

Vorteile einer Nerven Chirurgie mit intraoperativer Elektrodiagnostik

■ D. Burg, C. Meuli-Simmen, M. Infanger, V. E. Meyer

Klinik für Wiederherstellungschirurgie, Universitätsspital Zürich

Summary

Burg D, Meuli-Simmen C, Infanger M, Meyer VE. [Impact of intraoperative nerve function assessment on nerve surgery.] *Schweiz Arch Neurol Psychiatr* 2002;153:189–96.

To date in most cases of high-grade nerve injuries only partial recovery is achieved and the prognosis is still poor for some types of lesions. Neurophysiological methods are implemented to improve the outcome by assessing the condition of nerve fibres at any location and at any point of time during the course of surgery.

Monitoring is utilised to prevent inadvertent injury during surgical procedures. Free-running EMG signals are recorded from muscles targeted by a nerve at risk. Motor unit activity is initiated when dissecting instruments approach and contact the nerve. Bursts and neurotonic discharges arise and increase with tension or pressure exerted on the nerve. Acoustic feedback warns of imminent damage. Evoked muscle and cerebral potentials are applied to reveal impairment of the nerve excitability and conductivity by mechanical and metabolic stress.

Under normal conditions nerve action potential (NAP) recording from the exposed nerve reflects the integrity of the nerve by high amplitude, steep rise and normal temporal dispersion. Under pathological conditions the reduced density of nerve fibres, thickening of nerve sheaths, endoneurial cell proliferation and many other influences enhance the amplitude reduction of the NAP and may cause overestimation of nerve malfunction. However, this enhancement facilitates the detection of the location and the extension of the lesion.

In nerve tumour surgery NAP recording identifies affected and unaffected nerve fascicles and the border of healthy tissue.

In traumatology following closed nerve injuries early revision and evaluation with the aid of NAP recording has proved to be the best possible procedure. When the nerve is found in continuity, the appearance of the nerve does not reliably reflect the grade of the lesion and the prognosis. Resection of low-grade injuries, capable of spontaneous regeneration downgrades the outcome. If a high-grade lesion without potential of regeneration is not resected and repaired, recovery is not possible. To avoid inadequate measures, nerve surgery is frequently delayed awaiting muscle reinnervation. However, this loss of time has the most adverse impact on final outcome when repair is necessary. Neurography detects the presence or absence of significant nerve regeneration in the early months following the injury. Where the lesion is found in continuity after 3–4 months and NAPs are recorded across the lesion, neurolysis is done in order to promote nerve regeneration. Where NAPs are not recordable, resection and repair are required. In the same way NAP recording is used to judge single fascicles. Split nerve repair is done if some fascicles are conductive and others are not.

When nerve repair is indicated, the proximal stump has to be sectioned back "to healthy tissue". However, as intraoperative nerve evaluation by gross inspection and magnification does not reliably reflect the availability and viability of nerve fibres, NAP recording is recommended as an additional criterion for choosing an appropriate proximal coaptation site for reconstruction.

Intraoperative nerve function assessment is essential for brachial plexus surgery. As nerve repair is useless in the presence of preganglionic lesion, SEPs are applied to assess the integrity of the dorsal root. NAPs with high amplitude in the absence of nerve function are also useful tools to identify preganglionic lesions. With the aid of intraoperative SEP and NAP recording in plexus surgery surgical measures are selected according to the integrity of the roots, the quality of nerve

Korrespondenz:
Dr. med. Doris Burg
Klinik für Wiederherstellungschirurgie
Universitätsspital
Rämistrasse 100
CH-8091 Zürich
e-mail: doris.burg@chi.usz.ch

parenchyma and the potential of regeneration across lesions in continuity.

Intraoperative recording from the exposed nerve improves the understanding of pathophysiology of focal neuropathies as exemplified by studies on the ulnar nerve entrapment at the elbow.

Keywords: intraoperative electrophysiology; intraoperative NAP; intraoperative SEP; monitoring; nerve surgery; plexus surgery

Einleitung

Nervenoperationen haben durch die Mikrochirurgie beachtliche Fortschritte erreicht. Dennoch sind die Ergebnisse noch nicht zufriedenstellend. Besonders in der Nervenstraumatologie ist die Zahl der Patienten, die durch Nervenschäden Lebensqualität und Arbeitsfähigkeit einbüsst, hoch. Nervenrekonstruktionen können mit wenigen Ausnahmen nur einen Teil des erlittenen Funktionsverlustes rückgängig machen. Kompensationsmechanismen spielen dabei eine wichtige Rolle. Im Tierexperiment wurde gezeigt, dass selbst unter besonders günstigen Voraussetzungen – glatte Schnittverletzung des N. medianus und Direktnaht bei Affen – durchschnittlich nur 20% motorischer Nervenfasern ihren Muskel wieder erreichen [1]. Diese Zahl nimmt weiter ab, wenn ein Transplantat eingefügt wird. Kim und Mitarbeiter berichten, dass bei Transplantat-Rekonstruktionen des N. medianus nach vollständiger Durchtrennung in 68% der Fälle ein zufriedenstellendes oder gutes Ergebnis erzielt wurde [2]. Die Resultate verschlechtern sich, wenn der Nervenschaden weit proximal lokalisiert ist, wenn die Sprossungsbedingungen an der Verletzungsstelle durch Narbengewebe, Ödem oder Ischämie ungünstig sind und wenn die Nervenverletzung regenerationsproblematische Nerven wie den N. ulnaris oder peroneus oder Strukturen, die kaum je in relevantem Ausmass regenerieren, wie den unteren Truncus des Armplexus oder gar den achten Spinalnerv betrifft. Unter ungünstigen Bedingungen einer Nervenrekonstruktion, oder wenn mehrere Nerven an einer Extremität oder ein Nervenplexus betroffen sind, verbleibt trotz aufwendiger Nerven Chirurgie für den Rest des Lebens eine relevante Behinderung.

Verbesserungen der Operationsergebnisse sind vor allem für die Problemfälle ein dringendes Anliegen. Fortschritte werden von neuen Strategien, von erweitertem Muskel- und Nerven transfer, von künstlichen oder biologischen Leitschienen anstelle von Nerven transplantaten, von bio-

chemischer Verhinderung von Narbengewebe und molekularer Einflussnahme auf das Nervenwachstum erwartet. Vorerst gehören diese neuen Wege jedoch im wesentlichen der experimentellen Chirurgie an. Der Einsatz elektrodiagnostischer Methoden hingegen, der bis heute noch nicht zum Standard der Nerven Chirurgie gehört, kann bereits jetzt mit einem verhältnismässig geringen Aufwand zur Verbesserung der Resultate der Nerven Chirurgie beitragen. Die Methode wurde tierexperimentell von Kline und Mitarbeitern entwickelt [3] und hat sich an einem grossen Krankengut als vorteilhaft erwiesen [4]. Sie basiert auf den Erfahrungen der klinischen Neurophysiologie und kann zum Schutz von Nervengewebe [5], zur Optimierung nervenchirurgischer Strategien [4, 6, 7] und zur Gewinnung neuer Erkenntnisse der Pathophysiologie von Nervenschäden [8] eingesetzt werden. Im folgenden werden die Vorteile der intraoperativen Nerven funktionsdiagnostik vorgestellt. Bezüglich der Methoden wird auf die Literatur verwiesen [6, 9].

Besonderheiten der Elektrodiagnostik am freigelegten Nerv

Abbildung 1 zeigt ein Nervenaktionspotential (NAP), das intraoperativ von einem gesunden Nerven (N. radialis) unter optimalen Bedingungen – Vermeiden mechanischer Belastung bei der Präparation und bei der Ableitung, keine vorangegangene Blutleere – registriert wurde. Zu beachten ist vor allem die hohe Amplitude und die Anstiegssteilheit. Mit geeigneter Technik [6] erreichen die Amplituden gesunder Nerven mittleren bis dicken Kalibers intraoperativ 0,6 bis 3 mV. Die präzise Lokalisation einer Schädigung zeigt sich, wenn man ein NAP distal einer Nervenreizung entlang eines Nerven bis zu einer Schadstelle, die mit abruptem Verlust der Leitfähigkeit einhergeht, verfolgt (Abb. 2). Verschiebt man die Ableitelektrode über die Schadstelle nach distal, findet man unmittelbar danach eine Potentialumkehr (Abb. 2b) – ein positives Potential wie ein Spiegelbild des NAP proximal der Schadstelle. Slimp bezeichnet diese Ableitung einer plötzlichen Potentialumkehr als «killed end recording» [7]. Das NAP nähert sich der Elektrode, erreicht sie aber nicht mehr, so dass keine Negativität unter der Elektrode entsteht. Die Ableitung wenige Millimeter weiter distal registriert eine Nulllinie (Abb. 2c). Durch die kurze Latenz und Dauer kann man das positive Potential bei «killed end recording» von einem Muskelaktionspotential (MAP), das die Elektrode durch Volumenleitung

Abbildung 1 Intraoperativ bipolar von einem gesunden N. radialis abgeleitetes NAP.

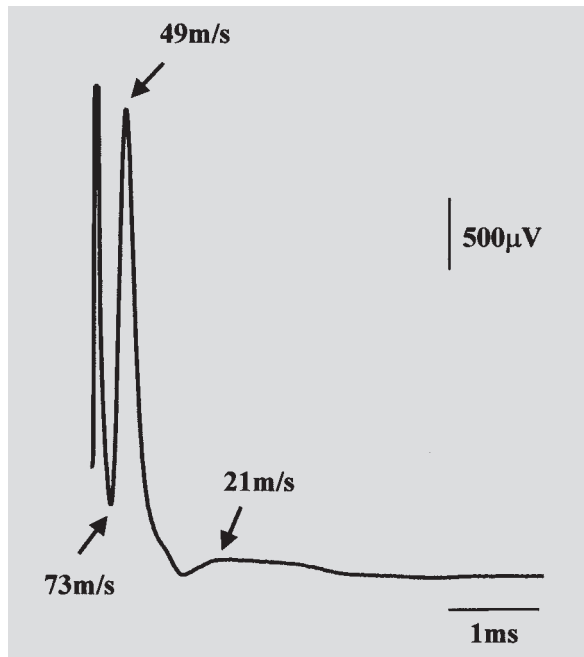
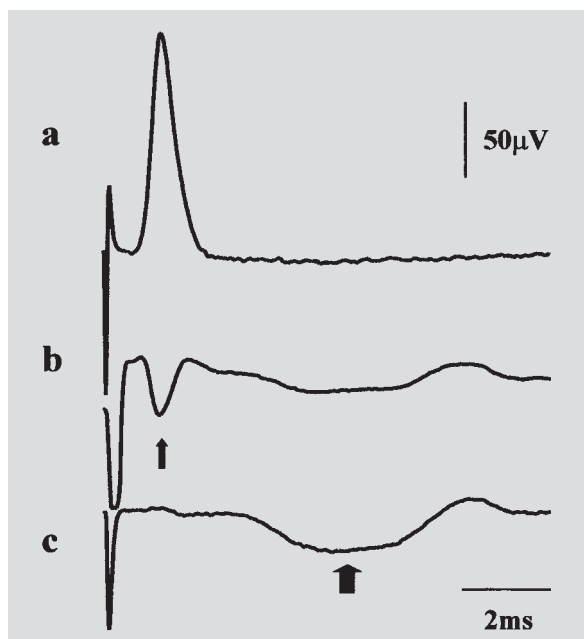


Abbildung 2 Monopolare Ableitung von einem iatrogen bei einer CTS-Operation durchtrennten motorischen Ast (R. recurrens) des N. medianus. Das Nervenende war subkutan verwachsen. Ein Ast zum M. flexor pollicis brevis war erhalten. Der N. medianus wurde gereizt.

- NAP 2 cm nach Abgang vom N. medianus. Amplitude und Konfiguration zeigen das Vorhandensein einer relevanten Menge erhaltener Nervenfasern an.
- Die Ableitung 5 mm distal von a zeigt ein Umkehrpotential (Pfeil) ohne anschließende Negativität, das auf eine fehlende Erregbarkeit des Nervs unter der Elektrode schließen lässt.
- Die Ableitung 5 mm distal von b weist nur eine späte positive Ablenkung (breiter Pfeil) mit negativer Nachschwankung auf. Sie stammt von dem MAP des M. flexor pollicis brevis (volumengeleitetes MAP).

Konsequenz: Der R. recurrens wurde in der Position a reseziert. Sein proximales Ende wurde zur Neurotisation in den M. abductor pollicis brevis implantiert.



erreicht und eine längere Latenz und Dauer hat, unterscheiden (Pfeil in Abb. 2c).

Besonders zu beachten ist intraoperativ unter pathologischen Bedingungen ein eindrücklicher «Verdeutlichungseffekt». Er kommt dadurch zustande, dass bei einem Nervenschaden nicht nur der Verlust an Nervenfasern, sondern viele weitere Faktoren zur Amplitudenreduktion des NAP beitragen. Dazu zählen unter anderen die verminderte Dichte von Nervenfasern, die höhere Dispersion des NAP, der isolierende Effekt von Abbauprodukten der Wallerschen Degeneration, die Proliferation endoneuraler Zellen, intranervale Fibrose, Ödem und verdickte Nervenhiüllen. Aufgrund dieses Verdeutlichungseffektes stellen sich Nervenschäden immer sehr eindrücklich dar und werden eher über- als unterschätzt.

Beachtenswert ist intraoperativ der Einfluss der Blutsperre auf die Nervenregbarkeit und -leitfähigkeit [6] und der Einfluss von Anästhetika auf evozierte Potentiale [10].

Intraoperatives Monitoring zum Schutz von Nervengewebe

Monitoring von Nervengewebe kann über eine kontinuierliche EMG-Registrierung in zugehörigen Muskeln oder mit elektrisch evozierten Nervensignalen, die die Gefährdungsstelle passieren und als MAPs oder als evozierte kortikale Potentiale (SEPs) registriert werden, erfolgen. Die Ableitung wird während kritischer Operationsphasen durchgeführt.

Zu starke Belastungen des Nervs durch Manipulationen, die den Nerv irritieren, z.B. beim Herauslösen des Nervs aus Narbengewebe oder beim Ablösen eines noch funktionstüchtigen Faszikels von einem Nerventumor, bewirken Nervenirritationen. Sie sind von kurzen Ausbrüchen von Einheitspotentialen oder von neurotonen Entladungen in Muskeln des betroffenen Innervationsgebietes gefolgt [5]. Das kontinuierliche EMG ist daher geeignet, den Chirurgen durch das akustische Feedback auf die Belastung des Nervs durch Zug oder Druck aufmerksam zu machen und Präparationen in kritischem Gebiet wie Peilstäbe zu leiten. Wenn es zu einer akzidentellen Durchtrennung eines Nerven kommt, entstehen meistens eindrückliche Ausbrüche lang anhaltender EMG-Aktivität. Besonders in der Tumorchirurgie, wenn Nerven in unübersichtlichem Präparationsgebiet passieren, ist diese Information wichtig, um die Verletzungsstelle aufzusuchen und mit Direktnaht zu versorgen.

Wird der Nerv über längere Zeit und zu stark mechanisch belastet, wird seine Leitfähigkeit blockiert. Auch dieses Warnsignal wird mit Hilfe evozierter MAPs, SEPs oder anderer evozierter Potentiale zum Nervenmonitoring verwandt. Viele Beispiele für die sinnvolle Anwendung von Nervenmonitoring zum Schutz von Hirnnerven und peripheren Nerven sind in der Literatur berichtet [5].

Beurteilung von Nervenschäden

Lokalisation und Ausdehnung

Die präoperative Diagnostik ist nicht immer in der Lage, einen Nervenschaden ausreichend genau zu lokalisieren. Dies gilt vor allem für Nervenstrecken ohne Abgang von Muskelästen und für Mehretagen-Läsionen. Die intraoperative NAP-Ableitung und NLG-Bestimmung hat sich in diesen Fällen als einfache Suchmethode erwiesen. Sie lässt anhand eines normalen, pathologisch veränderten oder fehlenden NAP erkennen, ob sich die Läsion distal oder unter beziehungsweise proximal der Ableitelektroden befindet. Das NAP zeigt die proximale Ausdehnung der Läsion an. Bei inkompletten Nervenschäden oder bei akuten Nerventraumen kann die Ausdehnung auch nach distal abgegrenzt werden. Die Neurographie deckt auch Nervenschäden auf, wenn der Nerv keine sichtbaren Veränderungen aufweist. Für den Chirurgen ist es besonders unbefriedigend, wenn er bei einer Nervenrevision mit einem morphologisch unauffälligen Nerv konfrontiert wird. Dies kann zum Beispiel nach Kontusionsschäden oder bei ischämisch bedingten Nervenschäden der Fall sein. In ausgedehntem Narbengewebe kommt es vor, dass Nervenstimulation mit NAP-Ableitung hilfreich ist, um Nervengewebe von Narbengewebe zu unterscheiden.

Beurteilung bei Nerventumoren

Die Bedeutung der intraoperativen Neurographie bei Nerventumoren liegt insbesondere in der selektiven Resektion geschädigter Faszikel. Erkennt man bei gutartigen Nervenscheidentumoren durch NAP-Ableitung, dass Faszikel ein NAP leiten, wird versucht, den Faszikel vom Tumor abzulösen und zu erhalten. Nicht leitende Faszikel werden reseziert. Vor allem beim Schwannom ist es hilfreich, Faszikel, die sich über den Tumor ausbreiten, anhand präziser Stimulation aufzusuchen und zu erhalten [4]. Bei der Resektion

von Tumoren kann es hilfreich sein, den proximalen Rand von Nervenveränderungen neurographisch aufzusuchen. Auch beim Perineuriom in einem frühen Stadium hat es sich als vorteilhaft erwiesen, betroffene Faszikel neurographisch zu identifizieren und selektiv zu resezieren.

Einfluss der intraoperativen Funktionsdiagnostik auf die Operationsstrategie

Bei Nervenoperationen wird die Nervenqualität makroskopisch, mikroskopisch und durch Palpation beurteilt. Man verlässt sich darauf, dass die morphologische Beurteilung der Nervenhiillen und ihrer Umgebung Rückschlüsse auf die Qualität der Nervenfasern, auf die es letztlich ankommt, zulässt. Die Elektrodiagnostik hingegen evaluiert das Nervengewebe direkt anhand seiner Erregbarkeit und Leitfähigkeit.

Nervenschäden in Kontinuität

Die meisten traumatischen Nervenschäden lassen den Nerv in Kontinuität. Dies trifft auf Kontusionen, Quetsch- und Dehnungsschäden, Strom- und Ischämieeinwirkungen, Injektions- und häufig auch auf Schussverletzungen zu. Da bekanntlich viele Nervenverletzungen, die in Kontinuität geblieben sind, nach vollständiger Axonotmesis eine Erholung durch Regeneration aufweisen und eine spontane Regeneration meistens ein besseres funktionelles Ergebnis aufweist, als mit Resektion und anschliessender Rekonstruktion zu erzielen ist, befürchtet man, bei einer frühen Nervenrevision, bevor die Regenerationszeit zum Muskel erfolglos abgelaufen ist, eine Schadtelle unnötig zu resezieren. Verlässt man sich bei der Wahl des Zeitpunktes einer Nervenrevision auf das Tinelzeichen, das im Verlauf nach distal wandert, erfolgt die Operation erst, wenn nach der errechneten Regenerationszeit keine nützliche Innervation zugehöriger Muskeln zu erkennen ist. Diese Strategie bedeutet einen Zeitverlust von vielen Monaten. Das Tinelzeichen kann täuschen, da eine schmale Nervenbrücke an der Verletzungsstelle genügt, um die für ein Tinelzeichen ausreichende Anzahl regenerierender Fasern passieren zu lassen. Andererseits kann trotz fehlenden Tinelzeichens eine nützliche Regeneration stattfinden. Für den Wiedergewinn motorischer Funktionen nach einer Nervenverletzung ist das Zeitfenster zwischen Verletzung und Eintreffen der regenerierten Nervenfasern im Muskel entscheidend [1].

Nützt man die intraoperative Elektrodiagnostik zum frühen intraoperativen Nachweis einer erfolgten oder ausgebliebenen spontanen Nervenregeneration, kann bereits nach 3–4, spätestens nach 6 Monaten eine Nervenrevision durchgeführt werden.

Wird der Nerv bei der Operation in Kontinuität gefunden, wird er intraoperativ proximal der Läsion gereizt und distal der Läsion von seiner Oberfläche abgeleitet. Stellt sich ohne Mittelungsverfahren ein NAP distal der Läsion dar, ist es zu einer relevanten spontanen Regeneration gekommen. Es wird lediglich eine Neurolyse durchgeführt und die Schadstelle ansonsten belassen. Kann kein NAP durch die Läsion geleitet und registriert werden, wird die Schadstelle reseziert und eine Rekonstruktion durchgeführt [3, 4, 11]. Meistens ist in diesen Fällen ein Transplantat erforderlich. Es kann lohnend sein, bei negativem NAP zunächst eine Neurolyse und danach noch einmal eine NAP-Kontrolle über die Schadstelle hinweg durchzuführen. Besteht der Verdacht einer partiellen Nervenschädigung, können die Faszikel einzeln neurographisch untersucht werden. Dabei wird für jeden Faszikel nach dem gleichen Prinzip entschieden, ob er reseziert oder erhalten wird. Es ist hervorzuheben, dass die NAP-Ableitung von Faszikeln eine hohe Zuverlässigkeit aufweist [12].

Kim und Mitarbeiter fanden bei Inkontinuitätsverletzungen des N. medianus, bei denen aufgrund eines vorhandenen NAP distal der Nervenläsion auf eine Resektion verzichtet wurde, in 95% der Fälle ein gutes postoperatives Ergebnis [2]. Entsprechend positiv sind auch die eigenen Erfahrungen.

Eine Frühoperation eines Nervenschadens ohne intraoperative Neurographie ist aufgrund der Ungewissheit der Qualität des Nervenparenchyms unbefriedigend. Unnötige Resektionen können nicht mit ausreichender Wahrscheinlichkeit vermieden werden. Unterschätzt man aufgrund des Aussehens des Nervs den Grad der Läsion und verzichtet fälschlicherweise auf die Resektion, wird das Ergebnis unbefriedigend sein. Der Verzicht auf Mittelungsverfahren bei dieser Methode soll verhindern, dass NAPs von geringer Qualität überbewertet werden.

Ein wesentlicher Vorteil der Frühoperation besteht im Zeitgewinn, was der Erhaltung des Muskels beim Eintreffen des Nervs im Fall einer Rekonstruktion zugute kommt. Wenn nur eine Neurolyse erforderlich ist, ist es von Vorteil, wenn diese nicht erst nach einem halben Jahr oder noch später, sondern bereits im frühen Stadium für bessere Regenerationsbedingungen sorgt.

Armplexusverletzungen

Bei schweren Armplexusverletzungen ist eine vollständige Wiederherstellung nicht möglich. Es muss versucht werden, durch eine optimal angepasste Operationsstrategie die begrenzte Anzahl noch verfügbaren Nervengewebes sinnvoll für rekonstruktive Massnahmen zu nutzen. Dazu gehört, dass zunächst geklärt werden muss, welche Spinalnerven noch an das Rückenmark Anschluss haben. Präoperativ weisen klinische Symptome, erhaltene sensible Nervenpotentiale und bildgebende Verfahren bereits mit Wahrscheinlichkeit auf Wurzelschäden hin. Letzte Sicherheit fehlt jedoch. Wenn ein Spinalnerv als «Nervenspender» bei einer Transplantatrekonstruktion verwendet wird, sollte seine morphologische und auch funktionelle Verbindung zum Rückenmark sichergestellt sein.

Intraoperative SEPs, die zervikal und kortikal als Antwort einer Spinalnervreizung dargestellt werden, haben sich, wenn man den Einfluss von Anästhetika beachtet, zur Wurzevaluation bewährt [10]. Wir benutzen neben den kortikalen SEPs auch die zervikale Ableitung evozierter Potentiale. Reizt man foramennah, können bei erhaltener Vorderwurzel MAPs von paravertebralen Muskeln neben spinalen evozierten Potentialen abgeleitet werden. Auch Muskelantworten wirbelsäulennaher Muskeln (M. serratus anterior, Mm. rhomboidei, M. levator scapulae) sind für die Beurteilung der Vorderwurzel hilfreich.

Ein intraoperativ abgeleitetes NAP bei präganglionärer Läsion ohne gravierende postganglionäre Schäden im betroffenen Plexussegment unterscheidet sich von einem regenerativen NAP durch eine normale Konfiguration, steilen Potentialanstieg, meistens relativ hohe Amplitude und kurze Dauer [4, 6] bei niedriger Erregungsschwelle. Bei vollständigem Funktionsverlust im entsprechenden Versorgungsgebiet ist ein weitgehend «normal» aussehendes Potential ein sehr zuverlässiges Merkmal einer präganglionären Läsion. Im Gegensatz zur präoperativen konventionellen Diagnostik kann man dieses Potential nun durch den Plexus verfolgen und einem Spinalnerv konkret zuordnen, was bei den Fingernervpotentialen, die für diese Fragestellung routinemässig präoperativ in Anspruch genommen werden, nicht möglich ist.

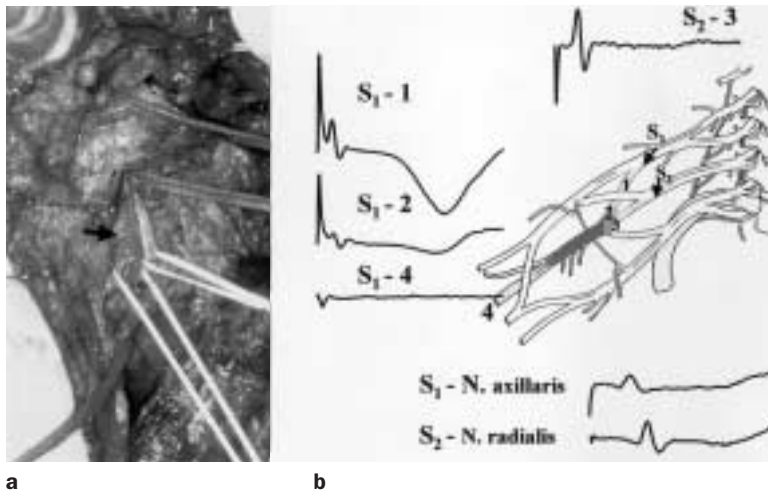
Der Nachweis einer präganglionären Läsion erspart die chancenlose Rekonstruktion von zugehörigen Plexussegmenten. Anstelle der Rekonstruktion wird für die wichtigsten Funktionen in diesem Fall die Neurotisation von Stammnerven durch Transfer eines gesunden Spendernervs durchgeführt. Der N. accessorius und Interkostal-

Abbildung 3 Plexusschaden mit vollständigem Ausfall des Versorgungsgebietes des Fasciculus posterior.

a) Verdickter, narbig veränderter Fasciculus posterior (Pfeil) neben einem normal aussehenden Faszikel.

b) Markierung der Läsion im Plexusschema mit Kennzeichnung der Stimulationsorte (S_1 und S_2) und der Ableitpositionen (1, 2, 3, N. axillaris und N. radialis [4]).

Konsequenz: Da sowohl der N. axillaris (über den Truncus superior) als auch der N. radialis (über den Truncus medius) Reinnervation aufwiesen, wurde eine Neurolyse durchgeführt und der Faszikel erhalten.



nerven werden am häufigsten benutzt. Andererseits sollte bei ausschliesslich postganglionärer Läsion und erhaltener Kontinuität von Nervenwurzeln zum Rückenmark nicht auf Transplantatrekonstruktionen vom Spinalnerv ausgehend verzichtet werden, wenn der Spinalnerv eine relevante Menge Neuriten enthält [6].

Plexusläsionen in Kontinuität, die bei schweren Traumen meistens multilokulär gefunden werden, werden nach dem oben geschilderten Prinzip der NAP-Ableitung beurteilt. Abbildung 3 zeigt die intraoperative Evaluation eines Plexusschadens bei einem 45jährigen Patienten, der wegen eines vollständigen Ausfalls des Fasciculus posterior fast 6 Monate nach einem Motorradunfall vorgestellt wurde. Die Operation ergab eine derbe Verdickung mit narbigen Veränderungen des Fasciculus posterior, die ohne Funktionsdiagnostik reseziert worden wäre. Nachdem die Neurographie jedoch zeigte, dass Axone aus dem Truncus medius in den N. radialis und aus dem Truncus superior in den N. axillaris eingewachsen waren, wurde nur eine Neurolyse durchgeführt und ein gutes Ergebnis erzielt.

Nervenrekonstruktion

Für eine Nervennaht oder eine Rekonstruktion durch Nerventransplantat ist die Anschlussstelle

an vitales Nervengewebe, von dem aus Neuriten in den distalen Stumpf einwachsen, von entscheidender Bedeutung. Auch hier gilt, dass die morphologische Beurteilung selbst unter Verwendung des Operationsmikroskopes trügerisch sein kann. Konventionell orientiert man sich an der Nervenumgebung, dem Epineurium, dem Querschnitt des Nerts, der eine intakte Faszikelstruktur zeigen sollte, und an dem pilzförmigen Vorquellen des Faszikelinhaltes beim Durchschneiden des Nerts. Diese Kriterien sind jedoch indirekt, da sie sich auf die Nervenüllen und nicht auf die Nervenfasern beziehen. Die NAP-Ableitung am proximalen Stumpf hingegen bietet die Möglichkeit, festzustellen, ob vitale Neuriten an der Anschlussstelle in relevanter Menge vorhanden sind [6] oder ob eine Resektion weiter proximal geeigneter ist. Neben den retrograden Veränderungen, die eine Schadstelle mit axonaler Degeneration bekanntlich mit sich bringen kann, spielen vor allem sekundäre Schäden, die bei besonders ungünstigen Belastungen des Nerts – z.B. bei Dehnungsschäden, Hitze oder Stromeinwirkung, Entzündungen oder Ischämie – vorkommen, eine Rolle.

Beitrag zur Pathophysiologie von Nervenläsionen

Tierexperimentelle Untersuchungen von operationsrelevanten Neuropathien sind vor allem wegen Unterschieden der anatomischen Verhältnisse kaum auf den Menschen übertragbar. Die intraoperative Elektrodiagnostik bietet daher eine gute Möglichkeit, Fragen zu evaluieren, die im Tierexperiment nicht vergleichbar nachvollzogen werden können, insbesondere da sie das operative Vorgehen nicht belasten und für die Operationsstrategie hilfreich sein können. Bei der noch geringen Verbreitung der intraoperativen Funktionsdiagnostik ist die Zahl der vorliegenden Untersuchungen zur Pathophysiologie von Nervenschäden noch gering. Zu erwähnen sind beispielhaft Untersuchungen zur Pathophysiologie von Nervenengpässen [8]. Von besonderem Interesse ist das Kompressionssyndrom des N. ulnaris am Ellenbogen, da das operative Vorgehen zwischen Dekompression und Ventralverlagerung noch immer kontrovers diskutiert wird. Eigene Untersuchungen sind in guter Übereinstimmung mit den Befunden von Brown und Veitch [8], die die häufigste und eindrucklichste Beeinträchtigung des N. ulnaris hinter der Spitze des Epicondylus medialis oder unmittelbar proximal davon gefunden haben und nur in Ausnahme-

fallen distal beim Eintritt in den kubitalen Tunnel. Wenn der Epicondylus medialis den Hauptschaden verursacht, liegt es nahe, von der Ventralverlagerung die wirksamste Entlastung zu erwarten. Campbell und Mitarbeiter [13] hoben umschriebene Engpässe beim Eintritt in den kubitalen Tunnel hervor und haben entsprechend differenzierte operative Massnahmen empfohlen.

Pathophysiologische intraoperative Untersuchungen haben auch ihren Platz im Einzelfall, wenn sich die präoperative Diagnose intraoperativ morphologisch nicht erhärten lässt. In diesen Fällen kann das Aufsuchen des Nervenschadens und die Identifizierung der Art der Läsion – Funktionsblock (uni- oder multilokulär) / Demyelinisierung / Ausmass einer axonalen Degeneration / unterschiedliche Faszikelbeteiligung – wertvolle diagnostische Informationen liefern.

Diskussion

Die intraoperative Elektrodiagnostik wurde vor mehr als 30 Jahren vor allem durch das Engagement von D. Kline und Mitarbeitern [3, 4, 9, 11] in die Nerven Chirurgie eingeführt. Anstoss waren histologische Nachuntersuchungen bei einer grossen Anzahl von Nervenverletzungen, die im zweiten Weltkrieg operiert wurden [14]. Sie haben gezeigt, dass Rückschlüsse vom morphologischen intraoperativen Befund auf die Qualität des Nervengewebes trügerisch sind. Nicht selten waren in Regeneration begriffene Nervensegmente bei Läsionen in Kontinuität unnötig reseziert worden. Inzwischen wird die Methode von einigen nerverenchirurgisch tätigen Kliniken mit unterschiedlichem Indikationsspektrum eingesetzt. Viele Indikationsbeispiele sind publiziert [4–7, 10–12], wobei einerseits der Wert des Monitorings [5], andererseits einzelne Indikationen der Nerven traumatologie [4, 6] oder pathophysiologische Untersuchungen [8] im Vordergrund stehen.

Die häufigste und auch nach unserer Meinung wichtigste Anwendung ist die Beurteilung einer erfolgten oder ausgebliebenen spontanen Regeneration einer Läsion in Kontinuität in der Nerven traumatologie. Sie ermöglicht die Frühoperation bereits nach 3–4, spätestens nach 6 Monaten. Im Einzelfall muss der Zeitpunkt in dieser Bandbreite mit allen individuellen Besonderheiten abgewogen werden. Spätere Operationen verschlechtern die Erfolgsaussicht eindeutig. Ist eine spontane Regeneration durch die Nervenschadestelle zu erkennen, erfolgt eine Neurolyse, die eine wesentliche Verbesserung der Regenerationschance, besonders im frühen Stadium, be-

wirken kann. Der Nerv wird ansonsten belassen. Ist keine spontane Regeneration – auch nicht nach Neurolyse und eventuell Kontrolle einzelner Faszikel – erkennbar, erfolgt die Resektion der Schadstelle mit anschliessender Rekonstruktion.

In mehrfacher Hinsicht ist die intraoperative Funktionsdiagnostik bei Operationen von Armplexusschäden vorteilhaft. Die Untersuchung der evozierten Potentiale zum Nachweis einer Kontinuität der Hinterwurzel mit Rückschlüssen auf die stattgehabte traumatische Belastung der Gesamtwurzel ist ein besonders wichtiger Beitrag zur optimalen Behandlung schwerer Armplexusverletzungen. Der Einwand, dass ein positives SEP den Zustand der Vorderwurzel offen lässt, wurde durch die Untersuchungen von Oberle und Mitarbeitern [15] relativiert. Diese Autoren haben einen wichtigen Beitrag zur Bewertung der intraoperativen SEPs geleistet, indem sie zwei Wochen vor der Plexusoperation den zervikalen Spinalkanal und die Nervenwurzeln revidiert haben. Alle SEPs von Spinalnerven, deren Wurzeln vollständig oder partiell rupturiert waren, fehlten intraoperativ. Selbst bei ausschliesslich rupturierter Vorderwurzel konnte kein SEP mehr abgeleitet werden. Dieser Befund überrascht nicht, da die Kräfte, die die Ruptur eines Teils einer Nervenwurzel bewirken, mit hoher Wahrscheinlichkeit auch den übrigen Anteil der Wurzel stark belasten.

Bei fehlendem SEP findet die Diagnose einer präganglionären Läsion bei fehlender postganglionärer Läsion des entsprechenden Nervenabschnittes eine Bestätigung durch erhaltene sensible Nervenpotentiale, die intraoperativ auch eine Zuordnung zu dem betroffenen Spinalnerven zulassen. Die Strategie von Armplexusrekonstruktionen profitiert ausserdem von der Beurteilung von Läsionen in Kontinuität und der Beurteilung der Qualität einer Nervenanschlussstelle bei Rekonstruktionen.

Die Elektrodiagnostik bei Plexusoperationen ist zeitaufwendig und beansprucht optimale Teamarbeit. Sie ist jedoch besonders lohnend, da sie hilft, die Möglichkeiten der Neurolyse, der Nerven transplantation und des Transfers unter Berücksichtigung der Qualität des Nervenparenchyms gegeneinander abzuwägen.

Der Einsatz der Elektrodiagnostik als ergänzendes Kriterium für eine geeignete Nervenkoaptationsstelle bei Rekonstruktionen erfordert besonders sorgfältigen Umgang mit dem Nerv bei der Präparation und adäquate Rezirkulation nach Blutsperrung. Sie ist ansonsten wenig zeitaufwendig und hat sich unter histologischer Kontrolle in der Synopsis mit anderen Kriterien, wie sie in der Nerven Chirurgie gefordert werden, bewährt [6].

Viele weitere Indikationen wie der Einsatz bei Nerventumoren, die selektive Beurteilung einzelner Faszikel bei einem partiellen Nervenschaden und der Einsatz der Elektrodiagnostik zum Schutz von Nervengewebe zeigen nur beispielhaft das grosse Spektrum der problemorientierten nützlichen Anwendung intraoperativer Nervenfunktionsdiagnostik. Voraussetzung ist, dass viele technische Besonderheiten und auch Besonderheiten der Interpretation bekannt sind und beachtet werden [6]. Erst die eingespielte Teamarbeit von Chirurgen und Neurologen macht einen flexiblen Einsatz möglich.

Schlussfolgerung: Die intraoperative Funktionsdiagnostik ergänzt die traditionell morphologisch orientierte Nerven Chirurgie in vorteilhafter Weise. Problemorientiert eingesetzt bietet sie viele Möglichkeiten, das Ergebnis von Nervenoperationen zu verbessern, gefährdetes Nervengewebe bei Operationen zu schützen und pathophysiologische Erkenntnisse über fokale Neuropathien zu gewinnen.

Literatur

- 1 Krarup C, Archibald SJ, Madison RD. Factors that influence peripheral nerve regeneration: an electrophysiological study of the monkey median nerve. *Ann Neurol* 2002;51:69–81.
- 2 Kim DH, Kam AC, Chandika P, Tiel RL, Kline DG. Surgical management and outcomes in patients with median nerve lesions. *J Neurosurg* 2001;95:584–94.
- 3 Kline DG, Hackett ER, May PR. Evaluation of nerve injuries by evoked potentials and electromyography. *J Neurosurg* 1969;31:128–36.
- 4 Kline DG, Hoppel LT. Penfield Lecture. A quarter century's experience with intraoperative nerve action potential recording. *Can J Neurol Sci* 1993;20:3–10.
- 5 Daube JR, Harper CM. Surgical monitoring of cranial and peripheral nerves. In: Desmedt JE, editor. *Neuro-monitoring in Surgery*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V. (Biomedical Division); 1989. p. 115–38.
- 6 Burg D, Infanger M, Meuli-Simmen C, Stallmach T, Beer G, Amgwerd S, et al. Methode, Indikationen und kritische Wertung der intraoperativen Nervenfunktionsdiagnostik. *Handchir Mikrochir Plast Chir* 2002;34:1–14.
- 7 Slimp JC. Intraoperative monitoring of nerve repairs. *Hand Clin* 2000;16:25–36.
- 8 Brown WF, Veitch J. Intraoperative monitoring of peripheral and cranial nerves. *Muscle Nerve* 1994;17:371–7.
- 9 Tiel RL, Hoppel LT Jr, Kline DG. Nerve action potential recording method and equipment. *Neurosurgery* 1996;39:103–8.
- 10 Sugioka H. Evoked potentials in the investigation of traumatic lesions of the peripheral nerve and the brachial plexus. *Clin Orthop* 1984;184:85–92.
- 11 Kline DG, Nulsen FE. The neuroma in continuity. Its pre-operative and operative management. *Surg Clin North Am* 1972;52:1189–209.
- 12 Williams HB, Terzis JK. Single fascicular recordings: an intraoperative diagnostic tool for the management of peripheral nerve lesions. *Plast Reconstr Surg* 1976;57:562–9.
- 13 Campbell WW, Sahni SK, Pridgen RM, Riaz G, Leshner RT. Intraoperative electroneurography: management of ulnar neuropathy at the elbow. *Muscle Nerve* 1988;11:75–81.
- 14 Woodhall B, Nulsen FE, White JC, Davis L. Neurosurgical implications. In: Woodhall B, Beebe GW, editors. *Peripheral nerve regeneration: a follow-up study of 3656 World War II injuries*. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office; 1956. p. 569–642.
- 15 Oberle J, Antoniadis G, Rath SA, Seitz K, Schneider O, Braun V, et al. Radiological investigations and intraoperative evoked potentials for the diagnosis of nerve root avulsion: evaluation of both modalities by intradural root inspection. *Acta Neurochir (Wien)* 1998;140:527–31.