

Mikrochirurgie peripherer Nerven

Inhalt

12.1	Allgemeines	000
12.1.1	Chirurgisch relevante Anatomie	000
12.1.1.1	Bindegewebige Anteile	000
12.1.1.2	Nervale Anteile	000
12.1.1.3	Vaskularisation	000
12.1.2	Operationszeitpunkt	000
12.1.3	Postoperative Behandlung und Nachsorge	000
12.2	Spezielle Operationstechniken	000
12.2.1	Eingriffe bei erhaltener Kontinuität	000
12.2.1.1	Neurolyse	000
12.2.1.2	Adjuvante Eingriffe	000
12.2.2	Eingriffe bei Kontinuitätsunterbrechung	000
12.2.2.1	Bereitung der Stümpfe	000
12.2.2.2	Approximation der Stümpfe	000
12.2.2.3	Koaptation (Neurorrhaphie)	000
12.2.2.4	Wiederherstellung der Nervenkontinuität ohne Defektzustände	000
12.2.2.5	Wiederherstellung der Nervenkontinuität bei Defektzuständen	000
12.2.3	Fehler und Gefahren	000
Literatur		000

12.1 Allgemeines

Im Unterschied zur Mikrochirurgie der Gefäße, wo der chirurgische Erfolg sofort nach der Operation mittels Durchgängigkeitsprüfung der Anastomose beurteilt werden kann, ist der definitive Erfolg in der peripheren Nerven Chirurgie nicht unmittelbar nach Beendigung entweder einer primären Nerven naht oder einer Nerven transplantation kontrollierbar. Gerade deshalb muss besonders darauf geachtet werden, dass bei der peripheren Nerven Chirurgie keine wie immer gearteten Kompromisse eingegangen werden.

! Absolute Voraussetzung für den Erfolg der peripheren Nerven naht – unabhängig davon, ob die Rekonstruktion durch eine primäre Naht oder durch eine Nerven transplantation erfolgt – ist das Vorliegen spannungsfreier Verhältnisse im Koaptationsbereich.

Da intraoperativ eine direkte Nervenstimulation notwendig ist, um eine Nervenläsion (genauer bei Neurolyse) zu diagnostizieren, dürfen während der (IT-)Narkose keine relaxierenden Medikamente eingesetzt werden. Für eine für die Intubation notwendige Relaxierung sollte nur die niedrigste Dosis gewählt werden. Eine Absprache mit der Anästhesie ist unerlässlich.

12.1.1 Chirurgisch relevante Anatomie

Für die exakte Beschreibung der verschiedenen Operationstechniken am peripheren Nerv ist eine einheitliche Benennung der verschiedenen anatomischen Strukturen des peripheren Nervs notwendig: Der periphere Nerv setzt sich aus nervalen und bindegewebigen Anteilen zusammen. Blut- und Lymphgefäße verlaufen im Bindegewebe.

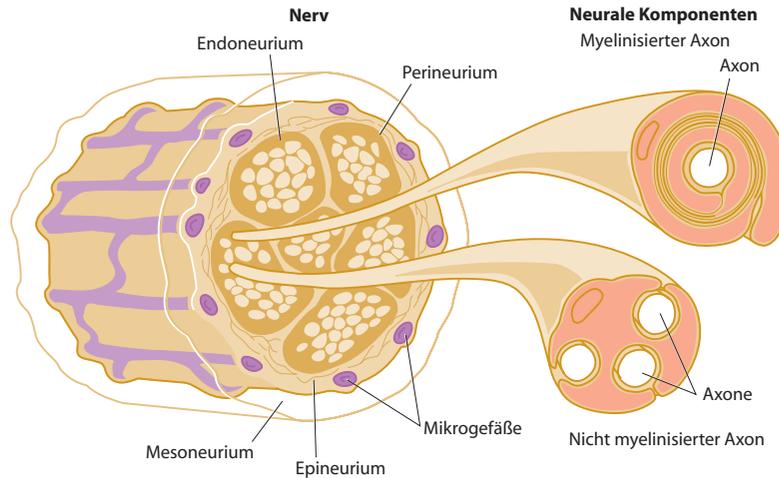


Abb. 12.1. Querschnittsanatomie des peripheren Nervis

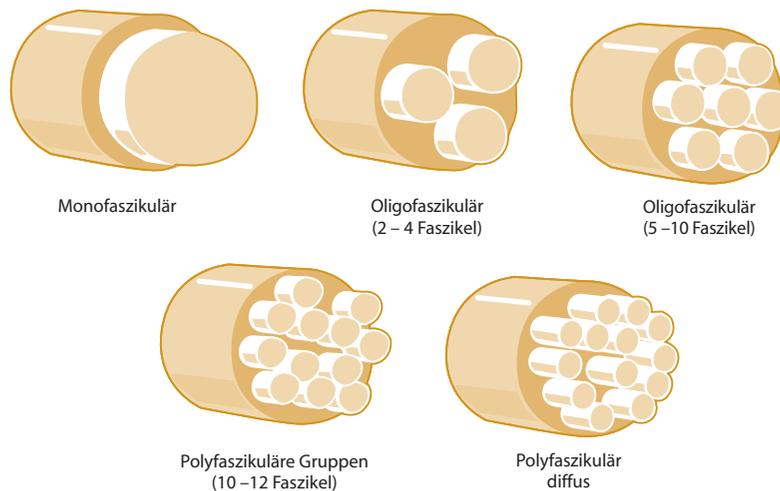


Abb. 12.2. Klassifikation des peripheren Nervis in Abhängigkeit von Anzahl und Anordnung seiner Faszikel

12.1.1.1 Bindegewebige Anteile

Folgende bindegewebige Strukturen werden unterschieden: Der periphere Nerv ist in eine adventitielle bindegewebige Schicht, das Paraneurium oder Mesoneurium, eingebettet. Diese zeigt fließende, ineinander übergreifende Verbindungen in das darunter liegende, den peripheren Nerv in seiner Gesamtheit umgebende Epineurium. Bei den peripheren Nerven unterscheidet man ein äußeres und ein inneres Epineurium, das zwischen die einzelnen Faszikelgruppen hineinreicht. Das Perineurium umhüllt die Faszikel, während das Endoneurium die einzelnen Nervenfasern umschließt. Die Handhabung des peripheren Nervis darf nur durch Anfassens des Epi- oder Perineuriums erfolgen (Abb. 12.1).

In Abhängigkeit von der Anzahl und Anordnung der Faszikel in einem peripheren Nerv werden 3 Grundtypen unterschieden (Abb. 12.2):

- monofaszikulärer Nerv,
- oligofaszikulärer Nerv,
- polyfaszikulärer Nerv.

Diese Einteilung ist bedeutsam für die Wahl der Koaptationstechnik (trunkulär vs. interfaszikulär) und Nahttechnik (epineural vs. epiperineural).

Nervenstämmen zeigen einen kabelartigen Aufbau. Dieser ist charakterisiert durch plexusartige Verbindungen der einzelnen Nervenfaszikel. Hierdurch wird

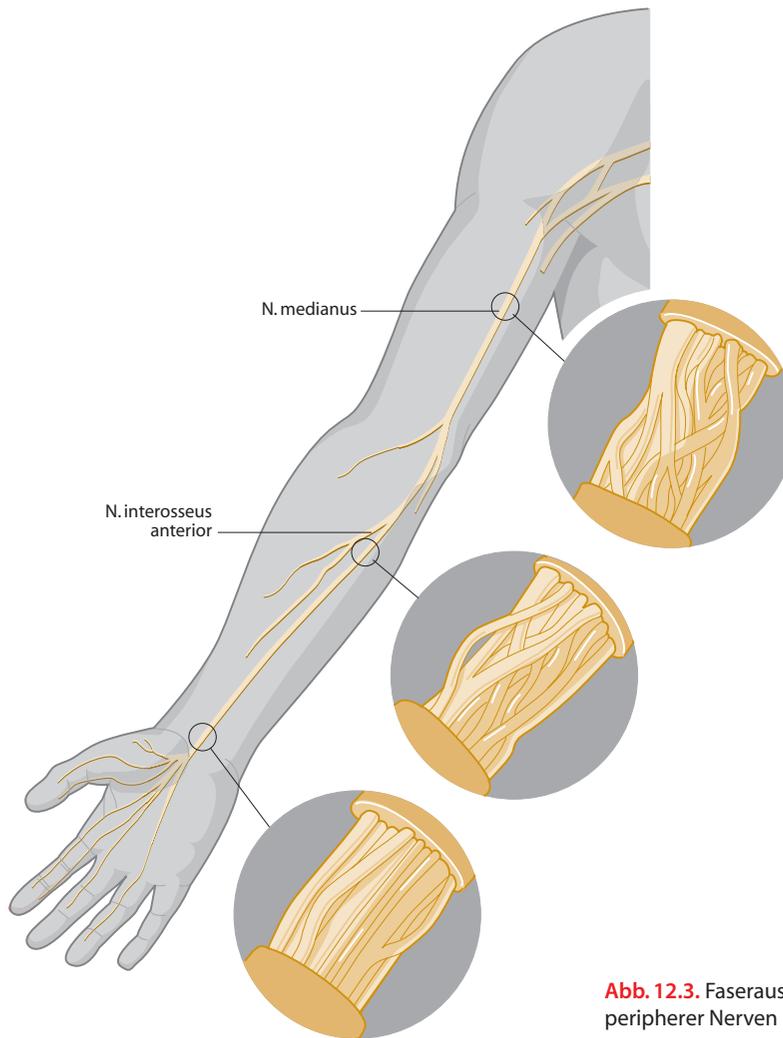


Abb. 12.3. Faseraustausch im Verlauf peripherer Nerven (distale Plexusbildung)

ermöglicht, dass einzelne Faserbündel ihre Position im Inneren des Nervenstammes ändern können, um trotz unterschiedlicher Herkunft ein gemeinsames Innervationsgebiet zu erreichen. Größere oder kleinere Fasergruppen wechseln von einem Faszikel in einen anderen hinüber, kehren teilweise auf einer anderen Höhe wieder in ihren vormaligen Faszikel zurück oder bauen neue Fasergruppen auf, wobei der Sinn dieses ständigen Faserwechsels nicht immer zu erkennen ist. Der dauernde Wechsel des Faszikelmusters im Verlauf eines Nervs führt dazu, dass ein bestimmtes Querschnittsbild des Nervs sich höchstens über eine Strecke von 0,6–6 mm verfolgen lässt (Abb. 12.3).

Diese innere Plexusbildung ist nicht seitenkongruent und auch nicht für den gleichen Nerv bei verschiedenen Individuen konstant. Eine sozusagen gesetzmäßige innere Topographie der Nervenstämme besteht daher nicht. Trotzdem können auf verschiedenen Höhen na-

türlich topographische Studien von Nerven durchgeführt werden, die jedoch nur anhaltswise exakte Funktionszuordnungen ermöglichen. Erschwerend kommt hinzu, dass durch den plexusartigen Aufbau und damit den gewundenen Verlauf der Nervenfaserbündel in den Nervenstämmen auf einem anderen Niveau ein Austausch von Faszikeln vorgetäuscht werden kann, ohne dass wirklich Abzweigungen stattgefunden haben. Der plexusartige Aufbau der Nerven hat wahrscheinlich vielmehr auch den Vorteil der besseren Kompensation der mechanischen Scher- und Dehnungs- sowie Biege- und Kompressionskräfte.

Für den klinischen Gebrauch wichtig ist die Unterscheidung in Zonen mit hoher Austauschrate (z. B. proximaler Oberarm, Ellenbogenbereich) und Zonen mit geringer Austauschrate (z. B. distaler Unterarmbereich).

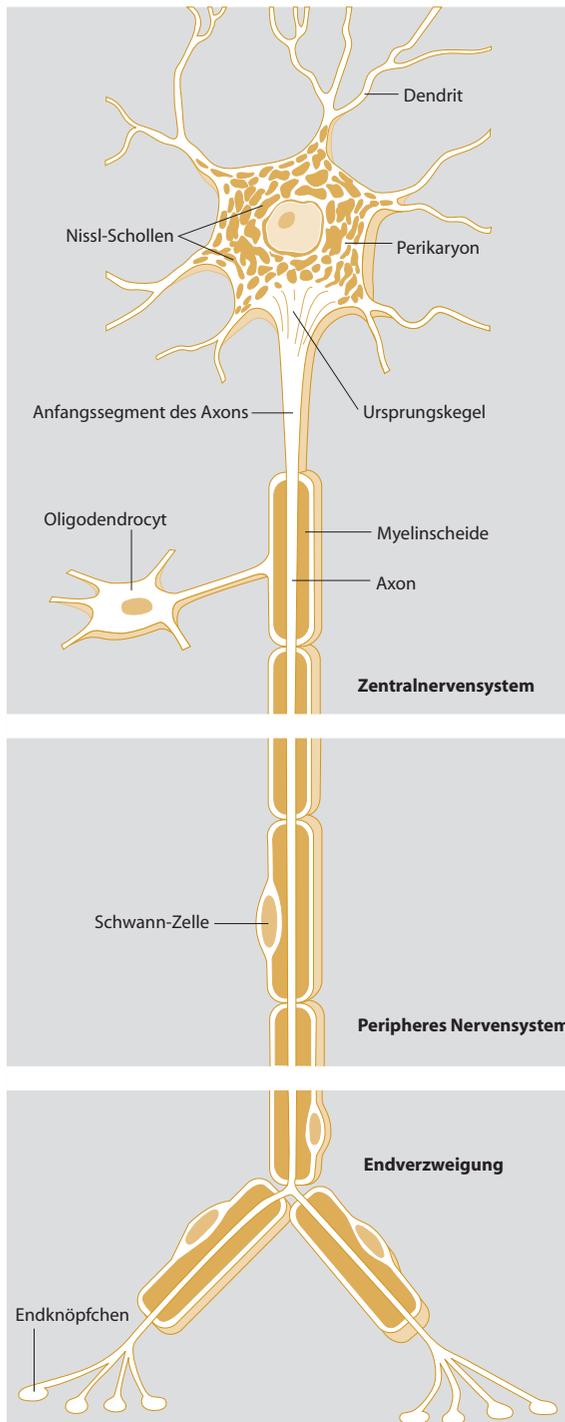


Abb. 12.4. Aufbau der Nervenfasern

12.1.1.2 Nervale Anteile

Die eigentliche Nervenfasern besteht aus dem Axon, einem bis zu 1 m langen Fortsatz einer Nervenzelle, deren Perikaryon z. B. im Rückenmark oder im Spinalganglion liegt, und einer dieses Axon umscheidenden Hülle. Bei marklosen Nervenfasern wird das Axon vom Zytoplasma der Hüllzellen, bei markhaltigen Nervenfasern von der Markscheide umgeben. Die Markscheide besteht aus Myelin, einem Lipoprotein, das von den Hüllzellen gebildet wird. Im Fall der peripheren Nerven sind es die Schwann-Zellen. In regelmäßigen Abständen (1–3 mm) wird die Markscheide durch tiefe Einschnürungen, die sog. Ranvier-Knoten, unterbrochen, wobei der Abschnitt zwischen 2 Knoten, das sog. Internodium, der Ausdehnung einer Hüllzelle entspricht. Das Axon verläuft von seinem Perikaryon bis zu den Endorganen ohne Kontinuitätsunterbrechung und teilt sich meist erst im distalen Abschnitt in zahlreiche Kollateralen auf.

Zwischen dem Umfang eines Axons, der Dicke der Markscheide, dem Abstand der Ranvier-Knoten und der Leitgeschwindigkeit eines Nervs bestehen gesetzmäßige Beziehungen. Je größer der Umfang eines Axons ist und je dicker die ihn umgebende Markscheide, umso länger sind die Internodien. Je länger die Internodien sind, desto schneller ist die elektrische Leitgeschwindigkeit der Faser. Wenn z. B. bemerkte Nervenfasern noch wachsen, wie z. B. bei Extremitätennerven, so vergrößert sich auch die Länge der Internodien (Abb. 12.4).

Insgesamt unterscheidet man markhaltige, markarme und marklose Nervenfasern, die auch als A-, B- und C-Fasern bezeichnet werden. Die markhaltigen A-Fasern haben einen Axondurchmesser von 3–20 μm und eine Leitgeschwindigkeit von bis zu 120 m/s. Die markarmen B-Fasern zeigen nur noch einen Durchmesser bis zu 3 μm und eine Leitgeschwindigkeit bis zu 15 m/s, und am langsamsten verläuft die Erregung in den marklosen Fasern mit nur ca. 2 m/s (Tabelle 12.1).

Bei den marklosen Fasern erfolgt die Erregungsausbreitung kontinuierlich und dadurch deutlich langsamer als in den markhaltigen Nerven. Diese sind durch eine saltatorische, d. h. sprunghafte Erregungsleitung gekennzeichnet. Die morphologische Grundlage der saltatorischen Erregungsleitung ist der Wechsel von markhaltigen Internodien mit nackten Ranvier-Knoten. Der Strom springt hier intraaxonal von einem Knoten zum nächsten, wobei am Knoten durch Permeabilitätsänderung der Axonmembran jedes Mal der Stromkreis geschlossen wird. Diese Fortleitung ist damit wesentlich schneller und verbraucht weniger Energie als die kontinuierliche Ausbreitung der Erregung.

Tabelle 12.1. Dicke und Funktion der verschiedenen Nervenfasern

Durchmesser [μm]	Leitungsgeschw. [ms]	Bezeichnung	
		Buchstaben	Ziffern
12–20	70–120	A α	Ia, Ib
5–15	30–70	β	II
2–10	15–30	γ	
1–7	12–30	δ	III
<3	3–15	B	
0,3–1,3	0,7–2,3	C	IV

A: α Nervenfasern für extrafusale Muskelfasern (die dickeren für „schnelle“, die dünneren für „langsame“);
 β Fasern, die „langsame“ extrafusale Muskelfasern innervieren und Kollaterale zu intrafusalen Muskelfasern abgeben;
 γ Fasern, die intrafusale Muskelfasern innervieren.
B: Präganglionäre autonome (markhaltige Fasern).
C: Postganglionäre autonome (marklose) Fasern.
Ia: Fasern von primären sensiblen Endigungen an Muskelspindeln;
Ib: Fasern von Sehnenspindeln.
II: Fasern von sekundären sensiblen Endigungen an Muskelspindeln; Fasern von sensiblen Nervenendigungen der Haut.
III: Fasern, die Schmerz- und Temperaturempfindungen und andere sensible Qualitäten leiten.
IV: Schmerzleitende Fasern von Eingeweiden und anderen Körperstellen (marklos).

12.1.1.3 Vaskularisation

Die Kenntnis der Vaskularisation der peripheren Nerven ist für jeden Eingriff (vor allem für die mikrochirurgische Neurolyse) von größter Bedeutung. Die Vaskularisation erfolgt über ein inneres Gefäßplexussystem, das aus einem epineuralen, perineuralen und endoneuralen Gefäßplexus besteht und von mehreren äußeren Zuflüssen versorgt wird. Beide Systeme können bis zu einem gewissen Grad Funktionsstörungen des anderen kompensieren.

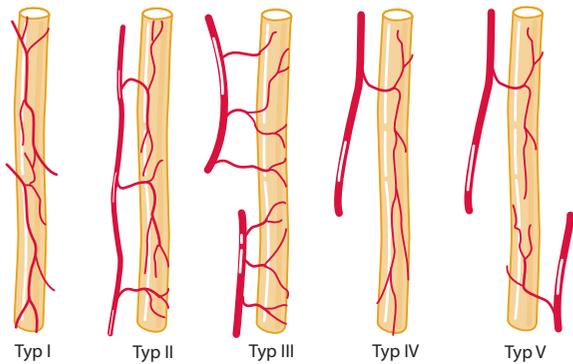
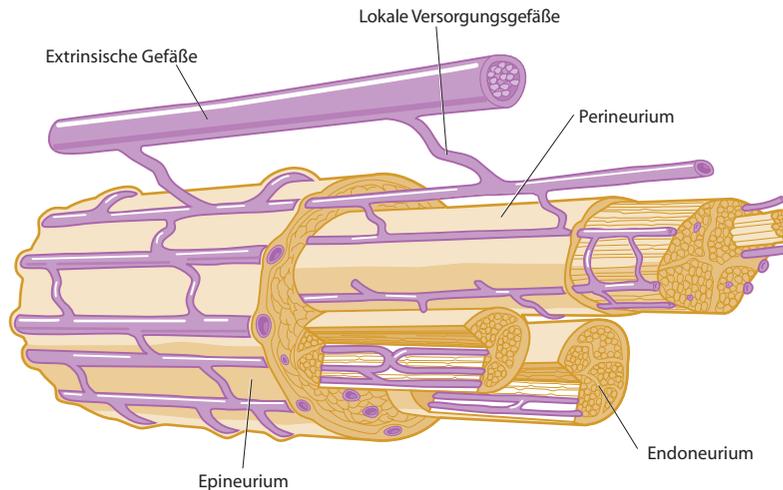
Das charakteristische Bild des epineuralen Gefäßplexus zeigt große longitudinal angeordnete Arteriolen und Venolen, die zahlreiche segmentale Äste zu den umliegenden Faszikeln abgeben. Über diese Äste werden reichhaltig Anastomosen mit dem perineuralen System ausgebildet. Diese perineuralen Gefäße verlaufen longitudinal im perineuralen Gewebe. Nach einem mehr oder weniger langen geraden Verlauf geben sie charakteristischerweise schräg verlaufende Äste ab, welche die perineurale Membran durchziehen und in den endoneuralen Raum eintreten, wo sie mit Ästen des endoneuralen Plexus anastomosieren.

Nach Lundborg bilden das perineurale und endoneurale Gefäßsystem zusammen eine gut definierte Gefäß-

einheit, die der anatomischen Einheit der „gruppierten Faszikel“ nach Millesi entspricht. Der endoneurale Gefäßplexus besteht aus Arteriolen, Kapillaren und Venolen, die charakteristischerweise longitudinal angeordnet sind und von Zeit zu Zeit in unterschiedlicher Höhe Schleifen bilden. Aufgrund des großen Gefäßkalibers und der hohen Kapillardichte können Änderungen der Gefäßperfusion ausgezeichnet kompensiert werden (Abb. 12.5).

Nach Anzahl und Bedeutung der extern makroskopisch sichtbaren Gefäße des peripheren Nervs werden nach Breidenbach und Terzis drei verschiedene externe Versorgungstypen unterschieden (Abb. 12.6):

- Typ I beschreibt Nerven ohne dominanten externen Gefäßstiel. Die externe Versorgung erfolgt über segmentale Äste aus der Umgebung.
- Beim Typ II versorgt ein dominanter Gefäßstiel einen Großteil des peripheren Nervs. Der restliche Anteil erhält segmentale Zuflüsse aus der Umgebung, kann aber auch über das innere Gefäßplexussystem ausreichend versorgt werden (z. B. vaskularisiertes N.-ulnaris-Transplantat).
- Nerven des Typs III haben multiple dominante äußere Gefäßstiele (z. B. R. superficialis N. radialis).



▲ **Abb. 12.5.** Das innere Gefäßplexussystem der peripheren Nerven. (Mod. nach Lundborg [4])

◀ **Abb. 12.6.** Klassifikation der externen Blutversorgung des peripheren Nervs nach Breidenbach und Terzis

12.1.2 Operationszeitpunkt

Liegt zum Zeitpunkt der Nervenläsion kein Nervendefekt vor, dann sollte – vorausgesetzt der Allgemeinzustand des Patienten erlaubt es – wenn immer möglich eine spannungsfreie primäre Nervennaht (primäre Nervenrekonstruktion) durchgeführt werden. Bei komplexen Knochen-Weichteil-Schäden mit starker Fibrosierung im Koaptationsbereich ist eine engmaschige Nachuntersuchung notwendig, um bei inadäquater Regeneration innerhalb der ersten 3–6 Monate eine frühsekundäre Nervenrekonstruktion durchzuführen.

Liegt zum Zeitpunkt der Nervenläsion ein Nervendefekt vor, erfolgt die Versorgung der Nervenläsion in der Regel sekundär nach 3 bis maximal 6 Monaten („früh sekundäre Nervenrekonstruktion“). Zu diesem Zeitpunkt sind mitbestehende Muskel-Sehnen- und/oder Knochenläsionen konsolidiert und das wirkliche Ausmaß der Nervenschädigung (vor allem bei Avulsions- oder Quetschtraumata) kann deutlich besser beurteilt werden (sekundäre Nervenrekonstruktion). Da die

funktionellen Ergebnisse nach sekundärer Nervenwiederherstellung >6 Monate („spät sekundäre Nervenrekonstruktion“) nach Unfall, aufgrund einer Endorganschwäche in den reinnervierten Muskeln deutlich schlechter werden, muss die nervale Rekonstruktion Priorität gegenüber sekundären traumatischen Eingriffen haben. Eine nervale Rekonstruktion mit dem Ziel der Verbesserung der Motorik sollte abhängig von der Entfernung zwischen Läsionshöhe und Muskel nicht später als 12 (große Distanz), maximal 18 Monate (kleine Distanz) durchgeführt werden. Soll nur eine Verbesserung der (protektiven) Sensibilität erreicht werden, so kann eine nervale Rekonstruktion auch nach 24–36 Monaten noch durchgeführt werden.

Nur ausnahmsweise wird primär eine Nervenrekonstruktion durchgeführt, wenn Nervenrekonstruktion aus einem nicht mehr zu rekonstruierenden Körperabschnitt verwendet werden kann („Gewebebankkonzept“).

12.1.3 Postoperative Behandlung und Nachsorge

Vor dem Wundverschluss ist eine sorgfältige Blutstillung anzustreben. Der Wundverschluss erfolgt schichtweise. Die unmittelbare Schicht oberhalb der Koaptation sollte vom Operateur selbst genäht werden. Als Drainage wird ein Easy Flow, abseits der Koaptationsstelle, eingebracht. Sonst übliche Redon-Drainagen sind aufgrund ihrer Sogwirkung kontraindiziert. Bei allen mikrochirurgischen Nervennähten ist eine postoperative Ruhigstellung für 10 Tage obligat. Beim Säubern des Wundgebietes sowie bei Verbandswechseln innerhalb der ersten 10 Tage ist darauf zu achten, dass keine Scherkräfte im Koaptationsbereich auftreten.

Bei Läsionen peripherer Nerven spielt die adäquate Nachbehandlung eine entscheidende Rolle. Deshalb sollten Sehnen- und/oder Gelenkeingriffe nicht gleichzeitig durchgeführt werden. Uneingeschränkte Belastungsstabilität im Bereich der Nervennaht besteht nach 3–6 Wochen. Ein intensives physiotherapeutisches Therapieprogramm mit Ergotherapie (Schielen, Sensibilisierung/Desensibilisierung) und Krankengymnastik ist notwendig.

12.2 Spezielle Operationstechniken

Die rekonstruktiven Eingriffe am peripheren Nerv können unterteilt werden in Eingriffe bei erhaltener Kontinuität – entsprechend den Sunderland-Läsionen (I, II) III und IV – und Eingriffe bei Kontinuitätsunterbrechung – entsprechend Sunderland V.

12.2.1 Eingriffe bei erhaltener Kontinuität

12.2.1.1 Neurolyse

Die Neurolyse ist indiziert bei Läsion ohne Kontinuitätsunterbrechung (z. B. Kompressionssyndrom) und bei Läsionen mit Kontinuitätsunterbrechung im Rahmen der Stumpfvorbereitung.

Im Falle einer Läsion ohne Kontinuitätsunterbrechung ist es wichtig, darauf hinzuweisen, dass das tatsächliche Ausmaß der Schädigung erst während der mikrochirurgischen Exploration durch differenzierte intraoperative Diagnostik bestimmt werden kann. Deshalb muss jeder Patient, bei dem eine Neurolyse geplant ist, auch über die Notwendigkeit einer möglichen Nerventransplantation – bei Vorliegen einer höhergradigen Nervenläsion – aufgeklärt sein (wichtiger medikolegaler Aspekt).

Jede noch so kunstgerecht durchgeführte mikrochirurgische Neurolyse führt zu einer Beeinträchtigung der

externen und internen Blutversorgung des peripheren Nervs. Der Benefit der Neurolyse, die Dekompression des Nervs für eine Verbesserung der Vaskularisation (auf lange Sicht) und Funktion, muss deshalb der Schädigung des Gewebes durch Operation mit weiterer akuter Reduktion der Durchblutung überwiegen. Um eine minimale iatrogene Schädigung zu bewirken, muss jede Neurolyse mit feinen mikrochirurgischen Instrumenten durchgeführt werden. Für alle Operationen an peripheren Nerven ist zumindest eine Lupenbrille, besser das Operationsmikroskop, notwendig.

Für die Klassifikation der intraoperativen Befunde bei mikrochirurgischer Neurolyse eines peripheren Nervs verwenden wir die Klassifikation nach Millesi [6]. Diese Klassifikation basiert auf der Beschreibung der anatomischen Veränderungen um und innerhalb eines peripheren Nervs sowie auf den Ergebnissen der direkten intraoperativen Nervenstimulation. Die operativen Schritte sind genau definiert und werden der individuellen Situation genau angepasst (Tabelle 12.2).

Als *externe Neurolyse* bezeichnet man die Präparation des peripheren Nervs aus seinem umliegenden Gewebe, wobei die Präparationschicht auf dem Paraneuri-

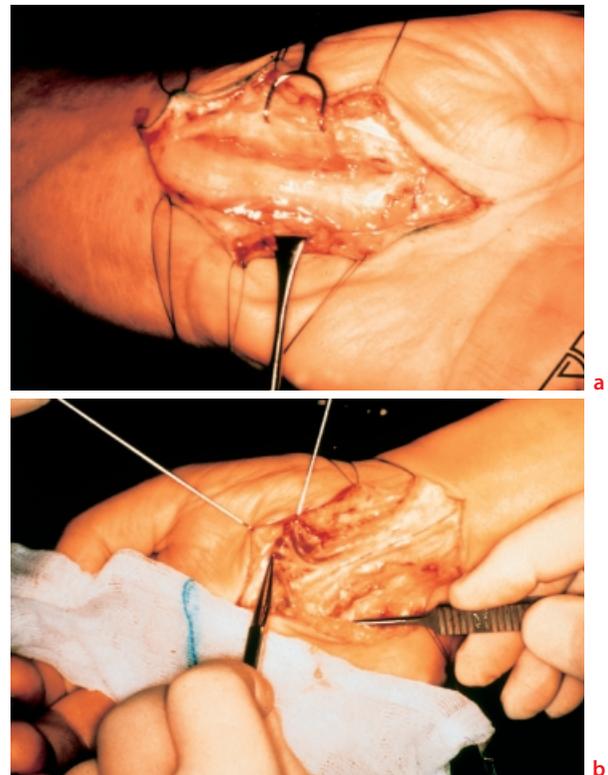
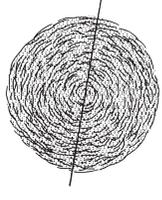
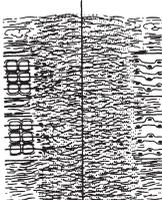
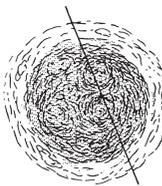
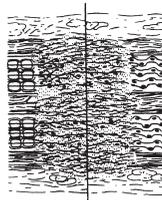
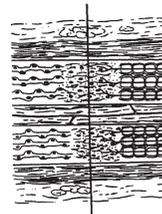
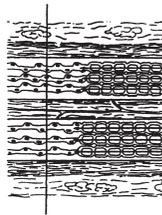
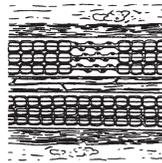
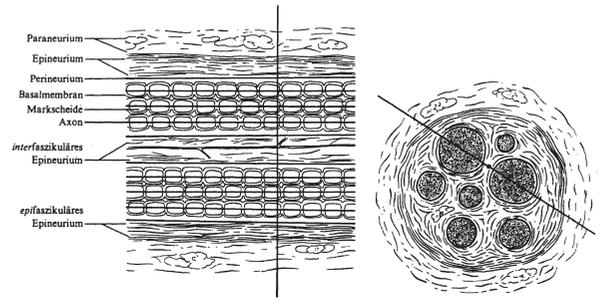


Abb. 12.7 a, b. Mikrochirurgische epifasziale Epineurotomie bei einem schweren Karpaltunnelsyndrom. **a** Klinischer Aspekt vor Neurolyse (sanduhrförmige Einengung im Bereich der Kompression); **b** klinischer Aspekt nach Neurolyse (frei expandierende Faszikelgruppen)



Einteilung bez. Kontinuität (1–5 nach Sunderland)

Einteilung bez. Reaktion (A, B, C, N, S)

1	Leitfähigkeit verloren, Kontinuität der Axone erhalten	–
1A	Leitfähigkeit verloren, Kontinuität der Axone erhalten	Fibrose des epifaszikulären Epineuriums (A)
1B	Leitfähigkeit verloren, Kontinuität der Axone erhalten	Fibrose des interfaszikulären Epineuriums (B)
2	Axonolyse, Endoneurium intakt	–
2A	Axonolyse, Endoneurium intakt	Fibrose des epifaszikulären Epineuriums (A)
2B	Axonolyse, Endoneurium intakt	Fibrose des interfaszikulären Epineuriums (B)
3	Axonolyse, Endoneurium zerstört, Perineurium intakt	–
3A	Axonolyse, Endoneurium zerstört, Perineurium intakt	Fibrose des epifaszikulären Epineuriums (A)
3B	Axonolyse, Endoneurium zerstört, Perineurium intakt	Fibrose des interfaszikulären Epineuriums (B)
3C	Axonolyse, Endoneurium zerstört, Perineurium intakt	Fibrose auch des Endoneuriums (C)
4N	Kontinuität nur durch BG aufrechterhalten	Narbe von Neurom durchwachsen (N)
4S	Kontinuität nur durch BG aufrechterhalten	Nur Narbe zwischen den Stümpfen (S)
5	Kontinuität verloren	Je nach Schaden der Stümpfe

Tabelle 12.2. Klassifikation der intraoperativen Befunde nach Neurolyse bei Läsionen ohne Kontinuitätsunterbrechung. (Nach Millesi [6])

Aussicht auf spontane Regeneration	Diagnose	Therapie
Sehr gut	Elektr. Leitfähigkeit der NF trotz Lähmung peripher erhalten	Keine
Gut nach D	Elektr. Leitfähigkeit der NF trotz Lähmung peripher erhalten	Epineuriotomie
Gut nach D	Elektr. Leitfähigkeit der NF trotz Lähmung peripher erhalten	Partielle Epineuriektomie
Sehr gut	Keine elektr. Leitfähigkeit; spontane Regeneration	Keine
Gut nach D	Keine elektr. Leitfähigkeit; spontane Regeneration	Epineuriotomie
Gut nach D	Keine elektr. Leitfähigkeit; spontane Regeneration	Partielle Epineuriektomie
Vorhanden	Operation	Keine
Vorhanden nach D	Operation	Epineuriotomie
Vorhanden nach D	Operation	Partielle Epineuriektomie
Keine	Operation	Resektion und NT
Schlecht	Operation	D durch NL oder
Keine	Operation	Resektion und NT
Keine	Operation	Anfrischung und NR oder NT

BG = Bindegewebe, D = Dekompression,
 NF = Nervenfasern, NL = Neurolyse,
 NR = Neurorrhaphie, NT = Nerven-
 transplantation.

um verläuft. Zeigt sich keine Veränderung des Epineuriums, dann sind keine weiteren operativen Schritte notwendig. Liegen jedoch Veränderungen des Nervenumfangs (z.B. sanduhrförmige Einziehung) vor, so sind weitere operative Maßnahmen indiziert.

Alle operativen Schritte, die das Epineurium oder tiefer gelegene Strukturen betreffen, werden unter dem Begriff *interne Neurolyse* zusammengefasst. Zur Auflösung der klassischen „sanduhrförmigen Einziehung“ im Bereich einer Kompressionsstelle erfolgt zunächst eine longitudinale Inzision von Paraneurium und Epineurium (epifasziale Epineurotomie). Können sich alle Faszikel(gruppen) frei ausbreiten, liegt eine Fibrose des Grades A nach Millesi vor. Eine weitere mikrochirurgische Intervention ist nicht mehr notwendig (Abb. 12.7).

Kommt es zu keiner kompletten Expansion der Faszikel(gruppen), muss eine Fibrose zwischen den Faszikel(gruppen) angenommen werden. Als nächster intraoperativer Schritt erfolgt die Epineurektomie, wobei diese nicht komplett zirkumferenziell durchgeführt werden soll, um eine unnötige Beeinträchtigung der Vaskularisation des Nerven zu vermeiden. Kann eine freie Expansion der Faszikel(gruppen) erreicht werden, sind weitere mikrochirurgische Operationsschnitte nicht mehr notwendig.

Bei weiter bestehender Kompression der Faszikel(gruppen) kann eine mikrochirurgische Resektion des Bindegewebes zwischen den Faszikeln notwendig werden. Dieser Schritt wird als *interfaszikuläre Epineurektomie* bezeichnet. Es muss ausdrücklich darauf hingewiesen werden, dass die interfaszikuläre Epineurektomie zu einer Beeinträchtigung der Blutversorgung führt und dass im Rahmen der normalen Wundheilung nach Neurolyse erneut Narbengewebe zwischen den Faszikel(gruppen) liegen wird. Ziel der interfaszikulären mikrochirurgischen Neurolyse ist nicht die Separation aller Faszikel voneinander, sondern deren möglichst freie Expansion. Die interfaszikuläre Neurolyse ist indiziert ab einem Fibrosegrad B II nach Millesi [6]. In einigen Fällen kann das Faszikelmuster erhalten sein, jedoch sind die Faszikel fibrotisch verändert, gewellt und/oder induriert. Falls bei intraoperativer Nervenreizung keine adäquate Reaktion ausgelöst werden kann, sollten diese veränderten Abschnitte „bis ins Gesunde“ reseziert und sofort eine interfaszikuläre Nerventransplantation durchgeführt werden.

In anderen Fällen können Abschnitte vorliegen, die ihre Faszikelstruktur verloren haben (Neuroma in continuitatem). Hier liegt eine Schädigung im Stadium III–IV vor. Bei Grad-IV-Läsionen ist zu unterscheiden, ob eine adäquate Antwort auf intraoperative direkte Nervenstimulation erzielt werden kann oder nicht. Bei adäquater Reizantwort erfolgt keine weitere operative Maßnahme. Bei inadäquater oder fehlender Antwort wird die Indikation zur interfaszikulären Nerventransplantation gestellt.

Abb. 12.8 a–f. Ulnodorsale Fasziolenplastik zur Abpolsterung des N. medianus nach interfaszikulärer Neurolyse im Handgelenkbereich. **a** Anatomie und Lappenplanung (Schema), **b** intraoperativer Aspekt (Schema); **c–f** postoperativer klinischer Aspekt: **c** palmar, **d** ulnar, **e, f** Funktion

12.2.1.2 Adjuvante Eingriffe

Adjuvante Eingriffe nach Neurolyse sind Nerventransposition (z.B. Ventralverlagerung des N. ulnaris bei schwerer Kompression im Bereich des Sulcus N. ulnaris) oder Deckung des Neurolysebereiches mit Hilfe von Lappenplastiken (Abb. 12.8). Die intraoperative Applikation von Substanzen, die die postoperative Bindegewebsbildung hemmen sollen, ist beschrieben, hat sich in unseren Händen jedoch nicht bewährt.

Die Ziele der adjuvanten Eingriffe können wie folgt angegeben werden:

- Reduktion der erneuten Bindegewebsbildung im Rahmen der Wundheilung auf ein Minimum;
- Verbesserung der Durchblutung des umliegenden Gewebes im Bereich der Neurolyse;
- mechanische Abpolsterung im Bereich der Neurolyse zur Verringerung von Neurombeschwerden.

12.2.2 Eingriffe bei Kontinuitätsunterbrechung

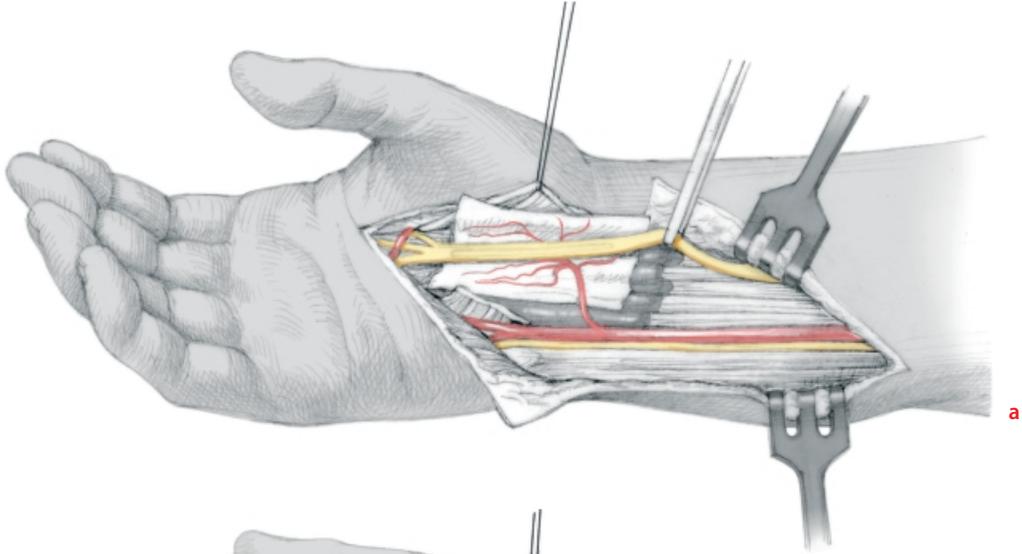
Nach Millesi [6] können folgende Schritte der Wiederherstellung der Kontinuität eines peripheren Nerven unterschieden werden:

- Bereitung der Stümpfe,
- Approximation der Stümpfe,
- Koaptation,
- Aufrechterhaltung der Koaptation.

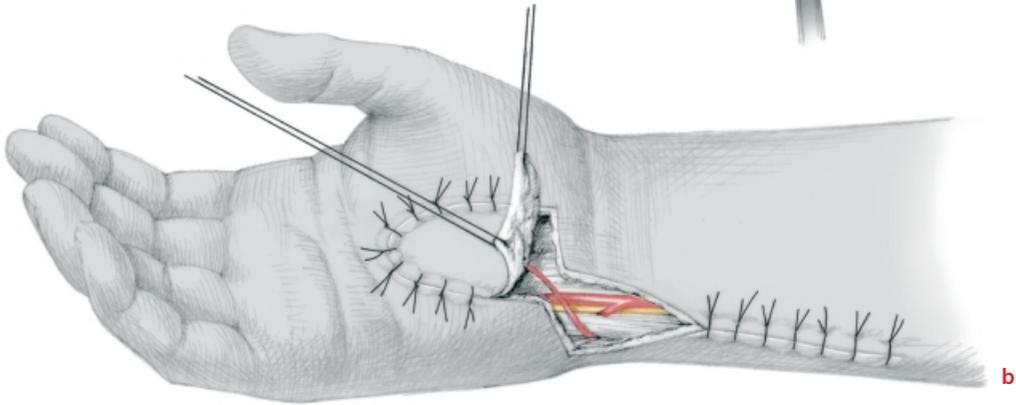
12.2.2.1 Bereitung der Stümpfe

In Blutleere wird der durchtrennte Nerv, vom Gesunden kommend, so weit wie nötig und so wenig wie möglich primär dargestellt (Abb. 12.9 a). Nach vollständiger Freipräparation der Nervenstümpfe wird die Blutleere geöffnet. Nun erfolgt eine sorgfältige Blutstillung mit der bipolaren (Mikro-)Pinzette. Neben der Inspektion ergibt auch die Palpation wichtige Hinweise auf die Ausdehnung der primären (proximaler Stumpf: Neurom, distaler Stumpf: Gliom) und sekundären (Fibrose) Schädigung. Die genaue Beurteilung der Nervenstümpfe und die weiteren Schritte erfolgen unter dem Operationsmikroskop.

Als Nächstes erfolgt eine Anfrischung des proximalen und distalen Stumpfes mit dem Ziel, geschädigte



a



b



c



d



e



f

Nervenanteile möglichst komplett zu entfernen und eine möglichst glatte Schnittfläche für die weiteren Rekonstruktionsschritte zu erreichen. Hierfür können entweder ein scharfes Skalpell (Nummer 11) oder spezielle Instrumentarien (S&T) verwendet werden (Abb. 12.9 b). Durch Anfassen und somit Fixierung des Nerven mit der Mikropinzette wird unter Verwendung der glatten, gebogenen Mikroschere an dem dem Operateur zugewandten Anteil der äußeren Nervenhülle das Epineurium nach proximal im proximalen Stumpf und nach distal im Bereich des distalen Stumpfes auf einer Strecke von etwa 2 mm zurückpräpariert. Dadurch wird das darunter liegende Perineurium sichtbar. Es muss darauf geachtet werden, dass in der dem Operateur gegenüberliegenden Zirkumferenz des Nerven das Epineurium erhalten bleibt (Abb. 12.9 c).

Sofort nach Anfrischung des Nerven, vor allem aber nach Rückpräparation des Epineuriums, wird es zu einem Vorquellen des Myelins aus den einzelnen Faszikeln kommen. Diese vorquellenden Myelinanteile werden mit der Mikrorillenschere auf der Höhe der umgebenden Hüllen gekürzt.

Bei oligofaszikulären und polyfaszikulären Nerven kann es darüber hinaus notwendig werden, durch interfaszikuläre Präparation unterschiedlich stark geschädigte Faszikel oder Faszikelgruppen auf unterschiedlicher Höhe zu reseziieren. Das Epineurium wird im Gesunden längs gespalten, einzelne Faszikel oder Faszikelgruppen werden in ihren natürlichen Spalten isoliert und bis zum Stumpf hin freipräpariert. Anschließend werden diese Faszikelgruppen so weit gekürzt, bis sie im Einzelnen eine gesunde Struktur zeigen [6] (Abb. 12.9 d).

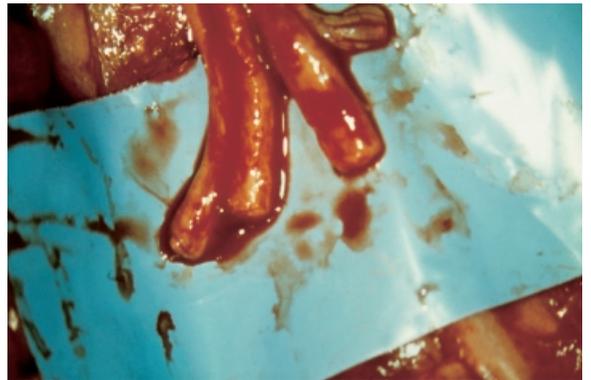
12.2.2.2 Approximation der Stümpfe

Nach Abschluss der Stumpfbereitung erfolgt die Approximation, d. h. das Zusammenführen beider Stümpfe, bis sie sich berühren. Die Approximation erfolgt mit 2 Mikropinzetten, die das Epineurium fassen. Es muss darauf hingewiesen werden, dass es zu vermeiden ist, die beiden Nervenstümpfe durch adaptierende Mikroklemmen aneinander zu bringen, da es infolge Quetschung zu einer irreversiblen Schädigung der Nervenstruktur kommt. Hierbei ist wichtig, dass dies spannungsfrei und ohne Zug möglich ist. Zur Erleichterung der Approximation kann eine Präparation der Nervenstümpfe durchgeführt werden. Vor allem im Bereich der Digitalnerven kann bis zu 1 cm Länge „gewonnen“ werden.

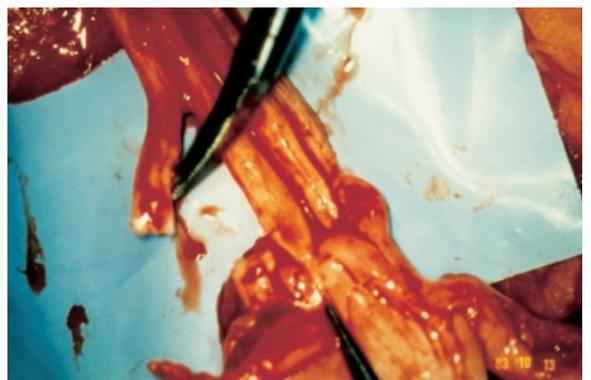
Eine Sonderform der Präparation stellt die Transposition (z. B. N. ulnaris im Ellenbogenbereich) dar.



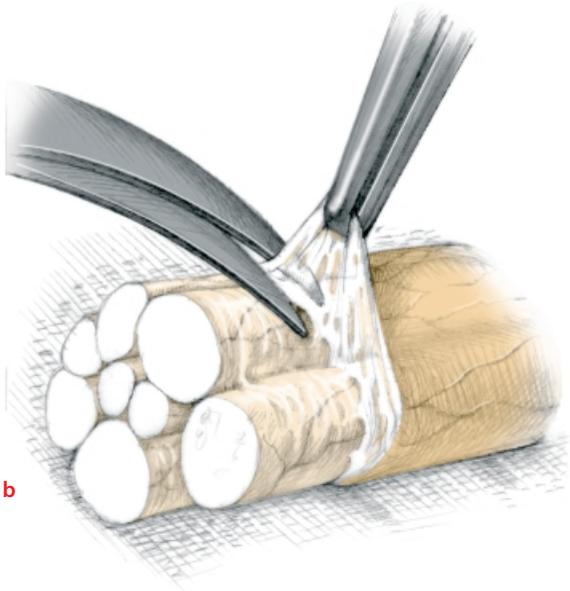
a



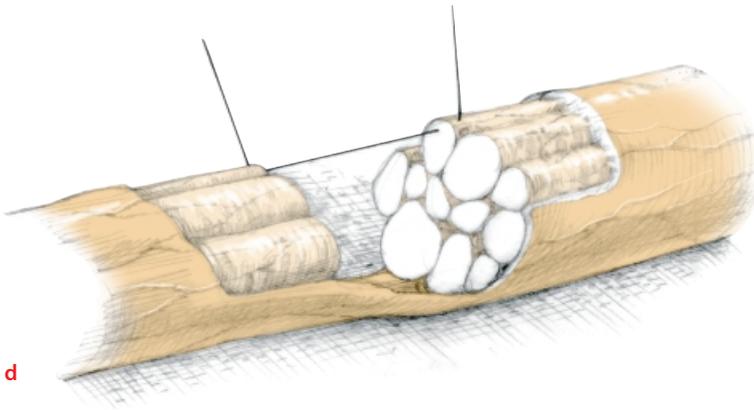
c



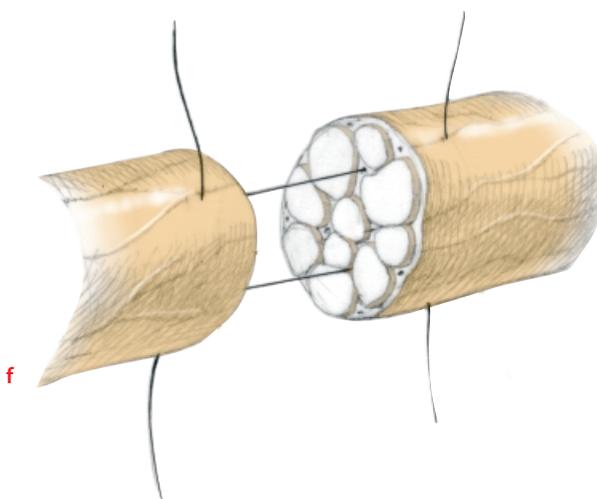
e



b



d



f

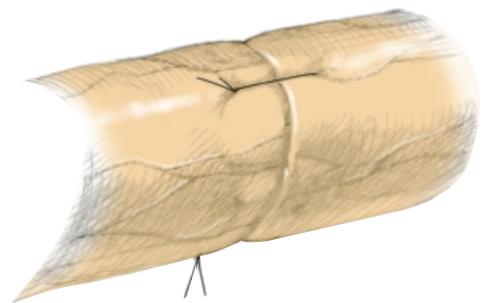


Abb. 12.9a-f. Mikrochirurgische direkte End-zu-End-Neurorrhaphie. **a** Präoperativer Befund, **b** Bereitung der Stümpfe, **c** ventrale limitierte Epineurektomie, **d** interfaszikuläres Zurückpräparieren bei oligo- und polyfaszikulären Nerven zur Darstellung gesunder Faszikel(gruppen), **e** Approximation der Stümpfe und dorsale epiperineurale Nähte zur Rekonstruktion der dorsalen Leitstruktur, **f** epiperineurale ventrale Nähte zur Aufrechterhaltung der Koaptation der zentralen und peripheren ventralen Faszikelgruppen

12.2.2.3 Koaptation (Neurorrhaphie)

Nach erfolgter Approximation können 2 Situationen unterschieden werden:

- Die Approximation kann spannungsfrei erfolgen; beide präparierten Nervenstümpfe liegen spannungsfrei aneinander. Zur Aufrechterhaltung der Koaptation erfolgt eine direkte Neurorrhaphie.
- Eine spannungsfreie Approximation ist nicht möglich; zwischen beiden präparierten Nervenstümpfe besteht eine Lücke. Zur Wiederherstellung der Nervenkontinuität ist eine Nerventransplantation oder eine andere Technik der Kontinuitätsüberbrückung erforderlich.

Der entscheidende Schritt der Koaptation ist die möglichst genaue Gegenüberstellung der korrespondierenden Faszikel(gruppen) im proximalen und distalen Stumpf. Bei akuten glatten Schnittverletzungen kann der Verlauf epineuraler Gefäße wichtige Hinweise auf die richtige Rotation der beiden Nervenstümpfe geben. Idealerweise ergibt der Anschnitt im distalen Stumpf ein Spiegelbild des Anschnitts im proximalen Stumpf.

Bei Defektzuständen und sekundären Rekonstruktionen erfolgt die möglichst genaue Wiederherstellung der intraneuralen Topographie im Defektbereich durch anatomische Kenntnisse der Faszikelanordnung oder genauer durch immunhistochemische Untersuchungen. Eine wertvolle Hilfe stellt die intraoperative Erstellung von Querschnittsschemata des proximalen und distalen Stumpfes dar (s. Abb. 12.12 c). Durch Vergleich der Anordnung von Faszikel(gruppen) und Blutgefäßen können mit hoher Wahrscheinlichkeit korrespondierende Faszikel(gruppen) einander zugeordnet werden.

Mit Hilfe der Acetylcholinesterasemethode ist es möglich, im Rahmen einer Schnellschnittuntersuchung motorische Faszikel von sensiblen im Bereich des proximalen Nervenstumpfes zu unterscheiden. Eine Rekonstruktion des N. medianus im distalen Unterarmbereich kann somit genauer durchgeführt werden.

Aufrechterhaltung der Koaptation

Für die Aufrechterhaltung der Koaptation können mehrere Techniken verwendet werden. In der Klinik etabliert ist die mikrochirurgische Naht (monofiler Faden 10×0) und die Fibrinklebung; experimentell sind kryochirurgische Verfahren, weitere Klebstoffe und der Laser in Erprobung.

12.2.2.4 Wiederherstellung der Nervenkontinuität ohne Defektzustände

Nach Durchtrennung eines peripheren Nervs kommt es, bedingt durch seinen Tonus, sofort zu einem Auseinanderweichen der Nervenstümpfe (natürliche Retraktion). Es handelt sich um einen „scheinbaren Defekt“, bedingt durch die intrinsische Gewebeelastizität. Bei glatter Durchtrennung des N. medianus entsteht ein Zwischenraum von 1,5–2 cm. Bestehen klinische Zweifel an der Spannungsfreiheit nach Koaptation, kann der sog. 8×0 -Stichtest für die großen Nervenstämme (Nn. medianus, ulnaris, radialis) bzw. 10×0 -Stichtest für die kleineren peripheren Nerven durchgeführt werden. Kann ein epineural geführter Stich die Koaptation beider Nervenstümpfe aufrechterhalten, dann besteht keine übermäßige Spannung; eine direkte Neurorrhaphie ist möglich. Kommt es zu einem Einreißen des Epineuriums, so liegt eine zu hohe Spannung im Nahtbereich vor; eine Nerventransplantation bzw. Defektüberbrückung muss durchgeführt werden.

Direkte End-zu-End-Neurorrhaphie

Mikrochirurgische Naht

Für die Nervennaht verwendet man einen monofilen Faden der Stärke 10×0 . Prinzipiell sollten so wenig Einzelknopfnähte wie nötig gemacht werden, um die Koaptation aufrechtzuerhalten (**cave:** Nahtgranulome). Im Gegensatz zur Gefäßnaht ist eine „wasserdichte“ Naht am Nerv falsch.

Die End-zu-End-Neurorrhaphie beginnt mit der Naht im verbleibenden, dem Operateur gegenüberliegenden erhaltenen Epineurium. Dabei wird zuerst im proximalen Anteil des Epineuriums, parallel zur Längsrichtung des Nervs, die Nadel, ihrem Krümmungsdurchmesser entsprechend, eingestochen, ausgestochen sowie dann im distalen Stumpfbereich erneut ein- und ausgestochen. Dabei ist darauf zu achten, dass die vor der Durchtrennung zueinander gehörenden Epineuriumanteile wieder vereinigt werden.

Nach dem Ausstechen aus dem distalen Epineurium erfolgt die Adaptation und Fixierung der beiden Stümpfe durch einen 3fachen Knoten. Bei allen mikrochirurgisch geknüpften Knoten ist darauf zu achten, dass sie nicht zu fest oder zu locker geknüpft sind. Zu fest geknüpfte Knoten führen zu einem Gewebeuntergang mit Fibrose und zu einer ungenauen Koaptation durch Herausquetschen von Endoneurium. Bei zu locker geknüpften Knoten bleibt ein Spalt zwischen beiden Nervenstümpfen bestehen, in dem sich Bindegewebe ansammelt und ebenfalls zu einem Regenerationshindernis wird.

Nach Vollendung der ersten Naht wird nun im gegenüberliegenden, noch verbleibenden Epineuriumanteil

eine zweite Naht in derselben Technik gesetzt. Nach Durchführung dieser beiden epineuralen Nähte ist der Nerv nun voll an der dem Operateur gegenüberliegenden Seite adaptiert (Abb. 12.9e).

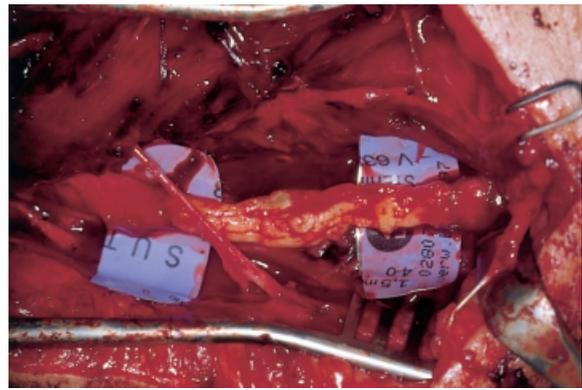
Die weitere Adaptation der einzelnen Faszikel(gruppen) erfolgt sodann durch weitere (epi)perineurale Nähte. Die Wahl der Nahttechnik, epineural vs. epiperineural vs. perineural ist abhängig von der Faszikelstruktur des Nerven. Monofaszikuläre Nerven können mit einer epineuralen Technik versorgt werden. In den meisten Fällen einer Nervennaht bei oligo- und polyfaszikulären Nerven findet die epiperineurale Nahttechnik Verwendung. Bei oligofaszikulären Nerven wird meist das äußere Epineurium mitgefasst, bei polyfaszikulären Nerven wird meist das innere Epineurium um die Faszikelgruppen mitgefasst. Die rein perineurale Nahttechnik kommt vor allem bei kleinen (mono- und bifaszikulären) Nerven und bei gezielter Neurotisation eines distalen Nervenstumpfes mit einem speziellen Faszikel (z. B. FCU-Faszikel bei Oberlin-Transfer) zum Einsatz.

Bei der epiperineuralen Nahttechnik wird im Bereich des Faszikels bzw. der Faszikelgruppe am proximalen Stumpf die Nadel ihrer Krümmung entsprechend durch das innere Epineurium unter das Perineurium eingestochen und sodann im Bereich des distalen Stumpfes wieder unter dem Perineurium durch das innere Epineurium eingeführt und ausgestochen, ohne das Endoneurium zu verletzen. Auch hier erfolgt die Fixierung durch einen 3fachen Knoten. Sollten nach Vollendung der Naht noch Myelinanteile aus den Faszikel(gruppen) vorquellen, werden diese zusätzlich mit der Mikroschere zurückgekürzt.

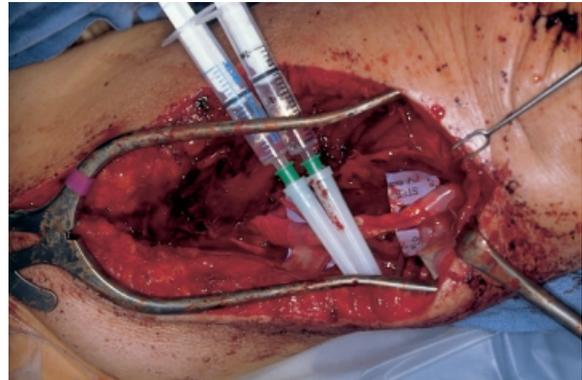
Für einen oligofaszikulären Nerv sind 2 bis maximal 4 Nähte notwendig. Für einen polyfaszikulären Nerv sollten maximal 4–8 Nähte verwendet werden, da die peripheren Faszikelgruppen zentral gelegene „schienen“ (Abb. 12.9f).

Fibrinklebung

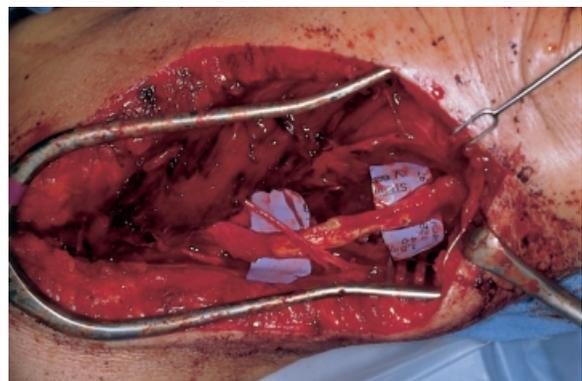
Vor allem im proximalen (stammnahen) Bereich der peripheren Nerven kann die Aufrechterhaltung der Koaptation auch mit kommerziell erwerbbarer Fibrinkleber (Tissucol) durchgeführt werden. Hierzu wird unter die Koaptation ein Plastikhintergrund gelegt (Abb. 12.10 a). Nach exakter Koaptation der Nervenstümpfe erfolgt die Gabe von Fibrinkleber auf die Koaptation (Abb. 12.10 b). Nun wird das Plastik um die Naht gerollt und mit 2 Mikropinzetten an die beiden Nervenstümpfe gedrückt, bis der Fibrinkleber abgebunden hat (Abb. 12.10 c). Anschließend wird das Plastik entfernt und die Koaptationsstelle erneut inzisiert (Abb. 12.10 d).



a



b



c

Abb. 12.10a–c. Direkte End-zu-End-Neurorrhaphie im proximalen (stammnahen) Bereich eines peripheren Nerven mit Fibrinkleber. **a** Exakte Approximation beider Nervenstümpfe auf einem Plastikhintergrund, Applikation des Fibrinklebers; **b** Einrollen des Plastikhintergrundes um die Koaptationsstelle und Andrücken mit 2 Mikropinzetten an die beiden Nervenstümpfe, bis der Fibrinkleber abgebunden hat; **c** postoperativer Aspekt nach Entfernung des Plastikhintergrundes

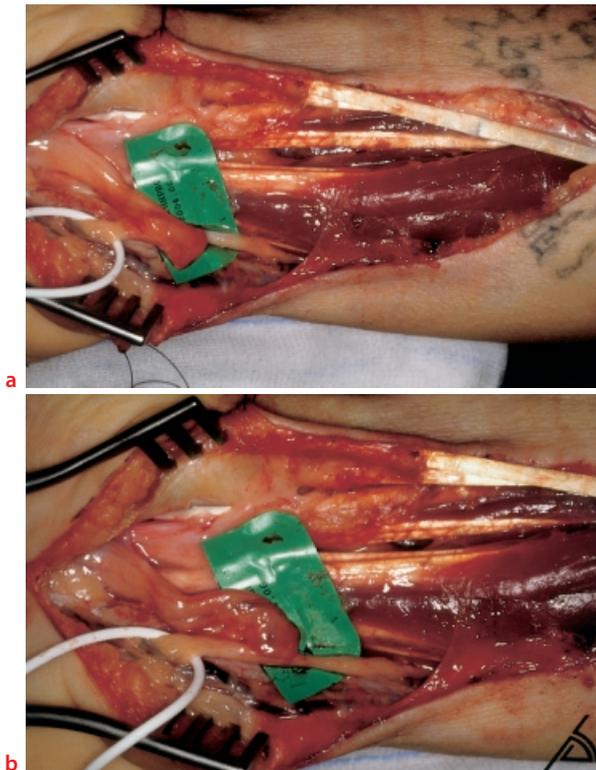


Abb. 12.11 a,b. End-zu-Seit Koaptation. **a** Koaptation des distalen Stumpfes „End-zu-Seit“; **b** Aufrechterhaltung der Koaptation mit drei 10×0-Nähten

End-zu-Seit-Neurorrhaphie

Obwohl die End-zu-Seit-Neurorrhaphie schon im 19. Jahrhundert beschrieben wurde, wurde sie aufgrund ihrer inkonstanten Ergebnisse schnell wieder verlassen. Erst durch die Arbeiten von Viterbo [12, 13] erfuhr diese Nahttechnik eine Renaissance. Ihr Vorteil ist der geringe oder klinisch völlig fehlende Spenderdefekt. Für die Rekonstruktion sensibler Funktionen sind gute Ergebnisse beschrieben worden. Bezüglich der Wiederherstellung motorischer Funktionen besteht nur dahingehend Einigung, dass agonistische Nervenanteile verwendet werden müssen.

Die Ergebnisse der motorischen Wiederherstellung sind sehr divergent. Prinzipiell können 4 Techniken beschrieben werden:

- keine epineurale Läsion,
- epineurale Läsion,
- epiperineurale Läsion,
- direkte End-zu-Seit-Pfropfung auf das Endoneurium.

In der klinischen Praxis hat sich die Technik der epineuralen Fensterung bewährt. Nach epineuraler Fensterung

wird der distale Stumpf – der nach den oben genannten Verfahren vorbereitet wurde – an den Spendernerv angesetzt (Abb. 12.11a). Die Aufrechterhaltung der Koaptation erfolgt mit 2–3 epiperineuralen Nähten (Abb. 12.11b).

12.2.2.5 Wiederherstellung der Nervenkontinuität bei Defektzuständen

Eingriffe bei vorhandenem proximalen und distalen Stumpf

Nerventransplantation

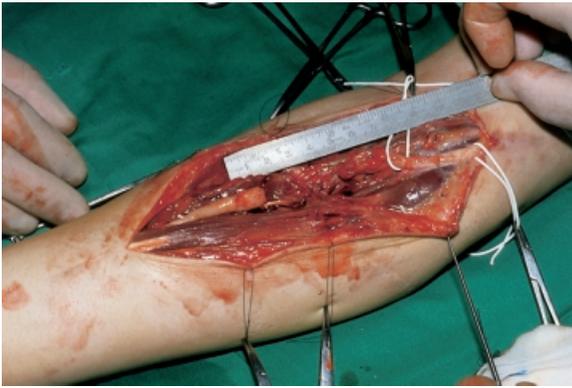
Die Wiederherstellung der Kontinuität eines Nervendefekts erfolgt heute üblicherweise mit Hilfe eines autologen Nerventransplantats. Die Standardspenderstellung für autologe Nerventransplantate sind der N. suralis und N. cutaneus antebrachii medialis. Wird mehr Nerventransplantatmaterial benötigt, kann auch der N. saphenus, N. cutaneus antebrachii medialis und der R. superficialis N. radialis verwendet werden. Der Nachteil der autologen Transplantate besteht in ihrem Spenderdefekt und der limitierten Menge.

Aufgrund der immunologischen Abstoßungsreaktion mit der Notwendigkeit einer systemischen Immunsuppression sind allogene Nerventransplantate von Erwachsenen nicht in breitem klinischen Gebrauch.

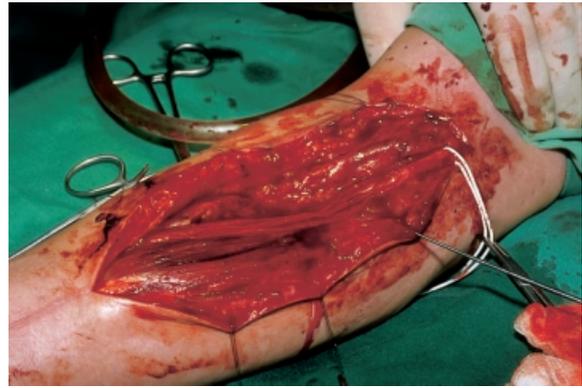
Bevor die Nerventransplantation erfolgen kann, müssen die Nervenstümpfe entsprechend vorbereitet werden. Dies erfolgt sowohl im proximalen als auch im distalen Stumpfbereich (s. 12.2.2.1). Die entnommenen Transplantate werden auf eine Länge von 10 % länger als der Defekt gekürzt und invertiert in den Defektbereich eingebracht. Durch die Invertierung kann ein Verlust von Axonen während der Regeneration verhindert werden. Auf eine ausreichende Anzahl von Nerventransplantaten ist zu achten. Ein „Overgrafting“, d.h. ein Einbringen von mehr Transplantaten als die Fläche des Nervenquerschnitts, sollte wenn möglich immer durchgeführt werden, da vor allem der N. suralis einen hohen Anteil an Bindegewebe zeigt.

Für den Erfolg einer Nerventransplantation ist die Qualität des Transplantatlagers von ausschlaggebender Bedeutung. Bei schlechtem Transplantatlager ist dies durch eines „lagerverbessernden Eingriff“ (z.B. Lappenplastik) zu beheben, oder es müssen längere Nerventransplantate und/oder ein extraanatomischer Verlauf (z.B. N. radialis im Oberarmbereich) gewählt werden. Bei „ersatzstarkem“ Lager spielt die Länge des Nerventransplantats nur eine untergeordnete Rolle.

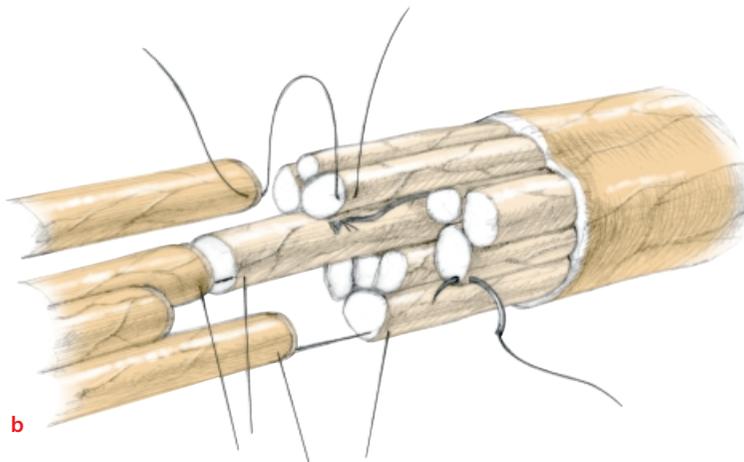
Grundsätzlich können zwei unterschiedliche Techniken der Nerventransplantation unterschieden werden: die trunkuläre Transplantation und die interfaszikuläre Transplantation.



a



c



b

Interfaszikuläre Nervenreplantation. Die interfaszikuläre Nervenreplantation ist die Technik der Wahl, vor allem im distalen (stammfernen) Abschnitt peripherer Nerven mit bereits festgelegter intraneuraler Topographie (Abb. 12.12 c). Die eingebrachten Nervenreplantate werden zunächst für die Replantation vorbereitet. Hier erfolgt das Rückschieben der äußeren Bindegewebsanteile in der gesamten Zirkumferenz mit der gerillten Schere bei gleichzeitigem entsprechendem Gegenzug durch Anfassen des Nervenreplantats mit der Mikropinzette im perineuralen Bereich. Auch hier werden eventuell vorquellende Myelinanteile mit der Mikroschere auf die Höhe des Epineuriums zurückgekürzt. Das gleiche Vorgehen erfolgt im distalen Stumpfbereich des Nervenreplantats.

Nervenstümpfe und Nervenreplantate sind nun für die Replantation vorbereitet. Mit Hilfe eines Nervenreplantats werden korrespondierende Faszikel(gruppen) miteinander verbunden. Durch Einstechen der Nadel unter das Epineurium und anschließendes Ausstechen im Replantatbereich, das wieder unter dem Perineurium bei gleichzeitiger Schonung des Myelins erfolgt, wird die erste Naht durch einen 3fachen Knoten fixiert. Das gleiche Vorgehen erfolgt auch im distalen Nahtbereich.

Abb. 12.12 a–c. Interfaszikuläre Nervenreplantation. **a** Einbringen der invertierten Replantate (mit einer Länge von 10% mehr als die Länge des Nervendefekts); **b** Beginn der Nervenreplantation im dorsalen Bereich (das erste Nervenreplantat dient als „dorsale Schiene“ analog dem Epineurium bei primärer Nervenreplantation); **c** interfaszikuläre Einbringung der Nervenreplantate zur Wiederherstellung der Kontinuität korrespondierender Faszikel(gruppen) analog der intraneuralen Topographie

Bei großen Faszikeln und vor allem bei der Fixierung des ersten dorsalen Faszikels, der als „dorsale Leitschiene“ dient, können 2 Nähte für eine exakte Koaptation notwendig werden. Die weiteren Replantate werden in gleicher Technik, wenn möglich mit jeweils einer Naht pro Nahtstelle, fixiert. Eventuell noch vorquellende Myelinanteile werden durch entsprechend entgegengesetzten Zug mobilisiert und durch glatte Durchtrennung auf Höhe des Perineuriums rückgekürzt.

Trunkuläre Nervenreplantation. Die trunkuläre Nervenreplantation kann bei proximalen (stammnahen) Nervendefekten eingesetzt werden, da hier eine eindeutige intraneurale Topographie noch nicht vor-

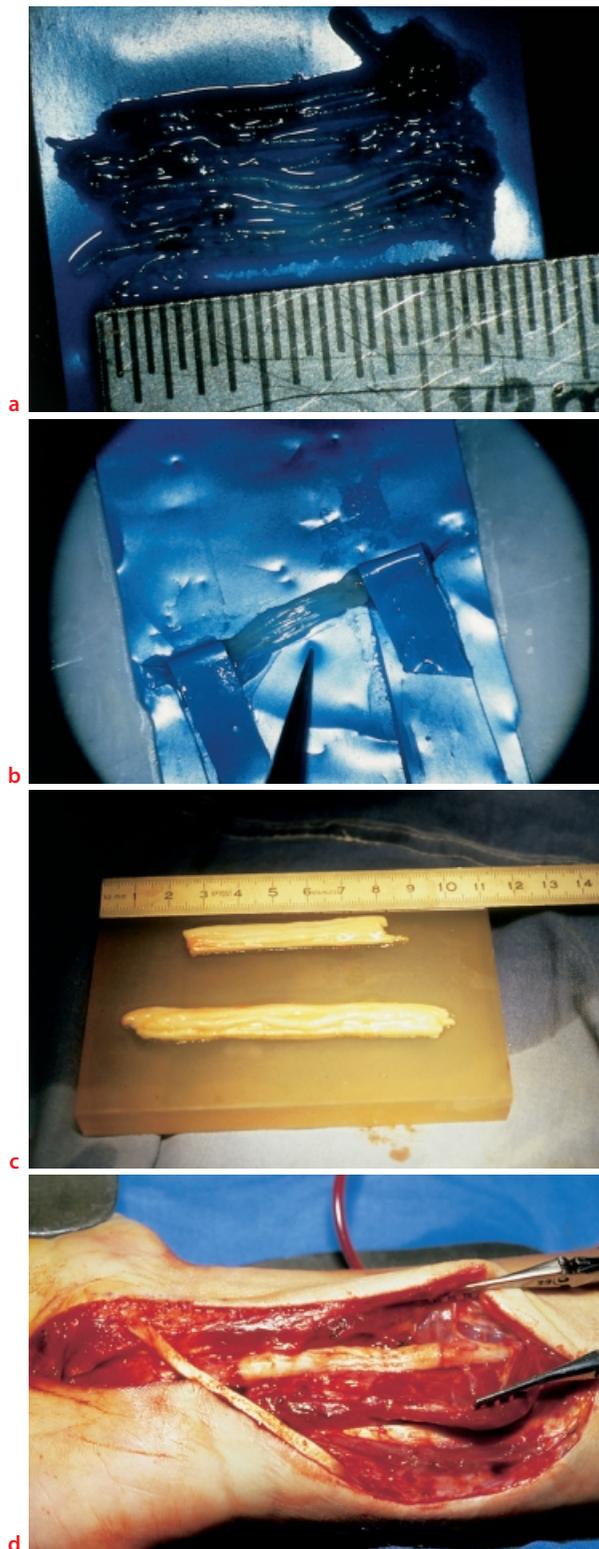
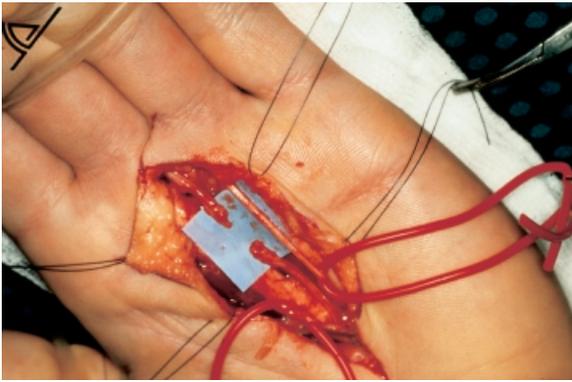


Abb. 12.13 a-d. Überbrückung eines stammnahen Nervendefekts mit Hilfe eines zusammengesetzten trunkulären Nerven- transplantats. **a** Dreidimensionale Anordnung der Endigungen der Nerven- transplantate auf einem Plastikhintergrund und Applikation des Fibrinklebers; **b** Einrollen des Plastikhintergrundes um die Koaptationsstelle und Andrücken mit 2 Mikropinzetten an die beiden Nervenstümpfe, bis der Fibrinkleber abgebunden hat; **c** postoperativer Aspekt nach Entfernung des Plastikhintergrundes und frischer Anschnitt im Bereich des distalen Endes des zusammengesetzten trunkulären Nerven- transplantats; **d** Fixierung des zusammengesetzten trunkulären Nerven- transplantats im Defekt mittels weniger epineuraler mikrochirurgischer Nähte

liegt. Die eingebrachten Nerven- transplantate werden zunächst für die Transplantation vorbereitet. Im Gegensatz zur interfazikulären Transplantation müssen sie gering mehr als 10 % länger als der Defekt gewählt werden, da im Verlauf der Herstellung des trunkulären Nerven- transplantats im proximalen und distalen Transplantatbereich jeweils ein zusätzlicher Anschnitt notwendig ist.

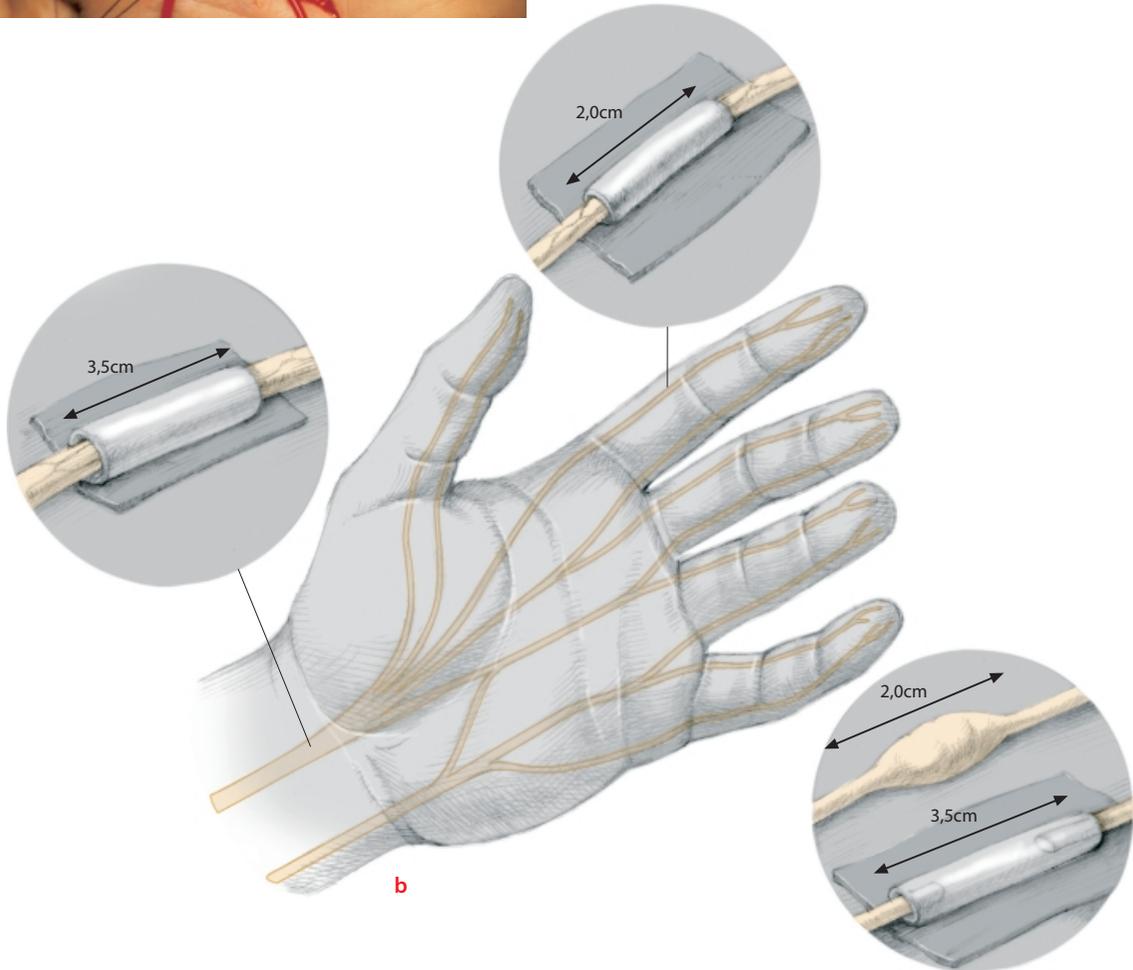
Eine ausreichende Anzahl von Nerven- transplantaten zur kompletten Abdeckung des Nervenquerschnitts wird angehäuft. Im Bereich beider Transplantatenden wird ein Plastikhintergrund untergelegt. Im Bereich der Transplantatenden wird eine dreidimensionale Anordnung der Nerven- transplantate – für die Anschlüsse – durchgeführt. Im Transplantatverlauf selbst wird eine hauptsächlich zweidimensionale Anordnung, die eine Auffächerung der Nerven- transplantate zulässt, gewählt. Durch die Auffächerung können die Nerven- transplantate leichter aus der Umgebung re- bzw. neovaskularisiert werden. Im Bereich der Transplantatenden werden die Transplantate mittels Fibrinkleber miteinander verbunden. Nach dreidimensionaler Anordnung der Nerven- transplantatenden erfolgt die Gabe von Fibrinkleber (Abb. 12.13 a). Nun wird das Plastik um die Naht gerollt und mit 2 Mikropinzetten an das trunkuläre Nerven- transplantat gedrückt, bis der Fibrinkleber abgebunden hat (Abb. 12.13 b). Anschließend wird das Plastik entfernt. An der Klebestelle liegt ein kegelförmiger Überschuss an abgebundenen Fibrinkleber vor. Das gleiche Vorgehen wird auch am gegenüberliegenden durchgeführt. Vor der Koaptation wird an beiden Transplantatenden ein frischer Anschnitt mit Exposition von Nervengewebe im gesamten Querschnittsbereich erfolgen (Abb. 12.13 c).

Das zusammengesetzte trunkuläre Nerven- transplantat wird nun in mikrochirurgischer Technik mittels weniger epineuraler Nähte mit monofilem 10×0-Faden in den Defekt eingebracht. Der Fibrinkleber an beiden Transplantatenden dient als „Neoepineurium“ und stellt eine mechanisch belastbare Schicht für die die Verankerung der Nähte dar. Abschließend ist darauf zu achten, dass im mittleren Abschnitt des zusammengesetzten



a

Abb. 12.14 a,b. Überbrückung eines segmentalen Nervendefekts < 2 cm des N. digitalis proprius mit Hilfe eines Venenconduits. **a** Klinischer Aspekt nach Bereitung des proximalen und distalen Stumpfes und Einbringen des Venenconduits; **b** Fixierung der beiden Stümpfe nach proximaler und distaler Invagination mit Hilfe je einer mikrochirurgischen Naht



b

trunkulären Nerventransplantats die einzelnen Nerventransplantate möglichst breit aufgefächert sind, um eine möglichst schnelle Revaskularisation zu erreichen (Abb. 12.13d).

Conduits

Nach anfänglichen Misserfolgen konnten kleine Nervendefekte zuverlässig mit Röhrchen überbrückt werden. Neben biologischen Materialien wie Knochen, Ge-

fäße (Arterie, Vene), Faszien-schläuche etc. wurden auch zahlreiche nichtbiologische Substanzen erprobt.

In der klinischen Praxis konnten sich neben autologen Venen, Silikonröhrchen und biodegradable, teils auch semipermeable Röhrchen etablieren. Eine weitere Möglichkeit stellt die Interposition eines Basalmembranconduits quer gestreifter Muskulatur dar. Allerdings zeigte sich, dass eine den Ergebnissen nach autologer Nerventransplantation vergleichbare Regenerati-

on nur bis zu einer Defektlänge von 2–3 cm zu erwarten war. Eine gute Indikation für den Einsatz von autologen Conduits stellt die Rekonstruktion kleiner Substanzdefekte im Bereich rein sensibler Nerven, wie z. B. N. digitalis proprius, dar (Abb. 12.14).

Bei Nervendefekten > 2–3 cm kommt es aufgrund der fehlenden Schwann-Zellen und der von ihnen sezernierten Wachstumsfaktoren zu einer deutlich schlechteren Nervenregeneration als nach autologer Nerven transplantation. Durch Einbringen von kleinen Nervensegmenten mit lebenden Schwann-Zellen in ein langes Röhrchen konnte tierexperimentell eine zufrieden stellende Regeneration auch über längere Defektstrecken erzielt werden. Mit Hilfe moderner Methoden der Zellkultivierung ist es möglich, Schwann-Zell-Kulturen anzufertigen, die – auf eine innere Matrix aufgebracht, in ein bioresorbierbares Röhrchen eingebracht – als lebendes künstliches Nervenimplantat eingesetzt werden können.

Nervendistraktion

Obwohl Einzelbeschreibungen gewollter und nicht gewollter (Vereinigung von Sehnenstümpfen mit den Stümpfen des N. medianus) Distraktionen im Bereich peripherer Nerven existieren, hat sich dieses Verfahren derzeit nicht in der klinischen Praxis etablieren können. Periphere Nerven können ohne klinisch sichtbare Funktionseinbuße bis zu 20 % ihrer Länge gedehnt werden. Dies ist hauptsächlich der Grund, warum bei Extremitätenverlängerungen klinisch sichtbare nervale Defekte nicht regelhaft auftreten. Allerdings führt die Extremitätenverlängerung zu signifikanten, subklinisch verlaufenden elektrophysiologischen Veränderungen.

Eingriffe bei fehlendem proximalen Stumpf

Bei fehlendem proximalen Nervensegment, wie z. B. Wurzelriss bei Läsion des Plexus brachialis, kann eine *extraanatomische Verbindung (Neurotisation)* mit einem anderen Nerv (neuronerval) als Axonspender durchgeführt werden. Es erfolgt eine direkte Neurorrhaphie in End-zu-End- oder End-zu-Seit-Technik.

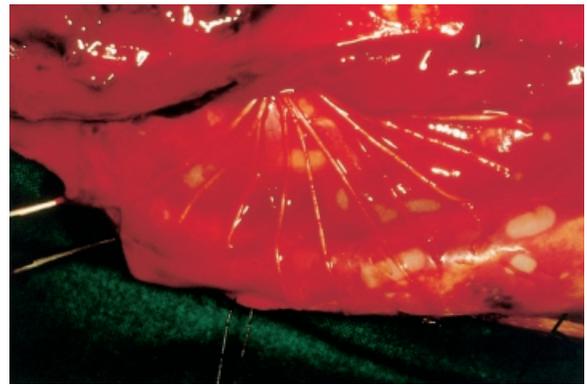


Abb. 12.15. Direkte neuromuskuläre Neurotisation

Eingriffe bei fehlendem distalen Stumpf

Ist der Nerv aus dem motorischen Feld seines Effektormuskels herausgerissen, fehlt ein distaler Stumpf zur Neurotisation. Durch *direkte neuromuskuläre Pfropfung* an verschiedenen Stellen des Muskels – möglichst ubiquitär über den Muskel verteilt – ist es möglich, eine funktionelle Muskelkontraktion zu erreichen.

Operationstechnisch ist dabei zu beachten, dass eine möglichst große Aufsplitterung im Sinn einer intraneuralen mikrochirurgischen Neurolyse des proximalen Nervensegmentes oder daran fixierter Transplantate erfolgen muss. Die einzelnen Faszikel werden nach Längsspaltung der Muskelfasern möglichst atraumatisch in den Muskel eingebracht und mit einer mikrochirurgischen Naht fixiert (Abb. 12.15).

12.2.3 Fehler und Gefahren

! Neben operationstechnischen Fehlern (Tabelle 12.3) sind eine ungünstige Wahl des Zeitpunktes der Nervenrekonstruktion sowie eine mangelhafte postoperative Ruhigstellung die Hauptursachen für ein unbefriedigendes Ergebnis nach Nervenwiederherstellung.

Die primäre Nervenrekonstruktion in traumatisch stark verschmutztem und geschädigtem Gebiet ist durch sekundäre Infektionen und Hämatome hoch gefährdet und wird daher nicht empfohlen. Dies gilt umso mehr für den Einsatz von Nervenimplantaten.

Tabelle 12.3. Schritte der mikrochirurgischen Neurorrhaphie und mögliche Fehlerquellen

Arbeitsschritte	Fehler und Gefahren
1. Bereitung der Nervenstümpfe	Inadäquate Beurteilung der wirklichen Schädigung der Nervenstümpfe Inadäquate mikrochirurgische Präparation der Nervenstümpfe
2. Approximation der Stümpfe	Ungenügende Mobilisierung der Nervenstümpfe/ übermäßige Mobilisierung mit iatrogener Devaskularisierung Approximation in schlechtem Lager (mitbestehender Muskel-Sehnen- und/oder Knochenschaden)
3. Koaptation	Koaptation unter Spannung Inadäquate Beachtung der intraneuralen Topographie Zu wenig Nerventransplantate pro Querschnitt bzw. inadäquate Nerventransplantate
4. Aufrechterhaltung der Koaptation	Neurorrhaphie ohne Operationsmikroskop/ kein Einsatz mikrochirurgischer Instrumente Zu dickes Nahtmaterial, zu feste Naht, zu viele Nähte (Fibrose) Inadäquate Applikation von Fibrinkleber in den Koaptationsspalt
5. Wundschluss	Einschichtiger Wundschluss Einlage von Saugdrainagen in Koaptationsnähe Externer Druck auf Koaptation
6. Postoperative Nachbehandlung	Fehlende oder inadäquate Ruhigstellung für 10 Tage Inadäquate postoperative Kontrolle der Regeneration Inadäquate postoperative physiotherapeutische Begleittherapie

Literatur

- Berger A (1988) Freie vaskularisierte Nerventransplantate, freie Spendernerven, geeignete Spenderzonen. *Handchir Mikrochir Plast Chir* 20: 83
- Berger A, Tizian C (1985) Technik der Mikrochirurgie. Lehrbuch und Atlas. Kohlhammer, Stuttgart
- Chiu DTW, Strauch B (1993) A prospective clinical evaluation of autogenous vein grafts used as a nerve conduit for distal sensory nerve defects of 3 cm or less. *Plast Reconstr Surg* 86: 928
- Lundborg G (1988) Nerve injury and repair. Churchill Livingstone, Edinburgh
- Lundborg G, Rosen B, Dahlin LB, Holmberg J (1997) Median and ulnar nerve repair: results from tubular vs. conventional technique. *J Hand Surg* 22B (Suppl 1): 38
- Millesi H (1992) Chirurgie der peripheren Nerven. Urban & Schwarzenberg, München
- Millesi H, Berger A, Meissl G (1976) Further experience with interfascicular grafting of the median, ulnar and radial nerves. *J Bone Joint Surg* 58A: 227
- Narakas A (1988) The use of fibrin glue in repair of peripheral nerves. *Orthop Clin North Am* 19: 187
- Noah EM, Williams A, Jorgenson C et al. (1997) End-to-side neurorrhaphy: a histologic and morphometric study of axonal sprouting into an end-to-side nerve graft. *J Reconstr Microsurgery* 13: 99–106
- Oberlin C, Beal D, Leechanvengvov S, Salon A (1994) Nerve transfer to the biceps muscle using a part of ulnar nerve for C5-C6 avulsion of the brachial plexus: anatomical study and report of four cases. *J Hand Surg* 19A: 232
- Terzis JK, Williams B (1975) The nerve gap: suture under tension vs. graft. *Plast. Reconstr Surg* 56: 166
- Viterbo F, Trindade JC, Hoshino K, Mazzoni A (1992) Latero-terminal neurorrhaphies without removal of the epineural sheath. Experimental study in rats. *Rev Paul Med* 110: 267
- Viterbo F, Trindade JC, Hoshino K, Mazzoni A (1994) End-to-side neurorrhaphy with removal of the epineural sheath: an experimental study in rats. *Plast Reconstr Surg*. 94: 1038

