

## Mikroroboter reparieren Rückenmark

**Ein Forschungsteam der ETH Zürich und der Universität Zürich (UZH) zeigt einen neuen Weg zur Behandlung von Rückenmarksverletzungen: Steuerbare Mikroroboter bringen Stammzellen gezielt an den Ort der Schädigung und fördern dort die Regeneration von Nervenzellen. In Tierversuchen verbesserte sich die Bewegungsfähigkeit dadurch deutlich.**

### In Kürze

- ETH-Forscher kombinieren Stammzellen mit magnetoelektrischen Nanopartikeln zu steuerbaren Mikrorobotern.
- Die Mikroroboter lassen sich gezielt zu verletzten Stellen im Rückenmark lenken, dort positionieren und stimulieren mittels Magnetfeldern die Zellentwicklung.
- In Versuchen mit Zebrafische und Mäuse regenerierten sich die Nervenzellen durch die Mikroroboter schneller, was die motorischen Funktionen deutlich verbesserte.

Rückenmarksverletzungen können für die Betroffenen verheerende Folgen haben, und die Nervenzellen im Rückenmark regenerieren sich nur selten natürlich. Oft verhindert eine Vernarbung das Nachwachsen von Nervenfasern. Moderne Therapien versuchen unter anderem, implantierte Stammzellen mithilfe von Elektrostimulation so zu beeinflussen, dass dadurch das Wachstum neuer Nervenzellen gefördert wird. Das hat verschiedene Nachteile: Es müssen dafür körperfremde Elektroden eingesetzt werden und die transplantierten Zellen überleben nicht immer oder sie integrieren sich nur schlecht ins bestehende Gewebe.

### Zellen und Nanopartikel klug kombiniert

Die Forschenden in Zürich verfolgen einen neuen Ansatz, den sie in der Fachzeitschrift *Nature Materials* veröffentlicht haben. Ihre Kernidee besteht darin, dass sie therapeutische Stammzellen mit magnetoelektrischen Nanopartikeln so verbinden, dass sie diese dann mithilfe von externen Magneten genau an die richtige Stelle lenken und die Stammzellen dort stimulieren können.

Die Forschenden haben dazu einen biohybriden Mikroroboter entwickelt. Biohybrid, weil er lebende, neurale Vorläuferzellen (Neural Progenitor Cells, kurz NPC) mit einer technischen Komponente, speziellen Nanopartikeln kombiniert. Die Vorläuferzellen werden aus sogenannten induzierten pluripotenten Stammzellen (iPS-Zellen) gewonnen. Dabei handelt es sich um gewöhnliche Körperzellen, die im Labor so verändert werden, dass sie wieder die Eigenschaften von Stammzellen erhalten. Aus iPS-Zellen können sich verschiedene Zelltypen des Nervensystems entwickeln.

Die Nanopartikel bestehen aus zwei Schichten: einem inneren Teil, der auf Magnetfelder reagiert, und einer äusseren Schicht, welche diese Reaktion in elektrische Signale umwandelt. Aus der Kombination dieser speziellen Nanopartikel und den Vorläuferzellen fabrizieren die Forschenden die sogenannten NPC-Bots.

### Ein Labor in Chipgrösse

Die NPC-Bots stellen die Forschenden in speziellen Labors her – auf nur einem Quadratzentimeter. Eine graphische Darstellung veranschaulicht das Prinzip. «In der Mitte haben wir ein Reservoir

platziert, in dem wir die Zellen einfangen. Dann injizieren wir die Nanopartikel und warten, bis sich die zwei Komponenten verbinden», erklärt Professor Salvador Pané i Vidal vom Multi-Scale Robotics Lab der ETH Zürich.

Nach nur dreissig Minuten sind die rund sechs Mikrometer grossen NPC-Bots fertig. «Um die Bots in grossen Mengen herzustellen, verwenden wir mehrere Lab-on-Chip-Systeme parallel», erläutert Hao Ye, Senior Scientist und Erstautor der Studie. Je nach Testvariante benötigen die ETH-Forschenden für zellbasierte Studien Hunderttausende und für Tierversuche mehrere Millionen Mikroroboter.

### **Verletzte Zebrafische schwimmen wieder**

Das Team hat die NPC-Bots an Rückenmarksverletzungen bei Zebrafischlarven getestet. Dabei wurden die Mikroroboter exakt an die verletzte Stelle der Fische gespritzt und elektromagnetische Felder erzeugt. Für Pané i Vidal war die Teamarbeit für das Gelingen des Experiments essenziell: «Stephan Neuhaus und Jingjing Zang an der Universität Zürich haben äusserst wertvolle Arbeit geleistet. Sie ermöglichten es uns, in einem gut bekannten regenerativen System zu zeigen, wie schnell sich die Zellen mit unserer Methode differenzieren und unsere Bots das Rückenmark reparieren.» Nach nur drei Tagen zeigten die Zebrafische ein nahezu normales Schwimm- und Erkundungsverhalten.

Die Forschenden testeten die NPC-Bots auch an Mäusen mit einem vollständig durchtrennten Rückenmark. Auch hier waren die Ergebnisse erfolgsversprechend: Nach 28 Tagen waren die Nervenzellen an der Verletzungsstelle bei den Tieren verbunden. Die behandelten Mäuse bewegten sich in dieser Zeit zunehmend besser – Gangbild, Schrittlänge, Koordination und Erkundungsverhalten normalisierten sich deutlich.

Dieses Resultat ist deshalb entscheidend, weil sich bei Mäusen das Rückenmark – im Gegensatz zu dem der Zebrafische – normalerweise nicht regeneriert. Die Tiere vertrugen die Behandlung gut, es traten keine schädlichen Nebenwirkungen oder Immunreaktionen auf.

### **Mit minimalinvasiver Stimulation zum Erfolg**

Möglich wurden diese Erfolge durch die elektrische Stimulation der Stammzellen, was deren Differenzierung nach der Transplantation besonders fördert. Dabei wandeln die Nanopartikel magnetische Signale direkt in elektrische Impulse um, welche die Stammzellen gezielt stimulieren. Bei den NPC-Bots müssen die Forschenden nur externe Magnetfelder verwenden, die rund um die zu reparierende Stelle angeordnet werden. Im Gegensatz zu bisherigen Ansätzen benötigt die Methode keine implantierten Elektroden oder Kabel. Dies ist wichtig, da das Rückenmark äusserst empfindlich ist. «Wir können durch die mikrorobotische Steuerung die Behandlung präziser und minimalinvasiver machen», fasst Hao zusammen.

Magnetfelder eignen sich besonders gut, um Stammzellen zu stimulieren, weil sie das Gewebe leicht durchdringen und sich Frequenz sowie Feldstärke flexibel an den jeweiligen Einsatz anpassen lassen. Nachdem die Vorläuferzellen stimuliert wurden und sich zu Nervenzellen entwickelt haben, verschmelzen die NPC-Bots im Wesentlichen mit dem Gewebe. Die Forschenden erwarten, dass die Nanopartikel dank ihrer Bariumtitanat-Beschichtung stabil und wenig reaktiv sind. Weitere Studien sollen klären, ob und wie die Partikel langfristig abgebaut oder ausgeschieden werden.

### **Idee lässt sich beliebig ausbauen**

Die Resultate aus den Tierversuchen sind äusserst vielversprechend. Bis die NPC-Bots im Menschen

angewendet werden können, wird es aber noch länger dauern. «Nebst vielen klinischen Aspekten müssen wir zuerst testen, welche Magnetfelder beim Menschen am besten funktionieren und wie lange die optimale Stimulationszeit ist», erklärt Hao. Trotzdem denken die Forschenden bereits jetzt über weitere Anwendungen nach: «Die reproduzierbare und skalierbare Herstellung von Mikrorobotern mit unserem Lab-on-a-Chip-System zeigt, dass das Anwendungspotenzial der Plattform über die Grundlagenforschung hinaus geht», erläutert Professor Pané i Vidal. Diese könnte zum Beispiel auch für die Kardiologie, die Onkologie, die Wundheilung und andere gezielte regenerative Therapien angepasst werden. So könnten auch diese Behandlungen dereinst sicherer, kontrollierbarer und wirksamer werden.

### **Literaturhinweis**

Ye H, Zang J, Zhu J, von Arx D, Zhao J, Pustovalov V, Mao M, Tang Q, Veciana A, Torlakcik H, Zhang E, Sevim S, Sanchis-Gual R, Gao Q, Chen X, Ahmed D, Sanchez-Vives M, Puigmartí-Luis J, Luo C, Nelson B, Neuhauss S, Pané S: Magnetoelectric Microrobots for Spinal Cord Injury Regeneration. Nature Materials 2026. DOI: [externe Seite10.1038/s41563-026-02625-3](https://doi.org/10.1038/s41563-026-02625-3).