

A. Meier-Koll, K. H. Weber

Fühlbare Beinprothesen

Ein Feldtest mit Phantomstimulatoren im Alltag amputierter Menschen

Perceptible Lower Limb Protheses

A Field Study Testing Phantom Stimulators in the Daily Life of Amputees

In einem früheren Beitrag wurde die Möglichkeit beschrieben, Phantomempfindungen für Teile einer amputierten Extremität mithilfe elektrischer Impulsströme auszulösen, die auf bestimmte Felder der Haut geleitet werden. Solche rezeptiven Hautstellen bilden sich als Folge einer Reorganisation des somatosensorischen Rindenbezirks der gegenüberliegenden Hirnhälfte, in dem die verlorene Extremität neuronal abgebildet wird. Die Grenzen eines rezeptiven Feldes lassen sich anhand taktiler Reize bestimmen und mithilfe eines Fettstiftes auf die Haut zeichnen. Der Prototyp eines Phantomstimulators besteht aus einem tragbaren, akkugespeisten Impulsgenerator und einem Satz von Elektroden und Drucksensoren. Letztere werden in die Schuhsohle eingelassen, auf die der Prothesenfuß tritt, ein Sensor unter dem Ballen, der andere unter der Ferse. Schließlich werden die Serien elektrischer Impulse des Generators mit den Schritten getriggert und lösen über die elektrische Reizung entsprechender rezeptiver Felder Phantomempfindungen für Ballen und Ferse aus. Für einen ersten Feldtest wurden nach dem Muster des Prototyps mehr als 20 verkleinerte Phantomstimulatoren hergestellt. Sie wurden versehrten Personen mit unterschiedlichen Amputationen einer oder beider unterer Extremitäten angepasst und für den alltäglichen Gebrauch zur Verfügung gestellt. Vier Fallberichte aus der noch laufenden Feldstudie werden hier vorgestellt.

Schlüsselwörter:

somatosensorische Hirnrinde, synaptische Reorganisation, rezeptive Felder, elektrische Stimulation, Phantom-Wahrnehmungen

A previous article described the possibility of eliciting phantom sensations in parts of an amputated limb using electrical current applied to certain fields of skin. These receptive areas of the skin are formed as a result of reorganisation of the somatosensory cortex of the contralateral side of the brain, where the lost limb is neurally represented. The boundaries of a receptive field can be determined using tactile stimuli and marked on the skin with a grease pen. A prototype of a phantom stimulator consists of a portable, battery-powered pulse generator and a set of electrodes and pressure sensors. The sensors are inserted in the sole of the shoe where there is contact with the prosthetic foot – one sensor under the ball of the foot, the other under the heel. Finally, the series of electrical pulses from the generator are triggered by steps and elicit phantom sensations for the ball and heel via electrical stimulation of the corresponding receptive fields. More than 20 small-scale phantom stimulators based on the prototype were produced for a first field test. They were adapted to several subjects with various amputations of one or both legs and made available to them for everyday use. Four case studies from the still ongoing field test are presented here.

Key words: somatosensory cortex, synaptic reorganisation, receptive fields, electrical stimulation, phantom sensations

Einleitung

In einem früheren Beitrag wurde ein Verfahren beschrieben, an beinamputierten Personen bestimmte Hautbezirke der zum verlorenen Bein gleichseitigen oberen Extremität elektrisch zu reizen und dadurch Phantomempfindungen für einzelne Teile dieses Beines hervorzurufen [1]. Entsprechende rezeptive Hautfelder lassen sich unschwer anhand taktiler Reize mithilfe einer Zahnbürste oder eines Aquarellpinsels auffinden. Werden ihre Grenzen mithilfe eines Fettstiftes auf die Haut gezeichnet, ergibt sich oft ein Mosaik mehrerer kleiner Bezirke, deren taktile Reizung Phantomempfindungen für bestimmte Teile des verlorenen Beines auslöst. Die meisten Amputierten sind sich solcher rezeptiver Felder nicht bewusst. Einem Patienten der genannten Vorstudie war jedoch aufgefallen, dass Empfindungen einzelner Teile seines amputierten rechten Beines ausgelöst wurden, sooft er seine Katze fütterte und deren Zunge die Innenseite seiner rechten Hand leckte. Anhand taktiler Reizungen mithilfe eines Aquarellpinsels ließen sich in der palmaren Seite seiner rechten Hand rezeptive Felder abgrenzen, deren Reizung selektive Phantomempfindungen für Ballen, Fußgewölbe und Ferse des amputierten rechten Beines auslöste. Rezeptive Felder sind unsichtbar auf die Haut bestimmter Körperteile gezeichnete Belege einer Reorganisation, die sich infolge der Amputation im somatosensorischen Rindenfeld der kontralateralen Hirnhälfte vollzieht [2, 3].

Beide Hirnhälften besitzen je ein Rindenfeld, dessen Neuronen Prozesse anregen, die ein Bewusstsein für einzelne Teile des Körpers hervorrufen. An solchen Zellen enden Nervenbahnen, die von Teilen des Kör-

pers ausgehen. Somit sind Kopf, Arm, Hand, Rumpf, Bein und Fuß eindeutig mit entsprechenden Gruppen von Neuronen der somatosensorischen Rindenfelder verbunden. Der Körper wird vom Scheitel bis zur Sohle in verkleinerter Form als Homunkulus in den somatosensorischen Rindenstreifen beider Hirnhälften abgebildet [4]. Die Amputation einer Extremität unterbricht alle Nervenbahnen, die von ihr ausgehen und im entsprechenden Bezirk des somatosensorischen Rindenstreifens der kontralateralen Hirnhälfte enden. Da die durchtrennten Bahnen keine Nervenimpulse mehr leiten, zerfallen ihre Synapsen an den Zielneuronen. In den nun brachliegenden Bezirk wachsen Nervenfasern aus angrenzenden somatosensorischen Bezirken ein und bilden mit den ungenutzten Neuronen neue synaptische Verbindungen [5, 6, 7]. Benachbarte Bezirke fusionieren mit dem brachliegenden. In eindrucksvoller Weise konnte eine derartige Reorganisation des somatosensorischen Rindenfeldes bei hand- und armamputierten Patienten mithilfe der funktionellen Computertomographie belegt werden [8, 9]. Eine neuere Studie dieser Art konnte überdies zeigen, dass in einen brachliegenden Rindenbezirk nicht nur Nervenfasern der unmittelbaren Nachbarschaft einwachsen, sondern auch aus relativ weit entfernten Teilen des somatosensorischen Rindenfeldes [10]. Daher vermag beispielsweise eine taktile oder elektrische Reizung bestimmter Hautstellen an Hand oder Arm nicht nur die entsprechenden Neuronen des „Hand- oder Armfeldes“ der somatosensorischen Hirnrinde zu aktivieren, sondern über neue, lange

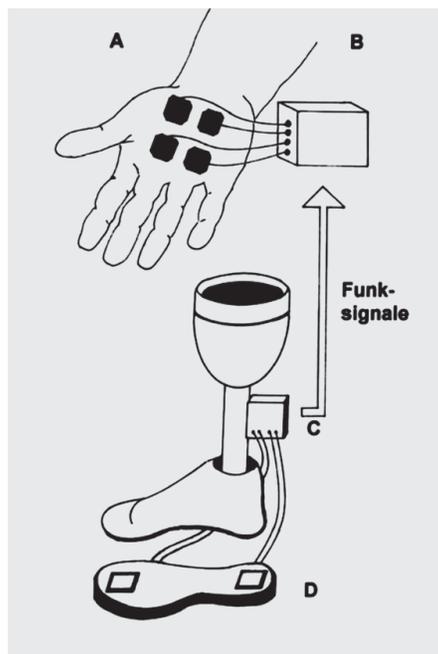


Abb. 1 Funktionsweise eines Phantomstimulators. A) Anordnung zweier Paare von TENS-Elektroden, die je ein rezeptives Feld bipolar reizen, von dem Phantomempfindungen für Ballen und Ferse ausgelöst werden. B) Tragbarer Impulsgenerator. C) Sender zur Steuerung der beiden Stromkreise des Impulsgenerators. D) Drucksensoren im Ballen- und Fersenfeld einer Schuhsohle.

Querverbindungen auch Neuronen des „Beinfeldes“. Der beinamputierte Patient nimmt folglich Phantomempfindungen für Teile seines verlorenen Beines wahr, wenn er an Teilen seiner Hand oder anderen Körperstellen taktil gereizt wird.

Methode

Für einen ersten Feldtest konnten mehr als 20 Personen mit ein- oder beidseitigen Amputationen unterer Extremitäten gewonnen werden. Bei jedem Probanden wurden zunächst Hautzonen an Oberschenkel, Hand, Arm, Schulter, Hüfte und Rücken der dem amputierten Bein gleichseitigen Körperhälfte mithilfe einer Zahnbürste oder eines Aquarellpinsels überstrichen. Sofern der so getestete Patient angab, eine

Phantomempfindung für einen umschriebenen Teil seines amputierten Beines wahrnehmen zu können, wurden die Grenzen der taktil gereizten Hautzone mithilfe eines Fettstiftes angezeichnet. Rezeptive Felder, bei denen die taktile Reizung Phantomempfindungen von Ballen und Zehen oder des gesamten Vorfußes ausgelöst hatte, und solche für Phantomempfindungen von Ferse oder Achillessehne wurden für die elektrische Stimulation ausgewählt.

Ein dafür geeignetes System besteht aus einem tragbaren, akkugespeisten Generator, der rechteckförmige Spannungsimpulse variabler Höhe und Frequenz für zwei Stromkreise liefert. Sein Gebrauch lässt sich am Beispiel einer Person erklären, in deren rechter Hand je ein rezeptives Feld für den Ballen und die Ferse ihres transtibial amputierten rechten Beines gefunden wurde (Abb. 1). Je ein Paar flacher Elektroden, die sich für eine transcutane elektrische Nervenstimulation eignen (TENS-Elektroden), wurde auf diese beiden Hautfelder geklebt und mit dem Generator zu je einem Stromkreis geschlossen. Beide Stromkreise konnten mithilfe einer Funkstrecke drahtlos durch die Signale zweier Drucksensoren eingeschaltet werden, die im Ballen- und Fersenteil einer Schuhsohle eingelassen waren. Impulsspannung und Frequenz wurden für beide Stromkreise so eingestellt, dass die amputierte Person beim Schreiten deutliche Phantomempfindungen für Ballen und Ferse wahrnehmen konnte. Für einen Feldtest wurden mehr als 20 Systeme der beschriebenen Art hergestellt und je zur Hälfte deutschen und kanadischen Beinamputierten angepasst. Sie konnten dann die Geräte in ihrem Alltag erproben.

Ergebnisse

Die an dem Feldtest beteiligten Personen hatten Amputationen unterschiedlicher Höhe an einer oder beiden unteren Extremitäten. Mehr oder weniger ausgedehnte rezeptive Hautfelder fanden sich in jedem Fall auf der dem amputierten Bein gleichseitigen Körperhälfte und bildeten dort teilweise komplexe Mosaik ihrer Anordnung. Die Vielfalt der Orte und Anordnung rezeptiver Felder lässt sich an vier Fallbeispielen belegen.

Fallbeispiel 1

Herrn B. H. (65 Jahre) musste zwei Jahre vor dem ersten Test das rechte Bein

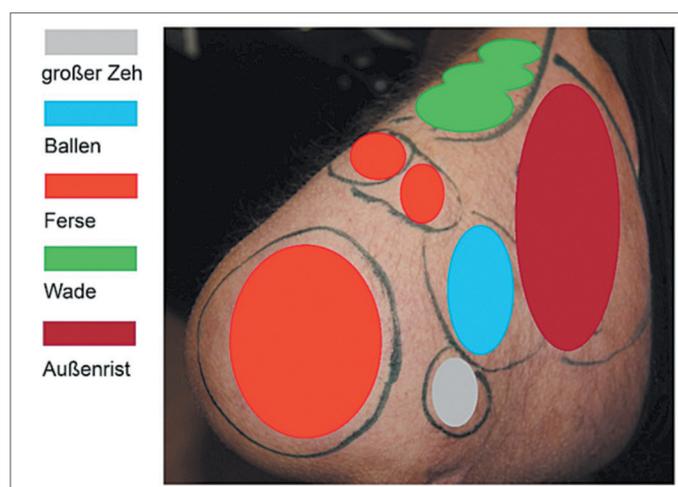


Abb. 2 Rezeptive Felder an Stumpf und Oberschenkel des Patienten B. H. (65 Jahre), deren taktile Reizung Phantomempfindungen unterschiedlicher Teile des amputierten rechten Beines auslöste.

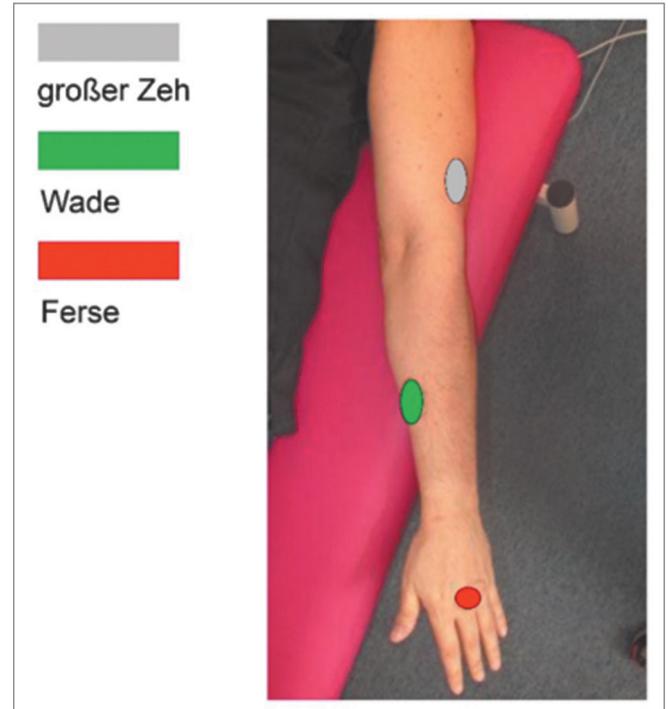
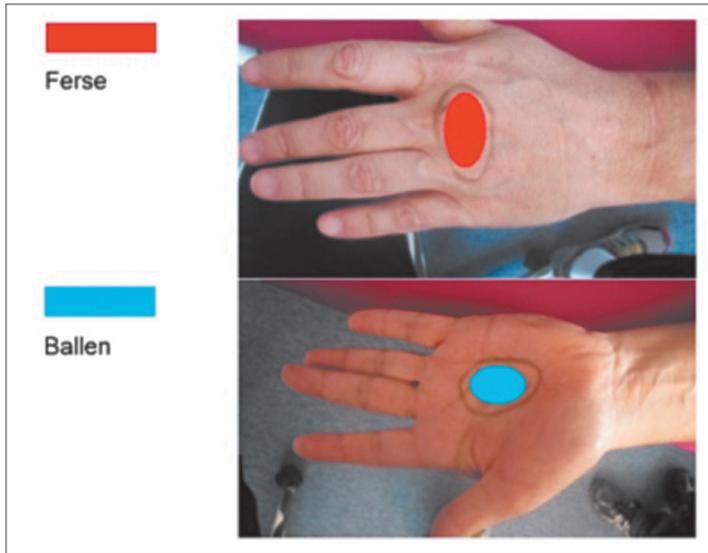


Abb. 3 Rezeptive Felder, deren taktile Reizung bei Patient C. H. (50 Jahre) Phantomempfindungen für Ballen, Ferse, Wade und großen Zeh auslöste.

infolge einer tiefen Venenthrombose oberhalb des Kniegelenks amputiert werden. Taktile Reizungen mithilfe einer Zahnbürste erlaubten es, an seinem Amputationsstumpf und Oberschenkel ein Mosaik mehrerer rezeptiver Felder zu kartieren, von denen sich Phantomempfindungen für Ferse, Ballen, den großen Zeh, Wade und Außenseite des verlorenen Fußes auslösen ließen (Abb. 2).

Ein großes rezeptives Feld für Phantomempfindungen der Ferse überdeckte das Stumpfende. Beim Anlegen der Prothese verschwand es vollkommen im Schaft. Daher wurden die beiden kleineren, fusionierten Fersenfelder oberhalb des Stumpfes und das rezeptive Feld des Ballens mit je

einem Paar TENS-Elektroden überklebt. Nach ersten erfolgreichen Tests bei kurzen Spaziergängen durch Haus und Garten wurde das System Herrn B. H. zur weiteren Erprobung überlassen. Später setzte dessen Orthopädie-Techniker ein entsprechendes Set von Carbonelektroden fest in den Liner ein. Folglich kamen die Elektrodenpaare bereits beim Anlegen des Liners mit den erwünschten rezeptiven Hautzonen des Oberschenkels in Kontakt.

Fallbeispiel 2

Herr C. H. (50 Jahre) arbeitete als Facharzt für Radiologie und erkrankte vor acht Jahren nach einer Stoßverletzung an einem multiresistenten Krankenhauskeim, der sich in seinem linken Bein ausbreitete.

Schließlich musste dieses exartikuliert werden. Herr C. H. trägt inzwischen eine Beckenkorb-Prothese. Da der multiresistente Keim auch die visuellen Rindenfelder beider Okzipitallappen seines Gehirns angegriffen hatte, erblindete Herr C. H. zusätzlich. An Außen- und Innenfläche seiner linken Hand fand sich je eine münz-

große Stelle, deren taktile Reizung eine Phantomempfindung für Ballen und Ferse hervorrief. Zusätzlich fanden sich am Arm ebenfalls münzgroße rezeptive Felder für den großen Zeh und die Wade (Abb. 3).

Auf die Außen- und Innenfläche der linken Hand wurde je ein Paar kleiner TENS-Elektroden geklebt, so dass die von den Drucksensoren der Schuhsohle gesteuerte bipolare Reizung der beiden rezeptiven Felder Phantomempfindungen für Ballen und Ferse im Takt der Schritte auslöste. So ausgestattet vermochte der rindenblinde Patient C. H. mit seiner Prothese auch einbeinig auf dem schwankenden Grund eines Trampolins zu balancieren und eine Haushaltsleiter zu erklimmen.

Fallbeispiel 3

Frau A. B. (28 Jahre) litt seit ihrer Kindheit an Morbus Recklinghausen (Typ 1). Infolge der Fibromatose musste zwei Monate vor dem ersten Test ihr linker Unterschenkel amputiert werden. Wurden bestimmte Zonen ihres linken Unterarmes und ihres linken Oberschenkels mithilfe einer Zahnbürste überstrichen, löste dies Phantomempfindungen für ihre Ferse, die Reihe der Zehen und die Oberseite ihres verlorenen Fußes aus (Abb. 4).

Die genannten rezeptiven Felder zeigten an Unterarm und Oberschenkel ähnliche Anordnungen. Innerhalb der rezeptiven Hautstreifen, welche die Zehenreihe repräsentierten, ließ sich anhand einer taktilen Reizung mittels eines Aquarellpinsels ein ge-



Abb. 4 Rezeptive Hautfelder am linken Unterarm und Oberschenkel der Patientin A. B. (28 Jahre), von denen sich taktil Phantomempfindungen für Zehen, Ferse und Fußrücken des amputierten Beines auslösen ließen.

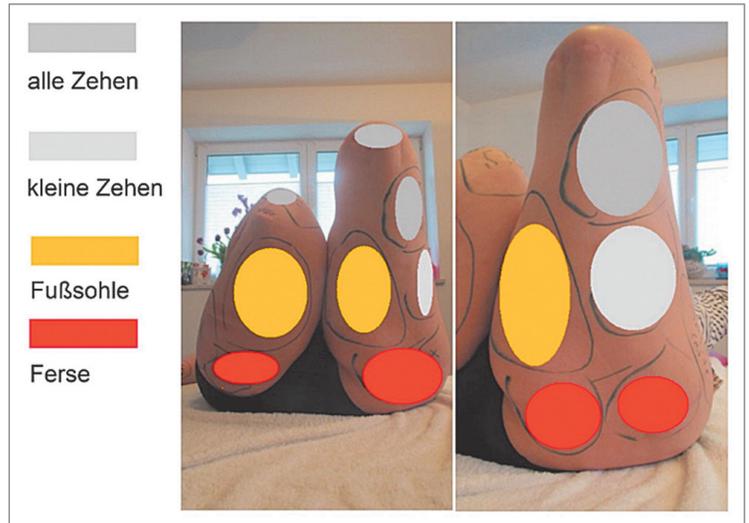
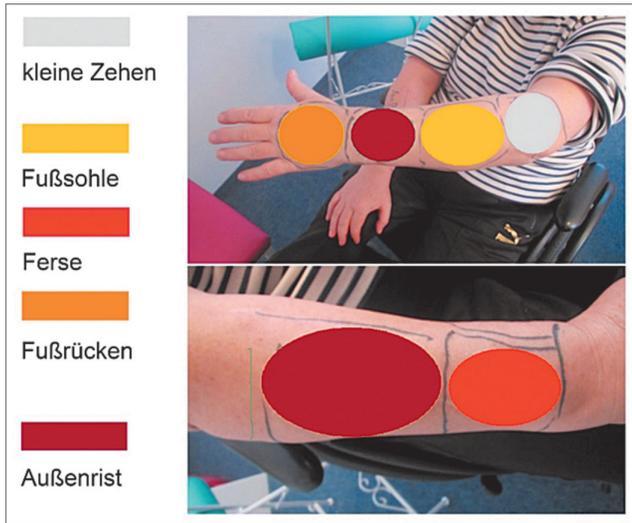
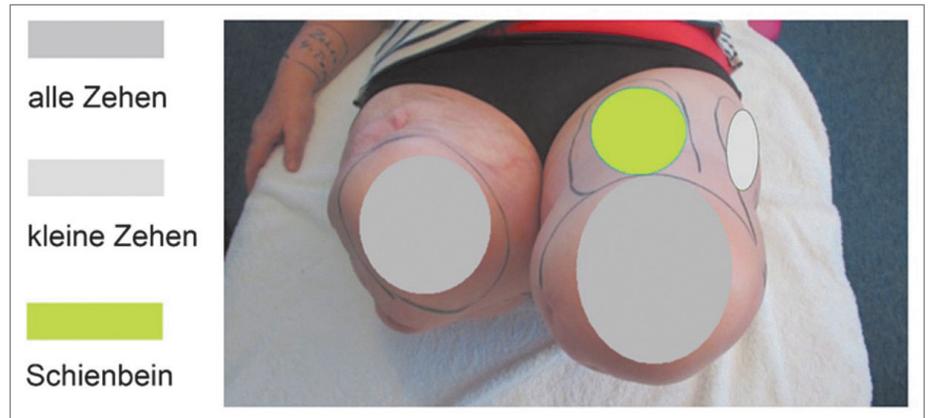


Abb. 5 Mosaik rezeptiver Felder an Armen und Oberschenkeln der beidseitig Oberschenkelamputierten Patientin A. P. (64 Jahre).



sondertes rezeptives Feld des großen Zehs von dem der vier kleinen Zehen abgrenzen.

Fallbeispiel 4

Frau A. P. (64 Jahre) hatte 13 Jahre vor dem ersten Test beide Beine infolge eines Autounfalls eingebüßt und ist beidseitig Oberschenkelamputiert. Sowohl an ihren Händen und Unterarmen als auch an beiden Oberschenkeln fanden sich zahlreiche rezeptive Hautzonen, deren taktile Reizung Phantomempfindungen für Teile des jeweils gleichseitigen Beines auslöste (Abb. 5).

Am linken Unterarm fanden sich vier rezeptive Hautfelder, deren taktile Reizung Phantomempfindungen für die vier kleinen Zehen, die Fußsohle, die Ferse und den Außenrist des linken Beines auslösten. Am rechten Oberarm fand sich je ein rezeptives Hautfeld für Phantomempfindungen von Fußrücken und Außenrist des rechten Beines.

An den Enden beider Amputationsstümpfe lag je ein rundes rezeptives Feld für Phantomempfindungen aller fünf Zehen des entsprechenden Fußes. Eine taktile Reizung der Oberseite des linken Oberschenkels löste

eine Phantomempfindung des linken Schienbeins aus. Demgegenüber erwies sich die Oberseite des rechten Oberschenkels als empfindungslos, da das beim Unfall verletzte Gewebe durch ein Transplantat ersetzt worden war.

An den Unterseiten beider Oberschenkel ließen sich rezeptive Felder für die entsprechenden Fußsohlen und Fersen abgrenzen. Zu beachten ist hierbei die symmetrische Anordnung der genannten Felder. Wie am Beispiel der Außenseite des linken Oberschenkels gezeigt, fanden sich beiderseits auch Hautfelder, deren taktile Reizung Phantomempfindungen für alle fünf Zehen (graue Flächen) oder nur Phantomempfindungen der vier kleinen Zehen (hellgraue Flächen) auslösten.

Diskussion

Die hier dargestellten Fallbeispiele wurden aus mehr als 20 Teilnehmern eines einjährigen Feldtests ausgewählt. Die Zahl der Teilnehmer mit einer Vielzahl unterschiedlicher Amputationshöhen einer oder beider unterer Extremitäten belegt, dass die Anlage rezeptiver Hautzonen, deren

taktile und elektrische Reizung Phantomempfindungen für bestimmte, umschriebene Teile der amputierten Extremität auslösen kann, keine Seltenheit ist. Offensichtlich stellt sie sich bei einer Mehrzahl der Patienten als Folge einer allgemeinen neurobiologischen Reorganisation des somatosensorischen Rindenfeldes ein, welches die amputierte Extremität neuronal repräsentiert. Die vier ausgewählten Fallbeispiele zeigen zusammen mit den beiden bereits in einem früheren Beitrag [4] beschriebenen eine Vielfalt der Lage und Größe rezeptiver Felder. Mehrere rezeptive Felder für unterschiedliche Teile eines amputierten Beines können sich beispielsweise in unmittelbarer Nähe des Amputationsstumpfes auf der Haut des verbliebenen Oberschenkels (Fallbeispiel 1) oder in ähnlicher Anordnung an Oberschenkel und Unterarm gruppieren (Fallbeispiel 3). Einige wenige, nur münzgroße Felder des Fallbeispiels 2 kontrastieren mit dichten Mosaiken großflächiger Felder des Fallbeispiels 4. Bei einigen Patienten fanden sich rezeptive Felder an Hüfte und Rücken. In jedem Fall ließen sich die rezeptiven Hautzonen leicht auffinden, indem gleichzeitig zur amputier-

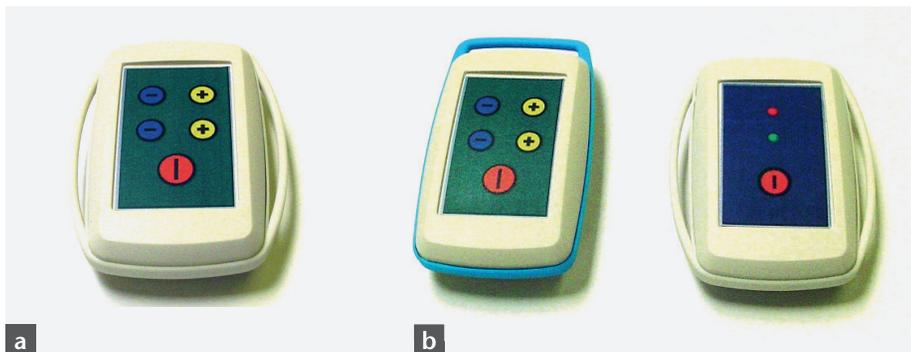


Abb. 6 Marktprodukte eines Phantomstimulators. a) All-in-one-Version für Patienten, deren rezeptive Felder nahe dem Amputationsstumpf an Oberschenkel oder Rumpf liegen. b) Version mit Funkbrücke für Patienten, die rezeptive Felder an Hand oder Arm aufweisen. Mithilfe von Tastern lassen sich Impulshöhe und Impulsfrequenz für jeden Stromkreis, der zu einem rezeptiven Feld führt, separat einstellen.

ten Extremität Körperstellen mithilfe einer Zahnbürste oder eines schmalen Pinsels überstrichen und die Grenzen der Hautzonen, innerhalb derer die taktile Reizung Phantomempfindungen für bestimmte Teile der amputierten Extremität ausgelöst hatte, auf die Haut gezeichnet wurden. Dieses Vorgehen ist so einfach, dass Patienten es selbst ausführen und in die gekennzeichneten Hautzonen je zwei TENS-Elektroden kleben können.

Bei Patienten, deren rezeptive Felder nahe dem Amputationsstumpf oder einer Hüfte liegen, kann die elektrische Stimulation über kurze Elektrodenkabel mithilfe eines Impuls-generators erfolgen, der verborgen im Schaft der Prothese direkt durch das Prothesenrohr mit Drucksensoren der entsprechenden Schuhsohle verkabelt wird. Solche All-in-one-Versionen eines Phantomstimulators können mittlerweile neben Systemen mit Funkbrücke als marktgängige Produkte der Firma CortXsensorics GmbH, Spaichingen, zur Verfügung gestellt werden (Abb. 6a u. b). Systeme mit Funkbrücke empfehlen sich für Patienten, deren rezeptive Felder auf Hand oder Arm liegen, weil damit eine störende Verkabelung der sich bewegenden oberen Extremität vermieden wird. Beidseitig amputierte Patienten bedürfen zweier Systeme. Sofern nutzbare rezeptive Felder an Händen oder Armen wie im Fallbeispiel 4 vorliegen, müssen die Funkstrecken des rechten und linken Systems mit unterschiedlichen Sendefrequenzen betrieben werden.

Alle am Feldtest beteiligten Patienten berichteten, dass nach einem Gebrauch der Geräte von einer oder mehreren Stunden die Phantomempfindungen für längere Zeit anhielten,

obwohl die Geräte abgeschaltet und die Klebeelektroden entfernt worden waren. Es genügte folglich, die Geräte nur stundenweise anzulegen und doch das amputierte Bein über eine längere Zeit des Tages wahrnehmen zu können. Die sich im Lauf von Stunden abschwächenden Phantomempfindungen konnten dann durch erneutes Anlegen der Geräte wieder aufgefrischt werden.

Bei ersten Tests in einer Gehschule berichteten Patienten, dass sie dank der Phantomstimulatoren selbst mit geschlossenen Augen sicherer laufen konnten als ohne sie. Es bedarf weiterer Studien zu prüfen, ob mithilfe solcher Geräte das Haltungs- und Gang-

bild neben der allgemeinen motorischen Sicherheit von Menschen mit Amputationen unterer Extremitäten verbessert werden kann.

Danksagung

Die Autoren danken Iris Heyen (Gehschule und Praxis für Physiotherapie, Roßhaupten) für ihre Mitwirkung an dem Feldtest und die Bereitstellung eines Teils des Bildmaterials.

Die Autoren:

Prof. Dr. rer. nat. Dr. med. habil.

Alfred Meier-Koll

Forschungsstelle für experimentelle Ergo- und Physiotherapie am Studienzentrum Friedrichshafen der Privaten Fachhochschule Nordhessen
Allmannsweilerstraße 104
88046 Friedrichshafen
alfred.meier-koll@fh-therapie.de
alfred.meier-koll@cortxsensorics.com

Karl Heinz Weber

CortXsensorics GmbH

Keplerstraße 45

78549 Spaichingen

Begutachteter Beitrag / reviewed paper

LITERATUR:

- [1] Meier-Koll A. Ein Phantomstimulator für amputierte Gliedmaßen. Orthopädie Technik, 2013; 64 (5): 36-39
- [2] Elbert T, Flor H, Birbaumer N, Knecht S, Hampson S, Larbig W, Taub E. Extensive reorganization of the somatosensory cortex in adult humans after nervous system injury. NeuroReport, 1994; 5: 2593-2597
- [3] Flor H, Elbert T, Knecht S, Wienbruch C, Pantev C, Birbaumer N, Larbig W, Taub E. Phantom limb pain as a perceptual correlate of cortical reorganization following arm amputation. Nature, 1995; 375: 482-484
- [4] Penfield W, Rasmussen T. The cerebral cortex of man. A clinical study of localization of function. New York: The Macmillan Comp., 1950
- [5] Florence SL, Taub HB, Kaas JH. Large scale sprouting of cortical connections after injury in adult macaque monkeys. Science, 1998; 282: 1117-1121
- [6] Merzenich MM, Nelson RJ, Stryker MP, Cynader MS, Schoppmann A, Zook JM. Somatosensory cortical map changes following digit amputation in adult monkeys. J Comp Neurol, 1984; 224: 591-605
- [7] Pons TP, Garraghty PE, Ommaya AK, Kaas JH, Taub E, Mishkin M. Massive cortical reorganization after sensory deafferentation in adult macaques. Science, 1991; 252: 1857-1860
- [8] Ramachandran VS. Behavioral and magnetoencephalographic correlates of plasticity in the adult human brain. Proc Natl Acad Sci USA, 1993; 90: 10413-10420
- [9] Ramachandran VS, Hirstein W. The perception of phantom limbs. The D. O. Hebb lecture. Brain, 1998; 121: 1603-1630
- [10] Simoes EL, Bramati I, Rodrigues E, Franzoi A, Moll J, Lent R. Functional expansion of sensorimotor representation and structural reorganization of callosal connections in lower limb amputees. J Neuroscience, 2012; 32 (9): 3211-3220