



Neurofeedback-gestütztes Bewegungsvorstellungstraining zur Rehabilitation nach einem Schlaganfall

Bewegungsbeobachtung

Mittels transkranieller Magnetstimulation (TMS) konnte nachgewiesen werden, dass die Beobachtung einer Handbewegung bei der beobachtenden Person zu einer relativ spezifischen Fazilitation in den Muskeln führt, die an der Bewegung teilnehmen [1]. Das Beobachten von Bewegung unterstützt motorisches Lernen [2]. Dies legt nahe, Bewegungsbeobachten auch in der motorischen Rehabilitation nach einem Schlaganfall zum Wiedererwerb basaler motorischer Fähigkeiten zu nutzen [3]. Initiale Pilotstudien wiesen unter Nutzung funktioneller Bildgebung auf einen potenziellen Effekt hin [4, 5]. Größere randomisierte kontrollierte Studien (RCT) wurden jedoch nur vereinzelt durchgeführt [6, 7], sodass ein endgültiger oder ausreichender Beleg für einen klinisch relevanten Effekt noch aussteht.

Bewegungsvorstellung

Demgegenüber hat das Bewegungsvorstellungstraining großes neurowissenschaftliches Interesse hervorgerufen und breiten Anschlag vor allem durch funktionelle Bildgebung erlebt. Mittlerweile gibt es zahlreiche Metaanalysen, die ein bilaterales Netzwerk sensomotorischer Strukturen zeigen, die am Bewegungsvorstellungsvermögen beteiligt sind [8]. Hierzu gehören vor allem der dorsale

und ventrale prämotorische Kortex, der superiore und inferiore parietale Kortex, Basalganglien und Kleinhirn. Traktographiestudien deuten darauf hin, dass auch für die Bewegungsvorstellung eine ventrale und eine dorsale Route existiert [9].

» Bewegungsvorstellung und -ausführung nutzen ähnliche Neuronenverbände

Ein Argument für eine Wirksamkeit ist vor allem Jeannerods Theorie der funktionellen Äquivalenz, welche besagt, dass Bewegungsvorstellung und Bewegungsausführung weitgehend ähnliche Neuronenverbände nutzen bzw. zumindest makroskopisch dieselben kortikalen und subkortikalen Strukturen benutzen [10]. Davon ausgehend wurde das Bewegungsvorstellungsvermögen und -training extensiv untersucht und auch zu einer Anbahnung motorischer Fähigkeiten und zum motorischen Lernen im Rahmen der Neurorehabilitation vorgeschlagen [11]. Einige Studien konnten positive Hinweise auf eine Wirksamkeit erbringen [12–17]. Ein Wirksamkeitsnachweis konnte jedoch nicht durchgängig in allen Studien bestätigt werden. Die wichtigsten RCTs seien kurz erwähnt, wobei insbesondere Gründe für einen negativen Ausgang erörtert werden.

RCTs zum Bewegungsvorstellungstraining

In einer Studie mit 46 stationären Patienten verglichen *Liu et al.* mentales Training mit konventioneller Ergotherapie [12]. Das Training erstreckte sich über 1 h pro Werktag über 3 Wochen. Im mentalen Training wurden 15 Alltagstätigkeiten eingeübt. Die Autoren beschrieben für die Interventionsgruppe eine verbesserte Fähigkeit, neue Aufgaben zu lernen und zu behalten; sie zeigten aber keinen größeren Zuwachs im Fugl-Meyer-Score.

In einer weiteren Studie wiesen *Liu et al.* noch einmal auf einen möglichen Effekt zur Generalisierung wieder erlernter Fertigkeiten hin, insbesondere in neuer Umgebung außerhalb der Trainingssituation [13]. Mentales Training bestand darin, Alltagstätigkeiten z. B. aus dem Haushalt in verschiedene Abschnitte zu zergliedern, Schwächen und Stärken der eigenen Ausführung zu reflektieren, die Übungssequenz mental möglichst häufig zu wiederholen und anschließend die Handlung auch auszuführen. Die Kontrollgruppe bekam konventionelle Ergotherapie. Beide Gruppen erhielten zusätzlich 1 h Krankengymnastik pro Tag zur Kräftigung, Mobilisierung und Förderung der Ausdauer. Das Training erstreckte sich werktags über 3 Wochen. Allerdings schloss die Studie keine Nachbeobachtung ein.

Page hat in zahlreichen Pilotversuchen auf einen möglichen positiven Wert des mentalen Trainings unmittelbar vor oder nach einer Sitzung Physiotherapie hingewiesen. Darüber hinaus wurden in einer randomisierten Studie 32 chronische Patienten mit mittelgradiger Hemiparese innerhalb eines Rehabilitationsprogramms untersucht [14]. Die Interventionsgruppe erhielt zusätzlich 2-mal pro Woche 30 min mentales Training unmittelbar im Anschluss an die Physiotherapie für insgesamt 6 Wochen. Die Kontrollgruppe erhielt denselben Umfang an Physiotherapie gefolgt von einem Entspannungstraining. Die Autoren beschreiben eine signifikante Verbesserung in der Interventionsgruppe hinsichtlich der beeinträchtigten Handfunktion und hinsichtlich Alltagsfunktionen. In einer weiteren Studie weisen sie auf eine Dosis-Wirkungs-Beziehung hin in dem Sinne, dass 60 min mentales Training in Verbindung mit Physiotherapie eine größere Verbesserung des Fugl-Meyer-Scores bewirken als 20 min [15].

Riccio *et al.* führten eine Cross-over-Studie bei 36 Patienten während einer 6-wöchigen Rehabilitationsbehandlung durch [16]. Für 3 Wochen erhielten sie zusätzlich mentales Training. Während der Phase des mentalen Trainings kann es zu signifikanten Verbesserungen des Motricity-Index und eines weiteren Armfunktionstests. Die Autoren schlossen daraus, dass mentales Training komplementär zur traditionellen Neurorehabilitation genutzt werden könnte.

Park und Park kombinierten bei 30 Patienten mindestens 6 Monate nach dem Infarkt Training mittels virtueller Realität, Wii-Plattform, Avatar und Bewegungssensoren über 4 Wochen werktags jeweils 30 min mit einem zusätzlichen mentalen Training in der Experimentalgruppe [17]. Die Kontrollgruppe führte dasselbe Training mittels virtueller Realität und Wii-Plattform durch, jedoch ohne zusätzliches mentales Training. Beide Gruppen verbesserten sich im Fugl-Meyer-Score und dem Box and Block Test, die Experimentalgruppe verbesserte sich jedoch signifikant mehr.

Demgegenüber zeigten andere RCTs kein positives Ergebnis. Die Studie von Braun *et al.* wurde an 36 Schlagan-

fallpatienten (durchschnittliches Alter 78 Jahre) in einem holländischen Pflegeheim durchgeführt [18]. Das Training ging über 6 Wochen. In den Wochen 1 und 2 wurden physikalische Übungen der Kontrollintervention und Übungen zur Bewegungsvorstellung erklärt und eingeübt, in den Wochen 3 bis 6 durchgeführt. Die Experimentalgruppe erhielt Physiotherapie plus mentales Training. Mindestens 10 Trainingssitzungen fanden statt. Die Kontrollgruppe erhielt konventionelles Training ohne zusätzliche Bewegungsvorstellung. Der Umfang der Intervention war in beiden Gruppen gleich groß. Primäres Outcome waren Eigenbewertungen von Alltagsaktivitäten, die auch im Bewegungsvorstellungstraining eingeübt wurden. Es zeigte sich keine Überlegenheit des mentalen Trainings gegenüber der konventionellen Vergleichsgruppe. Die Autoren erklärten die fehlende Wirkung dadurch, dass die Rekrutierung in einem Pflegeheim stattfand und die Teilnehmer möglicherweise nicht in einem ausreichend guten Zustand waren.

Schuster *et al.* verglichen zwei experimentelle Gruppen mit einer Kontrollgruppe ($n = 39$ Schlaganfallpatienten; [19]). Die erste Patientengruppe übte eine komplexe motorische Aufgabe. Dabei mussten sie sich aus dem Stand über den Kniestand zum Liegen auf den Boden legen und anschließend wieder aufstehen. Die Teilnehmer übten diese Aufgabe in der Physiotherapie. Zwischendurch stellten sie sich die Übungen mental vor, während sie entspannt auf dem Rücken lagen. Bei der zweiten Gruppe von Patienten mit Schlaganfall bestand kein inhaltlicher Zusammenhang zwischen der Krankengymnastik und einem Bewegungsvorstellungstraining. Die dritte Gruppe erhielt nur Physiotherapie plus Entspannung. Alle drei Gruppen erhielten in etwa den gleichen Therapieumfang, aufgeteilt auf insgesamt 9 Sitzungen innerhalb von 2 Wochen. Primäres Outcome war die Zeit für die Ausführung der Aufgabe. Insgesamt konnte zwischen den drei Gruppen kein signifikanter Unterschied nachgewiesen werden. Es bestanden jedoch verschiedene methodische Schwierigkeiten. Der Ausgangswert der neurologischen Be-

einträchtigung war in den drei Gruppen trotz Randomisierung unterschiedlich. Die Gruppengrößen waren klein und die Patienten waren im chronischen Stadium.

» Vorstellungstraining und Ausführung sollten kombiniert werden

In der RCT von Ietswaart wurden 121 Patienten 1 bis 6 Monate nach dem Infarkt eingeschlossen [20]. Nachgewiesen werden sollte, dass sich durch ein isoliertes Bewegungsvorstellungstraining auch ohne begleitende Physiotherapie größere Effekte finden lassen als durch nicht-motorisches Vorstellungstraining und als bei Patienten, die konventionelle motorische Therapie erhielten. Outcomeparameter war der Action Research Arm Test. Trotz der hohen methodischen Qualität zeigte sich kein Unterschied zwischen den drei Gruppen. Im Nachhinein könnte man argumentieren, dass das Ziel zu ehrgeizig war. Möglicherweise kann man tatsächlich nicht erwarten, dass Bewegungsvorstellungstraining isoliert ohne physisches Üben wirksam ist, da in früheren Studien immer favorisiert wurde, das Vorstellungstraining mit der Ausführung zu kombinieren.

Timmermans *et al.* verglichen den Effekt eines 6-wöchigen Bewegungsvorstellungstrainings 2 bis 6 Wochen nach einem Schlaganfall mit Handparese im Vergleich zu einer konventionellen Fazilitierungstechnik [21]. Im Bewegungsvorstellungstraining übten die Patienten mindestens 3-mal pro Tag. Mittels Videos wurden sie instruiert und zum mentalen Training angehalten. Outcome waren der Fugl-Meyer-Test, der Frenchay Arm Test und der Wolf Motor Function Test. Beide Therapiegruppen verbesserten sich, was auch nach 12 Monaten noch nachweisbar war. Es fand sich jedoch kein Unterschied zwischen den beiden Gruppen und es ergab sich somit kein Hinweis auf eine höhere Wirksamkeit des mentalen Trainings gegenüber einer konventionellen Fazilitierungstechnik.

Eine neue Studie von Oostru untersuchte den Effekt von Bewegungsvorstellungstraining auf die Gangrehabilitation

[22]. Es wurden 44 Patienten innerhalb von 12 Monaten nach dem Ereignis rekrutiert. 21 Patienten erhielten ein Vorstellungstraining, 23 Patienten nahmen an einem Entspannungstraining gleichen Umfangs teil. Dies wurde in Ergänzung zur Standardrehabilitation in Form von 2 h Krankengymnastik und 1 h Ergotherapie pro Tag an 5 Werktagen ausgeführt. Die Experimentalgruppe zeigte eine moderate Verbesserung im Gangbild gegenüber der Kontrollgruppe. Im Nachhinein ist dies jedoch nicht so verwunderlich, da die Kontrollgruppe keine aktive Therapie als Add-on-Behandlung, sondern Entspannungstraining erhielt.

Zu einem ähnlich uneinheitlichen Gesamtergebnis wie der vorliegende Beitrag kommt auch eine *Übersichtsarbeit und Metaanalyse* [23]: Etwa die Hälfte der Studien deutet auf eine mögliche Wirksamkeit des Bewegungsvorstellungstrainings, die andere Hälfte, die allerdings die deutlich größere Zahl der Studienteilnehmer umfasst, kann keinen entsprechenden Effekt nachweisen. Im Folgenden werden mögliche Gründe für ein Fehlen eines eindeutigen Nachweises der Wirksamkeit erörtert.

Konfundierende Faktoren für die Wirksamkeit des Bewegungsvorstellungstrainings

Woran liegt es also, dass das Behandlungskonzept des Bewegungsvorstellungstrainings nicht eindeutig über alle RCTs zum Behandlungserfolg führt? Beim Bewegungsvorstellungstraining spielen verschiedene konfundierende Faktoren eine Rolle. Die *Intensität* ist bei allen Therapien und Therapiestudien ein entscheidender Schlüssel [24]. Dabei gehören zur Intensität nicht nur die Frequenz und Dauer des Trainings (d. h. die *Dosis*), sondern auch die Gruppengröße (die Therapie in einer Gruppe bestehend aus zwei Patienten ist möglicherweise intensiver als in einer Gruppe von 20 Patienten) sowie das Bemühen bzw. die *Anstrengung* („effort“) des Patienten. Hohe Therapieanreize wie bei „serious games“ mögen sich positiv auf die Therapiemotivation auswirken. Möglicherweise sind ältere oder schwerer erkrankte Patienten überfordert oder

Nervenarzt DOI 10.1007/s00115-016-0185-y
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016

C. Dettmers · N. Braun · I. Büsching · T. Hassa · S. Debener · J. Liepert

Neurofeedback-gestütztes Bewegungsvorstellungstraining zur Rehabilitation nach einem Schlaganfall

Zusammenfassung

Mentales Training – Bewegungsbeobachten und insbesondere Bewegungsvorstellung – hat viel akademisches Interesse geweckt. Die funktionelle Äquivalenz von Bewegungsvorstellung und Bewegungsausführung lässt hoffen, dass sich mentales Training zur motorischen Rehabilitation nach einem Schlaganfall nutzen lässt. Mittlerweile stehen randomisierte kontrollierte Studien zur Verfügung, von denen ca. die Hälfte einen Zusatznutzen der Bewegungsvorstellung zeigen konnte, die andere Hälfte hingegen keinen Mehrwert nachwies. Mögliche Gründe für eine mangelnde Umsetzung im Rehabilita-

tionsalltag und Hindernisse auf dem Weg zur Etablierung werden ausführlich diskutiert. Im Anschluss daran werden das Neurofeedback-gestützte Bewegungsvorstellungstraining und Closed-loop-Systeme dargestellt und ihre potenzielle Bedeutung für das motorische Lernen und die Rehabilitation nach einem Schlaganfalls erörtert.

Schlüsselwörter

Bewegungsvorstellungstraining · Mentales Training · Motorisches Lernen · Closed loop · Physiotherapie · Randomisiert kontrollierte Studien

Neurofeedback-based motor imagery training for rehabilitation after stroke

Abstract

Mental training, including motor observation and motor imagery, has awakened much academic interest. The presumed functional equivalence of motor imagery and motor execution has given hope that mental training could be used for motor rehabilitation after a stroke. Results obtained from randomized controlled trials have shown mixed results. Approximately half of the studies demonstrate positive effects of motor imagery training but the rest do not show an additional benefit. Possible reasons why motor imagery training has so far not become

established as a robust therapeutic approach are discussed in detail. Moreover, more recent approaches, such as neurofeedback-based motor imagery or closed-loop systems are presented and the potential importance for motor learning and rehabilitation after a stroke is discussed.

Keywords

Motor imagery · Mental training · Motor learning · Closed loop · Physiotherapy · Randomized controlled trials

nicht in der Lage, anhaltend konzentriert intensives Vorstellungstraining durchzuführen, zumal ein unmittelbarer *Bewegungserfolg* oder eine sofortige *Belohnung* fehlen und das Verfahren aus Patientensicht möglicherweise nicht plausibel erscheint.

Es bleibt außerdem eine offene Frage, ob man von einem *isolierten* Bewegungsvorstellungstraining eine Wirkung erwarten kann, ohne es mit physischen Übungen zu kombinieren. Aus methodischen Gründen mag es vorteilhaft sein, Bewegungsbeobachten und -vorstellung zu trennen, um ihre getrennte Wirkung besser beurteilen zu können. In der Praxis liegt es jedoch nahe, beide Techniken zu

kombinieren, um einen stärkeren Effekt zu erreichen [25].

Wichtig sind sicherlich auch das *Setting* und der Ort der Rekrutierung, d. h. Alter, Komorbiditäten und Gesamtzustand der Patienten. Die Rekrutierung in einem Pflegeheim erscheint ungünstig für den Nachweis der Effizienz. Zudem hat die initiale Euphorie hinsichtlich eines neuen eleganten, attraktiven Behandlungsverfahrens die Praktiker vermutlich hinsichtlich Schulung der Therapeuten und der Patienten sowie Selektion der Patienten zu naiv oder unkritisch starten lassen [26].

Ferner wurde in den Studien nicht getestet, ob sich die Patienten mit einer

Handparese überhaupt noch ausreichend effektiv eine Handbewegung vorstellen können. Olsson und Nyberg hatten – in diesem Zusammenhang etwas provozierend – darauf hingewiesen, dass Patienten, die eine Handparese haben, vermutlich aufgrund der Äquivalenztheorie auch kein ausreichendes Vorstellungsvermögen haben, wie es für ein systematisches Bewegungsvorstellungstraining erforderlich ist [27]. Eine spezielle Untergruppe stellen Patienten mit räumlich-visuellem Neglekt dar, bei denen man zunächst auch Zweifel haben könnte, ob sie zum Bewegungsvorstellungstraining in der Lage sind [28]. In einer Pilotstudie konnten die Autoren nachweisen, dass bei dieser schwierig zu therapeutierenden Gruppe ausreichend Bewegungsvorstellungsvermögen erhalten ist und sich der Neglekt im Laufe des Trainings bessert (29; siehe auch Brandt et al. in diesem Heft).

» Räumlich-visueller Neglekt kann die Bewegungsvorstellung einschränken

Zukünftige Studien werden klären müssen, ob man diese Aussage auf bestimmte Infarktlokalisationen, -größen oder den Umfang des Impairments eingrenzen kann. Zumindest muss man sich zukünftig damit auseinandersetzen und testen, wie gut das individuelle Vorstellungsvermögen bei einem Patienten nach einem Infarkt erhalten ist. Hierfür eignen sich chronometrische Tests, die – basierend auf der bereits zitierten Äquivalenztheorie von Jeannerod – die Zeit für die mentale und reale Ausführung in Beziehung setzen. Für ein erhaltenes Bewegungsvorstellungsvermögen spricht, wenn die Zeiten für die Ausführung und Vorstellung einer Handlung vergleichbar sind. Alternativ lässt sich das implizite Bewegungsvorstellungsvermögen durch die Handidentifizierungsaufgabe testen. Dabei wird bei Bildern von Händen aus unterschiedlichen Perspektiven angegeben, ob es sich um eine rechte oder linke Hand handelt. Diese Aufgabe wird üblicherweise dadurch gelöst, dass man mental seine eigene Hand in die abgebildete Hand dreht. Es werden Trefferquo-

ten und Bearbeitungszeiten bestimmt, wobei die Bearbeitungszeit (partiell) vom notwendigen Rotationswinkel abhängt. Weniger zuverlässig erscheinen uns Fragebögen, die die Lebhaftigkeit des Bewegungsvorstellungsvermögens direkt erfragen (zum Vergleich der Tests s. z. B. [11]).

In einem zweiten Schritt wird sich herausstellen, ob die Patienten, die ein eingeschränktes Bewegungsvorstellungsvermögen haben, dennoch von dieser Therapie profitieren oder ob dies ein Ausschlusskriterium ist. Voraussetzung ist, dass das Bewegungsvorstellungsvermögen in diesen Studien qualitativ und auch möglichst quantitativ erfasst wird.

Wirken sich *Größe* und *Lokalisation* des Infarktes auf das Vorstellungsvermögen aus? Di Rienzo hat in einer Übersichtsarbeit zusammengetragen, wie sich Läsionen in verschiedenen Lokalisationen möglicherweise auf das Vorstellungsvermögen auswirken [30]. Die Intention der Arbeit ist gut, lässt jedoch kein einfaches Schema erkennen, weshalb wir diese Frage als noch nicht endgültig gelöst betrachten.

» Die Kompetenz der Vorstellung wurde in den Studien nicht systematisch geprüft

Inwieweit beeinträchtigt das *neurologische Defizit* das Vorstellungsvermögen? Es finden sich wiederholt Hinweise, dass Patienten mit sensiblen Defiziten und hochgradigen Paresen ein beeinträchtigtes Bewegungsvorstellungsvermögen haben [31–33]. Wenig untersucht ist bisher, welche Mindestanforderungen die Patienten hinsichtlich ihrer *Kognition*, d. h. insbesondere hinsichtlich des Arbeitsgedächtnisses, der Aufmerksamkeit und der Persistenz haben müssen. Sportwissenschaftler verweisen gerne auf das Konzept der Bewegungskompetenz, und möglicherweise gibt es auch eine *Bewegungsvorstellungskompetenz*: Es ist daher denkbar, dass eher Patienten von einer solchen Therapie profitieren, die vor dem Schlaganfall schon im Rahmen von Tanz, Sport, Musik oder anderen Aktivitäten im Vorstellungstraining geschult sind. Es ist auch ist nicht klar, wie eine opti-

male *Supervision* auszusehen hätte oder wie groß eine Gruppe sein sollte, um eine kontinuierliche Anstrengungsbereitschaft des Patienten zu gewährleisten. Bisherigen Studien ist gemein, dass die Kompetenz der Vorstellung nicht systematisch geprüft wurde und während des Bewegungsvorstellungstrainings nicht dokumentiert werden konnte, was die Patienten tatsächlich gemacht haben bzw. ob sie effektiv geübt haben.

Wondrusch und Schuster-Amft weisen darauf hin, dass Therapeuten besonders geschult werden sollten und es sicherlich hilfreich ist, ein Trainingsmanual zu erstellen [26]. Wir argumentieren, dass auch die Patienten eine sehr gründliche und systematische Einführung benötigen, um mit dieser Trainingsform effektiv arbeiten zu können.

Bewegungsvorstellungstraining mittels Neurofeedback

Neurofeedback-gestütztes Bewegungsvorstellungstraining (NF-BVT) ist eine Erweiterung des klassischen Bewegungsvorstellungstrainings. Durch Neurofeedback, einer Variante des Biofeedbacks, werden dem Patienten computergestützt und in *annähernd Echtzeit* eigene Gehirnsignale in Antwort auf vorgestellte Bewegungen rückgemeldet [34, 35]. Wie auch das klassische Bewegungsvorstellungstraining, zielt NF-BVT darauf ab, neuronale Plastizität und Reorganisation in den sensomotorischen Arealen anzustoßen. Anders als beim Bewegungsvorstellungstraining ohne Neurofeedback wird beim NF-BVT jedoch kontrolliert, ob und wie sehr sensomotorische Areale während der Bewegungsvorstellung rekrutiert werden [36]. Ziel des Neurofeedbacks ist es, Patienten rückzumelden, wann sie ihre Bewegungsvorstellungen besonders gut machen, d. h. ein im Hinblick auf die antizipierte motorische Genese günstiges neuronales Aktivitätsmuster aufzeigen, und wann nicht. Neurofeedback lässt sich somit als operantes Konditionieren verstehen, durch welches adaptive neuronale Aktivitätsmuster sichtbar gemacht und positiv verstärkt, maladaptive Aktivitätsmuster hingegen aufgelöst werden sollen [37].

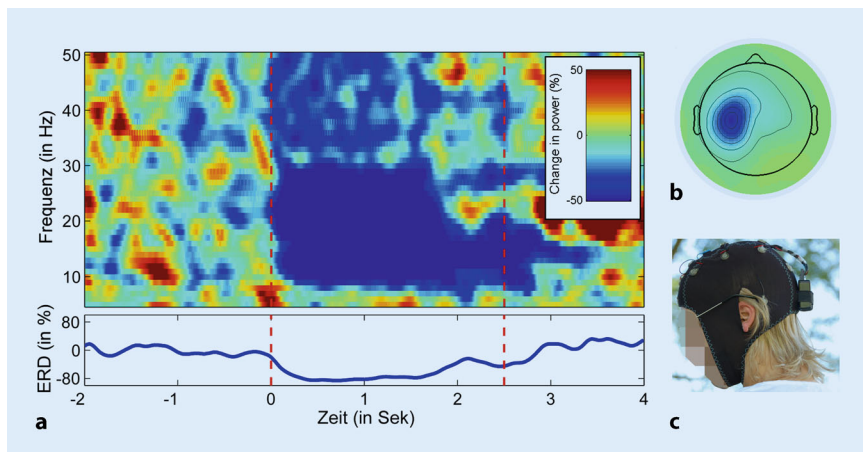


Abb. 1 ▲ Typisches ERD-Muster bei einer rechtshändigen Bewegungsvorstellung. **a** Abbildung eines Zeit-Frequenz-Plots. Kalte Farben signalisieren einen Amplitudenabfall und die rot-schraffierten Linien den Beginn und das Ende der Bewegungsvorstellung. Die untere blaue Linie kennzeichnet den durchschnittlichen Amplitudenabfall zwischen 8 und 30 Hz, relativ zu den ersten zwei Sekunden (Ruhephase). Zu sehen ist deutlich, wie das Signal während der Phase der Bewegungsvorstellung herabsinkt. **b** Typische ERD-Topographie bei einer rechtshändigen Bewegungsvorstellung. **c** Mobile EEG-Apparatur zur kabellosen Durchführung des Neurofeedback-Trainings. ERD „event-related desynchronization“

Welche neuronalen Aktivitätsmuster der motorischen Rehabilitation förderlich sind und welche maladaptiv, wird derzeit diskutiert. Zuspriech bekam in den letzten Jahren die „Abnormal-interhemispheric-inhibition“-Hypothese, derzufolge fortbestehende motorische Störungen partiell auch Folge einer maladaptiven kortikalen Reorganisation sind [38–40]. Die These ist, dass es durch Ausbleiben der interhemisphärischen Hemmung zu einer Dominanz der kontraläsionalen sensomotorischen Areale kommt und diese die adaptive Reorganisation der periläsionalen sensomotorischen Areale unterdrücken [38]. Ein therapeutischer Ansatz von NF-BVT ist es daher, das ungleichgewichtige Hemmverhältnis zwischen linken und rechten sensomotorischen Arealen wieder ins Gleichgewicht zu bringen [36].

» Neurofeedback bedeutet operantes Konditionieren

Bisher basieren die meisten NF-BVT-Trainingsprotokolle auf dem Elektroenzephalogramm (EEG), seit neuerem werden aber auch funktionell-bildgebende Verfahren erprobt [41, 42]. Ein häufig rückgemeldetes EEG-Signal ist die

sog. *ereigniskorrelierte Desynchronisation* („event-related desynchronization“, ERD), eine transiente Abnahme der oszillatorischen Gehirnaktivität im Frequenzbereich zwischen 8 und 30 Hz [34, 43]. Eine ERD tritt sowohl bei tatsächlich ausgeführten als auch lediglich imaginierten motorischen Bewegungen auf [44]. Die zeitlichen und topographischen ERD-Muster, die durch Bewegungsvorstellung evoziert werden, sind von denen, die durch Bewegungsausführung evoziert werden, in der Regel kaum zu unterscheiden. Die ERD ist typischerweise am stärksten über den sensomotorischen Arealen ausgeprägt, die kontralateral zur tatsächlich oder imaginativ bewegten Gliedmaße sind ([43]; ■ **Abb. 1**). Bei der Mehrheit aller gesunden Probanden kann die ERD zuverlässig auf Single-trial-Ebene detektiert und dann als Neurofeedback-Signal rückgemeldet werden [34].

Die Präsentation des Feedbacks kann auf unterschiedliche Weise erfolgen [45]. Zwei Beispiele sind in ■ **Abb. 2** illustriert. Bisher wird das Feedback zumeist auf einem Bildschirm präsentiert und dabei häufig in einen spielerischen Kontext gesetzt. Beispielsweise wird das Feedback in Form eines sich bewegenden Balles auf dem Bildschirm präsentiert, mit der Aufgabe, den Ball durch die eigenen Be-

wegungsvorstellungen in eine vorgegebene Richtung zu bewegen [46]. Aus Perspektive der Embodied-cognition-Literatur [47] stellt sich allerdings die Frage, ob nicht ein stärker körperbezogenes Feedbacksignal natürlicher und intuitiver ist. Gemeint ist damit ein Feedback, welches inhaltlich deckungsgleich zur vorgestellten Bewegung ist und dadurch als körper-eigen empfunden wird. Ein solches Feedback wäre beispielsweise dann gegeben, wenn die Person sich eine rechtehändige Bewegung vorstellt, der Computer diese registriert und sie unmittelbar in eine virtuelle rechtehändige Bewegung überführt.

Die Entwicklung von in das Körperschema integrierbaren Feedbacksignalen steckt zwar noch in den Kinderschuhen, perspektivisch zeichnen sich jedoch mehrere interessante Möglichkeiten ab. Einige Ansätze konzentrieren sich auf visuell-inkorporierbares Bewegungsfeedback und stützen sich auf die Ergebnisse zur Gummihand-Illusion [48]. Diese Studien zeigen, dass eine künstliche Hand als die eigene Hand empfunden werden kann, wenn das erzeugte Handperzept der künstlichen Hand inhaltlich deckungsgleich zum Handperzept der biologischen Hand ist [49]. Ursprünglich wurde die Illusion dadurch erzeugt, dass die künstliche Hand in anatomischer Kongruenz zur (verdeckten) biologischen Hand positioniert wurde und dann beide Hände synchron gestreichelt wurden [48]. Neuere Studien zeigen jedoch, dass die Illusion auch ohne taktile Stimulation auskommt, z. B. wenn eine virtuell präsentierte Hand in Synchronie zu den Bewegungen – oder bloßen Bewegungsvorstellungen – der tatsächlichen Hand bewegt wird [50]. Mehrere Trainingsprotokolle sind darauf hin erprobt worden, bei denen das Neurofeedback durch die Bewegung einer phänomenal inkorporierbaren virtuellen Hand präsentiert wird [35, 50–52]. Auch gibt es Versuche, eine anthropomorph aussehende Roboterhand für die Präsentation des Feedbacks zu verwenden [53, 54]. Gemeinsam ist beiden Ansätzen, dass durch das visuelle Bewegungsfeedback – ähnlich wie bei der Spiegelillusion [55] – das illusionäre Erleben erzeugt werden soll, dass die hochgradig paret-

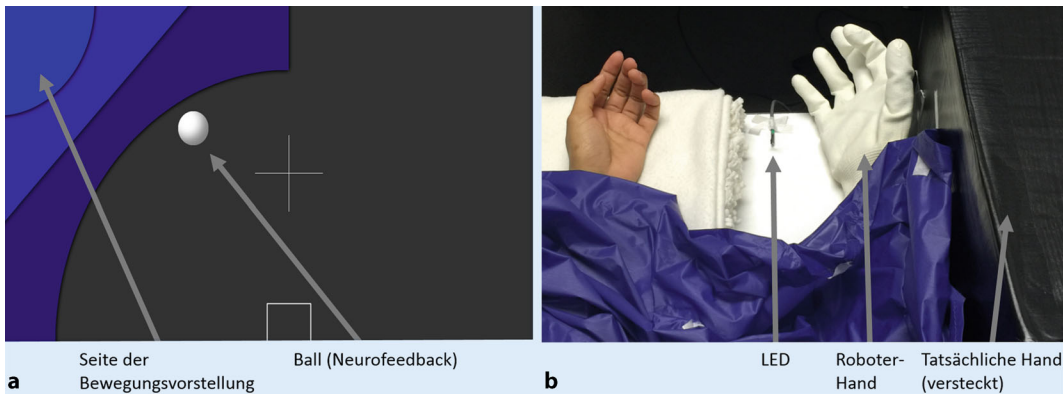


Abb. 2 ▲ Unterschiedliche Formen der Neurofeedback-Visualisierung. **a** Klassische Darbietung auf einem Bildschirm. Die Seite der Bewegungsvorstellung (linke Hand vs. rechte Hand) wird hier kenntlich gemacht durch die blauschraffierte Fläche, das Neurofeedback wird repräsentiert durch den sich bewegenden Ball. Ziel ist es, den Ball durch die eigene Bewegungsvorstellung in die blauschraffierte Fläche hineinzubewegen. **b** Embodied-Neurofeedback. Die betroffene Hand des Patienten wird versteckt in einer Box und die Roboterhand wird in anatomischer Kongruenz platziert. Die Bewegungen der Roboterhand werden durch das Neurofeedback-Signal gesteuert. Ziel ist es, die Bewegungen der Roboterhand systematisch zu steuern

sche Gliedmaße wieder bewegt werden kann. Für die klinische Wirksamkeit des Neurofeedbacks kommt unserer Meinung nach dem benutzten Feedback-Signal eine herausragende Bedeutung zu, wobei der entsprechende Nachweis noch aussteht.

Closed-loop-Systeme

Seit Jahren werden repetitive transkranielle Magnetstimulation und transkranielle Gleichstromstimulation bei Schlaganfallpatienten eingesetzt, um durch Veränderungen der Erregbarkeit meist in Kombination mit Physio- oder Ergotherapie eine Funktionsverbesserung zu erzielen [56]. Bislang wurde nicht berücksichtigt, in welchem Aktivitätszustand sich das Gehirn zum Zeitpunkt der nichtinvasiven Stimulation befand („open loop stimulation“). Ein Closed-loop-Verfahren stellt hingegen eine enge zeitliche und kausale Verbindung zwischen dem Hirnzustand und der Stimulation her und ermöglicht so, den optimalen Zeitpunkt für die Applikation eines Stimulationspunktes zu finden [57]. Voraussetzung ist ein Echtzeitdatenverarbeitungssystem, welches im Bereich von Millisekunden den jeweiligen Erregungszustand des Gehirns analysieren kann. Wie bereits oben in ähnlicher Form beschrieben, kann die bei einer Bewegungsvorstellung entstehende Desynchronisation der EEG-Aktivität im β -Band (16–22 Hz) als Indikator für

eine aufgabenbezogene Änderung der EEG-Aktivität genutzt werden. Wenn man transkraniell-magnetische Impulse genau zum Zeitpunkt der β -Wellen-Desynchronisation appliziert, führt dieses zu einem stärkeren Anstieg der kortikospinalen Erregbarkeit, als wenn die Magnetreize unabhängig von der EEG-Aktivität gegeben werden [58].

Gharabaghi et al. setzten Closed-loop-Stimulationen bei einem chronischen Schlaganfallpatienten ohne aktive Fingerbeweglichkeit ein [59]. Der Patient nahm an einem Bewegungsvorstellungstraining teil und stellte sich wiederholt die aktive Öffnung seiner betroffenen Hand vor. Wenn die online registrierte EEG-Aktivität eine Desynchronisation im β -Band zeigte, wurde ein transkraniell-magnetischer Impuls über dem ipsiläsionellen motorischen Kortex appliziert, gleichzeitig erfolgte eine passive Öffnung der Hand durch eine motorbetriebene Handorthese. Nach 20 Therapiesitzungen konnten eine deutliche Zunahme der kortikospinalen Erregbarkeit in der betroffenen Hemisphäre und eine leichte Funktionsverbesserung nachgewiesen werden. Allerdings kann aufgrund des Studiendesigns nicht differenziert werden, ob die Verbesserungen auf die passiven Bewegungen, die transkranielle Magnetstimulation oder beides zurückzuführen sind.

Der Closed-loop-Ansatz mit Bewegungsvorstellung und Triggerung durch Desynchronisation im EEG erscheint vor

allem für solche Patienten, die keine residuale muskuläre Willküraktivität aufweisen, interessant. Bei Patienten mit einer mäßigen Parese kann hingegen ein Closed-loop-Ansatz, bei dem eine neuromuskuläre *periphere* Elektrostimulation genau dann erfolgt, wenn der Patient eine Willkürinnervation durchführt und das Elektrostimulationsgerät die Muskelaktivität registriert, verwendet werden [60].

Fazit für die Praxis

- Das isolierte Bewegungsvorstellungstraining konnte sich bisher nicht als ausreichend wirksam im klinischen Rehabilitationsalltag durchsetzen.
- Embodied-Neurofeedback und der Closed-loop-Ansatz hingegen stellen vielversprechende Methoden dar, das Bewegungsvorstellungstraining in der Neurorehabilitation deutlich effektiver zu gestalten.
- Bei der Planung zukünftiger RCTs erscheint es zielführend, Neurofeedback zu integrieren und die beschriebenen konfundierenden Faktoren zu berücksichtigen.

Korrespondenzadresse

Prof. Dr. C. Dettmers

Kliniken Schmieder Konstanz
Eichhornstr.68, 78464 Konstanz, Deutschland
c.dettmers@kliniken-schmieder.de

Einhaltung ethischer Richtlinien

Interessenkonflikt. C. Dettmers, N. Braun, I. Büsching, T. Hassa, S. Debener und J. Liepert geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Dieser Beitrag beinhaltet keine von den Autoren durchgeführten Studien an Menschen oder Tieren.

Literatur

- Maeda F, Kleiner-Fisman G, Pascual-Leone A (2002) Motor facilitation while observing hand actions: Specificity of the effect and role of observer's orientation. *J Neurophysiol* 87(3):1329–1335
- Stefan K, Cohen LG, Duque J, Mazzocchio R, Celnik P, Sawaki L et al (2005) Formation of a motor memory by action observation. *J Neurosci* 25(41):9339–9346
- Buccino G, Solodkin A, Small SL (2006) Functions of the mirror neuron system: Implications for neurorehabilitation. *Cogn Behav Neurol* 19(1):55–63
- Ertelt D, Small S, Solodkin A, Dettmers C, McNamara A, Binkofski F et al (2007) Action observation has a positive impact on rehabilitation of motor deficits after stroke. *Neuroimage* 36(Suppl 2):T164–T173
- Garrison KA, Aziz-Zadeh L, Wong SW, Liew SL, Winstein CJ (2013) Modulating the motor system by action observation after stroke. *Stroke* 44(8):2247–2253
- Ertelt D, Hemmelmann C, Dettmers C, Ziegler A, Binkofski F (2012) Observation and execution of upper-limb movements as a tool for rehabilitation of motor deficits in paretic stroke patients: protocol of a randomized clinical trial. *BMC Neurol* 12:42
- Franceschini M, Ceravolo MG, Agosti M, Cavallini P, Bonassi S, Dall'Armi V et al (2012) Clinical relevance of action observation in upper-limb stroke rehabilitation: a possible role in recovery of functional dexterity. A randomized clinical trial. *Neurorehabil Neural Repair* 26(5):456–462
- Caspers S, Zilles K, Laird AR, Eickhoff SB (2010) ALE meta-analysis of action observation and imitation in the human brain. *Neuroimage* 50(3):1148–1167
- Vry MS, Saur D, Rijntjes M, Umarova R, Kellmeyer P, Schnell S et al (2012) Ventral and dorsal fiber systems for imagined and executed movement. *Exp Brain Res* 219(2):203–216
- Jeannerod M, Decety J (1995) Mental motor imagery: A window into the representational stages of action. *Curr Opin Neurobiol* 5(6):727–732
- Malouin F, Jackson PL, Richards CL (2013) Towards the integration of mental practice in rehabilitation programs. A critical review. *Front Hum Neurosci* 7:576
- Liu KP, Chan CC, Lee TM, Hui-Chan CW (2004) Mental imagery for promoting relearning for people after stroke: A randomized controlled trial. *Arch Phys Med Rehabil* 85(9):1403–1408
- Liu KP, Chan CC, Wong RS, Kwan IW, Yau CS, Li LS et al (2009) A randomized controlled trial of mental imagery augment generalization of learning in acute poststroke patients. *Stroke* 40(6):2222–2225
- Page SJ, Levine P, Leonard A (2007) Mental practice in chronic stroke: results of a randomized, placebo-controlled trial. *Stroke* 38(4):1293–1297
- Page SJ, Dunning K, Hermann V, Leonard A, Levine P (2011) Longer versus shorter mental practice sessions for affected upper extremity movement after stroke: A randomized controlled trial. *Clin Rehabil* 25(7):627–637
- Riccio I, Iolascon G, Barillari MR, Gimigliano R, Gimigliano F (2010) Mental practice is effective in upper limb recovery after stroke: A randomized single-blind cross-over study. *Eur J Phys Rehabil Med* 46(1):19–25
- Park JH, Park JH (2016) The effects of game-based virtual reality movement therapy plus mental practice on upper extremity function in chronic stroke patients with hemiparesis: A randomized controlled trial. *J Phys Ther Sci* 28(3):811–815
- Braun SM, Beurskens AJ, Kleynen M, Oudelaar B, Schols JM, Wade DT (2012) A multicenter randomized controlled trial to compare subacute „treatment as usual“ with and without mental practice among persons with stroke in Dutch nursing homes. *J Am Med Dir Assoc* 13(1):85.e1–85.e7
- Schuster C, Butler J, Andrews B, Kischka U, Ettlin T (2012) Comparison of embedded and added motor imagery training in patients after stroke: Results of a randomised controlled pilot trial. *Trials* 13:11
- Ietswaart M, Johnston M, Dijkerman HC, Joice S, Scott CL, MacWalter RS et al (2011) Mental practice with motor imagery in stroke recovery: Randomized controlled trial of efficacy. *Brain* 134(Pt 5):1373–1386
- Timmermans AA, Verbunt JA, van Woerden R, Moenekens M, Pernot DH, Seelen HA (2013) Effect of mental practice on the improvement of function and daily activity performance of the upper extremity in patients with subacute stroke: A randomized clinical trial. *J Am Med Dir Assoc* 14(3):204–212
- Oostra KM, Oomen A, Vanderstraeten G, Vingerhoets G (2015) Influence of motor imagery training on gait rehabilitation in sub-acute stroke: A randomized controlled trial. *J Rehabil Med* 47(3):204–209
- Braun S, Kleynen M, van Heel T, Kruihof N, Wade D, Beurskens A (2013) The effects of mental practice in neurological rehabilitation; a systematic review and meta-analysis. *Front Hum Neurosci* 7:390
- Lohse KR, Lang CE, Boyd LA (2014) Is more better? Using metadata to explore dose-response relationships in stroke rehabilitation. *Stroke* 45(7):2053–2058
- Wright DJ, Williams J, Holmes PS (2014) Combined action observation and imagery facilitates corticospinal excitability. *Front Hum Neurosci* 8:951
- Wondrusch C, Schuster-Amft C (2013) A standardized motor imagery introduction program (MIIP) for neuro-rehabilitation: Development and evaluation. *Front Hum Neurosci* 7:477
- Olsson CJ, Nyberg L (2010) Motor imagery: If you can't do it, you won't think it. *Scand J Med Sci Sports* 20(5):711–715
- Welfringer A, Leifert-Fiebach G, Babinsky R, Brandt T (2011) Visuomotor imagery as a new tool in the rehabilitation of neglect: A randomised controlled study of feasibility and efficacy. *Disabil Rehabil* 33(21–22):2033–2043
- Leifert-Fiebach G, Welfringer A, Babinsky R, Brandt T (2013) Motor imagery training in patients with chronic neglect: A pilot study. *NeuroRehabilitation* 32(1):43–58
- Di Rienzo F, Collet C, Hoyek N, Guillot A (2014) Impact of neurologic deficits on motor imagery: A systematic review of clinical evaluations. *Neuropsychol Rev* 24(2):116–147
- Liepert J, Greiner J, Nedelko V, Dettmers C (2012) Reduced upper limb sensation impairs mental chronometry for motor imagery after stroke: Clinical and electrophysiological findings. *Neurorehabil Neural Repair* 26(5):470–478
- Dettmers C, Benz M, Liepert J, Rockstroh B (2012) Motor imagery in stroke patients, or plegic patients with spinal cord or peripheral diseases. *Acta Neurol Scand* 126(4):238–247
- Liepert J, Greiner J, Dettmers C (2014) Motor excitability changes during action observation in stroke patients. *J Rehabil Med* 46(5):400–405
- Pfurtscheller G, Brunner C, Schlogl A, Lopes da Silva FH (2006) Mu rhythm (de)synchronization and EEG single-trial classification of different motor imagery tasks. *Neuroimage* 31(1):153–159
- Pichiorri F, Morone G, Petti M, Toppi J, Pisotta I, Molinari M et al (2015) Brain-computer interface boosts motor imagery practice during stroke recovery. *Ann Neurol* 77(5):851–865
- Boe S, Gionfriddo A, Kraeutner S, Tremblay A, Little G, Bardouille T (2014) Laterality of brain activity during motor imagery is modulated by the provision of source level neurofeedback. *Neuroimage* 101:159–167
- Christ O, Reiner M (2014) Perspectives and possible applications of the rubber hand and virtual hand illusion in non-invasive rehabilitation: Technological improvements and their consequences. *Neurosci Biobehav Rev* 44:33–44
- Grefkes C, Fink GR (2014) Connectivity-based approaches in stroke and recovery of function. *Lancet Neurol* 13(2):206–216
- Murase N, Duque J, Mazzocchio R, Cohen LG (2004) Influence of interhemispheric interactions on motor function in chronic stroke. *Ann Neurol* 55(3):400–409
- Takeuchi N, Oouchida Y, Izumi S (2012) Motor control and neural plasticity through interhemispheric interactions. *Neural Plast* 2012:823285
- Chiew M, LaConte SM, Graham SJ (2012) Investigation of fMRI neurofeedback of differential primary motor cortex activity using kinesthetic motor imagery. *Neuroimage* 61(1):21–31
- Mihara M, Hattori N, Hatakenaka M, Yagura H, Kawano T, Hino T et al (2013) Near-infrared spectroscopy-mediated neurofeedback enhances efficacy of motor imagery-based training in poststroke victims: A pilot study. *Stroke* 44(4):1091–1098
- Pfurtscheller G, Lopes da Silva FH (1999) Event-related EEG/MEG synchronization and desynchronization: basic principles. *Clin Neurophysiol* 110(11):1842–1857
- McFarland DJ, Miner LA, Vaughan TM, Wolpaw JR (2000) Mu and beta rhythm topographies during motor imagery and actual movements. *Brain Topogr* 12(3):177–186
- Lotte F, Larrue F, Muhl C (2013) Flaws in current human training protocols for spontaneous Brain-Computer Interfaces: Lessons learned from instructional design. *Front Hum Neurosci* 7:568
- Zich C, Debener S, Kranczioch C, Bleichner MG, Gutberlet I, De Vos M (2015) Real-time EEG feedback during simultaneous EEG-fMRI identifies the cortical signature of motor imagery. *Neuroimage* 114:438–447
- Wilson M (2002) Six views of embodied cognition. *Psychon Bull Rev* 9(4):625–636
- Botvinick M, Cohen J (1998) Rubber hands „feel“ touch that eyes see. *Nature* 391(6669):756
- Tsakiris M (2010) My body in the brain: A neurocognitive model of body-ownership. *Neuropsychologia* 48(3):703–712
- Perez-Marcos D, Slater M, Sanchez-Vives MV (2009) Inducing a virtual hand ownership illusion

- through a brain-computer interface. *Neuroreport* 20(6):589–594
51. Alimardani M, Nishio S, Ishiguro H (2013) Humanlike robot hands controlled by brain activity arouse illusion of ownership in operators. *Sci Rep* 3:2396
 52. Ono T, Kimura A, Ushiba J (2013) Daily training with realistic visual feedback improves reproducibility of event-related desynchronisation following hand motor imagery. *Clin Neurophysiol* 124(9):1779–1786
 53. Caspar EA, De Beir A, Magalhaes De Saldanha Da Gama PA, Yernaux F, Cleeremans A, Vanderborght B (2015) New frontiers in the rubber hand experiment: when a robotic hand becomes one's own. *Behav Res Methods* 47(3):744–755
 54. Spychala N, Bongartz E, Braun N, Debener S (2016) Towards free robotic hand control with EEG motor imagery. *Mind, Brain and Body Symposium*, Berlin.
 55. Ramachandran VS, Altschuler EL (2009) The use of visual feedback, in particular mirror visual feedback, in restoring brain function. *Brain* 132(Pt 7):1693–1710
 56. Klomjai W, Lackmy-Vallee A, Roche N, Pradat-Diehl P, Marchand-Pauvert V, Katz R (2015) Repetitive transcranial magnetic stimulation and transcranial direct current stimulation in motor rehabilitation after stroke: An update. *Ann Phys Rehabil Med* 58(4):220–224
 57. Zrenner C, Ziemann U (2015) Therapeutic applications of closed-loop brain stimulation. Success and expectations. *Nervenarzt* 86(12):1523–1527
 58. Kraus D, Naros G, Bauer R, Leao MT, Ziemann U, Gharabaghi A (2016) Brain-robot interface driven plasticity: Distributed modulation of corticospinal excitability. *Neuroimage* 125:522–532
 59. Brauchle D, Vukelic M, Bauer R, Gharabaghi A (2015) Brain state-dependent robotic reaching movement with a multi-joint arm exoskeleton: Combining brain-machine interfacing and robotic rehabilitation. *Front Hum Neurosci* 9:564
 60. Ono T, Mukaino M, Ushiba J (2013) Functional recovery in upper limb function in stroke survivors by using brain-computer interface A single case A-B-A-B design. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc* 2013:265–268