

Entwicklung und Verteilung rezeptiver Hautzonen zur Anregung von Phantomempfindungen an Beinamputierten

Development and Distribution of Receptive Skin Zones to Stimulate Phantom Sensations in Leg Amputees

Die Amputation einer Extremität unterbricht Nervenbahnen, die im somatosensorischen Rindenfeld der gegenseitigen Hirnhälfte enden. An den nicht mehr aktivierten Zielneuronen zerfallen Synapsen, welche die afferenten Nervenbahnen dort gebildet hatten. Sie werden durch neue Synapsen ersetzt, die intrakortikale Nervenfasern aus benachbarten Zonen des somatosensorischen Rindenfeldes an den deafferenzierten Zielneuronen anlegen. Diese synaptische Reorganisation weist schließlich Hautzonen auf der dem Ort der Amputation ipsilateralen Körperhälfte als rezeptive Felder aus, deren taktile und elektrische Reizung schmerzfreie Phantomempfindungen für Teile der amputierten Extremität auslösen kann. In zwei früheren Beiträgen wurde gezeigt, dass sich solche rezeptiven Felder bei Beinamputierten für eine schrittgetriggerte elektrische Phantomstimulation nutzen lassen, die beispielsweise beim Schreiten mit einer Prothese Phantomempfindungen für Ferse und Ballen des verlorenen Fußes hervorruft. An 60 beinamputierten Probanden wurde dokumentiert, in welcher Zeitspanne nach einer Amputation sich rezeptive Felder entwickeln und in welchen Mustern sie sich auf der entsprechenden Körperhälfte in Abhängigkeit von der Amputationshöhe verteilen.

Schlüsselwörter: elektrische Phantomstimulation, rezeptive Felder, Amputation unterer Extremitäten

The amputation of a limb disrupts the nerve pathways that terminate in the somatosensory cortex of the opposite side of the brain. As a result, synapses

at the target neurons decay and are replaced by new synapses that are formed by nerve fibres from adjacent areas of the somatosensory region. As a result of this reorganisation of the somatosensory cortex, areas of the skin on the amputated side become receptive fields whose tactile and electrical stimuli can trigger painless phantom sensations for parts of the amputated limb. Two previous articles described the possibility of using such receptive fields in leg amputees for step-triggered electrical phantom stimulation, which, for example, elicits phantom sensations for the heel and ball of the lost foot when walking with a prosthesis. These studies documented for 60 lower limb amputees the amount of time after amputation in which receptive fields were developed and their distribution patterns on the corresponding side of the body depending on the level of amputation.

Key words: electrical stimulation of phantom sensations, receptive fields, amputations of lower limbs

Einleitung

Die Wahrnehmung des Körpers und seiner Teile beruht auf elektrischen Impulsaktivitäten von Neuronen der postzentralen Windungen beider Hirnhälften. Nervenimpulse, ausgelöst an taktilen, nozi- und propriozeptiven Sinnesrezeptoren einer Körperhälfte, erregen – zur gegenseitigen Hirnrinde geleitetet – somatosensorische Neuronen, die den genannten Sinnesqualitäten zugeordnet sind. Die Nervenbahnen aus jeder Körperhälfte treffen in der postzentralen Windung der gegenseitigen Hirnhälfte somatotop geordnet an ihren Zielneu-

ronen ein. Benachbarte Orte einer Körperhälfte werden von Nervenbahnen mit Zielneuronen verbunden, die auch auf der entsprechenden postzentralen Hirnrinde benachbart sind. So wird jede Körperhälfte vom Scheitel bis zur Sohle in einem Kontinuum benachbarter Zielneuronen abgebildet. Die Entdecker dieses verkleinerten kortikalen Abbilds des menschlichen Körpers, Wilder Penfield und Thorsten Rasmussen, nannten es „Homunkulus“ [1].

Jede Amputation einer Extremität unterbricht Nervenbahnen und hinterlässt in der gegenseitigen somatosensorischen Hirnrinde ein Feld stummer, weil nicht mehr aktivierter Neuronen, deren Impulsaktivität vor der Amputation den verlorenen Körperteil repräsentiert hatte. Die nicht mehr betätigten Synapsen an solchen Neuronen zerfallen. Aus benachbarten Bereichen der somatosensorischen Hirnrinde können Axone in das brachliegende Feld einwachsen und an dessen Neuronen neue Synapsen anstelle der zerfallenen anlegen [2, 3]. Über sie werden Neuronen des brachliegenden Feldes wieder von Neuronen eines oder mehrerer benachbarter Rindenfelder aktiviert, sofern diese Reizimpulse aus den ihnen entsprechenden Hautzonen empfangen. Daher weist die beschriebene kortikale Reorganisation innerhalb der somatosensorischen Hirnrinde bestimmte Hautzonen als rezeptive Felder aus, deren taktile Reizung Phantomempfindungen für einzelne Teile der amputierten Extremität auszulösen vermag [4].

In zwei früheren Studien konnten an Unter- und Oberschenkelamputierten umschriebene rezeptive Felder ermittelt werden, deren taktile Reizung mit Hilfe von Pinseln oder Zahnbür-

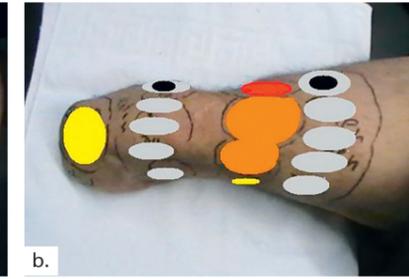


Abb. 1a u. b Rezeptive Felder an Stumpf, Knie und Oberschenkel eines linksseitig unterschenkelamputierten Probanden; a) Anzeichnung mit Hilfe eines Schminkestiftes; b) Kennzeichnung mit Hilfe der Paint-Funktion; gelbe Felder: Sohle, graue Felder: Zehen, graues Feld mit schwarzem Zentrum: Hallux, oranges Feld: Rist mit Außenkante, dunkelrotes Feld: Ferse.

ten Phantomempfindungen für einzelne Zehen, Ballen, Fußgewölbe, Ferse, Achillessehne und Wade hervorrief [5, 6]. Ihre Grenzen wurden mit Hilfe eines Schminkestiftes angezeichnet. In digitalen Fotografien ihrer Verteilungsmuster wurden einzelne rezeptive Felder mit Hilfe der Paint-Funktion eines Notebooks farblich hervorgehoben. Rezeptive Hautfelder waren ausschließlich ipsilateral zur Amputationsstelle über Oberschenkel, Hüfte, Oberkörper, Schulter, Ober- und Unterarm und Hand verteilt. Vorversuche hatten überdies gezeigt, dass auch Serien elektrischer Spannungsimpulse eines Funktionsgenerators – mit Hilfe eines bipolaren Sets von TENS-Elektroden auf eines dieser rezeptiven Felder geleitet – eine entsprechende Phantomempfindung hervorriefen [5].

Bei einem Anwender mit einer rechtsseitigen Unterschenkelamputation fand sich beispielsweise eine umschriebene Hautzone seiner rechten Körperhälfte als rezeptives Feld für den Vorfuß, eine andere als rezeptives Feld für die Ferse. Impulse zweier getrennter Stromkreise eines tragbaren akkugespeisten Funktionsgenerators wurden durch je eines der Elektrodenpaare an diese rezeptiven Hautzonen geleitet. Jeder Stromkreis ließ sich mit Hilfe eines lastempfindlichen Kontaktsensors schließen und öffnen. Je ein Kontaktsensor wurde in den vorderen, der andere in den hinteren Teil einer Schuhsohle eingearbeitet, auf die der Prothesenfuß trat. Setzte der Prothesenfuß beim Erstkontakt mit der Ferse auf, wurde zeitgleich eine Phantomempfindung für die Ferse ausgelöst. Sobald der Prothesenfuß abrollte, folgte die Phantomempfindung für den Vorfuß nach. Beide Phantomempfindungen zeigten eine gewisse Trägheit und gingen deshalb derart ineinander über, dass der Anwender dieses schrittgetriggerten Phantomstimulators den Eindruck hat-

te, mit einem intakten Bein statt mit einer Prothese zu schreiten.

Nach den Ergebnissen der beiden früheren Studien können Phantomstimulatoren als medizintechnische Hilfsmittel dienen, denn jede herkömmliche Beinprothese – selbst ein einfaches Holzbein – lässt sich mit einem derartigen System bestücken. Seine Komponenten können so kompakt zusammengestellt werden, dass sich ein solcher Phantomstimulator auch in jede High-Tech-Prothese einfügen lässt. Um die praktische und wirtschaftliche Nutzung der elektrischen Phantomstimulation zu beurteilen, müssen drei Fragen beantwortet werden:

1. Wie viele beinamputierte Personen einer größeren Stichprobe weisen rezeptive Felder auf, die sich für eine elektrische Phantomstimulation nutzen lassen?
2. Bedarf es nach der Amputation einer gewissen Zeitspanne, bis sich rezeptive Felder ausgebildet haben?
3. Wie verteilen sich rezeptive Felder in Abhängigkeit von der Amputationshöhe am Körper?

Die vorliegende Studie soll diese Fragen beantworten.

Methode

Im Verlauf mehrerer Jahre wurden von 60 beinamputierten Probanden Daten über die Anlage und Verteilung rezeptiver Felder gesammelt. Ein Teil der Amputierten waren Klienten einer süddeutschen, einer schweizerischen und einer kanadischen Rehabilitationsklinik für Orthopädie. Weitere amputierte Personen hatten sich aufgrund von Pressemitteilungen über eine Selbsthilfegruppe und dank der Vermittlung einer auf die Gehschulung Beinamputierter spezialisierten physiotherapeutischen Praxis zur Verfügung gestellt.

Für die Kartierung rezeptiver Felder wurde je eine Packung Einmal-Zahnbürsten und Wattestäbchen neben einigen Schminkestiften (Augenbrauen- oder Lidschatten-Stifte) bereitgehalten. Ein Untersucher begann damit, am freigelegten Stumpf mit einem der Instrumente Hautstellen zu überstreichen, und arbeitete sich langsam auf der dem Stumpf ipsilateralen Körperhälfte über Beckenbereich, Oberkörper und die Schulter vor, bis er auch den Arm und die Hand abgesucht hatte.

Erwartungsgemäß gaben die Probanden an, den taktilen Reiz an der Stelle zu spüren, an der er gesetzt wurde. Wenn ein Patient berichtete, die taktile Reizung einer Hautstelle rufe auch Phantomempfindungen eines bestimmten Teils seiner verlorenen Extremität hervor, wurden die Grenzen dieser Hautzone mit Hilfe eines Schminkestiftes angezeichnet. In solche umgrenzten Hautzonen wurde in Druckbuchstaben je eine verkürzte Benennung des entsprechenden Phantomgliedes eingezeichnet. Die so kartierten rezeptiven Hautzonen wurden zur Dokumentation mit Hilfe einer Digitalkamera fotografiert (Abb. 1a). Die Paint-Funktion eines Notebooks erlaubte es schließlich, die rezeptiven Felder in den digitalen Aufnahmen mit kreis- oder ellipsenförmigen Farbfeldern zu belegen (Abb. 1b). Nachdem die Grenzen der vorgefundenen rezeptiven Felder angezeichnet waren, wurde durch abermaliges Bestreichen die Reproduzierbarkeit der entsprechenden Phantomempfindungen geprüft.

Ergebnisse

Als Primärdaten wurden von jedem Patienten dessen Alter und die Zeit erfragt, die seit der Amputation bis zum Termin der Untersuchung verstrichen war. Im Folgenden wird sie als „Latenz“ bezeichnet. Diese beiden Koor-

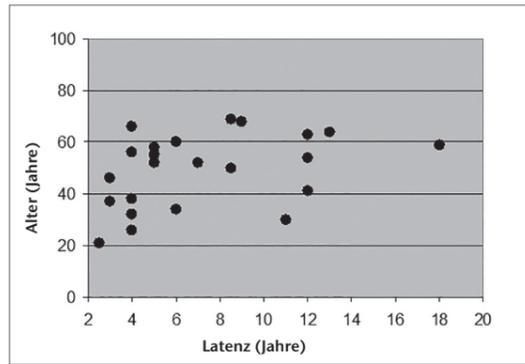


Abb. 2 Datenpunkte (Latenz/Alter) von 34 Probanden, deren Amputation weniger als 24 Monate oder genau zwei Jahre zurücklag. Weiße Datenpunkte stammen von Probanden ohne, schwarze von Probanden mit rezeptiven Feldern.

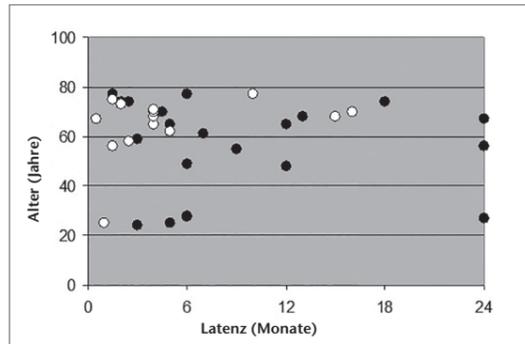


Abb. 3 Datenpunkte (Latenz/Alter) von 24 Probanden, deren Amputation mehr als zwei Jahre zurücklag. Zwei der Datenpunkte haben die gleichen Koordinaten (5/58) und fallen daher zusammen. All diese Probanden wiesen rezeptive Felder auf.

dinaten – Alter und Latenz – legen für jeden Patienten einen Punkt in einem Diagramm fest (Abb. 2 u. 3). Patienten, an denen mindestens ein rezeptives Feld kartiert werden konnte, erhielten einen schwarzen Punkt, Patienten, an denen kein rezeptives Feld gefunden wurde oder sich nicht reproduzieren ließ, einen weißen.

Bei den meisten Probanden ohne rezeptive Felder lag die Amputation weniger als sechs Monate zurück (s. Abb. 2). Insgesamt fanden sich 22 Patienten, deren Amputation weniger oder genau sechs Monate zurücklag. Davon zeigten 11 Probanden keine rezeptiven Felder. Innerhalb der ersten sechs Monate nach der Amputation hatten demnach 50 Prozent der Beinamputierten noch keine rezeptiven Felder entwickelt. In der Stichprobe fanden sich drei weitere Patienten ohne rezeptive Felder. Ihre Amputation lag mehr als sechs, jedoch weniger als 18 Monate zurück. An allen untersuchten Patienten, deren Amputation mehr als 1,5 Jahre zurücklag, wurde mindestens ein, in den meisten Fällen aber eine Gruppierung mehrerer rezeptiver Felder gefunden (s. Abb. 3).

Die Abbildungen 2 und 3 enthalten Datenpunkte von 58 Probanden. Bei zwei der insgesamt 60 untersuchten Probanden lag die Amputation mehr als 20 Jahre zurück. Auch bei diesen

Probanden wurden rezeptive Felder nachgewiesen; da ihre Latenz jedoch mehr als 20 Jahre betrug, konnten ihre Datenpunkte nicht in das Diagramm in Abbildung 3 aufgenommen werden.

Offensichtlich bedarf die Hälfte frisch amputierter Personen einer Spanne von mehreren Monaten, bis die neuronale Reorganisation der betroffenen somatosensorischen Hirnrinde bestimmte Hautzonen als rezeptive Felder zur Anregung von Phantomempfindungen ausgewiesen hat. Mit der Amputation geht notwendigerweise eine Deafferenzierung des Fuß- oder Beinfeldes im Homunkulus der korrespondierenden Hirnrinde einher. Wenn wir mit Ramachandran und Hirstein [4] annehmen, dass Axone aktiver Neurone des somatosensorischen Homunkulus aus der unmittelbaren oder ferneren Nachbarschaft in das brachliegende Feld einwachsen und dort synaptische Kontakte mit den inaktiven Neuronen schließen, müssen wir für dieses Wachstum eine Zeitspanne veranschlagen, die mehrere Monate dauern kann. An allen Probanden dieser Studie, deren Amputation mehr als 1,5 Jahre zurücklag, wurden rezeptive Hautfelder gefunden. Die genannte Penetration eines nach der Amputation brachliegenden Feldes der somatosensorischen Hirnrinde durch Axone aus

seiner Nachbarschaft ist gemäß der vorliegenden Schätzung spätestens nach 1,5 Jahren abgeschlossen.

Verteilungsmuster rezeptiver Felder

Für eine schrittgesteuerte elektrische Phantomstimulation lassen sich insbesondere rezeptive Felder für tarsale und metatarsale Teile des Fußes nutzen [5, 6]. Daher sollte bestimmt werden, in welchen Verteilungsmustern sich solche rezeptiven Felder in Abhängigkeit von der Amputationshöhe am Körper häufen. Die Mittelpunkte von rezeptiven Feldern tarsaler Anteile (Ferse, Sprunggelenk, Achillessehne) wurden mit einem Sternchen (*), diejenigen metatarsaler Anteile (Zehen, Ballen, Fußsohle) mit einem Kreis (o) gekennzeichnet. Anhand dieser Symbole wurden die individuellen Positionen tarsaler oder metatarsaler rezeptiver Felder kumulativ in geschlechtsneutrale Körperschemata eingetragen (Abb. 4 u. 5).

24 Probanden, die rezeptive Felder ausgebildet hatten, waren am Unterschenkel amputiert, 18 linksseitig und 6 rechtsseitig. Unter ihnen waren mehrere Probanden, deren Unterschenkel infolge eines Motorradunfalls zertrümmert worden war. Als Folge des Rechtsverkehrs und seiner Vorfahrtsregeln ist bei Motorradfahrern das linke Bein mehr gefährdet als das rechte. Dies erklärt den Unterschied in der Häufigkeit links- und rechtsseitig unterschenkelamputierter Probanden.

Das Kumulationsmuster der Zentren rezeptiver Felder für Phantomempfindungen tarsaler und metatarsaler Teile des verlorenen Fußes, das an 18 linksseitig Unterschenkelamputierten bestimmt wurde, zeigt eine deutliche Häufung an Vorder- und Rückseite von Oberschenkel und Arm (Abb. 4a). Für die kleine Gruppe der sechs rechtsseitig Unterschenkelamputierten ergab sich ein weniger dichtes Kumulationsmuster, das eine Häufung rezeptiver Felder an Knie und Oberschenkel erkennen lässt (Abb. 4b).

Desgleichen wurden entsprechende Kumulationsmuster an 11 linksseitig und 7 rechtsseitig Oberschenkelamputierten bestimmt (Abb. 5). Hier häuften sich rezeptive Felder am Oberschenkelstumpf. Mehr rezeptive Felder als bei den Unterschenkelamputierten wurden an Hüfte und Schulter gefunden,

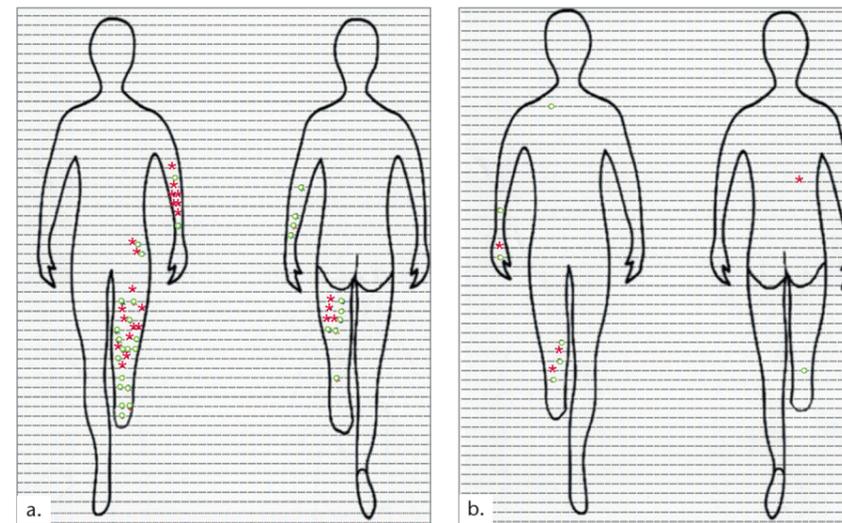


Abb. 4a u. b Kumulationsmuster der Zentren rezeptiver Felder für Phantomempfindungen tarsaler (*) und metatarsaler (o) Teile des verlorenen Fußes, bestimmt an 18 linksseitig (a) und 6 rechtsseitig Unterschenkelamputierten (b).

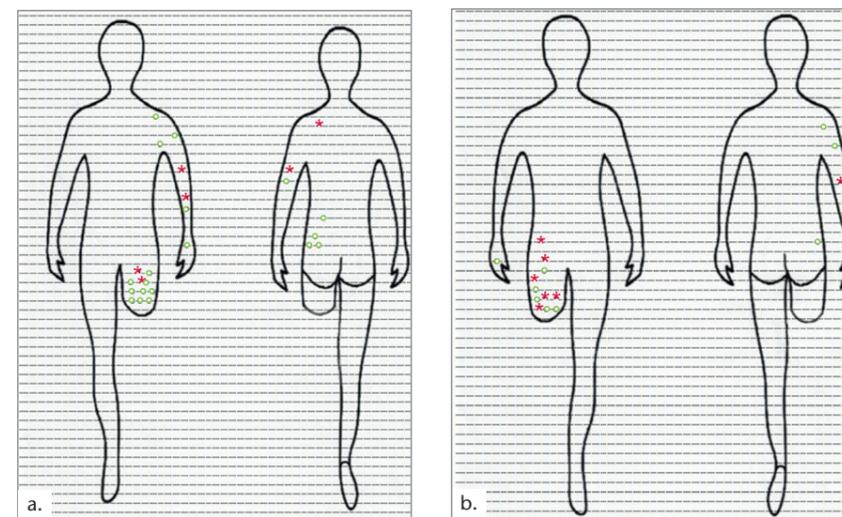


Abb. 5a u. b Kumulationsmuster der Zentren rezeptiver Felder für Phantomempfindungen tarsaler (*) und metatarsaler (o) Teile des verlorenen Fußes, bestimmt an 11 linksseitig (a) und 7 rechtsseitig Oberschenkelamputierten (b).

	US-Stumpf	OS	Hüfte	Schulter	Arm
OS-Amputierte N=18		50 %	16 %	13 %	21 %
US-Amputierte N=24	11 %	54 %	6 %	3 %	26 %

Tab. 1 Prozentuale Verteilung rezeptiver Felder an Unter- und Oberschenkel, Hüfte, Schulter und Arm bei Ober- und Unterschenkelamputierten.

jedoch vergleichbar viele rezeptive Felder bei beiden Gruppen am Arm.

Für die insgesamt 24 Unter- und 18 Oberschenkelamputierten wurden die relativen Häufigkeiten berechnet, mit der rezeptive Felder für tarsale und metatarsale Teile des Fußes am Stumpf des Unterschenkels, an Oberschenkel, Hüfte, Schulter und Arm der betroffenen Körperseite vertreten waren (Tab. 1). Die Daten in der Tabelle belegen, dass bei Oberschenkelamputierten mehr rezeptive Felder an Hüfte

und Schulter als bei Unterschenkelamputierten gefunden wurden.

Unter den 14 Probanden, an denen keine rezeptiven Felder bestimmt werden konnten, waren 11 unterschenkel- und 3 Oberschenkelamputiert. Die Gruppen der 24 Unterschenkel- und 18 Oberschenkelamputierten mit rezeptiven Feldern und die 14 Probanden ohne rezeptive Felder umfassen 56 Personen. Es bleibt von der insgesamt 60-köpfigen Stichprobe eine Restgruppe von 4 Probanden, die weder einseitig

unter- noch einseitig Oberschenkelamputiert waren. Zu dieser Restgruppe zählte eine beidseitig Oberschenkelamputierte und ein Proband mit einer linksseitigen Hüftexartikulation. Die an diesen beiden Personen gefundenen rezeptiven Felder wurden bereits in einem früheren Beitrag beschrieben [6]. Ein weiterer Proband, dessen Füße infolge einer Erfrierung amputiert werden mussten, zeigte ebenfalls an seinen Oberschenkeln rezeptive Felder für tarsale und metatarsale Teile seiner Füße.



Abb. 6 Rezeptive Hautfelder eines 24-jährigen Probanden mit linksseitiger Hemipelvektomie. Eine taktile Reizung der weißen Felder löste eine Phantommempfindung für den ganzen Unterschenkel, eine Reizung der schwarzen Felder Phantommempfindungen für den ganzen Oberschenkel aus. Daneben fand sich in Höhe des Ellbogens ein grün markiertes Feld für die Phantommempfindung der Wade.

Ein letzter Proband der Restgruppe hatte sich infolge eines Sarkoms einer linkseitigen Hemipelvektomie unterziehen müssen. Bereits drei Monate nach der Operation wies er an seinem linken Oberkörper und seinem linken Oberarm rezeptive Felder für Wade, Unter- und Oberschenkel auf (Abb. 6). Es wurden jedoch noch keine rezeptiven Felder für Teile seines Fußes gefunden. Möglicherweise schreitet die neuronale Reorganisation seiner rechtshemisphärischen somatosensorischen Hirnrinde noch fort und legt zu einem späteren Zeitpunkt auch rezeptive Felder für tarsale und metatarsale Teile seines Fußes an.

Diskussion

Von insgesamt 60 Probanden wiesen 46 (77 %) rezeptive Felder auf, die sich für eine elektrische Phantommstimulation eigneten. Bei den 14 Probanden, an denen keine oder keine reproduzierbaren rezeptiven Felder nachzuweisen waren, lag die Amputation weniger als 1,5 Jahre zurück, bei 11 von ihnen sogar weniger als 6 Monate. Dies weist darauf hin, dass die neuronale Reorganisation im deafferenzierten Teil der somatosensorischen Hirnrinde mitunter mehrerer Monate bedarf, bis einige umschriebene Stellen der Haut eindeutig als rezeptive Felder ausgewiesen sind. Alle untersuchten Probanden, deren Amputation länger als zwei Jahre zurücklag, wiesen rezeptive Felder auf.

Die dokumentierten Verteilungsmuster rezeptiver Felder lassen sich anhand des Kontinuums kortikaler Neuronen deuten, das den somatosensorischen Homunkulus kennzeichnet. Die infolge der Deafferenzierung brachliegenden Repräsentationszonen für Teile des verlorenen Fußes sollten bei Unterschenkelamputierten häufiger von Axonen aus den unmittelbar benachbarten Repräsentationsfeldern des Oberschenkels penetriert werden. Dementsprechend häuften sich rezeptive Felder bei Unterschenkelamputierten bevorzugt auf der Haut des Oberschenkels (s. Tab. 1).

Demgegenüber sollten brachliegende kortikale Repräsentationszonen für Teile des verlorenen Fußes bei Oberschenkelamputierten bevorzugt von Axonen aus dem oberen Teil des Ampu-

tationsstumpfes und den benachbarten Repräsentationszonen des Rumpfes penetriert werden. Dem entspricht die ermittelte Häufung rezeptiver Felder für Teile des verlorenen Fußes an Hautstellen des oberen Stumpfes und im Becken- und Hüftbereich (s. Tab. 1).

Im Fall des 24-jährigen Probanden mit linksseitiger Hemipelvektomie können die ermittelten rezeptiven Felder für Wade, Ober- und Unterschenkel damit erklärt werden, dass bereits drei Monate nach der Operation intrakortikale Axone aus Repräsentationszonen von Oberarm und Rumpf der betroffenen somatosensorischen Hirnrinde in die brachliegenden Repräsentationszonen für Wade, Ober- und Unterschenkel eingewachsen waren.

Interessenkonflikt

Phantommstimulatoren werden als zertifizierte medizinisch-technische Hilfsmittel von der Firma CortXsensorics GmbH, Keplerstr. 45, 78549 Spaichingen hergestellt und vertrieben. Der federführende Autor leitet die Forschungsstelle für Experimentelle Ergo- und Physiotherapie und ist geschäftsführender Teilhaber der Firma CortXsensorics.

Für die Autoren:

Prof. Dr. rer. nat. Dr. med. habil.
Alfred Meier-Koll
Schlößleweg 10
78351 Bodman-Ludwigshafen
Forschung.fn@diploma.de

Begutachteter Beitrag/reviewed paper

Literatur:

[1] Penfield W, Rasmussen T. The cerebral cortex of man. A clinical study of localization of function. New York: The Macmillan Comp., 1950

[2] Florence SL, Taub HB, Kaas JH. Large-scale sprouting of cortical connections after injury in adult macaque monkeys. *Science*, 1998; 282 (5391): 1117–1121

[3] Pons TP, Garraghty PE, Ommaya AK, Kaas JH, Taub E, Mishkin M. Massive cortical reorganization after sensory deafferentation in adult macaques. *Science*, 1991; 252 (5014): 1857–1860

[4] Ramachandran VS, Hirstein W. The perception of phantom limbs. The D. O. Hebb lecture. *Brain* 1998; 121: 1603–1630

[5] Meier-Koll A. Ein Phantommstimulator für amputierte Gliedmaßen. *Orthopädie Technik*, 2013; 64 (5): 36–39

[6] Meier-Koll A, Weber KH. Fühlbare Beinprothesen. *Orthopädie Technik*, 2014; 65 (7): 50–55