

Bionik

H. Diel

Der Weg zur Gedanken gesteuerten Prothese

Steps towards Mindcontrolled Prosthetics

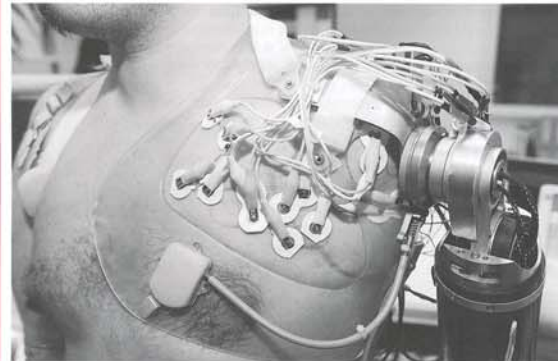
Zur Steuerung von myoelektrischen Prothesen wird das Elektromyogramm (EMG) herangezogen: Wenn sich ein Muskel zusammenzieht (kontrahiert), dann entsteht dabei eine elektrische Spannung. Diese Spannung liegt im Mikrovoltbereich und ist an der Hautoberfläche noch messbar. Elektrosmog, zum Beispiel aus der Netzspannung oder dem Mobilfunk entstehend, erschwert zusätzlich die verlässliche Aufzeichnung des EMG.

The electro-myogram (EMG) is used in the control of myoelectric prostheses: When a muscle contracts, it produces an electric voltage in a microvoltage range which can be measured on the skin's surface. Electrosmog caused by mobile radio equipment, mains voltage, etc. impedes the exact recording of the EMG.

Eine allgemein bekannte Nutzung dieser biochemischen Aktivität, die die Funktion des Herzmuskels darstellt, ist das EKG. Dabei werden Elektroden in Herznähe auf die Brust eines Patienten geklebt. Man registriert damit den Verlauf der elektrischen Spannung, die durch die Kontraktionen des

elektrischen Prothesen wird nur die Amplitudeninformation zur Steuerung verwendet.

Je stärker ein Muskel kontrahiert wird, um so „lauter“ wird er. Auf diese Weise kann der Prothesennutzer beispielsweise steuern, wie rasch seine Prothesenhand geschlossen wird oder wie fest sein Griff ist.



Herzmuskels entsteht. Daraus kann der Gesundheitszustand des Herzens abgeleitet werden.

Das EMG ist ein komplexes Biosignal, das verschiedene Informationen beinhaltet. Wesentliche Informationen für die Prothesensteuerung sind aus den Frequenzen und Amplituden ableitbar.

Dieser Vorgang ist mit der menschlichen Sprache vergleichbar. Der Muskel „spricht“, wobei die Frequenzen die unterschiedlichen Höhen und Tiefen der Sprache darstellen und die Amplitude der Lautstärke der Sprache entspricht. Bei heute üblichen myo-

Verwendbare Muskelgruppen

Zur Ansteuerung von Prothesen werden Muskeln oder erhaltene Muskelteile verwendet, die der Patient willentlich anspannen kann. Die für die Prothesensteuerung herangezogene Muskelanspannung sollte der ursprünglichen Funktion möglichst nahe kommen. Der Muskel darf nicht von außen liegenden anderen Muskeln abgedeckt sein. Es können auch nur Muskeln zur Steuerung herangezogen werden, die durch die Amputation nichts mehr zur Bewegung des Patienten

beitragen können. Bei einem Patienten, der seinen Arm ab der Schulter verloren hat, sind das Muskeln im Brust- und Rückenbereich. Es stehen somit zwei Muskelgruppen zur Verfügung, mit denen die unterschiedlichen Bewegungen des Prothesenarms gesteuert werden können.

Die Steuerungsmethode

Die zur Verfügung stehenden zwei Steuersignale werden immer zur Ansteuerung von Bewegung und Gegenbewegung eingesetzt. Eine konventionelle Armprothese verfügt über drei aktive Gelenke: Hand auf/zu, Handgelenk pronieren/supinieren, Ellbogen heben/senken. Einer der beiden genutzten Muskeln steuert durch seine Kontraktion, die über die Elektrode in ein elektrisches Signal übersetzt wird, beispielsweise die Funktionen Hand öffnen, Handgelenk supinieren und Ellbogen heben. Der andere Muskel steuert die entsprechende Gegenbewegung. Die beiden Steuersignale für die derzeitige Prothesensteuerung steuern nur ein einzelnes Gelenk. Dem Patienten steht daher immer nur eine Funktionsebene zur Verfügung. Möchte er einen Gegenstand ergreifen und dann den Arm heben, muss er von der Hand-Funktion auf die Ellbogen-Funktion umschalten. Für diese Bewegung muss er entweder beide Muskeln kurz und kräftig anspannen, oder einen Schalter betätigen. Dieser Schalter kann sich in den Bandagen befinden, die die Prothese am Körper fixieren.

Diese Art der Steuerung erlaubt es dem Patienten, Bewegungen aus verschiedenen Gelenken hintereinander auszuführen. Die Steuersignale zu den jeweiligen Gelenken



müssen umgeschaltet werden. Der Prothesenanwender muss sich merken, zu welchem Gelenk die Steuersignale geschaltet sind, damit er in der Folge die richtige Bewegung macht.

Die Probleme

Obwohl Prothesen heute mit extrem komplexer Technik ausgestattet sind, haben sie Schwachpunkte:

- Diese Art der Prothesensteuerung ist langsam, da Bewegungen aus einzelnen Gelenken des Armes nur hintereinander ausgeführt werden können.
- Der Prothesenträger muss in der Lage sein, die verwendeten Muskeln möglichst unabhängig von einander anzuspannen.
- Der Prothesenträger muss ein neues, unphysiologisches Steuerungsmuster erlernen. Das erfordert einen hohen Lernaufwand. Der Prothesenträger wird sich immer auf die Steuerung der Prothese

erlernen. Das erfordert einen hohen Lernaufwand. Der Prothesenträger wird sich immer auf die Steuerung der Prothese

- Die Prothesenanwender das „Gefühl“ der gesunden Hand nicht ersetzen, sie gibt keine Rückmeldung. Daher ist der Anwender darauf angewiesen, die Funktion visuell zu überwachen, was die Aufmerksamkeit der Umwelt gegenüber mindert.
- Die Bewegungsmöglichkeit einer Prothese mit nur drei aktiven Gelenken ist gering und fordert vom Patienten zusätzliche unnatürliche Ausgleichsbewegungen.

Deshalb wird diese Art der Versorgung von einem relativ hohen Anteil der Betroffenen abgelehnt. Diese Patienten ziehen es meist vor, ohne Prothese zu leben (gilt nur für einseitig Amputierte. Beidseitig Amputierte benötigen in jedem Fall eine Prothesenversorgung).

Targeted Muscle Reinnervation – Methode

Nach der Amputation eines Armes sind die Nerven bis zur Amputationsstelle funktionsfähig. Diese Nerven können grundsätzlich in einen neuen Muskel einwachsen und eine Kontraktion bewirken. Dieses Prinzip ist ein von der Natur eingerichtetes „Reparaturmechanismus“, mit dem die verloren gegangene Fähigkeit einer Muskelkontraktion wieder hergestellt wird.

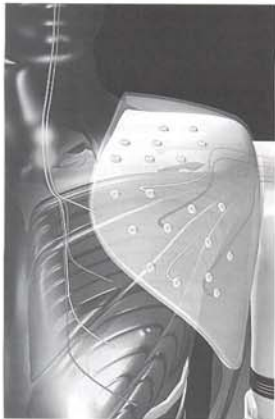
Die Idee der Targeted Muscle Reinnervation besteht darin, diesen Reparaturmechanismus künstlich



einzuweisen. Dabei wird ein Muskel, der durch die Amputation keine Funktion mehr ausübt, chirurgisch in mehrere Segmente aufgeteilt.

Die ursprüngliche Nervenversorgung dieses Muskels wird getrennt und für das Einwachsen der Nervstümpfe verwendet. Dieser Vorgang der gezielten Neuverbindung wird als Targeted Reinnervation bezeichnet.

Nach der hergestellten Neuverbindung kontrahiert der Muskel nach einem neuen Schema, das mit der Bewegung des Phantomarmes in Beziehung steht. Führt die Prothese genau dieselben Bewegungen aus wie der Phantomarm, spricht man von einer intuitiven Steuerung: Der Prothesenträger steuert die Prothese mit seinen Gedanken.



Bei dieser Versorgungstechnik ist das bei der konventionellen Versorgung erforderliche Umlernen nicht mehr notwendig. Durch das natürliche Bewegungsschema zwischen Phantomarm und Prothese wird die Versorgung stärker als Gliedmaßenersatz empfunden und erhält dadurch eine noch nie da gewesene Qualität.

Christian Kandlbauer ist der erste Patient in Europa, der auf diese neuartige Versorgungstechnik mittels einer speziellen Operation vorbereitet wurde. Am 11. September 2005 hat er bei einem Starkstromunfall (20 000 Volt) schwerwiegende Verletzungen beider Arme erlitten. Die Folge war Exartikulation des linken Armes im Schulterbe-

reich und Amputation des rechten Unterarmes. Dennoch waren in den darauffolgenden Wochen Nachamputationen und verschiedene kleinere Operationen erforderlich. Ende Oktober 2005 wurde Christian Kandlbauer aus dem AKH in die häusliche Pflege entlassen und Anfang Dezember 2005 ins Reha-Zentrum Weißer Hof in Klosterneuburg aufgenommen. Hier hat er den Umgang mit der ersten Prothese erlernt. Zum Zeitpunkt der Entlassung aus dem Reha-Zentrum war Christian Kandlbauer rechts mit einem DynamicArm versorgt. Kurz danach ermöglichte Prof. Kristen den Erstkontakt mit Prof. Aszmann im AKH bezüglich der geplanten bionischen Prothesenversorgung auf Kandlbauers linker Seite. Diese



Versorgung setzt einen komplizierten chirurgischen Eingriff voraus.

Der chirurgische Eingriff

Der chirurgische Eingriff muss sorgfältig geplant werden. Der Nervstumpf muss intakt sein und es muss ausreichend viel Muskelgewebe zur Verfügung stehen. Die Position der zu reinnervierenden Muskelsegmente muss so gewählt werden, dass die Bedingungen für eine Prothesenversorgung erfüllt werden. Dazu wurden bei Christian Kandlbauer Restmuskulatur und Nervenstränge im Bereich der linken Schulter in Spezialuntersuchungen durch Prof. Tatjana Paterostro-Sluga im AKH an der Uni-

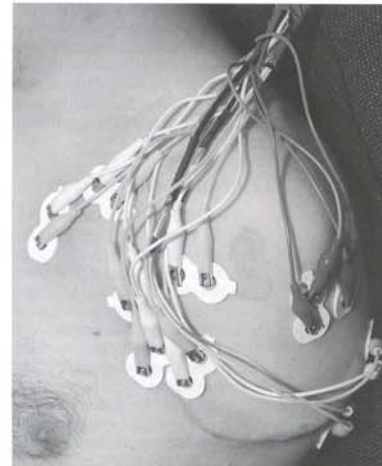
versitätsklinik für Physikalische Medizin und Rehabilitation evaluiert. Es waren auch wichtige Untersuchungen und Auswertungen bei Otto Bock notwendig.

Die Operation wurde am 5. Dezember 2006 am Wiener AKH durch Prof. Manfred Frey und Prof. Oskar Aszmann in Anwesenheit der Konsularärzte Prof. Todd Kuiken und Prof. Gregory Dumanian aus Chicago durchgeführt.

Bei der Operation werden die Nervstümpfe aus dem umgebenden Gewebe gelöst und in ihre einzelnen funktionellen Anteile (Faszien) aufgeteilt. Die zu reinnervierenden Muskeln müssen von ihrer ursprünglichen Nervenversorgung getrennt (deinnerviert) werden. Dabei wird die geplante Segmentierung



des Muskels berücksichtigt. Die für die Reinnervation geeigneten Muskeln bestehen aus mehreren Muskelfaserbündeln. Jedes Bündel wird von einem Ast des ursprünglichen Nervs innerviert. Jene Zone, an der der Nervenast in den Muskel einwächst, nennt man Innervationszone. Der ursprüngliche Nerv wird in der Nähe seiner Innervationszone durchtrennt und mit einem ausgewählten Nervstumpf verbunden. Die einzelnen Muskelfaserbündel werden voneinander getrennt, damit gewährleistet bleibt, dass neue Muskel-Nerv-Verbindungen voneinander unabhängig bleiben. Das heißt, die Nerven können dadurch nicht in die umliegenden Muskelfaserbündel einwachsen.



Sensible Anteile des Nervs (afferente Fasern) werden unter der Hautoberfläche platziert. Dadurch werden sensitive Regionen im Bereich der reinnervierten Körperoberfläche geschaffen, an denen

der Patient das Gefühl für seine Phantomhand erlangt (Tastsinn, Temperaturwahrnehmung).

Diese Zonen können bei der Prothesenversorgung für Rückmeldesysteme verwendet werden.

Das Training

Nach erfolgter Operation müssen alle Beteiligten geduldig sein. Die Nerven müssen in ihre neuen Muskeln erst einwachsen. Da ein Nerv nur ca. einen Millimeter pro Tag wächst, dauert es eine bestimmte Zeit (3-6 Monate), bis der Nerv sein Muskelsegment erreicht und erste Erfolge sichtbar werden. Nach dem derzeitigen Wissensstand ist es sinnvoll, dann mit einem gezielten Muskelaufbau-Training zu beginnen. Dabei wird der Phantomarm bewegt (Hand öff-

nen/schließen, Handgelenk beugen/strecken, innen/außen rotieren) und die sich ergebenden Muskelkontraktionen beobachtet. Zur Kontrolle und als Feedback wird die

Patienten verstanden dargestellt.

Hat das EMG eine Amplitude erreicht, mit der die Prothese steuerbar ist, wird PC-unterstützt gearbeitet. Der Patient wird aufgefordert, bestimmte Bewegungen mit dem Phantomarm auszuführen, die von einem virtuellen Arm am Bildschirm abgebildet werden. Bei diesen Bewegungen entstehen an den innervierten Muskelsegmenten Kontraktionsmuster, die durch Elektroden in ein EMG-Muster übersetzt werden. Über spezielle Mustererkennungsverfahren aus dem Forschungsgebiet der Künstlichen Intelligenz wird zu jeder Bewegung des Phantomarmes ein eindeutig zuordenbares EMG-Muster erkannt. Daraus werden im Zuge der Signalverarbeitung Steuersignale gebildet, die die gleiche Bewegung der virtuellen Prothese wie des Phantomarmes bewirken. Sobald der Patient mit diesem Programm die Bewegung des Prothe-



senarmes am Bildschirm gut beherrscht, wird das Training mit dem echten Prothesenarm fortgesetzt.

Die Prothesenversorgung

Christian Kandlbauer wurde am 13. Dezember 2006 aus dem AKH entlassen. Unmittelbar darauf hat die Physiotherapeutin Heidi Amon-Aspalter mit einem speziellen Therapieprogramm das Training begonnen. Im Laufe des Trainings hat sie ihr Programm immer wieder dem Entwicklungsprozess angepasst. Auch dadurch ist der Erfolg in Bezug auf die selektive Steuerungsfähigkeit gelungen. Nach erfolgreichem Training ist der Patient in der Lage, eine Prothese mit wesentlich höherer Funktionalität zu steuern. Der Orthopädie-Techniker fertigt einen Prothesenschaft, der die Prothese am Körper sicher fixiert. Der Schaft soll den Patienten möglichst wenig einschränken und gewährleisten, dass die Elektro-

den zuverlässig an der Haut anliegen. Der künstliche Arm wird an dem Schaft befestigt und kosmetisch verkleidet. Der Schaft stellt die Verbindung zwischen Mensch und Prothese dar.

Künstliche Arme, die den beschriebenen Nutzen in vollem Umfang ausschöpfen, existieren als Prototypen. Als Alltagsprothese

benutzt der Patient eine modifizierte Standardprothese, die aus Serienteilen besteht. Dieser Arm hat zwar nur drei aktive Gelenke, ermöglicht dem Patient aber eine intuitive Steuerung und bietet dadurch einen signifikant höheren Nutzen.

Herausforderungen

Targeted Muscle Reinnervation führt zu einer signifikanten Verbesserung der Rehabilitation von Arm-Amputierten. Die noch zu lösenden Herausforderungen dieser Methode, um dem Patienten den vollen Nutzen aus diesem Verfahren bieten zu können, sind zum Beispiel:

- Die derzeit im Labor verwendeten Prototypen, die den vollen Nutzen bieten, müssen zur Serienreife entwickelt werden.
- In den Prothesenschaft müssen viele Elektroden eingebettet werden. Diese dürfen den Hautkontakt nicht verlieren. Dazu sind neu zu entwickelnde Schafttechniken erforderlich.
- Die auf künstlicher Intelligenz basierende Mustererkennung muss vor jedem Gebrauch der Prothese trainiert werden. Dieser Vorgang dauert ca. 15 Minuten. Die Steuerung muss entsprechend weiterentwickelt werden, damit dieser Vorgang wegfallen kann.

Der Autor:
Dr. Hans Dietl
Otto Bock Austria
Kaiserstraße 39
1070 Wien
Österreich

Literatur:

- Stubblefield, K. A. (2004) *Prosthetics And Orthotics International* 28, 245-253.
- [2] Hijawi, J. B., Kuiken, T. A., Lipschutz, R. D., Miller, L. A., Stubblefield, K. A., Dumanian, G. A. (2006) *Plastic And Reconstructive Surgery* 118, 1573-1578.