

GEGEN DEN STROM

Bewegung ist eines der Kardinalzeichen des Lebens. Die versierten Funktionen der menschlichen Hand bedürfen des Zusammenspiels von über 60 Muskeln in Schulter, Arm, Hand und Handgelenk. In unserem Alltag bewältigen wir manuelle Aufgaben so meisterhaft, dass kaum einer von uns einen Gedanken daran verschwendet, welche Leistung unsere Hände täglich erbringen und wie abhängig wir von ihnen sind. Der Verlust einer Hand, z. B. durch Amputation, stellt Betroffene daher vor eine immense Herausforderung. Elektromechanisch gesteuerte Prothesen können heutzutage einen Teil der menschlichen Handfunktion nachempfinden. In diesem Kapitel wollen wir die neurobiologischen Grundzüge von Bewegung und menschlicher Handfunktion erläutern und anhand eines Patientenschicksals beleuchten, wie das Konzept der bionischen Rekonstruktion entstanden ist.

Samstags zu arbeiten, kostete Patrick keine Überwindung. Er war als gelernter Elektroenergietechniker bereits eine ganze Woche auf der Baustelle in Mannersdorf am Leithagebirge tätig und wusste, dass es bald wieder zurück ins heimatliche Oberösterreich gehen würde. Seine Firma war dort mit Revisionsarbeiten an der Energieversorgung eines Zementwerks beschäftigt. Keine außergewöhnliche Tätigkeit für Patrick. Der Tag nahm jedoch eine Wendung, mit der niemand auf der Baustelle gerechnet hatte. An diesen kalten Samstagmorgen im Februar 2008 würde sich Patrick sein ganzes Leben lang erinnern.

Die Starkstromleitungen der gesamten Baustellenanlage wurden vor Arbeitsbeginn ausgeschaltet, damit Stromkabel verlegt werden konnten, was ohne Unterbrechung des Stroms lebensbedrohlich gewesen wäre. Patrick wollte im Zementwerk ein Kabel, das aus dem Boden kam, auf dicke Kupferschienenwickeln, die in die darüber liegende Etage führten. Um an die Kupferschienen zu gelangen, stieg Patrick auf eine Leiter, während sein Oberschenkel das Kabel streifte, das sich aus dem Boden emporschlangelte. Zwei Kilometer von der Baustelle entfernt hatte ein Kollege kurz davor den Schaltkreis jenes Anlagenteils, in dem Patrick gerade arbeitete, wieder eingeschaltet. Über dreißig Sekunden war er im Stromkreis gefangen, während 20.000 Volt durch seinen Leib zuckten.

Abb. 2: Durch die Unachtsamkeit eines Kollegen stand der Anlagenteil der Baustelle, in dem Patrick arbeitete, unter Starkstrom.



Elektrischer Strom kennt keinen Unterschied zwischen dem Menschen und einem anderen leitfähigen Material. Was er braucht, um zu fließen, ist einzig und alleine eine Eintrittsstelle und eine Austrittsstelle. Die Eintrittsstelle bahnte sich der Strom, ausgehend von dem unter Spannung stehenden Kabel, durch Patricks Arbeitshose und den darunterliegenden Oberschenkel. Der Strom schoss durch seinen Körper. Patricks Muskulatur verkrampfte am ganzen Körper, irgendwie schaffte er es aber trotzdem, sich an den Kupferschienen nach oben zu ziehen. Als er merkte, dass er dadurch den Stromkreis nicht verlassen hatte, bündelte er seine letzte, verbliebene Kraft und schrie um sein Leben. Ein Kollege in der Nähe hatte Patrick gehört. Als dieser ihn in einer Rauchwolke auf der Leiter hängen und am ganzen Körper zucken sah, hätte er ihn aus seiner Panik heraus beinahe selbst aus dem Stromkreis befreien wollen. Ein Fehler, der vermutlich beider Leben gekostet hätte. Stattdessen rief der Kollege ebenfalls um Hilfe, bis jemand über einen Notausschalter den Strom abschaltete. Als der Strom seinen Körper verlassen hatte, fiel Patrick rücklings von der Leiter und schlug am Boden auf. Rauch stieg von seinem Körper auf, dessen Geruch an verkohltes Grillfleisch erinnerte. Während des Unglücks war Patrick ununterbrochen bei vollem Bewusstsein. Vom Aufprall am harten Boden war er zwar leicht benommen, realisierte aber ganz klar, was soeben geschehen war.

Durch die dicke Arbeitskleidung konnte der damals 20-Jährige nicht alle Verletzungen ausmachen. Bis auf ein leichtes Brennen spürte er keine Schmerzen. An der rechten Hand dürfte sich der Strom eine Austrittsstelle gesucht haben. Es fehlte das Endglied des Mittelfingers, auch der Daumen war am Übergang zur Handfläche stark verkohlt. Blut konnte er keines sehen. Es verging mehr als eine halbe Stunde, bis der Notarzthubschrauber endlich da war. Als Patrick beim Warten seinen Kopf auf die linke Seite neigte, sah er, dass die Finger der linken Hand komplett verbogen waren, ähnlich einer Katzenkralle. Er konnte keinen Finger dieser Hand bewegen, nicht einmal das Handgelenk konnte er vom Boden heben. Auch als medizinischer Laie erkannte Patrick, dass die Verletzungen an der linken Hand bedeutend schlimmer aussahen als der verkohlte Daumen der Gegenseite.

Am rechten Oberschenkel, wo der Strom in Patricks Körper eingetreten war, sah er nur ein kleines schwarzes Loch in seiner Arbeitshose, als hätte jemand dort eine Zigarette ausgedämpft. Erst als der Notarzt ihn aus seiner Kleidung geschnitten hatte, wurde die Eintrittsstelle sichtbar, wo der Strom die Hälfte

seines rechten Oberschenkels verkohlt hatte. Langsam wurde Patrick klar, dass es doch schlimmer war, als die oberflächlichen Verletzungen anfangs vermuten ließen. Der Notarzt gab Patrick starke Beruhigungsmittel, das Letzte, was er mitbekam, war die Diskussion des Notarztes mit der Leitstelle des Wiener AKH. Die zuständigen Koordinatoren sprachen von einer voll belegten Verbrennungs-Intensivstation, der Hubschrauber solle das Krankenhaus Wiener Neustadt anfliegen. Der Notarzt, der diese Anweisung schier ignorierte, schrie in sein Funkgerät, dass er diesen Patienten in zwanzig Minuten auf dem Landeplatz des Wiener AKH übergeben würde. Bei dem Satz „So ein großes Loch habe ich noch nie in einem Körperteil gesehen“ dämmerte Patrick langsam weg. Im AKH schaffte er es in einem letzten, klaren Moment, seine Familie anzurufen. Seine Eltern sollten sich auf den Weg ins Wiener AKH machen, die Ärzte würden ihm jetzt gerne das Leben retten.

Die Notoperation, die sofort nach Übernahme des Patienten erfolgte, fand in einem Operationssaal statt, der speziell für Verbrennungspatienten eingerichtet ist, direkt im Anschluss daran befand sich die Verbrennungs-Intensivstation. Das Team von Ärzten der Abteilung für Plastische und Rekonstruktive Chirurgie, das an diesem Wochenende Dienst hatte, unternahm alles, um Patrick in einen stabilen Zustand zu überführen. Zum Glück waren bei Patrick keine lebensbedrohlichen Herzrhythmusstörungen aufgetreten, die nach einem Stromunfall auch zu Kammerflimmern und plötzlichem Herztod führen können.

Elektrischer Strom kann auf seinem Weg durch den Körper tiefe Gewebe schichten verbrennen, die sich unter einer äußerlich unversehrten Haut verbergen können. Die plastischen Chirurgen bewerteten vor allem die Austrittsstelle an Patricks schwer verwundeter linker Hand als kritisch. An der Strommarke am Unterarm zeigten sich alle Strukturen schwer beschädigt; die Sehnen der Handbeugemuskulatur waren vom Strom verbrannt, ebenso die wichtigsten beiden Nerven in dem Bereich, die zur Hand ziehen, um dort die Muskulatur und Haut zu versorgen. Das Fettgewebe, das normalerweise unterhalb der Haut liegt, war in diesem Bereich ebenfalls verkohlt. Dieses abgestorbene Gewebe musste so großflächig abgetragen werden, dass ein riesiger Defekt am Unterarm entstand, den man vorerst offenlassen musste. Um einen Druckanstieg im umliegenden Gewebe durch den Muskelzerfall und austretende Zellinhalte zu vermeiden, wurde ein langer, wellenförmiger Schnitt bis zur Achsel hinauf gesetzt, der die Haut und die darunter liegenden Faszien spaltete.

Auch am rechten Oberschenkel musste sehr viel verbranntes Gewebe chirurgisch entfernt werden, darunter auch abgestorbene Muskulatur. Der entstandene Defekt musste anschließend mit Haut bedeckt werden, die von Patricks Unterschenkeln und dem unversehrt gebliebenen Oberschenkel der Gegenseite entnommen wurde. Mit dieser Hauttransplantation konnte zwar die Oberfläche der Wunde gedeckt werden, der großvolumige Defekt auf Patricks Oberschenkel würde jedoch immer sichtbar bleiben.

An der rechten Hand musste der Mittelfinger, dessen Spitze durch den Stromausritt verkohlt worden war, rückgekürzt und amputiert werden. Auch der rechte Daumen, dem Patrick am Unfallort gedanklich gute „Überlebenschancen“ gegeben hatte, musste aufgrund des Verletzungsausmaßes, das der Strom hinterlassen hatte, in seiner vollen Länge amputiert werden.

Als Patrick zehn Stunden später noch an der Beatmungsmaschine aus der Narkose erwachte, wurden ihm die operativen Schritte erklärt, die nötig waren, um sein Überleben zu sichern. Die Wunden der rechten Hand und des Oberschenkels waren zu dieser Zeit ausreichend versorgt, bei der linken Hand machte man deutlich ungenauere Angaben. Unter Umständen müsste die Hand aufgrund der schwerwiegenden Verletzung auf Höhe des Unterarms amputiert werden. Am nächsten Tag besuchte Oskar C. Aszmann Patrick zum ersten Mal und begutachtete beide Hände. Die linke Hand war tatsächlich in einem katastrophalen Zustand, doch unversucht wollte Aszmann nichts lassen und entschloss sich, den großen Defekt mit einem Gewebeblock aus der Leiste zu decken. Seine linke Hand war vier Wochen am Bauch eingenäht, um ein Einwachsen des Leistenlappens am Unterarm zu sichern. Dieses Vorgehen stabilisierte die Wundverhältnisse, wodurch die Hand erhalten werden konnte. Funktion war dadurch allerdings noch keine zurückgewonnen.

Patrick verbrachte weitere sechs Wochen auf der Verbrennungs-Intensivstation, wo er Menschen beim Sterben zusehen musste. Patienten, deren Verletzungen einen so großen Teil der Körperoberfläche betrafen, dass all die Bemühungen, die ihr Körper anstellte, am Leben zu bleiben, letztlich erfolglos blieben. Patrick realisierte, dass er so einem Schicksal nur knapp entkommen war.

In einem zivilrechtlichen Prozess konnte durch ein Gerichtsgutachten der Unfalltag genau rekonstruiert und analysiert werden. Ein Arbeitskollege hatte den

Anlageteil, in dem Patrick gearbeitet hatte, aufgrund eines zufahrenden Lkw, der Zement aufladen wollte, kurzzeitig unter Strom geschaltet. Ein Fehler, der niemals hätte passieren dürfen. Der Kollege wurde schuldig gesprochen. Grob fahrlässige schwere Körperverletzung lautete das Urteil. An den Staat musste der Kollege rund 3.000 Euro Strafe zahlen. Patrick hatte aufgrund der Tatsache, dass es sich um einen Arbeitsunfall handelte und der Kollege diesen Fehler nicht vorsätzlich begangen hatte, kein Recht auf Entschädigungszahlungen. Was Patrick aber viel mehr zusetzte, war die Uneinsichtigkeit des Kollegen, der jede Schuldzuweisung mit einem Kopfschütteln von sich wies, selbst nach der Verurteilung vor Gericht. Er wies sogar noch jede Schuld von sich, als Patrick bei einem weiteren Gerichtsprozess die AUVA klagte, da es sich in seinen Augen um einen Arbeitsunfall handelte, der durch die grobe Außerachtlassung von Arbeitnehmerschutzvorschriften verursacht worden war und ihm dadurch über 70% Minderung der Erwerbsfähigkeit entstanden waren. Patrick wurde vom Richter erneut Recht gegeben. Die Einmalzahlung, die ihm dadurch zu stand, änderte aber nicht das Geringste an seiner Situation. Und schon gar nichts an seiner Handfunktion.



Abb. 3: Der große Defekt Patricks linker Hand musste mit einem Gewebeblock aus der Leiste gedeckt werden. Der Geweblappen ist gut eingehieilt, nachdem sein Unterarm vier Wochen an seinem Bauch eingenäht war.

Als Patrick nach Hause entlassen werden konnte, wog er nur knapp über vierzig Kilogramm. Es folgten vierzehn Wochen Rehabilitation. Die linke Hand konnte er gar nicht bewegen. Die rechte bestand nur noch aus drei Fingern; der für die Handfunktion so wichtige Daumen fehlte. An diese gewaltige Umstellung musste sich Patrick erst gewöhnen. Dazu kam, dass die Amputationsnarbe des Daumens besonders schmerzte; selbst leichteste Berührungen an dieser Haut verursachten sehr starke Schmerzen. Die Ergotherapeutin begann langsam mit einer Stumpfahärtung, wie Patrick erklärte wurde. Der Amputationsstumpf müsste langsam an Berührungen gewöhnt werden, das unangenehme Gefühl ließ tatsächlich mit der Zeit nach. Mit einem provisorischen Plastikdaumen, der mit einem Klettverschluss um die Hand herum fixiert wurde, konnte Patrick erstmals wieder Gegenstände auf annähernd natürliche Weise manipulieren. Einhändig, versteht sich – die linke Hand blieb leblos.

Wir waren regelmäßig mit Patrick in Kontakt und wollten die Funktion seines rechten Daumens langfristig wiederherstellen – biologisch gab es da ein paar Möglichkeiten. Oskar C. Aszmann schlug Patrick im Oktober 2008 den Transfer seiner zweiten Zehe vom Fuß als Daumenersatz vor. Patrick hatte noch nie von so etwas gehört. Die Idee lehnte er nicht grundsätzlich ab, allerdings wollte er gerade von seinen Füßen, die vom Strom unversehrt geblieben waren, kein Stück intakte Anatomie opfern. Gemeinsam kamen wir im Gespräch auf die Idee, stattdessen den Ringfinger der linken Hand auf die Daumenposition der rechten Hand zu verpflanzen. Aufgrund des Nerven- und Weichteilschadens würde sich auch durch weitere Operationen an der linken Hand die Funktion des vierten und fünften Fingers nicht verbessern. Anstatt die beiden Finger ohne weiteren Nutzen zu amputieren, wurde schließlich der linke Ringfinger zum rechten Daumen. Die Operation war ein voller Erfolg. Der nur noch aus Narben bestehende linke Kleinfinger wurde im gleichen Eingriff amputiert.

Beflügelt von diesem rekonstruktiven Erfolg wollten wir Patrick auch in seiner linken Hand ein wenig Funktion zurückgeben. In einem weiteren sechsstündigen Eingriff wurden Sehnen, Nerven und Weichteilgewebe aus Patricks rechtem Oberschenkel in den linken Unterarm verpflanzt. Alles lief nach Plan, nur leider waren die Finger der Hand so steif und leblos, dass sie selbst mit intensivster Physiotherapie nicht mehr zum Leben zu erwecken waren.

Patrick übte, wartete, übte weiter. Schienen wurden angepasst, Therapien verordnet und irgendwann mussten wir dann die bittere Bilanz ziehen: die Hand wird nicht mehr. Oskar C. Aszmann konnte Patrick nichts mehr anbieten, was die Funktion der linken Hand verbessern würde. Diese Wahrheit, die sich kein Chirurg nach langer Mühe eingestehen will, die anzuerkennen aber wichtig ist, um auch dem Patienten die Möglichkeit zu geben, abzuschließen und weiterzugehen, musste ausgesprochen werden.

Patrick war verzweifelt. Das konnte es doch nicht gewesen sein. Der junge Oberösterreicher hoffte, im Internet auf Alternativen zu stoßen. Innerhalb kürzester Zeit filterte er zwei Möglichkeiten heraus, die in seinen Augen für ihn in Frage kamen: die Transplantation der Hand eines Toten oder eine Handprothese. Er nahm Kontakt mit dem Handtransplantationszentrum in Innsbruck auf. Dort erklärten ihm die Chirurgen allerdings, dass Patrick ein Handtransplantat mit den in seinem Unterarm fehlenden bzw. funktionsuntüchtigen Nerven niemals bewegen würde können. Eine Option weniger. Damit kam nur noch die Prothese in Frage. Patrick trug diese Idee an uns heran und gemeinsam loteten wir die Möglichkeiten des mechatronischen Handersatzes aus. Patrick war Feuer und Flamme. Endlich ein Funken Licht am Ende des Tunnels! Die wichtigste Frage war nun, ob überhaupt Steuersignale für eine „elektrische“ Hand in seinem Unterarm vorhanden waren – und ob Patrick diese noch „denken“ konnte. Schon in der nächsten Woche waren wir im Labor. Gemeinsam mit Ingenieuren der Firma Otto Bock verkabelten wir Patrick und verbanden ihn mit einer „virtuellen Hand“ am Computer. Nach einem Vormittag der Signalaustestung und des „Hand-Denkens“ konnte Patrick die virtuelle Hand am Computerschirm bewegen. Er war begeistert. Die Hand, die er so lange nicht bewegen konnte, tanzte am Bildschirm vor ihm!

„Dann müssen Sie mir doch nur noch die Hand amputieren!“, hört sich Patrick heute noch sagen. Welche Grundsatzdiskussion er mit dieser Aussage unter Rekonstruktionsspezialisten losgetreten hatte, war ihm in diesem Moment nicht bewusst gewesen. Und wie funktioniert das eigentlich, wie konnte Patrick diese virtuelle Hand am Computerschirm bewegen?

Nach einer kurzen Einführung in die allgemeine Bewegungslehre klären wir auf, wie Patricks Wunsch nach einem prosthetischen Handersatz schließlich realisiert werden konnte.

VOM GEDANKEN ZUR BEWEGUNG

Wie kommt es von einem Gedanken an eine Bewegung dazu, dass unsere Gliedmaßen tatsächlich das tun, was wir wollen?

Bewegung bzw. Reizantwort ist eines der wichtigsten Kardinalzeichen des Lebens, wobei das Spektrum der Bewegung eine immense Spannweite umfasst: von simpler Automatisierung, Reaktion auf äußere Reize bis hin zu hochkognitiver bewusster Aktion. Selbstverständliche Tätigkeiten – wie das Schreiben mit einem Stift – erfordern das Zusammenspiel von über 60 Muskeln in Schulter, Arm, Hand und Handgelenk und ohne ein intaktes **Nervensystem** sind solch koordinierte Bewegungen nicht möglich. Die Erkenntnis, dass Neuronen (= Nervenzellen) mit der Steuerung von Bewegung zu tun haben, verdanken wir dem Anatomen **Herophilos**, der 300 v. Chr. Strafgefangenen bei lebendigem Leib aus dem Rückenmark austretende Nerven durchtrennte und dabei Funktionsausfälle in den Armen und Beinen beobachtete. Nerven stellen also die nötige Verbindung zwischen Gehirn und Endorgan her, sei es ein Sinnesorgan, von dem Empfindungen ans Gehirn zurückgesandt werden, oder ein Muskel, dem über den ankommenden Nerv ein Impuls zur Kontraktion gegeben wird.

DAS ZENTRALE NERVENSYSTEM

Das zentrale Nervensystem (ZNS) ist der Koordinator und das Kontrollzentrum für den Körper. Zum zentralen Nervensystem zählen das **Gehirn** und das **Rückenmark**.

Wie ein Muskel besitzt das Gehirn die Fähigkeit, trainiert zu werden, wobei sich einzelne Hirnareale vergrößern können und spezifische Verbindungen zwischen verschiedenen Regionen verstärkt werden, die für spezielle Fähigkeiten benötigt werden. Wer regelmäßig Klavier übt, merkt, dass sich die Fingerfertigkeit immer mehr verbessert und das Gehirn immer effizienter arbeitet. Unser Gehirn ist also flexibel und Motorik durchaus erlernbar. Dieses Phänomen wird als **Plastizität** bezeichnet – ein Vorgang, der vor allem nach Unfällen, die

das Nervensystem beeinträchtigen, wichtig ist, um Regeneration und Rehabilitation zu ermöglichen.



Die Oberfläche des Gehirns ist durch Hirnwindungen (= Gyri) gekennzeichnet. Striche man all diese Windungen glatt, hätte das Gehirn eine Oberfläche von $2,3 \text{ m}^2$. Zwischen den etwa 100 Mrd. Nervenzellen des Gehirns gibt es mehr potenzielle Verbindungen, als es Atome im Universum gibt. Im Fötalstadium bilden sich pro Minute 250.000 Nervenzellen, deren Gesamtzahl schon bei der Geburt erreicht wird. Das Ausbilden von funktionellen Verbindungen zwischen den einzelnen Nervenzellen (= Synapsen) findet allerdings erst nach der Geburt statt und kann bis ins hohe Alter forschreiten.

Über den Hirnstamm ist das Gehirn mit dem **Rückenmark** verbunden, das durch die Wirbelsäule nach außen hin geschützt wird. Das Rückenmark leitet Informationen – also Nervenimpulse – zwischen dem Gehirn und dem gesamten Körper (s. Abb. 4).

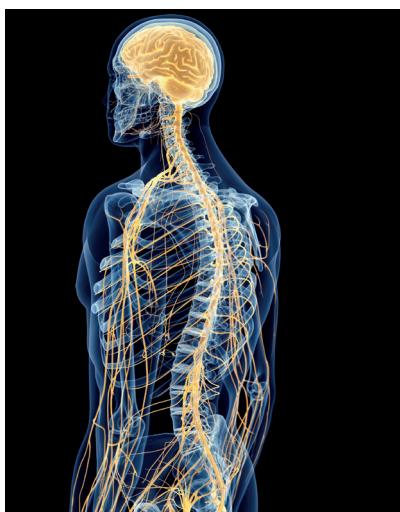


Abb. 4: Das zentrale Nervensystem besteht aus Gehirn und Rückenmark. Vom Rückenmark aus durchziehen Nerven den gesamten Körper, so auch Arme und Hände.