

---

# ***Gedanken steuern Maschinen – Moderne Technologien für Schwerstbehinderung***

*Hubert Egger<sup>a</sup>, Thomas Haslwanter<sup>a</sup>, Robert Merwa<sup>a</sup>*

<sup>a</sup>FH OÖ, Studiengang Medizintechnik, *Fakultät für Gesundheit und Soziales,  
Garnisonstraße 21 4020 Linz/Austria*

---

## **1 EINLEITUNG**

Neurologische Erkrankungen und Unfälle mit Schädel-Hirn-Traumen, Querschnittsverletzungen und Amputationen von Gliedmaßen können zu schweren Beeinträchtigungen des muskuloskeletalen Bewegungsapparates führen. Zunehmende Stoffwechselerkrankungen wie Diabetes Mellitus und Hypercholesterinämie steigern das Risiko für Durchblutungsstörungen und damit auch für Amputationen, insbesondere der unteren Gliedmaßen. Bei schweren Beeinträchtigungen von Körperfunktionen sind Betroffene oft vollständig auf fremde Hilfe angewiesen. Sogar das Vermögen mit der Umwelt zu kommunizieren kann davon betroffen sein. Armprothesen, welche intuitiv bewegt werden können, das heißt den bloß im Kopf vorgestellten Phantombewegungen gehorchen (Gedankengesteuerte Armprothesen) sind bereits am Markt. Das nächste Ziel, nicht nur Prothesen, sondern auch Geräte und Maschinen durch „Gedankenkraft“ zu steuern, liegt nicht mehr in weiter Ferne. Der Fortschritt könnte die Lebensqualität besonders von schwerstbehinderten Menschen entscheidend verbessern.

## **2 GEDANKENSTEUERUNG IN DER MEDIZINTECHNIK**

Die Begriff Gedankensteuerung wird häufig missverstanden. Keineswegs ist damit die Fähigkeit einer Maschine zu verstehen, verborgene Gedanken zu lesen. Was aber möglich ist, ist die Erfassung von neuronalen Signalen, sei es im Gehirn oder an Muskeln, und deren Verwendung zur Gerätesteuerung. Die Messung von elektrischen Muskelsignalen (Elektromyographie oder EMG) oder Gehirnsignalen (Elektroenzephalographie oder EEG) ist bereits seit fast 100 Jahren verfügbar. Die Verwendung von Gehirnsignalen, oder sogenannte Brain-Computer-Interfaces (BCI), wurde durch die Verfügbarkeit von preisgünstigen und zugleich leistungsfähigen Computern in den letzten 15 Jahren sehr populär. Zurzeit arbeiten über 300 wissenschaftliche Labors an der Verbesserung des Brain Computer-Interfaces (BCI).

Auch die robuste Erfassung von elektrischen Muskelsignalen ist inzwischen Routine. Dies ist eine Voraussetzung, um einem Menschen mit einer Armamputation die Möglichkeit zu geben, mit den verbleibenden intakten Nerven Prothesen zu steuern. Hier kann die Wirkung von motorischen Befehlen aufgrund des nicht mehr vorhandenen Endorgans „Arm“, nicht mehr entfaltet werden. Die elektrischen Bewegungsbefehle werden zwar genauso wie bei Menschen mit gesunden Gliedmaßen im Motocortex erzeugt und über motorische Nervenbahnen zur Peripherie geleitet, sie enden jedoch in den Nervenstümpfen der amputierten

Gliedmaße. Die gewollt durchgeführte Bewegung bleibt als wirkungslose Phantombewegung auf das Gehirn beschränkt. Gelingt es jedoch den Bewegungsbefehl, das heißt das elektrische Reizmuster zum Beispiel am Nervenstumpf abzugreifen, dann kann er als Maschinenbefehl genutzt werden und motorangetriebene Gelenke in einer Armprothese steuern. Damit entfaltet der Bewegungsbefehl aus dem Gehirn wieder seine ursprüngliche motorische Wirkung - er vermag einen Prothesenarm so zu bewegen, wie er den gesunden Arm bewegt hätte [1]. Betroffene haben den Eindruck, der Prothesenarm folgt der gewollten und gedanklich durchgeführten Phantombewegung. Zu ähnlichen Ergebnissen gelangt man, wenn man Unterbrechungen der Reizfortleitung ganz allgemein betrachtet und motorische Befehle vor der Unterbrechung abgreift, rein ingenieurwissenschaftlich betrachtet und technisch nutzt [6].

## 2.1 Beispiel einer gedankengesteuerten Armprothese

Am einfachsten erfolgen die Abgriffe motorischer Befehle an den gemischten Nerven des peripheren Nervensystems. So zum Beispiel können derzeit am Markt verfügbare gedankengesteuerte Armprothesen die neuronale Steuerinformation aus den vier wesentlichen Armnerven des Plexus Brachialis abgreifen:

- *N. radialis* (C5-Th1),
- *N. medialis* (C6-Th1),
- *N. musculocutaneus* (C5-C7)
- *N. ulnaris* (C8-Th1)

Der Signalabgriff kann nach einem selektiven Nerventransfer [2] bzw. Targeted Muscle Reinnervation (TMR) mittels einer EMG-Ableitung (Elektromyogramm) erfolgen [3]. In diesem Fall werden brachliegende Nervenstümpfe chirurgisch zu Restmuskeln (Target) umgeleitet (reinnerviert). Als Restmuskeln (Target) kommen Muskeln in Frage, die ihren Ansatz an der amputierten Gliedmaße hatten, aber ihre Aufgabe nicht mehr erfüllen können. Motorische Reize einer Nervenfasern verzweigen sich auf die reinnervierten Muskelfasern einer motorischen Einheit und finden sich im Elektromyogramm mit einer deutlich höheren Amplitude wieder (biologischer Verstärker). Die Natur der Re-Innervation wird im Tierexperiment studiert [2]. Der Restmuskel (Target) wird segmentiert, um möglichst separierte Signalmuster zu erhalten. In Abb.1 ist das Prinzip des selektiven Nerventransfers für die Prothesensteuerung [4] an vier Segmenten des M. pectoralis major schematisch dargestellt. Prothesensteuerungen, die auf einen Signalabgriff aus dem Zentralnervensystem (Gehirn + Rückenmark) beruhen, befinden sich derzeit noch im Forschungsstadium [5].

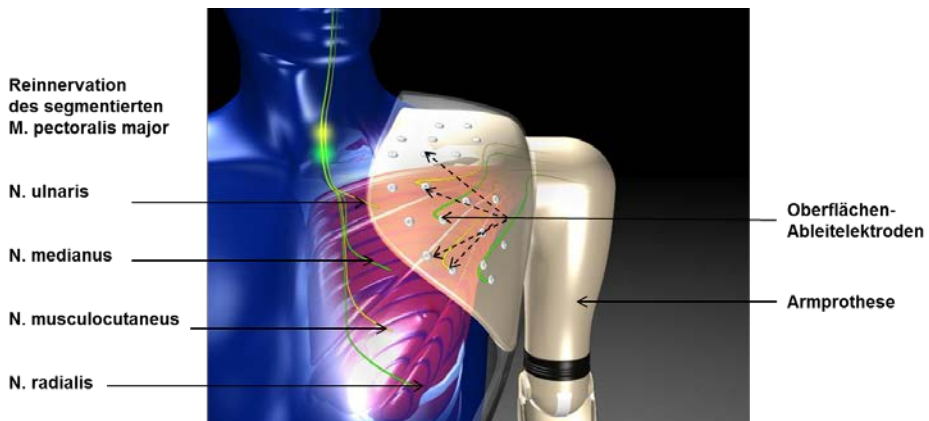


Abb. 2: Prinzip des selektiven Nerventransfers für Prothesensteuerung

### 3 DIE VERSORGUNGSPRAXIS

Praktische Erfahrungen mit Prothesenversorgungen, die auf einer Targeted Muscle Reinnervation (TMR) beruhen, bestehen seit etwa einem Jahrzehnt. Diese betreffen vorwiegend Armprothesen bei Patienten mit hohem Amputationsniveau. Die Versorgungen wurden bei ca. 50 Patienten in den USA, Europa und Israel durchgeführt (Stand 2011). Ein ideal verlaufender Versorgungsprozess dauert etwa 2-3 Jahre. In diesem Zeitraum ist ein interdisziplinär zusammengesetztes Versorgungsteam mit vielseitigen Aufgaben befasst. Ein Patient wird zu Beginn ausführlich aufgeklärt und untersucht, ob er für die Versorgungstechnik geeignet ist. Dazu gehört in erster Linie eine Überprüfung, ob die umzuleitenden Nervenreste motorische Reizmuster enthalten, die eindeutig von Phantombewegungen im Motocortex herrühren. Es sollte keine Nervenschädigung vorliegen, wie z.B. eine schwere diabetische Polyneuropathie. Der Patient muss den Versorgungsprozess verstehen und motiviert sein, sämtliche Rehabilitationsmaßnahmen, die auf ihn zukommen, umzusetzen. Bezugspersonen, welche den Patienten begleiten und unterstützend zur Seite stehen sind ebenso wichtig, wie eine professionelle psychologische Begleitung. Mögliche posttraumatische Belastungen müssen rechtzeitig erkannt und behandelt werden. Sind die medizinischen Voraussetzungen für eine Targeted Muscle Reinnervation (TMR) erfüllt und der Patient entschlossen den Versorgungsprozess in Angriff zu nehmen, kann mit der OP-Planung begonnen werden. Diese ist für jeden Patienten individuell und zielt grundsätzlich darauf ab, die Nervenumleitung chirurgisch so durchzuführen, dass sich später möglichst gut reproduzierbare und räumlich getrennte Signalmuster ableiten lassen. Bei der typischen Nervenregeneration von ca. 1 mm pro Tag kann es mehrere Monate dauern, bis der Re-Innervationsprozess abgeschlossen ist. In dieser Zeit muss sich der Patient einem intensiven Training unterziehen. Empfohlen werden 2-3 Trainingssitzungen pro Woche von je einer Stunde. Die Arbeit unter physiotherapeutischer Anleitung besteht in einem videounterstützten Vorstellungstraining von gezielten Bewegungen des künftigen Prothesenarmes. Am Anfang werden einfache Bewegungen trainiert wie zum Beispiel „Hand öffnen/Hand schließen“, „Hand innenrotieren/Hand außenrotieren“ oder „Ellbogen beugen/Ellbogen strecken“. Parallel dazu wird mit einer hochempfindlichen Ableitmessvorrichtung überprüft, ob die dazugehörigen Bewegungsbefehle im Elektromyogramm (EMG)

der Reinnervationszone in Erscheinung treten. Tatsächlich lassen sich beginnend mit sehr schwachen Signalen nach und nach immer differenziertere EMG-Muster erkennen, deren Merkmale (zum Beispiel Signalstärke) als Farbmuster ähnlich wie bei einer Wärmebildkamera auf einem Bildschirm sichtbar werden. Diese Visualisierung der Bewegungsbefehle ist für den Patienten ein wichtiges Biofeedback zur Verbesserung und Bewertung der Trainingsergebnisse. Das postoperative Training erfordert vom Patienten mitunter viel Geduld und Durchhaltevermögen. Bei planmäßigem Verlauf wird die High-Tech-Prothese, welche die konditionierten EMG-Mustern abgreift, nach etwa 1-3 Jahren an den Körper angepasst. In Abb.2 ist eine gedankengesteuerte Armprothese dargestellt.



Abb. 2: Gedankengesteuerte Armprothese (Bild: Otto Bock)

Die Anfertigung des Schaftes mit integrierten Ableitelektroden (elektrische Schnittstelle Mensch-Maschine), die Anbringung leicht bedienbarer Befestigungsmechanismen und kosmetische Feinschliffe rundet den Versorgungsprozess ab. Im Alltag wird die Prothese typischerweise während der Nachtstunden elektrisch aufgeladen, am Morgen angelegt und den ganzen Tag verwendet. Die geschwindigkeits- und kraftkontrollierten Bewegungen, welche simultan in mehreren Gelenken gleichzeitig erfolgen können, ermöglichen den Prothesenträgern weitgehende Selbstständigkeit und Unabhängigkeit in den meisten Alltagssituationen.

## REFERENZEN

- [1] Aimee E. Schultz, MS, Todd A. Kuiken, MD, PhD (2011), Neural Interfaces for Control of Upper Limb Prostheses: The State of the Art and Future Possibilities, CME, Vol. 3, Iss. 1, 2011, 55-67
- [2] Paul D. Marasco<sup>1</sup> and Todd A. Kuiken (2010) "Amputation with Median Nerve Redirection (Targeted Reinnervation) Reactivates Forepaw Barrel Subfield in Rats" The Journal of Neuroscience, November 24, 2010 • 30(47):16008 –16014
- [3] He Huang Member, IEEE, Ping Zhou, Senior Member, IEEE, Guanglin Li, Senior Member, IEEE, and Todd A. Kuiken (2008),, "An Analysis of EMG Electrode Configuration for Targeted Muscle Reinnervation Based Neural Machine Interface"
- [4] Kuiken TA, Dumanian GA, Lipschutz RD, Miller LA and Stubblefield KA Rehabilitation Institute of Chicago Neural Engineering Center for Artificial Limbs, 345 E Superior St, Chicago, IL 60611 and Northwestern University Feinberg School of Medicine (2004) "Targeted muscle reinnervation for improved myoelectric prosthesis control"

- [5] Hoffer JA, Loeb GE (1980). Implantable electrical and mechanical interfaces with nerve and muscle. *Ann of Biomed Eng*, **8**, 351-360
- [6] Kuiken TA, Stoykov S, Popovic M, Lowery M and Taflove A (2001). Finite element modeling of electromagnetic signal propagation in a phantom arm. *IEEE Trans Neural Sys and Rehab Engr* **9**(4), 345-354