**

Im vorgestellten Fall führt eine Hüftoperation bei anlagebedingtem Nervenengpass zu einem Totalausfall des Nervs ohne jegliche spontane Erholungstendenz im Verlauf von 8 Monaten.

Diagnose: akute, kombinierte Druck-/Dehnungsläsion des N. peroneus auf Fibulaköpfchenhöhe links auf dem Boden einer anlagebedingten Enge.

Anamnese:

Bei dem minderjährigen Patienten wurde 3 Jahre zuvor ein T-Zell-Lymphom (Non-Hodgkin-Lymphom) mit Tumorbefall an der Halswirbelsäule erfolgreich chemotherapiert. Wohl auch infolge der Chemotherapie zeigten sich zunehmende Hüftveränderungen, welche aufgrund einer fortgeschrittenen Hüftkopfnekrose mit sekundär kontrakter Coxarthrose links die Implantation einer zementfreien Hüft-TEP linksseitig notwendig machten. Nach der Operation besteht eine komplette Fußheberparese, begleitet von einer deutlichen Schmerzsymptomatik, ausstrahlend bis in den linken Vorfuß. Diese hat auch eine brennende Schmerzkomponente. Aufgrund der Schmerzintensität Behandlung mit Pregabalin. Im Verlauf zeigt sich keinerlei Besserung der Motorik. Bei der ambulanten Erstvorstellung zeigt der Patient barfuß einen Steppergang. Er ist mit einer Peronausschiene versorgt und hat hierdurch eine deutliche Druckstelle an der Ferse entwickelt. Es besteht eine Hypästhesie am lateralen Unterschenkel und Vorfuß bei Anästhesie im interdigitalen Autonomstreifen des Profundusanteils zwischen DI und DII. Die Fußsohle zeigt eine normale Berührungsempfindlichkeit. Die Motorik des M. quadriceps, des iliopsoas, der Hüftad- und -abduktoren und des Bizeps femoris ist uneingeschränkt und zeigt jeweils einen Kraftgrad von 5/5. Es besteht kein Hinweis auf eine Parese des Gluteus medius/minimus oder maximus, entsprechend Kraftgrad 5/5. Der M. tibialis anterior und die Mm. peronei, der extensor hallucis longus und die distalen Extensoren zeigen keinerlei Kontraktionen, entsprechend einem Kraftgrad 0/5. Die Funktion

des M. tibialis posterior ist sehr gut mit einer kräftigen Inversionsbewegung von KG 5/5. Es findet sich ein positives Hoffmann-Tinel-Zeichen auf Fibulaköpfchenhöhe. Dennoch findet sich auch ein deutlich umschriebener Schmerz bei tiefer glutealer Palpation in Projektion über dem Foramen infrapiriforme.

Aufgrund der TEP-Implantation war auch eine Läsion des peronealen Anteils des N. ischiadicus in Betracht zu ziehen. Eine präoperative Neurosonographie zeigte keine neuromatösen Veränderungen des N. ischiadicus, jedoch eine Abplattung des N. peroneus auf Fibulaköpfchenhöhe und eine weiter proximal gelegene Auftreibung.

Ausgeführte Operation

1. Freilegung des N. peroneus vom distalen Oberschenkel bis zum proximalen Unterschenkel auf Höhe des Fibulaköpfchens, Dekompression bei Fascienenge, Teilinzision des Ansatzes der peronealen Muskulatur am Fibulaköpfchen, Nervenaktionspotentialbestimmung.
2. Minimalinvasive Inspektion des N. ischiadicus über subglutealen Port, kein Hinweis auf neuromatöse Läsion.

Intubationsnarkose, frei von Muskelrelaxanzien. Bauchlagerung. Leichtes Anheben unter der linken Hüfte, um so eine diskrete Rotation des Gesäßes zu erzeugen. Anzeichnen eines S-förmigen Hautschnittes hinter dem Fibulaköpfchen gelegen und nach proximal in den distalen Oberschenkel auslaufend sowie eines in die Subglutealfalte gelegten kurzen Hautschnittes. Zunächst Eingehen hinter dem Fibulaköpfchen, Darstellen der Faszie. Es fällt hier bei dem ansonsten nicht muskelkräftigen Mann eine deutlich verdickte und sehnenartig verstärkte Faszie mit akzessorischem Muskel als Ausläufer der Bizepsfaszie auf. Dies deckt sich mit der Höhe der präoperativ neurosonographisch festgestellten Nervenabplattung. Die Faszie und der Muskel werden durchtrennt. Die Struktur war ca. 4 mm dick, der Nerv deutlich abgeplattet und im gesamten distalen Verlauf kalibervermindert. Der Nerv wird nun nach distal bis in seine Trifurkation dargestellt, hierzu wird die Ansatzstelle des M. peroneus longus/brevis am Fibulaköpfchen teilinzidiert. Der Nerv ist nach distal nicht mehr eingeengt. Nun wird er nach proximal dekomprimiert. Um eine Nervenaktionspotentialbestimmung durchzuführen, wird er zirkumferenziell extern neurolysiert, nach mehrfacher Stimulation mit dreipoliger Stimulationselektrode und Ableitung mit zweipoliger Ableitelektrode lässt sich kein eindeutiges Antwortpotential bei gutem Stimulationsartefakt und Stimuli bis 15 mA ableiten. Insgesamt ist der Nerv jedoch nicht neuromatös verhärtet, so dass keinerlei Indikation zur Rekonstruktion mit Transplantation gesehen wird. Der wahrscheinlichste Mechanismus dürfte in der anlagebedingten Engstelle und einer zusätzlichen akuten Dehnungs-Druckwirkung bei den Repositionsmanövern der TEP Implantation in Kniebeugstellung bestanden haben. Um eine bildtechnisch nicht dargestellte Läsion im Bereich des N. ischiadicus auf Gesäßhöhe auszuschließen, wird subgluteal eröffnet, zwischen den beiden Muskelbäuchen präpariert, und der Nerv dargestellt. Er liegt in seinem natürlichen Bett ohne Hinweis auf Vernarbungen. Der Nerv ist weich palpierbar und nicht neuromatös verändert. Beim Wundverschluß auf Kniehöhe wird bewußt auf eine adaptierende Fasziennaht verzichtet.

Nachbehandlung

Sofortige Mobilisation so weit wie möglich

Ergebnis. Begleitende Krankengymnastische Beübung. Sobald eine Besserung und insbesondere Muskelkontraktion der Fußheber spürbar ist wird der Patient angehalten zu Trainingszwecken auch zuhause kontrolliert barfuß zu laufen, um aktiv am Abrollmechanismus und der muskulären Fußstabilisation zu arbeiten.

Ergebnis

Minimale muskuläre Verbesserung mit einzelnen wahrnehmbaren Kontraktionen innerhalb Tagesfrist. Funktionelle Verbesserung mit minimaler Fußhebung beginnend nach 2 Wochen. Nach 3 Monaten ist eine Fußhebung um 20 Grad mit Kraftgrad 4/5 möglich. 8 Monate nach dem Eingriff besteht keine Einschränkung mehr. Es ist keine Seitendifferenz der Fußhebung mehr feststellbar, der Abrollvorgang des Fußes und das Laufen sind normal

Merke

Auch kombinierte Mechanismen sollten bei traumatischen Läsionen in Betracht gezogen werden. Nach Beseitigung einer prädisponierenden Engstelle ist bei komplettem Ausfall eine innerhalb von Wochen, schnell voran schreitende funktionell wirksame Reinnervation bis zum Normalzustand möglich

Zusammenfassung

Die genaue Evaluation des Läsionsmechanismus und exakte Erhebung des klinischen Befundes direkt nach der Verletzung und gegebenenfalls im Verlauf sind entscheidend. Deswegen ist die frühe Vorstellung bei einem rekonstruktionserfahrenen Nervenchirurgen so wichtig. Ein solcher wird versuchen eine Entscheidung im Hinblick auf eine Operation möglichst frühzeitig herbeizuführen. Hierbei helfen ihm neben der klinischen Expertise auch die modernen bildgebenden Verfahren. Die Sachlage ist dennoch meist klar. Bei kompletten Funktionsausfällen und notwendiger Nervrekonstruktion profitiert der Patient von einer möglichst frühzeitig durchgeführten Operation. In unklaren Fällen werden die diagnostischen Möglichkeiten voll ausgeschöpft. Unter Nervenexperten hat die Bilddiagnostik mit Kernspintomographie und Neurosonographie neben der klinischen Untersuchung und der Elektrophysiologie eine immer größer werdende Rolle eingenommen. In den wenigen dennoch unklaren Fällen hat auch eine explorative Freilegung des Nervs ihre Berechtigung. Bei unklarer Läsionshöhe können endoskopische Verfahren helfen, einen Nerv schonend und mit kleineren Zugängen zu explorieren, bevor langstreckig freigelegt wird. In den meisten Fällen ist mit den adäquaten mikrochirurgischen Verfahren eine Funktionsverbesserung erzielbar. Im Fall einer kompletten Transplantation müssen aber lange Zeiträume in Kauf genommen werden bis sich die Ergebnisse zeigen. Um den Patienten auch langfristig zu motivieren ist die Nachbehandlungsphase bis zu den ersten klinisch erkennbaren Reinnervationszeichen besonders wichtig. Die Patienten profitieren davon, wenn sie von den Therapeuten auch Hinweise erhalten wie sie mit einfachen Mitteln selber trainieren können. Die Nachbehandlung nach physio- und ergotherapeutischen Prinzipien, ergänzt durch regelmäßiges selbständiges Training ist langwierig und eminent wichtig um bestmögliche Resultate zu erzielen (Kretschmer, Antoniadis, & Assmus, 2014). Ein Informationsaustausch zwischen Therapeut und Chirurg ist anzustreben und nützt dem Patienten in jedem Fall.

Literatur

- Campbell, W. W. (2008). Evaluation and management of peripheral nerve injury. *Clinical neurophysiology : official journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, 119(9), 1951–1965. doi:10.1016/j.clinph.2008.03.018
- Dolan, R. T., Butler, J. S., Hynes, D. E., & Cronin, K. J. (2012). The nerve to delay: the impact of delayed referrals in the management of traumatic brachial plexus injuries in the Republic of Ireland. *J Plast Reconstr Aesthet Surg*, 65(8), 1127–1129. doi:10.1016/j.bjps.2012.02.003
- Eser, F., Aktekin, L. A., Bodur, H., & Atan, C. (2009). Etiological factors of traumatic peripheral nerve injuries. *Neurology India*, 57(4), 434–437. doi:10.4103/0028-3886.55614
- Fu, S. Y., & Gordon, T. (1995a). Contributing factors to poor functional recovery after delayed nerve repair: prolonged axotomy. *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, 15(5 Pt 2), 3876–3885.
- Fu, S. Y., & Gordon, T. (1995b). Contributing factors to poor functional recovery after delayed nerve repair: prolonged denervation. *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, 15(5 Pt 2), 3886–3895.
- Fu, S. Y., & Gordon, T. (1997). The cellular and molecular basis of peripheral nerve regeneration. *Molecular neurobiology*, 14(1-2), 67–116. doi:10.1007/BF02740621
- Hart, A. M., Terenghi, G., & Wiberg, M. (2008). Neuronal death after peripheral nerve injury and experimental strategies for neuroprotection. *Neurological research*, 30(10), 999–1011. doi:10.1179/174313208X362479
- Khan, R., & Birch, R. (2001). Latrotoxic injuries of peripheral nerves. *The Journal of bone and joint surgery British volume*, 83(8), 1145–1148.
- Kim, D. H., Murovic, J. A., Tiel, R. L., & Kline, D. G. (2004). MANAGEMENT AND OUTCOMES IN 318 OPERATIVE COMMON PERONEAL NERVE LESIONS AT THE LOUISIANA STATE UNIVERSITY HEALTH SCIENCES CENTER. *Neurosurgery*, 1421–1429. doi:10.1227/01.NEU.0000124752.40412.03
- Kline, D. G. (1989). Civilian gunshot wounds to the brachial plexus. *Journal of Neurosurgery*, 70(2), 166–174. doi:10.3171/jns.1989.70.2.0166
- Kline, D., Tasker, R., & Kim, D. (2008). *Kline & Hudson's Nerve Injuries. ... & Hudson's Nerve*
- Koenig, R. W., Schmidt, T. E., Heinen, C. P. G., Wirtz, C. R., Kretschmer, T., Antoniadis, G., & Pedro, M. T. (2011). Intraoperative high-resolution ultrasound: a new technique in the management of peripheral nerve disorders. *Journal of Neurosurgery*, 114(2), 514–521. doi:10.3171/2010.9.JNS10464
- Kouyoumdjian, J. A. (2006). Peripheral nerve injuries: a retrospective

- survey of 456 cases. *Muscle & nerve*, 34(6), 785–788.
doi:10.1002/mus.20624
- Kretschmer, T., & Birch, R. (2011). *Management of Acute Peripheral Nerve Injuries*. (R. Winn, Ed.) (6 ed., pp. 2465–2483). Elsevier.
- Kretschmer, T., Antoniadis, G., & Assmus, H. (Eds.). (n.d.). *Nervenchirurgie Trauma Tumor Kompression* (1st ed.). Heidelberg: Springer.
- Kretschmer, T., Antoniadis, G., Braun, V., Rath, S. A., & Richter, H. P. (2001). Evaluation of iatrogenic lesions in 722 surgically treated cases of peripheral nerve trauma. *Journal of Neurosurgery*, 94(6), 905–912.
doi:10.3171/jns.2001.94.6.0905
- Kretschmer, T., England, J. D., Happel, L. T., Liu, Z. P., Thouron, C. L., Nguyen, D. H., et al. (2002a). Ankyrin G and voltage gated sodium channels colocalize in human neuroma--key proteins of membrane remodeling after axonal injury. *Neuroscience letters*, 323(2), 151–155.
- Kretschmer, T., Heinen, C. W., Antoniadis, G., Richter, H.-P., & König, R. W. (2009a). Iatrogenic nerve injuries. *Neurosurgery Clinics of North America*, 20(1), 73–90, vii. doi:10.1016/j.nec.2008.07.025
- Kretschmer, T., Ihle, S., Antoniadis, G., Seidel, J. A., Heinen, C., Börm, W., et al. (2009b). Patient satisfaction and disability after brachial plexus surgery. *Neurosurgery*, 65(4 Suppl), A189–96.
doi:10.1227/01.NEU.0000335646.31980.33
- Kretschmer, T., Nguyen, D. H., Beuerman, R. W., Happel, L. T., England, J. D., Tiel, R. L., & Kline, D. G. (2002b). Painful neuromas: a potential role for a structural transmembrane protein, ankyrin G. *Journal of Neurosurgery*, 97(6), 1424–1431. doi:10.3171/jns.2002.97.6.1424
- Noble, J., Munro, C. A., Prasad, V. S., & Midha, R. (1998). Analysis of upper and lower extremity peripheral nerve injuries in a population of patients with multiple injuries. *The Journal of trauma*, 45(1), 116–122.
- Roganovic, Z. (2005). Missile-caused complete lesions of the peroneal nerve and peroneal division of the sciatic nerve: results of 157 repairs. *Neurosurgery*, 57(6), 1201–12; discussion 1201–12.
- Ruijs, A. C. J., Jaquet, J.-B., Kalmijn, S., Giele, H., & Hovius, S. E. R. (2005). Median and ulnar nerve injuries: a meta-analysis of predictors of motor and sensory recovery after modern microsurgical nerve repair. *Plastic and Reconstructive Surgery*, 116(2), 484–94–discussion 495–6.
- Scholz, T., Krichevsky, A., Sumarto, A., Jaffurs, D., Wirth, G. A., Paydar, K., & Evans, G. R. D. (2009). Peripheral nerve injuries: an international survey of current treatments and future perspectives. *Journal of reconstructive microsurgery*, 25(6), 339–344.
doi:10.1055/s-0029-1215529
- Seidel, J. A., Koenig, R., Antoniadis, G., Richter, H.-P., & Kretschmer, T. (2008). Surgical treatment of traumatic peroneal nerve lesions. *Neurosurgery*, 62(3), 664–73; discussion 664–73.
doi:10.1227/01.neu.0000317315.48612.b1
- Stewart, M. P., & Birch, R. (2001). Penetrating missile injuries of the

- brachial plexus. *The Journal of bone and joint surgery British volume*, 83(4), 517–524.
- Taylor, K. S., Anastakis, D. J., & Davis, K. D. (2009). Cutting your nerve changes your brain. *Brain : a journal of neurology*, 132(Pt 11), 3122–3133. doi:10.1093/brain/awp231
- Terenghi, G., Hart, A., & Wiberg, M. (2011). The nerve injury and the dying neurons: diagnosis and prevention. *The Journal of hand surgery, European volume*, 36(9), 730–734. doi:10.1177/1753193411422202
- Wee, A. S., Truitt, N. R., & Smith, L. D. (2006). Type and frequency of peripheral nerve injuries encountered in a clinical neurophysiology laboratory. *Journal of the Mississippi State Medical Association*, 47(3), 67–71.
- Wilbourn, A. J. (1998). Iatrogenic nerve injuries. *Neurologic clinics*, 16(1), 55–82.

Abbildungen

(Abbildungsrechte sämtlich beim Autor)

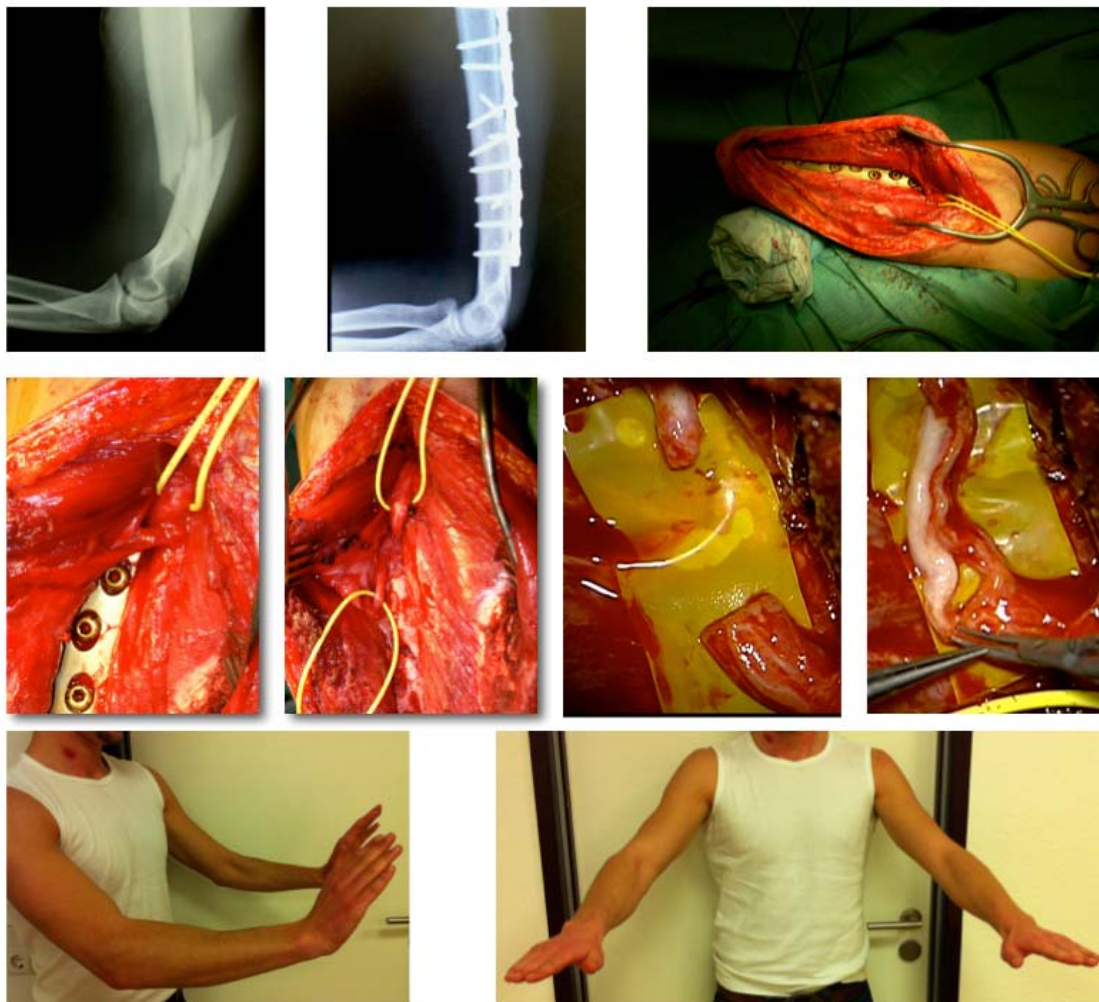


Abbildung 1: Komplette Parese (Fallhand) durch Ausfall des N. radialis distal der Trizepsäste infolge einer dislozierten Humerusfraktur, die am Unfalltag verplattet wurde. Leider wird der Verlauf trotz kompletter Fallhand ohne weitere Maßnahmen 12 Monate im Verlauf beobachtet. Der Nerv wird unterhalb der Platte nur durch einen dünnen Bindegewebsstrang in Kontinuität gehalten (Sunderland Grad IV Läsion). Ohne Transplantation besteht keinerlei Chance auf Regeneration. Nach Rückschnitt des Nervs bis auf normale Faszikelstruktur werden sukzessive Transplantate eingebracht und koaptiert. Nach 1,5 Jahren zeigt sich keinerlei Streckdefizit mehr.



Abbildung 2: Die Nervenregeneration in diesem Fall wurde trotz intaktem Nerv und guter Nervinnenstruktur durch die Einengung der entstandenen Narbe verhindert. Es entwickelt sich bereits eine Krallenhand. Eine solche Narbe und konzentrische Nerveneinengung ist durch den Nervenultraschall erkennbar. Nach einer Dekompression und externen Neurolyse, konnte bereits intraoperativ festgestellt werden, wie sich der Nervendurchmesser wieder vergrößert. Im Anschluss wurde die elektrophysiologische Leitfähigkeit über die Läsion hinweg mit Hilfe von Nervenaktionspotentialen bestimmt. Es zeigt sich eine gute Reizantwort, so dass auf weitere Maßnahmen verzichtet werden kann. Postoperativ kam es innerhalb weniger Wochen zu einer kompletten Restitution. Die Schreibfähigkeit der Patientin war wieder hergestellt.



Abbildung 3: End-zu-End Naht am ulnarseitigen Kleinfingernerv, nach Verletzung mit schmerzhafter Teildurchtrennung.

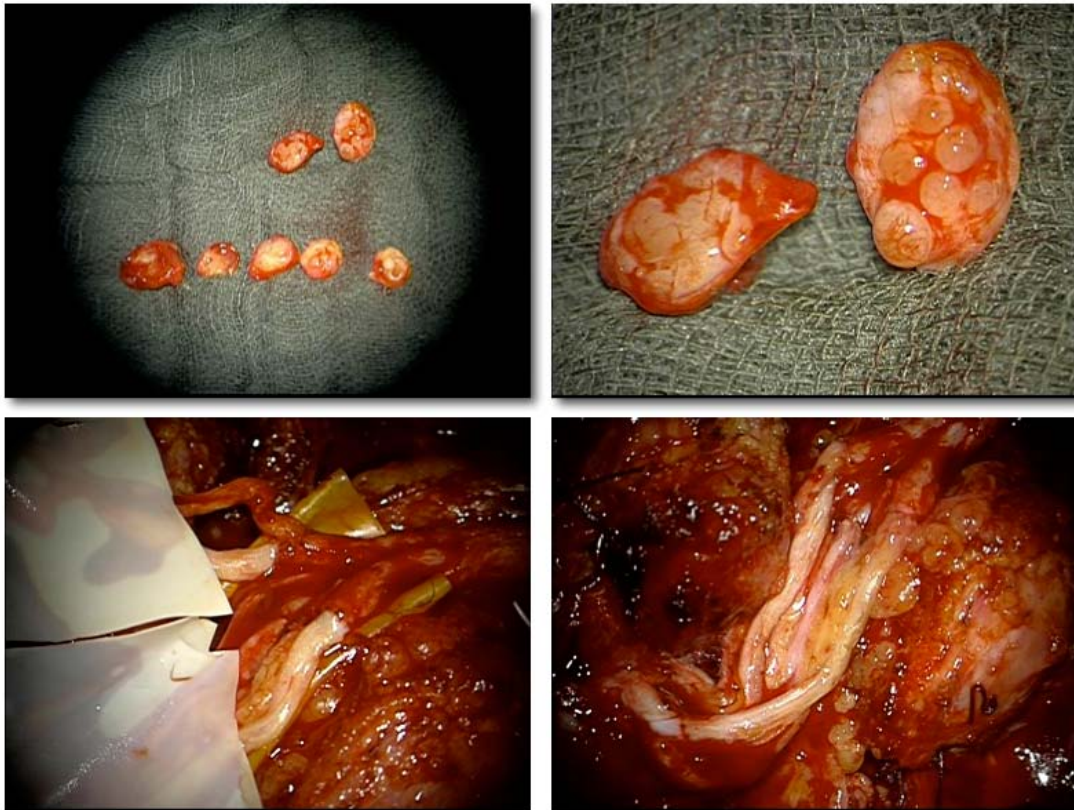


Abbildung 4: Obere Bildreihe - Rückansichte von einem neuromatös veränderten Nervenabschnitt. Auf dem oberen rechten Bild ist links noch narbig veränderter Nerv und rechts bereits wieder beginnende Faszikelstruktur erkennbar.

Unteren Bildreihe - Die Nervenreparaturmaterialien sind auf der linken Abbildung an der helleren Farbe erkennbar. Sie werden spannungsfrei in Überlänge eingelegt und mit einzelnen Faszikelgruppen möglichst passenden Durchmessers koaptiert. Das Wundbett sichert die Gefäßversorgung.

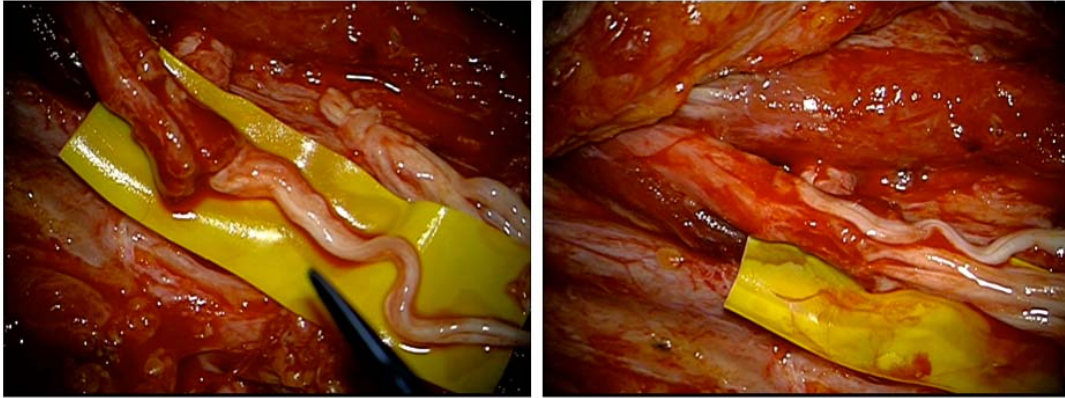


Abbildung 5: Nerventransplantation - Nach Präparation von Faszikeln am proximalen Nervenstumpf wird ein freies autologes Nerventransplantat angelagert (links); in der Folge sind schon mehrere Transplantate koaptiert.(rechts)

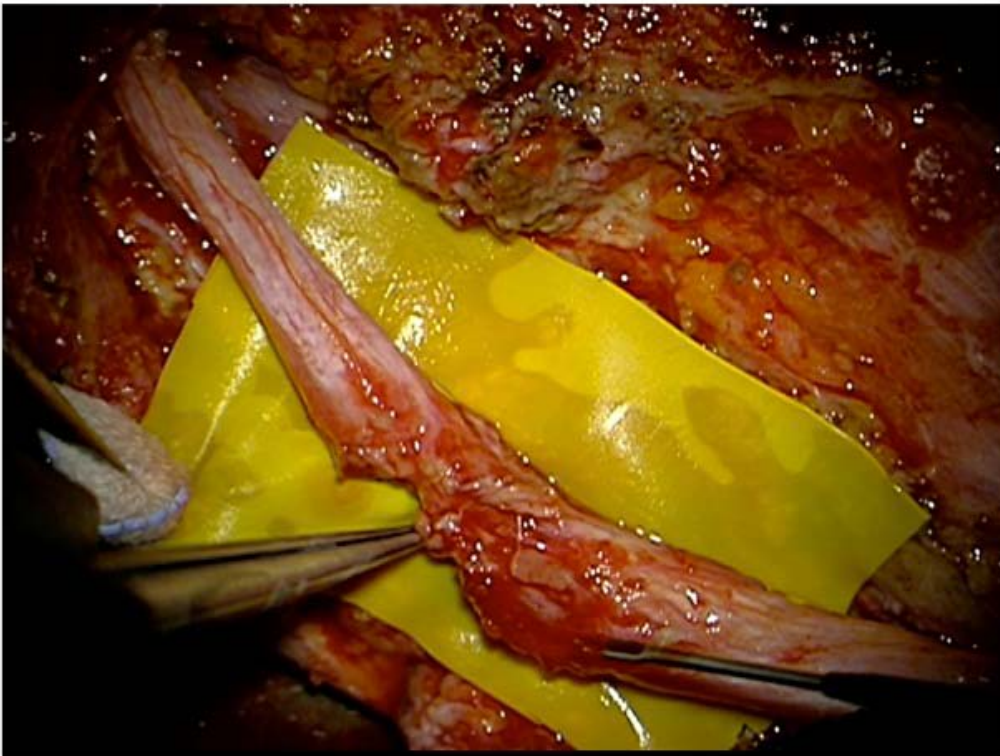


Abbildung 6: Teilläsion des N. ulnaris mit klinisch komplettem Funktionsverlust. Über die Hälfte des Nervenquerschnitts ist irreversibel geschädigt und muss transplantiert werden. Dies wird Teiltransplantation (split repair) genannt.