Operative Optionen bei Plexusverletzungen der oberen Extremität

Verletzungen des Plexus brachialis führen zu erheblichen funktionellen Einschränkungen der willkürlichen Armbewegungen und erfordern komplexe chirurgische Rekonstruktionen. Meist verbleiben dauerhafte Behinderungen, Prognosen erweisen sich als äußerst schwierig. Etwa 70 % der Verletzungen des Plexus brachialis bei Erwachsenen werden durch Hochrasanztraumata bei Motorradunfällen verursacht. Die daraus resultierenden körperlichen Behinderungen führen bei den meist jungen Patienten zu erheblichen sozioökonomischen Problemen [1–3].

Während der letzten Jahrzehnte wurden neue chirurgische Konzepte entwickelt, die eine Verbesserung der funktionellen Ergebnisse erwarten lassen. Nerven transfers von intra- und extraplexalen Spendernerven sowie mikrovasculäre Transplantationen von freien Muskeln zur gelähmten Extremität sind integrale Bestandteile des Rekonstruktionsplans geworden.

Chirurgische Anatomie

Der Plexus brachialis besteht aus den nervalen Strukturen, über die das zentrale Nervensystem mit der oberen Extremität in Verbindung steht. Er beinhaltet 5 Spinalnerven (C5–T1) und 3 Primärstränge (oberer, mittlerer, unterer). Die ventralen und dorsalen Äste (Divisiones) der Primärstränge ordnen sich zu 3 Sekundärsträngen (Faszikeln) um. Aus diesen gehen die 5 langen Armnerven (N. musculocutaneus, N. radialis, N. axillaris, N. medianus und N. ulnaris) hervor. Im oberen Verlauf werden bereits mehrere

Äste zu den Muskeln der Schulterregion abgegeben (■ Abb. 1).

Nach dem Verlassen der Neuroforamina verlaufen die 5 Spinalnerven entlang der knöchernen Rinne zwischen dem vorderen und hinteren Tuberkel der Wirbelkörper. Diese knöchernen Rinnen sind gut ausgebildet für die Spinalnerven, die den oberen Primärstrang bilden, jedoch flach für die Spinalnerven des unteren Primärstrangs. Ferner werden die unteren Spinalnerven von weniger fixierendem Bindegewebe umgeben. Demzufolge sind die unteren Spinalnerven anfällig für präganglionäre (Avulsions-)Verletzungen, wohingegen die Nerven, die den oberen Primärstrang bilden, eher zu postganglionären Verletzungen tendieren.

Klassifikation

Verletzungen des Plexus brachialis lassen sich auf unterschiedliche Art und Weise klassifizieren. Topographisch können sie in supraklavikuläre (Wurzeln, Spinalnerven, Primärstränge) und infraklavikuläre Läsionen (Faszikel) eingeteilt werden. Sie können aber auch in präganglionäre und postganglionäre Verletzungen mit daraus resultierenden grundlegenden chirurgischen Konsequenzen unterschieden werden. Eine präganglionäre Verletzung hat eine permanente Paralyse der Muskeln, die von den abgerissenen Wurzeln innerviert werden, einen kompletten sensorischen Verlust korrespondierender Dermatome und v. a. den Ausschluss jeglicher spontaner Erholung zur Folge. Bei einer postganglionären Verletzung ist die Nervenzelle vom ventralen Horn des Rücken-

marks bis zum Austritt aus dem intervertebralen Foramen bzw. darüber hinaus erhalten, so dass die Neurone bei geeigneten Voraussetzungen Axone regenerieren können.

Verletzungen des Plexus brachialis können offen oder geschlossen sein. Offene Verletzungen schließen glatte Schnittwunden und Schusswunden ein, wohingegen geschlossene Verletzungen Traktions-, Druck- und Quetschverletzungen beinhalten. Saubere, scharfe Nervenverletzungen sollen umgehend operativ versorgt werden. Die verzögerte Rekonstruktion nach Wochen wird bei zerklüfteten Wunden empfohlen. Durch Schussverletzungen verursachte Plexusschädigungen müssen nicht routinemäßig operiert werden. In der Regel handelt es sich um Neurapraxien mit spontaner Erholung innerhalb von 6 Monaten. Bei geschlossenen Verletzungen ist grundsätzlich eine differenzierte diagnostische Abklärung zeitnah erforderlich, um eine mögliche Spontanheilung von rekonstruktionspflichtigen Verletzungsfolgen zu unterscheiden (■ Abb. 2).

Patientenuntersuchung

Jeder Patient mit einer Schädigung des Plexus brachialis hat ein individuelles Verletzungsmuster. Die klinische Untersuchung beinhaltet die exakte Beurteilung sämtlicher motorischer und sensorischer Qualitäten des Plexus brachialis. Jeder Muskel wird in seinem Kraftgrad M0–M5 (British Medical Research Council) bewertet (■ Tab. 1).

Zu überprüfen ist das Vorhandensein eines Hoffmann-Tinel-Zeichens im Be-

Abb. 1 ◀ Plexus brachialis. (Aus [16])

Abb. 2 ▲ Chirurgisches Vorgehen

reich des supra- oder infraklavikulären Plexus. Dieses kann ein Indikator sein, ob die Verletzung prä- oder postganglionär vorliegt. Die passiven und aktiven Bewegungsausmaße der Schulter, des Ellenbogens, des Unterarms, des Handgelenks sowie der Hand werden ebenso wie die Reflexe untersucht und dokumentiert.

Spezifische Zeichen wie das Horner-Syndrom oder stärkste Schmerzen

asensibler Extremitäten weisen auf eine Deafferenzierung der oberen Extremität hin. Sie geben Hinweis darauf, dass es sich um eine präganglionäre Plexusverletzung handelt und lassen damit auf eine schlechte Prognose schließen.

Nicht vergessen werden darf eine Erhebung des Gefäßstatus zur Überprüfung begleitender Gefäßverletzungen sowie die Feststellung möglicher Rücken-

markverletzungen, die in 2–5 % der Plexusverletzungen vorkommen.

Radiologische Diagnostik

Die radiologische Untersuchung der Halswirbelsäule, der Schulter, der oberen Extremität sowie des Brustkorbs sind wichtig, um zusätzliche Verletzungen der knöchernen Strukturen zu diagnostizieren. Um eine Zwerchfelllähmung auszuschließen, ist eine Röntgenaufnahme des Thorax notwendig.

Die konventionelle sowie die CT-Myelographie des Halsmarks können wertvolle Informationen bezüglich einer präganglionären Verletzung des Plexus brachialis liefern [4]. Die Entwicklung einer Pseudomeningozele weist sicher auf einen Wurzelabriss hin. In den letzten Jahren wurden diese Untersuchungsformen weitgehend durch die Magnetresonanztomographie (MRT) abgelöst [5]. Durch die Verwendung schneller 3D-Gradienten-Echo-Sequenzen im Verlauf des Plexus brachialis ist es möglich, dreidimensionale Rekonstruktionen in jeder beliebigen Raumebene entlang der ventralen und dorsalen Wurzeln zu erstellen.

Elektrophysiologie

Elektrophysiologische Untersuchungen (ENG, EMG, SEP) werden zum Ausschluss oder Nachweis einer spontanen Regeneration diagnostisch herangezogen, um letztlich chirurgische Maßnahmen daraus abzuleiten. Sie bestätigen die klinische Diagnose, lokalisieren die Verletzung und definieren die Schwere des neuronalen Schadens sowie das Ausmaß der Läsion. Gerade die sensiblen Nervenantwortpotenziale (sNAP) können dabei helfen, präganglionäre von postganglionären Schäden zu unterscheiden.

Eine Elektromyographie (EMG) ist frühestens 20 Tage nach der Verletzung sinnvoll und ermöglicht, eine axonale Schädigung von einem reinen Myelinschaden/Leitungsblock zu unterscheiden. Die Bestimmung der Nervenleitungsgeschwindigkeit (NLG) wiederum erlaubt sofort, einen Leitungsblock des Nervens zu erkennen, kann jedoch diesen nicht von einem axonalen Schaden unterscheiden. Fortlaufende elektrophysiologische Untersuchungen in Verbindung mit regelmäßigen klinischen Untersuchungen weisen Reinnervationen oder fortbestehende Denervationen nach.

Zeitpunkt der operativen Behandlung

Idealerweise werden die Patienten umgehend in ein Zentrum mit Expertise in der Behandlung von Plexusverletzungen überwiesen, so dass sie adäquat behandelt werden. Anzeichen einer Befundverbesserung müssen sorgfältig erfasst werden.

Der optimale Zeitpunkt für die Operation wird nach einem festen Behandlungsschema bestimmt. Dies ist wichtig, da zeitabhängig irreversible Veränderungen in den motorischen Endplatten stattfinden. Aus diesem Grund nimmt die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Reinnervation immer mehr ab, je länger der Zielmuskel denerviert ist [6].

Der bestmögliche Zeitpunkt für die chirurgische Intervention bei Patienten, die keine adäquate Reinnervation zeigen, liegt innerhalb weniger Monate [7]. Ein zu langes Abwarten kann unnötigerweise zu einem Verlust der motorischen Endplatten und somit zum Scheitern der

Reinnervation führen. Die frühe Exploration und Rekonstruktion innerhalb von 3 bis 6 Wochen ist angezeigt, wenn deutliche Hinweise auf einen Wurzelabriss vorliegen [8]. Sicher nachgewiesene postganglionäre Defektverletzungen, die keinerlei Aussicht auf eine Spontanheilung haben, sollten ebenfalls frühzeitig operativ versorgt werden. Lediglich im Fall einer Dehnungsverletzung, bei der die nervalen Strukturen in ihrer Kontinuität erhalten sind, ist ein abwartendes Vorgehen gerechtfertigt, um einer möglichen spontanen Erholung ausreichend Zeit zu geben.

Die Ergebnisse nach verzögerter (9 bis 12 Monate) oder später (mehr als 12 Monate) Operation sind schlecht, da der Zeitraum für die Nervenregeneration zum Zielmuskel größer ist als die Überlebenszeit der motorischen Endplatten nach der Denervation. In diesen Fällen sind sekundäre rekonstruktive Maßnahmen zu empfehlen.

Chirurgische Optionen

Während der letzten Jahrzehnte ist es zu einer Zunahme der chirurgischen Optionen bei der operativen Behandlung von Verletzungen des Plexus brachialis gekommen. Dieser Anstieg verlief parallel zu den Fortschritten der mikrochirurgischen Techniken und der zunehmenden Verfügbarkeit intraoperativer elektrophysiologischer Verfahren. Das Wissen und die Fähigkeit, Nervenrekonstruktionen mit sekundär rekonstruktiven Maßnahmen zu kombinieren, sind der Schlüssel, um optimale funktionelle Ergebnisse zu erzielen. Standardoperationen schließen die Neurolyse, die direkte Nervennaht, die Nervenwiederherstellung mittels Transplantaten und den Nerventransfer ein.

Neurolyse bedeutet die Entfernung von Narbengewebe um den Nerv (externe Neurolyse) oder zwischen einzelnen Faszikeln (interne Neurolyse). Die Präparation wird distal und proximal am unverletzten Nerv in Richtung des verletzten Segments begonnen. Mit Hilfe intraoperativer Elektrostimulation lässt sich feststellen, ob das verletzte Segment ein elektrisches Signal fortleiten kann. Das Vorhandensein von Nervenakti-

Trauma Berufskrankh 2017 · 19 (Suppl 3):S350–S355
<https://doi.org/10.1007/s10039-017-0322-2>
 © Springer Medizin Verlag GmbH 2017

D. Schreier · T. Al Malat · H. H. Homann

Operative Optionen bei Plexusverletzungen der oberen Extremität

Zusammenfassung

Verletzungen des Plexus brachialis führen zu erheblichen motorischen und sensiblen Ausfällen. Um optimale Ergebnisse zu erzielen, ist ein interdisziplinäres diagnostisches Vorgehen notwendig. Bei offenen, glatten Durchtrennungen des Plexus brachialis ist im Gegensatz zu geschlossenen Traktionsverletzungen eine umgehende operative Intervention angezeigt. Verbesserte diagnostische Möglichkeiten sowie weiterentwickelte chirurgische Techniken, wie der Einsatz intra- und extraplexaler Spendernerven sowie freier mikrovasculärer Musculus-gracilis-Lappen, erlauben mittlerweile eine zuverlässige Wiedererlangung der Schulterstabilität und Ellenbogenbeugung.

Schlüsselwörter

Plexus brachialis · Rekonstruktion · Nervennaht · Nerventransfer · Freie funktionelle Muskeltransplantation

Surgical options for brachial plexus injuries

Abstract

Traumatic brachial plexus injuries often result in considerable motor and sensory loss. A multidisciplinary diagnostic approach is necessary to attain optimal outcomes in the treatment of these injuries. In the case of open clean-cut severances of the brachial plexus, early surgical intervention is advisable in contrast to closed traction injuries. Improved diagnostic modalities as well as advances in surgical techniques, such as the implementation of intraplexal and extraplexal donor nerves and free functioning microvascular gracilis muscle flaps have facilitated reliable restoration of shoulder stability and elbow flexion.

Keywords

Brachial plexus · Reconstruction · Nerve suture · Nerve transfer · Free functioning muscle transplantation

Tab. 1 Muskel-Grading nach dem British Medical Research Council

M0	Keine Muskelkontraktion
M1	Sichtbare oder tastbare Muskelkontraktion
M2	Aktive Bewegung unter Ausschaltung der Schwerkraft
M3	Aktive Bewegung gegen die Schwerkraft
M4	Aktive Bewegung gegen mäßigen Widerstand
M5	Normale Muskelkraft

onspotenzialen über dem betroffenen Segment weist darauf hin, dass die alleinige Neurolyse die angemessene Maßnahme für die Wiederherstellung der Nervenfunktion ist (■ **Abb. 3**).

Direkte Nervennähte sind nur möglich, wenn eine kurze Defektstrecke zwischen den zu koaptierenden Nervenenden vorliegt. Eine Spannung der Nerven-naht muss unbedingt vermieden werden, um das Risiko eines Versagens der Regeneration zu minimieren. Die Spannung kann durch proximale und distale Mobilisation des Nervs vermindert werden. Die direkte Naht wird mit monofilen Fäden der Stärke 9–0 oder 10–0 durchgeführt, alternativ kann die Koaptation der Nervenenden mit Fibrinkleber erfolgen.

Transplantate werden benötigt, wenn der Abstand nach Narbenresektion zu groß ist für eine direkte spannungsfreie Approximation. Das Transplantat sollte die Länge der Defektstrecke plus 10 % haben. Üblicherweise werden kleinkalibrige Transplantate von N. suralis, N. cutaneus antebrachii medialis oder R. superficialis n. radialis (sofern dieser von der Verletzung weiter proximal betroffen ist) genutzt. Diese kleinkalibrigen Transplantate erzielen bessere Ergebnisse als großkalibrige auf Grund einer schnelleren Revaskularisation [9].

Kommen großkalibrige Transplantate von nichtfunktionierenden Nerven, wie z. B. der N. ulnaris, zur Anwendung, ist dessen Blutzufuhr über ein ausreichend großes Gefäß zu gewährleisten.

Nerventransfers haben das chirurgische Vorgehen bei Plexusverletzungen, insbesondere bei den einst nicht reparablen Avulsionsverletzungen, aber auch bei postganglionären Schädigungen ge-

wandelt [10]. Bei diesen Verfahren wird ein intakter Nerv (mit niedriger Spendermorbidity) durchtrennt und distal auf einen wichtigeren, jedoch irreparabel geschädigten Nerv umgesetzt, so dass dieser mit gesunden Spenderaxonen reinnerviert wird. Oft erlaubt diese Vorgehensweise, die Nervenrekonstruktion näher an der motorischen Endplatte durchzuführen.

Nerventransfers können mittels extra- oder intraplexaler Spendernerven durchgeführt werden. Regelhaft eingesetzte Nerventransfers sind das Umsetzen des N. accessorius auf den N. suprascapularis und motorischer Faszikel des N. radialis auf den N. axillaris zur Neurotisation der Schultermuskulatur. Zur Wiederherstellung der Ellenbogenbeugung werden Interkostalnerven und motorische Faszikel des N. ulnaris für den N. musculocutaneus sowie der doppelte Transfer von Faszikeln des N. ulnaris und des N. medianus auf den N. musculocutaneus und den motorischen Ast des M. brachialis verwandt. Der kontralaterale C7-Spinalnerv steht für die intraplexale Rekonstruktion zur Verfügung. Die Wiederherstellung der umgesetzten Funktion scheint auf der kortikalen Plastizität des Gehirns zu beruhen [11].

Tung et al. beschrieben exzellente Kraftwerte für die Ellenbogenbeugung beim Einsatz von Nerventransfers für die Reinnervation des M. biceps brachii und des M. brachialis [12]. In einer Vergleichsstudie zeigten Ali et al., dass bei Verletzungen des oberen Primärstrangs Nerventransfers bessere Ergebnisse als Rekonstruktionen mittels Transplantaten bzw. die Kombination beider Techniken für die Wiederherstellung der Ellenbogenbeugung und Schulterabduktion erzielen [13].

Freie funktionelle Muskeltransplantation

Bei der freien funktionellen Muskeltransplantation (FFMT) wird ein Muskel transplantiert, bei dem eine mikrovaskuläre Anastomose zur Revaskularisation und eine mikrochirurgische Koaptation zu einem motorischen Empfänger-nerv zur Reinnervation genutzt werden. Die

FFMT ist insbesondere von Nutzen für die Wiederherstellung der Ellenbogen- und Handfunktion bei kompletten Plexusausfällen. Das Verfahren hat sich als effektiv erwiesen und wird zunehmend angewandt. Der freie myokutane Musculus-gracilis-Lappen ist der am häufigsten verwendete Muskellappen und stellt die beste Option eines Spendermuskels bei der Plexus-brachialis-Rekonstruktion dar [14, 15]. Als extraplexale Spendernerven kommen meist der N. accessorius, die Interkostalnerven, der N. phrenicus, der seitengleiche oder kontralaterale N. pectoralis medialis und der kontralaterale C7-Spinalnerv in Betracht. Intraplexale Spendernerven sind meist motorische Anteile des N. ulnaris oder des N. medianus. Bei größeren zu überbrückenden Distanzen muss zunächst eine Nervenverlängerung (Transplantation) vorgenommen werden, die FFMT wird nach erfolgreicher Reinnervation in einem zweiten operativen Schritt durchgeführt. Die Ergebnisse der FFMT sind zufriedenstellender als jene, die mit einem lokalen Muskeltransfer erreicht werden.

Die Indikationen zur FFMT bei Verletzungen des Plexus brachialis beinhalten akute oder chronische Wurzelabrisse sowie Wurzelverletzungen mit gescheitertem Nerventransfer.

Palliative (sekundäre) Rekonstruktion

Palliative Rekonstruktionsverfahren kommen zur Anwendung, wenn nach abgeschlossener Erholung (mit oder ohne Nervenrekonstruktion) Funktionsausfälle bzw. Deformitäten verbleiben. Sie schließen den Muskel- und Seh-nenttransfer, den freien funktionellen Muskeltransfer, Tenodesen und Arthrodesen ein. Alternativ können Orthesen und Prothesen zum Einsatz kommen.

Priorität hat die Rekonstruktion der aktiven Ellenbogenbeugung und einer stabilen Schulter. Daran schließen sich ggf. Eingriffe zur Wiedererlangung der Hand- bzw. Fingerfunktion an.

Gestielte Muskeltransfers sind bei inkompletten Plexusverletzungen wie C5/6-Avulsionen mit intakten C7-T1 indiziert. Beispiele gestielter Muskel-

Abb. 3 ▲ Neurolyse des supraclavikulären Plexus

Abb. 4 ▲ Transfer des M. trapezius (a) mit simultaner Implantation einer Oberarmkopfprothese (b)

transfers sind die Verwendung des M. trapezius oder des M. latissimus dorsi für die Schulterfunktion (Abb. 4), des M. latissimus dorsi, des M. pectoralis major sowie der Unterarmbeuger (Steindler-Operation) für die Ellenbogenbeugung, des M. deltoideus (partiell) für die Ellenbogenstreckung und der Unterarmbeuger für die Handgelenk- oder Fingerstreckung.

Fazit für die Praxis

- Verletzungen des Plexus brachialis haben nicht nur gravierende Auswirkungen auf die Funktion der betroffenen Extremität, sondern auf den gesamten Patienten.
- Das Erreichen eines optimalen funktionellen Ergebnisses beruht auf einer umfassenden Analyse des Schädigungsmusters und transparenten

Kommunikation zwischen Patient und Chirurg.

- Realistische Ziele und nicht behebbare funktionelle Defizite müssen klar formuliert werden.
- Der behandelnde Arzt benötigt eine umfassende Fachkenntnis, um das jeweils korrekte operative Vorgehen zum richtigen Zeitpunkt festzulegen.
- Mit verbesserten mikrochirurgischen Techniken und zunehmend kreativen Rekonstruktionsmöglichkeiten hat sich die Prognose für Patienten mit Plexusverletzungen deutlich verbessert; weitere Fortschritte sind zu erwarten.

Korrespondenzadresse

Dr. D. Schreier

Klinik für Handchirurgie, Plastische Chirurgie,
Zentrum für Schwerbrandverletzte, BG
Klinikum Duisburg
Großenbaumer Allee 250, 47249 Duisburg,
Deutschland
detlef.schreier@bg-klinikum-duisburg.de

Einhaltung ethischer Richtlinien

Interessenkonflikt. D. Schreier, T. Al Malat und H.H. Homann geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Dieser Beitrag beinhaltet keine von den Autoren durchgeführten Studien an Menschen oder Tieren.

The supplement containing this article is not sponsored by industry.

Literatur

1. Narakas AO (1985) The treatment of brachial plexus injuries. *Int Orthop* 9:29–36
2. Allieu Y (1999) Evolution of our indications for neurotization. Our concept of functional restoration of the upper limb after brachial plexus injuries. *Chir Main* 18:165–166
3. Doi K, Muramatsu K, Hattori Y, Otsuka K, Tan SH, Nanda V, Watanabe M (2000) Restoration of prehension with the double free muscle technique following complete avulsion of the brachial plexus. Indications and long-term results. *J Bone Joint Surg Am* 82:652–666
4. Doi K, Otsuka K, Okamoto Y et al (2002) Cervical nerve root avulsion in brachial plexus injuries: magnetic resonance imaging classification and comparison with myelography and computerized tomography myelography. *J Neurosurg* 96:277–284
5. Yoshikawa T, Hayashi N, Yamamoto S et al (2006) Brachial plexus injury: clinical manifestation, conventional imaging findings, and the latest imaging techniques. *Radiographics* 26(suppl_1):S133–S143. <https://doi.org/10.1148/rg.26si065511>
6. Nath RK, Mackinnon SE (2000) Nerve transfers in the upper extremity. *Hand Clin* 16:131–139
7. Tung TH, Mackinnon SE (2010) Nerve transfers: indications, techniques, and outcomes. *J Hand Surg Am* 35:332–341
8. Giuffrè JL, Kakar S, Bishop AT et al (2010) Current concepts of the treatment of adult brachial plexus injuries. *J Hand Surg Am* 35:678–688
9. Millesi H (1981) Reappraisal of nerve repair. *Surg Clin North Am* 61:321–340
10. Midha R (2004) Nerve transfers for severe brachial plexus injuries: a review. *Neurosurg Focus* 16(5):1–10
11. Malessy MJ, Thomeer RT, van Dijk JG (1998) Changing central nervous system control following intercostal nerve transfer. *J Neurosurg* 89:568–574
12. Tung TH, Novak CB, Mackinnon SE (2003) Nerve transfers to the biceps and brachialis branches to improve elbow flexion strength after brachial plexus injuries. *J Neurosurg* 98:313–318

-
13. Ali ZS, Heuer GG, Faught RW et al (2015) Upper brachial plexus injury in adults: comparative effectiveness of different repair techniques. *JNeurosurg* 122:195–201
 14. Chuang DCC (1995) Functioning free muscle transplantation for brachial plexus injury. *Clin Orthop Relat Res* 314:104–111
 15. Doi K (2008) Management of total paralysis of the brachial plexus by the double free-muscle transfer technique. *J Hand Surg Eur Vol* 33:240–251
 16. Vogt P (Hrsg) (2011) *Praxis der Plastischen Chirurgie. Plastisch-rekonstruktive Operationen – Plastisch-ästhetische Operationen – Handchirurgie – Verbrennungschirurgie*. Springer, Heidelberg, Berlin, New York <https://doi.org/10.1007/978-3-540-37573-9>