

Galvanisch-vestibuläre Stimulation als Add-on-Verfahren bei der Behandlung somatosensorischer Störungen und Missempfindungen nach Schlaganfall: Zwei Fallstudien

M. Adams¹, G. Kerkhoff¹, St. Reinhart¹

Zusammenfassung

Obwohl über die Hälfte aller Schlaganfallpatienten unter somatosensorischen Störungen oder Missempfindungen leiden, gibt es kaum adäquate, evidenzbasierte Behandlungsansätze für diese Störungen. Neuere Befunde sprechen für einen modulierenden Einfluss der Galvanisch-Vestibulären Stimulation (GVS) auf das somatosensorische System. Auch die Spiegeltherapie beeinflusst somatosensible Störungen positiv. Im vorliegenden Beitrag werden zwei ältere Patienten vorgestellt, die infolge eines rechtshemisphärischen Infarktes unter initialer Hemiparese und langanhaltenden Missempfindungen der linken Körperseite litten, wie einem dumpfen, fremdartigen Gefühl oder Brennen und Kribbeln in verschiedenen Körperregionen. Trotz zum Teil mehrerer Reha-Aufenthalte persistierte die Symptomatik. Wir führten daraufhin ein dreiwöchiges kombiniertes Therapieprogramm mit Spiegeltherapie und paralleler, unterschwelliger GVS durch. Bei beiden Patienten konnte innerhalb von drei Wochen eine deutliche und anhaltende Reduktion der Empfindungsstörungen erzielt werden. Die gleichzeitige Anwendung von Spiegeltraining und die Applikation schwacher elektrischer Ströme über das thalamo-vestibuläre System ist daher eine vielversprechende und leicht anwendbare Methode zur Verstärkung therapeutischer Effekte in der somatosensiblen Neurorehabilitation nach Schlaganfall.

Schlüsselwörter: Missempfindungen, somatosensorische Störungen, galvanisch-vestibuläre Stimulation, Therapie, Rehabilitation

¹ Klinische Neuropsychologie und Neuropsychologische Universitätsambulanz, Universität des Saarlandes, Saarbrücken

Einleitung

Somatosensorische Funktionsbeeinträchtigungen sind nach zerebrovaskulären Schädigungen häufig anzutreffen. Hierzu zählen Störungen der Oberflächen- und Tiefensensibilität, sowie Missempfindungen. Etwa 50–85% aller Schlaganfallpatienten sind von solchen Störungen betroffen [10]. In den ersten Wochen nach einem Schlaganfall können zwar spontane Erholungen der initialen Funktionsverluste beobachtet werden, häufig persistieren die Symptome jedoch, sind mit längeren Klinikaufenthalten verbunden [40] und resultieren in einer chronischen Beeinträchtigung des alltäglichen Lebens [46]. Im Alltag kann eine gestörte Wahrnehmung der Tiefensensibilität zu Verletzungen durch Anstoßen am Türrahmen oder anderen Hindernissen führen. Einige Patienten berichten sogar von Verbrennungen an der betroffenen Extremität aufgrund des eingeschränkten Temperaturempfindens. Auch Berührungen und körperliche Nähe durch uns vertraute Menschen wie ein wohltuendes Streicheln über die Wange kann nur eingeschränkt gespürt werden oder wird aufgrund einer Hypersensitivität als unangenehm oder gar schmerzhaft erlebt. Ein gestörtes körperliches Empfinden hat dadurch auch Auswirkungen auf das psychische Befinden und die Beziehung zu anderen Menschen. Anders

ausgedrückt: Somatosensible Beeinträchtigungen infolge einer Hirnschädigung wirken sich im doppelten Sinne auf das Alltagsleben aus: primär als Fähigkeitsdefizit und sekundär als Störung des emotional-körperlichen Empfindens und Befindens.

Während für die Behandlung motorischer Defizite infolge von Schlaganfall eine Vielzahl von therapeutischen Maßnahmen existiert und auch ständig neue Verfahren hinzukommen [22], finden somatosensorische Störungen und Missempfindungen trotz ihrer hohen Relevanz noch zu selten Berücksichtigung in der Behandlung. Dies liegt vermutlich auch daran, dass bisher nur wenige evaluierte Behandlungsmethoden zur Verfügung stehen und diese z.T. sehr personalintensiv sind. Insbesondere für die nicht selten auftretenden Missempfindungen [2] gibt es bislang – abgesehen von einer symptomatischen Dauermedikation durch Schmerzmittel – kaum wirksame Therapieverfahren.

Im vorliegenden Beitrag beschreiben wir daher unsere Erfahrungen mit zwei älteren Patienten, die chronisch unter solchen Missempfindungen verschiedener Qualitäten und Intensitäten litten¹. Da wir in eigenen Untersuchungen bereits positive Effekte sowohl bei Spiegel-

¹ Diese Patienten wurden bereits in einer größeren Fallserie, die auch jüngere Patienten enthielt, in Neurologie & Rehabilitation 2015; 4: 211-222 beschrieben.

Galvanic vestibular stimulation in the somatosensory neurorehabilitation after stroke – 2 case studies

M. Adams, G. Kerkhoff, St. Reinhart

Abstract

Although more than 50% of stroke patients show somatosensory deficits and paresthesias, there is only a limited number of evidence-based retraining approaches that focus on such deficits.

Recent findings suggest a modulating influence of galvanic vestibular stimulation (GVS) on the somatosensory system. Mirror therapy as a further treatment, also seems to have a high impact on somatosensory disturbances.

We studied two elder patients with initial left-sided hemiparesis and persistent paresthesia (e.g. burning or tingling sensations) due to chronic right-hemisphere lesions. Despite several inpatient rehabilitation programs, the symptoms still persisted. We therefore conducted a combined therapy program including mirror therapy and parallel subliminal GVS, for a total of three weeks. The treatment revealed a long lasting decrease of sensory disturbances in both cases. The concomitant treatment of mirror training and the application of weak electrical currents over the thalamo-vestibular system is therefore a promising and readily applicable method for the enhancement of therapeutic effects in the somatosensory neurorehabilitation after stroke.

Keywords: paresthesia, somatosensory dysfunction, galvanic vestibular stimulation, rehabilitation, treatment

NeuroGeriatric 2015; 12(2): 75–84
© Hippocampus Verlag 2015

training als auch bei GVS fanden [38, 39], kombinierten wir in der hier vorgestellten klinisch-experimentellen Pilotstudie beide Verfahren mit dem Ziel, die Missempfindungen möglichst zeitökonomisch und maximal zu reduzieren. Im Folgenden beschreiben wir zunächst die therapeutischen Interventionen, im Anschluss daran die Fallbeispiele und deren Behandlungsergebnisse.

Beschreibung der kombinierten therapeutischen Intervention

Die Spiegeltherapie

Die Spiegeltherapie hat sich mittlerweile als gängiges Therapieverfahren in der Neurorehabilitation von motorischen Defiziten etabliert [42]. Ihren Ursprung hat die Therapie in der Behandlung von Phantomempfindungen nach Amputation. Für die Ursache von Phantomempfindungen werden zwei verschiedene Erklärungen diskutiert. Eine Erklärung postuliert die Existenz einer Neuromatrix, ein neuronales Netzwerk, welches u. a. in Teilen des Thalamus, der somatosensorischen Hirnrinde, dem limbischen System und dem posterioren Parietalcortex lokalisiert zu sein scheint [26, 27, 28, 29]. Es bildet die neuroanatomische Grundlage für eine stabile Repräsentation des Körpers (Körperschema). Bei dem Körperschema handelt es sich um eine multidimensionale Empfindung, die durch taktile, propriozeptive und vestibuläre, aber auch visuelle Informationen modifiziert werden kann. Die sensorischen Informationen

hinterlassen ein spezifisches Aktivierungsmuster, die Neurosignatur. Melzack vermutet, dass bei Menschen, denen eine Gliedmaße amputiert wurde, eine abnorm veränderte sensorische Information entsteht, welche sich dann in Form eines Phantomschmerzes zeigen kann. Ein ähnlicher Erklärungsansatz sieht die Ursache von Phantomschmerzen in einer ungünstigen kortikalen Reorganisation nach Deafferenzierung [16, 17, 18]. Die fehlende afferente Information nach Amputation führt zu einer Verschiebung der umliegenden kortikalen Regionen in das deafferenzierte Areal [32]. Diese kortikale Reorganisation korreliert mit der Intensität von Phantomschmerzen, wie Flor und Kollegen [16] zeigen konnten.

Mithilfe der Spiegeltherapie wird versucht, die ursprüngliche Topographie im motorischen und somatosensorischen Cortex wiederherzustellen und damit die Phantomschmerzen zu lindern. Dabei wird ein Spiegel sagittal zur Körpermitte so positioniert, dass die betroffene Extremität hinter dem Spiegel nicht mehr sichtbar ist. Der Patient beobachtet auf der anderen Seite das Spiegelbild der gesunden Extremität. Hierdurch entsteht die Illusion, dass die im Spiegel verfolgten Bewegungen durch den betroffenen Arm oder das betroffene Bein ausgeführt wird. Die Anwendung dieses Verfahrens bei Patienten mit Schlaganfall wurde erstmals von Ramachandran [33] vorgeschlagen und von Altschuler und Kollegen [3] in einer Pilotstudie umgesetzt. Inzwischen existieren zahlreiche Studien, die die Wirksamkeit der Spiegeltherapie bei Personen mit motorischen Defiziten nach zerebrovaskulären Schädigungen belegen [30]. In einer Studie mit Schlaganfallpatienten und resultierender schwerer Hemiparese konnte durch ein mehrwöchiges Spiegeltraining nicht nur eine Verbesserung distaler motorischer Funktionen, sondern auch ein positiver Einfluss auf die Oberflächensensibilität festgestellt werden [11].

Die Galvanisch-vestibuläre Stimulation (GVS)

Die GVS ist eine nicht-invasive, einfach anwendbare und – wenn die Sicherheitsstandards eingehalten werden – praktisch nebenwirkungsfreie Stimulationsmethode des vestibulären Systems [45]. Bei der bipolaren, bilateralen GVS werden zwei Elektroden unterschiedlicher Polarität binaural über den Mastoiden platziert, die schwache elektrische Ströme (<1 mA) abgeben (**Abb. 1**).

GVS beeinflusst über Polarisierungseffekte die Otolithen und Bogengangafferenzen des Nervus vestibularis, welcher bilateral unter den Mastoiden vom Innenohr zu den Vestibulariskernen im Hirnstamm verläuft [14]. Diese Kerne stehen wiederum in Verbindung mit dem Thalamus (Nucleus ventroposterolateralis). Von dort führen zahlreiche Projektionen zu kortikalen vestibulären Gebieten (parieto-insulärer vestibulärer Cortex, PIVC) und zum somatosensorischen Cortex [19]. Durch

GVS wird eine Aktivierung des gesamten thalamo-kortikalen vestibulären Systems induziert. In Abhängigkeit von der Polarität der Elektroden werden diese Gehirnareale auf unterschiedliche Weise stimuliert: links-kathodale/ rechts-anodale GVS (L-GVS) führt zu einer bihemisphärischen Aktivierung, rechts-kathodale/ links-anodale (R-GVS) zu einer unilateralen rechtshemisphärischen Aktivierung. Da das vestibuläre System als multisensorisches System in viele Areale des Gehirns projiziert, konnten für die GVS positive Effekte für unterschiedliche Modalitäten sowohl bei gesunden Personen als auch neurologischen Patienten gefunden werden. So wurde bei Patienten mit zerebralen Schädigungen durch GVS eine vorübergehende Reduktion visueller Neglectsymptome erreicht [37, 44, 31]. Auch visuell-räumliche und visuo-konstruktive Defizite konnten durch GVS-Applikation positiv moduliert werden [47, 48]. In zwei weiteren Studien konnten wir einen lang anhaltenden Einfluss weniger GVS-Applikationen beider Polaritäten auf die taktile Extinktion (die Vernachlässigung eines kontraläsionalen Reizes bei simultaner bilateraler taktile Stimulation) belegen [20, 38]. Die GVS wirkt sich auch positiv auf die Propriozeption aus. Defizite in der Propriozeption führen zu erheblichen Alltagsbeeinträchtigungen, wie Anstoßen des Armes, fehlende Geschicklichkeit oder Nichtgebrauch des Körperteils. Sie ist häufig nach Schädigungen des somatosensorischen und vestibulären Systems beeinträchtigt. Bei einer Untersuchung der Propriozeption der Armposition bei Neglect-Patienten konnten die positiven Auswirkungen der GVS auf diese Leistung eindeutig nachgewiesen werden. Ihre ungenaue Einschätzung der Position des Armes verbesserte sich unter L-GVS signifikant auf das Niveau von Gesunden. Dabei zeigte sich, dass GVS nicht nur zu einer unmittelbaren Verbesserung der Propriozeption führte, sondern dass diese Verbesserung auch bei der Untersuchung eines Nacheffektes 20 Minuten nach Stimulationsende stabil blieb [39].

Neben dieser vestibulären Stimulationsmethode findet die kalorisch-vestibuläre Stimulation (CVS) Anwendung. Ihr Nebenwirkungsprofil ist im Gegensatz zur galvanisch vestibulären Stimulation deutlich größer. Durch eine Spülung der horizontalen Bogengänge mit meist eisgekühltem Wasser kommt es auch hier zu einer Aktivierung vestibulärer Funktionskreise. Für die kalorisch-vestibuläre Stimulation (CVS) belegen bereits einige Studien eine Interaktion zwischen somatosensorischem System und Vestibulärapparat. So konnten Bottini und Kollegen [7] zeigen, dass eine in den linken Gehörgang applizierte CVS zu einer transienten Reduktion einer linksseitigen Hemianästhesie infolge einer rechtshemisphärischen Schädigung führte. Die Befunde werden auf eine neuroanatomische Überlappung zwischen vestibulären und taktilen Projektionen zurückgeführt [6]. Der Einfluss der vestibulären Stimulation ist nicht auf pathologische Hirnfunktionen beschränkt. In

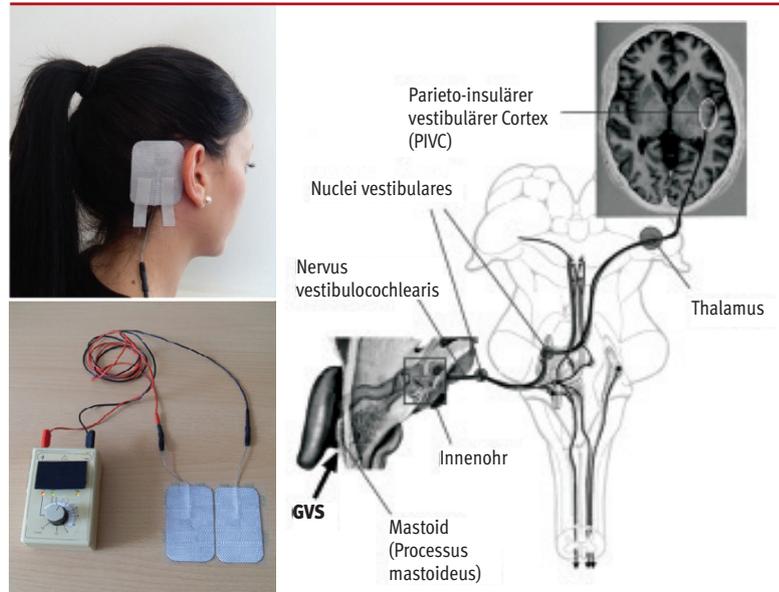


Abb. 1: GVS-Gerät und Platzierung der Elektroden am Mastoid (links). Schematische Darstellung des thalamo-kortikalen vestibulären Systems (rechts, Utz et al., 2010).

zwei Studien konnte gezeigt werden, dass CVS und GVS zu einer unmittelbaren Senkung der Wahrnehmungsschwelle für taktile Reize bei gesunden Menschen führen [12, 13]. Eine vestibuläre Stimulation kann außerdem zu einer vorübergehenden Beeinflussung der Repräsentation des eigenen Körpers (Bodyschema) führen. So konnte gezeigt werden, dass CVS zu einer temporären Veränderung der internalen Repräsentation des Handareals führte [24]. Störungen der Körperwahrnehmung finden sich am häufigsten nach rechtshemisphärischen Schädigungen des parieto-temporalen Kortex, dem eine wichtige Bedeutung bei der Integration visueller, taktiler und propriozeptiver Signale zugeschrieben wird [9]. Das gebräuchlichste Paradigma für Untersuchungen zur Manipulation dieser multisensorischen Integration ist die sogenannte »rubber hand« Illusion [8]. Gewöhnlich werden eine vor der Person platzierte sichtbare Gummihand und die eigene verdeckte, nicht sichtbare Hand mit einem Pinsel synchron berührt. Diese Manipulation führt zu der illusionären Wahrnehmung, dass die Gummihand zum eigenen Körper dazugehört (body-ownership). Das bedeutet, dass die unechte Hand kurzfristig in das Körperschema integriert wurde. Lopez und Kollegen [23] stellten fest, dass diese Illusion durch GVS noch verstärkt werden kann. GVS ist also nicht nur zur kurzfristigen Verbesserung von Neglectsymptomen und assoziierten Störungen wie Extinktion geeignet, sondern beeinflusst auch entscheidend die internele Körperrepräsentation bei gesunden Personen.

Insgesamt sprechen diese Belege für einen starken Einfluss des vestibulären Systems auf das gesamte somatosensorische System. Da wir in zwei Studien bereits einen Langzeiteffekt der L-GVS (0,5 mA, 20 Minuten) auf die taktile Extinktion fanden [20, 38], könnte GVS geeig-

net sein, propriozeptive und andere körperbezogene Störungen nicht nur kurzfristig zu verbessern, sondern auch langfristige therapeutische Effekte erzielen.

Vor diesem Hintergrund scheint die kombinierte Anwendung dieser Methoden ein vielversprechender Ansatz zu sein, um einen Maximaleffekt zu erreichen: das Spiegeltraining als aktiv übendes Verfahren sowie L-GVS als Add-on-Verfahren zur Modulation somatosensorischer Defizite nach Schlaganfall.

Durchführung der galvanisch-vestibulären Stimulation

Die GVS wurde subliminal, also unterschwellig mit einer durchschnittlichen Stromstärke zwischen 0,7 mA und 0,8 mA appliziert. Die Schwellenbestimmung erfolgte durch Erhöhung des Gleichstromes in Schritten von 0,1 A, bis ein leichtes Kribbeln wahrgenommen wurde. Die Stromstärke wurde dann so weit vermindert, bis das Kribbeln verschwand. Die Applikation der schwachen elektrischen Ströme erfolgte mit einem Gleichstromgerät (9 Volt-Batterie, Typ ED 2011, Hersteller: DKI GmbH, DE-01277 Dresden) über selbstklebende Elektroden (5 x 9 cm, Hersteller: DKI GmbH, DE-01277 Dresden). Genauere Angaben über Schwellenhöhe, Applikationsart (single-session/multi-session) und Applikationsdauer finden sich in den jeweiligen Fallbeschreibungen der beiden Patienten.

Durchführung des Spiegeltrainings

Da alle Patienten über ausreichende Restfunktionen in den betroffenen Gliedmaßen verfügten, wurde ein aktives Spiegeltraining durchgeführt, das heißt, die Übungen wurden sowohl durch die gesunde als auch die beeinträchtigte Extremität simultan ausgeführt. Wesentlich für das Spiegeltraining ist die Beobachtung von Handlungsausführungen der nicht betroffenen Extremität. Durch die Beobachtung dieses visuellen Perzeptes soll die Illusion entstehen, die betroffene Extremität bewege sich normal. Der therapeutische Erfolg hängt maßgeblich von der Konzentration auf das Spiegelbild und der Vorstellungskraft des Patienten ab. Vorteil des aktiven Trainings

ist das zusätzlich zum visuellen Reiz hinzukommende propriozeptive Feedback, welches die Illusion der sich bewegendenden Extremität verstärken kann.

Jede Trainingssitzung wurde mit einer kurzen Eingewöhnungsphase mit einfachen Bewegungen der jeweiligen Extremitäten zur Herstellung und Stabilisierung der Illusion eingeleitet. Im Anschluss wurde zu komplexeren Aufgaben übergegangen. Bei allen Patienten wurden individuell angepasste motorische und somatosensorische Übungs- und Stimulationssequenzen durchgeführt (genauere Beschreibungen zum Training finden sich im Abschnitt »Therapeutische Intervention« für den jeweiligen Patienten). **Tabelle 1** gibt einen Überblick über die wichtigsten Merkmale der beiden Patienten.

Fallbeschreibung H. B.

Bei H. B. handelte es sich um einen 84-jährigen Patienten, der 34 Monate vor dem Untersuchungszeitraum, vermutlich perioperativ, einen rechtsseitigen Mediainfarkt hochparietal an der Mantelkante erlitten hatte. Bei der neuroradiologischen Untersuchung wurden zusätzlich Zeichen einer vaskulären Leukenzephalopathie gefunden. Der Infarkt resultierte in einer beinbetonten Hemiparese links mit deutlicher Sensibilitätsstörung und fehlender Propriozeption. **Abbildung 2** (linke Grafik) gibt einen Überblick über die Lokalisation der sensiblen Empfindungsstörungen. H. B. befand sich im chronischen Stadium nach dem Infarkt, Spontanremissionen waren daher nicht mehr zu erwarten.

Beschreibung der Missempfindung

H. B. kontaktierte unsere Neuropsychologische Universitätsambulanz, weil er nach einem rechtsseitigen Mediainfarkt im Jahre 2012 auch nach erfolgter stationärer Rehabilitation noch erhebliche Defizite im Bereich der Sensibilität, insbesondere der Oberflächensensibilität und der Propriozeption (Lagesinn) der linken Körperhälfte hatte. H. B. beschrieb ein starkes Taubheitsgefühl, beginnend ab dem unteren Oberschenkel, welches sich bis in die Fußsohle durchzog. Weiterhin gab er an, das

Tabelle 1: Übersicht der wichtigsten Merkmale der Patienten H.B. und I.R. nach unilateraler rechtshemisphärischer Schädigung.

Patient	Alter/ Geschlecht	Ätiologie	Läsion	ZSL (Monate)	Hemiparese	NEG	APS	Sens. Lok.	Stim. schwelle
H. B.	84/m	I	M	34	links	motor	--	Bein, Fuß (li)	0,7 mA
I. R.)	72/w	I	M, SG	9	links	visuell, Body	+	Kopf, Oberkörper, Arm, Hand, Fuß (li)	0,7 mA
	Mittelwert: 78 Jahre	2 I		Median: 34 Monate	2/2 Hemiparese	2/2 Neglect	1/2 gestörte Propriozeption		

Abkürzungen: I: ischämischer Schlaganfall; M/SG/Th: Mediainfarkt/Stammganglien/Thalamus; ZSL: Zeit seit Läsion; Hemiparese j/n: ja/nein; NEG: Neglect: motor: motorischer Neglect; visuell: visueller Neglect; Body: körperbezogener (body-) Neglect; APS: Armpositionschädigung/Propriozeption (--: gestört, +: ungestört); Sens.Lok.: Lokalisation der Sensibilitätsstörungen/Missempfindungen, genauere Beschreibungen siehe Text; (li): linke Körperseite. Stim. schwelle: Schwellenwertbestimmung der GVS.

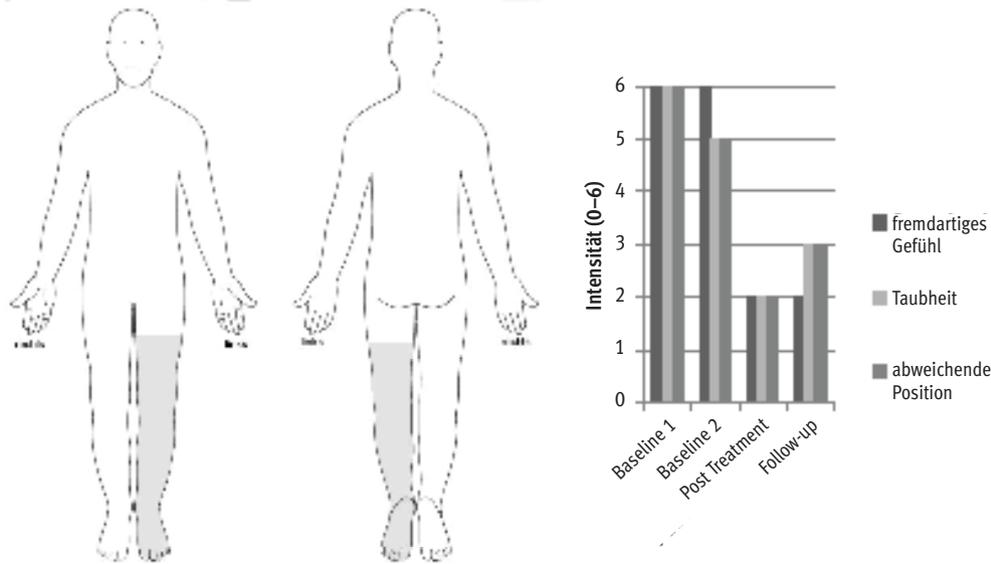


Abb. 2: Patient H.B.: Lokalisation der sensiblen Empfindungsstörungen am linken Bein (linke Grafik). Rating der intensivsten Empfindungsstörungen/Misempfindungen (Anmerkung: nur die intensivsten Ratings sind dargestellt, weitere Nennungen möglich) vor der Therapie (Baseline 1 & Baseline 2), unmittelbar nach drei Wochen Treatment mit Spiegeltherapie und L-GVS (Post-Treatment) & Follow-up zwei Wochen nach dem Treatment (rechte Grafik).

Bein habe eine Art Eigenleben, es fühle sich »fremdartig« an, er könne nicht genau sagen, was an seinem linken Bein passiere, wo dieses stehe, und sei deshalb noch unsicher auf den Beinen. Beim Aufstehen müsse er sich immer vergewissern, wo und in welcher Position das Bein stehe. Die Beschreibungen legten damit eine gestörte Propriozeption des Beines nahe. Manchmal vergesse er auch das linke Bein, was dann meistens zu Stolpern oder ähnlichen Problemen führe. Auch bei anderen bilateralen motorischen Aufgaben würde er die linke Seite manchmal »ausblenden«. Diese Schilderungen deuteten auf einen motorischen Neglect hin. Hieraus ergab sich eine Stand- und Gangunsicherheit, die den Patienten nach eigenen Angaben im Alltag einschränkte. H. B. sei als leidenschaftlicher Fahrradfahrer seit dem Schlaganfall nicht mehr in der Lage, diesen Sport auszuüben. Die geschilderten Empfindungen würden ihm erst bewusst, wenn er das Bein aktiv benutze, wie beim Gehen. Wenn er sich nicht um das Bein »kümmere«, habe er auch keine unangenehmen Empfindungen.

Somatosensorisches und motorisches Assessment

Zur Quantifizierung der Funktionsbeeinträchtigungen und zur Verlaufsmessung wurde ein Fragebogen zur Erfassung von Sensibilitätsstörungen und Misperceptions eingesetzt [36]. In diesem wurden die verschiedenen Qualitäten der sensorischen Beeinträchtigung beziehungsweise Misperception (Druck, Kribbeln, Kälteempfinden) auf einer siebenstufigen Skala (0 = gar nicht bis 6 = extrem stark vorhanden) abgefragt. Einen Überblick über die intensivsten Empfindungsstörungen und deren Lokalisation gibt **Abbildung 2**. Vor der

therapeutischen Intervention wurden zwei Baseline-Messungen erhoben sowie täglich Messungen während der Therapie zur Verlaufskontrolle durchgeführt.

Die Messung der Oberflächensensibilität erfolgte mittels Semmes-Weinstein-Monofilamenten jeweils bilateral an den Händen (u. a. Fingerbeere des Zeigefingers) und den Beinen. Um die Sensibilitätsschwelle zu bestimmen, wurde mit einem Monofilament mit einer Stärke von 2,83 beginnend jeweils zweimal in auf- und absteigender Reihenfolge getestet. Jeder Stimulus wurde dabei dreimal für jeweils 1,5 Sekunden wiederholt auf der Haut appliziert und als wahrgenommen gewertet, wenn der Patient mindestens zwei von drei Berührungen erkannte. Als weiteres Sensibilitätsmaß wurde die statische Zwei-Punkt-Schwelle erfasst (Discrim-A-Gon, Firma Baseline). Zur Erfassung der Tiefensensibilität wurde das Vibrationsempfinden mithilfe einer Stimmgabel (Rydel-Seiffer, 64 Hz) erfasst. Um Temperaturdifferenzen zwischen rechter und linker Körperseite zu erfassen, wurde die Oberflächentemperatur der Haut an der Außenfläche der Hand und dem Schienbein mit einem Infrarot-Thermometer (Firma Raytek) gemessen. Zur Erfassung der Handgeschicklichkeit kam der Nine Hole Peg Test [25] zum Einsatz.

Therapeutische Intervention: H. B.

H. B. absolvierte ein dreiwöchiges Therapieprogramm, bestehend aus einer Kombination von multi-session L-GVS (tägliche GVS-Applikation) und Spiegeltraining. Zu Beginn der Therapie erfolgte die individuelle Schwellenbestimmung der GVS. Bei jeder täglichen Therapieeinheit wurde eine 20-minütige Stimulation mit L-GVS

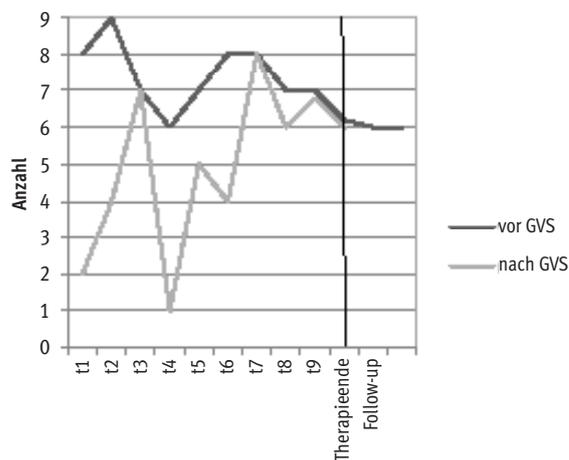


Abb. 3: Anzahl der Misperceptions bei H. B. unmittelbar vor und nach L-GVS sowie Follow-up zwei Wochen nach der Therapie (t1–t10: Messzeitpunkt 1–10). Die einzelnen Linien sind zur besseren Unterscheidbarkeit versetzt dargestellt.

bei 0,7 mA durchgeführt. Da die GVS nicht zu Habituationseffekten führt [43, 44], entschieden wir uns bei diesem Patienten für die tägliche Anwendung der Stimulationsmethode (5-mal/Woche). Parallel dazu absolvierte H. B. jeden Tag für 50 bis maximal 90 Minuten ein individuelles Spiegeltraining. Da die Sensibilitätsstörungen auf das Bein und den Fuß beschränkt waren, wurde ein Spiegel sagittal zur Körpermitte zwischen beiden Beinen auf dem Boden positioniert. Neben bilateralen motorischen Übungen (Pronation und Supination der Füße sowie Dorsalflexion und Plantarflexion der Füße und Zehen) lag der Fokus auf bilateraler somatosensorischer Stimulation der Beine und Füße. Die Stimulation erfolgte durch unterschiedlich raue Stoffe und Materialien: verschiedenporige Schwämme, Schaumgummi, Filze unterschiedlicher Rauigkeit, Peelinghandschuhe, Teppiche und unterschiedliche Flauschstoffe. Zur Stimulation der Fußsohlen, die eine deutlich geringere Oberflächensensibilität aufweisen, wurden entsprechend Materialien mit größeren Oberflächeneigenschaften verwendet wie taktile Bodenscheiben mit unterschiedlichen Strukturen (»Taktile Scheiben«, Firma Wehrfritz).

Ergebnisse

Bei der Auswertung des Fragebogens zeigte sich, dass sich die am Anfang als sehr unangenehm berichteten Empfindungen bezüglich der wahrgenommenen abweichenden Position der Fußstellung, des Fremdheitsgefühls des gesamten Beines als auch des Taubheitsgefühls deutlich verbesserten. Die anfänglich subjektiv als sehr stark empfundenen Misperceptions (=6), reduzierten sich auf eine mittlere Intensität (Abb. 2, rechts). Hinzu kamen andere Empfindungen, die vom

Patienten jedoch nicht als Misperceptions, sondern als angenehme Wahrnehmungen (Kribbeln) geschildert wurden. Sie wurden vom Patienten selbst einem besseren Spüren im Zusammenhang mit einer parallelen Reduktion des Taubheitsempfindens und einer stärkeren Aktivierung des Beines zugeschrieben. Auch normalisierte sich der anfängliche Temperaturunterschied zwischen der linken pathologischen Seite und der rechten intakten Seite von initial 1°C Seitenunterschied in der Oberflächentemperatur, gemessen am Schienbein, sukzessive in Schritten von 0,2° auf bis zuletzt 0,2° Gesamtunterschied (32,6° links und 32,4° rechts). Die Tendenz zu einer symmetrischeren Körpertemperatur an beiden unteren Extremitäten zeigt an, dass die dreiwöchige Therapie zu einer Normalisierung beitrug. Die verbesserte Empfindungsfähigkeit führte vermutlich dazu, dass die betroffene Extremität wieder häufiger bewegt wurde, wodurch die Durchblutung des Beines und der Lymphfluss günstig beeinflusst werden. Da unmittelbar vor jeder GVS-Applikation als auch kurze Zeit danach Veränderungen hinsichtlich der Misperceptions mit dem Fragebogen eruiert wurden, konnte der direkte Nacheffekt der GVS erfasst werden. Es zeigte sich nicht nur im Gesamtverlauf, sondern auch nach einigen Anwendungen eine unmittelbare Reduktion der Misperceptions-Symptomatik (Abb. 3).

Die Diagnostik der Oberflächensensibilität mithilfe von Semmes-Weinstein-Monofilamenten ergab vor der Intervention eine deutlich pathologisch verringerte Sensibilität im Bereich der unteren Extremität. Nach dem dreiwöchigen Training konnte eine Verbesserung der Oberflächensensibilität am Schienbein und der Wade um mindestens zwei Stärken festgestellt werden. Die Berührungssensibilität verbesserte sich auch an der linken Hand, was auf eine umfassende, nicht nur auf das Bein beschränkte Aktivierung durch unser Behandlungskonzept hindeutet. Die Sensitivitätsmessung des Fußes ergab keine Veränderung. Erklärbar ist dieser Umstand möglicherweise durch neuropathische Einflüsse bei einem langjährigen Diabetes mellitus. Die Zwei-Punkt-Diskrimination ergab vor der Therapie Werte im Normbereich für die rechte Hand, gemessen an der Fingerbeere (5 mm = normale Sensibilität). Die Messung an der linken Hand ergab einen Wert von 6 mm, was einem eingeschränkten Berührungsempfinden entspricht [1]. Auch das Vibrationsempfinden, welches mit einer Stimmgabel an der oberen und unteren Extremität (Phalanx distalis, Processus styloideus ulnae, Tibia, Malleolus lateralis, Metatarsalgelenk) gemessen wurde, war vor Beginn der Therapie deutlich beeinträchtigt (Pallhypästhesie). Im Therapieverlauf normalisierte sich das Vibrationsempfinden für die untere und obere linke Extremität von einem Wert von 4/8 zu 6/8, gemessen mit einer Stimmgabel nach Rydel-Seiffer (64 Hz).

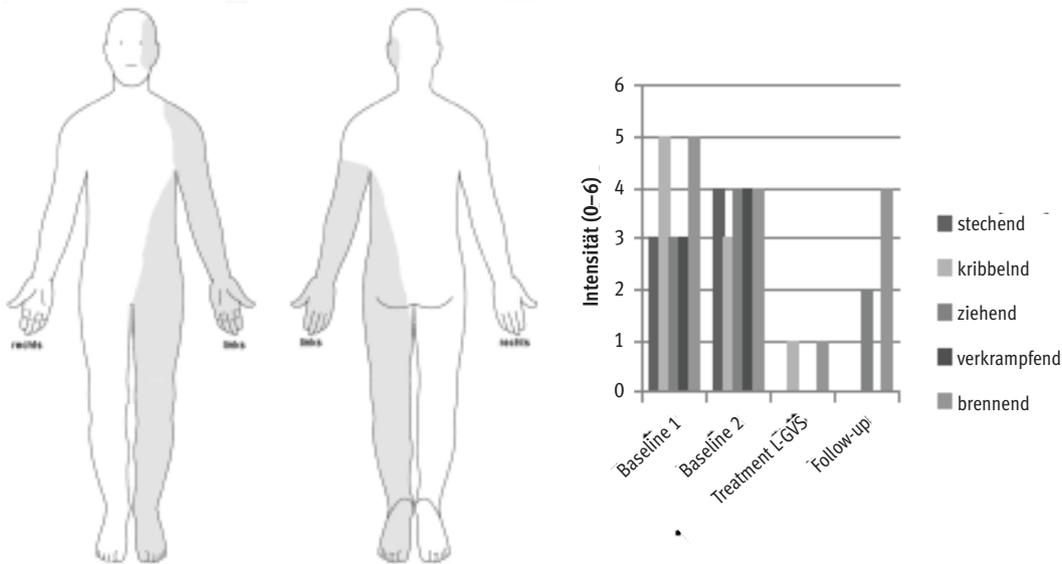


Abb. 4: Patientin I. R.: Lokalisation der sensiblen Empfindungsstörungen (linke Grafik). Rating der intensivsten Empfindungsstörungen/Missempfindungen (Anmerkung: nur die intensivsten Ratings sind dargestellt, weitere Nennungen möglich) vor der Therapie (Baseline 1 und Baseline 2), unmittelbar zu Beginn des Treatments mit Spiegeltherapie und L-GVS (Treatment L-GVS) & Follow-up 19 Monate nach dem Treatment (rechte Grafik).

Fallbeschreibung I. R.

I. R. war eine 72-jährige Patientin, die neun Monate vor Therapiebeginn, vermutlich aufgrund einer Cardioembolie bei persistierendem Foramen ovale, einen ausgedehnten ischämischen Mediainfarkt erlitt. Die radiologische Untersuchung zeigte ein ausgedehntes demarkiertes Infarktareal im Mediastromgebiet sowie eine geringe hämorrhagische Inhibierung in einem rechts frontobasalen Infarktareal und auf Höhe der Stammganglien. Der Infarkt resultierte in einer armbetonten Hemiparese und Sensibilitätsstörungen. Bei erhaltenem Lageempfinden wurde ein reduziertes Vibrationsempfinden (Pallhypästhesie), Hyperästhesie und ein distal reduziertes Wärmeempfinden festgestellt. Die Hemiparese bildete sich während eines stationären Reha-Aufenthaltes weitgehend zurück und war nur noch latent vorhanden. Im weiteren Verlauf entwickelten sich einschließende, schmerzhafte Missempfindungen an der linken Körperseite.

Beschreibung der Missempfindung

I. R. stellte sich 2013 bei uns mit schmerzhaften Missempfindungen an der linken Körperseite vor. Besonders intensiv schilderte sie die Missempfindungen im Bereich der linken Gesichtshälfte (Wange und Ohr) sowie der Handinnenfläche und der Fußsohle. Auslöser seien taktil-haptische Reize der linken Körperseite oder auch längere Aktivität im entsprechenden Körperteil. So berichtet die Patientin, dass das längere Umgreifen eines Fahrradlenkers schon genüge, um eine schmerzhafte Missempfindung in der Handinnenfläche auszulösen. Außerdem gab sie an, die Empfindungen seien tages-

zeitabhängig und vor allem morgens nach dem Aufstehen besonders stark ausgeprägt. Auch Kältereize seien häufig Auslöser. Die Empfindungen seien vergleichbar mit dem Hineingreifen in Nesseln, es käme zu einem plötzlichen starken Brennen, welches auch manchmal durch Stiche begleitet würde. Fremdbertührungen seien sehr unangenehm. Im Alltag falle I. R. auf, dass sie gelegentlich beim Gehen den linken Schuh oder Pantoffel verliere, manchmal auch an Hindernissen anstoße oder Personen auf der linken Seite übersehe. Diese Schilderungen deuteten auf einen multimodalen Neglect hin (visueller Neglect & Body-Neglect). Da I. R. umgelernte Linkshänderin war, belasteten sie die Funktionsstörungen auf der linken Seite im Alltag ganz besonders.

Assessment

Um die Missempfindungen zu erfassen, wurde auch hier der Fragebogen zur Erfassung von Sensibilitätsstörungen und Missempfindungen eingesetzt [36]. Einen Überblick über die intensivsten Empfindungsstörungen und deren Lokalisation gibt **Abbildung 4**.

Vor der therapeutischen Intervention wurden zwei Baseline-Messungen erhoben, während der Therapie wurden Messungen zur Verlaufskontrolle durchgeführt.

Zur Untersuchung der taktilen Extinktion wurde der Qualitative Extinktionstest [41] verwendet. Es handelt sich um einen Test, der durch unilaterale Stimulation und bilaterale Doppel-Simultan-Stimulationen des linken und rechten Handrückens mit Berührungsreizen die taktilen Extinktionsrate misst. Der Patient muss die sechs unterschiedlichen Materialien (Flausch, Jute, Seide, Schaumgummi, Plastikfolie, Sandpapier) erkennen und

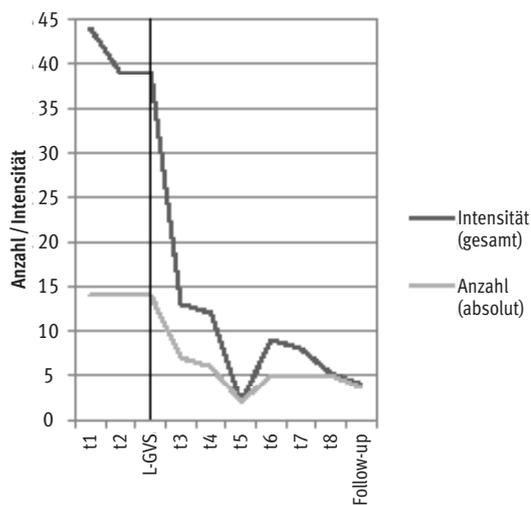


Abb. 5: Anzahl und Intensität der Missempfindungen bei I. R. vor der Kombinationsbehandlung mit L-GVS (t1 & t2) sowie Beginn mit der galvanisch-vestibulären Stimulation (t3–t8) & Follow-up 19 Monate nach der Therapie. t: Messzeitpunkt.

benennen. Wegen der Schilderungen der Patientin, dass sie Hindernisse auf der linken Seite übersehe, wurden mehrere Neglect-Tests durchgeführt (u. a. Neglect-Durchstreichtests, Motor Neglect-Alltagsrating und die deutsche Version der Catherine Bergego-Scale für Patienten mit Neglect).

Therapeutische Intervention: I. R.

I. R. nahm in unserer neuropsychologischen Universitätsambulanz eine dreiwöchige Therapie in Anspruch. Auch hier bestand die therapeutische Intervention in einer Kombination aus motorischen und taktilen Spiegeltrainingseinheiten (ca. 1½ Stunden) sowie paralleler L-GVS. Nach der Schwellenbestimmung wurde täglich für 20 Minuten subliminal bei 0,7 mA stimuliert. Da die Missempfindungen sowohl in den oberen als auch unteren Extremitäten lokalisiert waren, wurde die obere Extremität am Tisch mit dem Spiegel und die untere Extremität mit dem Spiegel auf dem Boden trainiert. Die Übungen am Spiegel beinhalteten motorische und haptische Komponenten. Motorische Übungen für die obere Extremität beinhalteten die Pronation und Supination der Unterarme, die Extension und Flexion der Hände und die Opposition und Reposition des Daumens. Nach diesen einführenden motorischen Übungen wurden dann auch komplexere Objektmanipulationen am Spiegel durchgeführt (z. B. Holzklötze in einer Schale ablegen). Motorische Übungen für die untere Extremität umfassten die Pronation und Supination der Füße sowie Dorsalflexion und Plantarflexion der Füße und Zehen. Die bilaterale somatosensorische Stimulation wurde

auf die Hände, die Arme und die Füße beschränkt. Unterschiedlich raue Materialien und Stoffe dienten als taktile Berührungsreize (siehe oben, Patient H. B.). Zur Stimulation der Fußsohlen wurden entsprechend grobere Materialien verwendet.

Ergebnisse

Die Auswertung des Fragebogens ergab eine deutliche Reduktion der Anzahl und Intensität der Missempfindungen (**Abb. 5**) parallel zum Stimulationsbeginn mit L-GVS.

Einige Symptome remittierten sogar vollständig (»Ziehen« und »Stechen« in den Extremitäten, **Abbildung 4**, rechte Grafik). I. R. gab außerdem bei Therapieende an, dass sie die linke Hand und das linke Bein mittlerweile länger bewegen oder belasten könne, ohne dass es zu unangenehmen Missempfindungen käme. Auch würde sie nirgendwo mehr anstoßen, sondern Hindernisse oder Personen frühzeitig erkennen. Wir verabschiedeten die Patientin mit einer minimalen Restsymptomatik bezüglich der Empfindungsstörungen. In der telefonischen Nachuntersuchung (Follow-up, **Abbildung 4**) 19 Monate später, berichtet die Patientin, dass sie etwa ein Jahr nach der Therapie zwei zerebrale Krampfanfälle erlitt. Seit dem Zeitpunkt seien die Missempfindungen wieder stärker geworden. Die Monate zuvor sei die Symptomatik stabil gewesen. Dennoch hätten sich die Missempfindungen durch die Anfallssymptomatik nur teilweise verschlechtert und sind nach wie vor deutlich geringer in Bezug zum ursprünglichen Ausgangsniveau. Die Patientin erklärte auch, dass ihre sozialen Aktivitäten nicht mehr wegen der Missempfindung leiden würden, sondern dass sie sich wieder regelmäßig mit Bekannten treffe und ihrem Hobby nachginge.

Diskussion und Ausblick

Die Therapie von Missempfindungen nimmt bisher immer noch keinen entscheidenden Stellenwert in der Neurorehabilitation nach Schlaganfall ein. Viele Patienten erhalten lediglich eine Dauermedikation mit teilweise starken Nebenwirkungen. Dabei sind relativ viele Personen nach einem Schlaganfall davon betroffen [2]. Die Auswirkungen dieser Beeinträchtigung sind von höchster Relevanz im täglichen Leben. Eine gestörte Propriozeption kann zu Anstoßen und Verletzungen führen und die Mobilität beeinflussen, wenn die Lage oder die Bewegung für das Bein im Raum nicht genau durch adäquate sensorische Informationen ermittelt werden kann. So hat eine geschädigte Sensibilität nicht nur Auswirkungen auf die wahrgenommene Haptik von Objekten und Gegenständen, die angefasst werden, sondern kann auch zwischenmenschliche Beziehungen beeinflussen, da Berührungen entweder gar nicht, vermindert oder als schmerzhaft wahrgenommen werden.

Ziel dieser experimentell-klinischen Pilotstudie war es zu zeigen, dass eine bessere Behandlung von sensiblen Störungen, insbesondere Missempfindungen nach Schlaganfall ohne Dauermedikation möglich ist.

Beide Schlaganfallpatienten profitierten deutlich von der dreiwöchigen kombinierten therapeutischen Intervention. Auch mehrere Wochen bzw. Monate nach der Therapie blieben die erzielten Verbesserungen weitestgehend stabil. Bei H.B., dessen Empfindungsstörungen nach einer Ischämie im Bereich der rechtshemisphärischen Mantelkante auf das linke Bein und den linken Fuß beschränkt waren, sanken die Intensitäten der Missempfindungen deutlich. Die Oberflächensensibilität, die Zwei-Punkt-Diskrimination und das Vibrationsempfinden zeigten Verbesserungen bis in den Normalbereich. Patientin I.R. erlitt einen ausgedehnten rechtsseitigen ischämischen Infarkt im Medialstromgebiet, dessen klinisches Bild durch eine Hyperästhesie und einschließende schmerzhaft Missempfindungen geprägt war. Auch hier führte die Doppel-Stimulation durch GVS und Spiegeltraining zu einer massiven Verminderung vieler Missempfindungen. Unmittelbar nach der Therapie waren die sehr unangenehmen stechenden, kribbelnden und krampfartigen Empfindungsstörungen vollständig verschwunden. Etwa ein Jahr nach Abschluss der erfolgreichen Behandlung kam es zu einem teilweisen Rezidiv der Empfindungsstörungen, vermutlich geschuldet zwei zwischenzeitlich aufgetretenen zerebralen Krampfanfällen. Trotzdem blieb sowohl die Anzahl als auch die Intensität der wiedergekehrten Missempfindungen im Vergleich zu der Zeit vor Therapiebeginn reduziert.

Zusammenfassend kann daher festgehalten werden, dass die Kombination von Spiegeltherapie und GVS ein vielversprechendes Potenzial im Hinblick auf die Wiederherstellung eines gestörten Körperschemas hat [23, 24, 26, 27, 34] und damit zu einer Reduktion oder gar Beseitigung von Missempfindungen beitragen kann. Um den Effekt, der auf L-GVS als Add-on-Verfahren zurückgeht, genauer zu untersuchen, führen wir gegenwärtig kontrollierte, randomisierte Studien mit einer größeren Anzahl an Patienten mit entsprechender residualer Symptomatik durch.

Literatur

- American Society for Surgery of the Hand (ed): The Hand: Examination and Diagnosis. 2nd edn. Edinburgh, NY: Churchill Livingstone 1983.
- Antonietto D, Kluger BM, Sahlein DH, Heilman KM. Phantom limb after stroke: an underreported phenomenon. *Cortex* 2010; 46(9): 1114-22.
- Altschuler EL, Wisdom SB, Stone L, Foster C, Galasko D, Llewellyn DM, Ramachandran VS. Rehabilitation of hemiparesis after stroke with a mirror. *Lancet* 1999; 353(9169): 2035-6.
- André JM, Martinet N, Paysant J, Beis JM, Le Chapelain L. Temporary phantom limbs evoked by vestibular caloric stimulation in amputees. *Neuropsychiatry Neuropsychol Behav Neurol* 2011; 14(3): 190-196.
- Bisiach E, Rusconi ML, Vallar G. Remission of somatoparaphrenic delusion through vestibular stimulation. *Neuropsychologia* 1991; 29(10): 1029-1031.
- Bottini G, Paulesu E, Sterzi R, Warburton E, Wise RJ, Vallar G, Frackowiak RS, Frith CD. Modulation of conscious experience by peripheral sensory stimuli. *Nature* 1995; 376(6543): 778-781.
- Bottini G, Paulesu E, Gandola M, Loffredo S, Scarpa P, Sterzi R, Santilli I, Defanti CA, Scialfa G, Fazio F, Vallar G. Left caloric vestibular stimulation ameliorates right hemianaesthesia. *Neurology* 2005; 65: 1278-1283.
- Botvinick M, & Cohen J. Rubber hands feel touch that eyes see. *Nature* 1998; 391(6669): 756.
- Brandt T, Dieterich M. The vestibular cortex. Its locations, functions and disorders. *Ann NY Acad Sc* 1999; 871: 293-312.
- Carey LM. Somatosensory loss after stroke. *Crit Rev Phys Rehabil Med* 1995; 7: 51-91.
- Dohle C, Pullen J, Nakaten A, Kust J, Rietz C, Karbe H. Mirror therapy promotes recovery from severe hemiparesis: a randomized controlled trial. *Neurorehabil Neural Repair* 2009; 23(3): 209-17.
- Ferrè ER, Sedda A, Gandola M, & Bottini G. How the vestibular system modulates tactile perception in normal subjects: A behavioral and physiological study. *Exp Brain Res* 2011; 208: 29-38.
- Ferrè ER, Day BL, Bottini G, & Haggard P. How the vestibular system interacts with somatosensory perception: a sham-controlled study with galvanic vestibular stimulation. *Neurosci Lett* 2012; 550: 35-40.
- Fink GR, Marshall JC, Weiss PH, et al. Performing allocentric visuospatial judgments with induced distortion of the egocentric reference frame: An fMRI study with clinical implications. *Neuroimage* 2003; 20(3): 1505-1517.
- Fitzpatrick RC, Day BL. Probing the human vestibular system with galvanic stimulation. *J Appl Physiol* 2004; 96: 2301-2316.
- 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(6531): 482-4.
- Flor H. Phantom-limb pain: characteristics, causes, and treatment. *Lancet Neurol* 2002; 1(3): 182-9.
- Flor H. The Modification of Cortical Reorganization and Chronic Pain by Sensory Feedback. *Appl Psychophysiol Biofeedback* 2002; 27(3): 215-227.
- Guldin WO, Grusser OJ. Is there a vestibular cortex? *Trends Neurosci* 1998; 21: 254-259.
- Kerkhoff G, Hildebrandt H, Reinhart S, Kardinal M, Dimova V, & Utz KS. A long-lasting improvement of tactile extinction after galvanic vestibular stimulation: two Sham-stimulation controlled case studies. *Neuropsychologia* 2011; 49: 186-195.
- Le Chapelain L, Beis JM, Paysant J, André JM. Vestibular caloric stimulation evokes phantom limb illusions in patients with paraplegia. *Spinal cord* 2001; 39(2): 85-87.
- Liepert J. Evidenzbasierte Verfahren in der motorischen Rehabilitation. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 2010; 11 (1): 5-10.
- Lopez C, Lenggenhager B, Blanke O. How vestibular stimulation interacts with illusory hand ownership. *Conscious Cogn* 2010; 19: 33-47.
- Lopez C, Schreyer H-M, Preuss N, Mast FW. Vestibular stimulation modifies the body schema. *Neuropsychologia* 2012; 50: 1830-1837.
- Mathiowetz V, Weber K, Kashman N, Volland G. Adult norms for the nine hole peg test of finger dexterity. *OTJR* 1985; 5(1): 24-38.
- Melzack R. Pain and the neuromatrix in the brain. *J Dent Educ* 2001; 65(12): 1378-82.
- Melzack R. Phantom limbs. *Sci Am* 1992; 266(4): 120-126.

28. Melzack R. Phantom limbs and the concept of a neuromatrix. *Trends Neurosci* 1990; 13(3): 88-92.
29. Melzack R, Loeser JD. Phantom body pain in paraplegics: evidence for a central »pattern generating mechanism« for pain. *Pain* 1978; 4(3): 195-210.
30. Michielsen ME, Selles RW, van der Geest, JN, Eckhardt M, Yavuzer G, Stam HJ, Smits M, Ribbers GM, Bussmann. Motor recovery and cortical reorganization after mirror therapy in chronic stroke patients: a phase II randomized controlled trial. *Neurorehabil Neural Repair* 2011; 25(3): 223-233.
31. Oppenländer K, Keller I, Karbach J, Schindler I, Kerkhoff G, Reinhart S. Subliminal galvanic-vestibular stimulation influences ego- and object-centred components of visual neglect. *Neuropsychologia* 2014; 1-8. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2014.10.039.
32. 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): 1857-60.
33. Ramachandran VS. Phantom limbs, neglect syndromes, repressed memories, and Freudian psychology. *Int Rev Neurobiol* 1994; 37: 291-333.
34. Ramachandran VS, Levi L, Stone L, Rogers-Ramachandran D, McKinney R, Stalcup M, Arcilla G, Zweifler R, Schatz A, Flippin A. In: Llinás R & Churchland PS (ed). *The Mind-Brain Continuum: Sensory Processes*. Cambridge, MA: MIT Press 1998.
35. Reinhart S, Schaadt A-K, Kerkhoff G. Behandlung von Missempfindungen nach Schlaganfall mittels Spiegeltherapie: eine Fallstudie. *Neurol Rehabil* 2011; 17(5/6): 251-257.
36. Reinhart S, Kerkhoff G. FEMS: Fragebogen zur Erfassung von Missempfindungen und Sensibilitätsstörungen (in Vorbereitung).
37. Rorsman I, Magnusson M, & Johansson BB. Reduction of visuo-spatial neglect with vestibular galvanic stimulation. *Scand J Rehabil Med* 1999; 31: 117-124.
38. Schmidt L, Utz KS, Depper L, Adams M, Schaadt A-K, Reinhart S, Kerkhoff G. Now You Feel both: Galvanic Vestibular Stimulation Induces Lasting Improvements in the Rehabilitation of Chronic Tactile Extinction. *Front Hum Neurosci* 2013; 7: 90.
39. Schmidt L, Keller I, Utz KS, Artinger F, Stumpf O, Kerkhoff G. Galvanic Vestibular Stimulation Improves Arm Position Sense in Spatial Neglect: A Sham-Stimulation-Controlled Study. *Neurorehabilitation & Neural Repair* 2013; 27(6): 497-506.
40. Sommerfeld DK, Arbin MH. The impact of somatosensory function on activity performance and length of hospital stay in geriatric patients with stroke. *Clin Rehabil* 2004; 18(2): 149-155.
41. Schwartz AS, Marchok PL, Flynn RE. A sensitive test for tactile extinction: Results in patients with parietal and frontal lobe disease. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 1977; 40: 228-233.
42. Thieme H, Mehrholz J, Pohl M, Behrens J, Dohle C. Mirror therapy für improving motor function after stroke. *Stroke* 2013; 44: e1-e2.
43. Utz KS, Dimova V, Oppenländer K, Kerkhoff G. Electrified minds: Transcranial direct current stimulation (tDCS) and Galvanic Vestibular Stimulation (GVS) as methods of non-invasive brain stimulation in neuropsychology – A review of current data and future implications. *Neuropsychologia* 2010; 48: 2789-2810.
44. Utz KS, Keller I, Kardinal M, Kerkhoff G. Galvanic vestibular stimulation reduces the pathological rightward line bisection error in neglect—a sham stimulation-controlled study. *Neuropsychologia* 2011; 49: 1219-1225.
45. Utz KS, Korluss K, Schmidt L, Rosenthal A, Oppenländer K, Keller I, Kerkhoff G. Minor adverse effects of galvanic-vestibular stimulation in post-stroke patients and healthy individuals. *Brain Inj* 2011; 25: 1058-1069.
46. Van Stralen HE, Zandvoort MJE, Dijkerman HC. The role of self-touch in somatosensory and body representation disorders after stroke. *Philos Trans R Soc B Biol* 2011; 366: 3142-3152.
47. Wilkinson D, Zubko O, Degutis J, Milberg W, Potter J. Improvement of a figure copying deficit during subsensory galvanic vestibular stimulation. *J Neuropsychol* 2010; 4: 107-118.
48. Wilkinson D, Zubko O, Sake IM, Coulton S, Higgins T, Pulicino P. Galvanic vestibular stimulation in hemi-spatial neglect. *Front Integr Neurosci* 2014; 8: 4.

Interessenvermerk

Es besteht kein Interessenkonflikt.

Korrespondenzadresse:

Michaela Adams, M. Sc. Psych.
 Universität des Saarlandes
 Klinische Neuropsychologie und
 Neuropsychologische Universitätsambulanz
 Campus Gebäude A 1.3
 D-66123 Saarbrücken
 E-Mail: michaela.adams@uni-saarland.de