

## Neue Trends in der Plexuschirurgie

### Inhalt

<b>2.1 Allgemeines</b>	35
2.1.1 Grundlagen	35
2.1.2 Aktuelle Situation 1969	36
2.1.3 Die weitere Entwicklung	36
2.1.4 Das Krankengut	36
<b>2.2 Chirurgisch relevante Anatomie</b>	37
2.2.1 Begriffsbestimmungen	37
2.2.2 Gleitgewebe und Faszienräume	37
<b>2.3 Diagnose</b>	38
2.3.1 Stellung der Detaildiagnose	38
2.3.2 Indikation zur Operation und optimaler Zeitpunkt	38
<b>2.4 Spezielle Techniken</b>	39
2.4.1 Neue Trends der operativen Behandlung	39
2.4.1.1 Freilegung des Plexus brachialis	39
2.4.1.2 Fortsetzung der Operation supraclaviculär	39
2.4.1.3 Fortsetzung der Operation infraklavikulär	39
2.4.1.4 Darstellung des Plexus brachialis im Sulcus deltoideopectoralis	40
2.4.1.5 Partielle Läsionen	40
2.4.1.6 Komplette Läsionen	41
2.4.2 Neurolyse	44
2.4.2.1 Äußere Neurolyse	44
2.4.2.2 Paraneuriektomie	45
2.4.2.3 Innere Neurolyse	45
<b>2.5 Zentrum, Reizleitung und Erfolgsorgan als Einheit</b>	45
<b>2.6 Schlussfolgerung</b>	45
<b>Weiterführende Literatur</b>	46

### 2.1 Allgemeines

In diesem Kapitel soll dargestellt werden, in welche Richtungen sich die Plexuschirurgie in den letzten 10 Jahren entwickelt hat. Diese Darstellung beruht auf Erfahrungen, die an eigenem Krankengut gewonnen werden konnten, auf neuen Erkenntnissen aus dem Schrifttum und nicht zuletzt auf der Analyse von Patienten, die auswärts wegen einer Plexus-brachialis-Läsion behandelt wurden und an unserem Zentrum Beratung suchten.

Es soll von vornherein betont werden, dass hier geäußerte Ansichten auf subjektiven Erfahrungen beruhen und keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit erheben.

#### 2.1.1 Grundlagen

Seit 1961 werden vom Autor Operationen an Patienten durchgeführt, die eine Läsion des Plexus brachialis erlitten haben. 1966 fand in Paris ein Symposium der SICOT (Société Internationale de Chirurgie Orthopaédique and Traumatologique) statt, bei dem alle Chirurgen vertreten waren, die damals Spezialisten auf dem Gebiet der Plexuschirurgie waren. Die Schlussfolgerung auf diesem Symposium war, dass die Chirurgie bei Läsionen der Spinalnerven außer der Bestätigung der Diagnose keine brauchbare Lösung bieten kann, so dass die konservative Therapie nicht endlos fortgesetzt werden sollte. Für solche Fälle wurden die Amputation und die Versorgung mit einer Prothese empfohlen. In diese Zeit fällt der Vorschlag von Seddon, einen Nervenfaservertransfer von Interkostalnerven über Nerventransplantate zum N. musculocutaneus auszuführen, um eine aktive Ellbogengelenksbeugung zu erreichen (Yeoman und Seddon 1961; Seddon 1963). Nach Amputation des Unterarms und Anbringen einer Unterarm- und Handprothese sollte es möglich sein, die Prothese durch Beugung im Ellbogengelenk aktiv zu bewegen.

Eine rationale chirurgische Therapie in größerem Maßstab wurde erst möglich, als eine verlässliche Methode der freien Nerventransplantation zur Verfügung stand (Millesi et al. 1966; Millesi 1968). Der Autor hatte

Gelegenheit, anlässlich eines Symposiums unter der Leitung von Prof. Dr. Claude Verdan im Februar 1969 in Lausanne über die Ergebnisse bei 16 einschlägigen Fällen zu berichten.

### 2.1.2 Aktuelle Situation 1969

Das Hauptziel bei kompletten, traumabedingten Plexus-brachialis-Läsionen war es, eine aktive Beugung des Ellbogengelenks und eine Kontrolle des Schultergelenks zu erreichen. Es war schon damals klar, dass bei kompletten Läsionen durch eine Operation am Plexus allein eine objektiv nützliche Funktion nicht zu erreichen ist, sondern eine gute Beugung im Ellbogengelenk und ein stabiles Schultergelenk nur dann Sinn machen, wenn auch das Handgelenk durch eine Arthrodesen stabilisiert wurde. Im Gegensatz dazu bringt eine Arthrodesen im Schultergelenk keinen Vorteil, wenn die Skapula nicht aktiv bewegt werden kann.

Wurden die oben genannten Funktionen erreicht, ergaben sich folgende Vorteile für den Patienten:

- Der gelähmte, schlaff herabhängende Arm ist nicht mehr hinderlich.
- Der Arm kann als unterstützendes Glied eingesetzt werden.

Der Hauptvorteil liegt darin, dass wieder Körpersymmetrie herrscht und die Gefahr der sonst unweigerlich auftretenden Skoliose der Wirbelsäule verringert wird.

Trotz dieser Vorteile wurden Operationen am verletzten Plexus brachialis vielfach abgelehnt und bekämpft. Es handle sich um eine große, gefährliche Operation, der funktionelle Gewinn sei gering und eine Wiedereingliederung in den Arbeitsprozess kaum möglich.

Für Patienten mit einem Ausriss aller fünf Wurzeln gab es damals kein rationales Konzept.

### 2.1.3 Die weitere Entwicklung

Im Laufe der Siebzigerjahre hatte sich die Chirurgie der traumabedingten Plexus-brachialis-Läsionen durchgesetzt; sie wurde allgemein als nützlich anerkannt und konnte sich in die Breite entwickeln. Dazu kam unter etwas anderen Voraussetzungen die Chirurgie der obstetrischen Läsionen des Plexus brachialis.

Die Einführung der Mikrochirurgie eröffnete neue Einsichten in die Folgen einer intraneuralen Fibrose mit Kompression erhalten gebliebener Faszikel (Millesi 1992), auch wenn diese Erkenntnisse heute noch nicht Allgemeingut geworden sind.

Man hat gelernt, dass es häufig besser ist, mit etwas längeren Nerventransplantaten von den Primärstämmen aus periphere Nerven unter Umgehung der Faszikel di-

rekt zu neurotisieren und so eine unkontrollierte „Verdünnung“ der Nervenfasern zu vermeiden.

Immer häufiger wurden Axonspender außerhalb des Plexus brachialis zur Neurotisierung wichtiger Nerven herangezogen.

Interkostalnerven wurden in größerer Zahl für Nervenfaservertransfers verwendet und zwar nicht unter Umgehung einer Plexusfreilegung wie von Seddon und Tsuyama (1969) empfohlen, sondern als Teil einer weitergehenden Rekonstruktion.

Der Transfer von Nervenfasern aus dem N. accessorius nach Abgang des ersten Astes zur Erhaltung der Innervation des M. trapezius hat sich vielfach bewährt.

Der Plexus cervicalis kann als Axonspender herangezogen werden, vor allem, wenn ein Zuzug von C4 zum Plexus brachialis besteht.

Gegen den Transfer des N. phrenicus bestanden Einwände wegen des Verlusts der Diaphragmafunktion, vor allem, wenn gleichzeitig mehrere Interkostalnerven verlagert werden.

Der N. hypoglossus wurde wegen der zu erwartenden konkomitierenden Bewegungen im eigenen Patientengut nie verwendet.

Die Entwicklung der vaskularisierten Nerventransplantate (Taylor und Ham 1976) führten zu großen Erwartungen hinsichtlich einer Revolutionierung der peripheren Nerven Chirurgie, die allerdings ausgeblieben sind.

### 2.1.4 Das Krankengut

Die Entwicklung in die Breite führte zur Publikation großer Serien. Trotzdem haben unsere Kenntnisse z. B. hinsichtlich der Zusammensetzung eines Krankenguts nicht zugenommen. Es wird immer noch zwischen supraklavikulären und infraklavikulären Läsionen unterschieden. Die Auswertung großer Zahlen über viele Jahre birgt die Gefahr der Inhomogenität in sich, da sich ja Details im Lauf der Zeit ändern. Verlässliche Auskünfte erhält man nur, wenn sich eine Studie über einen begrenzten Zeitraum erstreckt, eine konsekutive Serie enthält, nach dem gleichen Protokoll behandelt und nach den gleichen Kriterien ausgewertet wurde. Natürlich muss auch eine genügend lange Zeit der Nachbeobachtung gegeben sein.

Eine solche Studie wurde an unserem Zentrum zwischen 1994 und 2002 durchgeführt. Es handelte sich um eine ununterbrochene Serie von 131 operierten Patienten. Davon hatten 69 eine komplette und 62 eine partielle Läsion erlitten. In 90 % der Patienten mit kompletten Läsionen war mindestens ein Ramus ventralis eines Spinalnervs (RVSP) betroffen. In 75 % der Fälle war mindestens ein Spinalnerv (SP) ausgerissen. Natürlich erstreckten sich diese Läsionen auch auf periphere Abschnitte. In 8,7 % waren alle fünf, in 18,8 % vier Spinalnerven ausgerissen. Nur in 10 % waren rein periphere Läsionen vorhanden.

Es muss also in einem weit höheren Prozentsatz mit einer Beteiligung von Spinalnerven gerechnet werden.

Die Analyse von 16 Patienten mit einer partiellen Läsion von C5 und C6 ergab, dass letztlich nur bei zwei Fällen ein Wurzelausschnitt vorlag, während bei 14 Patienten eine Rekonstruktion der Rami ventrales der Spinalnerven (RVSP) C5, C6 bzw. des Truncus superior möglich war. Dies spricht m.E. dafür, es sich gut zu überlegen, ohne Freilegung gleich – aus Bequemlichkeit – einen Nerventransfer anzustreben. Bei zwei dieser Patienten lag auch eine periphere Läsion des N. suprascapularis vor, die man ohne ausgedehnte Freilegung übersehen hätte.

In dem Krankengut der kompletten Läsionen fanden sich drei Patienten, bei denen eine Präfixation, und ein Patient bei dem eine Postfixation vorlag (zusammen 5,8%), ein Wert, der bei einem geplanten kontralateralen C7-Transfer berücksichtigt werden sollte.

## 2.2 Chirurgisch relevante Anatomie

### 2.2.1 Begriffsbestimmungen

Rein topographische Begriffe:

- Epineural: oberflächlich zu einem Nerv.
- Perineural: um einen Nerv.
- Paraneural: neben einem Nerv.

Begriffe, die eine Zugehörigkeit ausdrücken:

- Epineurial: in Beziehung zum Epineurium stehend (daher „Epineuriektomie“ und nicht „Epineurektomie“).
- Perineurial: in Beziehung zum Perineurium stehend.
- Paraneurial: in Beziehung zum Paraneurium stehend usw.

### 2.2.2 Gleitgewebe und Faszienräume

Die Strukturen des Plexus brachialis verlaufen in präformierten Räumen, die durch Gleitgewebe ausgekleidet und durch Faszien gegenüber anderen Gewebsschichten abgegrenzt sind. Diese Strukturen erlauben das wenig beachtete, aber notwendige reibungsarme Gleiten. Nur dadurch sind die ausgedehnten Bewegungen des Kopfes und des Arms im Schultergelenk ohne Irritation der Nervenstrukturen möglich.

Im Bereich des Plexus brachialis kann man folgende Räume unterscheiden:

**Scalenuszelt** Der Raum wird durch die Mm. scaleni und nach kaudal durch die Membrana suprapleuralis (sibson-sche Membran) gebildet.

**Raum unter der Membrana suprapleuralis** In dem Raum zwischen der Membrana suprapleuralis in der Pleurakuppel verlässt der RVSP T1 das Intervertebralförmen und diesen Raum durch einen schmalen Spalt zwischen erster Rippe und freiem Rand der Membrana suprapleuralis, um in den Raum des Skalenuszelts einzutreten. Die RVSP formieren sich zu Trunci und verlassen das Zelt durch den Hiatus scalenus, bleiben aber noch unter der Fascia praevertebralis. Diese Faszie bildet die Gleitschicht, die vor allem die reibungslose Bewegung der Klavikula bei Schulterbewegungen über dem Plexus brachialis ermöglicht. Es ist einleuchtend, dass eine Osteotomie der Klavikula dieses System stört und nur durch einen komplizierten Regenerationsprozess wieder gutgemacht werden kann.

**Raum unter der Fascia coraco-clavi-pectoralis** Die Fascia coraco-clavi-pectoralis teilt den Raum zwischen der gemeinsamen Faszie über M. pectoralis major und M. deltoideus sowie der Faszie, die Thoraxwand und M. serratus anterior bedeckt, in zwei Teile.

Der Raum oberflächlich am vorderen Thorax (Spatium antethoracale superficiale) zwischen gemeinsamer Faszie und Fascia coraco-clavi-pectoralis enthält den M. pectoralis major und den M. deltoideus und umfasst den Sulcus deltoideo-pectoralis dazwischen, das subpektorale Gleitgewebe, die V. cephalica, die A. thoraco-acromialis und ihre Äste und Begleitvenen sowie die Nervi pectorales. Dieser Raum ist vor allem für die Beweglichkeit des Pectoralis major wichtig. Er muss durchschritten und die Fascia coraco-clavi-pectoralis durchtrennt werden, wenn der Plexus brachialis infraklavikulär dargestellt wird.

Die Fascia coraco-clavi-pectoralis entspringt von der Klavikula, umschließt den M. subclavius, setzt sich fort zum M. pectoralis minor und umschließt auch diesen Muskel. Die Faszie ist über den Ansatz dieses Muskels mit dem Processus coracoideus und über seinen Ursprung mit der Faszie der Thoraxwand und den Ansätzen der Rippen am Sternum verbunden. Der Processus coracoideus sorgt wie eine Zeltstange dafür, dass unabhängig von der Stellung der Skapula zur Thoraxwand ein genügend großer Abstand zur Thoraxwand aufrecht erhalten wird. Daraus ergeben sich Spannungen innerhalb der Faszie, die zur umschriebenen Kollagenisierung und zur Bildung eines Ligaments führen können, dem Ligamentum costo-coracale, das unter Umständen den Plexus brachialis komprimieren kann.

Nach dem Durchtritt durch den Hiatus scalenus gelangen Plexus und A. axillaris zwischen Klavikula und erster Rippe in den Raum unter der Fascia coraco-clavi-pectoralis, den man als Spatium antethoracale profundum bezeichnen kann.

Für den Operateur ist es wichtig zu wissen, dass man diesen Raum von supraklavikulär her durch stumpfes Eindringen unter die Klavikula erreichen kann. Will man

von infraklavikulär in den Raum eindringen, muss man die Fascia coraco-clavi-pectoralis durchtrennen.

Die Fascia coraco-clavi-pectoralis setzt sich zum M. coraco-brachialis fort und gewinnt Anschluss an die Fascia brachialis und axillaris. Der Raum unter der Faszie erreicht unter den Ursprüngen der M. coraco-brachialis und des kurzen Biceps-brachii-Kopfes die Vorderseite des Schultergelenks und des Humerusschafts bis zum Ansatz des M. teres major und des M. latissimus dorsi. Der Raum reicht nach dorsal in den Spalt zwischen M. subscapularis und M. serratus anterior und ermöglicht so die Bewegungen der Skapula. Unter und hinter dem Processus coracoideus erreicht der Raum die Hinterseite des Schultergelenks.

Während die zuletzt beschriebenen Räume eher virtuelle Räume zur Gewährleistung einer maximalen, reibungsarmen Beweglichkeit sind, entsteht ventral, dort, wo das Nerven-Gefäß-Bündel verläuft, ein echter Raum. Dieser Raum wird dadurch gesichert, dass die Klavikula den Angulus superior der Skapula in einem Abstand zur vorderen Thoraxwand hält und ein Entlanggleiten an der Thoraxwand nach vorne verhindert. Der Raum ist mit raumfüllendem Gleitgewebe ausgefüllt, das dem Nerven-Gefäßbündel Platz macht und so seine enorme Verschieblichkeit ermöglicht.

## 2.3 Diagnose

### 2.3.1 Stellung der Detaildiagnose

Trotz aller Neuerungen und Fortschritte sind wir nach wie vor noch nicht in der Lage, eine sichere prä- oder intraoperative Diagnose hinsichtlich der Brauchbarkeit eines proximalen Stumpfes als Regenerationsquelle zu stellen. In dieser Hinsicht zählt nur der positive Befund. Wenn man in einer Magnetresonanztomographie (MRT) eine Unterbrechung der Wurzelfüßchen sehen kann, ist dies ein eindeutiger Befund. Ergibt die Untersuchung eine erhaltene Kontinuität, wissen wir nicht, ob die Qualität der Wurzelfüßchen gut genug ist, eine Regeneration zustande zu bringen.

Von 171 geschädigten Spinalnerven war bei 12 (7 Patienten) die Kontinuität erhalten und trotzdem keine ausreichende Regenerationsfähigkeit vorhanden. Auch die erhaltene Leitfähigkeit bei zentraler Stimulation (Turkof et al. 1995, 1997) gibt keine Garantie, dass eine Regeneration erwartet werden kann. Den besten Hinweis erhält man von einem positiven Tinel-Hoffmann-Zeichen.

Abgesehen von diesen funktionellen Problemen sind auch mit modernsten Geräten ausgestattete Institute nicht vor falsch-positiven und falsch-negativen Resultaten gefeit.

### 2.3.2 Indikation zur Operation und optimaler Zeitpunkt

Bei offener Verletzung und scharfer Durchtrennung besteht die Indikation zur Primärversorgung.

Bei offener Durchtrennung mit Gefäßverletzung und eventuell einer Klavikulafraktur sollen die Gefäße und die Fraktur akut versorgt werden. Der Plexus soll nicht inspiziert und markiert oder teilversorgt werden. Alles, was zu einer verstärkten Narbenbildung führt, ist zu unterlassen. Dasselbe gilt für Gefäßverletzungen bei geschlossenen Wunden.

Bei geschlossenen Verletzungen ist die Frage nach dem optimalen Zeitpunkt der Freilegung besonders aktuell. Es gibt primär keinen sicheren Hinweis auf das Ausmaß des Schadens.

Es kann sich um eine Neurapraxie (nach Seddon bzw. Grad 1 nach Sunderland) handeln. In diesem Fall besteht keine Operationsindikation. Die Diagnose ergibt sich aus der elektrophysiologischen Untersuchung, wenn nach 10–14 Tagen die motorische Leitfähigkeit erhalten geblieben ist, obwohl bei einem stärkeren Schaden bereits eine wallersche Degeneration abgelaufen sein müsste.

Nach Ausschluss eines Schadens von Grad 1 bleibt immer noch die Differentialdiagnose zwischen Schaden Grad 2 bis 5 und im Fall des Schadens von Grad 5 die Unterscheidung zwischen Ausriss und Abriss.

Ein aus Großbritannien kommender Trend tritt für eine Frühoperation ein, d. h. Tage nach dem Unfall. Abgesehen vom Zeitgewinn wird ins Treffen geführt, dass bei einer Frühoperation die Präparation leichter sei, weil sich noch keine Narben und Fibrosen gebildet haben.

Diese Meinung wird durch keine harten Fakten gestützt. Sie beruht m. E. auf einem Denkfehler. Das Ausmaß der entstehenden Narben wird durch das Ausmaß des Traumas bestimmt. Bei einem reinen Traktionschaden ist es gering. Bei einer Kontusion nimmt es ein größeres Ausmaß an und verursacht einen größeren Gewebsschaden, eine stärkere Blutung und mehr Ödeme. Das Ausmaß der Narbenbildung liegt also schon zum Zeitpunkt des Unfalls fest, auch wenn es noch nicht sichtbar ist. Es besteht daher die Gefahr, dass nicht ausreichend angefrischt wird.

Das Tinel-Hoffmann-Zeichen wird erst nach drei Monaten positiv. Es ist nach Meinung des Autors das verlässlichste Zeichen, dass im Bereich des TH-positiven RVSP kein Ausriss vorliegt. Der Zeitpunkt 3 bis 4 Monate nach dem Unfall ist also für eine geplante Freilegung optimal. Zu diesem Zeitpunkt hat sich der Patient von seinem, in der Regel schweren Trauma erholt, die lokalen Folgen des Traumas im Gewebe sind abgeklungen und schwere Nebenverletzungen versorgt. Würden genügend untermauerte Hinweise vorliegen, dass ein mehrfacher Wurzelausriss vorliegt, würden wir auch früher operieren.

Dazu kommt, dass zumindest in unseren Breiten eine sofortige Zuweisung aus organisatorischen Gründen nur schwer durchsetzbar wäre.

Ab 6 Monate nach dem Unfall nehmen die Erfolgsaussichten langsam ab. Man sollte also vor diesem Zeitpunkt operieren, wenn man die Wahl hat. Häufig werden aber Patienten wesentlich später zugewiesen. In diesem Fall könnte auch zu einem deutlich späteren Zeitpunkt die Indikation zur Freilegung gestellt werden, da wir auch nach längeren Zeitintervallen noch Erfolge gesehen haben.

## 2.4 Spezielle Techniken

### 2.4.1 Neue Trends der operativen Behandlung

#### 2.4.1.1 Freilegung des Plexus brachialis

Die operative Freilegung soll die gegebenen Strukturen so wenig wie möglich stören oder schädigen. Es sollen Inzisionen gewählt werden, die zu günstigen Narben führen, aber im Notfall jederzeit erweitert werden können.

#### Zugang zur Fossa supraclavicularis

Der Patient befindet sich in Rückenlage mit leicht unterlegter Schulter. Der Kopf ist zur Gegenseite leicht abgewendet. Hals, vorderer Thorax, Skapularegion und ganze obere Extremität sind gewaschen und abgedeckt. Der Operateur befindet sich zwischen Kopf und Arm und sieht die Fossa supraclavicularis von kranial.

Es folgt die sagittale Inzision entsprechend einer Hautfalte, die sich bei Abduktion im Schultergelenk bildet. Durchtrennung von Haut und Platysma unter Schonung der Nervi supraclaviculares. Eine Hebung des Schultergelenks erweitert die Fossa supraclavicularis. Durchtrennung der gemeinsamen Faszie (Fascia cervicalis superficialis). Schonung der Venen, Isolierung des M. omohyoideus. Vordringen zur Fascia praevertebralis.

#### Zugang zur Fossa infraclavicularis

Spaltung der gemeinsamen Faszie über M. pectoralis major und M. deltoideus und Öffnung der mohlenheimischen Grube. Damit ist der oberflächliche antethorakale Raum eröffnet. Zur Erweiterung sparsame Desinsertion der Partes claviculares des Pectoralis major und des Deltoideus von der Klavikula. Im Fett- und Gleitgewebe unter den Muskeln werden V. cephalica und N. pectora-

lis lateralis dargestellt. Stumpfes Vordringen zur Fascia coraco-clavi-pectoralis.

### Herstellung einer Verbindung zwischen den Operationsgebieten

Von der Fossa supraclavicularis aus wird dorsal (ventral vom M. omohyoideus gelangt man durch stumpfe Präparation nicht in den Raum unter die Klavikula, da der Muskel über die Fascia cerviclis media mit der Klavikula verbunden ist) vom omohyoideus Stumpf unter der Klavikula in den tiefen antethorakalen Raum unter der Fascia coraco-clavi-pectoralis eingegangen. Die jetzt von beiden Seiten dargestellte Faszie wird durchtrennt. Dadurch können Klavikula und M. subclavius umfasst, angeschlungen und gehoben werden, wodurch der Zugang großzügig erweitert wird.

#### 2.4.1.2 Fortsetzung der Operation supraclaviculär

Spaltung der Fascia praevertebralis und Darstellung des Truncus superior sowie des N. suprascapularis. Verfolgung des Truncus superior und Isolierung von C5 und C6, Darstellung des N. phrenicus und evtl. des N. thoacicus longus sowie des N. dorsalis scapulae bei ihrem Austritt aus dem M. scalenus medius. Sind Manipulationen an C5 und C6 notwendig, empfiehlt sich eine zusätzliche quere Inzision am Hals.

Durch den gewählten Zugang kann der Truncus superior nach vorne abgeschoben werden und dahinter ein Zugang zu C7 bzw. zum Truncus medius gewonnen werden. Bei weiterem Vordringen in die Tiefe des Skalenuszelts wird C8 dargestellt. Die Verfolgung nach vorne führt zur Vereinigung von C8 mit T1 und damit zum Truncus inferior sowie medial davon zur A. subclavia. Wenn T1 weiter nach proximal verfolgt werden soll, muss die Membrana suprapleuralis von der ersten Rippe abgelöst werden, um in den Raum unter die Membran zu gelangen.

Alle diese Schritte sind von dem gewählten Zugang aus relativ leicht möglich.

#### 2.4.1.3 Fortsetzung der Operation infraklavikulär

Nach der Durchtrennung der Fascia coraco-clavi-pectoralis in der Fossa infraclavicularis wird eine eventuelle Verdickung der Faszie im Sinne eines Ligamentum costocoracale reseziert. Der Plexus brachialis wird freigelegt. Die erste Struktur, auf die man stößt, ist der Fasciculus lateralis, dahinter lateral der Fasciculus posterior, weiter



medial die A. axillaris und noch weiter der Fasciculus medialis.

Stößt man hier auf eine ausgedehnte Fibrose, empfindet sich eine Darstellung weiter peripher.

#### 2.4.1.4 Darstellung des Plexus brachialis im Sulcus deltoideo-pectoralis

Der Operateur wechselt die Position und befindet sich jetzt zwischen abduziertem Arm und Körper des Patienten. Es wird eine bogenförmige Inzision in Höhe des Processus coracoideus angelegt. Durchtrennung der gemeinsamen Faszie zwischen Pectoralis major und Deltoideus, Schonung der Vena cephalica. Man stößt auf den M. pectoralis minor, durchtrennt die Fascia coraco-claviopectoralis kranial und die Fortsetzung der Faszie in Richtung M. coraco-brachialis kaudal des Muskels und isoliert den Muskel. Man hat jetzt einen sehr guten Zugang zu dem großen, oben beschriebenen Raum und kann den Plexus brachialis gut darstellen. Die Strukturen werden unter Hebung der Haut zwischen den Inzisionen nach proximal verfolgt.

Findet man auch hier eine ausgedehnte Fibrose, stellen wir den Plexus mit Hilfe einer weiteren Inzision proximal am Oberarm dar und verfolgen ihn vom Gesunden in Richtung Läsion unter Hebung der Hautbrücken zwischen den Inzisionen.

#### 2.4.1.5 Partielle Läsionen

Bei Vorliegen einer partiellen Läsion bestehen normal innervierte Muskeln, die zum Ersatz fehlender Funktionen verlagert werden können, entsprechend einer palliativen Chirurgie. Das klassische Beispiel wäre eine sog. Radialisersatzoperation bei einer oberen Plexus-brachialis-Läsion C5, C6 und C7, bei der die fehlende Funktion durch den Transfer medianus- und ulnarisinnervierter Muskeln, die ja normal funktionieren, ersetzt wird.

Bei partiellen Plexusläsionen ergibt sich auch die Möglichkeit, durch einen Nervenfaservertransfer<sup>1</sup> innerhalb des Plexus gelähmte Muskeln des betroffenen Teils durch

Nervenfasern vom nicht betroffenen Teil zu neurotisieren. Das klassische Beispiel ist der Nervenfaservertransfer vom Medianus oder Ulnaris zum Muskulokutaneus nach Oberlin.

Diese Methode ist effizient und bringt relativ rasch ein Ergebnis, da nur kurze Distanzen zu überbrücken sind, solange im Spendernerv eine genügende Anzahl an Nervenfasern verbleibt, um dort eine nützliche Funktion aufrecht zu erhalten.

Ähnliche Verfahren werden zunehmend angewendet. Als Beispiele seien genannt: Nervenfaservertransfers von einem Muskelast des langen Trizepskopfes zum Axillaris und Muskeläste vom N. musculocutaneus zum Biceps brachii und brachialis zu den Nervenästen für Unterarmmuskel bei unteren Plexus-brachialis-Läsionen.

Susan Mackinnon hat sich Verdienste um die Entwicklung solcher Transfers erworben und eine Monographie herausgegeben, deren Lektüre sehr zu empfehlen ist (Mackinnon und Nowak 2008).

Interessant erscheinen in diesem Zusammenhang auch die Untersuchungen von Gu und seiner Gruppe über die vielseitige Verwendbarkeit eines intakten ipsilateralen RVSP C7 als Axonspender (Xu et al. 2004).

Der Nervenfaservertransfer gewinnt zunehmend an Popularität. Der Phantasie scheinen keine Grenzen gesetzt zu sein, manchmal mit katastrophalen Ergebnissen. Dem Autor sind Fälle bekannt, bei denen nach einem Transfer von Medianusfasern auf den Muskulokutaneus zwar die Ellbogenbeugung zurückkehrte, die Opposition des Daumens aber verloren ging. Nach der (offenbar antiquierten) Ansicht des Autors müsste man einen gravierenden zusätzlichen Funktionsverlust bei einem durch eine, wenn auch nur partielle Plexusläsion geschädigten Patienten unbedingt vermeiden. Heutzutage wird über ein solches Problem mit dem Argument hinweggegangen: „Der Patient soll froh sein, dass er die Ellbogengelenksbeugung zurückerhalten hat“.

Es steht außer Frage, dass ein Nervenfaservertransfer innerhalb des Plexus bei partiellen Läsionen die Methode der Wahl darstellt, wenn es sich um einen Wurzelaustritt oder eine andere Läsion mit schlechter Prognose handelt. Es erhebt sich aber die Frage, ob bei Läsionen mit erhaltener Kontinuität bzw. kurzen Defekten die Erhaltung bzw. Wiederherstellung des ursprünglichen Innervationsmusters einem Transfer vorzuziehen wäre. Dafür spräche die Wiederherstellung der ursprünglichen Neuroanatomie. Für den Transfer sprechen die kürzere Reinnervationszeit und die einfache, rasch durchzuführende Operation.

Eine gewisse Gefahr für Nervenfaservertransfers stellen Fälle dar, die ursprünglich eine komplette Läsion aufwiesen, bei denen aber eine teilweise spontane Regeneration stattgefunden hat. Sie präsentieren sich klinisch als partielle Läsionen, der funktionierende Teil hat aber doch einen unbekannten Schaden erlitten.

<sup>1</sup> Nervenfaservertransfers oder kurz Nerventransfers innerhalb des Plexus werden vielfach als „Neurotisation“ bezeichnet. Das ist falsch. Unter Neurotisation versteht man das Einwachsen von Nervenfasern in denerviertes Gewebe. Bei einer Nervennaht wird der denervierte distale Stumpf vom normal innervierten proximalen Stumpf her neurotisiert. Ein denervierter Muskel kann auf verschiedene Weise neurotisiert werden. Beim Nervenfaservertransfer werden Nervenfasern von einem funktionierenden Nerv auf einen denervierten Nerv transferiert, um diesen zu neurotisieren. Die Neurotisation ist das Ziel und der Transfer die Maßnahme, um das Ziel zu erreichen.

### 2.4.1.6 Komplette Läsionen

**Bewegungsketten** Gegenwärtig wird in den meisten Zentren hauptsächlich darauf Wert gelegt, die Funktion des Biceps brachii und des Brachialis wiederherzustellen und eine Kontrolle des Schultergelenks durch eine geringe Abduktion zu erreichen. Der Erfolg wird in Einzelfunktionen analysiert und anhand der wiedererlangten Kraft gemessen. Die Wiederherstellung einer aktiven Außenrotation wird vernachlässigt.

Dies entspricht nicht der funktionellen Realität. Niemand führt Beugungen des Ellbogengelenks als Selbstzweck aus. Die Ellbogenbeugung ist immer ein Teil einer Bewegungskette.

### Ausriss von vier oder fünf Wurzeln

Für einen Patienten mit einer kompletten Plexus-brachialis-Lähmung bei Vorliegen eines Ausrisses von vier oder fünf Wurzeln (ca. 26 % in unserem Krankengut) hat das Festhalten von Gegenständen zwischen Oberarm und Thorax eine große funktionelle Bedeutung. Dazu muss der Patient folgende Bewegungskette ausführen können:

- Ellbogenbeugung,
- Adduktion und Außenrotation,
- Abduktion, um den Griff zu öffnen,
- kräftige Adduktion, um den Griff zu schließen.

Die Mehrzahl der Patienten, die in Erfolgsstatistiken präsentiert werden, kann dies nicht. Dabei spielt die grobe Kraft der Ellbogengelenksbeugung nur eine untergeordnete Rolle.

Sollen Unterarm und Hand als unterstützendes Glied eingesetzt werden, muss der Patient die Möglichkeit haben, den Arm im Schultergelenk nach vorne zu bewegen (Anteversion), und er benötigt ein stabiles Handgelenk, am besten durch eine Arthrodesen. Die Feinabstimmung in Richtung auf den Zielgegenstand erfolgt durch geringfügige aktive Bewegungen im Sinne der Außen- und Innenrotation bzw. Beugung und Streckung im Ellbogengelenk.

Das Endziel aller Bemühungen bei derart schweren Läsionen ist die Wiederherstellung einer Greiffunktion, etwa in Form eines Schlüsselgriffs zwischen Daumen und Zeigefingers bzw. eines Hakengriffs der Langfinger. Dazu werden ein stabiles Handgelenk (Arthrodesen) und drei aktive Beugemuskeln am Unterarm benötigt. Ein Muskel aktiviert die Sehne des Flexor pollicis longus, der zweite die Sehnen des Flexor digitorum profundus. Der dritte verfügbare Muskel wird auf die Streckseite verlagert und mit den Strecksehnen der Finger und des Daumens verbunden. Für das gute Funktionieren des Schlüsselgriffs ist

**Tab. 2.1** Erwünschte Funktionen, Nerven, durch deren Neurotisation diese Ziele erreicht werden können und Vorschläge für die zu verwendenden Spendernerven

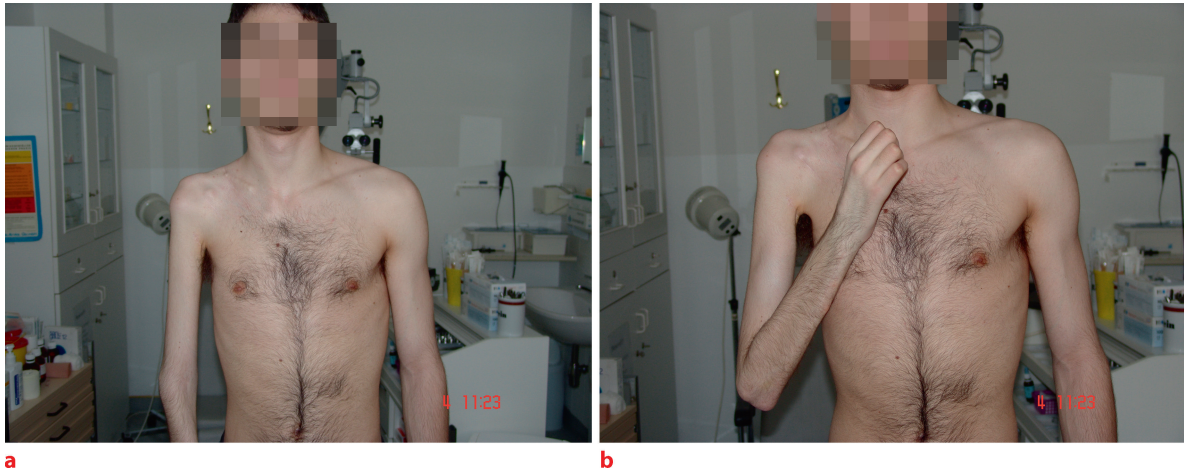
Funktion	Nerven	Mögliche Spendernerven
Beugung EG	MC	Intercostal n./PHR
Streckung EG	R	Intercostal n./C4
AR+ADD SG	PMA p.stc.	CI.PMED/PHR
ABD SG	SPSC	ACC
Ante-V. SG	AX	C4
Rotation SCA	PMA p.cl.	CI.PLAT
Sens D1, D2	THL	DSC E:S
Greiffunktion	M	Intercosto-brachialis
	M	CI.C7 AD
	U	CI.C/ PD

es notwendig, den Ansatz der Sehne des Flexor pollicis longus abzulösen und auf die Streckaponeurose des Daumens zu übertragen. Dadurch wird bei Aktivierung der Flexor-pollicis-longus-Sehne die automatische Beugung im Interphalangealgelenk vermieden und gleichzeitig eine leicht opponierende Bewegung des Daumens hervorgerufen.

Um möglichst viele Funktionen wiederherzustellen, sollen möglichst viele Muskeln neurotisiert werden. Dazu sollten alle machbaren Transfers ausgeführt werden. Dabei handelt es sich naturgemäß um Nervenfasertests von Nerven außerhalb des Plexus brachialis, wenn man von dem einen Stumpf eines RVSP bei vier Wurzelaustritten absieht. Die Tab. 2.1 zeigt eine Liste der Funktionen, die wiederhergestellt werden sollen, der Nerven, die zu diesem Zweck neurotisiert werden müssen, und die Axonspender, die für Transfers zur Verfügung stehen.

Besonders wichtig ist es, einen Muskel auszuwählen und zu neurotisieren, der die Rolle des Außenrotators übernehmen soll. Am besten bewährt hat sich für diesen Zweck die Pars sterno-costalis des M. pectoralis major, der nach Reinnervation durch die Faszien zwischen Pectoralis minor und Coracobrachialis zur dorsolateralen Seite des Humerusschafts gebracht und dort verankert wird. Das terminale Segment des Muskels wird in ein artifizielles Sehnengewebe eingehüllt, das die Muskelkraft auf den Knochen überträgt und unerwünschte Adhäsionen mit den Strukturen der Umgebung verhindert.

Es wird meistens übersehen, dass der M. serratus anterior eine wichtige Funktion hat. Er kann relativ ein-



**Abb. 2.1a,b** Fall 1: Der 15-jährige männliche Patient erlitt durch einen Motorradunfall eine komplette Läsion des rechten Plexus brachialis. Die operative Freilegung ergab einen Ausriss der Wurzeln C6, 7, 8 und T1 sowie einen Abriss des Ramus ventralis des Spinalnervs (RVSP) C5. Zur Reinnervation von Biceps brachii und Brachialis wurden zwei Nerven transplantate (N. suralis) von 15 cm Länge End-zu-Seit an den N. phrenicus nach Inzision des Epineuriums angeschlossen und mit ihrem peripheren Ende End-zu-End mit dem N. musculocutaneus verbunden. Diese Operation erfolgte im Juni 2002. Zur Wiedererlangung einer Greiffunktion wurde ein kontralateraler C7-Transfer vorgeschlagen, zu dem aber keine Einwilligung erfolgte. Die Abbildung zeigt die gute Beugefunktion im Ellbogengelenk bei voll erhaltener Zwerchfellfunktion etwa 2 Jahre danach. In weiterer Folge wurden Operationen zur Verbesserung der Abduktion und der Außenrotation durchgeführt sowie eine Arthrodesse des Handgelenks

fach durch eine End-zu-Seit-Neurorrhaphie des distalen Stumpfes des N. thoracicus longus zum N. dorsalis scapulae reinnerviert werden.

Die Publikationen von Gu über den kontralateralen C7-Transfer haben zusätzliche Axonspender erschlossen, die wir zur Reinnervation der Unterarmbeuger einsetzen, mit dem Ziel, durch rekonstruktive Eingriffe eine Greiffunktion zu erreichen (Chen und Gu 1992).

Es werden sowohl Medianus als auch Ulnaris neurotisiert. Von der Verwendung des N. ulnaris als vaskularisiertes Nerven transplantat sind wir abgekommen, weil die freie Transplantation des N. saphenus dieselben Ergebnisse bei jungen Patienten liefert. Die Gruppe Gu bemüht sich durch retropharyngeale Positionierung des C7-Transfers, die Wegstrecke zu verkürzen und damit nur auf kürzere Nerven transplantate zurückgreifen zu müssen, wodurch die Reinnervationszeit verkürzt wer-

den soll (Chen und Gu 1992). Nach unseren Erfahrungen spielen das Alter des Patienten und das Zeitintervall eine bedeutende Rolle bei der Prognose, nicht aber die Länge der Transplantate.

Die End-zu-Seit-Koaptation erweitert das Reservoir an Axonspendern, weil der Spendernerv seine ursprüngliche Funktion behält. In letzter Zeit wurde an unserem Zentrum begonnen, den N. phrenicus nicht wie von Gu vorgeschlagen in ganzer Länge zu entnehmen und damit die Diaphragmafunktion zu opfern (Xu et al. 2002), sondern die Phrenikusfunktion zu erhalten und den N. mu-

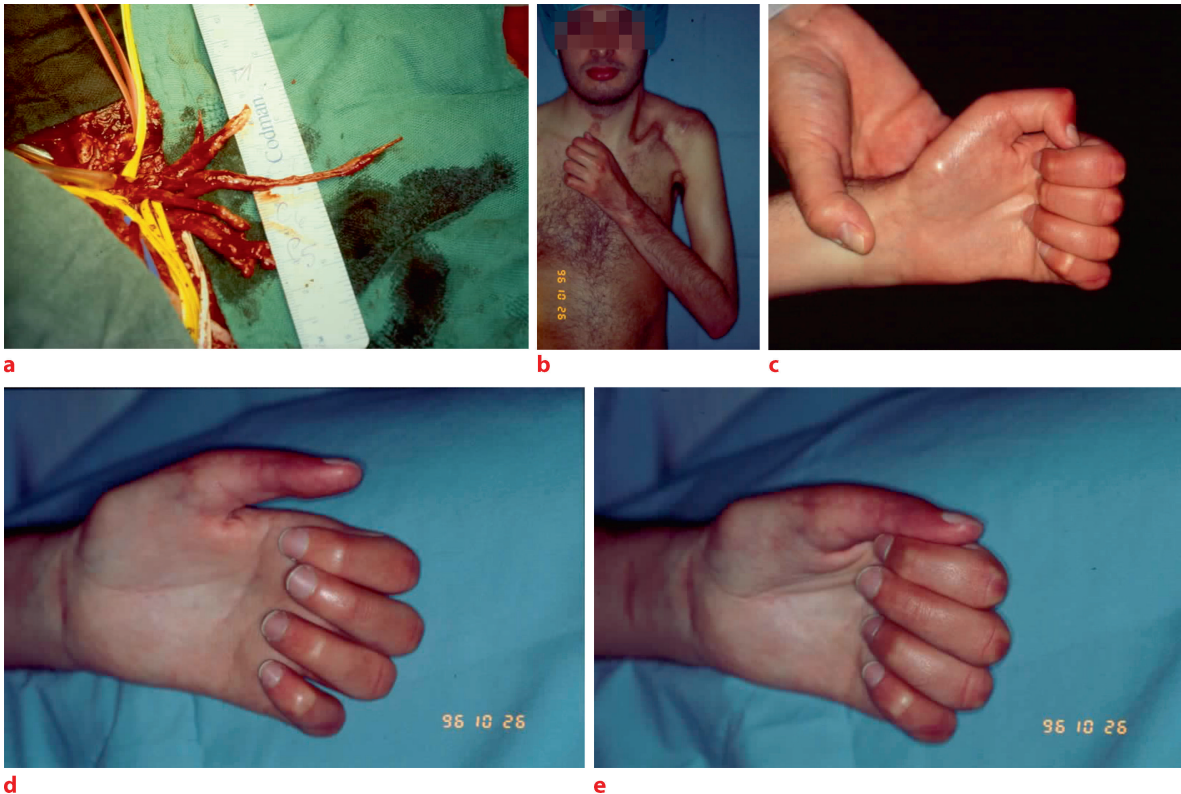
**Tab. 2.3** Bei schweren Verletzungen des Plexus brachialis erhält man einen besseren Überblick über die nützliche Funktion, wenn man nicht Einzelfunktionen bewertet, sondern die Fähigkeit, koordinierte Bewegungen auszuführen, in den Vordergrund rückt

**Tab. 2.2** Übersicht über die im Untersuchungszeitraum operierten Patienten mit Ausriss von vier oder fünf Wurzeln

Zahl der Fälle	19
Avulsion von 5 SP	6
Avulsion von 4 SP	13
Keine NU	3
Zahl der Fälle zur Auswertung	16

Schaden	Funktion
Grad I	Keine Regeneration
Grad II	Schwache Regeneration; weniger als M3
Grad III	Kräftige Regeneration wichtiger Muskel ohne koordinierte Bewegungen
Grad IV	Koordinierte Bewegungen
Grad V	Greiffunktion





**Abb. 2.2** **a** Fall 2: 17-jähriger, männlicher Patient. Komplette Plexus-brachialis-Läsion links durch Motorradunfall mit Ausriss aller Wurzel (C5, 6, 7, 8, T1) vor 3 Monaten. Thrombose der A. axillaris sin. Operation im Juni 1992: 1. Herstellung einer Verbindung zwischen dem proximalen Stumpf des N. accessorius nach Abgang des ersten Astes am Vorderrand des M. trapezius und dem N. musculocutaneus durch ein Segment des N. ulnaris als vaskularisiertes Nerventransplantat. 2. Herstellung einer Verbindung zwischen einem motorischen Ast des Plexus cervicalis und dem N. medianus durch ein weiteres Segment des N. ulnaris als vaskularisiertes Nerventransplantat. 3. Herstellung von Verbindungen zwischen weiteren motorischen Ästen des Plexus cervicalis und den peripheren Stümpfen des N. suprascapularis, des N. axillaris und des N. pectoralis lateralis durch freie Nerventransplantate, die aus übrig gebliebenen Segmenten des N. ulnaris durch Spaltung in einzelne Faszikelgruppen gebildet wurden, um die freie Transplantation vollständig zu überleben. 4. Transfer von Nervenfasern aus den proximalen Stümpfen der Interkostalnerven 3, 4, 5 und dem N. radialis durch freie Nerventransplantate aus dem N. cutaneus antebrachii medialis. 5. Verbindung des proximalen Stumpfes des zweiten Interkostalnervs mit dem peripheren Stumpf des N. thoracicus longus durch Neurorrhaphie. **b** Es ergab sich eine sehr kräftige Beugung und Streckung im Ellbogengelenk und eine ausreichende Kontrolle des Schultergelenke. Funktionsrückkehr im Flexor pollicis longus, Flexor digitorum superficialis und Flexor carpi radialis. Hierauf Arthrodese im Handgelenk und Transfer der Sehne des Flexor carpi radialis auf Extensor digitorum communis und Extensor pollicis longus mit dem Ziel, einen Schlüsselgriff zu erreichen. **c** Die Greiffunktion wird durch die aktive Beugung im Interphalangealgelenk des Daumens behindert. Daher Desinsertion der Sehne des Flexor pollicis longus und Verlagerung der Sehne zur Streckseite. Verbindung mit der Streckaponeurose. **d, e** Sehr guter Schlüsselgriff. *Kommentar:* Dieser Fall wird demonstriert, um zu zeigen, dass bereits 1992 eine brauchbare Greiffunktion bei Ausriss aller fünf Wurzeln erzielt werden konnte. Der Plexus cervicalis erweist sich in bestimmten Fällen als nützlicher Transplantatspender und zwar nicht nur als vaskularisiertes Transplantat, sondern auch zur freien Transplantation nach Zerlegung in Faszikelgruppen („slit nerve grafts“)

sculocutaneus über End-zu-Seit-angeschlossene Nerventransplantate zu neurotisieren (Abb. 2.1a, b).

Bei der Beurteilung der Ergebnisse von Fällen mit 4 bis 5 Wurzelaustrissen wollen wir wissen, inwieweit komplexe Funktionen wiederhergestellt werden und bevorzugen eine Evaluierung nach dem in Tab. 2.2 gegebenen

Schema anstatt der Beurteilung einzelner Muskeln nach der Kräfteskala (Mo bis M5; Tab. 2.3).

Die Ergebnisse unserer letzten Nachuntersuchung werden in Tab. 2.4 und 2.5 gezeigt (Abb. 2.2a–e).

**Tab. 2.4** Auswertung des in Tab. 2.2 angeführten Krankengutes nach den Kriterien der Tab. 2.3 etwa 1,5 Jahre nach der Operation am Plexus, nachdem die Regeneration ein beurteilbares Ausmaß erreicht hatte. Man sieht, dass ein Patient keine Regeneration aufweist und als komplett negatives Ergebnis zu bewerten ist. Drei Patienten zeigen deutliche Regenerationen, erreichen aber nicht einen Grad der Regeneration, der als nützlich einzustufen wäre. Zwölf Patienten haben eine nützliche Regeneration bestimmter Muskelgruppen erreicht, aber keiner konnte zielführende koordinierte Bewegungen ausführen

Schaden	Patienten [n]
Grad I	1
Grad II	3
Grad III	12
Grad IV	0
Grad V	0

### Komplette Läsionen mit unterschiedlicher Schädigung

Es wurde schon erwähnt, dass rein *infraklavikuläre* Schäden nur 10 % der Plexusläsionen in unserem Krankengut ausmachen. Diese Läsionen gehen aber häufig mit Läsionen der Arteria und/oder der Vena axillaris einher und sind daher mit einer ausgedehnten Fibrose der ganzen Region verbunden. Die anatomische Situation ist durch eine sorgfältige Neurolyse zu klären. In extremen Fällen ist die Einfüllung des Plexus brachialis mit einem subplektoralen Gleitgewebslappen angezeigt.

Den allgemeinen Regeln folgend beginnt die Präparation immer im Gesunden, bei ausgedehntem Schaden eventuell sogar an der Innenseite des Oberarms.

In der Mehrzahl der Fälle liegt der Hauptschaden im *supraklavikulären* Bereich, so dass in der Regel eine Freilegung in dieser Region beginnt.

Wenn ein Spinalnerv sich bei der Präparation als ausgerissen erweist, ist die Diagnose klar. Schwierigkeiten bereiten die Situationen, bei denen ein innerer Ausriss vorliegt, der Nerv aber in situ verblieben ist. Der Operateur hat keine Möglichkeit, diesen inneren Ausriss nachzuweisen. Er muss sich auf einen eindeutigen Befund der Magnetresonanztomographie verlassen, die aber nach wie vor Fehlerquellen hat. Auch der Nachweis einer erhaltenen Kontinuität sowohl bei der MRT als auch bei der zentralen Stimulation ist kein Garant dafür, dass eine brauchbare Regeneration stattfinden wird. Es geht dabei besonders um die Spinalnerven C8 und T1. Wir tendieren dazu, die Operation als Neurolyse zu beenden. Tritt innerhalb einer vernünftigen Zeit (2 bis 3 Monate) ein Tinel-Hoffmann-Zeichen auf, wird weiter konservativ

**Tab. 2.5** Hier setzen nun die rekonstruktiven Eingriffe ein, die unbedingt notwendig sind, um die Funktion zu rationalisieren und zu maximieren. Durch solche Eingriffe konnte bei allen Patienten eine Verbesserung erreicht werden, so dass sie koordinierte Bewegungen ausführen konnten. Bei drei Patienten konnte sogar eine funktionell brauchbare Greiffunktion erzielt werden. Die Operation am Plexus schafft also die Voraussetzungen, dass genügend innervierte Muskeln vorhanden sind. Die folgende Periode der rekonstruktiven Eingriffe setzt dann das vorhandene Potential im funktionellen Sinne um. Dabei erweist es sich als besonders wertvoll, wenn später geplante rekonstruktive Eingriffe bereits bei der Operation am Plexus einkalkuliert werden

Schaden	Patienten [n]
Grad I	1
Grad II	3
Grad III	0
Grad IV	9
Grad V	3

behandelt. Wenn nicht, gilt dies als Bestätigung eines Ausrisses und es wird ein konterlateraler C7-Transfer ausgeführt.

Bei einer Ruptur im peripheren Abschnitt eines RVSP kann man die Entwicklung eines Neuroms erwarten. Dieses wird reseziert und die Kontinuität durch Nerven-transplantate wiederhergestellt, und zwar nur bei kurzen Defekten im anatomischen Sinne, bei längeren Defekten direkt zu den entsprechenden peripheren Nerven. Dasselbe gilt bei Läsionen von Trunci.

Läsionen mit erhaltener Kontinuität bedürfen eines differenzierten Vorgehens.

## 2.4.2 Neurolyse

Zuerst gilt es, die Strukturen des Plexus brachialis aus dem fibrös veränderten und adhärennten Bindegewebe der Umgebung zu befreien und örtliche Kompressionen, z. B. durch Knochenvorsprünge bei Klavikulafrakturen oder fibröse Verdickungen von Faszien, zu beseitigen.

### 2.4.2.1 Äußere Neurolyse

Dieser Akt leitet jede Maßnahme am verletzten Plexus brachialis ein, weil man ja erst durch die Freilegung genauen Aufschluss über das Ausmaß der Schädigung erhält. Hier setzt das Argument der Befürworter der Frühoperation ein, nämlich, dass die frühzeitige Freilegung durch das Fehlen der Fibrose erleichtert wird. Das

Plastische Chirurgie

Forschung, Handchirurgie, Rhinoplastik,  
Gesichtstransplantation

Berger, A.; Hierner, R.; Pallua, N. (Hrsg.)

2017, XXII, 324 S. 239 Abb. in Farbe., Hardcover

ISBN: 978-3-662-48848-5