



Eine helfende Hand

Damit Prothesen die Aufgaben unserer Hände zumindest teilweise übernehmen können, nutzen sie modernste Technologien und künstliche Intelligenz.

Denise Müller-Dum und Jens Kube

Die menschliche Hand besteht aus 36 Gelenken und 39 Muskeln. Rund 20 Freiheitsgrade reichen aus, um die Motorik dieses sehr komplexen und besonders beweglichen Gebildes zu beschreiben. Trotz aller Fortschritte in der Orthopädietechnik können Prothesen dies nicht leisten – eine Teilfunktionalität lässt sich heute aber wiederherstellen.

Ungewöhnliche Ansätze sind 3D-gedruckte bionische Unterarmprothesen oder Modelle aus Legosteinen. Historisch betrachtet gilt der römische Offizier Marcus Silus (3. Jh. v. Chr.) als erster Träger einer Handprothese, über deren Beschaffenheit aber wenig bekannt ist. Im ausgehenden Mittelalter trug zum Beispiel der Ritter Götz von Berlichingen eine „Eiserne Hand“. Eine solch massive Konstruktion ließ sich mit der gesunden Hand öffnen und schließen und ermöglichte ein Zugreifen. Dem deutschen Arzt und Sanitätsoffizier Ferdinand Sauerbruch gelang 1916 der Übergang von solchen passiven zu aktiven Prothesen: Mit einem Elfenbeinstift kontaktierte er den Oberarmmuskel, sodass dessen Anspannung den Stift bewegte. Diese

Bewegung übertrug ein Seilzug auf die Prothese.

Auch heute steuern die Muskeln im Armstumpf die Prothese – allerdings nicht mehr mechanisch, sondern myoelektrisch. Dabei erfassen Sensoren elektrische Signale im Muskel und übertragen sie an einen Mikroprozessor. Dieser wertet das Elektromyogramm aus und übersetzt es in Signale, um die Bewegung zu steuern. Die erfassten Spannungssignale entsprechen dem Aktionspotential in den Muskeln. Es beruht auf den unterschiedlichen Konzentrationen der Ladungsträger auf beiden Seiten der Zellmembran – und unterscheidet sich vom Membranpotential, das im Ruhezustand der Muskelfasern vorliegt. Beim Anspannen der Muskeln entstehen Spannungen von einigen Millivolt, die mit Elektroden an der Hautoberfläche zu messen sind.

Vom Signal zur Bewegung

Bei myoelektrischen Handprothesen sind solche Elektrodenmodule im Schaft positioniert, der je nach Amputationshöhe auf dem Unterarmstumpf

sitzt. In der Regel arbeiten zwei Module zusammen, etwa für Beuge- und Streckmuskel. Um aus dem Verlauf der Signalstärke im Vergleich mit einem geeigneten Schwellenwert ein zuverlässiges „An“- oder „Aus“-Signal zu generieren, gilt es, die Spannungssignale zu verstärken, gleichzurichten und anschließend mit einem Tiefpass zu filtern (Abb. 1). Für die entsprechende Bewegung öffnet oder schließt ein Elektromotor die Hand oder dreht das Handgelenk. In eine proportionale Steuerung geht auch die Signalstärke ein: Ein starkes Signal führt zu einer schnellen Bewegung, ein schwaches zu einer langsamen.

Allerdings lassen sich so in der Praxis nur wenige der natürlichen Freiheitsgrade kontrollieren. Beispielsweise führt eine Kontraktion des Beugemuskels zum Zugreifen und eine des Streckmuskels zum Loslassen. Gleichzeitig weitere Bewegungen auszuführen, etwa eine im Alltag übliche Rotation der Hand, bedarf zusätzlicher Steuerung. Möglich wäre es, mit der gesunden Hand einen Taster zu betätigen, die Kontraktionsgeschwindigkeit zu variieren oder

durch das gleichzeitige Anspannen des Muskelpaares (Co-Kontraktion) zwischen einzelnen Funktionen hin- und herzuschalten. Die betroffene Person muss die Bewegung in ihre Einzelteile zerlegen und diese nacheinander ausführen – ein völlig anderer Vorgang als der intuitive Gebrauch der gesunden Hand. Daher gleicht es dem Erlernen eines Musikinstruments, eine Handprothese gezielt zu steuern: Ein intensives Training über längere Zeit ist nötig, damit eine Prothese wichtige Bewegungsfreiheiten zurückgeben kann.

Mustererkennung gefragt

Künstliche Intelligenz soll die Bewegungen der Prothese flüssiger machen. Dazu wertet ein Algorithmus das Zusammenspiel unterschiedlicher Muskelgruppen bei bestimmten Bewegungen aus. Trotz des amputierten Gliedes können Nutzerinnen und Nutzer die Bewegungsmuster noch abrufen und die entsprechenden myoelektrischen Impulse im Stumpf erzeugen. Dazu stellen sie sich die Bewegung entweder vor oder üben sie mit den noch vorhandenen Gliedmaßen aus. Dann gilt es, die Signale aus dem Zusammenspiel der Muskeln mit gleichmäßig um den Arm verteilten Elektrodenmodulen aufzunehmen, mit bekannten Bewegungsmustern abzugleichen und die entsprechenden Kommandos bis zu 40-mal pro Sekunde an die Prothese zu schicken. Der Algorithmus entscheidet sich anhand des Muskelzusammenspiels für eine Bewegung. Doch die Muster unterscheiden sich teils nur um Nuancen. Ein ausgiebiges Training, unterstützt mit einer App, sorgt für eine verlässliche Zuordnung.

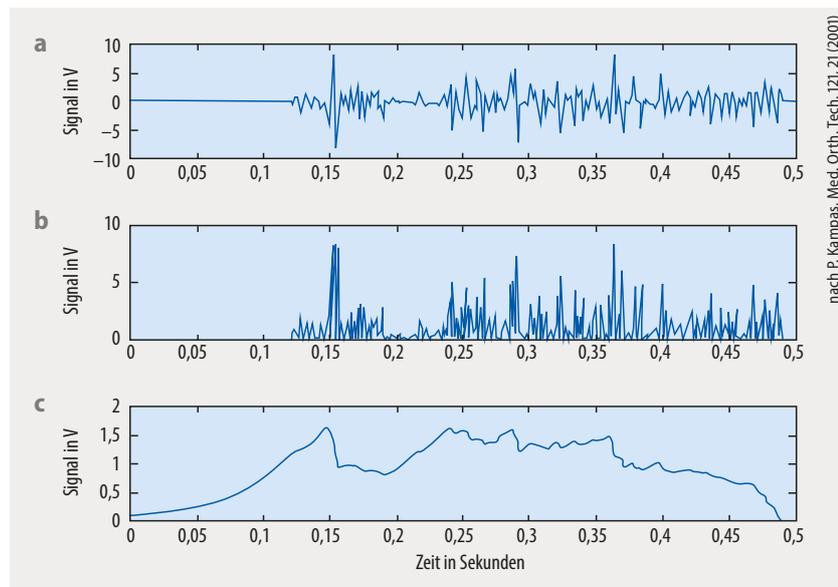


Abb. 1 Das detektierte myoelektrische Signal setzt sich aus Beiträgen verschiedener motorischer Einheiten eines Muskels zusammen. Um die Prothese zu steuern, braucht es nur die „Einhüllende“ des detaillierten Signals. Sie ergibt sich nach dem Verstärken (a) und Gleichrichten (b) durch das Glätten mit einem Tiefpassfilter (c).

So hat sich seit Sauerbruch einiges in der Prothesentechnik getan, um auch nach dem Verlust einer Hand ein flexibles Greifen zu realisieren. Doch zum sicheren Greifen gehört auch das Fühlen. Ein zu festes Zupacken kann den Gegenstand beschädigen, bei zu leichtem Griff rutscht er aus der Hand. Diese Information liefert der Tastsinn; sie beeinflusst im Sinne einer Rückkopplung den Prozess des Greifens. Personen mit einer Prothese müssen sich dazu auf ihren Sehsinn verlassen und die Bewegung gegebenenfalls korrigieren. Neuere Greifapparate geben bereits Rückmeldung, ob beispielsweise stärker zugelangt werden muss.

Der Tastsinn ist noch nicht vollständig verstanden. Dennoch stehen drei wesentliche Informationen fest, die er beim Greifen bereitstellt: Wann gibt es Kontakt mit

dem Gegenstand, wie ist dieser beschaffen und wie fest wurde zugegriffen? Einige dieser Informationen stellen beispielsweise Kraftsensoren zur Verfügung. Zur Übermittlung bedarf es eines Tricks: Anstatt die Tastnerven anzuregen und so ein Gefühl zu erzeugen, werden Vibrationen im Schaft ausgelöst, die sich mit etwas Übung schnell und korrekt interpretieren lassen.

Um eine „fühlende“ Prothese zu entwickeln, versuchen Forschende, die sensorische Rückmeldung direkt an einen Nerv weiterzugeben, und zwar mithilfe chirurgisch eingesetzter Elektroden. Ein anderer Ansatz ist die Entwicklung einer künstlichen Haut, die Druckreize in Lichtsignale umwandelt. Im Tierversuch gelang es, Nervenzellen so anzuregen, dass sie Signale aussenden, die das Nervensystem prinzipiell verarbeiten kann. Bei diesen Feedback-Modellen handelt es sich aber noch um grundlegende Forschung: Bis zum praktischen Einsatz beim Menschen dürfte noch einige Zeit vergehen.

Die Autor:innen

Dr. Denise Müller-Dum und **Dr. Jens Kube**,
awk/jk – Agentur für Wissenschaftskommunikation, awkjk.de

