

Neuro Rehabil 2010; 16 (1): 8–14

# Roboterunterstützte Rehabilitation der oberen Extremität nach Schlaganfall

R. Riener, V. Klamroth-Marganska

*Labor für Sensomotorische Systeme am Institut für Robotik für Intelligente Systeme, Departement für Maschinenbau und Verfahrenstechnik, ETH Zürich und Paraplegikerzentrum, Universitätsklinik Balgrist, Universität Zürich, Schweiz*

## Zusammenfassung

Die Erkenntnisse neurowissenschaftlicher Grundlagenforschung zur Neuroplastizität verändern die herkömmliche neurologische Rehabilitationsbehandlung und werden in die Entwicklung neuer Therapieformen integriert. Wichtige Faktoren zur Steigerung trainingsinduzierter Plastizität können mit den Begriffen aufgabenorientiertes Training mit möglichst physiologischen Bewegungen, hochgradige Intensität und Repetition, aktive Beteiligung und Motivation umrissen werden. Roboter scheinen in besonderer Weise geeignet, diese Faktoren erfolgreichen motorischen Lernens umzusetzen.

Dieser Beitrag gibt einen Einblick in die Technik und Anwendung der roboterunterstützten Bewegungstherapie am Beispiel des ARMin-Roboters. Neben den technischen Herausforderungen und Lösungsmöglichkeiten wird auch auf die klinische Anwendung zur neurologischen Rehabilitation nach Schlaganfall eingegangen.

**Schlüsselwörter:** Roboter, Schlaganfall, zerebraler Insult, Therapie, Rehabilitation, Arm, obere Extremität, Hemiparese

## Robot-assisted therapy for neurological rehabilitation of the upper limb following stroke

R. Riener, V. Klamroth-Marganska

### Abstract

Recent advances in the understanding of neural plasticity have transformed the approach to conventional rehabilitation therapy; these advances in understanding cortical plasticity are now being integrated into the development of new therapeutic approaches. Important factors defining training-induced plasticity are task-oriented training with close to physiological movements, active participation, high intensity, repetition and motivation. Robotic devices are positioned to embody these features and to transform modern rehabilitation practices.

This article provides insights into the technique and application of robot-assisted therapy using the example of the arm robot ARMin. Furthermore, we address the issue of technical demands and potential solutions as well as clinical applications for the neurological rehabilitation following stroke.

**Key words:** robot, stroke, cerebral vascular event, therapy, rehabilitation, arm, upper limb, hemiparesis

© Hippocampus Verlag 2010

## Einleitung

Zum Gehen benötigt man beide Beine. Mit Beginn der Mobilisierung nach Schlaganfall wird die betroffene Seite sofort trainiert, da alle Leistungsqualitäten, das Aufstehen, das Gehen, die Standfestigkeit, Funktionen beider Beine gemeinsam sind. Viele Aktivitäten der oberen Extremitäten kann man dagegen zunächst auch mit nur einer Hand ausführen. So entwickelt der Patient nach Schlaganfall Kompensationsstrategien, die dazu führen, dass die nichtbetrof-

fene Seite bevorzugt alleine eingesetzt und der betroffene Arm vernachlässigt wird. Der primären, zerebral-strukturellen Schädigung folgt also eine zweite, funktionelle Einbuße aufgrund Nichtgebrauchs. CIMT (Constraint Induced Movement Therapy) ist eine erfolgreiche Therapiemethode zur Überwindung dieses Mechanismus bei leichter betroffenen Patienten [36]. Die Robotertherapie bietet einen neuen vielversprechenden Weg, auch den Arm schwerer betroffener Patienten, der kaum funktionell eingesetzt werden kann, wieder in den Alltag zu integrieren.

Schon in den 80er Jahren des letzten Jahrhunderts entstanden Ideen zur Nutzung von Robotern in der Rehabilitation der oberen Extremität, damals noch in Form umfunktionaler Industrieroboter [7]. Primäres Ziel war es, den gängigen Behandlungsablauf der Hemiparese nach Schlaganfall – Muskeltonusregulierung, Erlernen von Massenbewegungen und schließlich Training komplexer Bewegungsabläufe – zu imitieren und zu intensivieren. Inzwischen bieten Roboter in der Neurorehabilitation aber nicht nur einen quantitativen Gewinn, sie verändern auch die Qualität einer Therapie, indem sie lerntheoretische Prinzipien und Erkenntnisse zur Neuroplastizität optimal umsetzen. Dieser Beitrag soll einen Einblick in die Technik und Anwendung der roboterunterstützten Bewegungstherapie der oberen Extremitäten geben. Neben den technischen Herausforderungen und Lösungsmöglichkeiten wird auch auf die klinische Anwendung und den Nutzen für den Patienten eingegangen.

### **Klinische Anforderungen an roboterunterstützte Rehabilitation der oberen Extremität**

Keiner der traditionellen, neurorehabilitativen Behandlungsansätze zur Armtherapie nach Schlaganfall zeigt sich in systematischen Untersuchungen als überlegen. Verschiedene Studien haben dies untersucht und konnten auch dem Bobath-Konzept, einem der weltweit am häufigsten angewendeten Therapieansätze, keinen Vorzug geben [17]. Dies weckt die Hoffnung in neue Therapieansätze zur Verbesserung der motorischen Fähigkeiten.

Die Beobachtung, dass repetitives Üben die Funktionserholung in besonderer Weise fördert [4], lenkte das Interesse auf die maschinell unterstützte Therapie. In einer herkömmlichen Therapiestunde (durchschnittlich 36 min effektive Trainingszeit) setzt sich die durchschnittliche Anzahl von Wiederholungen aus 39 aktiven, 34 passiven und zwölf aufgabenspezifischen Bewegungen zusammen [23]. Im Vergleich zählten wir beim Armrehabilitationsroboter ARMin in der gleichen Therapiezeit 180 aktiv-assistierte, 73 passive und 81 aufgabenspezifische Bewegungen (eigene Beobachtung an drei moderat betroffenen Patienten). Das sind in etwa zwei- bis siebenmal mehr Bewegungsaktionen als bei der herkömmlichen Therapie.

Stereotype Wiederholungen allein bewirken an der oberen Extremität jedoch noch kein (Wieder-)Erlernen von Bewegungen. Damit kortikale Reorganisation stattfindet, sollte das Training weitere lernpsychologische Prinzipien berücksichtigen. Es sollte nicht nur repetitiv, sondern auch aktiv, intensiv und aufgabenspezifisch sein [18, 30]. Roboter scheinen in besonderer Weise geeignet, diese Schlüsselfaktoren erfolgreichen motorischen Lernens in die Therapie einzubringen.

Intensivierung durch Robotherapie bedeutet, dass pro Zeiteinheit mehrere Bewegungen, sogar von verschiedenen Gelenken gleichzeitig, durchgeführt werden können. Aufgabenspezifisch bedeutet, dass die in der therapeutischen Situation implementierten Bewegungen den Tätigkeiten des

Alltags gleichen. Computerspiele, z. B. diverse grafikunterstützte Ballspiele, eröffnen eine motivierende Möglichkeit, intensiv und hochrepetitiv natürliche Bewegungsabläufe zu trainieren. Mit jedem Treffer hat der Patient vorausschauend die Ortsveränderung des Balles erfasst, kognitiv verarbeitet, eine Bewegungsstrategie entworfen und verfolgt. Mit motorischer Unterstützung des Roboters können auch bei ausgeprägten Paresen mit geringer Willküraktivität vollständige Bewegungen ausgeführt werden, indem das Gerät die Fähigkeiten des Patienten in jedem Moment erkennt und nur so wenig wie möglich, aber so viel wie nötig unterstützend in den Bewegungsablauf eingreift. Durch Ausrichtung der Aufgaben auf die individuellen motorischen Defizite (Shaping) können kontinuierlich Erfolge und Verbesserungen erreicht und vom Patienten zu jedem Zeitpunkt erlebt werden.

Zusätzlich bietet die Technik der virtuellen Realität den Vorteil, durch extrinsische akustische und sensorische Rückmeldungen die Signale überzogen anbieten zu können (augmented feedback) – ein Umstand, der besonders für Patienten von Belang ist, die ihre Bewegungen aufgrund einer Störung der Wahrnehmung und Kognition nicht durch intrinsische Afferenzen abgleichen können.

Unter der Annahme, dass das Gehirn nicht primär Muskeln trainiert, sondern die Muskeln als Werkzeuge zur Erreichung einer kinematischen Bewegungsabfolge eingesetzt werden [16], sollte motorisches Lernen nicht auf Muskelstärkung, sondern auf das Training von funktionellen Bewegungsabläufen ausgerichtet sein. Roboter vermögen es, präzise die kinematischen Eigenschaften einer physiologischen Armbewegung – nämlich Weg, Geschwindigkeit, Beschleunigung – zu imitieren, zu lenken, nötigenfalls zu korrigieren und dabei jedes einzelne Gelenk im Zusammenspiel der Bewegung zu führen. Das Training kann in einzelnen Sequenzen erfolgen, Bewegungen lassen sich präzise wieder und wieder trainieren.

In der klinischen Forschung werden Roboter eingesetzt, die die beschriebenen Faktoren erfolgreichen motorischen Lernens, nämlich aktive Partizipation des Patienten, Repetition, Intensität und Verhaltensrelevanz, einzeln oder kombiniert umsetzen. Armroboter ermöglichen passive und aktive Bewegungen, teilweise aktiv-assistiert oder gegen Widerstand. Sie unterscheiden sich unter anderem im Trainingsansatz (proximal vs. distal vs. proximal und distal; unilaterales vs. bilaterales Training, etc.) und der Orientierung der Bewegung im Raum (zweidimensional vs. dreidimensional) (Tab. 1).

### **Einsatz von Robotern in der Rehabilitation der oberen Extremität**

Um die oberen Extremitäten eines Patienten zu bewegen, können endeffektorbasierte Roboter oder Exoskelettroboter verwendet werden. Erstere sind am Boden, an der Wand oder an der Decke fixiert und werden mit dem Unterarm oder der Hand des Patienten verbunden (Abb. 1, links). Damit kann, je nach Anzahl der Freiheitsgrade des Roboters, die Position

Roboter	Anzahl aktiver Freiheitsgrade	Patientengruppen	Mögliche Gelenkbewegungen	Bestätigte Anzahl behandelter Patienten	Quellen
REHAROB	12	Schlaganfall (chronisch) und Schädelhirntrauma	Schulter, Ellenbogen	15	Fazekas et al., 2007
Bi-Manu-Track	1	Schlaganfall (akut und chronisch)	Handgelenk (bimanuell)	34	Hesse et al., 2003, 2005
GENTLE/s (Haptic Master, FCS)	5	Schlaganfall (akut und chronisch)	Schulter, Ellenbogen, Handgelenk	> 20	Van der Linde et al., 2002; Harwin et al., 2001; Coote et al., 2002, 2003
MIT-Manus	2	Schlaganfall (akut und chronisch)	Schulter, Ellenbogen	> 200	Hogan et al., 1995; Krebs et al., 1998, 2000; Aisen et al., 1997; Volpe et al., 1999, 2000, 2001, 2002; Fasoli et al., 2003; Stein et al., 2004
ARMin I – III	4 bis 7	Schlaganfall (chronisch) und Querschnittslähmung	Schulter, Ellenbogen, Handgelenk, Handöffnung	> 10	Nef et al., 2007, 2009; Staubli et al., 2009
MIME	6	Schlaganfall (chronisch)	Schulter, Ellenbogen (bimanuell)	27	Lum et al., 2002

Tab. 1: Übersicht existierender Roboter für die Therapie der oberen Extremitäten

und/oder die Orientierung der Hand im Raum kontrolliert werden. Die Kinematik dieser endeffektorbasierten Roboter ähnelt zumeist derjenigen von Industrierobotern; sie sind im Allgemeinen technisch einfach zu realisieren. Zahlreiche Gruppen arbeiten mit solchen Geräten [20], Übersicht in [32]. Allerdings haben diese Roboter Nachteile. Denn obschon der Arm und die Schulter des Patienten viele Freiheitsgrade besitzen, kann ein endeffektorbasierter Roboter nur maximal sechs Bindungen vorgeben. Dadurch ist der Arm des Patienten statisch unterbestimmt und die Steuerbarkeit eingeschränkt. Weiterer Nachteil ist, dass der Roboter die Drehmomente, welche auf die Gelenke des Patienten wirken, nicht unabhängig voneinander aufbringen kann, da der Roboter nur an einer Stelle mit dem Patientenarm verbunden ist. Dies ist vor allem bei Patienten mit Spastik oder Kontrakturen ungünstig und bedeutet sogar ein Sicherheitsrisiko.

Bei Exoskelettrobotern (Abb. 1, rechts) stimmen die Rotationsachsen des Roboters mit denjenigen des Patienten überein. Deshalb kann der Roboter mit dem Unterarm und dem Oberarm des Patienten verbunden werden. Dadurch kann das Drehmoment des Ellenbogens unabhängig von den Drehmomenten in der Schulter aufgebracht werden. Allerdings müssen dazu die Segmentlängen des Roboters an die Armsegmentlängen der verschiedenen Patienten exakt angepasst werden können. Eines der bekanntesten endeffektorbasierten Systeme ist der MIT Manus (Abb. 2, [20]). Hierbei handelt es sich im Wesentlichen um einen einfachen zweigelenkigen (SCARA) Roboter, der die Hand des Patienten in der horizontalen Ebene bewegt. Ein graphisches Display wird verwendet, um dem Patienten visuelle Instruktionen darzubieten. Mittels integrierter Bewegungs- und Kraftsensorik wird die Umsetzung von patientenfreundlichen Impedanzregelungsstrategien ermöglicht, welche die Durchführung eines mechanisch nachgebenden Verhaltens erlauben. Mit dem MIT Manus konnte bereits anhand von Studien an über 200 Schlaganfallpatienten

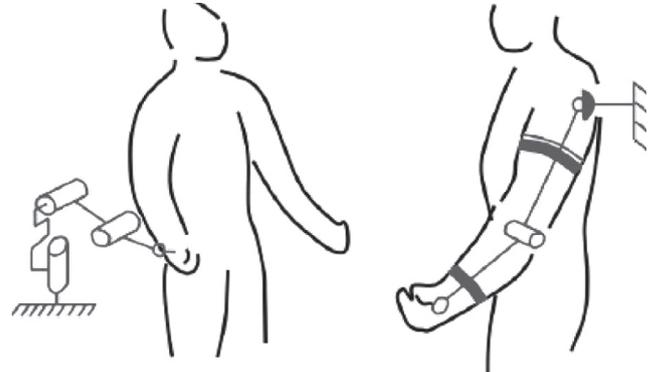


Abb. 1: Endeffektorbasierter Roboter (links) und Exoskelettroboter (rechts)



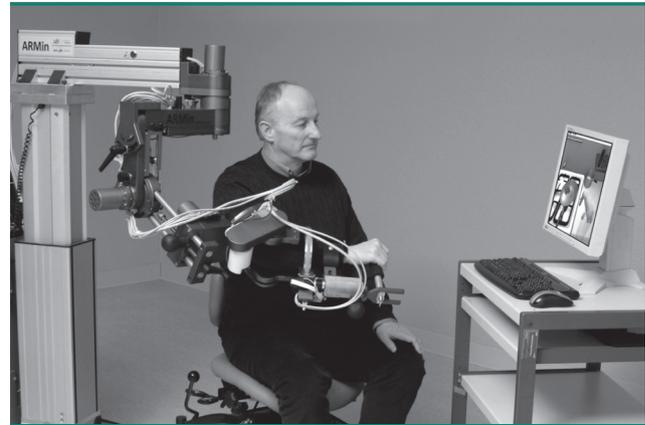
Abb. 2: MIT Manus zur Therapie halbseitengelähmter Patienten nach Schlaganfall (mit Genehmigung von I. Krebs und N. Hogan).

ten nachgewiesen werden, dass die roboterunterstützte Therapie zu einer signifikanten Verbesserung der Funktion und Motorik der oberen Extremität führt (siehe Kapitel »Klinische Evidenz der roboterunterstützten Armtherapie«).

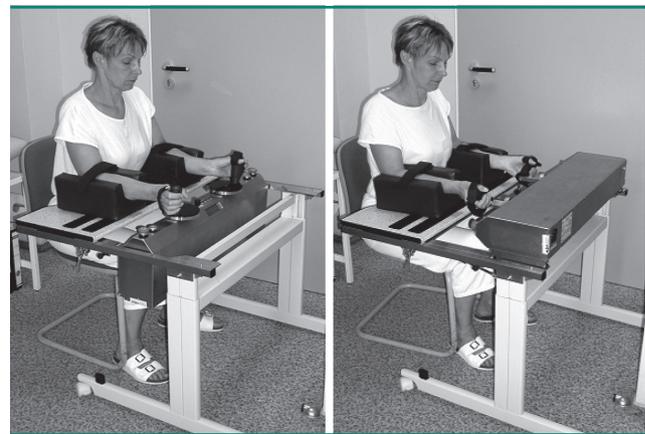
Neben dem MIT Manus gibt es auch noch weitere, komplexere endeffektorbasierte Systeme, welche die Bewegung des Armes auch in vertikaler Richtung zulassen. Das System MIME (Mirror Image Movement Enhancer) von Lum et al. [25] ermöglicht es, mittels eines sechsschichtigen Industrieroboters den Unterarm eines Schlaganfallpatienten beliebig im Raum zu bewegen und positionieren. Dabei folgt der durch den Roboter unterstützte gelähmte Arm einer Bewegung, die durch den gesunden Arm vorgegeben und online aufgezeichnet wird. Das jüngere System GENTLE/s basiert auf dem Haptic Master von FCS und ermöglicht ebenso die Bewegung und Therapie des Unterarms, insbesondere bei Schlaganfallpatienten [12, 38]. Zwar besitzt der Haptic Master nur drei aktive Bewegungsfreiheitsgrade, jedoch konnten durch diverse technische Erweiterungen zwei weitere Freiheitsgrade ergänzt werden, sodass auch die aktive Bewegung der Hand möglich wurde. Beim REHAROB [9] wird ein zweiter Industrieroboter mit dem Oberarm des Patienten verbunden, um eine bessere Bewegungsgüte von Ellenbogen und Schulter zu erlangen. Alle diese Roboter wurden auch in klinischen Tests evaluiert (siehe Kapitel »Klinische Evidenz der roboterunterstützten Armtherapie«).

Der Exoskelettroboter ARMin wurde von uns an der ETH Zürich und der Universitätsklinik Balgrist entwickelt (Abb. 3). Ähnlich wie MIT Manus ist auch ARMin in der Lage, patientenkooperative Impedanzregelungsstrategien umzusetzen [27, 28, 29]. Sie wurden so erweitert, dass sie den Patienten auch in einem Spielemodus oder bei Durchführung alltagsrelevanter Aufgaben unterstützen können. Gegenüber dem MIT Manus zeichnet sich ARMin vor allem dadurch aus, dass er mehrere Bewegungsfreiheitsgrade besitzt und die Momente über eine Exoskelettstruktur direkt in die Gelenke eingeleitet werden. Dadurch lassen sich auch komplexere Bewegungen und Aufgaben des täglichen Lebens trainieren. Während die erste Generation des Gerätes (ARMin I) nur vier Freiheitsgrade aufwies, kann ARMin III bereits sieben Bewegungsrichtungen in Schulter, Ellenbogen, Handgelenk und Hand aktiv unterstützen (s. u.). ARMin wird noch klinisch getestet, er soll bei der Therapie von Patienten mit Lähmungen der oberen Extremitäten insbesondere nach Schlaganfall (Hemiplegie) und Querschnittsverletzung (Tetraplegie) eingesetzt werden und später auch für den Einsatz bei Patienten mit Schädelhirntrauma und Kindern mit Zerebralpareesen angepasst werden.

Es gibt eine ganze Reihe von weiteren, einfacheren technischen Systemen, welche in der Lage sind, Arm- und Handbewegungen zu unterstützen. Eines davon ist der Bi-Manu-Track von Reha-Stim (Abb. 4) [13]. Dabei werden die Hände eines Schlaganfallpatienten an einem aktuierten Griff befestigt, welcher – je nach Einstellung – Flexions-Extensionsbewegungen oder Pronations-Supinationsbewegungen ausführt. Das Gerät kann in aktivem und passivem Modus betrieben werden. So



**Abb. 3:** Armtherapieroboter ARMin III, der an der ETH Zürich und Universitätsklinik Balgrist entwickelt wurde. ARMin III besitzt sechs Bewegungsfreiheitsgrade und kann durch ein zusätzliches Handöffnungsmodul erweitert werden [28, 29].



**Abb. 4:** Bi-Manu-Track in zwei verschiedenen Settings. Links: Training der Handgelenkflexion/-extension. Rechts: Training der Unterarm Pronation/Supination [13].

kann der Patienten, je nach Behandlungsstatus und Lähmungsintensität, unterschiedlich stark eingebunden werden.

### Klinische Evidenz der roboterunterstützten Armtherapie

#### Übersicht bisheriger klinischer Studien

Die Ergebnisse klinischer Studien zur Robotervertherapie der oberen Extremität nach Schlaganfall wurden in mehreren systematischen Übersichten zusammengefasst [22, 26, 31]. Besonderes Augenmerk galt der Wirkung auf die Aktivitäten des täglichen Lebens (ADL – Activities of Daily Living) und auf die motorische Schädigung. Daneben wurden auch die Akzeptanz durch die Patienten und Sicherheitsfragen betrachtet.

Es stellte sich heraus, dass Roboter in der motorischen Funktionsverbesserung anderen Therapieformen tendenziell überlegen sind (Testverfahren: Fugl-Meyer-Test, Chedoke McMaster). Vor allem beidseitiges, distales Armtraining schien sich positiv auf die Funktionsverbesserung auszuwirken (Bi-Manu-Track, siehe [14, 31]). Das Ergebnis ist insofern bemerk-

kenswert, als sich nicht nur die Funktion des Handgelenks verbesserte, sondern auch ein Transfer nach proximal mit Verbesserung der Schulter- und Ellbogenfunktion stattfand, eine Beobachtung, die bereits *Bütefisch* machte [4]. Neben der motorischen Funktionsverbesserung fand sich in der Robotherapie auch eine im Vergleich zu den Kontrollgruppen stärkere Zunahme der Muskelkraft. Der Transfer von Erlerntem in den Alltag konnte im Vergleich zur konventionellen Therapie durch den Einsatz von Robotern allerdings nicht verbessert werden. Die Robotherapie wurde von den Patienten positiv aufgenommen, es ergab sich kein Hinweis auf ein erhöhtes Sicherheitsrisiko unter Robotherapie.

**Kritische Beurteilung**

Die bisherigen theoretischen Ansätze zur Armrobotertherapie stützen sich auf neurophysiologische Forschungsergebnisse, die sich mit den Termini Intensivierung, Verhaltensrelevanz und aktive Partizipation umreißen lassen. Die Übersetzung der wissenschaftlichen Erkenntnisse in die Anwendung sollte jedoch vorsichtig beurteilt werden. Die Physiologie motorischen Lernens ist noch lange nicht vollständig verstanden. Erkenntnisse zum Lernen wurden teilweise aus Tierversuchen, teilweise aus Befunden gesunder Probanden abgeleitet und lassen sich nicht unkritisch auf Wiedererlernen, etwa nach Schlaganfall, übertragen. Weiterhin können Erfahrungen, die für die untere Extremität gemacht wurden, nicht auf die Armfunktion übertragen werden. So kam ein Cochrane Review zu dem Ergebnis, dass repetitives Üben an der unteren Extremität zu einer moderaten Funktionssteigerung führt, während es die Armfunktion kaum verbessert [10]. Dies erscheint schlüssig, wenn man sich die Unterschiede von Bein- und Armeinsatz vor Augen hält. Gehen ist zumindest in Grundzügen eine hochrepetitive Abfolge von Schritten. Der Einsatz der oberen Extremität ist weitaus komplexer: Aktivitäten wie das Platzieren der Hand im Raum, Greifen, Halten und Manipulieren von Objekten verlangen eine komplizierte Koordination der Muskeltätigkeit von der Schulter bis in die Finger. Bei der Beurteilung der Effektivität der Robotherapie sollte berücksichtigt werden, dass die einzelnen untersuchten Roboter nur Teilaspekte der physiologischen Armbewegung in die Therapie umsetzten. Eine Therapieform, die die Kinematik des Armes präzise nachahmen und lehren kann, scheint eine wichtige Voraussetzung zur Erholung der Armfunktion zu sein [16]. Der Roboter ARMin folgt diesem Ansatz. Durch sechs Freiheitsgrade ermöglicht er eine physiologische Unterstützung und Führung des Armes.

**ARMin: Beispiel einer roboterunterstützten Armtherapie bei Schlaganfallpatienten**

**Funktion und Einsatz von ARMin**

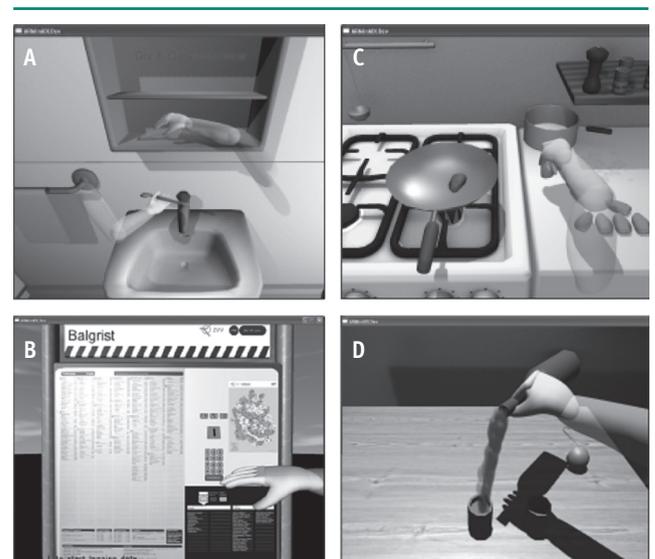
ARMin ermöglicht drei Therapieformen: Passive Mobilisierung, Spielemodus und Training von ADL (Activities of Daily Living). Die passive Mobilisierung wird durchge-

führt, um der Versteifung der Gelenke vorzubeugen sowie Muskelaufbau und Durchblutung zu fördern. Der Roboter wiederholt dabei das vom Therapeuten vorgegebene Bewegungsmuster beliebig oft, der Therapeut übernimmt aus Gründen der Sicherheit nur eine Kontrollfunktion.

Im Spielemodus bewegt der Patient seinen in der Robotermanschette befestigten Arm und beobachtet die Aktionen auf einem graphischen Display (Monitor oder Stereoprojektion). Der Roboter wird nicht nur als Eingabegerät zur Bewegung virtueller Objekte verwendet, sondern er erkennt auch die Fähigkeiten des Patienten und greift nötigenfalls unterstützend ein. Im virtuellen Ballspiel, zum Beispiel, besteht die Aufgabe für den Patienten darin, durch Bewegen eines virtuell dargestellten Schlägers einen virtuellen Ball zu fangen, der entlang einer schiefen Ebene herabrollt. Die Ballgeschwindigkeit kann vom Therapeuten individuell eingestellt werden. Ebenso kann entschieden werden, ob alle Gelenkachsen oder nur ausgewählte Achsen zur Bewegung des Schlägers herangezogen werden. Ist der Patient so schwach, dass er seinen Arm nicht rechtzeitig dem herabrollenden Ball nähern kann, so führt der Roboter den Patienten.

Beim Training von ADL-Aufgaben soll der Patient alltagsrelevante Tätigkeiten wie Essen, Trinken, Zähneputzen, Glaseinschenken, Haarekämmen usw. wiedererlernen (Abb. 5). Diese Bewegungen verlangen das Hinführen der Hand zu einem Punkt im Raum oder am Körper sowie das Greifen von Objekten. Deshalb sollte der Roboter Bewegungen der Schulter (drei Freiheitsgrade) und des Ellenbogens (ein Freiheitsgrad), sowie Pro-/Supination des Unterarms (ein Freiheitsgrad), Handgelenksflexion/-extension und Öffnen und Schließen der Hand ermöglichen. Der Roboter benötigt demnach mindestens sieben Freiheitsgrade.

Für die Bewegungstherapie ist es wichtig, dass der Bewegungsraum sowie die erzielbaren Gelenkmomente des Roboters möglichst mit den Werten des menschlichen



**Abb. 5:** Verschiedene ADL-Szenarien in virtueller Realität am ARMin-Roboter: Zähne putzen (A), Fahrkarte lösen (B), kochen (C), Glas einschenken (D).

Arms übereinstimmen. Damit modellbasierte, patientenkooperative Regelungsstrategien basierend auf Impedanz- und Admittanzregelungen realisiert werden können, besitzt der Roboter eine möglichst kleine Trägheit, wenig Reibung und geringes Spiel. Um eine gute Performanz bei der Impedanzregelung zu erreichen, müssen zudem die Motoren und Getriebe möglichst gut rücktreibbar sein. Der Roboter kann durch einfache Umstellungen sowohl am linken als auch am rechten Arm angewendet werden und ist für Körpergrößen zwischen 150–190 cm anpassbar. Damit die Verletzungsrisiken für Patienten und den Therapeuten gering sind, wurden zahlreiche aktive und passive Sicherheitsmechanismen integriert.

Eine weitere Besonderheit der roboterunterstützten Armtherapie ist, dass die Bewegungsfähigkeit und der klinische Zustand des gelähmten Armes mittels eingebauter technischer Sensoren automatisch gemessen und ausgewertet werden können. Beispiele für automatisierte Messmethoden sind die Erfassung aktiver und passiver Bewegungsbereiche (Range of Motion) in verschiedenen Gelenken und Gelenkbewegungsrichtungen. Zudem können Bewegungsgeschwindigkeit, Reaktionsvermögen, Muskelkraft (maximales Willkürmoment) oder Tragfähigkeit bestimmter virtueller Objekte erfasst werden. Zeichnet man bei verschiedenen Gelenkwinkelstellungen die auftretenden, aktiv-isometrischen Drehmomente mehrerer Gelenke gleichzeitig auf, so kann man damit sogar auf die Intensität abnormaler Gelenkkopplungen (pathologische Synergien) zurückschließen. Die verschiedenen Therapiemodi liefern zusätzliche Informationen über die Bewegungsqualität und somit über den Therapiestatus. Wichtige Kenngrößen sind zum Beispiel die Genauigkeit und die Treffsicherheit, die beim Durchführen eines Spiels oder einer ADL-Aufgabe erzielt werden können. In der Zukunft wird es auch möglich sein, die dynamische Gelenksteifigkeit zu messen und somit ein Maß für die Spastik in einzelnen Gelenken zu gewinnen.

#### Klinische Erfahrungen mit dem ARMin-Roboter

In Vorbereitung auf eine derzeit laufende klinische Multi-center-Studie zur ARMin-Therapie wurden in einer Pilotstudie [33] zunächst vier Patienten im chronischen Stadium nach Schlaganfall (mindestens ein Jahr nach Apoplex) über acht Wochen zwei- bis dreimal wöchentlich am ARMin Roboter II behandelt. Drei der vier trainierten Patienten zeigten eine signifikante Verbesserung der motorischen Fähigkeiten (Testverfahren: Fugl-Meyer-Test, gemessen in zwei motorischen Tests während der Trainingsperiode). Bemerkenswert ist die über die Trainingsphase hinaus zunehmende Verbesserung der Funktion, die auch noch in der Nachbetreuung sechs Monate später auffiel. Auch andere Studien berichten von einem Funktionsgewinn in nicht trainierten Armsegmenten [1, 14, 21, 35]. Denkbare Erklärung ist eine Verstärkung der kortikomotorischen Erregbarkeit angrenzender Areale als Antwort auf rhythmische Bewegungsübungen [1]. Das von uns beobachtete

Phänomen eines Funktionsgewinns über die Trainingszeit hinaus ist damit nicht hinreichend erklärt. Möglicherweise verbesserte die Therapie die Funktion in einem solchen Maß, dass der Arm im Alltag wieder eingesetzt werden konnte und sich dadurch weiter erholte.

In einer weiteren Studie behandelten wir gezielt pathologische Synergien der oberen Extremität nach Schlaganfall. So wie das motorische Lernen in Stufen erfolgt [24], lässt sich auch die Erholung nach Schlaganfall in Stadien einteilen, die während des Genesungsprozesses in typischer Abfolge durchlaufen werden [3, 37], wobei häufig stereotype Bewegungsmuster, sogenannte pathologische Synergien, auftreten können. Die Therapie am ARMin-Roboter ermöglicht passive, aktiv-assistierte und aktive Bewegungen des Patientenarmes entgegen den pathologischen Synergiemustern. Wir erstellten ein Behandlungsprotokoll am ARMin II, bei dem Patienten im chronischen Stadium nach Schlaganfall gezielt außerhalb dieser Synergienbewegungsmuster behandelt wurden. Bei der Übung »Verkehrspolizist« z. B. wird Schulterabduktion mit Ellbogenextension und Schulteradduktion mit Ellbogenflexion kombiniert. Daneben wurden Deut- und Werfbewegungen, Umarmung und Armdrücken trainiert. In unserer Untersuchung zeigten alle vier Patienten im chronischen Stadium (mehr als sechs Monate nach Schlaganfall) nach nur vier Wochen Therapie (dreimal wöchentlich eine Stunde) positive Effekte in der stärksten Synergiekomponente: der Kopplung von Schulterabduktion und Ellbogenflexion. Ein Patient konnte die Einschränkungen durch Synergien völlig überwinden [11].

#### Schlussfolgerungen

Gehirnwissenschaftliche Erkenntnisse haben in den vergangenen Jahren zur Entwicklung neuer Therapieformen in der neurologischen Rehabilitation geführt. Robotertherapie bietet einen Ansatz zur Optimierung der Rehabilitation nach Schlaganfall. Durch ein häufiges, wiederholtes Bewegen von Körpersegmenten wird die Lern- und Anpassungsfähigkeit des Gehirns und Rückenmarks genutzt. Roboter ermöglichen eine kontrollierte intensive Behandlung. Weiterhin bieten sie Verfahren zur objektiven Quantifizierung des Schädigungsmusters zu Beginn und im Verlauf der Therapie.

Die Forschung konzentriert sich zunehmend auf Roboter, die präzise die kinematischen Eigenschaften einer Bewegung nachahmen. Hier kommen vor allem neue Verfahren der Robotik sowie Display- und Interfacetechnik zum Einsatz. Die verwendeten Geräte und Systeme sollten sich dabei möglichst kooperativ verhalten und auf die Bedürfnisse und Intentionen des Patienten eingehen. Außerdem können durch zusätzliche audiovisuelle Displays verschiedene Anwendungen auf spielerische Weise geübt werden. In virtueller Realität können Patienten wirklichkeitsnah Aktivitäten des täglichen Lebens trainieren – in der Hoffnung, dass dies den Transfer des Erlernten in den Alltag erleichtert.

Literatur

1. Ackerley SJ, Stinear CM, Byblow WD. The effect of coordination mode on use-dependent plasticity. *Clin Neurophysiol* 2007; 118 (8): 1759-1766.
2. Aisen ML, Krebs HI, Hogan N, McDowell F, Volpe BT. The effect of robot-assisted therapy and rehabilitative training on motor recovery following stroke. *Arch Neurol* 1997; 54 (4): 443-446.
3. Brunnstrom S. *Movement Therapy in Hemiplegia*. Harper & Row, New York 1970.
4. Butefisch C, Hummelsheim H, Denzler P, Mauritz KH. Repetitive training of isolated movements improves the outcome of motor rehabilitation of the centrally paretic hand. *J Neurol Sci* 1995; 130 (1): 59-68.
5. Coote S, Stokes EK, Amirabdollahian F, Loureiro R, Harwin W. Robot mediated therapy for the upper extremity post stroke. *Irish Journal of Medical Science* 2002; 170: 127.
6. Coote S, Stoke E, Murphy B, Harwin W. The effect of GENTLE/s robot-mediated therapy on upper extremity dysfunction post stroke. *Proc. 8th ICORR* 2003, 59-63.
7. Dijkers MP, deBear PC, Erlandson RF, Kristy K, Geer DM, Nichols A. Patient and staff acceptance of robotic technology in occupational therapy: a pilot study. *J Rehabil Res Dev*. Spring 1991; 28 (2): 33-44.
8. Fasoli SE, Krebs HI, Stein J, Frontera WR, Hogan N. Effects of robotic therapy on motor impairment and recovery in chronic stroke. *Arch Phys Med Rehabil* 2003; 84 (4): 477-482.
9. Fazekas G, Horvath M, Troznai T, Toth A. Robot-mediated upper limb physiotherapy for patients with spastic hemiparesis: a preliminary study. *J Rehabil Med* 2007; 39 (7): 580-582.
10. French B, Thomas LH, Leathley MJ, Sutton CJ, McAdam J, Forster A, Langhorne P, Price CI, Walker A, Watkins CL. Repetitive task training for improving functional ability after stroke. *Cochrane Database Syst Rev* 2007 (4): CD006073.
11. Guidali M, Schmiedeskamp M, Klamroth V, Riener R. Assessment and training of synergies with an arm rehabilitation robot. *ICORR, International Conference on Rehabilitation Robotics*. June 23-26, 2009, Kyoto.
12. Harwin W, Loureiro R, Amirabdollahian F, Taylor M, Johnson G, Stokes E, Coote S, Topping M, Collin C. The Gentle/s project: a new method for delivering neurorehabilitation. In: Marincek C et al. (Eds). *Assistive Technology – Added Value to the Quality of Life AAATE'01*. IOS Press, Amsterdam 2001, 36-41.
13. Hesse S, Schulte-Tiggas G, Konrad M, Bardeleben A, Werner C. Robot-assisted arm trainer for the passive and active practice of bilateral forearm and wrist movements in hemiparetic subjects. *Arch Phys Med Rehabil* 2003; 84 (6): 915-920.
14. Hesse S, Werner C, Pohl M, Rueckriem S, Mehrholz J, Lingnau ML. Computerized arm training improves the motor control of the severely affected arm after stroke: a single-blinded randomized trial in two centers. *Stroke* 2005; 36 (9): 1960-1966.
15. Hogan N, Krebs HI, Sharon A, Charnnarong J. Interactive robotic therapist. US Patent 5466213 (1995).
16. Hogan N, Krebs HI, Rohrer B, Palazzolo JJ, Dipietro L, Fasoli SE, Stein J, Hughes R, Frontera WR, Lynch D, Volpe BT. Motions or muscles? Some behavioral factors underlying robotic assistance of motor recovery. *J Rehabil Res Dev* 2006; 43 (5): 605-618.
17. Kollen BJ, Lennon S, Lyons B et al. The effectiveness of the Bobath concept in stroke rehabilitation: what is the evidence? *Stroke* 2009; 40 (4): 89-97.
18. Krakauer JW. Motor learning: its relevance to stroke recovery and neurorehabilitation. *Curr Opin Neurol* 2006; 19 (1): 84-90.
19. Krebs HI, Volpe BT, Aisen ML, Hogan N. Increasing productivity and quality of care: robot-aided neuro-rehabilitation. *J Rehabil Res Dev* 2000; 37 (6): 639-652.
20. Krebs HI, Hogan N, Aisen ML, Volpe BT. Robot-aided neurorehabilitation. *IEEE Trans Rehab Eng* 1998; 6: 75-87.
21. Krebs HI, Volpe BT, Williams D, Celestino J, Charles SK, Lynch D, Hogan N. Robot-Aided Neurorehabilitation: A Robot for Wrist Rehabilitation. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng* 2007; 15 (3): 327-335.
22. Kwakkel G, Kollen BJ, Krebs HI. Effects of robot-assisted therapy on upper limb recovery after stroke: a systematic review. *Neurorehabil Neural Repair* 2008; 22 (2): 111-121.
23. Lang CE, MacDonald JR, Gnip C. Counting repetitions: an observational study of outpatient therapy for people with hemiparesis post-stroke. *J Neurol Phys Ther* 2007; 31 (1): 3-10.
24. Luft AR, Buitrago MM. Stages of motor skill learning. *Mol Neurobiol* 2005; 32 (3): 205-216.
25. Lum PS, Burgar CG, Shor PC, Majmundar M, Van der Loos M. Robot-assisted movement training compared with conventional therapy techniques for the rehabilitation of upper-limb motor function after stroke. *Arch Phys Med Rehabil* 2002; 83 (7): 952-959.
26. Mehrholz J, Platz T, Kugler J, Pohl M. Electromechanical and robot-assisted arm training for improving arm function and activities of daily living after stroke. *Cochrane Database Syst Rev*. 2008 (4): CD006876.
27. Nef T, Mihelj M, Riener R. ARMin: a robot for patient-cooperative arm therapy. *Med Biol Eng Comput* 2007; 45 (9): 887-900.
28. Nef T, Quinter G, Muller R, Riener R. Effects of Arm Training with the Robotic Device ARMin I in Chronic Stroke: Three Single Cases. *Neurodegener Dis* 2009; 26.
29. Nef T, Guidali M, Riener R. ARMin III – Arm therapy exoskeleton with ergonomic shoulder actuation. *Applied Journal of Bionics and Biomechanics* 2009; 6: 127-142.
30. Plautz EJ, Milliken GW, Nudo RJ. Effects of repetitive motor training on movement representations in adult squirrel monkeys: role of use versus learning. *Neurobiol Learn Mem* 2000; 74 (1): 27-55.
31. Prange GB, Jannink MJ, Groothuis-Oudshoorn CG, Hermens HJ, Ijzerman MJ. Systematic review of the effect of robot-aided therapy on recovery of the hemiparetic arm after stroke. *J Rehabil Res Dev* 2006; 43 (2): 171-184.
32. Riener R, Nef T, Colombo G. Robot-aided neurorehabilitation of the upper extremities. *Med Biol Eng Comput* 2005; 43 (1): 2-10.
33. Staubli P, Nef T, Klamroth-Marganska V, Riener R. Effects of intensive arm training with the rehabilitation robot ARMin II in chronic stroke patients: four single cases. *J Neuroeng Rehabil* 2009; 6 (1): 46.
34. Stein J, Krebs HI, Frontera WR, Fasoli SE, Hughes R, Hogan N. Comparison of two techniques of robot-aided upper limb exercise training after stroke. *Am J Phys Med Rehabil* 2004; 83 (9): 720-728.
35. Stoykov ME, Lewis GN, Corcos DM. Comparison of bilateral and unilateral training for upper extremity hemiparesis in stroke. *Neurorehabil Neural Repair* 2009; 23 (9): 945-953.
36. Taub E, Crago JE, Uswatte G. Constraint-Induced Movement Therapy: a new approach to treatment in physical rehabilitation. *Rehabil Psychol* 1998; 43: 152-170.
37. Twitchell TE. The restoration of motor function following hemiplegia in man. *Brain* 1951; 74 (4): 443-480.
38. Van der Linde RQ, Lammertse P, Frederiksen E, Ruiter B. The Haptic-Master, a new high-performance haptic interface. *Proc. Eurohaptics*, Edinburgh, UK, 2002; 1-5
39. Volpe BT, Ferraro M, Krebs HI, Hogan N. Robotics in the rehabilitation treatment of patients with stroke. *Curr Atheroscler Rep* 2002; 4 (4): 270-276.
40. Volpe BT, Krebs HI, Hogan N. Is robot-aided sensorimotor training in stroke rehabilitation a realistic option? *Curr Opin Neurol* 2001; 14 (6): 745-752.
41. Volpe BT, Krebs HI, Hogan N, Edelstein OL, Diels C, Aisen M. A novel approach to stroke rehabilitation: robot-aided sensorimotor stimulation. *Neurology* 2000; 54 (10): 1938-1944.
42. Volpe BT, Krebs HI, Hogan N, Edelstein L, Diels CM, Aisen ML. Robot training enhanced motor outcome in patients with stroke maintained over 3 years. *Neurology* 1999; 53 (8): 1874-1876.

**Interessenvermerk:**

Der korrespondierende Autor versichert, dass das Thema unabhängig und produktneutral präsentiert wurde. Verbindungen zu einer Firma, die ein genanntes Produkt bzw. ein Konkurrenzprodukt herstellt oder vertreibt, bestehen nicht. Der Roboter ARMin wurde an der ETH Zürich unter Leitung des korrespondierenden Autors entwickelt.

**Korrespondenzadresse:**

Prof. Dr.-Ing. Robert Riener  
 Sensory Motor Systems Lab  
 ETH Zürich  
 Department of Mechanical and Process Engineering  
 Institute of Robotics and Intelligent Systems  
 TAN E4, Tannenstr. 1  
 CH-8092 Zurich  
 riener@mavt.ethz.ch