

Persönliche PDF-Datei für  
P. Bäumer, M. Pham, M. Bendszus

Mit den besten Grüßen vom Georg Thieme Verlag

[www.thieme.de](http://www.thieme.de)

## MR-Neurographie – bildgebende Diagnostik im peripheren Nervensystem

DOI 10.1055/s-0034-1387787  
Akt Neurol 2014; 41: 461–468

Nur für den persönlichen Gebrauch bestimmt.  
Keine kommerzielle Nutzung, keine Einstellung  
in Repositorien.

**Verlag und Copyright:**  
© 2014 by  
Georg Thieme Verlag KG  
Rüdigerstraße 14  
70469 Stuttgart  
ISSN 0302-4350

Nachdruck nur  
mit Genehmigung  
des Verlags

 **Thieme**

# MR-Neurographie – bildgebende Diagnostik im peripheren Nervensystem

## MR Neurography – Diagnostic Imaging Modality for the Peripheral Nervous System

### Autoren

P. Bäumer, M. Pham, M. Bendszus

### Institut

Neuroradiologie, Universitätsklinikum Heidelberg

### Schlüsselwörter

- MR-Neurographie
- periphere Nerven
- Bildgebung

### Keywords

- MR neurography
- peripheral nerves
- imaging

### Zusammenfassung

Die Bildgebung des peripheren Nervensystems mittels Sonographie und MRT ist mittlerweile zum Standard in der Diagnostik von Läsionen peripherer Nerven geworden. Die MR-Neurographie bietet hochauflösende Diagnostik von Nerven in allen Körperregionen. Das Spektrum an Indikationen reicht von traumatischen Verletzungen über Kompressionsneuropathien, inflammatorischen Erkrankungen und Polyneuropathien zu Neoplasien des PNS. Sie erhebt präzise Informationen zur Lokalisation von Läsionen und deren Verteilungsmuster und kann an Hand dieser Befunde entscheidende Hinweise in der Differenzialdiagnostik peripherer Nervenerkrankungen geben.

### Abstract

Imaging of the peripheral nervous system by ultrasonography and MRI has become a standard procedure in the diagnosis of peripheral nerve lesions. MR neurography offers high-resolution diagnostic imaging of nerves in all body regions. Indications range from traumatic nerve injuries over compression neuropathies, inflammatory diseases, and polyneuropathies to neoplasms of the PNS. MR neurography offers precise information regarding localization of lesions as well as lesion patterns, and can give crucial clues in the differential diagnosis of peripheral nerve diseases.

### Einleitung

Standard in der Diagnostik von Erkrankungen des peripheren Nervensystems (PNS) ist die klinische Untersuchung zusammen mit den elektrophysiologischen Methoden der Elektromyographie und Elektroneurographie. Als dritte diagnostische Säule hat sich die Bildgebung des PNS mittels Sonographie und MRT etabliert. Während sich die Sonographie hervorragend als schnelles und breiter verfügbares Verfahren zum Screening von Pathologien oberflächlicher Nerven eignet, bietet die MR-Neurographie (MRN) mit multimodaler Diagnostik von peripheren Nerven in allen Körperregionen die aktuell umfassendste Bildgebung des PNS [1]. Die MR-Neurographie liefert besonders präzise Informationen zur Lokalisation der Läsion, zur Anzahl der Läsionen in einem bestimmten Nervensegment und, falls mehrere Nervenläsionen vorliegen, zu deren Verteilungsmuster. Damit ist sie eine häufig sinnvolle Ergänzung zur funktionellen Diagnostik mittels Elektrophysiologie. Der folgende Artikel stellt die MRN als Technik vor mit exemplarischen

Anwendungen bei Trauma, Tumor, Kompression und Entzündung von peripheren Nerven.

### Technische Voraussetzungen und diagnostische Kriterien

Technische Voraussetzung zur Durchführung der MRN ist ein Hochfeld-Kernspintomograf mit geeigneten Empfangsspulen sowie speziell für die Nervenbildgebung optimierte Protokolle von Pulssequenzen. Bei einer Feldstärke von 3 Tesla können periphere Nerven als multifaszikuläre Strukturen dargestellt werden. Auch einzelne Äste peripherer Nerven, wie z.B. der Nervus interosseus anterior oder der Ramus profundus des Nervus radialis, sind bis nahe des Eintritts in die Zielmuskulatur verfolgbar. Den Großteil von MRN-Untersuchungen stellen T2-gewichteten Sequenzen mit Fettsättigung und in hoher räumlicher Auflösung dar (exemplarisches Sequenzprotokoll ● Tab. 1).

Der normale Nerv erscheint auf T2-gewichteten Bildern iso- bis leicht hyperintens zum umge-

### Bibliografie

DOI <http://dx.doi.org/10.1055/s-0034-1387787>  
 Online-Publikation: 22.9.2014  
 Akt Neurol 2014; 41: 461–468  
 © Georg Thieme Verlag KG  
 Stuttgart · New York  
 ISSN 0302-4350

### Korrespondenzadresse

**Dr. med. Philipp Bäumer**  
 Neuroradiologie  
 Universitätsklinikum Heidelberg  
 Im Neuenheimer Feld 400  
 69120 Heidelberg  
 philipp.baeumer@med.uni-heidelberg.de

**Tab. 1** Typische Sequenzen zur Durchführung der MR-Neurographie am Plexus (SPACE STIR, T2 SPAIR) und an den Extremitäten (T2). ST – Schichtdicke; S – Anzahl der Schichten im Block; n – Anzahl der Mittelungen.

Sequenz	TR (ms)	TE (ms)	TI (ms)	ST (mm)	Auflösung (mm <sup>2</sup> )	Field of View (mm)	S	n
koronare SPACE STIR (Plexus beidseits)	3 800	267	180	0,8	0,781 × 0,781	250	72	2
sagittal-oblique T2 SPAIR (Plexus einseitig)	5 530	45		3,0	0,469 × 0,469	150	51	4
axiale fettgesättigte T2 (Extremitäten)	7 020	52		3,0	0,300 × 0,300	130	45	3

benden Muskelgewebe. Das wichtigste Kriterium der klinischen MR-Neurographie ist eine T2-Signalanhebung von Nervenfaszickeln. Dieses Kriterium ist hinsichtlich der pathohistologischen Dignität der Läsion unspezifisch. Es kann jedoch mit einer hohen räumlichen Auflösung und gleichzeitig einer weiträumigen anatomischen Abdeckung untersucht werden. Die vollständige oder zumindest repräsentative Erfassung räumlicher Läsionsmuster ist grundlegend für die Klassifikation peripherer Neuropathien. Die lokalisatorische Charakterisierung lässt daher durch das Verteilungsmuster der Nervenläsionen eine engere Eingrenzung der zugrundeliegenden Krankheitsentität zu.

Bei Veränderungen im T2-Signals des Nervens gilt es zu beachten, dass es bei einem Verlauf des Nervens in einem schrägen Winkel zum Hauptmagnetfeld (B<sub>0</sub>) zu einer artifiziellen Signalanhebung im Nerven kommen kann, dem sogenannten magic-angle-Effekt. Diese artifizielle Signalanhebung ist in den meisten Fällen zu vermeiden durch eine gerade Lagerung des Nervenabschnitts zur Hauptachse des Magnetfeldes. Eine Ausnahme ist bspw. der N. peroneus communis am Kniegelenk, dessen Beurteilung mit besonderer Vorsicht jedoch ebenfalls reliabel ist [2].

In vielen Fällen ist eine Kontrastmittelgabe bei MRN-Untersuchungen nicht notwendig. T1-gewichtete Sequenzen mit Kontrastmittel (KM) sind vor allem bei der Frage nach Neoplasien und in postoperativen Situationen sinnvoll. Eine Kontrastmitelanreicherung von Nervengewebe ist wie im zentralen Nervensystem grundsätzlich als pathologisch zu werten.

Die Kontinuität von Nervenstrukturen wird am besten mittels 3-dimensionaler Sequenzen beurteilt. Auch für die Bildgebung des Plexus brachialis und lumbosacralis sind 3-dimensional-isotrope Sequenzen zur Übersicht äußerst hilfreich, da sie eine Rekonstruktion der Zielstrukturen in allen Raumebenen ermöglichen. Der intradurale Verlauf von Nervenwurzeln und ihrer Faseranteile kann besonders genau mit stark T2-gewichteten Sequenzen wie bspw. CISS (constructive interference in steady state) oder SPACE (Sampling Perfection with Application optimized Contrasts using different flip angle Evolutions) erfolgen. Im peripheren Verlauf lassen sich mittels spezieller Mehrkanaloberflächenspulen zudem sämtliche Strukturen des supra- und auch infraklavikulären und axillären Plexus brachialis in hoher Auflösung darstellen. Mit dieser besonderen Untersuchungsanordnung für den Plexus brachialis können alle seine Elemente (intradurale Filamente, Spinalnerven, Trunci, Divisiones, Fasciculi) und auch die abgehenden Armnerven einschließlich des N. axillaris voneinander differenziert und in ihrem T2-Signal beurteilt werden.

Zusätzlich zu diesen etablierten Techniken zur Visualisierung der Pathomorphologie befinden sich weitere Methoden zur Berechnung von funktionellen Parametern des peripheren Nervengewebes in der klinischen Validierung. Das Diffusion tensor imaging (DTI) nutzt die gerichtete Diffusion entlang von Nervenfaserbündeln zur Beurteilung der axonalen Integrität und könnte zukünftig möglicherweise das Monitoring von Nervenregeneration erlauben.

In Ergänzung zur Beurteilung von peripheren Nerven kann die Muskulatur im gesamten Querschnitt einer Extremität hervor-

ragend im MRT untersucht werden. Die Muskulatur wird ebenfalls in T2-gewichteten Bildern beurteilt. Neurogene Denervierung ist charakterisiert durch flächige T2-Signalsteigerung der betroffenen Muskulatur. Analog zu Nervenläsionen ist ein pathologisch erhöhtes T2-Signal primär unspezifisch und kann auch entzündlich oder traumatisch bedingt sein. Auch hier wird durch das Muster der betroffenen Muskulatur und die Zusammenschau mit den Befunden an innervierenden Nerven die der Befund einer Denervierung erhoben und in die Gesamtbeurteilung einer neuromuskulären Erkrankung miteinbezogen.

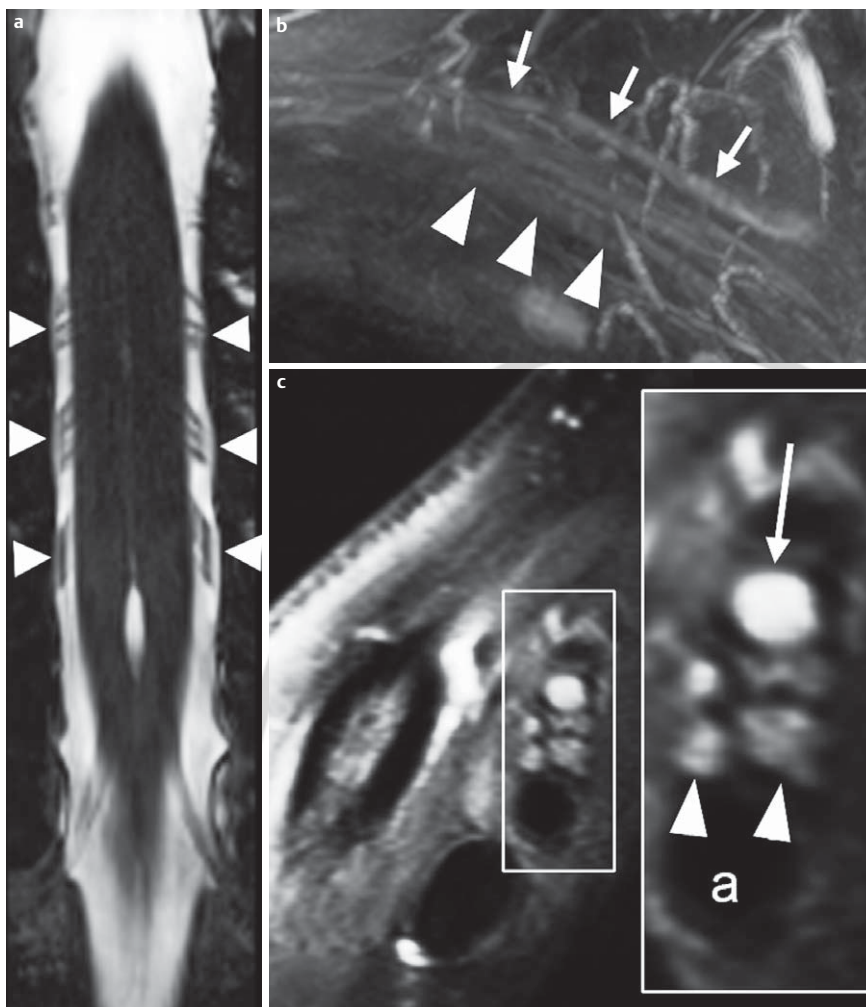
## Indikationen und exemplarische Anwendung

### ▼ Traumatische Nervenverletzungen

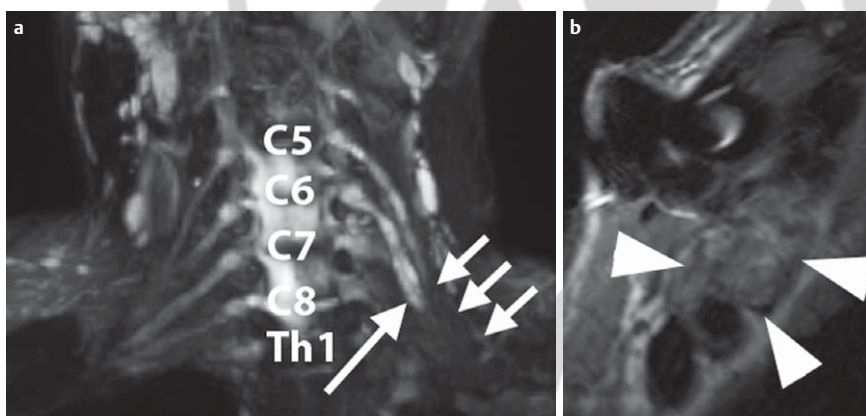
Im Falle eines peripheren Nerventraumas ist es in frühen Stadien entscheidend festzustellen, ob die Kontinuität des Nerven erhalten ist oder ob eine Durchtrennung von Nervenstrukturen stattgefunden hat. Dies ist nur mit der Bildgebung verlässlich möglich und von größter Relevanz für das weitere Prozedere (Abwarten der Spontanregeneration bei intakter Kontinuität gegenüber Nervenrekonstruktion bei unterbrochener Kontinuität). Die MR-Neurographie ist eine zuverlässige Methode zur Beurteilung der Kontinuität von peripheren Nerven und der Nervenplexus. Dies gilt nicht nur für oberflächliche, sondern vor allem auch für tiefer gelegene Strukturen. In diesen Fällen kann die MR-Neurographie eine vorangegangene sonografische Untersuchung sinnvoll ergänzen, da sonografische Verfahren hinsichtlich der Beurteilung tiefer im Weichteilmantel verborgener oder nahe an Knochen lokalisierter Nerven- oder Plexusabschnitte eingeschränkt sind.

Der Plexus brachialis ist ein Paradebeispiel für die Diagnostik von Nervenkontinuität mittels MRN. Ein Trauma kann sowohl zu Ausrissen der intraduralen Filamente als auch zu weiter peripheren Läsionen der Plexuselemente mit vollständiger Durchtrennung und nachfolgender Neurombildung führen. In beiden Fällen ist eine zuverlässige Diagnostik mittels der MRN möglich. Die Diagnostik von intraduralen Nervenwurzelaustrissen erfolgte früher mittels CT-Myelographie. Dies ist mittlerweile aus Strahlenschutzgründen obsolet, da das MRT mit geeigneten Sequenzen die intraduralen Filamente vom Myelon zum Neuroforamen direkt visualisiert (● **Abb. 1**). Diese Art der Diagnostik ist bereits in den Tagen nach dem Traumaereignis möglich.

Für die Bildgebung des Plexus empfiehlt es sich hingegen, nach einem schweren Trauma etwa 4 Wochen zu warten, damit die Beurteilung der Nervenstrukturen nicht durch Weichteilödem oder Hämatome beeinträchtigt wird. Die Korrelation von Nervenverletzungen nach der Seddon-Sunderland Klassifikation mit bildgebenden Kriterien ist bislang nicht etabliert. Stattdessen lässt sich für die MRN eine eigene Einteilung mit entsprechenden Empfehlungen zum Prozedere treffen. Bei traumatischen Läsionen kann die MRN differenzieren zwischen einem echten Neurom, einem Kontinuitätsneurom und einer funktionellen Läsion mit erhaltener Kontinuität ohne Kaliberauftreibung.



**Abb. 1** Intakte intradurale Nervenfasern bei peripherem Traktionsschaden. In der koronaren CISS **a** ist die Nervenkontinuität der intraduralen Nervenfasern (Pfeilspitzen) erhalten [die weiter kaudalen Nervenwurzeln sind teilweise in dieser Ebene nicht erfasst, nebenbefundlich kurzstreckige Hydromyelie zentral im Myelon]. Im peripheren Verlauf des Plexus brachialis **b** sind alle Elemente kontinuierlich nachweisbar (Pfeilspitzen), der Fasciculus posterior mit N. axillaris jedoch kaliberaufgetrieben (Pfeile). In der oblique-sagittalen T2 durch den Plexus auf Höhe der Clavicula **c** pathologisch erhöhtes T2-Signal von den Teilen des Fasciculus posterior, die distal den N. axillaris bilden.

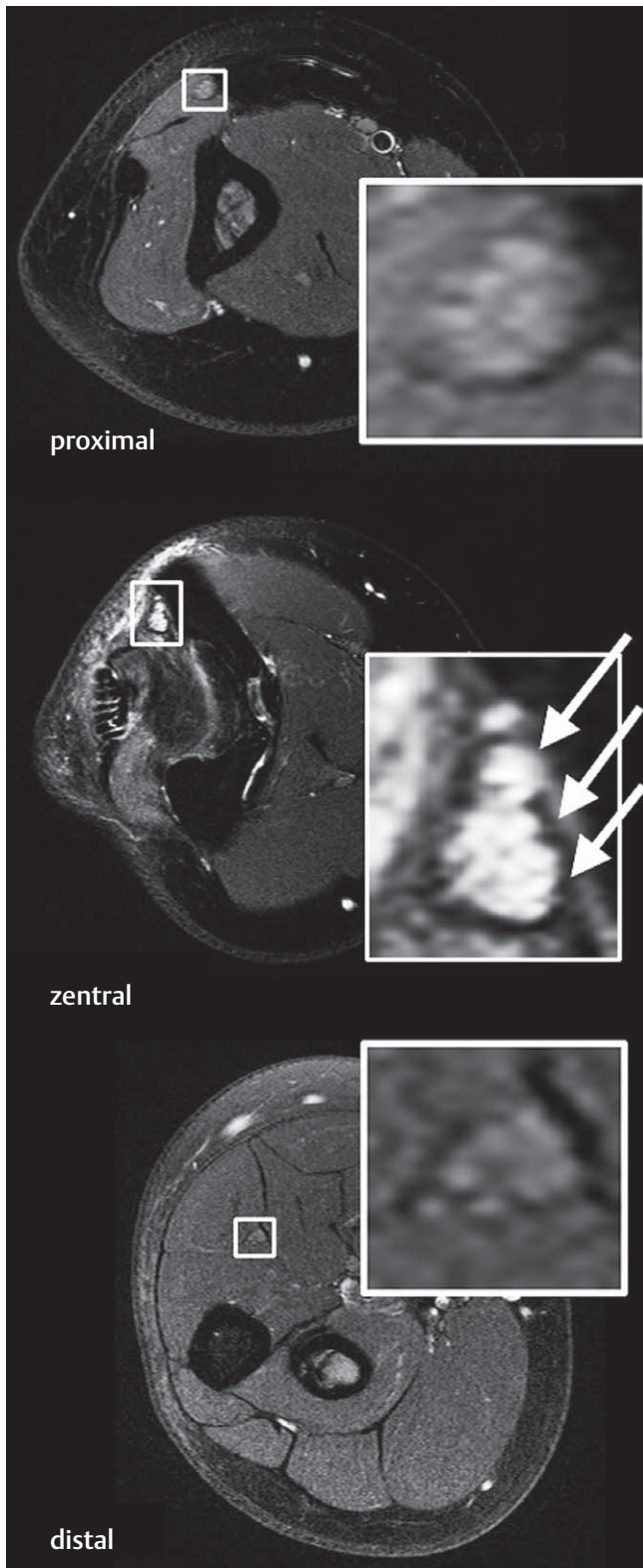


**Abb. 2** Echte Abrissverletzung des supraclavikulären Plexus (Truncus superior). Neurom der Spinalnerven C5 und C6 (langer Pfeil) am Übergang zum Truncus superior, dann Kontinuitätsunterbrechung (kurze Pfeile) ohne Nachweis von intakten Nervenstrukturen entsprechend einem echten Diskontinuitätsneurom. Im sagittalen Bild Metallartefakte durch Osteosynthese der Clavicula, der große distale Neuromstumpf ist dennoch deutlich erkennbar (Pfeilspitzen).

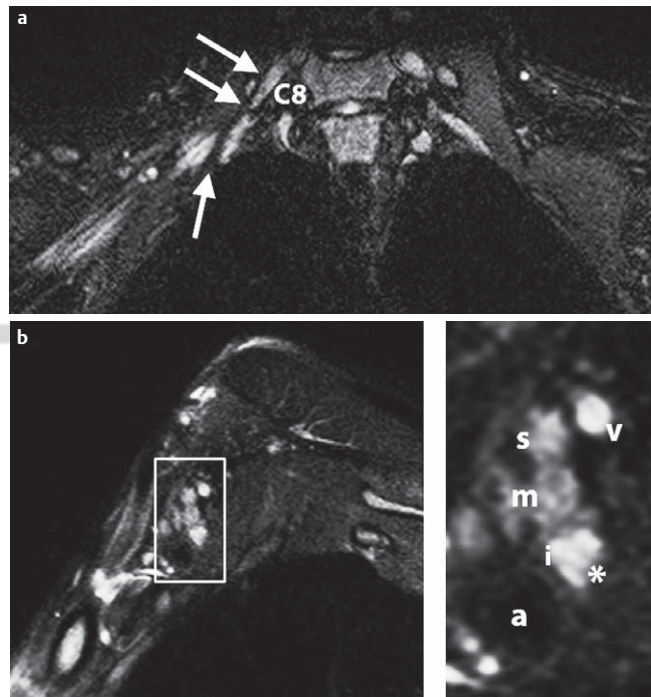
Liegt eine komplette Kontinuitätsunterbrechung eines Plexus-elements mit Neuombildung vor, leistet die Bildgebung die wesentliche diagnostische Hilfe bei der Indikationsstellung zur frühen Operation (• **Abb. 2**). Im Falle eines Kontinuitätsneuroms kann die Bildgebung bislang nicht verlässlich vorhersagen, ob es zu einer Spontanregeneration kommen wird oder nicht. Ist lediglich ein T2-hyperintensives Signal des betroffenen Nerven bei erhaltener Kontinuität und ohne wesentliche Kaliberveränderung gegeben, wie etwa bei einem leichten Traktionsschaden, kann die Spontanregeneration zunächst weiter abgewartet werden.

### Kompression

Eine Kompressionsneuropathie kann in der MRN anhand typischer Kriterien diagnostiziert werden. Am Ort der Kompression findet sich häufig eine Kaliberverminderung durch Einschnürung des Nerven, mit Kaliberauftreibung proximal und distal der Engstelle (• **Abb. 3**). Dies geht einher mit erhöhtem T2-Signal, das ein noch sensitiveres Kriterium als das Kaliber für den Nachweis der Neuropathie ist [3]. Beim Karpaltunnelsyndrom hat die MRN nur Relevanz in den seltenen diagnostisch schwierigen Fällen, etwa bei der Frage nach zusätzlichen Nervenläsionen an anderer Stelle oder bei postoperativ unzufriedenstellendem Verlauf. Bei der Ulnarisneuropathie und ihren Differenzialdiagnosen wird die MR-Neurographie erfolgreich und routinemäßig einge-



**Abb. 3** Typischer MRN-Befund beim Kubitaltunnelsyndrom: Zentral im Sulcus nervi ulnaris (bzw. dem knöchernen Kubitaltunnel) deutliche Verdickung und T2-Läsion des N. ulnaris (Pfeile), die auf den Sulcusbereich beschränkt ist und sich nicht nach proximal oder distal fortsetzt. Als intraindividuelle Kontrolle kann zusätzlich zu den proximalen und distalen Nervenabschnitten auch mit den in diesem Fall asymptomatischen Nervus medianus und radialis verglichen werden (volar bzw. rechts im Bild, nicht vergrößert) der eine normale T2-Signalintensität zeigt.

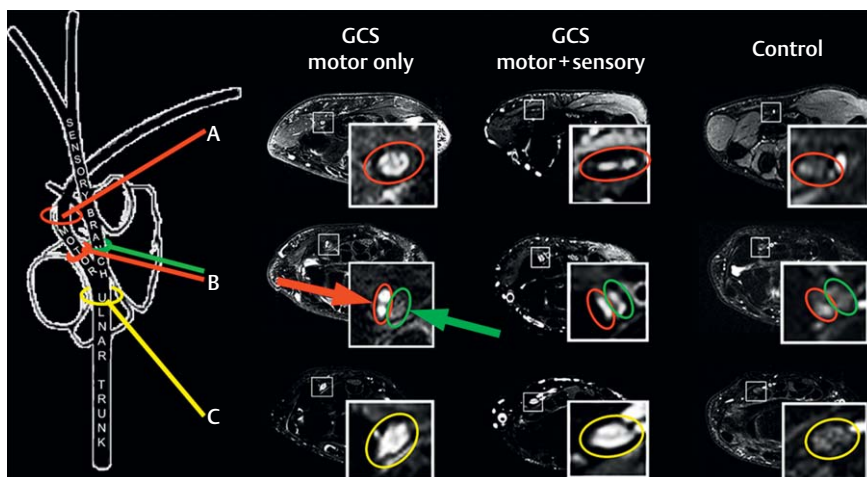


**Abb. 4** Nachweis eines klassischen Thoracic-Outlet-Syndroms. Die koronare SPACE STIR Sequenz zeigt auf der rechten Seite eine bandförmige hypointense Struktur (Pfeile), die vom Processus transversus des HWK 7 in Richtung auf die erste Rippe bzw. Pleurakuppe zieht und dabei unmittelbar den proximalen Plexuselementen C8 und Truncus inferior anliegt. In der sagittalen T2-gewichteten Sequenz dann Bestätigung der pathophysiologischen Relevanz des Bandes: kranial der A. subclavia (a) ist der Truncus inferior (i) im Vgl. zum Truncus superior (s) und medius (m) deutlich T2 hyperintens, (v) bezeichnet eine Vene, nicht zu verwechseln mit pathologischen Nervenstrukturen.

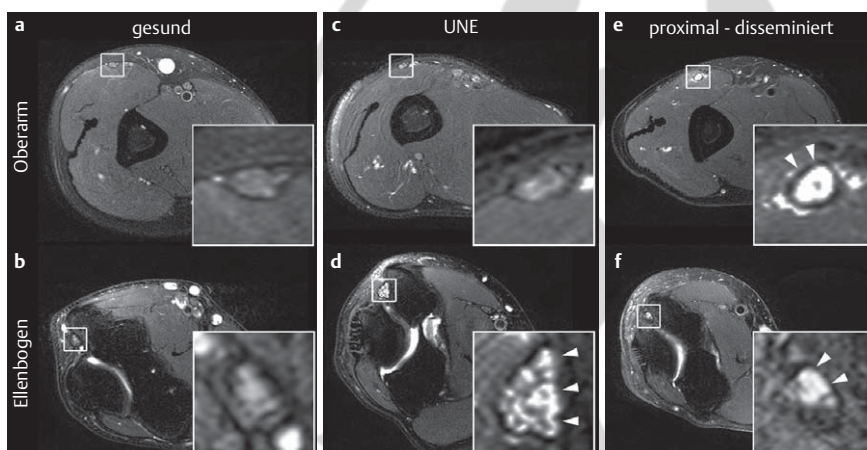
setzt. Sie kann dabei zur präzisen Lokalisation des Schädigungsortes beitragen. Eine neuroforaminale Kompression ist im konventionellen MRT der HWS bereits beurteilbar. Eine Plexopathie ist in der MRN des Plexus brachialis nachweisbar mit genauer Zuordenbarkeit der einzelnen Plexusanteile. So kann z.B. auch beim neurogenen Thoracic Outlet-Syndrom das strukturelle Korrelat der Erkrankung, häufig ein fibröses Band vom Processus transversus des HWK 7 zur ersten Rippe, im MRT visualisiert werden [4]. Eine selektive T2-Läsion in den unteren, durch das Band komprimierten Plexuselementen bestätigt die klinisch relevante Kompression (● **Abb. 4**).

Das Kubitaltunnelsyndrom bzw. die Ulnarisneuropathie am Ellenbogen (UNE) sind durch die MR-Neurographie mit hoher Spezifität und Sensitivität zu diagnostizieren [3]. Ähnlich wie beim Karpaltunnelsyndrom ist eine Zunahme des T2w-Signals in und vor allem unmittelbar proximal der Stelle der Kompression deutlich erkennbar (● **Abb. 3**). Zusätzlich kommt es zu der im operativen Situs und neurosonografisch bereits häufig beschriebenen Kaliberzunahme, dem sog. Pseudoneurom. Dabei kann die Erhöhung des T2w-Signals vor allem zur Diskriminierung zwischen einem klinisch symptomatischen Kubitaltunnelsyndrom und dem gesunden asymptomatischen Zustand dienen. Eine Kaliberzunahme hingegen ist sensitiv und spezifisch für das Vorliegen eines höheren Schweregrads eines Kubitaltunnelsyndroms.

Als seltene Differenzialdiagnose der Ulnarisneuropathie lässt sich auch das Loge-de-Guyon-Syndrom mittels MR-Neurographie mit hoher diagnostischer Genauigkeit nachweisen [5].



**Abb. 5** Typischer Läsionsnachweis beim distalen Ulnarissyndrom (auch Loge-de-Guyon-Syndrom genannt). Bei der typischen Ausprägung mit motorischer Symptomatik (Ausfall der Zielmuskulatur des Ramus profundus n. ulnaris) erkennt man eine schwerpunktmäßig im Ramus profundus zentrierte T2-Läsion (linke Spalte „GCS motor only“). Bei den selteneren Fällen mit zusätzlicher sensibler Symptomatik ist auch der Ramus superficialis deutlich betroffen und erhöht im T2-Signal (mittlere Spalte „GCS motor+sensory“). Die gesunde Kontrollperson hingegen zeigt die typische, allenfalls geringfügig erhöhte T2-Signalintensität (rechte Spalte „Control“). Das anatomische Schema auf der linken Seite verdeutlicht mit farbigen Referenzpositionen die jeweiligen Schichtpositionen und Astdarstellungen (rot: Ramus profundus, grün: Ramus superficialis) [5].



**Abb. 6** Differenzierung einer typischen Ulnarisneuropathie am Ellenbogen (monofokal) von einer disseminierten Neuropathie (multifokal). Auf der linken Seite der Abbildung ist zunächst der Nervus ulnaris jeweils vergrößert zu sehen und zwar im Sulcus n. ulnari am Ellenbogen (unten) sowie deutlich weiter proximal in Oberarmmetage (oben). In der Mitte der Abbildung die typische fokale Ulnarisneuropathie am Ellenbogen mit monofokal T2-signalgesteigertem N. ulnaris im Ellenbogensegment (unten) aber nicht im Oberarmsegment (oben). Auf der rechten Seite der disseminierte Befall des N. ulnaris, der nicht nur monofokal am Ellenbogen sondern auch in der Oberarmmetage pathologisch T2-hyperintens ist [6].

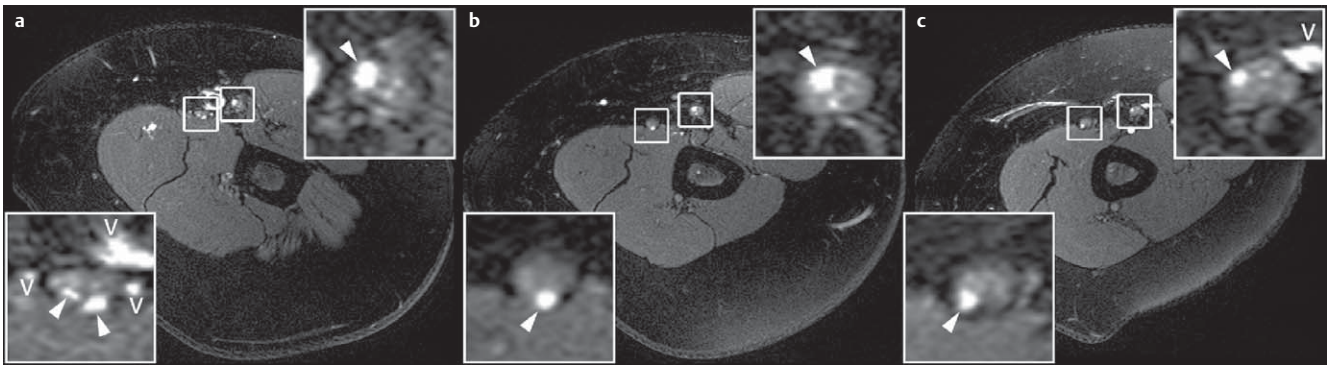
Raumfordernde Ganglienzysten und deren räumliche Beziehung zum N. ulnaris sind zuverlässig nachweisbar. Auch in Abwesenheit einer erkennbaren ursächlichen Raumforderung ist beim idiopathischen Loge-de-Guyon-Syndrom eine deutliche T2-Läsion im Ramus profundus festzustellen. Hingegen sind die sensiblen oberflächlichen Äste und der Hauptstamm – meist in guter Korrelation zur Klinik des Patienten – nur bei seltener sensibler Symptomatik signalangehoben sind, und sonst, ohne das Vorliegen von sensiblen Symptomen, normintens sind (Abb. 5). Dies illustriert die Ortsspezifität des nervalen T2-Signals.

### Inflammatorische Neuropathien

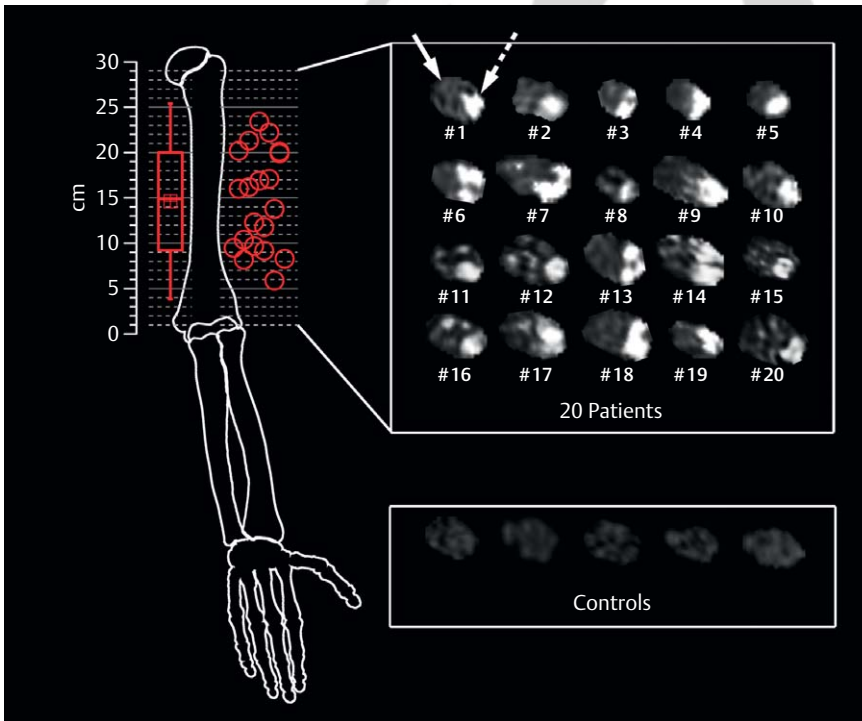
Bei manchen Patienten mit einer Neuropathie unklarer Ätiologie und Lokalisation lässt sich kein einzelner Fokus in der MRN ausmachen. Stattdessen weist der Nerv ein längerstreckig erhöhtes T2w-Signal oder disseminiertes Läsionsmuster mit diskontinuierlichen Nervenläsionen auf (Abb. 6). In solchen Fällen kann primär von einer entzündlichen Nervenerkrankung ausgegangen werden [6]. Dieser Verdacht erhärtet sich insbesondere dann, wenn weitere, häufig noch asymptomatische Läsionen in anderen Nerven der oberen Extremität nachweisbar sind (Abb. 7). Prädilektionsstellen für solche zusätzlichen Läsionen sind typischerweise der Oberarm für den Nervus medianus und der Sulcus radialis humeri für den Nervus radialis. Auch an anderen Prädilektionsstellen für Kompressionsneuropathien manifestieren sich Nervenläsionen im Rahmen entzündlicher Erkrankungen häufig zuerst bzw. die disseminierten Nervenläsionen auf dem Boden der entzündlichen Neuropathien sind am stärksten an typischen Stellen ausgeprägt.

Ein eindruckliches Beispiel für den zusätzlichen diagnostischen Nutzen der MRN gerade bei inflammatorischen Neuropathien ist das Interosseus-anterior-Syndrom (auch Kiloh-Nevin-Syndrom). Hierbei findet sich in der überwiegenden Zahl der Fälle eine langstreckige Nervenläsion im Nervus medianus am Oberarm [7]. Interessanterweise betrifft diese Nervenläsion nicht den gesamten Querschnitt des Nerven, sondern nur die Faszikel, die weiter distal den Nervus interosseus anterior bilden (Abb. 8). Damit belegt die MRN eine entzündliche Genese dieser Neuropathie, während die von Vertretern anderer Fachrichtungen gelegentlich postulierte Kompression am Ellenbogen in diesen Fällen ausgeschlossen werden kann. Zusätzlich wird hiermit erstmals in-vivo am Menschen die lange umstrittene Existenz einer robusten Somatotopie peripherer Nerven auch in proximalen Nervenstämmen belegt.

Die Differenzierung zwischen fokalen und disseminierten oder multifokalen Läsionsmustern ist für den Neurologen und Neurochirurgen natürlich vor allem deswegen eine essentielle diagnostische Information, weil monofokale Neuropathien häufig einer Kompressionsneuropathie entsprechen und somit potentiell chirurgisch behandelbar sind, hingegen multifokale Neuropathien häufig eine immunologische Genese aufweisen. Zusammenfassend ist die Differenzierung von Monofokalität vs. Multifokalität peripherer Nervenläsionen mittels MRN in den meisten klinisch und elektrophysiologisch unklaren Fällen eindeutig möglich und daher eine häufige und sinnvolle Indikationsstellung.



**Abb. 7** Subklinische Nervenläsionen im N. medianus bei Ulnarisneuropathie. Axiale T2-fettgesättigte Schichten von proximal **a** nach distal **c** am Oberarm. Links unten im Bild jeweils der symptomatische N. ulnaris mit faszikulärer Läsion. Rechts oben der asymptotische N. medianus mit ebenfalls längerstreckiger faszikulärer Nervenläsionen. Kleine Venen (v) laufen parallel zu den Nerven, können aufgrund des Verlaufs jedoch mit Sicherheit von pathologischen Nervenfasern differenziert werden [6].



**Abb. 8** Faszikuläre Läsionen des N. medianus auf Oberarmlevel bei Anterior-Interosseus-Syndrom. In 20 Patienten mit Anterior-Interosseus- (Kiloh-Nevin) Syndrom sind die jeweils repräsentativen, axialen, T2-fettgesättigten Schichten durch den Oberarm gezeigt. Die Läsionslokalisation ist in allen Fällen deutlich proximal des Ellenbogens. Innerhalb des N. medianus ist eine robuste Somatotopie erkennbar, mit den zum AIN führenden Fasern dorsolateral im axialen Nervenquerschnitt [8].

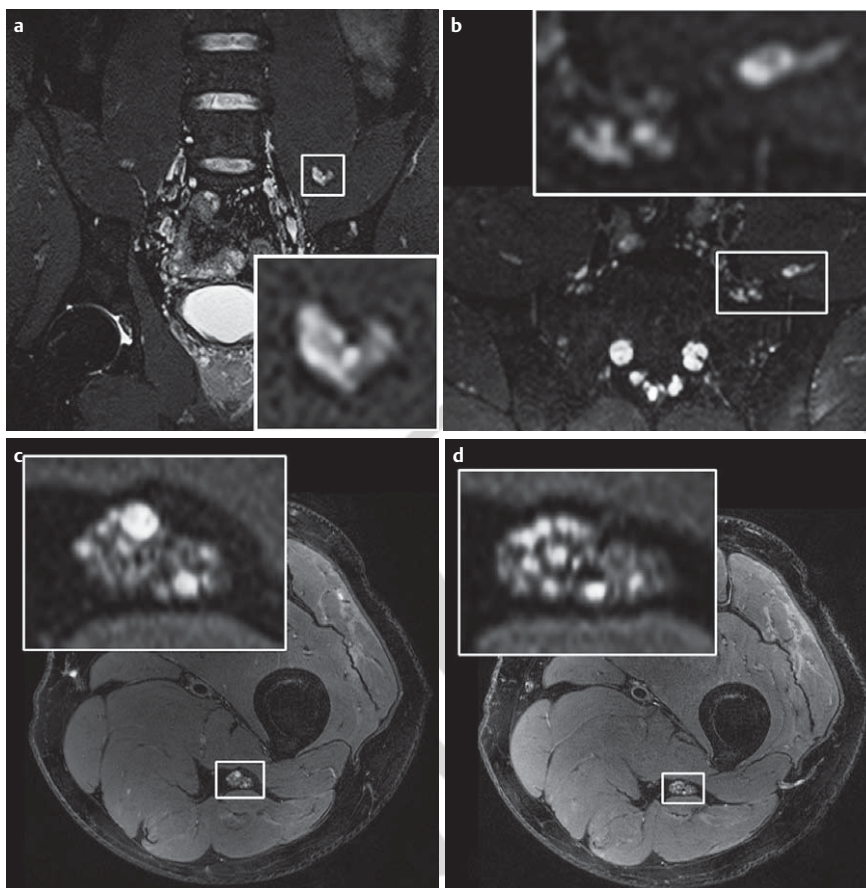
## Polyneuropathien

Polyneuropathien mit distal symmetrisch betonten Symptomen stellen die größte Gruppe peripherer Nervenläsionen dar und können isoliert oder im Rahmen metabolischer (z.B. Diabetes mellitus) oder genetischer Erkrankungen auftreten. Das diagnostische Dilemma liegt oftmals nicht in der Diagnosestellung an sich, sondern in der Erkennung von frühen Stadien des Ausmaßes der Polyneuropathie sowie des Verständnisses der zugrunde liegenden Pathophysiologie. Die MR-Neurographie kann hier einen neuen, nicht-invasiven Beitrag in der Diagnostik leisten. Exemplarisch sei hier die diabetische Polyneuropathie genannt, die häufigste periphere Neuropathie und die häufigste distal symmetrische Polyneuropathie überhaupt. Mit der MR-Neurographie konnten die bereits seit Langem vermuteten proximalen symmetrischen Schwerpunktläsionen der Nervenstämme am Oberschenkel in-vivo nachgewiesen werden [8]. Proximale Nervenschädigungen scheinen dabei dem späteren distalen Faserverlust zeitlich vorauszugehen. Anhand dieser bildgebenden Befunde konnte eines der führenden Konzepte zur

Erklärung der Entstehung diabetischer Nervenschädigungen unterstützt werden. Dieser Erklärungsansatz wurde bereits seit Langem anhand von ex-vivo Befunden aufgestellt, bisher aber nie anhand von in-vivo Befunden unterstützt: durch die Kumulation proximaler multifokaler Nervenläsionen, möglicherweise durch mikrovaskulär ischämische Pathomechanismen vermittelt, kommt es zu einem axonalen Faserverlust – der distale axonale Faserverlust ist also kein primär früher Krankheitsvorgang, sondern folgt erst nach der Kumulation proximaler Läsionen. Das Ausmaß der MR-Signalveränderungen korreliert dabei gut mit dem Schweregrad der klinischen Symptome. Somit liegt offensichtlich mit den Signalveränderungen in der MR-Neurographie ein frühes Korrelat klinisch relevanter Nervenschädigung vor, was z.B. für die Beurteilbarkeit von Therapieeffekten von entscheidendem Vorteil sein könnte.

## Neoplasien des PNS

Die MRN ist die Methode der Wahl in der Diagnostik von Tumoren des peripheren Nervensystems. Sie legt punktgenau die Lo-



**Abb. 9** Nachweis von Tumorvorstufen in peripheren Nerven. In diesem Patienten mit einer Neurofibromatose 2 – assoziierten Polyneuropathie gelingt der Nachweis von multiplen faszikulären Auftreibungen im gesamten PNS. In koronarer Schicht durch den Plexus lumbosacralis **a** ist der linke N. femoralis aufgetrieben und T2-hyperintens. Auf der axialen Schicht **b** sind neben dem N. femoralis zusätzlich bereits kleine faszikuläre Verdickungen des linken Spinalnerven L5 nachweisbar (hyperintense Punkte in Vergrößerung). In 2 repräsentativen axialen Schichten durch den Oberschenkel (**c** und **d**) sind multiple Faszikelverdickungen mit erhöhtem T2-Signal nachweisbar.

kalisation des Tumors und seine Ausdehnung sowie die mögliche Infiltration der Umgebung fest. Die Abbildung der Tumorgöße, der Bezug zu den angrenzenden Weichteilstrukturen und der genaue Entstehungsort, ob innerhalb eines Nervenstamms, extrinsisch am Nervenstamm oder von einem kleinen Seitenast ausgehend, sind entscheidende präoperative Informationen für den Neurochirurgen. Die Visualisierung von übrigen, nicht betroffenen Faszikeln desselben Nerven kann Entscheidungsgrundlage für den operativen Zugangsweg darstellen.

Schon bereits kleinste Tumorvorstufen lassen sich in der MRN visualisieren (Abb. 9) [9]. Dies kann z.B. dann relevant sein, wenn neben einem symptomatischen, größeren Tumor weitere kleinere, bislang asymptomatische Tumoren detektiert werden und somit eine genetische Erkrankung wie die Schwannomatose ursächlich in Frage kommt. Ein weiteres Merkmal von Tumoren peripherer Nerven ist die Kontrastmittelaufnahme. Diese ist unterschiedlich stark ausgeprägt und kann in Schwannomen und plexiformen Neurofibromen sehr heterogen sein.

Neurofibrome weisen im Vergleich zu Schwannomen häufiger ein zentrales KM-Enhancement und ein sogenanntes „target sign“ in T2 auf, welches einer zentralen hypointensen Zone im ansonsten hyperintensiven Tumor entspricht [10]. In Schwannomen sind zentral die einzelnen Faszikel besser erkennbar („fascicle sign“) und sie weisen einen hyperintensiven Randsaum in T2 auf. Eine verlässliche Unterscheidung zwischen Schwannom und Neurofibrom gelingt nicht. Auch bei der klinisch relevanten Einschätzung der Dignität eines peripheren Nervenscheidentumors ist die MRT allein mit einer Sensitivität von 60% und Spezifität von 90% nicht hinreichend verlässlich [11]. Eine Größe über 5 cm, schlecht abgrenzbare Tumorränder, Invasion in das angrenzende Fettgewebe sowie umgebendes Ödem können je-

doch ein Hinweis sein auf das Vorliegen eines Malignen Peripheren Nervenscheidentumors (MPNST).

Nicht jede Kaliberauftreibung eines peripheren Nerven entspricht einem echten Tumor [12–14]. Bei entzündlichen Erkrankungen kommt es gelegentlich zu einer ausgeprägten pseudotumorösen Anschwellung des Nerven. Eine langstreckige Untersuchung der betroffenen Extremität bspw. zusätzlich der Gegenseite kann weitere entzündliche Läsionen im selben Nerven oder in anderen Nerven detektieren und damit die weitere Diagnostik und Therapie in Richtung von entzündlichen gegenüber neoplastischen Erkrankungen lenken. Die zuverlässige Differenzialdiagnose zwischen denjenigen Tumorentitäten, die sich diffus entlang peripherer Nerven ausdehnen können (also vor allem MPNST oder Perineuriome) und schweren Kaliberauftreibungen im Rahmen chronisch-entzündlicher Erkrankungen ist auch mittels MRN weiterhin schwierig.

#### Fazit für die Praxis

Die MR-Neurographie ist eine sinnvolle Ergänzung in der Diagnostik des peripheren Nervensystems, insbesondere in Fällen, die mittels Elektrophysiologie und Neurosonographie nicht eindeutig zu klären sind. Die Indikationen reichen von traumatischen Verletzungen, Kompressionsneuropathien, entzündlichen Neuropathien und Polyneuropathien zu Neoplasien des PNS. Mittels der MR-Neurographie lassen sich Läsionen der peripheren Nerven exakt lokalisieren. Anhand des Verteilungsmusters der Läsionen in einem Patienten können dabei Rückschlüsse auf die Genese der Erkrankung gezogen werden. Dies erlaubt mindestens eine Eingrenzung der Differenzialdiagnosen, häufig sogar eine definitive Diagnose.



## Zur Person



**Dr. med. Philipp Bäumer**, Jahrgang 1981, studierte Medizin in Heidelberg, Stockholm, Sydney und Bern. Doktorarbeit in der Neurobiologie an der Harvard Medical School in Boston. Approbation 2008 sowie zusätzlicher Abschluss im Masterstudiengang Health Care Management in Heidelberg/Mannheim. Seit 2009 arbeitet er in der Abteilung Neuroradiologie unter Leitung von Prof. Dr. Bendszus am Universitätsklinikum Heidelberg. Sein Forschungsschwerpunkt ist die MR-Neurographie, für seine Arbeiten erhielt er 2011 den Marc-Dünzl Preis der Deutschen Gesellschaft für Neuroradiologie.

## Interessenkonflikt

Die Autoren geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

## Literatur

- 1 Bendszus M, Stoll G. Technology insight: visualizing peripheral nerve injury using MRI. *Nat Clin Pract Neurol* 2006; 1: 45–53
- 2 Kastel T, Heiland S, Baumer P et al. Magic Angle Effect: A Relevant Artifact in MR Neurography at 3T? *Am J Neuroradiol* 2011; 32: 821–827
- 3 Baumer P, Dombert T, Staub F et al. Ulnar neuropathy at the elbow: MR neurography – nerve T2 signal increase and caliber. *Radiology* 2011; 260: 199–206
- 4 Baumer P, Kele H, Kretschmer T et al. Thoracic outlet syndrome in 3T MR neurography–fibrous bands causing discernible lesions of the lower brachial plexus. *Eur Radiol* 2014; 24: 756–761
- 5 Kollmer J, Baumer P, Milford D et al. T2-signal of ulnar nerve branches at the wrist in guyon's canal syndrome. *PLoS One* 2012; 7: e47295
- 6 Baumer P, Weiler M, Ruetters M et al. MR Neurography in Ulnar Neuropathy as Surrogate Parameter for the Presence of Disseminated Neuropathy. *PLoS One* 2012; 7: e49742
- 7 Pham M, Baumer P, Meinck HM et al. Anterior interosseous nerve syndrome: Fascicular motor lesions of median nerve trunk. *Neurology* 2014; 82: 598–606
- 8 Pham M, Oikonomou D, Baumer P et al. Proximal neuropathic lesions in distal symmetric diabetic polyneuropathy: findings of high-resolution magnetic resonance neurography. *Diabetes Care* 2011; 34: 721–723
- 9 Baumer P, Mautner VF, Baumer T et al. Accumulation of non-compressive fascicular lesions underlies NF2 polyneuropathy. *J Neurol* 2012; 260: 38–46
- 10 Jee WH, Oh SN, McCauley T et al. Extraaxial neurofibromas versus neurilemmomas: discrimination with MRI. *AJR Am J Roentgenol* 2004; 183: 629–633
- 11 Li CS, Huang GS, Wu HD et al. Differentiation of soft tissue benign and malignant peripheral nerve sheath tumors with magnetic resonance imaging. *Clin Imaging* 2008; 32: 121–127
- 12 Simmons Z, Mahadeen ZI, Kothari MJ et al. Localized hypertrophic neuropathy: magnetic resonance imaging findings and long-term follow-up. *Muscle Nerve* 1999; 22: 28–36
- 13 Golan JD, Jacques L. Nonneoplastic peripheral nerve tumors. *Neurosurg Clin N Am* 2004; 15: 223–230
- 14 Koszyca B, Jones N, Kneebone C et al. Localized hypertrophic neuropathy: a case report and review of the literature. *Clin Neuropathol* 2009; 28: 54–58