

H. Egger

Die gedankengesteuerte Armprothese und die fühlende Handprothese

Bewegungen wie mit dem gesunden Arm – Fühlen wie mit der eigenen Hand

The Brain Controlled Arm Prosthesis and the Sensing Hand Prosthesis Operating like the Healthy Arm – Sensing as the Own Hand

Christian Kandlbauer aus der Steiermark hatte im Jahr 2005 im Alter von 17 Jahren durch einen Unfall an einer 20 000 Volt Hochspannungsleitung schwere Verbrennungen erlitten und dabei beide Arme verloren. Seitdem war er ständig auf fremde Hilfe angewiesen. Essen, Trinken, An- und Ausziehen, selbst der Weg zur Toilette war alleine nicht mehr möglich. Heute ist Christian Kandlbauer mit High-tech-Prothesen von Otto Bock versorgt: rechts mit einer myoelektrischen Armprothese, links mit der gedankengesteuerten Armprothese. Sein Leben ist wieder weitgehend das, das er vor dem Unfall führte. Ein Leben, das er selbstständig und ohne fremde Hilfe bewältigt. Er übt inzwischen nicht nur seinen Beruf als Lagerist in einer Kfz-Werkstätte wieder aus, sondern fährt sogar den Weg zur Arbeit mit seinem eigenen Auto, das er wie ein Fahrer mit gesunden Armen lenkt und bedient.

Christian Kandlbauer, originating from Styria, suffered in 2005 heavy burn injuries at the age of 17 from an accident with a 20,000 volt high-voltage power line. Christian lost both arms in this accident. Since then, he was always dependent on outside help. Eating, drinking, getting dressed, even going to the bathroom alone was no longer possible. Today, Christian Kandlbauer is fitted with high-tech prostheses developed by Otto Bock: on the right side with a myo-electrical arm prosthesis, on the left with a thought-controlled arm prosthesis. His life is nearly back to

what it was like before the accident. A life that he can live independently, without outside help. Not only is he back in his job as a warehouse clerk in a garage, but drives to work in his own car, which he handles just like any driver with sound arms.

Die Verschmelzung von Mensch und Technik

Leistungsstarke Mikroprozessoren in der Größe eines Fingernagels machen das, was vor Jahrzehnten noch als Science Fiction galt, inzwischen möglich. Sie errechnen aus Aktionspotenzialen motorischer Nervenfasern in Echtzeit die ihnen zugrunde liegende Information. Nicht mehr als 80 Millisekunden werden benötigt, um die beabsichtigte Bewegung einer Hand, eines Ellbogen- oder Schultergelenks zu ermitteln.

Gelingt es, nach einer Armamputation die Aktionspotenziale motorischer Nervenreste in eine Hightech-Armprothese zu leiten, können die dort befindlichen Mikroprozessoren die Bewegungen des Phantomarmes ermitteln. Schließt der Patient zum Beispiel in seiner Vorstellung seine Hand, weiß die Prothese das in nur Bruchteilen von Sekunden und macht es ihr nach. In derselben Weise werden alle Gelenke in der Prothese bewegt. Der Patient stellt sich die Bewegung vor – die Prothese führt sie aus.

Die Einbeziehung der motorischen (efferenten) Nervenfasernreste

ist jedoch nur der Anfang eines faszinierenden Weges zu einer Hightech-Armprothese, die den Patienten vergessen lässt, dass er eine Prothese trägt. Die Fortsetzung der Arbeit besteht darin, auch die sensorischen (afferenten) Nervenfasernreste zu nutzen. Mikrosensoren im Zeigefinger der Prothesenhand messen Druck, Temperatur und Oberflächenbeschaffenheit eines gegriffenen Objektes. Ein eigener

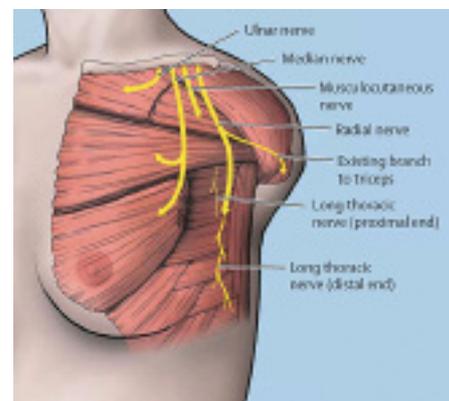


Abb. 1 Prinzipdarstellung: selektiver Nerventransfer.

Mikroprozessor wandelt die gemessenen Größen in geeignete Reize für die sensiblen Nervenfasern um. Von diesen zum Gehirn weitergeleitet, bewirken sie dieselbe Sinneswahrnehmung wie eine gesunde Hand. Mit der Prothesenhand fühlen wie mit der eigenen Hand und den Prothesenarm bewegen wie den eigenen Arm: für Menschen mit fehlenden Gliedmaßen bedeutet das einen noch nie da gewesenen Quantensprung ihrer Lebensqualität. Ein Fallbeispiel soll dies demonstrieren.

Der Weg zur gedankengesteuerten Armprothese

Die chirurgische Umleitung der vier wesentlichen Armnerven N. medianus, N. radialis, N. ulnaris und N. musculocutaneus zum großen segmentierten Brustmuskel führte zur Reinnervation, das heißt, zu einer Neuverbindung zwischen motorischen (efferenten) Nervenfasern und Muskelfasern der einzelnen Segmente (Abb. 1). Unmittel-

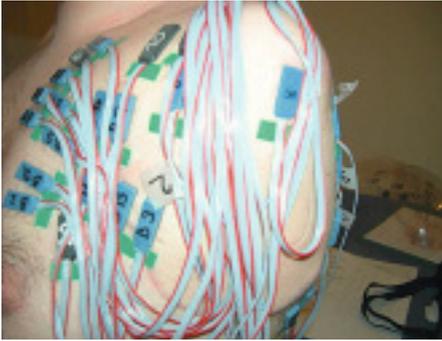


Abb. 2 EMG-Ableitung.

bar nach dem chirurgischen Eingriff konnten noch keine genauen Prognosen darüber erstellt werden, zu welchem Zeitpunkt und an welchen Stellen die Neuverbindungen hergestellt werden würden. Vielmehr galt es geduldig abzuwarten, bis sich die ersten Nervenfasern mit Muskelfasern in der prognostizierten Zeit von ca. vier Monaten – bei dem bekannten Wachstum für Nervenfasern von ein mm pro Tag – verbinden. Circa vier Monate nach der chirurgischen Umleitung konnten erste Muskelkontraktionen im linken Brustbereich beobachtet werden. Diese wurden bei der gedanklichen Vorstellung über eine bestimmte Armbewegung ausgelöst. Das im Reinnervationsbereich mit einem Feld eng beieinander liegender Elektroden abgeleitete Elektromyogramm (EMG) (Abb. 2) war der Ausdruck der gedanklichen Bewegungen des Phantomarmes. Im Laufe der Zeit entwickelten sich immer mehr motorische Regionen mit ansteigenden EMG-Amplituden von ursprünglich nur wenigen Mikrovolt bis mehreren 100 Mikrovolt. Regelmäßig durchgeführte EMG-Analysen ließen zunehmend differenzierte Phantomarmbewegungen erkennen. Stellen und Ausdehnung der einzelnen motorischen Areale änderten sich jedoch

fortwährend – ein sichtbares Zeichen für den fortschreitenden Reinnervationsprozess. Erst nach zwei Jahren schien sich der Prozess allmählich zu stabilisieren. Der Großteil der motorischen Nervenfasernreste des amputierten Armes dürfte also inzwischen neue Muskelfasern gefunden haben. Das Versorgungsprogramm mit der neuartigen Armprothese konnte beginnen.

Während eine Bewegung der Armprothese eindeutig spezifiziert werden kann, kann eine nur vorgestellte Bewegung zunächst weder spezifiziert noch dargestellt werden. Sie findet ja ausschließlich im Kopf des Patienten als „Phantombewegung“ statt.

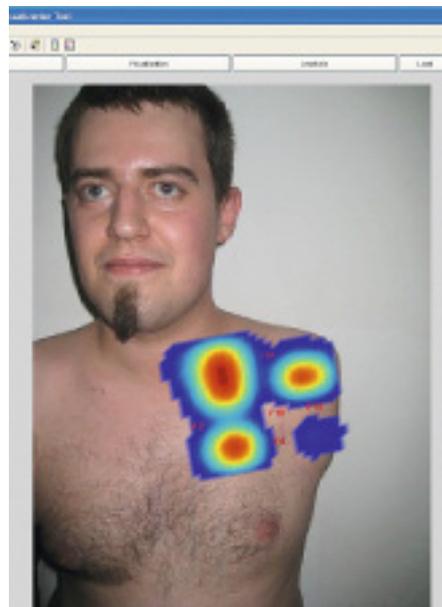


Abb. 3 EMG-Signalmuster durch Phantomarmbewegung.

Nach welchem Schema soll der Patient seine Phantombewegungen trainieren, damit später seine Armprothese auch tatsächlich das macht, was er sich vorstellt? Wie weiß der Patient, dass er eine bestimmte Bewegung des Phantomarmes, wie zum Beispiel „Hand schließen“, tatsächlich jedes Mal auf dieselbe Art und Weise durchführt, noch bevor es ihm die Armprothese demonstriert? Schließlich gibt es weder für ihn noch für einen Therapeuten sichtbare Zeichen der Bewegung des Phantomarms.

Der therapeutische Ansatz bei Christian Kandlbauer hat darin bestanden, sich knapp hinter ihn zu stellen und die Arme auf Höhe seines Schultergürtels nach vorne zu strecken. Vom Therapeuten durchgeführte Hand- und Armbewegun-

gen musste Christian Kandlbauer beobachten und in seiner Vorstellung möglichst exakt nachmachen. Umgekehrt musste sich der Patient im nächsten Trainingsabschnitt selbst für eine Bewegung entscheiden und sie während der Ausführung laut benennen. Der Therapeut führte die angegebenen Bewegungen aus. Das EMG aus der Reinnervations-Zone wurde am PC visualisiert und mit einem Feld von Farbmustern auf ein vorher aufgenommenes Bild seines Oberkörpers projiziert (Abb. 3). Mit dieser Methode konnte eine eindeutige Zuordnung zwischen den gewonnenen Mustern der elektrischen Signallandschaft und der durchgeführten Phantomarmbewegung geschaffen werden.

Eine Farbskala zeigte die EMG-Amplitude an. Auf diese Weise hatten sowohl Patient als auch Therapeut erstmals ein Feedback, um gezielte Bewegungen des Phantomarmes zu trainieren. Die zu trainierenden Phantomarm-Bewegungen waren exakt jene sieben Bewegungen, die später von der Armprothese ausgeführt werden sollten:

1. Hand öffnen/schließen (im Pinzettengriff),
2. Hand öffnen/schließen (im Lateralgriff),
3. Hand innen-/außenrotieren,
4. Hand beugen/strecken,
5. Ellbogen beugen/strecken,
6. Oberarm innenrotieren/außenrotieren,
7. Oberarm beugen/strecken.

Nach mehrwöchiger Übung zeigte sich am Visualisierungsbildschirm zu jeder der Phantomarmbewegungen ein eindeutiges Muster der EMG-Signallandschaft. Dem nächsten Schritt, der Verbindung der Armprothese mit den EMG-Ableitelektroden, stand nichts mehr im Wege.

Zunächst musste die Armprothese noch in einen Trainingsmode geschaltet werden. Jede der sieben Bewegungen musste sich Christian Kandlbauer zunächst hintereinander vorstellen. Dazu wurden ihm diesmal Videos gezeigt, die die Bewegungen darstellten. Die zu jeder Vorstellung abgeleiteten EMG-Signalmuster wurden im Speicher der Armprothese abgelegt und mit einem Steuerbefehl für das stellvertretende Prothesengelenk

versehen. Nach Abschluss der Trainingsprozedur für die Armprothese konnte es endlich losgehen: Christian stellte sich die Bewegungen seines Phantomarmes vor und die Prothese führte sie aus, ein Erlebnis, das alle Beteiligten nicht so schnell wieder vergessen werden. Christian bezeichnet die Prothese, die allein seiner Vorstellung gehorcht, als seine „gedankengesteuerte Armprothese“.

Inzwischen ist der Prototyp der gedankengesteuerten Armprothese zur Alltagsprothese weiterentwickelt worden. Christian Kandlbauer nutzt sie im täglichen Leben außerhalb des Labors von Otto Bock, zu Hause und bei seiner Arbeit. Die Erfahrung zeigt, dass sich Christian Kandlbauer inzwischen nicht mehr an seinen ursprünglichen Arm erinnern muss beziehungsweise an seinen Phantomarm denkt. Das Verhalten der Prothese in Verbindung mit dem optischen Feedback führt zu einer Verschmelzung der Technik im Körperbild des Menschen. Ähnlich wie ein routinierter Autofahrer die Lenkung oder die Gangschaltung seines Fahrzeuges entspannt bedient. Christian bewegt seinen Hightech-Prothesenarm in den vorhandenen Gelenken so, wie er vor seinem Unfall seinen gesunden Arm bewegt hat.

Der Weg zur fühlenden Handprothese

Die chirurgische Umleitung der vier wesentlichen Armnerven N. medianus, N. radialis, N. ulnaris und N. musculocutaneus zu Regionen des Brustkorbs führte zu einer Neuverbindung zwischen den Rezeptoren der Haut und den sensiblen (afferenten) Nervenfasern. Unmittelbar nach dem chirurgischen Eingriff konnten allerdings noch keine genauen Prognosen darüber erstellt werden, zu welchem Zeitpunkt und an welchen Stellen die Neuverbindungen hergestellt werden würden. Vielmehr galt es geduldig abzuwarten, bis sich die ersten Fasern mit den Rezeptoren in der prognostizierten

Zeit von ca. vier Monaten – bei dem bereits genannten Wachstum von ein mm pro Tag – verbinden.

Die Freude im Team war groß, als Christian Kandlbauer nach etwa dreieinhalb Monaten bei Otto Bock anrief und sagte: „Mir war heute

der Haut der Brustregion eine Verbindung hergestellt haben.

Die reinnervierte Brust wurde hinsichtlich ihrer Sensibilität immer mehr zur Hand. Immer größere Areale des Unterarms bildeten sich auf der Brust ab, gefolgt von der Hand und schließlich einzelnen Fingern. Regelmäßig durchgeführte Sensibilitätsuntersuchungen haben ergeben, dass sich eine zunehmend differenzierte Wahrnehmung für Temperatur, Vibration und Druck entwickelte. Stellen und Ausdehnung der einzelnen Areale änderten sich ebenfalls im Laufe der Zeit. Ein sichtbares Zeichen also für den fortschreitenden Prozess der Neuverbindungen.

Erst nach zwei Jahren schien sich der Prozess allmählich zu stabilisieren. Dies ließ vermuten, dass der Großteil der sensiblen Nervenfaserreste des amputierten Armes Rezeptoren gefunden hatte und keine weiteren mehr nachwachsen würden. Die eigene virtuelle Hand, die Christian Kandlbauer sensibel auf der Brust wahr-

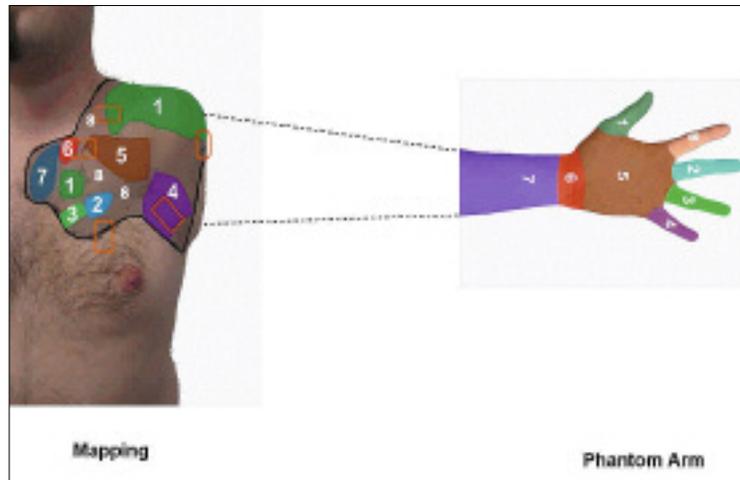


Abb. 4 Virtuelle Hand.

Morgen beim Duschen, als ob das Wasser über Stellen des Unterarms geflossen wäre.“ Die Untersuchung beim nächsten Termin im Labor bestätigte die Wahrnehmung von Christian Kandlbauer. Wenn der Verfasser mit dem Zeigefinger leicht an bestimmte Stellen der Brust klopfte, sagte Christian nicht



Abb. 5 Fühlende Handprothese, schematische Darstellung.

„Ich spüre das Klopfen auf meiner Brust, wie auf der kontralateralen Seite“, sondern er sagte: „Ich spüre das Klopfen auf meinem Unterarm.“ Dies war der erste Beweis dafür, dass seit der Amputation rezeptorlose sensible Nervenenden des Unterarms mit Rezeptoren in

nimmt (Abb. 4). Verglichen mit der Hand eines gesunden Menschen liefert die virtuelle Hand zudem vergleichbare Ergebnisse hinsichtlich des Kälte-, Wärme-, Vibrations- (gemessen bei 100 Hz) und Druckempfindens. Dem nächsten Schritt, der Entwicklung einer

fühlenden Handprothese, stand nun nichts mehr im Weg. Wenn Christian Kandlbauer seine Hand auf seiner Brust fühlt, ist – sensorisch betrachtet – die Brust nicht Brust, sondern Hand. Gelingt es, Messgrößen aus der Prothesenhand – wie die Griffkraft, die Temperatur eines gegriffenen Objektes oder seine Oberflächenbeschaffenheit – zur virtuellen Hand zu leiten, dann fühlt Christian Kandlbauer das gegriffene Objekt in der Hand und nicht auf der Brust, also so, wie er es fühlen würde, hätte er seine gesunde Hand noch. Das Ergebnis darf genau genommen nicht verwundern. Schließlich wird die Information über das gegriffene Objekt genau an jene sensiblen Nervenfasern übertragen, die vor der Amputation Information aus der gesunden Hand an das Gehirn geleitet haben. Im Prototyp der fühlenden Prothesenhand wurden Mikrosensoren eingebaut, die Temperatur, Vibration und Druck auf der Kuppe des Zeigefingers messen. Ein Mikroprozessor basiertes Regelsystem leitet die Information zur Zeigefingerkuppe der virtuellen Hand. Das Regelsystem sorgt dafür, dass sich der Temperatur-, Vibrations- und Druckreiz auf exakt demselben Niveau befindet wie in der Prothesenhand (Abb. 5).

Erste Untersuchungsergebnisse zeigten, dass Christian Kandlbauer übersensibel auf die Reize aus der Prothesenhand reagierte. Er beschrieb insbesondere die Temperaturwahrnehmung bei Objekten, deren Temperatur höher als die

Körpertemperatur war, als unangenehm. Tatsächlich konnten etwa bei Berührung einer Tasse frisch zubereiteten Tees Schweißperlen an seiner Stirn beobachtet werden. Möglicherweise eine psychosomati-

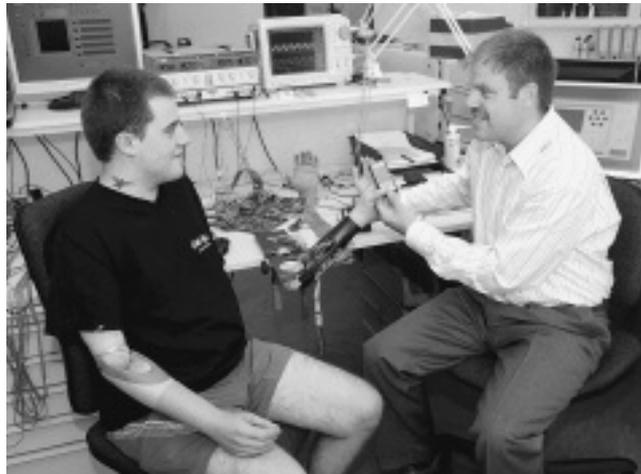


Abb. 6 Fühlen eines Handys im Vibrationsmodus.

sche Reaktion des Körpers, da Christian an seiner Hand seit Jahren keine Wärme mehr empfunden hat. Andererseits ist rasches Schwitzen ein bekanntes Problem für ihn seit der Amputation, insbesondere in den Sommermonaten. Dies ist auf den Wärmestau zurückzuführen, bedingt durch die im Vergleich zu gesunden Menschen geringere Körperoberfläche, die um die Oberfläche der fehlenden Arme reduziert ist. In Christians Fall muss die Haut vorzeitig mit der Absonderung von Schweiß beginnen, um zur Temperaturregulierung des Körpers ausreichend viel Wärme an die Umgebung abzugeben.

Der erste Versuch, das Fühlen eines vibrierenden Handys, war ein großes Erfolgserlebnis für Christian (Abb. 6). Seit dem Unfall konnte

Christian das erste Mal wieder mit seiner Hand erleben, wie sich ein Gegenstand „anfühlt“, ob er glatt oder rau ist. Sobald er mit seinem Zeigefinger über das Objekt streift, versetzt er durch die Relativbewegung den Vibrationssensor wie einen Rezeptor der Haut in Schwingungen. Die Begeisterung über die Wiederherstellung des Tastsinnes wurde etwa beim Händeschütteln oder beim Streicheln von Tieren besonders deutlich, da in Verbindung mit der empfundenen Körperwärme Christian das Gefühl hatte „Leben“ zu spüren. Der Wahrnehmung der Griffkraft ordnete Christian den größten praktischen Nutzen im Alltag zu. Mit der rechten Prothesenhand muss er besonders vorsichtig sein, damit er

einen filigranen Gegenstand, wie etwa ein Glas, nicht zerbricht. Die Griffkraft kann er in diesem Fall nur abschätzen. Die linke, fühlende Handprothese ermöglicht es ihm jedoch zu fühlen, wie stark er zugreift; damit kann er die Griffkraft durch die gedankliche Vorstellung des „Zupackens“ dosieren. Tests haben ergeben, dass bei eingeschalteter Griffkraftwahrnehmung deutlich reproduzierbarere Griffkräfte erzeugt werden können als bei ausgeschalteter Griffkraftwahrnehmung.

Der Autor:

Dr.-Dipl.-Ing. Hubert Egger
 Otto Bock HealthCare Products
 GmbH
 Kaiserstr. 39
 A – 1070 Wien



TRICHTERFRÄSEN

TEL. 0049 (0) 2336 9283-0

AFT-INTERNATIONAL.COM