



15.07.2026

Querschnittlähmung: Therapieansätze und aktueller Forschungsstand

In der Vergangenheit haben Studien, in denen Querschnittgelähmte vermeintlich wieder Laufen gelernt haben sollen, medial oft große Aufmerksamkeit erregt. Dabei ist die wissenschaftliche Forschung selten weit fortgeschritten, aber Studien mit Einzelfallbeschreibungen suggerieren Hoffnung auf eine potenzielle Heilung.

Bei einer Querschnittverletzung wird das Rückenmark – und somit die zentrale Nervenverbindung zwischen Gehirn und Körper – teilweise oder vollständig geschädigt. Dies umfasst Nervenfasern, Nervenschaltstellen und Nervenwurzeln im Bereich der verletzten Stelle. Die Aussichten auf eine Regeneration der beschädigten Nervenstrukturen sind bislang schlecht. Das liegt vor allem daran, dass das Rückenmark nur mit einer begrenzten Zahl nachwachsender Zellen ausgestattet ist und die auf die Verletzung folgende Entzündungsreaktion ebenfalls einer Regeneration entgegenwirkt. Aktuelle wissenschaftlichen Versuche, eine Querschnittlähmung zu heilen, verfolgen verschiedene Ansätze. Moleküle sollen regenerationshemmende Proteine inaktivieren. Zelltransplantationen sollen abgestorbene Zellen ersetzen und/oder Wachstumsfaktoren zum Rückenmark bringen. Verschiedene Neurotechnologien – von Elektrostimulationsgeräten bis hin zu implantierbaren Gehirn-Computer-Schnittstellen – sollen motorische Fähigkeiten wiederherstellen. Aber wann genau ist ein Bericht über einen tatsächlichen oder vermeintlichen Erfolg berichtenswert? Wie weit ist die Forschung in diesem Bereich fortgeschritten? Was wären zukünftige Meilensteine und Durchbrüche?

Dieses Fact Sheet bietet einen Überblick über Therapien, die derzeit intensiv beforscht werden, über deren Ziele und darüber, wie weit der klinische Einsatz bisher erprobt ist. Es soll als Hilfestellung dienen, neue Studien zu Heilungsversprechen bei Querschnittlähmung in die Vielzahl der bisherigen Ansätze besser einordnen zu können. Der Fokus dieses Fact Sheets liegt auf motorischen Fähigkeiten, da diese einen medialen Fokus darstellen. Daneben gibt es eine Vielzahl von mindestens ebenso wichtigen Symptomen.



Übersicht

Was ist Querschnittlähmung?	2
Therapieansatz 1: Schutz des verletzten Rückenmarks	4
Therapieansatz 2: Regeneration des Rückenmarks	5
Therapieansatz 3: Neue Zellen für das Rückenmark	7
Therapieansatz 4: Technische Unterstützung	9
Hintergrund: Phasen klinischer Studien	13
Fazit und Ausblick	14
Literaturstellen, die zitiert wurden	15
Weitere Recherchequellen	18

Was ist Querschnittlähmung?

- ▶ Schädigung oder Durchtrennung des Rückenmarks infolge von Unfällen (traumatisch) oder als Krankheitserscheinung bei Tumoren, Blutungen, Durchblutungsstörungen und neurodegenerativen Krankheiten (chronisch)
- ▶ Folgen sind Lähmungen von allen vier Extremitäten bzw. nur der Beine (Tetra- bzw. Paraplegie), meist auch Beckenboden- und Rumpfmuskulatur und Sensibilität (Berührung, Schmerz, Temperatur, Tiefensensibilität), aber zum Beispiel auch Beeinträchtigung des vegetativen Nervensystems (v.a. Blasen-/Darmfunktion, Schweiß-/Temperaturregulation, periphere Durchblutung, Herz-Kreislauffunktion etc.)
- ▶ Verletzungshöhe und -schwere der Rückenmarksschädigung sind ausschlaggebend für genaue Ausprägung der Folgen; im Einzelfall sehr unterschiedlich
- ▶ in Deutschland momentan 140.000 Menschen wegen Querschnittlähmung in Behandlung [1]
- ▶ jedes Jahr rund 2400 neue Fälle

Akute Phase [2]

- ▶ in ersten vier bis sechs Wochen nach der Rückenmarksverletzung
- ▶ geht meist mit schlaffen Lähmungen und fehlenden Reflexen einher
- ▶ Schwellung und Entzündungsreaktion des Rückenmarks
- ▶ durch nervenschützende (neuroprotektive) Maßnahmen und Operationen wird versucht, die Nervenschädigung so gering wie möglich zu halten

Subakute Phase

- ▶ bis circa sechs Monate nach Eintritt der Querschnittlähmung
- ▶ neuropathische Schmerzen und in vielen Fällen Spastik
- ▶ Ziel von Reha-Maßnahmen: höchstmögliche Selbständigkeit und Unabhängigkeit (soweit möglich Training der Geh-/Steh-/Arm-/Handfunktion, Rollstuhltraining, Lösungen für Harn- und Darmentleerung) – abhängig von Verletzungshöhe und -schwere [3]



Chronische Phase

- ▶ ab circa sechs Monaten nach der Verletzung
- ▶ ohne intensive Therapie keine weiteren wesentlichen Veränderungen im Zustand

▶ Beurteilung des Schweregrades

- ▶ laut Leitlinie [3] anhand der ASIA-Impairment-Scale (AIS), einer fünfstufigen Skala zur Beurteilung des Schweregrades der Querschnittlähmung: Einstufung anhand der verbliebenen sensiblen und motorischen Fähigkeiten unterhalb der Verletzung, eingeführt von der American Spinal Injury Association (ASIA)
 - AIS Level A: kompletter Verlust der Sensorik und Motorik
 - AIS Level B: teilweise erhaltene Sensorik, kompletter Verlust der Motorik
 - AIS Level C-D: teilweise erhaltene Sensorik und Motorik, D mit etwas mehr Kraftentwicklung in einzelnen getesteten Muskeln, gewisser Alltagsnutzen ist erhalten
 - AIS Level E: keine Einschränkungen, gesunde Referenz
- ▶ besonders wichtig für die Regenerationsaussichten: Unterscheidung zwischen kompletter oder inkompletter Querschnittlähmung, vor allem Ausmaß des Schadens an der jeweiligen Struktur (Nervenbahnen, Nervenwurzeln, Nervenschaltstellen)
- ▶ Neurological Level of Injury (NLI) gibt das Rückenmarkssegment an, bis zu welchem die motorische und sensorische Funktion noch auf beiden Seiten des Körpers intakt ist; generell gilt hier: je höher die Verletzung, desto mehr Regionen des Körpers sind gelähmt



Therapieansatz 1: Schutz des verletzten Rückenmarks

- ▶ in der akuten Phase kurz nach der Verletzung sollte das Rückenmark möglichst vor anhaltenden Schädigungen geschützt/ diese begrenzt werden
- ▶ eingesetzte Medikamente wirken v.a. gegen die Entzündung im Bereich der Verletzung und die Reizüberflutung der verbleibenden Nerven [4] [5]
- ▶ Ziel ist es, den entstandenen Schaden des Rückenmarks so gering wie möglich zu halten
- ▶ in diesem Bereich wurden die folgenden Medikamente getestet:

▶ Methylprednisolon (MP)

- ▶ wirkt vor allem entzündungshemmend und abschwellend an der verletzten Stelle

Stand der Forschung

- in umfangreichen Studien zu akuter Querschnittlähmung (NASCIS) in den USA getestet
- liefern gemischte Ergebnisse: leichte neurologische Verbesserungen, aber auch statistisch signifikant erhöhtes Vorkommen von erheblichen Nebenwirkungen wie Sepsis, Magen-Darm-Blutungen und Lungenentzündung [6]
- Kritik an der Methodik dieser Studien wegen fehlender Placebogruppen, unzureichender Patientenbeschreibungen, sowie Vorabveröffentlichung der Studienergebnisse [7]
- in Deutschland wird die klinische Anwendung nicht mehr empfohlen [3]

▶ Erythropoetin (EPO)

- ▶ potenzieller Ersatz des umstrittenen Methylprednisolon
- ▶ aktiviert Signalwege, die schützend gegen oxidativen Stress und Entzündungen wirken, verhindert weiteres Absterben der Zellen

Stand der Forschung

- Studien zeigen vor allen in Tierversuchen positiven Effekt auf Nervenfunktion, ebenfalls in ersten Pilotstudien positive Auswirkungen [8] [9], in vergleichenden Studien schneidet EPO besser ab als MP [10] [11] [12]

▶ Minocyclin

- ▶ Tetracyclin-Antibiotikum mit entzündungshemmenden Eigenschaften, soll Zellschäden nach Querschnittverletzung reduzieren

Stand der Forschung

- Phase-II-Studie in Patientinnen und Patienten mit akuter traumatischer Querschnittlähmung: kein klarer klinischer Nutzen bestätigt [13]

▶ Riluzol

- ▶ Natrium-Kanal-Blocker, senkt Zellsterben und Überstimulation der Nerven nach der Verletzung
- ▶ für Amyotrophe Lateralsklerose (ALS), eine neurodegenerative Erkrankung mit Muskelschwäche, zugelassen; Hoffnung auf Übertragbarkeit auf Querschnittlähmung



Stand der Forschung

- Phase-III-Studie (RISCIS) mit 351 Betroffenen mit akuter traumatischer Querschnittlähmung: potenzieller Nutzen für motorische Funktion, statistische Signifikanz nicht bewiesen [14] [15] [16]

Therapieansatz 2: Regeneration des Rückenmarks

- ▶ langfristiges Ziel der regenerativen Behandlung: Nerven sollen nachwachsen, beschädigte ersetzt werden und sich neu verknüpfen, soll zur Regeneration der Nervenfunktion führen
- ▶ aber: verschiedene Mechanismen wirken der Erholung des Rückenmarks entgegen
 - Regenerationsfähigkeit des zentralen Nervensystems (Rückenmark und Gehirn) – verglichen mit dem peripheren (andere Nerven) – sehr begrenzt
 - Rückenmark und Gehirn verfügen kaum über Reparaturmechanismen für verletzte Nerven
 - Umgebung des verletzten Rückenmarks hemmt die Regeneration, z.B.: Nerven isolierendes Myelin setzt hemmende Proteine frei, die das Nervenwachstum erschweren
- ▶ regenerationshemmende Proteine als Angriffspunkt für verschiedene Arzneimittel: minimiert man diese Hemmung, fördern die Medikamente die Erholung der Nervenfasern im Rückenmark
- ▶ Schwierigkeit: regenerierte Nervenbahnen müssen bis zur ursprünglichen Zielstruktur weiterwachsen, diese finden und an der ursprünglichen Stelle eine neue Nervenverbindung bilden, geht über Überbrückung des verletzten Bereichs hinaus
- ▶ im Folgenden sind Therapieansätze aufgelistet, die in diesem Bereich erforscht werden

▶ AXER-204

- ▶ Protein, das die Wirkung der Hemmstoffe (Nogo-A, MAG, OMgp) verhindert, indem es ihre Zielstruktur, den NgR1-Rezeptor, auf der Oberfläche von bestimmten Nervenzellen blockiert
- ▶ Anwendung bei chronischer Querschnittlähmung: mindestens ein Jahr nach Verletzung

Stand der Forschung

- abgeschlossene Phase-I/II-Studie in den USA [17]: insgesamt keine signifikante Verbesserung der motorischen Fähigkeiten über alle Patientinnen und Patienten hinweg
- aber: in Subgruppe mit inkompletter Querschnittlähmung Hinweis auf geringe Verbesserung der Motorik

▶ Nogo-A-Antikörper

- ▶ Nogo-A ist erster entdeckter Subtyp der hemmenden Proteine [18]
- ▶ Antikörper inaktiviert Nogo-A, so soll Regeneration der Nervenfortsätze gefördert werden [19]



Stand der Forschung

- abgeschlossene Phase-II-Studie zu Nogo-A-Antikörper: Antikörper-Therapie in den ersten vier bis acht Wochen nach der Verletzung ohne signifikante Verbesserung der Motorik in den oberen Extremitäten [20], dazu hat das SMC Statements von Forschenden eingeholt [1]
- Subgruppen-Analyse: positive Hinweise für verbesserte motorische Erholung gefolgt von verbesserter funktioneller Erholung bei inkomplett Querschnittgelähmten: soll in weiteren Studien untersucht werden
- seit Dezember 2024: laufende Phase-I-Studie (SPROUT) von NovaGo Therapeutics AG zu weiterem Nogo-A-Antikörper

► NVG-291

- im Zuge der Rückenmarksverletzung kommt es zur Narbenbildung des umgebenden Gewebes
- Narben enthalten Chondroitinsulfat-Proteoglykane (CSPG): wirken der Regeneration entgegen, unter anderem über Bindung an den PTP σ -Rezeptor
- Protein NVG-291 des Herstellers NervGen soll an Rezeptor binden und so die hemmende Wirkung von CSPG verhindern

Stand der Forschung

- in Tierstudien: positive Effekte auf das Nervenwachstum [21]
- Phase-I- und Phase-I/II-Studie: laut Pressemitteilung erhöhte motorisch evozierte Potenziale in einem Handmuskel, nur dieser eine von zwei Endpunkten statistisch signifikant geändert
- Hersteller plant Phase-III-Studie



Therapieansatz 3: Neue Zellen für das Rückenmark

- ▶ Transplantation von Zellen in die Nähe des Rückenmarks
- ▶ transplantierte Zellen sollen zur Verletzung wandern und verletztes Gewebe ersetzen
- ▶ oder: unterstützen Regeneration des Rückenmarks, indem sie schützend auf das Nervengewebe wirken oder wachstumsfördernde Faktoren ausschütten [22] [23]
- ▶ verschiedene Zellarten kommen infrage; Stammzellen am beliebtesten: entwickeln sich in unterschiedliche Zellarten weiter, können antientzündlich wirken, sind im Labor leichter zu vermehren
 - transplantierte Zellen entweder aus neuronal vordifferenziertem Gewebe (z.B. fötales Gewebe) gewonnen oder aus undifferenziertem Gewebe (z.B. induzierbare pluripotente Stammzellen) in Nervenzellen überführt
- ▶ unterschiedliche Verabreichungsmethoden untersucht:
 - intrathekal, also direkt in das Nervenwasser um das Rückenmark
 - intravenös: ins Blut
 - intraläsional: direkt in die Verletzung
 - Zellen werden z.T. über Gerüststrukturen, zum Beispiel Kollagengerüste oder Hydrogele, eingebracht [24] [25]
- ▶ statt neue Zellen zu injizieren: körpereigene Zellen mittels Gentherapie zu Nervenzellen umprogrammieren
 - laufende First-in-Human-Studie in Südkorea

Herausforderungen und Zukunft

- ▶ entzündliche Umgebung sorgt für meist schlechtes Überleben der transplantierten Zellen im Gewebe und erschwerte Integration in das bestehende Gewebe
- ▶ weitere Erkenntnisse über Zellarten, deren Aufgaben und Entstehungsmechanismen erforderlich
- ▶ weitere Spezifizierung der Transplantatzellen in z.B. motorische oder sensible Nervenzellen: Differenzierung im Labor nötig, die weiterer Forschung bedarf [26]
- ▶ häufig neuronale oder mesenchymale Stammzellen eingesetzt, welche beide im Folgenden kurz vorgestellt werden
- ▶ Wachstum von Nervenbahnen kann mit verschiedenen Ansätzen gefördert werden, aber das Wiederherstellen der früheren Nervenverbindungen ist bislang nicht realistisch

▶ Neuronale Stammzellen

- ▶ besitzen die besondere Fähigkeit, sich zu anderen Nervenzellen weiterzuentwickeln oder „auszudifferenzieren“
- ▶ Weiterentwicklung zu Nervenzellen, die dann Verbindungen zu noch bestehenden Nervenzellen herstellen können
- ▶ oder Weiterentwicklung zu nervenumgebenden Stützzellen (Gliazellen), die das verletzte Gewebe beispielsweise durch Wachstumsfaktoren modellieren [27] [28] [29]
- ▶ aus fötalem Gewebe gewonnen, ethisch umstritten, unterliegt in Deutschland hohen Auflagen



- ▶ mögliche Alternativen: Umprogrammierung von körpereigenen Zellen, die dann neues Nervengewebe bilden, um die Risiken einer Transplantation zu umgehen [30] [31] oder Gewinnung aus humanen induzierten pluripotenten Stammzellen (hiPSC)
 - hiPSC können aus gespendeten Körperzellen gewonnen werden, indem diese zu noch undifferenzierten Stammzellen zurückentwickelt werden
 - Weiterentwicklung dieser undifferenzierten Stammzellen zu z.B. neuronalen Stammzellen, die dann transplantiert werden

Stand der Forschung

- Durchführbarkeit und Sicherheit für neuronale Stammzelltransplantation, gewonnen aus abgetriebenen Föten, gezeigt; noch kein Wirksamkeitsbeweis
- Transplantation von neuronalen Stammzellen aus Föten in Phase-I- und II-Studien mit kleinen Patientenkohorten: allenfalls Hinweise auf Verbesserung der Sensibilität und teilweise Motorik, langfristig jedoch keine signifikanten Verbesserungen [32] [33] [34]
- alternative Ansätze mit im Labor hergestellten hiPSC: erste Phase-I-Studie aus Japan mit vier Personen zur Sicherheit der Transplantation neuronaler Stammzellen aus hiPSC; positive Ergebnisse in Pressekonferenz berichtet: ein Patient soll Muskeln der Arme und Beine bewegen können, ein weiterer stehen [28] [35], Studientyp nicht zur Feststellung von Wirksamkeit geeignet, bisher keine peer-reviewte Publikation der Ergebnisse

▶ Mesenchymale Stammzellen

- ▶ sollen ins Rückenmarksgewebe einwandern, dort Eigenschaften neuronaler Zellen annehmen und Gewebe mit entzündlichen Faktoren anreichern: weniger Narbenbildung und Erhalt des nervenschützenden Gewebes [23]
- ▶ unter anderem aus dem Knochenmark, Zahnmark, Fettgewebe oder Nabelschnur gewonnen, werden vor der Transplantation im Labor vermehrt und weiterentwickelt
- ▶ häufig gegenüber neuronalen Stammzellen bevorzugt verwendet: leichtere Gewinnung und weniger ethische Bedenken, nicht aus Föten, möglicherweise aus dem eigenen Körper gewonnen, dadurch nur geringes Risiko einer Abstoßungsreaktion des Immunsystems [36]

Stand der Forschung

- Sicherheit und Wirksamkeit in Studien im Tiermodell gezeigt, in klinischen Studien waren Ergebnisse zur Wirksamkeit und Sicherheit in ersten Studien übertragbar, wobei die Zellen aus unterschiedlichen Geweben gewonnen wurden:
- **aus Fettgewebe:** Phase-I-Studie (10 Personen): Transplantation körpereigener mesenchymaler Stammzellen in Rückenmark sicher, bei 7 Personen Hinweis auf Verbesserung des Berührungsempfindens [37], laufende **Phase-II-Studie** ohne Ergebnisse
- **aus Nabelschnur:** umfangreichere Phase-I/II-Studie (143 Patientinnen und Patienten) ohne Kontrollgruppe zur Transplantation mesenchymaler Stammzellen aus Nabelschnur-Gewebe ergab Hinweis auf Verbesserung der Sensibilität und Motorik in allen Subgruppen [38]
- **aus Knochenmark:** bereits in Phase-III-Studien getestet: Hinweis auf Verbesserungen der Sensibilität und Motorik [39] [40] [41]: beste Ergebnisse für kombinierte Therapien aus mesenchymalen Stammzellen in Kombination mit bestimmten Nervenstützzellen [42] [43], fördern besonders die Regeneration des Nerven isolierenden Myelin [44] [45]



Therapieansatz 4: Technische Unterstützung

- ▶ verlorene Fähigkeiten sollen auf technischem Weg wiederhergestellt werden
- ▶ Geräte werden momentan vor allem in Rehabilitationstherapie eingesetzt; in Einzelfällen Berichte von langfristiger Wiederherstellung motorischer Fähigkeiten
- ▶ Nutzung soll Anpassung noch vorhandener Nervenverbindungen verbessern
- ▶ **Elektrische Stimulation**
 - ▶ trotz Verletzung des Rückenmarks können unterhalb der Verletzung Nervenschaltstellen im Rückenmark und periphere Nerven in den Armen und Beinen noch funktionsfähig geblieben sein [46]
 - aber für Funktion fehlen Nervenbahnen über der Verletzungsstelle im Rückenmark und Nervenschaltstellen und Nervenwurzeln direkt im Verletzungsbereich
 - ▶ Prinzip: elektrische Vorgänge an diesen Nerven oder Muskeln (die nicht mehr durch Nerven versorgt sind) künstlich beeinflussen
 - künstliche elektrische Impulse starten Aktionspotenziale an Fasern
 - länger anhaltende konstante elektrische Felder beeinflussen die Erregbarkeitsschwelle von Zellmembranen für Aktionspotenziale
 - ▶ über externe Elektroden an der Hautoberfläche oder implantierte Elektroden nahe von Nervenstrukturen: elektrische Nervenstimulation von
 - motorischen Fasern: Muskelkontraktion
 - sensorischen Fasern: übermitteln Informationen über äußere Reize und Körperposition über Rückenmark weiter zum Gehirn
 - ▶ Ziel 1: Bewegungsmuster in gelähmten Extremitäten wieder möglich machen
 - Bewegungsstörungen individuell, sowohl Muskelaktivierung als auch Modifikation (Verstärkung oder Beruhigung) von Muskeleigenaktivität nötig, Beispiele von adressierten Bewegungsstörungen:
 - Lähmung, spastische Muskelkontraktion, andauernde Muskelspannungen (Tonus), rhythmische Schüttelbewegungen (Klonus)
 - ▶ Ziel 2: vorhandene Nervenstrukturen, Muskeln, Weichteile und Knochen gesund erhalten – für systemische Gesundheit und Fitness, für mögliche künftige Entwicklungen in Biologie und Technik
 - ▶ bisher überwiegend Einzelfallstudien oder Fallserien an sehr wenigen Patienten: Stimulationstechnologien können Gehfähigkeit unter Gewichtsentlastung unterstützen, nervenabhängige sexuelle Fehlfunktion und neuropathische Schmerzen positiv beeinflussen

Herausforderungen und Zukunft

- Studien an einzelnen Querschnittgelähmten ohne Kontrollgruppen oder Verblindung, erfordert gleichzeitig sehr aufwendige und individuelle Rehabilitations- und Trainingsmaßnahmen, um Erfolge zu erzielen; Einzelfälle nicht auf andere Querschnittgelähmte übertragbar



Elektrische Stimulation am Rückenmark

- ▶ Elektroden werden über dem Rückenmark (epidural oder nicht-invasiv auf der Haut) unterhalb der Rückenmarksverletzung implantiert [47]
- ▶ Geräte werden mit Strom aus einem Pulsgenerator versorgt (am Körper getragen oder ebenfalls implantiert)
- ▶ auch Stimulation sensibler Nervenwurzeln an der Rückseite des Rückenmarks unterhalb der Verletzung über rückenmarksnah platzierte Elektroden
- Reaktivierung des geschädigten Rückenmarks durch Ersetzen fehlender Signale
- Stimulation des Rückenmarks ergänzt bestimmte Aktivierungsmuster, wie sie sonst natürlicherweise dort beim Gehen oder Stehen entstehen (grob und wenig selektiv im Vergleich zu natürlichen Nervenaktivierungen)
- ▶ Anwendung immer in Verbindung mit intensivem, langfristigem funktionsorientiertem Training (Rehabilitation): Aktivierungsmuster des Rückenmarks werden verstärkt und Muskeln aufgebaut; motorische Fähigkeiten können so wieder in beschränktem Umfang zurückgewonnen werden

Stand der Forschung

- invasive, aufwendige Verfahren, nur von wenigen Gruppen weltweit durchgeführt und erforscht; publizierte Einzelfall-Berichte z.B.:
- erste Publikation 2011 in Louisville: ein Patient mit epiduraler Stimulation und intensiver Rehabilitation: gehhilfenunterstützte Schritte unter voller Gewichtsbelastung [48]
- Hinweise für unabhängigeres Gehen [49] [50], Radfahren und Schwimmen – bisher ausschließlich an Einzelfällen oder geringen Fallserien [52] mit günstiger Regenerationsausgangslage
- non-invasive Stimulation mit ARC-EX-System an 65 Personen getestet: verbesserte Kraft und Funktion der oberen Extremität [76], Firma ONWARD, hat bereits FDA-Zulassung

Elektrische Stimulation peripherer Nerven

- ▶ Stimulation bestimmter Nerven oder Muskeln in z.B. Armen oder Beinen oder für bestimmte Körperfunktionen (wie Blasenfunktion) [53]
- ▶ ursprüngliche Anwendung zur Schmerztherapie, auch weiterhin breit angewendet
- ▶ nicht-invasiv möglich: Stimulation der peripheren Nerven durch auf der Haut haftende Elektroden, neuerer Trend: Integration der Elektronik in Kleidungsstücke

Stand der Forschung

- in klinischen Studien sowohl auf motorische Verbesserungen, Schmerztherapie und vegetative Funktionen getestet, Einsatz meist nur episodisch und nicht langfristig
- Studie mit 22 Betroffenen: Stimulation der Nerven in Armen/Beinen in ersten sechs Monaten nach Verletzung; fortschreitender Funktionsverlust der Nerven vermindert [54]
- in Machbarkeitsstudien: Hinweise auf motorische Verbesserungen, Verringerung von Spastik und neuropathischen Schmerzen [55] [56]
- neuere Ansätze erforschen stimulierende Kleidung und elektrisch leitende Hydrogele, die in die Läsion appliziert werden und durch Ultraschall angeregt werden können [57] [58] [59] [60]



Vagusnerv-Stimulation

- ▶ Vagusnerv ist ein Hirnnerv, seine Äste reichen von Hirnstamm bis Darm
- ▶ reguliert Funktion vieler innerer Organe: z.B. Ohr, Rachen, Stimmapparat, Herz und Lunge sowie Magen, Leber, Gallenblase, Darm, Blutgefäße, Hautfeuchte, ...
- ▶ Äste des Vagusnerv sind bei Querschnittverletzungen oft mitgeschädigt, Stimulation soll Nervenregeneration und damit Wiederherstellung motorischer Fähigkeiten und Beckenbodenfunktionen nach Querschnittverletzung fördern [61]

Stand der Forschung

- **Phase-II-Studie** mit 19 Patientinnen und Patienten mit inkompletter zervikaler Querschnittlähmung im zwölfwöchigen Rehabilitationsprogramm der Arme mit zeitgleicher Vagusnerv-Stimulation: Verbesserung der Hand- und Armkraft und alltagsrelevanter Funktionen [75]
- Weiterführung der **Phase-II-Studie** untersucht Auswirkungen auf motorische Fähigkeiten der Beine und auf Kontrolle der Harnblase

▶ Exoskelette

- ▶ Gestelle, die gelähmte Extremitäten umschließen, Halt bieten und zugleich Bewegungen ermöglichen sollen
- ▶ Impuls-Messung der Muskeln oder KI-gestützte Technologien, um die Bewegungsabsichten des Menschen zu erkennen und auszuführen
- ▶ meist nur im klinischen Umfeld in Rehabilitationsprogrammen eingesetzt, teuer und ohne Hilfe nicht anziehbar, Balancehalten erfordert Hilfsperson
- ▶ Vorteil: vertikale Lage des Körpers trainiert Herz und Kreislauf, belastet die Knochen als Osteoporoseprophylaxe
- ▶ passive Bewegungen aktivieren kaum das neuromuskuläre System

Stand der Forschung

- in Deutschland an einigen Kliniken getestet und eingesetzt, zum Beispiel in Heidelberg, Bochum oder Halle
- Firma Cyberdyne: nach Bewegungstraining mit Exoskelett Verbesserungen der Mobilität bei 50 Patientinnen und Patienten [62]
- ABLE Human Motion S.L.: multizentrische Phase-II-Studie mit 24 Patientinnen und Patienten: positive Auswirkungen auf motorische Fähigkeiten nach wiederholtem Gangtraining mit dem Exoskelett [63]

▶ Brain-Computer-Interfaces (BCIs)

- ▶ aus der Messung der Gehirnaktivität im Motorkortex sollen Steuersignale abgeleitet werden, die dann Muskeln über ein zweites Gerät (z.B. über epidurale elektrische Stimulationsgeräte) aktivieren [64]
- ▶ andere Anwendungen von Brain-Computer-Interfaces: Steuerung von Rollstühlen, Schreiben von Texten ohne Tastatur, Steuerung virtueller Finger [77] und von Neuroprothesen [65]
- ▶ nicht-invasiv durch Elektroden auf der Haut oder invasiv mit implantierten Elektroden in beziehungsweise auf das Gehirn



- ▶ „closed-loop“-System soll bessere Kontrolle und Anpassungen der Bewegung durch Feedback ans Gehirn ermöglichen [51] [66]: dabei werden auch Signale über das BCI an das Gehirn oder Rückenmark rückgemeldet
- ▶ **Stand der Forschung**
 - ▶ Insgesamt: Einzelfälle und proof-of-concept-Studien publiziert, keine zugelassenen klinischen Anwendungen in USA und Europa
 - ▶ erste Zulassung des invasiven BCIs NEO der Firma Neuracle Medical Technology durch Chinas Arzneimittelbehörde
 - ▶ BCIs vor allem von Unternehmen entwickelt, detailliertere Entwicklungen lassen sich [hier](#) verfolgen, exemplarische Entwicklungen und Firmen werden hier vorgestellt:
 - ▶ ONWARD
 - strebt Zulassung und Verkauf von Brain-Spine-Interfaces sowie von ganzer Gruppe an Elektrostimulationsgeräten und BCIs an
 - ARC-EX (nicht-invasiv): Stimulation über Hautelektroden (in USA/EU zugelassen) (siehe Kapitel elektrische Stimulation am Rückenmark)
 - ARC-IM (invasiv): implantierbares Rückenmark-Stimulationssystem
 - ARC-BCI (invasiv): Hirnimplantat, das mit ARC-IM gekoppelt werden kann und damit ein „Brain-Spine-Interface“ ergibt (bisher in sieben Personen implantiert)
 - Einzelfall-Bericht über dieses „Brain-Spine-Interface“ in der Schädeldecke (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne), im Rahmen der laufenden [STIMO-BSI-Studie](#) getestet: soll „natürliches“ Gefühl über die Kontrolle der Extremitäten erwecken; Patient mit inkompletter Querschnittlähmung konnte mit Gehhilfe laufen und treppensteigen [67]; Statements von Forschenden dazu beim SMC [\[II\]](#)
 - ▶ BrainGate
 - US-amerikanische Firma führt seit 2004 Studien zu BCIs an Menschen mit Querschnittlähmung durch: als sicher bewiesen, aktuell laufende [Machbarkeitsstudie](#) soll Bedienen einer Computermaus und anderer Assistenzwerkzeuge durch Gedanken zeigen [68]
 - Weitere Studien zeigten Kontrolle virtueller Finger zur Steuerung einer virtuellen Drohne oder einer Tastatur [77][78]
 - Hardware (z.B. Utah-Arrays) wird durch Blackrock Neurotech entwickelt
 - ▶ Neuralink
 - Firma von Elon Musk, erste Implantate in die Gehirnrinde ermöglichen Kontrolle einer Computermaus, [Machbarkeitsstudie](#) zur Kontrolle von Neuroprothesen über BCI läuft [69]
 - ▶ Synchron
 - US-amerikanische Firma entwickelt weniger invasives BCI: wird über ein Blutgefäß, das über der Gehirnrinde verläuft, eingesetzt [70] [71] [72]
 - laufende [Machbarkeitsstudie](#) zum Einsatz des BCI in Verbindung mit einer Prothese
- ▶ **Herausforderungen und Zukunft**
 - Implantation löst Narbenbildung im Gehirn aus, Langzeithaltbarkeit der Elektroden, komplexe Technologie, ethische Fragen in Bezug auf Selbstbestimmung [73]



Hintergrund: Phasen klinischer Studien

- ▶ die vorgestellten Therapieansätze werden üblicherweise in den verschiedenen Phasen klinischer Studien auf Sicherheit, Verträglichkeit und Wirksamkeit getestet. Einen Überblick über die verschiedenen Phasen und deren Ziele sowie Anforderungen bietet ein Fact Sheet des SMC [III] zur Wirkstoffentwicklung und Zulassung.
- ▶ vor den klassischen Phase I-, II- und III-Studien werden oft Pilotstudien durchgeführt, in denen die Therapien vor dem Beginn der eigentlichen Studie an wenigen Betroffenen getestet werden. So soll vor allem der Studienablauf erprobt werden. Es können keine Aussagen zum Erfolg der Maßnahme getroffen werden, da die Größe der Versuchsgruppe und die Dauer der Studie nicht darauf ausgelegt sind, statistisch belastbare Aussagen zu treffen [74].



Fazit und Ausblick

- ▶ Trotz vieler Ansätze: in naher Zukunft keine Erwartung, dass eine Therapie flächendeckend bei vielen Patientinnen und Patienten gleichermaßen anwendbar zu einer Wiederherstellung des geschädigten Rückenmarks oder Wiedergewinnung der verlorenen Fähigkeiten führt
- ▶ verschiedene Hürden und Limitationen bei der Regeneration motorischer Fähigkeiten und der Heilung der Nerven im Rückenmark:
 - akute Therapien zum Schutz des Rückenmarks: viele mögliche Wirkstoffe getestet, keiner zeigt überzeugende Wirksamkeit
 - Wirkstoffe gegen hemmende Proteine (z.B. Nogo-A-Antikörper): systematisches Studiendesign ermöglichte gründliche Prüfung in klinischen Studien, Wirksamkeit allerdings bisher nicht bewiesen, Ergebnisse aus Phase-III-Studien und Ergebnisse zur Wirksamkeit in Subgruppen mit inkompletter Querschnittlähmung in Zukunft relevant
 - Zelltherapien: bisher vor allem Sicherheit in klinischen Studien gezeigt, Hinweise auf Wirksamkeit; weitere grundlegende Forschung zu an der Verletzung beteiligten Zellarten und deren Aufgaben im Rückenmark nötig, außerdem sind ethische Fragestellungen hinsichtlich des Ursprungs der Zellen relevant
 - Technische Unterstützung: in Einzelfällen Therapieerfolg, allerdings wegen der individuellen Krankheitsbilder und Fähigkeiten schlecht übertragbar auf größere Kohorte, invasive Verfahren erschweren Umsetzung
- ▶ Erfolg liegt in Zukunft möglicherweise in kombinierten und personalisierten Therapien, Herausforderungen in den Therapiekosten
- ▶ Zulassungen von Therapieansätzen selten und schwer zu erreichen wegen verschiedener Herausforderungen bei der Durchführung von Studien:
 - hohe Kosten großer Studien mit langer Nachverfolgungszeit
 - relativ kleine und ortsgebundene Patientenkohorten, Vernetzung verschiedener Standorte wäre nötig, um große Studien durchzuführen
 - schwierige Standardisierung der Behandlungen und Subjektivität der beobachteten Verbesserungen
 - oft Betroffene mit individuellen Verletzungen und Einschränkungswerten in einer Studie inkludiert, anschließende Subgruppenstudien wegen begrenzter Patientenzahl nicht aussagekräftig



Literaturstellen, die zitiert wurden

- [1] Abel R (2019): [Pressemappe der Fördergemeinschaft der Querschnittgelähmten](#). Website der Fördergemeinschaft der Querschnittgelähmten.
- [2] Masuhr KF (2013): Neurologie. 7., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Georg Thieme Verlag.
- [3] Deutsche Gesellschaft für Neurologie e.V. (DGN), Deutschsprachige Medizinische Gesellschaft für Paraplegiologie e.V. (2024): [S3-Leitlinie Diagnostik und Therapie der akuten Querschnittlähmung](#).
- [4] Torregrossa F et al. (2020): [Emerging Therapeutic Strategies for Traumatic Spinal Cord Injury](#). World Neurosurgery. DOI: 10.1016/j.wneu.2020.03.199.
- [5] Serag I et al. (2024): [An updated systematic review of neuroprotective agents in the treatment of spinal cord injury](#). Neurosurgical Review. DOI: 10.1007/s10143-024-02372-6.
- [6] Bracken MB et al. (1997): [Administration of methylprednisolone for 24 or 48 hours or tirilazad mesylate for 48 hours in the treatment of acute spinal cord injury. Results of the Third National Acute Spinal Cord Injury Randomized Controlled Trial](#). National Acute Spinal Cord Injury Study. JAMA.
- [7] Himmelseher S (1999): [Zur Gabe von Kortikosteroiden nach akuter spinaler Traumatisierung](#). Veröffentlichung des Bundesverband Deutscher Anästhesistinnen und Anästhesisten.
- [8] Alibai EA (2015): [Effects of Human Erythropoietin on Functional Outcome of Patients with Traumatic Cervical Cord Injury; A Pilot Randomized Clinical Trial](#). Bulletin of Emergency and Trauma. DOI: 10.7508/beat.2015.03.002.
- [9] Matis GK et al. (2009): [Erythropoietin in spinal cord injury](#). European Spine Journal. DOI: 10.1007/s00586-008-0829-0.
- [10] Ganjeifar B et al. (2021): [The effect of combination therapy with erythropoietin and methylprednisolone in patients with traumatic cervical spinal cord injury: a pilot randomized controlled trial](#). Spinal Cord. DOI: 10.1038/s41393-020-00604-2.
- [11] Fang M et al. (2022): [Recombinant human erythropoietin plus methylprednisolone versus methylprednisolone in treatment of acute spinal cord injury: protocol for a systematic review and meta-analysis](#). BMJ Open. DOI: 10.1136/bmjopen-2021-056689.
- [12] Costa DD et al. (2015): [Tolerability and efficacy of erythropoietin \(EPO\) treatment in traumatic spinal cord injury: a preliminary randomized comparative trial vs. methylprednisolone \(MP\)](#). Neurological Sciences. DOI: 10.1007/s10072-015-2182-5.
- [13] Casha S et al. (2012): [Results of a phase II placebo-controlled randomized trial of minocycline in acute spinal cord injury](#). Brain: A Journal of Neurology. DOI: 10.1093/brain/aws072.
- [14] Chow D et al. (2023): [Riluzole in Spinal Cord Injury Study \(RISCIS\)–Pharmacokinetic \(PK\) Sub-Study: An Analysis of Pharmacokinetics, Pharmacodynamics, and Impact on Axonal Degradation of Riluzole in Patients With Traumatic Cervical Spinal Cord Injury Enrolled in the RISCIS Phase III Randomized Controlled Trial](#). Journal of Neurotrauma. DOI: 10.1089/neu.2022.0499.
- [15] Fehlings MG et al (2023): [Safety and Efficacy of Riluzole in Acute Spinal Cord Injury Study \(RISCIS\): A Multi-Center, Randomized, Placebo-Controlled, Double-Blinded Trial](#). Journal of Neurotrauma. DOI: 10.1089/neu.2023.0163.
- [16] Grossman R et al. (2014): [A Prospective, Multicenter, Phase I Matched-Comparison Group Trial of Safety, Pharmacokinetics, and Preliminary Efficacy of Riluzole in Patients with Traumatic Spinal Cord Injury](#). Journal of Neurotrauma. DOI: 10.1089/neu.2013.2969.
- [17] Maynard G et al. (2023): [Soluble Nogo-Receptor-Fc decoy \(AXER-204\) in patients with chronic cervical spinal cord injury in the USA: a first-in-human and randomised clinical trial](#). The Lancet Neurology. DOI: 10.1016/S1474-4422(23)00215-6.
- [18] Caroni P & Schwab ME (1988): [Two membrane protein fractions from rat central myelin with inhibitory properties for neurite growth and fibroblast spreading](#). The Journal of Cell Biology. DOI: 10.1083/jcb.106.4.1281.
- [19] Caroni P & Schwab ME (1988): [Antibody against myelin associated inhibitor of neurite growth neutralizes nonpermissive substrate properties of CNS white matter](#). Neuron. DOI: 10.1016/0896-6273(88)90212-7.
- [20] Weidner N et al. (2025): [Safety and efficacy of intrathecal antibodies to Nogo-A in patients with acute cervical spinal cord injury: a randomised, double-blind, multicentre, placebo-controlled, phase 2b trial](#). The Lancet Neurology. DOI: 10.1016/S1474-4422(24)00447-2.



- [21] Luo F et al. (2022): Inhibition of CSPG receptor PTP σ promotes migration of newly born neuroblasts, axonal sprouting, and recovery from stroke. Cell Reports. DOI: 10.1016/j.celrep.2022.111137.
- [22] Hu X et al. (2023): Spinal cord injury: molecular mechanisms and therapeutic interventions. Signal Transduction and Targeted Therapy. DOI: 10.1038/s41392-023-01477-6.
- [23] Zipser CM et al. (2022): Cell-based and stem-cell-based treatments for spinal cord injury: evidence from clinical trials. The Lancet Neurology. DOI: 10.1016/S1474-4422(21)00464-6.
- [24] Okano Y et al. (2025): Spinal cord injury regenerative therapy development: integration of design of experiments. Neural Regeneration Research. DOI: 10.4103/NRR.NRR-D-24-00553.
- [25] Jia Z et al. (2023): Hydrogel-based treatments for spinal cord injuries. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e19933.
- [26] Roman A et al. (2024): Cell Transplantation for Repair of the Spinal Cord and Prospects for Generating Region-Specific Exogenic Neuronal Cells. Cell Transplantation. DOI: 10.1177/09636897241241998.
- [27] Salewski RP et al. (2015): Transplantation of Induced Pluripotent Stem Cell-Derived Neural Stem Cells Mediate Functional Recovery Following Thoracic Spinal Cord Injury Through Remyelination of Axons. Stem Cells Translational Medicine. DOI: 10.5966/sctm.2014-0236.
- [28] Sugai K et al. (2021): First-in-human clinical trial of transplantation of iPSC-derived NS/PCs in subacute complete spinal cord injury: Study protocol. Regenerative Therapy. DOI: 10.1016/j.reth.2021.08.005.
- [29] Muheremu A et al. (2021): Sustained delivery of neurotrophic factors to treat spinal cord injury. Translational Neuroscience. DOI: 10.1515/tnsci-2020-0200.
- [30] Tai W et al. (2021): In vivo reprogramming of NG2 glia enables adult neurogenesis and functional recovery following spinal cord injury. Cell Stem Cell. DOI: 10.1016/j.stem.2021.02.009.
- [31] Tai W et al. (2024): NG2 glia reprogramming induces robust axonal regeneration after spinal cord injury. iScience. DOI: 10.1016/j.isci.2024.108895.
- [32] Curt A et al. (2020): The Damaged Spinal Cord Is a Suitable Target for Stem Cell Transplantation. Neurorehabilitation and Neural Repair. DOI: 10.1177/1545968320935815.
- [33] Curtis E et al. (2018): A First-in-Human, Phase I Study of Neural Stem Cell Transplantation for Chronic Spinal Cord Injury. Cell Stem Cell. DOI: 10.1016/j.stem.2018.05.014.
- [34] Levi AD et al. (2018): Emerging Safety of Intramedullary Transplantation of Human Neural Stem Cells in Chronic Cervical and Thoracic Spinal Cord Injury. Neurosurgery. DOI: 10.1093/neuros/nyx250.
- [35] Mallapaty S (2025): Paralyzed man stands again after receiving 'reprogrammed' stem cells. Nature NEWS. DOI: 10.1038/d41586-025-00863-0.
- [36] Chen W et al. (2021): Transplantation of mesenchymal stem cells for spinal cord injury: a systematic review and network meta-analysis. Journal of Translational Medicine. DOI: 10.1186/s12967-021-02843-0.
- [37] Bydon M et al. (2024): Intrathecal delivery of adipose-derived mesenchymal stem cells in traumatic spinal cord injury: Phase I trial. Nature Communications. DOI: 10.1038/s41467-024-46259-y.
- [38] Yang Y et al. (2021): Repeated subarachnoid administrations of allogeneic human umbilical cord mesenchymal stem cells for spinal cord injury: a phase 1/2 pilot study. Cytotherapy. DOI: 10.1016/j.jcyt.2020.09.012.
- [39] El-Kheir WA et al. (2014): Autologous Bone Marrow-Derived Cell Therapy Combined with Physical Therapy Induces Functional Improvement in Chronic Spinal Cord Injury Patients. Cell Transplantation. DOI: 10.3727/096368913X664540.
- [40] Mendonça MVP et al. (2014): Safety and neurological assessments after autologous transplantation of bone marrow mesenchymal stem cells in subjects with chronic spinal cord injury. Stem Cell Research & Therapy. DOI: 10.1186/scrt516.
- [41] Oh SK et al. (2016): A Phase III Clinical Trial Showing Limited Efficacy of Autologous Mesenchymal Stem Cell Therapy for Spinal Cord Injury. Neurosurgery. DOI: 10.1227/NEU.0000000000001056.
- [42] Oraee-Yazdani S et al. (2013): Safety and possible outcome assessment of autologous Schwann cell and bone marrow mesenchymal stromal cell co-transplantation for treatment of patients with chronic spinal cord injury. Cytotherapy. DOI: 10.1016/j.jcyt.2013.03.012.
- [43] Oraee-Yazdani S et al. (2021): Combining cell therapy with human autologous Schwann cell and bone marrow-derived mesenchymal stem cell in patients with subacute complete spinal cord injury: safety considerations and possible outcomes. Stem Cell Res. & Therapy. DOI: 10.1186/s13287-021-02515-2.



- [44] Franklin RJ et al. (1997): **Local recruitment of remyelinating cells in the repair of demyelination in the central nervous system**. Journal of Neuroscience Research. DOI: 10.1002/(SICI)1097-4547(19971015)50:2<337::AID-JNR21>3.0.CO;2-3.
- [45] Kanno H et al. (2014): **Combination of Engineered Schwann Cell Grafts to Secrete Neurotrophin and Chondroitinase Promotes Axonal Regeneration and Locomotion after Spinal Cord Injury**. The Journal of Neuroscience. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.2661-13.2014.
- [46] Sherwood AM et al. (1992): **Evidence of subclinical brain influence in clinically complete spinal cord injury: discomplete SCI**. Journal of the Neurological Sciences. DOI: 10.1016/0022-510x(92)90014-c.
- [47] Dorrian RM et al. (2023): **Electrical stimulation for the treatment of spinal cord injuries: A review of the cellular and molecular mechanisms that drive functional improvements**. Frontiers in Cellular Neuroscience. DOI: 10.3389/fncel.2023.1095259.
- [48] Harkema S et al. (2011): **Effect of Epidural stimulation of the lumbosacral spinal cord on voluntary movement, standing, and assisted stepping after motor complete paraplegia: a case study**. Lancet. DOI: 10.1016/S0140-6736(11)60547-3.
- [49] Angeli CA et al. (2014): **Altering spinal cord excitability enables voluntary movements after chronic complete paralysis in humans**. Brain. DOI: 10.1093/brain/awu038.
- [50] Gill ML et al. (2018): **Neuromodulation of lumbosacral spinal networks enables independent stepping after complete paraplegia**. Nature Medicine. DOI: 10.1038/s41591-018-0175-7.
- [51] Wagner FB et al. (2018): **Targeted neurotechnology restores walking in humans with spinal cord injury**. Nature. DOI: 10.1038/s41586-018-0649-2.
- [52] Rowald A et al. (2022): **Activity-dependent spinal cord neuromodulation rapidly restores trunk and leg motor functions after complete paralysis**. Nature Medicine. DOI: 10.1038/s41591-021-01663-5.
- [53] Kamboonlert K et al. (2021): **Effects of Bilateral Transcutaneous Tibial Nerve Stimulation on Neurogenic Detrusor Overactivity in Spinal Cord Injury: A Urodynamic Study**. Archives of Physical Medicine and Rehabilitation. DOI: 10.1016/j.apmr.2020.10.130.
- [54] Lee M et al. (2015): **Short-term peripheral nerve stimulation ameliorates axonal dysfunction after spinal cord injury**. Journal of Neurophysiology. DOI: 10.1152/jn.00839.2014.
- [55] Celik EC et al. (2013): **The effect of low-frequency TENS in the treatment of neuropathic pain in patients with spinal cord injury**. Spinal Cord. DOI: 10.1038/sc.2012.159.
- [56] Sivaramakrishnan A et al. (2018): **Comparison of transcutaneous electrical nerve stimulation (TENS) and functional electrical stimulation (FES) for spasticity in spinal cord injury - A pilot randomized cross-over trial**. The Journal of Spinal Cord Medicine. DOI: 10.1080/10790268.2017.1390930.
- [57] Yang K et al. (2014): **Screen printed fabric electrode array for wearable functional electrical stimulation**. Sensors and Actuators A. Physical. DOI: 10.1016/j.sna.2014.03.025.
- [58] Zhou H et al. (2015): **Stimulating the Comfort of Textile Electrodes in Wearable Neuromuscular Electrical Stimulation**. Sensors. DOI: 10.3390/s150717241.
- [59] Li Z et al. (2024): **A conductive piezoelectric hydrogel combined with perampanel and wireless electrical stimulation for spinal cord injury repair**. Chemical Engineering Journal. DOI: 10.1016/j.cej.2024.152238.
- [60] Minassian K et al. (2024): **Transcutaneous spinal cord stimulation neuromodulates pre- and postsynaptic inhibition in the control of spinal spasticity**. Cell Reports Medicine. DOI: 10.1016/j.xcrm.2024.101805.
- [61] Porter BA et al. (2012): **Repeatedly Pairing Vagus Nerve Stimulation with a Movement Reorganizes Primary Motor Cortex**. Cerebral Cortex. DOI: 10.1093/cercor/bhr316.
- [62] Aach M et al. (2023): **Feasibility, safety, and functional outcomes using the neurological controlled Hybrid Assistive Limb exoskeleton (HAL®) following acute incomplete and complete spinal cord injury – Results of 50 patients**. The Journal of Spinal Cord Medicine. DOI: 10.1080/10790268.2023.2200362.
- [63] Wright MA et al. (2023): **Multicentric investigation on the safety, feasibility and usability of the ABLE lower-limb robotic exoskeleton for individuals with spinal cord injury: a framework towards the standardisation of clinical evaluations**. Journal of Neuro Engineering and Rehabilitation. DOI: 10.1186/s12984-023-01165-0.
- [64] Levett JJ et al. (2024): **Invasive Brain Computer Interface for Motor Restoration in Spinal Cord Injury: A Systematic Review**. Neuromodulation. DOI: 10.1016/j.neurom.2023.10.006.
- [65] Rupp R (2014): **Challenges in clinical applications of brain computer interfaces in individuals with spinal cord injury**. Frontiers in Neuroengineering. DOI: 10.3389/fneng.2014.00038.
- [66] Ganzer PD et al. (2020): **Restoring the Sense of Touch Using a Sensorimotor Demultiplexing Neural Interface**. Cell. DOI: 10.1016/j.cell.2020.03.054.



- [67] Lorach H et al. (2023): [Walking naturally after spinal cord injury using a brain–spine interface](#). Nature. DOI: 10.1038/s41586-023-06094-5.
- [68] Rubin DB et al. (2023): [Interim Safety Profile From the Feasibility Study of the BrainGate Neural Interface System](#). Neurology. DOI: 10.1212/WNL.0000000000201707.
- [69] Antonio Regalado (16.01.2025): [What to expect from Neuralink in 2025](#). MIT Technology Review.
- [70] Oxley TJ et al (2021): [Motor neuroprosthesis implanted with neurointerventional surgery improves capacity for activities of daily living tasks in severe paralysis: first in-human experience](#). Journal of Neurointerventional Surgery. DOI: 10.1136/neurintsurg-2020-016862.
- [71] Mitchell P et al. (2023): [Assessment of Safety of a Fully Implanted Endovascular Brain-Computer Interface for Severe Paralysis in 4 Patients: The Stentrode With Thought-Controlled Digital Switch. \(SWITCH\) Study](#). JAMA Neurology. DOI: 10.1001/jamaneurol.2022.4847.
- [72] Kacker K et al. (2025): [Motor activity in gamma and high gamma bands recorded with a Stentrode from the human motor cortex in two people with ALS](#). Journal of Neural Eng. DOI: 10.1088/1741-2552/adbd78.
- [73] Goering S & Yuste R. (2016): [On the Necessity of Ethical Guidelines for Novel Neurotechnologies](#). Cell. Doi: 10.1016/j.cell.2016.10.029.
- [74] Smith PG (2015): [Preliminary studies and pilot testing](#). Field Trials of Health Interventions: A Toolbox, Oxford University Press. Chapter 13. DOI: 10.1093/med/9780198732860.003.0013.
- [75] Kilgard MP et al. (2025): [Closed-loop vagus nerve stimulation aids recovery from spinal cord injury](#). Nature. DOI: 10.1038/s41586-025-09028-5.
- [76] Moritz C et al. (2024): [Non-invasive spinal cord electrical stimulation for arm and hand function in chronic tetraplegia: a safety and efficacy trial](#). Nature Medicine. DOI: 10.1038/s41591-024-02940-9.
- [77] Willsey MS et al. (2025): [A high-performance brain–computer interface for finger decoding and quadcopter game control in an individual with paralysis](#). Nature Medicine. DOI: 10.1038/s41591-024-03341-8.
- [78] Jude JJ et al. (2026): [Restoring rapid natural bimanual typing with a neuroprosthesis after paralysis](#). Nature Neuroscience. DOI: 10.1038/s41593-026-02218-y.

Weitere Recherchequellen

Wings of Life Foundation Website: wingsforlife.com/de/forschung

Informationsportal der Manfred Sauer Stiftung: [Der-Querschnitt.de](https://der-querschnitt.de)

SMC-Angebote zum Thema

- [I] Science Media Center (2024): [Behandlung der Querschnittlähmung mit Nogo-A-Antikörpern](#) <https://sciencemediacenter.de/angebote/behandlung-der-querschnittlaehmung-mit-nogo-a-antikoerpern-24179>. Statements. Stand: 19.12.2024.
- [II] Science Media Center (2023): [Kabellose Gehirn–Rückenmark-Verbindung erfolgreich bei Lähmung](#) <https://sciencemediacenter.de/angebote/kabellose-gehirn-rueckenmark-verbindung-erfolgreich-bei-laehmung-23084>. Statements. Stand: 24.05.2023.
- [III] Science Media Center (2017): [Arzneimittel: Von der Entwicklung bis zur Zulassung](#) <https://sciencemediacenter.de/angebote/arzneimittel-von-der-entwicklung-bis-zur-zulassung-17076>. Fact Sheet. Stand: 02.12.2017.



fact sheet

Ansprechpartnerinnen in der Redaktion

Helena Salamun

Redakteurin für Medizin und Lebenswissenschaften

Annabell Winkler

Praktikantin, Medizin und Lebenswissenschaften

Telefon +49 221 8888 25-0

E-Mail redaktion@sciencemediacenter.de

Disclaimer

Dieses Fact Sheet wird herausgegeben vom Science Media Center Germany. Es bietet Hintergrundinformationen zu wissenschaftlichen Themen, die in den Schlagzeilen deutschsprachiger Medien sind, und soll Journalisten als Recherchehilfe dienen.

SMC-Fact Sheets verstehen sich nicht als letztes Wort zu einem Thema, sondern als eine Zusammenfassung des aktuell verfügbaren Wissens und als ein Hinweis auf Quellen und weiterführende Informationen.

Dieses Fact Sheet wurde von entsprechenden Fachleuten aus der Wissenschaft auf Korrektheit geprüft.

Sie haben Fragen zu diesem Fact Sheet (z. B. nach Primärquellen für einzelne Informationen) oder wünschen Informationen zu anderen Angeboten des Science Media Center Germany? Dann schicken Sie uns gerne eine E-Mail an redaktion@sciencemediacenter.de oder rufen Sie uns an unter +49 221 8888 25-0.

Impressum

Die Science Media Center Germany gGmbH (SMC) liefert Medienschaffenden schnellen Zugang zu Stellungnahmen und Bewertungen von Experten aus der Wissenschaft – vor allem dann, wenn neuartige, ambivalente oder umstrittene Erkenntnisse aus der Wissenschaft Schlagzeilen machen oder wissenschaftliches Wissen helfen kann, aktuelle Ereignisse einzuordnen. Die Gründung geht auf eine Initiative der Wissenschafts-Pressekonferenz e.V. zurück und wurde möglich durch eine Förderzusage der Klaus Tschira Stiftung gGmbH.

Nähere Informationen: www.sciencemediacenter.de

Diensteanbieter im Sinne MStV/TMG

Science Media Center Germany gGmbH
Schloss-Wolfsbrunnenweg 33
69118 Heidelberg
Amtsgericht Mannheim
HRB 335493

Redaktionssitz

Science Media Center Germany gGmbH
Rosenstr. 42–44
50678 Köln

Vertretungsberechtigter Geschäftsführer

Volker Stollorz

Verantwortlich für das redaktionelle Angebot (Webmaster) im Sinne des § 18 Abs.2 MStV

Volker Stollorz



science
media center
germany