

**Aus dem Institut für Medizinische Psychologie
der Universität Tübingen
Direktor: Professor Dr. N. Birbaumer**

**Neurophysiologische Korrelate beim mentalen
Training motorischer Bewegungen: Ein
Vergleich zwischen professionellen Musikern
und Amateuren**

**Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Humanwissenschaften**

**der Medizinischen Fakultät
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen**

**vorgelegt von
Gabriela Scheler, geb. Moster**

**aus
Mainz
2004**

Dekan: Professor Dr. C. D. Claussen

1. Berichterstatter: Professor Dr. N. Birbaumer

2. Berichterstatter: Professor Dr. Ch. Gerloff

Für Sebastian und Elisabeth

Inhaltsangabe

Abkürzungen.....	6
1. Einleitung	7
2. Theorie	10
2.1. Motorisches Lernen	10
2.1.1. Grundlagen motorischen Lernens	10
2.1.2. Lernphasen bei Musikern.....	16
2.1.3. Aufgaben der linken Hand	19
2.2. Mentales Training	21
2.2.1. Begriffsbestimmung	21
2.2.2. Effektivität mentalen Trainings	22
2.2.3. Neurophysiologische Korrelate mentalen Trainings	26
2.3. Ergebnisse der Vorstudie	33
2.4. Bildgebung mit Magnetresonanztomographie	35
2.4.1. Kernspintomographie.....	35
2.4.2. Funktionelle Kernspintomographie	35
3. Hypothesen.....	37
4. Methode	38
4.1. Probanden	38
4.2. Musikalische Aufgabe.....	39
4.3. Messung	39
4.3.1. fMRI	39
4.3.2. Statistische Auswertung	40
4.4. EMG	41
4.5. Psychophysische Befragung	42
5. Ergebnisse.....	43
5.1. Ergebnisse der Aktivierungskarten.....	43

5.1.1.	Aktivierungen	43
5.1.2.	Deaktivierungen.....	43
5.1.3.	Masking zwischen den Gruppen.....	43
5.1.4.	Vorgestellte versus ausgeführte Bewegung	44
5.1.5.	Ausgeführte versus vorgestellte Bewegung	44
5.2	EMG – Messung	45
5.3	Ergebnisse der psychophysischen Befragung	45
5.4.	Tabellen	47
5.5.	Abbildungen	57
6.	Diskussion	62
6.1.	Primäre motorische Areale	65
6.2.	Sekundäre motorische Areale	66
6.3.	Zerebellum	67
6.4.	Auditorischer Kortex.....	69
6.5.	Parietallappen	71
6.6.	Frontallappen.....	72
6.7.	Basalganglien	74
6.8.	Schlussfolgerung	74
7.	Zusammenfassung	76
8.	Literatur	78
	Danksagung	86
	Lebenslauf	87

Abkürzungen

M1	primärer motorischer Kortex
S1	primärer sensorischer Kortex
c	kontralateral
i	ipsilateral
PMC	Prämotorischer Kortex
SMA	Supplementär motorisches Areal
CG	Gyrus zinguli
PC	Parietaler Kortex
PFC	Präfrontaler Kortex
A1	Primärer akustischer Kortex
BA	Brodmann Areal
MRI/MRT	Magnet-Resonanz-Imaging/Tomographie, Kernspintomographie
fMRI	Funktionelle Kernspintomographie
MEG	Magnetenzephalographie
PET	Positronen-Emissions-Tomographie
TMS	Transkranielle Magnetstimulation
rCBF	regional cerebral blood flow, regionale zerebrale Durchblutung
BOLD-Effekt	Blood Oxygenation Level Dependend Effect
VAS Skala	Visuelle Analog Skala
IM	imagined movement, vorgestellte Bewegung
EM	executed movement, ausgeführte Bewegung

1. Einleitung

Musizieren mit einem Instrument beinhaltet eine Reihe expliziter und impliziter Lernvorgänge, die eine sichere Verknüpfung von akustischen Vorstellungen (Töne, Rhythmen, Klangfarben und Harmonien) mit Bewegungen (Sequenzierung der Fingerbewegungen, bimanuale Koordination etc.) bedingen. Lesen und Speichern des Notentextes sowie die Interpretation der musikalischen Anforderungen sind die expliziten Vorgänge beim Erlernen eines Musikstückes. Der implizierte Lernprozess umfasst das Umsetzen des Notentextes in motorische Bewegungsabläufe.

Beim Instrumentalunterricht werden neue Bewegungen durch Beobachtungslernen, Wiederholen, Erweiterung der Bewegungsmuster und deren Kombinationen unter ständigem auditiven, visuellen und sensomotorischen Feedback gelernt. Die motorischen Anforderungen beim Instrumentalspiel umfassen ein Maximum an räumlicher Genauigkeit, zeitlicher Prägnanz, feinsten Kraftabstufung und hoher Geschwindigkeit der Bewegungsabläufe sowie deren präzise Koordination (Klöppel 2003). Bei längeren Trainingszeiten entstehen im Laufe der Zeit überlernte Bewegungsmuster, die zunehmend automatisierte Anteile enthalten.

Das musikalische praktische Üben mit dem Instrument kann durch mentales Training ergänzt werden. Unter mentalem Training versteht man das Erlernen und Verbessern eines Bewegungsablaufs durch intensives Vorstellen ohne das gleichzeitig tatsächlich sichtbare Vollziehen dieses Bewegungsablaufes (Volpert 1976). Mentales Training ist das Ergebnis eines bewussten Zugriffs auf die Repräsentation einer Bewegungsintention, die normalerweise unbewusst stattfindet (Jeannerod 1995). Es aktiviert ähnliche, sich überlappende neuronale Netzwerke, die auch bei der Ausführung von Bewegungen aktiviert sind (Lotze et al. 1999), und ist mit der ausgeführten Bewegung weitgehend funktionell äquivalent (Jeannerod et al. 1994). Daher ist mentales Training geeignet, Kontrolle über normalerweise größtenteils unbewusst ablaufende Einzelheiten

einer Bewegung zu erwerben. Je mehr das zu Übende bereits bekannt und im Gedächtnis gespeichert ist, desto genauer kann mental trainiert werden.

Die positive Wirkung mentalen Trainings wurde empirisch zunächst durch Studien mit Sportlern nachgewiesen (Eberspächer 2002). Mentales Training wird bei Profisportlern häufig zur Vorbereitung von Wettkämpfen sowohl in Bezug auf das Bewegungslernen als auch auf die psychische Vorbereitung verwendet. Auch Musiker trainieren mental, jedoch ist es hier nicht üblich Üben und Proben mit dem Instrument als Training zu bezeichnen. Trotzdem wird der Ausdruck „Training“ in dieser Arbeit der Klarheit wegen verwendet. Sich mit dem zu spielenden Stück zu beschäftigen, einzelne Passagen immer wieder im Kopf durchzugehen oder sich die Konzertsituation vorzustellen sind allgemeine Bereiche der mentalen Vorbereitung. Konkrete mentale Trainingsübungen dagegen sind beispielsweise das Vorstellen von Abständen, die bei Lagenwechseln auf dem Griffbrett überwunden werden müssen oder feine Kraftabstufungen mit der Bogenhand für die Dynamik und Klangfarbe der Tongebung. Beide Trainingsformen dienen der motorischen und emotionalen Sicherheit in der Konzertsituation. Je größer die Erfahrung mit der Sportart oder mit dem Instrument desto häufiger wird mentales Training angewendet. Während es im Ausbildungskatalog der Konservatorien und Musikhochschulen (noch) nicht erwähnt wird, schildern viele professionelle Musiker das mentale Training als unverzichtbare Ergänzung des praktischen Übens. Das Üben am Instrument durch mentales Training jedoch völlig zu ersetzen wird nur wenigen Musikern möglich sein wie beispielsweise der Pianisten Walter Gieseking (Gieseking 1963) in seiner Biographie berichtet: *„Jedes komplizierte Werk lerne ich aber nicht am Instrument, sondern nur lesend. Ebenso repetiere ich länger nicht gespielte Werke, indem ich diese, mit dem Notenbuch in greifbarer Nähe, im Gedächtnis ablaufen lasse, wobei zur Erleichterung der Kontrolle die Finger, die jeweils zu spielen hätten, andeutungsweise bewegt werden können. Hierdurch werden die vom Kopf (von der musikalischen Vorstellung) ausgehenden Impulse sozusagen durchprobiert, um festzustellen, ob die Übertragung in die Finger einwandfrei funktioniert.“*

In dieser Studie werden die neuronalen Aktivierungsmuster von professionellen Geigern während mentalen Trainings mit denen weniger gut ausgebildeter Amateurgeiger mittels funktioneller Kernspintomographie (fMRI) verglichen. Beide Gruppen haben gleiche Bewegungen am Instrument gelernt, allerdings unterschiedlich lang. Studien zur Neuroplastizität haben gezeigt, dass langjähriges motorisches Training sich kortikal sowohl auf struktureller (Schlaug et al. 1995; Amunts et al. 1996) als auch auf funktioneller Ebene (Elbert et al. 1995; Pantev et al. 1998; Pantev et al. 2001) manifestiert. Da professionelle Musiker von früher Jugend an über viele Jahre hinweg mit ihrem Instrument arbeiten ist zu erwarten, dass bei ihnen das Vorstellen oft geübter Bewegungsmuster im kortikalen Netz funktional und strukturell anders repräsentiert ist als bei den Amateuren.

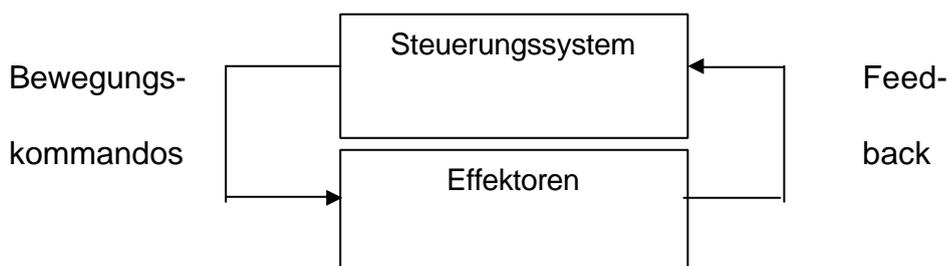
Mental trainiert wurde das Vorstellen der Bewegungen der linken Hand, die für das Spielen der ersten 16 Takte des Violinkonzertes in G-Dur von W. A. Mozart (KV 216) nötig sind. In einer Vorstudie wurden die Aktivierungskarten der gleichen Gruppen bei der Aufgabe verglichen, diese 16 Takte mit der linken Hand analog zu den Bewegungen auf dem Griffbrett der Violine zu tappen. Nachdem das Tappen auf dem Brustkorb beherrscht wurde, folgte der Teil des mentalen Trainings. Die neurophysiologischen Korrelate des Gehirns bei beiden Bedingungen wurden im Kernspintomographen aufgezeichnet. Danach wurden anhand einer visuellen Analog Skala (VAS) die Gruppen befragt, welche Bereiche des mentalen Übens besonders lebhaft vorgestellt worden waren. Mit einem a - posteriori Fragebogen wurde bei den Profis zwei Wochen nach der Studie erfasst, welche Komponenten des Übens von ihnen normalerweise mental trainiert werden. Es wurde erwartet, dass beim mentalen Üben komplexer motorischer Aufgaben ähnliche neuronale Strukturen aktiviert werden wie bei der Ausführung der Bewegung, dass es Unterschiede in den aktivierten Arealen bei Profis und Amateuren gibt und dass die Profis beim mentalen Üben die Musik innerlich mithören, also eine Koaktivierung im auditorischen Kortex zeigen.

2. Theorie

2.1 Motorisches Lernen

2.1.1. Grundlagen motorischen Lernens

Motorisches Lernen bezieht sich auf die Fähigkeit, sich die für eine bestimmte Bewegung charakteristischen zeitlichen und räumlichen Muster sowie deren Abfolge anzueignen, so dass deren Ausführung zunehmend durch vorprogrammierbare Prozesse charakterisiert ist. Es setzt weiterhin die Fähigkeit voraus, aus einer Vielzahl möglicher Bewegungen diejenige auszusuchen, die in einer bestimmten Situation benötigt wird, sowie eine Bewegung einer neuen externen Situation anzupassen. Der Prozess des motorischen Lernens gestaltet sich unter ständigem sensomotorischen, visuellen und auditorischem Feedback im Sinne eines „Closed Loop“ Systems, wie es von J. A. Adams (Adams 1971) nach der „Open Loop“ Vorlage von W. James (1890) vorgeschlagen wurde: die Rückmeldung aus der Bewegung ist maßgeblich für die Steuerung dieser Bewegung.



Lernprozesse sind Ausdruck neuronaler Plastizität. Was gelernt wird muss in der Struktur, die diesen Lernprozeß ermöglicht, kodiert werden. Folglich führen Lernprozesse im Gehirn zu Veränderungen von Strategien der Informationsverarbeitung, von Kodierungseigenschaften einzelner Neurone und Um- oder Reorganisationsprozessen von motorischen Repräsentationen. Auf makroskopischer Ebene vollzieht sich motorisches Lernen durch Veränderungen der synaptischen Verbindungen kortikal und subkortikal

verzweigter Neuronenpopulationen, d.h. durch systematische Verstärkung der Verbindung zwischen neuronalen Netzwerken. Grundlage solcher Annahmen basieren auf der Aussage von Hebb (Hebb 1949), dass die Verschaltung funktioneller neuronaler Einheiten durch häufige gemeinsame Aktivierung verstärkt werden (Bliss and Lomo 1973).

Das Erlernen von Bewegungen geschieht nach Anderson (Anderson 1996) implizit in drei Phasen: in der kognitiven, der assoziativen und der autonomen Phase. In der ersten Phase des Bewegungslernens versucht der Anfänger über kognitive Strategien die Elemente einer Bewegung zu erfassen, die zunächst auf einfache Parameter reduziert wird. Nicht alle Möglichkeiten einer Bewegung werden erkannt und die Anzahl der Freiheitsgrade, welche die Variierbarkeit einer Bewegung beschreiben (Bernstein 1967), kann nicht ausgeschöpft werden. Die Integration sensorischen Feedbacks ist zu Beginn von zentraler Bedeutung. In der assoziativen Phase wird die sensomotorische Kopplung gefestigt. Die Zusammenhänge der verschiedenen Komponenten einer Bewegung werden erkannt, die Dynamik und Möglichkeiten der Bewegungsausführung ins Lernen einbezogen. In der autonomen dritten Phase konsolidiert sich die sensomotorische Kopplung. Bewegungselemente werden automatisiert und die Aufmerksamkeit kann sich auf größere Zusammenhänge richten. Bei automatisierter Bewegungsausführung werden Teile von Bewegungsmustern zu einem spontan ablaufenden Vorgang, der nicht mehr direkt vom Bewusstsein kontrolliert wird. So stellt sich durch motorisches Training ein Übergang von ursprünglich vorrangig aufmerksam kontrollierten, angestregten, störanfälligen und fehlerhaft koordinierten Bewegungen zu einer weitgehend automatischen, störresistenten, variabel verfügbaren und gut koordinierten Motorik ein.

Motorisches Lernen kann sich über zunehmend komplexe Bewegungssubroutinen bis hin zu virtuosen Fertigkeiten, wie dem instrumentalen Musizieren, entwickeln. Kaum eine andere Berufsgruppe wie die professioneller Musiker beginnt so früh und intensiv mit einer kognitiven und motorischen Spezialisierung. Da sich musikalisches Training über viele Jahrzehnte erstreckt, um ein professionelles Leistungsniveau zu erreichen, führt

es zu besonderen neuroanatomischen und neurophysiologischen Anpassungsprozessen (Jancke 2002). In bildgebenden Studien konnte gezeigt werden, dass der Erwerb der komplexen motorischen Fertigkeiten in Gehirnen von Musikern zu Veränderungen der Repräsentationen sowohl struktureller als auch funktioneller Art führen. Händigkeitsrelevante Struktur-Funktionsbeziehungen werden beispielsweise von Amunts und Kollegen in einer Studie mit professionellen rechtshändigen Musikern untersucht (Amunts et al. 1996). Sie fanden mittels anatomischer MRT-Messung eine reduzierte Links-Rechts Asymmetrie der posterioren Wand des Sulcus centralis als Ausdruck einer Vergrößerung des motorischen Handareals der nicht-dominanten Hemisphäre. Dieses Areal ist bei rechtshändigen Nicht-Musikern stark asymmetrisch zugunsten der dominanten Hand ausgebildet. Langjährige Übung der Feinmotorik führt offenbar zu einer Veränderung der Größe der Handregionen in den primären motorischen Arealen. Diese Resultate korrespondieren mit Ergebnissen einer Studie von Elbert und Kollegen, die mittels Magnetenzephalographie (MEG) nachwies, dass sich die kortikalen Repräsentationen der Greiffinger der linken Hand im primären somatosensorischen Kortex, gemessen an der Stärke des aktivierten Dipols, bei professionellen Geigern vergrößert darstellen im Vergleich zu einer Kontrollgruppe, aber auch im Vergleich der Repräsentation der Daumen derselben Hand (Elbert et al. 1995). Schlaug und Kollegen demonstrierten mittels kernspintomographischer Morphometrie, dass Musiker im Vergleich zu Nicht-Musikern ein signifikant vergrößertes Corpus callosum besitzen (Schlaug et al. 1995). Die Vergrößerung betrifft den vorderen Anteil des Balkens, der vor allem die Faserverbindungen enthält, die die motorischen und prämotorischen Areale beider Hemisphären verbinden. Die funktionelle Beanspruchung der bimanuellen Koordination beim Klavierspielen mit dem notwendigen schnellen Informationsaustausch zwischen rechts und links führt zu einer Verstärkung der Bemerkung der Fasern, was in einer schnelleren Nervenleitfähigkeit resultiert.

Karni und Kollegen zeigten mittels fMRI, dass sich die kortikale Repräsentation einer trainierten Fingertapping-Sequenz in M1 vergrößert darstellt (Karni et al. 1998). Sie betonen, dass sich nicht die Repräsentation der Hand vergrößert

darstellt, sondern die Repräsentation der trainierten Bewegung, da durch das Üben zusätzliche Neurone des primären motorischen Areals für die Aufgabe herangezogen würden. Gerloff und Kollegen untersuchten mittels repetitiver TMS die Funktion des motorischen Kortex bei simplen und komplexen Fingerbewegungen und fanden die Erregbarkeits-Schwelle der Neurone des primären motorischen Kortex bei komplexen Bewegungen erniedrigt (Gerloff et al. 1998). Sie schlossen daraus, dass M1 nicht nur eine exekutive Rolle spielt, sondern auch bei der Organisation von Bewegungssequenzen beteiligt ist. Hund-Georgiadis und von Cramon, die mittels fMRI die erfahrungsabhängigen kortikalen Veränderungen bei Pianisten und Nicht-Musikern untersuchten, berichten während des Lernprozesses bei Pianisten im Vergleich zu Nicht-Musikern höhere Aktivität im kontralateralen M1 (Hund-Georgiadis and von Cramon 1999). Nach ihren Daten aktivieren die Pianisten schon während eines frühen Trainingsstadiums größere Teile von M1 und diese erweiterte M1-Aktivierung zeigte sich während der gesamten Lernphase.

Erfahrung vermindert den Beitrag sekundär motorischer Areale an einer komplexen Bewegung. Dass nach intensivem Training weniger Anstrengung für gut gelernte Bewegungen aufgewendet werden muss, zeigt eine fMRI-Studie von Krings und Kollegen, die bei Pianisten im Vergleich zu Nicht-Musikern während komplexer Fingerübungen am Klavier signifikant verringerte Aktivität im supplementär motorischen Areal und dem prämotorischen Kortex feststellten (Krings et al. 2000). Sie interpretierten die insgesamt verminderte Anzahl aktivierter Voxel in den sekundären Arealen bei Pianisten dahingehend, dass Pianisten bei gleichen Bewegungen insgesamt weniger Neurone aktivieren als Nicht-Pianisten, da die zu spielenden Tonfolgen von Pianisten als weniger komplex empfunden werden, obwohl ihr Vortrag schneller und besser war als der der Nicht-Musiker. Komplexe Bewegungen aktivieren auch den ipsilateralen M1/S1, vor allem wenn sie durch die nicht dominante linke Hand ausgeführt werden (Kim et al. 1993). So zeigten Chen und Kollegen, dass durch repetitive TMS im Bereich des ipsilateralen M1 komplexe Fingerbewegungen, besonders der linken Hand, gestört werden (Chen et al. 1997). Shibasaki und Kollegen untersuchten mittels PET komplexe und einfache Tappingsequenzen und

fanden signifikante Durchblutungserhöhungen bei komplexen Bewegungen sowohl in der SMA als auch im ipsilateralen M1/S1 (Shibasaki et al. 1993). Diese Ergebnisse konnten von Lotze und Kollegen mittels fMRI bestätigt werden (Lotze et al. 2000). Sie untersuchten die neuronale Aktivität bei zunehmend komplexen Fingerbewegungen und fanden bei steigender Komplexität der Anforderungen steigende Aktivierung in der SMA, dem PMC und dem ipsilateralen M1. Professionelle Pianisten hingegen zeigen im Vergleich zu Nicht-Musikern weniger Aktivierung im ipsilateralen primären motorischen Kortex (iM1) und sekundären motorischen Arealen beim Ausführen unterschiedlich komplexer Fingerbewegungen (Hund-Georgiadis and von Cramon 1999; Jancke et al. 2000). Die Autoren nehmen an, dass die Musiker einen effektiveren und ökonomischeren Umgang mit ihrem Instrument gelernt haben und dadurch Kapazitäten für andere musikalische Anforderungen frei werden.

Mit einer größeren Trainingserfahrung beginnt die Beteiligung des präfrontalen Kortex zu sinken, der besonders in frühen Phasen des Lernens aktiviert ist (Sakai et al. 1998a). Pascual-Leone und Kollegen berichten über einen Rückgang der präfrontalen Aktivierung beim Erlernen eines Klavierstückes über fünf Tage (Pascual-Leone et al. 1995). Präfrontale Aktivierung wurde während motorischen Lernens in frühen Phasen beobachtet, nicht aber beim Ausführen trainierter Bewegungen (Deiber et al. 1997; Jueptner et al. 1997a; Jueptner et al. 1997b). Geübte Bewegungen werden mit Aktivierungen im parietalen Kortex verbunden (Sadato et al. 1996; Sakai et al. 1998a) und insbesondere ist der superiore Parietallappen zuständig für das Gedächtnis von Bewegungstrajektorien (Seitz et al. 1997). Shadmehr und Holcomb beschreiben eine Verschiebung der aktivierten Areale während motorischen Lernens von den präfrontalen Arealen hin zum PMC (BA 6), dem superioren posterioren Parietallappen (BA 7) und zum Zerebellum in einem Zeitraum von 6 Stunden nach Beendigung des Trainings (Shadmehr and Holcomb 1997). Die neuronale Repräsentation dieses internalen Bewegungsmodells scheint nach dieser Zeitspanne stabil zu bleiben. Dagegen konnten Penhune & Doyon in einer PET-Studie zeigen, dass sich bei weiterführendem Training in einem Zeitraum bis zu

vier Wochen die Aktivität im Zerebellum verringerte, die zu Beginn die Feinabstimmung der Bewegung in Bezug zum sensomotorischen Feedback widerspiegelte und die bei überlernten Bewegungen nicht mehr benötigt wird (Penhune and Doyon 2002). Die Verringerung der zerebellären Aktivität im Laufe des Lernprozesses wird begleitet von einer Aktivierungssteigerung in den Basalganglien (Doyon et al. 1996). So kann angenommen werden, dass während früher Phasen motorischen Lernens ein zerebellär-kortikales Netzwerk aktiviert ist, während bei der trainierten Bewegung eher ein striato-kortikales (Doyon et al. 2002) involviert ist.

Instrumentales Musizieren besteht aus sehr komplexen Bewegungsmustern, deren Niveau sich nur durch kontinuierliches Üben halten lässt. Diese Bewegungsmuster werden nicht nur durch motorische Befehle gesteuert, sondern auch durch eine auditive Vorstellung der geplanten Melodie. Die Bewegungen für die zu spielenden Töne werden durch inneres Voraushören antizipiert. Wenn der Ton dann erklingen ist, kontrolliert das Ohr, ob er so klingt, wie dies geplant war. Bangert und seine Kollegen untersuchten die Koaktivierung auditorischer und motorischer Kortexareale bei Pianisten und Anfängern mittels EEG (Bangert et al. 2001). Erstaunlicherweise konnten auch bei den Anfängern schon nach der ersten Erfahrung mit dem Klavier aufmerksamkeitsabhängige auditorisch-sensomotorische Koaktivierungsprozesse nachgewiesen werden. Bei den Berufspianisten war jedoch eine so starke Vernetzung von Hörarealen und Motorkortex vorhanden, daß auch die Reizung nur einer der beiden Strukturen ausreichte um die andere automatisch mitzuaktivieren. Bangert nimmt an, dass durch das jahrelange Training die Koaktivierung unbewußt auf der Ebene von Reflexen ausgelöst wird. Zu einem ähnlichen Ergebnis kamen Haueisen und Knösche bei einer MEG-Studie. Pianisten aktivierten beim Anhören eines oft gespielten Musikstückes unwillkürlich den kontralateralen primären motorische Kortex (Haueisen and Knosche 2001). Die Vorstellung einer bestimmten Lautstärke, Tonhöhe oder Artikulation ist beim professionellen Musiker mit einer genauen impliziten Vorstellung von Bewegung und Kraft verbunden. Je komplizierter die Anforderungen sind, je länger sie trainiert worden sind, desto fester sind

Bewegungsprogramme mit der Realisierung der Tonvorstellung verbunden. Die Fähigkeit, sowohl die erzeugten Töne über das Ohr objektiv kontrollieren zu können, als auch Töne bereits vorher innerlich hören zu können, macht einen wesentlichen Unterschied zwischen Profis und Amateuren aus.

2.1.2. Lernphasen bei Musikern

Unter musikalischen Gesichtspunkten wird in der kognitiven Phase eine deklarative Enkodierung der motorischen Aufgabe durchgeführt. Für das Erarbeiten einer Tonfolge auf der Geige bedeutet dies zunächst die Konzentration auf die visuelle Anforderung, d.h. Lesen der Noten und internes Hören als Voraussetzung für die Bewegungen, die zum Spielen des Instrumentes nötig sind. Motorisches Lernen in der Anfangsphase ist gekennzeichnet durch die bewusste Aufmerksamkeit und die Notwendigkeit von sensorischer Rückkopplung. Das Korrigieren der Bewegungen läuft in Form des closed-loop Systems ab, in dem ein Korrelat von motorischer und sensorischer Information gesucht wird. Das motorische Gedächtnis speichert vor allem die Rückmeldungen der Tiefensensibilität, des Tastsinns, des Gleichgewichtssinns, der Stellung der Gelenke zueinander, die Spannung der Muskulatur sowie die Bewegungsrichtung und -sequenzierung (Klöppel 2003). Zunächst werden noch zusätzliche Muskeln innerviert, die für die zielgerichtete Ausführung nicht notwendig wären, wobei es zu einer gegenseitigen Behinderung verschiedener Einzelaspekte von Bewegungsmustern kommt (Szende 1971). Mehrere funktional voneinander getrennte Abläufe sollen in eine Gesamtbewegung zusammenfließen, aber die vorhandenen Bewegungsmuster sind noch nicht ausreichend strukturiert, um den neuen Notentext zu spielen. Durch häufiges Wiederholen der Bewegungen wird eine Steigerung der Effizienz in der Bewegungsausführung angestrebt. Mit der Zeit werden immer mehr Bewegungsmuster im Repertoire gespeichert, auf welche dann beim Einüben einer neuen und komplexeren Bewegungssequenz zurückgegriffen werden kann. Die Aufmerksamkeit ist zunächst durch die verschiedenen Parameter, die zu beachten sind, überfordert, das Hören als nachträgliche Kontrolle und Feedback aus den gleichen Gründen ungenau und allgemein. In dieser

Lernphase ist das reale Üben wegen der größeren Deutlichkeit der Eindrücke dem mentalen überlegen. Trotzdem können kleine Bewegungseinheiten erfolgreich mental trainiert werden, um eine sich aus der anfangs behindernden Vielzahl von Anforderungen ergebende Überforderung zu umgehen.

In der assoziativen Phase werden Fehler und Störungen, die in der anfänglichen Bewegungsplanung auftraten, aufgedeckt. Mit zunehmenden Training verfestigt sich die intern errichtete und zunächst noch provisorische sensomotorische Kopplung. Um sich behindernde Teilbewegungen zu koordinieren und die Strukturierung der Bewegung in ihrer raum-zeitlichen Koordination flüssiger gestalten zu können müssen die Bewegungen immer wieder auf der Basis der wahrgenommenen Fehler modifiziert werden. Dieser integrative Prozess benötigt ein Monitoring der internalen Repräsentation in Relation zum sensomotorischen und auditorischen Feedback. Die Aufmerksamkeit für gehörtes und gefühltes Spielen verfeinert sich durch die bessere Strukturierung der Teilbewegungen, und die Deutlichkeit der Wahrnehmung für den Ablauf nimmt zu (Mantel 1999). Der eingesetzte Kraftaufwand kann allmählich vermindert werden, da die Störung der einzelnen Teilbewegungen untereinander nachläßt und die überschüssige Innervierung der für den Bewegungsablauf nicht benötigten Muskeln verringert wird (Szende 1971). In dieser Phase werden mit verschiedenen Übungsmethoden die Bewegungsmuster variiert und wiederholt, bis die Aufmerksamkeit und das Gehör alle Komponenten einer Bewegung erfassen können. Die Bewegungen werden vertrauter und das sensorische Feedback verliert an Bedeutung für die Bewegungsausführung (Deiber et al. 1997). Das Loslösen von der Notwendigkeit einer kontinuierlichen Detailkontrolle ist entscheidend für die Schnelligkeit einer Bewegung. Der Bewegungsablauf entwickelt und verbessert sich mit dem Ziel, zukünftige notwendige Bewegungen unbewusst vorzubereiten um bereits als Komponenten jetziger Bewegungen in Erscheinung zu treten. Erst wenn vor neuen Abschnitten keine bewussten Entscheidungen über den Fortlauf der Bewegungen getroffen werden müssen, kann von einem gelernten Ablauf gesprochen werden (Mantel 1999). Wenn in dieser Phase mental geübt wird, werden motorische Gedächtnislücken bemerkt,

die sich im allgemeinen Ablauf des Spielens durch Fehler wie beispielsweise unrhythmische Spiel, mangelnde Geschwindigkeit oder un schönen Klang bemerkbar machen. Diese Vorstellungslücken sind potentielle Fehlerquellen, wenn die Aufmerksamkeit beim Musizieren von der übergeordneten musikalischen Kontrolle auf fehlenden Details in der Bewegungsausführung gerichtet wird. Hier hat das mentale Üben die Funktion, den bisherigen Bewegungsablauf auf Schwachstellen zu überprüfen und die durch diese motorischen Gedächtnislücken entstehenden Fehler zu korrigieren. Durch das Loslösen von der Abhängigkeit eines dauernden sensorischen Feedbacks hat die Fähigkeit für ein genaues Bewegungsgefühl deutlich zugenommen und ermöglicht die Vorstellung komplexer Bewegungsabläufe im Detail. Der Vorteil des mentalen Übens ist die Trennbarkeit einzelner Komponenten, die beim realen Spiel nicht möglich ist. Auch kann sich der Spielende ohne die Angst eines Misserfolgs vor einer noch nicht beherrschten Passage im Musikstück unbelasteter auf Einzelheiten konzentrieren.

In der autonomen Phase wird der Bewegungsablauf automatisiert. Die Teilbewegungen verschmelzen zu einem harmonischen Bewegungsablauf. Die Einzelheiten können subkortikalen Bewegungszentren überlassen werden (Vanecek 1994). Durch das unbewusste Delegieren motorischer Befehle an subkortikale Zentren wird die Dauer der Reizübertragung in den Nerven ganz wesentlich verkürzt (Grafton et al. 1992; Halsband 1992). Dann können Geschwindigkeiten erreicht werden, die zu schnell für die direkte Kontrolle sind. Die Reaktionszeit beim Menschen liegt bei 120 bis 180 Millisekunden. Bei einer Metronomzahl von 160 für Viertelnoten folgen Sechzehntel aber in einem Zeitabstand von weniger als 100 Millisekunden aufeinander (Klöppel 2003). Derartig schnelle Bewegungen können nicht durch fortwährende Kontrolle gelenkt werden, sondern müssen durch ein automatisiertes Bewegungsprogramm festgelegt sein.

Auch Rhythmus und Agogik (Möglichkeit der individuellen Gestaltung des Tempos beim Musizieren) verlangen stabilisierte Bewegungsmuster, da die Bewegungsabläufe in ein kontinuierliches und metrisch vorgegebenes Zeitmuster eingepasst werden müssen. Erst wenn die Bewegungsprogramme

automatisiert zur Verfügung stehen, ist genügend geistige Kapazität da, das Gespielte akustisch zu beurteilen, während gleichzeitig Bewegungen ausgeführt und andere geplant werden. In dieser Phase kann das mentale Üben das reale gut ergänzen und sogar ersetzen, da die Bewegungsmuster sowie die musikalische Interpretation vorhanden und gefestigt sind. Das mentale Üben erspart belastende Wiederholungen und trotz Fehlen des Klangs wird auf diese Weise objektiver und mit Distanz geübt (Mantel 1999). Auch emotional-physiologische Aspekte wie Nervosität und Lampenfieber können mental vorweggenommen und sinnvolle Strategien entwickelt werden, um die Situation zu bewältigen.

2.1.3. Aufgaben der linken Hand beim Geigen

Zwei grundsätzliche Aufgaben betreffen die linke Hand beim Geigen: das Greifen der Töne und das Vibrato. Alle anderen Bereiche der Technik beziehen sich auf die rechte Hand oder die Koordination beider Hände (Galamian 1983). Die Bewegungen der Finger bestehen darin, die Saiten der Geige durch viele fein differenzierte Berührungen so zu verkürzen, dass verschiedene Tonhöhen erklingen. Motorische und sensorische Elemente werden integriert und ergeben zusammen die Tonvorbereitung der linken Hand, die die rechte Hand durch die Bewegungen des Bogens in Töne verschiedener Dynamik, Artikulation und Klangfarbe umsetzt.

Folgende Bewegungen sind ein grundsätzlicher Teil dessen, was die linke Hand beim Geigen ausführt: Zeigefinger bis kleiner Finger (D2 bis D5) werden sequenziell oder in unregelmäßiger Folge auf das Griffbrett gesetzt; mit unterschiedlich viel Kraft werden die Saiten niedergedrückt (auf den tiefen Saiten und am Ende des Griffbretts mehr Kraft, für Flageolets (Def.: hohe Obertöne der Eigenschwingung der Saiten) fast ohne Druck); der Abstand der Finger zueinander ändert sich fortwährend; der Daumen bewegt sich opponierend in Zusammenhang mit den Bewegungen der anderen vier Finger; für Doppelgriffe oder Dreiklänge müssen gleichzeitig mehrere Finger auf die Saite aufgesetzt werden; Finger, Hand und Arm schwingen gemeinsam beim Vibrieren eines Tones; bei Lagenwechseln und sehr großen Intervallen werden

die Finger zusammen mit dem Arm bewegt; für jeden Tonwechsel müssen die Fingerbewegungen gestoppt werden, ohne die fließende Gesamtbewegung zu unterbrechen; beim Trillern repetieren Finger schnell.

Alle Bewegungen werden zeitlich abgestimmt, wobei der musikalische und der technische Ablauf zu unterscheiden sind. Der musikalische Ablauf bedeutet das Erklingen des Musikstückes in seiner rhythmischen Struktur und im gewünschten Tempo, der technische Ablauf das Ausführen der Bewegungen zu dem Zeitpunkt und in der Geschwindigkeit, die einen einwandfreien musikalischen Ablauf gewährleisten (Galamian, 1983). Die Beherrschung des ganzen Komplexes der zeitlichen Abstimmung ist abhängig von der Qualität der überlernten Bewegungsabfolgen, einer präzisen Reaktionsfähigkeit und des Wachheitsniveaus des Spielers. Je mehr ein Musiker imstande ist, diese komplexen Bewegungen mental ohne Gedächtnislücken zu trainieren, desto leichter wird ihm die Integration dieser Parameter fallen und desto mehr Bewegungsfolgen kann er zeitlich integrieren.

2.2. Mentales Training

2.2.1. Begriffsbestimmung

Der Begriff "Mentales Training" wird nicht einheitlich verwendet. Einerseits versteht man darunter Bewegungslernen durch Vorstellung, andererseits eine Form der Vorbereitung und Angstbewältigung vor Auftritten beziehungsweise Wettkämpfen. Für diese Arbeit ist nur das mentale Training als Form des motorischen Lernens von Bedeutung. Untersuchungen zum Mentalen Training, die sich auf das Bewegungslernen beziehen, stammen bereits aus den 30er Jahren des letzten Jahrhunderts und die Bezeichnung „mental practice“ ist mehr als 50 Jahre alt (Klöppel 1996)

Mentales Training wird als aktiver Prozess definiert, bei dem eine geistige Repräsentation von Bewegungen im Arbeitsgedächtnis internal produziert wird ohne die tatsächliche Ausführung der Bewegungen durch die Muskulatur (Decety and Grezes 1999). Es ist im weitesten Sinn eine Veränderung der Verhaltensmöglichkeiten, die - ohne dass eine Handlung durchgeführt wird - lediglich durch die verstandesmäßige Bearbeitung einer Aufgabe entsteht (Klöppel 1996).

Unter Training durch interne Realisation im Bereich des Leistungssportes versteht Volpert (Volpert 1976) alle Trainingsformen, bei denen die zu übende Tätigkeit auf höheren Regulationsebenen aktualisiert wird, ohne tatsächlich zur Ausführung zu kommen und ohne Gegenstand einer verbalen Kommunikation zu sein. Dieses Training gliedert sich bei Volpert in observatives (Training durch Beobachtung eines Modells) und mentales (Training durch Vorstellen). Das Vorstellen der Bewegung kann einmal in Form des subvokalen Trainings (mit sich selbst über eine Bewegungshandlung sprechen), zum anderen in Form eines versteckten Wahrnehmungstrainings (eine andere Person in der Ausführung einer Bewegungshandlung beobachten) oder als ideomotorisches Training (sich selbst in der Bewegungshandlung fühlen) erfolgen. Das ideomotorische Training wird auch internes oder kinästhetisches Training

genannt und unterscheidet sich vom externalen Training, bei dem sich die Person die Bewegung ausführen sieht (Jeannerod et al. 1994).

Nach Eberspächer (Eberspächer 2001) handelt es sich beim mentalen Training um das planmäßige, wiederholte, bewusste Sich-Vorstellen einer sportlichen Handlung ohne deren gleichzeitiger, praktischer Ausführung. Er ist der Auffassung, dass die Informationsverarbeitungsprozesse (denken, vorstellen, überlegen) regelmäßig und intensiv trainiert werden müssen, um über die Optimierung kognitiver Fertigkeiten das Handeln und die Bewegungsführung zu stabilisieren und zu verbessern.

Durch mentales Üben kann das Erlernen einer neuen Bewegung beschleunigt werden, weil ein passendes kognitives Modell der zu erlernenden Bewegung vor dem tatsächlichen Ausführen der Bewegung erstellt wird (Mendoza and Wichman 1978). Mentales Üben wird sowohl bei Sportlern (Suinn 1984; Denis 1985) als auch bei Musikern wie beispielsweise Vladimir Horowitz und Artur Rubinstein sehr geschätzt (Giesecking 1963; Schoenberg 1987).

2.2.2. Effektivität

Die Effektivität mentalen Trainings wird immer wieder betont (Decety and Ingvar 1990; Roure et al. 1999; Millard et al. 2001; Page et al. 2001). Die meisten quantifizierenden Erhebungen stammen aus der Sportpsychologie. Dort finden sich zahlreiche Arbeiten, die sich mit den Auswirkungen mentalen Trainings beschäftigen. Feltz und Landers (Feltz 1983) erhoben eine Metaanalyse von über 60 Studien, die bis dahin zum Thema „mentales Üben“ erschienen und die an 144 Personenstichproben sowie anhand unterschiedlichster Aufgabenstellungen durchgeführt worden waren. Die Ergebnisse konnten sie in vier schwerpunktmäßige Aussagen zusammenfassen:

- Mentales Training begünstigt grundsätzlich sowohl den Erwerb von Fertigkeiten, als auch deren anschließende Verbesserung, aber
- die Wirkung des Mentalen Trainings ist bei eher kognitiven Aufgaben stärker lern- und leistungssteigernd als bei eher motorisch-energetischen.

- Auch reichen für eine eher kognitive Aufgabe 5 bis 6 gedankliche Wiederholungen aus, für eher motorisch-energetische Aufgaben scheint die doppelte Anzahl mentaler Übungen erforderlich.
- Mentales Training kann "echtes" Training nicht ersetzen: Körperliches Training wirkt stärker als eine Kombination von körperlichem und mentalem Training, die Kombination wiederum wirkt stärker als ausschließlich mentales Training.

Seither wurde die Frage der Effektivität unter verschiedenen Gesichtspunkten immer wieder untersucht. Typische Studien unterstreichen anhand von Leistungsvergleichen die Erfolge mentalen Trainings (Lejeune et al. 1994). Eine Studie von Savoy & Beitel (Savoy 1996) untersuchte den Einfluss mentalen Trainings bei Basketballern während einer Spielsaison. Spiele ohne mentales Training (A) wurden gefolgt von Spielen mit mentalem Training (B) nach einem ABABAB Plan, bei dem mentales Training in der ideomotorischen Form nach der Anregung von Epstein (Epstein 1980) angewandt wurde. Die Spieler mussten in den Trainingsphasen mit mentalem Training vor den Wettkämpfen je 8 Würfe in den Korb zielen und sich dann dieselbe Anzahl der Würfe mental vorstellen. Die Trefferrate verbesserte sich von A- zu B-Spielen signifikant. Auch außerhalb des Sports wird die Effektivität des mentalen Trainings an Leistungsparametern untersucht. So führten Yagüez und seine Kollegen eine Studie durch, die Leistungssteigerung in Bezug auf Genauigkeit und Schnelligkeit von graphomotorischen Übungen erfasste (Yaguez et al. 1998). Probanden mussten einmal Piktogramme in verschiedenen Größen zeichnen und zum anderen Kreise miteinander verbinden. Eine Gruppe wurde angeleitet, sich eine Vorstellung von den Bewegungsfolgen zu machen, sich die für die Bewegungen benötigte Muskeln vorzustellen und die Bewegungen zu fühlen, die den Stift führen. Die andere Gruppe stellten sich die Bewegungen visuell vor, indem sie vor einem Spiegel sitzend die Bewegungen ausführten. Die Gruppe mit dem mentalen motorischen Training war nach 10 Minuten signifikant schneller und präziser als die Kontrollgruppe. Die Forscher folgerten daraus, dass mentales Üben bei räumlich-zeitlichen Aufgaben die Leistung verbessert und sich von visuellen Vorstellungsaufgaben unterscheidet.

Mehr Parameter wurden in einer Studie von Roure und Kollegen erhoben, bei der Volleyballspieler eine komplexe, zeitlich unbegrenzte motorische Aufgabe trainierten (Roure et al. 1998). Eine Gruppe übte zwischen den Aufgaben mental, die andere nicht. Während der Ausführung wurden autonome Parameter wie Herzfrequenz, Atmungsfrequenz und Hautwiderstand gemessen. Die gemessenen Parameter reagierten bei beiden Gruppen nach dem physischen und physischen/mental Training ähnlich, waren aber in der Gruppe mit mentalem Training bei besseren Leistungen in Amplitude und Frequenz niedriger. Die Autoren folgern, dass mentales Training bei komplexen Aufgaben ein Bewegungsschema zu erstellen hilft, das während der aktuellen Ausführung unbewusst verwendet werden kann.

Die Frage, ab wann mentales Trainings wirksam wird, untersuchten Weinberg und Kollegen (Weinberg 1991) durch unterschiedlich lange mentale Trainingszeiten vor und nach Basketballspielen. Es ergaben sich signifikante Verbesserungen in Bezug auf die Trefferrate ohne Unterschiede, ob ein-, fünf- oder zehn Minuten sowohl vor als auch nach dem Spiel mental trainiert wurde. Interessanterweise fanden sich keine Unterschiede zwischen den Gruppen, die entweder physisch oder physisch/ mental geübt hatten. Sie vermuten, dass bei den verwendeten schwierigeren Aufgaben längere mentale Trainingszeiten notwendig sind und aus diesem Grund keine Differenz der Trainingsgruppen signifikant wurde.

Ob die Wirksamkeit mentalen Trainings von längeren Trainingszeiten sowie der Vorerfahrung abhängig ist, konnten beispielsweise Gould und Kollegen (Gould 1993) bei einer Befragung von Olympia-Sportlern erheben. Sie erfuhren, dass erfolgreiche Olympia Sportler sich von ihren weniger erfolgreichen Kollegen nicht so sehr durch die Art der Strategien des mentalen Trainings unterschieden, sondern vor allem in dem Maß in dem diese Strategien gelernt und vertraut waren. Im Jahr 2002 befragten Cumming & Hall 159 Berufsathleten und engagierte Freizeitsportler nach der Inanspruchnahme mentalen Trainings (Cumming and Hall 2002). Die Profis verwendeten diese Technik signifikant öfter. Die Forscher folgerten, dass der Effekt des mentalen Trainings wahrscheinlich dann größer ist, je geübter die Bewegungsabläufe bereits sind.

Bei Musikern sind wenig Studien durchgeführt worden, die sich an der Leistungssteigerung als dem die Effektivität erfassenden Parameter orientieren. Eine davon wurde von der Pianistin Orloff-Tscherkorsky (Orloff-Tschekorsky T. 1996) in Zusammenarbeit mit der Sporthochschule in Köln durchgeführt. Sie trainierte Klavierstudenten über ein paar Wochen mental mit einem umfassenden Trainingsprogramm, das Entspannungstechniken und psychologische Programme zur Vorbereitung für das motorischen mentale Üben mit einschlossen. Ihre Studenten verbesserten ihre Leistungen hinsichtlich Schnelligkeit, Präzision und Treffsicherheit signifikant. Gemessen wurden diese Parameter über einen MIDI-Flügel. Bei diesem mit einer Abtastapparatur ausgestatteten Flügel werden unter anderem für jeden gespielten Ton Tonhöhe, Zeitpunkt vom Anfang und Ende und die Dynamik erfasst und als MIDI-Daten (*Musical Instruments Digital Interface*) einem Computer zugeleitet, wo sie zur weiteren Auswertung zur Verfügung stehen. In Abbildung 1 (S. 57) ist ein Notenbeispiel und eine Aufzeichnung des Klavierstückes „Reflets dans l'eau (Takt 25, 26) von Claude Debussy vor und nach mentalem Training gezeigt (Klöppel 1996), die die Effektivität der Trainingseinheit optisch sichtbar macht. Zusammenfassend folgert Orloff-Tscherkorsky aus ihren Erfahrungen, dass „die intensive Vorstellung von Bewegungsabläufen ohne deren praktische Ausführung eine Vertrautheit mit der Bewegung voraussetzt und in dieser Hinsicht die Vorwegnahme einer später ausgeführten Tätigkeit ist, die auf schon erworbenen Kenntnissen beruhen“. Die Vertrautheit mit den zu trainierenden Bewegungsmustern und die Erfahrung im mentalen Üben sind offenbar entscheidende Parameter, um eine maximale Wirkung des mentalen Übens erreichen zu können.

2.2.3. Neurophysiologische Korrelate

Motorische Vorstellung (IM; imagined movement) wird als aktiver Prozess definiert, während dem die neuronale Repräsentation einer bestimmten Bewegungsfolge internal aus dem Gedächtnis produziert wird ohne die dazugehörige motorische Bewegung (Decety and Grezes 1999). IM aktiviert ähnliche kortikale und subkortikale Areale, die auch bei der Bewegungsvorbereitung aktiviert sind (Decety et al. 1994). Bewegungsvorbereitung ist im Gegensatz zur Bewegungsvorstellung ein unbewußter Prozess. Erst wenn eine Bewegung nicht oder nicht zu Ende ausgeführt wurde, erreicht sie das Bewußtsein (Jeannerod et al. 1994). Jeannerod vermutet, dass bewusstes motorisches Training und unbewusste Bewegungsplanung gemeinsame Netzwerke aktivieren und funktionell verwandt sind. Mit Hilfe bildgebender Verfahren konnte eine große Überlappung aktivierter Areale bei ausgeführter Bewegung (EM; executed movement) und IM gezeigt werden (Beisteiner et al. 1995; Jeannerod and Decety 1995).

Ähnlichkeiten zwischen EM und IM konnten durch Zeitmessungen gezeigt werden. So brauchen normale Probanden für das mentale Ausführen einer bestimmten Bewegung genauso viel Zeit wie sie für die tatsächliche Ausführung benötigen (Jeannerod et al. 1994; Crammond 1997; Jeannerod and Frak 1999). Die Zeit Wege verschiedener Länge zu laufen entspricht der Zeit sie mental abzuschreiten. Bei der Erweiterung der Aufgabe durch das Tragen eines 25 kg schweren Rucksacks änderte sich die Zeit des tatsächlichen Gehens nicht, während sie bei der Vorstellung um 30% überschätzt wurde (Decety and Michel 1989). Mentale Bewegungsvorstellung unterliegt denselben Bedingungen, die durch das Gesetz von Fitts (Fitts 1954) definiert sind. Es definiert eine Beziehung zwischen Entfernung und Zeit, die besagt, dass die Zeit zu einem Ziel definierter Größe und die Zeit zu einem Ziel definierten Abstands entsprechende logarithmische Funktionen sind (Sirigu et al. 1995; Sirigu et al. 1996).

Auch vegetative Reaktionen, die mit physischer Anstrengung einher gehen, variieren bei mentalem Training ähnlich wie bei der Ausführung der

Bewegungen (Decety et al. 1991). Herz- und Atmungsfrequenz sowie CO₂-Druck wurden bei Probanden gemessen, die Beinbewegungen ausführten oder mental übten (Decety et al. 1993). Schon nach wenigen Sekunden ausgeführter respektive mentaler Übung stieg die Herzfrequenz verglichen zur Ruhebedingung bis zu 50% respektive 32% an. Die Atmungsfrequenz erhöhte sich nahezu ohne Verzögerung sowohl während der ausgeführten als auch der vorgestellten Bewegung bei trainierten Athleten (Wuyam et al. 1995). Diese Ergebnisse bestätigen, dass eine Veränderung physiologischer Parameter eher zentralen Faktoren zugeschrieben werden kann als metabolischen Veränderungen (Adams et al. 1987; Decety and Jeannerod 1995). Vegetative Aktivierung während der Vorbereitung für eine Aktion ist ein Teil des motorischen Programms, das mit zentraler motorischer Aktivierung beginnt und die kommenden metabolischen Veränderungen vorbereitet. Die Möglichkeit, dass diese autonomen Veränderungen die Konsequenz muskulärer Aktivität sind, konnten Decety und Kollegen durch eine Spektroskopie-Analyse ausschließen, die keine metabolischen Veränderungen in der Muskulatur während der motorischen Vorstellung zeigte (Decety et al. 1993).

Bildgebende Studien wiesen übereinstimmend Aktivierungen in der SMA und im prämotorischen Kortex (PMC; BA 6) während IM und EM nach (Stephan et al. 1995; Lotze et al. 1999). Neurone in der SMA sind bei der Bewegungsvorbereitung beteiligt, die mit der Bewegungsvorstellung große Ähnlichkeit aufweist (Jeannerod, 1995). Die Beteiligung der SMA wurde bei einigen Autoren differenzierter dargestellt. So lagen die Aktivierungen während IM bei Stephan und Kollegen eher in der posterioren rostralen SMA, während EM zusätzlich den caudoventralen Teil aktivierte (Stephan et al. 1995). Andere Studien bestätigten die Aktivität in der posterioren SMA mit einem Schwerpunkt Richtung rostral bei IM und berichteten über zusätzliche Aktivierungen in der prä-SMA während IM (Gerardin et al. 2000). Erhöhte Aktivierung in der prä-SMA wird auch während der Vorstellung von sequentiellen Fingerbewegungen berichtet (Abbruzzese et al. 1996). Während die prä-SMA an der Bewegungsauswahl (Deiber et al. 1991) und –vorbereitung (Humberstone et al. 1997) beteiligt ist, sind die posterioren Anteile während EM (Stephan et al.

1995) und beim Initiieren einer Bewegung (Passingham 1996) aktiviert. Neurone der SMA sind besonders beim Planen von räumlich-zeitlichen Aktionen und beim Umsetzen von motorischen Plänen für zeitlich aufeinanderfolgende Bewegungen aktiviert (Shima et al. 1996; Tanji et al. 1996).

Im PMC wird bei IM ebenfalls ein rostro-caudaler Gradient berichtet (Gerardin et al. 2000). Laterale prämotorische Aktivierungen während IM wurden in anderen Studien gefunden (Rao et al. 1993; Decety et al. 1994). Binkofski und Kollegen berichten über Aktivierungen in dorsalen und ventralen Anteilen des PMC während vorgestellter Fingerbewegungen (Binkofski et al. 2000). Das Areal BA 6, vor allem in Zusammenhang mit dem anterioren Gyrus cinguli, können in kognitive Aspekte von Bewegungsauswahl (Deiber et al. 1991) oder bei der Inhibition einer motorischen Antwort involviert sein (Krams et al. 1998). Aktivierungen in der Area BA 44 bei der Vorstellung zielgerichteter Handbewegungen wurden von Grafton und Kollegen beschrieben (Grafton et al. 1996). Die Aktivierungen von BA 44/45 interpretieren Binkofski und Kollegen (Binkofski et al. 2000) als mögliche Korrelate sogenannter Spiegel-Neurone, wie sie auch von Rizzolatti und Arbib (Rizzolatti and Arbib 1998) beschrieben wurden, und sie vermuten, dass die BA 44 bei der Steuerung komplexer Armbewegungen beteiligt ist.

Über eine Aktivierung im primären motorischen Areal bei IM wird unterschiedlich berichtet. Die Beteiligung des kontralateralen primären Motorkortex während IM wurde während einfacher Fingerbewegungen (Finger zum Daumen) mittels fMRI gezeigt (Sabbah et al. 1995; Luft et al. 1998; Lotze et al. 1999; Porro et al. 2000; Nair et al. 2003), auch wenn die gemessene Aktivierungsstärke niedriger war als bei der Ausführung (Lang et al. 1996; Roth et al. 1996; Schnitzler et al. 1997). Porro und Kollegen berichten, dass bei IM etwa 30% der in cM1 aktivierten Voxel aktiviert waren wie bei EM (Porro et al. 1996). Während der Beobachtung von Bewegungen wurden in einer MEG Studie eine signifikante Erhöhung der Aktivität in M1 berichtet (Hari et al. 1998). Obwohl die neurophysiologischen Veränderungseffekte bei ausgeführten Bewegungen stärker sind, sind sie auch bei IM signifikant vorhanden. Rein

mentales Üben einer Fingerbewegung ist ausreichend, um an frühen Stadien motorischen Lernens beteiligte neuronale Netze zu verändern, was sich sowohl anhand physiologischer Messungen als auch anhand von Leistungsdaten belegen ließ (Pascual-Leone et al. 1995). Beim Ausführen von Bewegungen zeigen sich kortikale Asymmetrien, die sich aus der unterschiedlichen Dominanz der beiden Hände ergeben (Amunts et al. 1996). Diese sind auch bei der mentalen Ausführung zu sehen, allerdings ist der Unterschied der Asymmetrie zwischen dominanter und nicht-dominanter Hand bei der mentalen Aufgabe verstärkt (Maruff et al. 1999).

Einige der Studien kontrollierten eine mögliche Beteiligung der Muskulatur durch eine gleichzeitige EMG-Ableitung der untersuchten Extremität (Porro et al. 1996; Roth et al. 1996; Lotze et al. 1999; Porro et al. 2000; Nair et al. 2003). Während motorischer Vorstellung steigt die muskuläre Aktivität im Vergleich zur Ruhe an. Mittels EMG kann festgestellt werden, dass sich die Aktivität auf die Muskeln beschränkt, die an der vorgestellten Bewegung beteiligt sind und proportional zu der für die vorgestellte Bewegung benötigten Anstrengung steigt (Wehner et al. 1984). Aktivität der absteigenden motorischen Bahnen während motorischer Vorstellung wurde auch mittels TMS untersucht (Gandevia and Rothwell 1987; Abbruzzese et al. 1996; Fadiga et al. 1999). Pascual-Leone und Kollegen prüften die Veränderungen der neuronalen Aktivierungsschwelle von M1 beim Spielen und mentalen Training einer Sequenz auf dem Klavier und fanden diese, im Gegensatz zur Aktivierungsschwelle in der Kontrollgruppe, schon nach fünf Übungstagen signifikant erniedrigt (Pascual-Leone et al. 1995). Es schien auch bei IM zu einer Bahnung der bei dem Lernprozess beteiligten Neurone zu kommen, die eine äußere Anregung durch TMS begünstigt. Abbruzzese und Kollegen untersuchten die Erregbarkeit der Neurone von M1 während sequentieller und repetitiver Fingerbewegungen, die interessanterweise nur während der sequentiellen Aufgabe erhöht war (Abbruzzese et al. 1996). Fadiga und Kollegen berichten, dass bei IM die Erregungsmuster denen ähneln, die bei der Ausführung gemessen werden, wobei die Stimulation des linken präzentralen Gyrus sowohl kontra- als auch ipsilateral die kortikospinale Erregungsschwelle erniedrigte, während die

Stimulation des rechten präzentralen Gyrus sich nur kontralateral auswirkte (Fadiga et al. 1999). Auch Ergebnisse von Studien mit MEG zeigten eine Beteiligung von M1 während einfacher Fingerbewegungen bei IM (Lang et al. 1996; Schnitzler et al. 1997). Im Gegensatz dazu finden sich in PET Studien wenig Berichte über Aktivität im primären motorischen Kortex während IM (Lafleur et al. 2002). Dies kann an der schlechten zeitlichen Auflösung des PET liegen, das eine möglicherweise nur kurze Beteiligung von M1 während IM nicht erfassen kann. Als Ausnahme ist die Studie von Malouin und Kollegen zu erwähnen, die über Aktivität in M1 während einer motorischen Aufgabe berichtet, bei der die Personen sich vorstellen mussten zu laufen (Malouin et al. 2003). Beim Laufen ist der ganze Körper involviert und die Vorstellung der Beteiligung vieler Glieder und Gelenke hat eventuell mehr Einfluss auf M1 als wenn nur Fingerbewegungen imaginiert werden. Die Beteiligung von M1 ist möglicherweise auch abhängig von der Komplexität der Vorstellungsaufgabe. Während mentalen Trainings neu gelernter und einfacher Fingerbewegungen wird häufiger eine M1 Aktivierung beschrieben (Lotze et al. 1999) als bei mehr visuellen Aufgabenstellung wie dem Rotieren einer Handbewegung (Kawamichi et al. 1998), der komplexen Vorstellungsaufgabe wie dem Spielen eines Instrumentes (Langheim et al. 2002) oder beim Vorstellen einer motorischen Aufgabe in späteren Lernphasen (Lafleur et al. 2002).

Aktivierung im Zerebellum während mentalen Trainings ist der Aktivität des sensomotorischen Systems ähnlich, da beide Systeme während motorischer Aktivität eine enge Verbindung haben (Braitenberg et al. 1997). Während Aktivierung im anterioren ipsilateralen Lobulus (Larsell lobule H IV-V) bei wiederholten, hoch automatisierten Bewegungen beobachtet wurde, ist der posteriore Lobulus (H VII) vor allem während Änderung von Bewegungen mit multimodalen sensorischen Eingängen aktiviert (Sakai et al. 1998b). Das Zerebellum ist aber auch bei vorgestellten Bewegungen involviert (Decety and Boisson 1990; Ryding et al. 1993; Decety et al. 1994), wobei sich die Aktivierungen in ihrer Lokalisation unterscheiden: IM wird mehr inferior posterior lokalisiert (Larsells Lobulus H VII) als die ausgeführte Bewegung (Larsells Lobulus H IV) (Lotze et al. 1999; Grodd et al. 2001). Es wird angenommen,

dass die während der Vorstellungsaufgabe verminderte Aktivierung im anterioren Zerebellum auf die fehlende afferente Information zurückzuführen ist. Laterale Anteil des Zerebellums waren bilateral während motorischer Vorstellung verschiedener Musikstücke bei Instrumentalisten aktiviert (Langheim et al. 2002).

Der parietale Kortex und vorzugsweise der linke parietale Kortex scheinen Areale zu sein, in dem motorische Bewegungen in Form von einem internen Modell dieser Bewegung gespeichert sind (Sirigu et al. 1999). Gerardin und Kollegen fanden in einem fMRI Experiment im Vergleich zwischen IM und EM bei der Vorstellung eine stärkere Aktivierung im inferioren und posterioren Parietallappen (Gerardin et al. 2000). Aktivierungen im inferioren parietalen Lappen werden während Bewegungsvorbereitung (Decety 1996) und während zielgerichteter Bewegungen (Kawamichi et al. 1998) beschrieben. Auch während später Lernphasen motorischer Bewegungen werden bei IM Aktivierungen in inferioren Anteilen berichtet (Lafleur et al. 2002). Aktivierungen im superioren Parietallappen werden bei zielgerichteten Bewegungen beobachtet (Wolbers et al. 2003). In Bezug zu musikalischer Vorstellung wird vermutet, dass der superiore Parietallappen räumlich-analoge Informationen über Tonhöhen speichert und bei der motorischen Ausübung einer musikalischen Aufgabe involviert ist (Sergent et al. 1992; Sergent 1993b; a), was Langheim und Kollegen in ihrer Studie über mentales Üben bei Musikern bestätigen konnten (Langheim et al. 2002). Stephan und Kollegen beschreiben Aktivität im caudalen Teil des superioren Parietallappens (BA 7) bei der Bewegungsvorstellung und mehr rostrale Anteile beim Planen von Bewegungen (Stephan et al. 1995). Bei IM einfacher Fingerbewegungen wird jedoch oft keine parietale Aktivierung gefunden (Lotze et al. 1999).

Präfrontale Aktivierungen während Bewegungsvorbereitung werden in dorsolateralen (BA9 und BA 46), in orbitofrontalen Arealen (BA 10 und BA 11) und im Gyrus cinguli berichtet (Jeannerod 2001). Aktivität im orbitofrontalen Lappen beschreiben Lafleur und Kollegen bei IM in frühen Lernphasen motorischen Lernens (Lafleur et al. 2002). Langheim beobachtet bei Musikern, die ein ihnen gut bekanntes Musikstück mental übten, ein aktiviertes Netzwerk

das die SMA, den PMC, den rechten superioren Parietallappen, den rechten frontalen inferioren Gyrus und das bilaterale Zerebellum einschließt (Langheim et al. 2002). Aktivierungen in den Basalganglien unterscheiden sich bei IM und EM. EM aktiviert den postkommissuralen Anteil des Putamen (Jueptner et al. 1997a), während IM mehr rostral den Nukleus Caudatus aktiviert (Gerardin et al. 2000). Aktivität im Nukleus Caudatus wird auch bei IM von Greifbewegungen (Decety et al. 1994) und beim expliziten Lernen von sequentiellen Fingerbewegungen (Jueptner et al. 1997b) beschrieben.

Insgesamt kann zusammengefasst werden, dass IM und EM zwar große überlappende Areale gemeinsam aktivieren, dass sich aber auch im Detail deutliche Unterschiede finden. Von besonderem Interesse dabei ist sicher die Wahl des Paradigmas bezüglich Vorstellungsaufgabe und Komplexität. Deshalb muss die mentale Aufgabe vor der Messung präzise definiert und ausreichend trainiert werden. Dieses Training sollte die Ausführung der Bewegung vor dem mentalen Training mit einschließen und beide Bedingungen sollten per EMG während der Messung kontrolliert werden. Trotzdem muss eingeräumt werden, dass sich große Teile des mentalen Trainings der Kontrolle entziehen und auf dem Niveau einer theoretischen Anweisung bleiben.

2.3. Ergebnisse der Vorstudie

In der Vorstudie wurden die unterschiedlichen Aktivierungen kortikaler und subkortikaler Areale von professionellen Geigern und Amateur-Geigern während einer komplexen Finger-Tapping-Sequenz mittels fMRI untersucht. Die Sequenz entsprach den ersten 16 Takten des Soloparts aus Mozarts Violinkonzert in G-Dur (KV 216, 1. Satz), einem Konzert, das zum Repertoire jeden professionellen Geigers gehört, aber auch für Amateure realisierbar ist.

Beide Gruppen wurden anhand eines Anweisungsbogens mit ihrer musikalischen Aufgabe vertraut gemacht. Sie mussten den Notentext durch gleichzeitiges Hören einer Aufnahme des Konzertes von der CD und Lesen der Violinstimme auswendig lernen, da ihnen während der Messung weder auditorische noch visuelle oder metrische Hilfen gegeben wurden. Wegen des begrenzten Platzes im Kernspintomographen musste die Tapping-Aufgabe statt auf der Geige auf dem Brustkorb ausgeführt werden. Beide Gruppen empfanden diese Umstellung als natürlich. Das Training war beendet, wenn die Probanden die zu spielenden Takte im richtigen Rhythmus und der richtigen Reihenfolge auswendig spielen konnten. Sie wurden angewiesen nur die linke Hand zu bewegen und die rechte Hand so reglos wie möglich zu lassen. Um sicher zu gehen, dass die Finger der rechten Hand nicht bewegt wurden und um eine Kontrolle der linksseitig ausgeführten Bewegung zu haben, wurde vor und während der Messung ein Elektromyogramm (EMG) der Fingerextensoren beider Unterarme abgeleitet.

Die komplexe motorische Aufgabe dieser Studie zeigte in beiden Gruppen ähnliche Aktivierungen, allerdings waren die der Profis umschriebener und weniger verstreut als die der Amateure. Die Amateure zeigten im Gegensatz zu den Profis, vermehrte ipsilaterale Aktivität vor allem im Bereich sensomotorischer Areale. Beide Gruppen zeigten Aktivierungen in sekundär motorischen Arealen wie der SMA und dem PMC, als auch bilateral anteriore und posteriore zerebelläre Aktivierung. Zudem zeigten beide Gruppen Aktivität im bilateralen superioren parietalen Kortex, im linken anterioren superioren Temporallappen und im rechten Heschlschen Gyrus. In den präfrontalen

Regionen zeigten beide Gruppen Aktivierung im linken frontalen Operkulum, die Amateure zusätzlich bilateral in mittleren und orbitalen Regionen. Aktivität in den Basalganglien (linker Nukleus Caudatus) wurde nur bei den Amateuren gesehen.

Zwei signifikante Korrelationen ergaben sich bei den Profis: zum einen korrelierte die gemittelte EMG Amplitude während der ausgeführten Bewegung mit der kontralateralen M1 BOLD Effekt Intensität ($r = 0.82$; $p < 0.05$; höchstes aktiviertes Voxel), zum anderen ergab sich ein signifikanter Zusammenhang ($r = 0.67$; $p < 0.05$) zwischen dem Beginn des musikalischen Trainings und der ipsilateralen zerebellären Aktivität.

Unterschiede in der Maskierungsevaluation: die Profis zeigten einen höheren Anstieg der Aktivierung im kontralateralen M1 und im ipsilateralen anterioren Zerebellum. Die Amateure hingegen zeigten eine höhere ipsilaterale M1 Aktivierung sowie Aktivierungen im kontralateralen Zerebellum, bilateral in den prämotorischen und somatosensorischen Arealen und der SMA. Bei ihnen konnten auch höhere Aktivierungen bilateral in den mittleren und orbital frontalen Arealen festgestellt werden, das linke frontale Operkulum eingeschlossen. Auch aktivierten sie mehr den anterioren superioren temporalen Gyrus (BA 22, 38), die Profis mehr den primären auditorischen Kortex (A1, Heschlscher Gyrus).

2.4. Bildgebung mit Magnetresonanztomographie

2.4.1. Magnetresonanztomographie

Die Magnetresonanztomographie, auch Kernspintomographie genannt, benutzt die seit 1946 bekannte Erscheinung der kernmagnetischen Resonanz (nuclear magnetic resonance, NMR), um Dichte und Relaxationszeiten magnetisch erregbarer Wasserstoffkerne (Protonen) im menschlichen Körper zu erfassen. Beide Parameter – Dichte und Relaxationszeiten – können als Funktion des Ortes mittels bildgebender Systeme dargestellt werden.

Die MRT basiert auf dem Grundprinzip des Drehimpulses (Spin) geladener Teilchen, wobei Wasserstoff das größte magnetische Moment aufweist. Unter dem Einfluss eines starken Magnetfelds werden die Wasserstoff-Atomkerne des Körpergewebes in einen bestimmten Energiezustand und eine bestimmte Richtung gebracht. Durch einen Hochfrequenzimpuls (Radiowellen) kann die Richtung der Kerne anschließend aus ihrer zunächst aufgezwungenen Position ausgelenkt werden. Nach Abschalten des Impulses schwenken sie wieder zurück. Die dabei entstehenden elektromagnetischen Signale lassen sich messen und in einer Serie von Schichtbildern zu einem Überblick über anatomische Strukturen darstellen (Birbaumer 1996).

2.4.2. funktionelle Kernspintomographie

Da die Aktivierung von Hirnarealen mit einer Depolarisation des Membranpotentials der Neuronen verbunden ist, dessen Erhaltung und Wiederherstellung Energie und Sauerstoff benötigt, kommt es zu einer Steigerung von Blutfluss und Sauerstoffverbrauch. Hierbei führt die neuronale Aktivierung zu einer überproportionalen Steigerung des regionalen Blutflusses im Vergleich zum Sauerstoffverbrauch und damit zu einem Anstieg des oxygenierten Hämoglobins in den Kapillaren des aktivierten Gehirngewebes. Diese Änderungen der lokalen Blutversorgung und der magnetischen Eigenschaften des Blutes können durch das MRT erfasst werden (Klose 1999).

Da der Anstieg des rCBF erst 4-6 Sekunden nach der Erregung der betroffenen Neuronen einsetzt, ist die zeitliche Auflösung des fMRI entsprechend gering. Um den BOLD Effekt zeitlich erfassen zu können, werden besonders lange Echozeiten (TE) benötigt: T* gewichtete EPI (Echo Planar Imaging) Bilder (ein TE von 60 ms). Der BOLD-Effekt ist recht klein, ca. 1 - 3% verglichen zur Ruheaktivität des Gehirns. Die räumliche Auflösung dieser Methode ist gegenüber anderen nicht invasiven Hirnkartierungsmethoden sehr hoch, je nach verwendeter Matrix liegt sie bei einigen Millimetern.

3. Hypothesen

In dieser Studie werden folgende Hypothesen untersucht, die sich mit der Frage beschäftigen, ob die fMRI BOLD Signale sowohl zwischen den Gruppen (Amateure - Profis) als auch zwischen den Bedingungen (ausgeführte Bewegung – mentales Training) unterschiedlich sind.

Hypothese 1:

Mentales Üben komplexer motorischer Aufgaben aktiviert ähnliche neuronale Strukturen wie die Ausführung der Bewegung.

Hypothese 2:

Profis und Amateuren zeigen Unterschiede in den aktivierten Arealen.

Hypothese 3:

Aufgrund der langjährigen Erfahrung der Profis wird eine Koaktivierung im auditorischen Kortex auch beim mentalen Üben erwartet.

4. Methode

4.1. Probanden

Acht professionelle Musiker (zwei Frauen und sechs Männer zwischen 35 und 53 Jahren), die Mitglied in einem deutschen oder schweizerischen Kulturorchester sind und acht Amateure (sechs Frauen und zwei Männer zwischen 18 und 65 Jahren), die durch eine Anzeige innerhalb der Universität Tübingen gewonnen werden konnten, nahmen an der fMRI Studie teil. Der Altersunterschied zwischen den Gruppen war nicht signifikant. Alle Probanden waren nach dem Edinburgh Handedness Inventory (Oldfield 1971) Rechtshänder. Die Studie war von der Ethik-Kommission der Universität Tübingen genehmigt worden und alle Teilnehmer gaben nach einer Aufklärung über Durchführung und Zweck der Studie schriftlich ihre Einwilligung zu der Untersuchung.

Zum Zeitpunkt der Untersuchung wurde der Unterschied zwischen professionellen Musikern und Amateuren in erster Linie durch die Gesamtzeit des Trainings mit dem Instrument definiert. Die Profis hatten seit dem Beginn ihres Instrumentalunterrichts durchschnittlich seit dem 6.75 Lebensjahr ohne Unterbrechung mit dem Instrument gearbeitet, die Amateure hingegen zeichneten sich durch mindestens sechs Jahre Instrumentalunterricht aus und hatten seit dem Beginn des Unterrichts (ca. 9.50 Lebensjahr) durchschnittlich 11.14 Jahre pausiert.

Im Gegensatz zu den Amateuren verbrachten die Profis signifikant mehr Zeit mit ihrem Instrument, sie spielten durchschnittlich 35.63 Jahre (SD = 6.37), die Amateure 12.03 Jahre (SD = 3.59); ($t(14) = 9.14$; $p < 0.001$). Auch übten die Profis in den drei Monaten vor der Untersuchung signifikant mehr: 30.87 Stunden/ Woche (SD = 3.95), die Amateure 1.45 Stunden/ Woche (SD = 1.60), ($t(9.24) = 19.52$; $p < 0.001$). Im Gegensatz zu den Amateuren übten alle professionellen Musiker regelmäßig mental (siehe Abb.2).

4.2. Musikalische Aufgabe

Beide Gruppen wurden analog zur Vorstudie mit ihrer musikalischen Aufgabe vertraut gemacht. Die zu übende Passage war bereits bekannt und stand ihnen auswendig zur Verfügung. Im Gegensatz zu der Vorstudie sollten sie die ersten 16 Takte des Violinkonzertes von W.A. Mozart nicht auf dem Brustkorb tappen, sondern mental üben.

Sie hatten die Aufgabe sich die Fingerbewegungen der linken Hand, die für die ersten 16 Takte des Soloparts der Violine benötigt werden, so lebhaft wie möglich vorzustellen ohne sie tatsächlich auszuführen. Sie übten die Imagination der Fingerbewegungen in der vorgegebenen Reihenfolge des Notentextes, mit festgelegten Fingersätzen und im Rhythmus des Konzertes. Das wurde so lange unter professioneller Aufsicht mit ihnen trainiert, bis sie die Bewegungsabläufe im Kopf beherrschten.

Die Profis konnten die Aufgabe innerhalb weniger Minuten bewältigen, da sie oft mental übten. Die Amateure brauchten durchschnittlich mehr als eine Stunde Training. An das Training schloss sich die Messung im fMRI-Tomographen an.

4.3. Messungen

4.3.1. fMRI

Die funktionelle Kernspintomographie wurde mit einem Siemens 1.5 Tesla Tomographen (SIEMENS Vision, Erlangen, Deutschland) mit echo-planarer Bildgebung (EPI: Matrix 96*128, FOV 250 mm, TE 59 ms, TR 8 s, Interscanintervall 10 s) von 36 Schichten mit 3 mm Schichtdicke und 1 mm Lücke im Blockdesign durchgeführt. Es wurden 48 Messungen des gesamten Gehirns pro Bedingung in Blocks von je 6 Messungen gemessen, während jeder Messung wurde vier mal zwischen Ruhe und Aktivierung gewechselt. Jeder Proband führte sowohl die ausgeführte als auch die vorgestellte Bewegung zweimal aus. Zusätzlich wurden korrespondierende T1-gewichtete Bilder in der gleichen Schichtführung sowie ein T1-gewichteter 3D-Datensatz

(128 sagittale Schichten, Matrix 256*256, Schichtdicke 1,5 mm) als anatomische Referenz aufgezeichnet.

4.3.2. Statistische Auswertung:

Die Evaluierung der fMRI-Aktivierungskarten wurde mit dem "Statistical Parametric Mapping" Programm (SPM'99; Wellcome Department of Neurology, London) durchgeführt. Die ersten beiden Messungen des gesamten Kopfvolumens wurden verworfen um T1 Sättigungseffekte zu vermeiden. Die verbleibenden 46 Bilddatensätze der Profis und Amateure wurden – orientiert auf die jeweilige erste Messung – bewegungskorrigiert, um Bewegungsartefakte auszugleichen. Die anatomischen und funktionellen Datensätze wurden individuell aufeinander koregistriert und durch eine nicht lineare Normalisierung wurden die funktionellen Datensätze aller in den gleichen Raum abgebildet. Dadurch wurde eine Voxel orientierte Gruppenanalyse ermöglicht. Die normalisierten Bilder wurden mit einem 6mm „full-width-half-maximum (FWHM) Gauss Filter geglättet um das Signal-zu-Rausch-Verhältnis zu verbessern.

Es wurde eine statistische Analyse im sogenannten „fixed effect model“ durchgeführt und die Voxel abhängige Differenz zwischen Aktivierung und Ruhe bei jeder Aufgabe (ausgeführte Bewegung und mentales Training) ermittelt. Hierbei wurde unter Zugrundelegung einer Rechteckfunktion die angenommene haemodynamische Antwort bei der Aufgabe modelliert und zusätzlich mit einem Hochpassfilter von 196 Sekunden (doppelte Ruhe- und Aktivierungsperiode) versucht, nicht aufgabenspezifische Veränderungen über den Zeitverlauf zu eliminieren. Um einen Überblick über die Aktivierungen und Deaktivierungen des ganzen Kopfes zu bekommen wurde das gesamte Volumen mit einem Schwellenwert von $p < 0.05$ bei Korrektur auf das gesamte Messvolumen dargestellt. Die bei diesen Kriterien noch aktivierten Pixel wurden auf das MNI (Montreal Neurological Institute) segmentierte Gehirn (ein Gehirn eines Probanden, das einer Überlagerung von 305 gesunden Versuchspersonen am ähnlichsten war) überlagert.

Die prominenten Deaktivierungen in frontalen und parietalen Regionen, die Beobachtungen von Gusnard & Raichle (Gusnard and Raichle 2001)

entsprechen, führten zu Problemen beim direkten Vergleich innerhalb und zwischen den Bedingungen (z.B. beim Vergleich Profis-Amateure). Daher wurde eine exklusive Maskierung, die nur die Aktivierung oberhalb der Schwelle beim Vergleich der Gruppen (Profis-Amateure) und der Bedingungen (ausgeführte und vorgestellte Bewegung) verglich, angewendet mit einer Maskierungsschwelle von $p < 0.05$. Wiederum wurde mit einem Schwellenwert von $p < 0,05$ auf das gesamte Messvolumen korrigiert. Die Koordinaten der am höchsten aktivierten Voxel der signifikanten Aktivierungsareale wurden mit dem in MATLAB implementierten Konversionsprogramm „mni2tal“ von Matthew Brett (MRC Cognition und Brain Sciences Unit, Cambridge, England, <http://www.mrc-cbu.cam.ac.uk/Imaging>) in das Talairach Koordinatensystem (Talairach 1988) transformiert. Bevor die entsprechenden Brodman Areale benannt wurden, wurden sie mit einer automatisierten Version des „talairach daemon“ (http://ric.uthscsa.edu/td_applet/) verglichen. Für die durch die Hypothesen definierten Areale wurden die z-Werte der am höchsten aktivierten Voxel innerhalb dieser Areale sowohl mit den demographischen Daten, den visuellen Analog-Skalen als auch den EMG Ergebnissen korreliert (SPSS; bivariate Korrelationen).

4.4. EMG

Vor und während der fMRI-Untersuchung wurde die Muskelaktivität der Fingerextensoren beider Hände mittels eines für die fMRI Umgebung geeigneten EMG-System (IED-System, Hamburg) aufgezeichnet. Ein Zwei-Kanal EMG mit Ag/AgCl - Elektroden zeichnete über der Haut des dorsalen Unterarms die Signale der Muskeln auf, die bei der Extension fast aller Finger aktiv sind (vom musculus extensor carpi radialis über die oberflächlichen Extensoren bis zum extensor carpi ulnaris). Die Signale wurden mit dem Faktor 100 verstärkt, mit einem 200 Hz Tiefpass- und einem 2 Hz Hochpassfilter gefiltert. Die so vorbereiteten Daten wurden in ein Lichtsignal umgesetzt und zu einem PC zur Visualisierung, Speicherung und weiteren Berechnung gesendet. Die Visualisierung der EMG-Daten online erfolgte mittels „DASYLAB“.

Um die EMG-Differenzen zwischen den Bedingungen und den Probanden zu ermitteln, wurde eine off-line Analyse mittels „BRAIN VISION“ (Version 1.03) durchgeführt. Hierbei wurden die EMG-Amplituden zwischen 2 und 200 Hz für jede Bedingung (IM und EM) und Gruppe (Amateure und Professionelle) gemittelt. Die Differenzen zwischen Aktivität und Ruhe wurden für beide Gruppen durch eine MANOVA-Varianzanalyse (Programm „STATVIEW“) berechnet. Bivariate Korrelationen zwischen Demografischen Daten, VAS Skalen und den EMG Ergebnissen wurden mittels „SPSS“ durchgeführt.

4.5. Psychophysische Befragung

Vor den Messungen wurden anhand eines Fragebogens die Daten der Probanden zu ihrem Alter, zu dem Beginn des Instrumentalunterrichts, zur Dauer des Arbeitens mit dem Instrument seit Beginn des Instrumentalunterrichts bei den Profis, zur Dauer der Pause nach der Beendigung des Instrumentalunterrichtes sowie die durchschnittliche Dauer des wöchentlichen Übens erhoben. Nach der Untersuchung wurden alle Probanden gebeten, ihre Fähigkeit zur Konzentration, zur Lebhaftigkeit der Bewegungsvorstellung, des Vorstellungsvermögens von Tonhöhe und Rhythmus anhand einer visuellen Analog Skala (von 0 = „gar nicht“ bis 10 = „sehr gut“) einzuschätzen.

Zusätzlich wurden die Profis, die mentales Üben zur Vorbereitung für Konzerte anwenden, mit einem a posteriori Fragebogen über die Art ihres mentalen Trainings anhand einer VAS-Skala befragt, um den zeitlichen Umfang und die unterschiedlichen Komponenten des mentalen Übens sowie die Einschätzung der Verbesserung durch das mentale Üben zu erfassen.

Diese Daten wurden in SPSS 99 mit dem One-sample Kolmogoroff-Smirnov-Test auf ihre Normalverteilung überprüft, die Mittelwerte wurden errechnet und mit einem t-Test für unabhängige Stichproben auf signifikante Differenzen geprüft. Die nicht normalverteilten Daten wurden mit dem U-Test von Mann-Whitney verglichen.

5. Ergebnisse

5.1. Ergebnisse der Aktivierungskarten

5.1.1. Aktivierungen:

Die Amateure zeigten weit verstreute Aktivität, die besonders bilateral lateral frontal und inferior operkulär zu sehen war, ebenso in prämotorischen und supplementär motorischen Regionen, in parietalen, anterior temporalen und in posterior lateralen zerebellären Arealen. Die Aktivierungen der Profis lagen im linken prämotorischen Kortex, im supplementär motorischen Areal, ipsilateral im posterioren Zerebellum, bilateral superior und links inferior parietal, im linken anterioren superioren Temporallappen und im rechten superioren operkulären Teil des inferioren frontalen Gyrus.

5.1.2. Deaktivierungen:

Während bei den Profis keine signifikanten Deaktivierungen zu sehen waren, zeigten sich bei den Amateuren verstreute Deaktivierungscluster bilateral im anterioren und posterioren Zerebellum, im Gyrus angularis, im anterioren superioren temporalen Gyrus und im mittleren präfrontalen Gyrus. Zusätzlich wurden Deaktivierungen in der rechten Hemisphäre gefunden, im supramarginalen Gyrus, im superioren Parietallappen und im Nukleus caudatus. Erhöhte BOLD-Signale während der Ruhebedingung wurden nur bei den Amateuren im linken frontalen Operkulum und in den linken somatosensorischen Regionen festgestellt.

5.1.3. Masking zwischen den Gruppen Profis versus Amateure:

Die Profis manifestierten prominente BOLD-Signale im linken prämotorischen Areal, in der SMA, im linken posterioren Zerebellum, bilateral superior und links inferior parietal, im rechten superioren Teil des Operkulums sowie auch im linken superioren Temporallappen. Die Amateure hingegen zeigten verstreutere Aktivierungen in den sensomotorischen Regionen (linker PMC und SMA) sowie auch bilateral sensomotorisch und bilateral im posterioren Zerebellum. Weiterhin waren auch bilateral (posterior und inferior) der Parietallappen und

operkulär und dorsolateral der Frontallappen sowie das anteriore Zingulum bei den Amateuren aktiviert. Beide Gruppen zeigten links temporal anterior Aktivität, die Amateure jedoch mehr posterior-superior. Aktivität in den Basalganglien (Nukleus Caudatus) war nur bei den Amateuren zu finden.

5.1.4. Vorgestellte versus ausgeführte Bewegung (IM – EM) innerhalb der Gruppen:

Stärkere Aktivierungen während vorgestellter Bewegung wurden bilateral im posterioren Zerebellum, in der SMA, im kontralateralen somatosensorischen Kortex und im linken inferioren prämotorischen Kortex bei den Amateuren gesehen. Ebenso wurde erhöhte Aktivität bilateral in den inferioren Parietallappen und linken präfrontalen Arealen (frontal operkulär und dorsolateral) bei Amateuren gesehen. Zusätzlich aktivierten sie den linken anterioren temporalen Gyrus mehr während der vorgestellten Bewegung als während der ausgeführten. Die Profis zeigten nur im linken superioren und inferioren Parietallappen und in der SMA höhere Aktivität während der vorgestellten Bewegung.

5.1.5. Ausgeführte versus vorgestellte Bewegung (EM – IM) innerhalb der Gruppen:

Stärker als die Profis aktivierten die Amateure in den sensomotorischen Regionen bilateral die primären Areale, den linken prämotorischen und den rechten somatosensorischen Kortex sowie die SMA und bilateral anterior und links inferior posterior das Zerebellum. Die Profis hingegen zeigten eine höhere Aktivität im kontralateralen primären motorischen Kortex, bilateral im somatosensorischen Kortex, im rechten superioren prämotorischen Kortex, in der SMA und links posterior und anterior im Zerebellum. Im Parietallappen aktivierten die Profis mehr rechts superior, während die Amateure höhere Aktivität im linken superioren Parietallappen zeigten. In beiden Gruppen wurde Aktivität im linken anterioren superioren Temporallappen und im rechten Heschlschen Gyrus (A1) gesehen. Nur die Amateure zeigten erhöhte BOLD-Effekte im Frontallappen (bilateral orbitofrontal, rechts frontal mittelliniennah,

linkes frontales Operkulum), in der Amygdala, dem Thalamus und in den Basalganglien (linker Nukleus Caudatus).

5.2. EMG-Messung

In Übereinstimmung mit der gegebenen Anweisung, bei der vorgestellten Bewegung keine Muskeln zu bewegen, wurde kein Unterschied in der EMG-Aktivität verglichen zur Ruhe-Bedingung gemessen.

5.3. Ergebnisse der psychophysischen Befragung

Die erhobenen Daten über Alter der Probanden, Beginn ihres Instrumentalspiels, Dauer der Lebensspielzeit und die Stunden des wöchentlichen Übens bei Profis und Amateuren, sowie die Daten der VAS-Skalen hinsichtlich Konzentration auf die Aufgabe, Vorstellungsvermögen der Musik, der Tonhöhe und des Rhythmus waren normalverteilt. Lediglich die Variable Pause war nicht normalverteilt.

Signifikante Unterschiede zwischen Profis und Amateuren zeigten sich nur hinsichtlich des Vorstellungsvermögens für die Bewegungen ($t(14) = 3.36$; $p < 0.05$). Profis schätzten ihre Fähigkeit sich die Bewegungen genau vorzustellen höher ein als die Amateure. Die anderen Selbsteinschätzungen unterschieden sich nicht signifikant nach der Korrektur für multiple Testungen (z.B. Rhythmus ($t(7.77) = 3.15$; $p = 0.056$).

Die Lebhaftigkeit der Vorstellung für Rhythmus und Tonhöhe korrelierte positiv mit der Trainingszeit pro Woche (Rhythmus: $r = 0.65$; $p < 0.01$; Tonhöhe: $r = 0.54$; $p < 0.05$) und mit der Lebensspielzeit (Rhythmus: $r = 0.68$; $p < 0.005$; Tonhöhe: $r = 0.64$; $p < 0.05$).

Die Profis beantworteten die Frage nach der Menge des mentalen Übens mit einem durchschnittlichen Einschätzungswert von 5.76 (± 3.38) aus einem Gesamtbereich von 10. Vor allem schwere Stellen innerhalb des zu übenden Musikstückes wurden häufig mental geübt (Durchschnitt 7.01; ± 2.34). Das mentale Üben von konkreten Fingerbewegungen wurde mit einem Durchschnitt von 6.91 (± 2.68), das Üben in Bezug auf die Tongestaltung mit einem

Durchschnitt von 8.58 (± 0.97) eingeschätzt. Mit einem Durchschnitt von 8.05 (± 2.35) attestierten sie dem mentalen Üben, zu einer Verbesserung ihres Spiels zu führen. Obwohl die Profis berichteten, regelmäßig mentales Training anzuwenden, war eine weitere Quantifizierung der zeitlichen Menge nicht möglich.

5.4. Tabellen

5.4.1. IM gegen Ruhe

Region	BA/Larsell	Amateure				Profis			
		t-Wert	x	y	z	t-Wert	x	y	z
Sensomotorische Regionen									
Linker prämotorischer Kortex	4/6	7.15	-51	-2	39	6.43	-48	10	40
Linker iS1	1,2,3	8.33	-40	-26	58				
Rechter cS1	1,2,3	8.91	14	-49	69				
Supplementär motor. Areal	6	7.13	0	12	45	6.22	8	9	60
Linke posteriore zerebelläre Hem.	HVIIAcrII	12.55	-42	-72	-35				
Linke posteriore zerebelläre Hem.	HVIc					6.21	-24	-61	-19
Rechte posteriore zerebelläre Hem.	HVIIAcrII	10.72	40	-58	-29				
Rechte posteriore zerebelläre Hem.	HVIc					5.53	30	-59	-21
Parietallappen									
Links superior parietal	5,7	8.48	-16	-65	57	7.26	-42	-46	48
Links inferior parietal	40	6.19	-57	-29	40	5.15	-22	-67	58
Rechts superior parietal	5,7	9.21	18	-67	49	5.11	38	-46	56
Rechts inferior parietal	40	9.28	40	-60	45				
Frontallappen									
Links inf. frontal (Opercularis)	44	7.34	-57	16	14				
Links präfrontal	10	7.40	-32	45	11				
Rechts inf. frontal (Opercularis)	44	6.40	53	16	16				
Rechts inf. frontal lateral (Operc.)	9					7.11	57	13	27
Rechts präfrontal	10	8.72	38	47	12				
Temporallappen									
Links ant. sup. temporal	22	5.30	-51	4	-5	5.62	-51	15	-9
Links post. sup. temporal	22/40	7.86	-55	-40	20				
Rechts ant. sup. temporal	22	6.67	51	11	-9				
Rechter Heschl's Gyrus, A1	41	5.03	44	-23	10				
Basal Ganglia:									
Rechter Nukleus Caudatus		5.29	16	10	9				
Linkes Putamen		5.14	-26	4	-4				

5.4.2. Unterschiede zwischen den Gruppen während der Bewegungsvorstellung

Amateure – Profis

Profis - Amateure

Regionen	BA/Larsell	t-Wert	x	y	z	t-Wert	x	y	z
Sensomotorische Regionen									
Linker postzentraler Gyrus, iS1	1, 2, 3	8.33	-40	-26	58				
Linker inferiorer prämotor. Kortex	6	7.20	-57	-1	26	6.18	-50	10	40
Rechter postzentraler Gyrus, cS1	1, 2, 3	8.91	14	-49	69				
Supplementär motorisches Areal	6					6.03	-18	0	66
Linke post. zerebelläre Hem.	H VI c					5.68	-24	-59	-17
Linke post. inf. zerebelläre Hem.	H VII AcrII	12.55	-42	-72	-35				
Rechte post. inf. zerebelläre Hem.	H VII AcrII	10.72	40	-58	-29				
Parietallappen									
Medial superior parietal	7					6.05	2	-55	60
Links superior parietal	5, 7	8.33	-40	-26	58	5.05	-22	-67	55
Links inferior parietal	40	7.86	-55	-40	20	5.96	-48	-46	48
Rechts superior parietal	5, 7	7.72	14	-69	50	5.11	38	-46	56
Rechts inferior parietal	39	9.28	40	-60	45				
Frontallappen									
Links inf. frontal (opercular)	44	6.79	-57	11	16				
Links dorsolateral prefrontal	10	7.40	.32	45	11				
Rechter inf. frontaler Gyrus (opercular)	44	6.40	53	16	16	7.11	57	13	27
Rechts dorsolat. präfrontal	10	8.72	38	47	12				
Gyrus cingularis	24	7.41	-10	17	27				
Temporallappen									
Links anterior sup. temporal	22, 38	5.60	-59	-2	7	5.71	-51	15	.6
Rechts anterior sup. temporal	22, 38	5.7	49	13	11				
Basalganglien									
Rechter Nukleus caudatus		5.29	16	10	9				

5.4.3. Unterschiede zwischen Bewegungsausführung und Bewegungsvorstellung :

EM - IM:

Amateure – Profis

Profis - Amateure

Regionen	BA/Larsell	t-Wert	x	y	z	t-Wert	x	y	z
Sensomotorische Regionen									
Linker präzentraler Gyrus, iM1	4	6.79	-25	-18	65				
Linker postzentraler Gyrus, iS1	1, 2, 3					7.16	-50	-27	51
Linker inferiorer prämotorischer Kortex, PMC	6	8.53	-54	6	35				
Rechter präzentraler Gyrus, cM1	4	16.17	38	-10	63	12.95	32	-14	65
Rechter postzentraler Gyrus, cS1	1, 2, 3	11.11	36	-38	61	9.18	46	-30	53
Rechter superiorer prämotorischer Kortex, PMC	6	9.68	30	11	57				
Linke anteriore zerebelläre Hem.	H V	14.27	-18	-50	-18	12.46	-18	-50	-19
Linke inf. posteriore zerebelläre Hem.	HV III	8.65	-28	-59	-44	8.19	-20	-62	-42
Rechte ant. zerebelläre Hem.	H V	9.18	34	-61	-19				
Vermis	V	11.95	-2	-63	-11	10.42	-4	-61	-14
Parietallappen									
Links superior parietal	7	8.91	-36	-46	57				
Rechts superior parietal	7					7.20	32	-46	59
Frontallappen									
Links orbitofrontal	11	7.54	-26	58	-6				
Rechts orbitofrontal	11	7.32	36	44	-17				
Rechte Amygdala		5.58	22	-8	-13				
Temporallappen									
Links anterior sup. temporal	22	10.10	-60	-2	-2	6.08	-52	9	-11
Rechter Heschlscher Gyrus, A1	41	5.24	44	-17	10	5.33	50	-15	8
Linker Heschlscher Gyrus, A1	41	5.76	-53	-17	8				
Thalamus									
		7-06	14	-19	1				
Basalganglien									
Linker Nucleus caudatus		7.61	-2	13	-2				

5.4.4. Unterschiede zwischen Bewegungsvorstellung und Bewegungsausführung :

IM - EM:

Amateure – Profis

Profis - Amateure

Regionen	BA/Larsell	t-Wert	x	y	z	t-Wert	x	y	z
Sensomotorische Regionen									
Linker inf. prämotorischer Kortex	6	6.75	-59	1	26				
Rechter postzentraler Gyrus, cS1	1, 2, 3	8.51	14	-49	69				
Supplementär motorisches Areal	6	7.09	-4	14	51	5.11	-16	1	66
Linke post. zerebelläre Hem.	H VII AcrII	10.71	-42	-72	-35				
Rechte post. zerebelläre Hem.	H VII AcrII	10.50	40	-58	-29				
Parietallappen									
Links superior parietal	7					6.00	-48	-48	50
Links inferior parietal	39, 40	7.86	-55	-40	20	5.42	-28	-77	44
Rechts inferior parietal	40	5.52	40	-43	24				
Frontallappen									
Linker inf. frontaler Gyrus (opercular)	44	6.46	-55	18	12				
Links dorsolateral präfrontal	10	7.18	-42	49	10				
Temporallappen									
Links anterior sup. temporal	22	4.98	-59	-2	7				

5.4.5. Deaktivierungen

Amateure

Profis

Regionen	BA/Larsell	t-Wer	x	y	Z	t-Wert	x	y	z
Sensormotorische Regionen									
Linker iS1	1,2,3	4.87	-57	-6	41				
Linke anteriore zerebelläre Hem.	HV	6.38	-44	-67	-17				
Linke pos teriore zerebelläre Hem..	HVIII	14.00	-42	-72	-35				
Rechte anteriore zerebelläre Hem.	HV	6.77	32	-44	-23				
Rechte posteriore zerebelläre Hem.	HVIII	11.44	22	-85	-28				
Parietallappen									
Links inf. parietal (angularis)	39	7.70	-38	-72	46				
Rechts inf. parietal (angularis)	39	7.02	46	-68	31				
Rechts inf. parietal (supramarginal)	40	5.81	53	-32	26				
Rechts superior parietal	5,7	6.98	26	-68	48				
Präfrontallappen									
Links inf. frontal (Operculär)	44	5.97	-40	12	10				
Links mittel präfrontal	10	6.10	-32	33	39				
Rechts mittel präfrontal	10	5.07	42	23	41				
Temporallappen									
Links post. sup. temporal	22/40	6.36	-51	-28	16				
Rechts post. sup. temporal	22/40	5.97	58	-48	17				
Basal Ganglien									
Rechter Nukleus Caudatus		6.82	6	12	-1				

5.4.6. Mittelwerte

	1 = Amateure 2 = Profis	N	Mittelwert	Standard- abweichung	Standardfehler des Mittelwertes
Konzentration auf die Aufgabe	1	8	6,73	1,74	0,61
	2	8	8,28	1,12	0,40
Vorstellung Musik	1	8	8,19	0,90	0,32
	2	8	8,83	0,91	0,32
Vorstellung Bewegung	1		6,25	2,06	0,72
	2		8,94	0,94	0,33
Vorstellung Tonhöhe	1	8	8,08	1,10	0,45
	2	8	9,34	0,76	0,27
Vorstellung Rhythmus	1	8	6,34	2,84	1,00
	2	8	9,59	0,67	0,24
Beginn des Instrumentalunterrichts	1	8	9,50	4,28	1,51
	2	8	6,75	1,58	0,56
Dauer der Zeit, in der das Instrument gespielt wurde	1	8	12,00	3,59	1,27
	2	8	35,63	6,37	2,25
Dauer des Pausierens	1	8	11,14	12,71	4,80
	2	8	0,00	0,00	0,00
Übungsstunden pro Woche	1	8	1,45	1,60	0,57
	2	8	30,88	3,95	1,40
Alter der Probanden	1	8	31,25	17,04	6,02
	2	8	42,38	5,50	1,95

5.4.7. t-Test für unabhängige Stichproben zwischen Amateuren und Profis

	N	Levene-Test der Varianzgleichheit			t-Test für die Mittelwertgleichheit				
		Varianz	F	Sign.	T	df	Sign.	Mittl. Differenz	Standardfehler d. Diff.
Konzentration auf die Aufgabe	8	gleich	0,91	0,36	-2,12	14	0,52	-1,55	0,73
	8	ungleich			-2,12	11,99	0,56	-1,55	0,73
Vorstellung Musik	8	gleich	0,001	0,98	-1,41	14	0,18	-0,64	0,45
	8	ungleich			-1,41	13,99	0,18	-0,64	0,45
Vorstellung Bewegung	8	gleich	1,28	0,28	-3,36	14	0,005	-2,69	0,79
	8	ungleich			-3,36	9,80	0,007	-2,69	0,79
Vorstellung Tonhöhe	8	gleich	2,03	0,18	-2,53	12	0,26	-1,25	0,49
	8	ungleich			-2,40	8,45	0,42	-1,25	0,52
Vorstellung Rhythmus	8	gleich	29,82	0,00	-3,45	14	0,007	-3,25	1,03
	8	ungleich			-3,45	7,77	0,014	-3,25	1,03
Beginn des Instrumentalunterrichts	8	gleich	2,67	0,13	1,71	14	0,11	2,75	1,61
	8	ungleich			1,71	8,88	0,12	2,75	1,61
Dauer der Zeit, in der das Instrument gespielt wurde	8	gleich	1,26	0,28	-9,14	14	0,00	-23,62	2,58
	8	ungleich			-9,14	11,03	0,00	-23,62	2,58
Dauer des Pausierens	8	gleich	34,48	0,00	2,49	13	0,02	11,14	4,46
	8	ungleich			2,32	3,00	0,06	11,14	4,80
Übungsstunden pro Woche	8	gleich	7,97	0,14	-19,52	14	0,00	-29,43	1,50
	8	ungleich			-19,52	9,24	0,00	-29,43	1,50
Alter der Probanden	8	gleich	8,21	0,12	-1,76	14	0,10	-11,13	6,24
	8	ungleich			-1,76	8,45	0,11	-11,13	6,24

5.4.8. Korrelationen

Profis

Korrelationen

		Konzentration auf die Aufgabe	Vorstellung Musik	Vorstellung Bewegung	Vorstellung Tonhöhe	Vorstellung Rhythmus	BEGINN	Lebensspielzeit	PAUSE	PROWOCH
Konzentration auf die Aufgabe	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	1,000	,789*	,381	,133	-,035	-,607	,474		-,789*
	N	8	,020	,351	,753	,935	,110	,236	, ^a	,020
Vorstellung Musik	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,789*	1,000	,104	,224	,102	-,522	,390	, ^a	-,510
	N	8	,020	,806	,595	,811	,184	,340	, ^a	,196
Vorstellung Bewegung	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,381	,104	1,000	,743*	-,408	-,406	,449	, ^a	-,356
	N	8	,806	,035	,035	,316	,318	,264	, ^a	,386
Vorstellung Tonhöhe	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,133	,224	,743*	1,000	,818*	-,383	,407	, ^a	-,012
	N	8	,595	,035	,035	,013	,349	,317	, ^a	,977
Vorstellung Rhythmus	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,035	,102	,408	,818*	1,000	-,287	,210	, ^a	,264
	N	8	,811	,316	,013	,490	,617	,617	, ^a	,527
BEGINN	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,607	-,522	-,406	-,383	-,287	1,000	-,635	, ^a	,074
	N	8	,184	,318	,349	,490	,8	,091	, ^a	,861
Lebensspielzeit	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,474	,390	,449	,407	,210	-,635	1,000	, ^a	-,340
	N	8	,340	,264	,317	,617	,091	,8	, ^a	,410
PAUSE	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	, ^a	, ^a	, ^a	, ^a	, ^a	, ^a	, ^a	, ^a	, ^a
	N	8	,8	,8	,8	,8	,8	,8	, ^a	,8
PROWOCH	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,789*	-,510	-,356	-,012	,264	,074	-,340	, ^a	1,000
	N	8	,196	,386	,977	,527	,861	,410	, ^a	,8

*. Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

^a. Kann nicht berechnet werden, da mindestens eine der Variablen konstant ist.

Amateure

Korrelationen

		Konzentration auf die Aufgabe	Vorstellung Musik	Vorstellung Bewegung	Vorstellung Tonhöhe	Vorstellung Rhythmus	BEGINN	Lebensspielzeit	PAUSE	PROWOCH
Konzentration auf die Aufgabe	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	1,000	,664	,618	,643	,105	-,444	,099	-,605	,019
	N	8	,072	,102	,168	,804	,270	,816	,150	,964
Vorstellung Musik	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,664	1,000	,376	,154	-,506	-,574	,261	-,770*	,073
	N	8	,072	,358	,771	,201	,137	,532	,043	,864
Vorstellung Bewegung	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,618	,376	1,000	,046	-,385	-,432	,242	-,152	-,137
	N	8	,358	,931	,346	,285	,563	,745	,745	,747
Vorstellung Tonhöhe	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,643	,154	,046	1,000	,012	-,219	-,096	-,377	,298
	N	6	,771	,931	,931	,982	,677	,857	,531	,566
Vorstellung Rhythmus	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,105	-,506	,385	,012	1,000	,135	-,182	,457	-,087
	N	8	,201	,346	,982	,751	,666	,303	,7	,837
BEGINN	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,444	-,574	-,432	-,219	,135	1,000	,373	,827*	,643
	N	8	,137	,285	,677	,751	,8	,363	,022	,086
Lebensspielzeit	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,099	,261	,242	-,096	-,182	,373	1,000	,329	,829*
	N	8	,532	,563	,857	,666	,363	,8	,471	,011
PAUSE	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,605	-,770*	-,152	-,377	,457	,827*	,329	1,000	,406
	N	7	,043	,745	,531	,303	,022	,471	,7	,367
PROWOCH	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,019	,073	-,137	,298	-,087	,643	,829*	,406	1,000
	N	8	,864	,747	,566	,837	,086	,011	,367	,8

*. Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

5.4.9. Mittelwerte VAS-Fragebogen Profis

	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standard- abweichung
1) Üben Sie zusätzlich zum tatsächlichen Üben auch mental?	8	,60	9,40	5,76	3,29
2a) Gehen Sie die zu spielende Musik im Kopf durch, um sich den Bewegungsablauf klar zu machen?	8	,80	9,20	6,15	3,26
2b) Gehen Sie die zu spielende Musik im Kopf durch, um die Erinnerung zu stärken?	8	1,80	9,10	5,68	3,17
2c) Gehen Sie die zu spielende Musik im Kopf durch, um den musikalischen, klanglichen Überblick zu bekommen?	8	,50	10,00	6,20	3,72
2d) Gehen Sie die zu spielende Musik im Kopf durch, um sich in einer Konzertsituation sicherer zu fühlen?	8	,00	9,50	6,03	3,84
3) Entspannen Sie sich aktiv vor dem mentalen Üben?	8	,00	4,20	1,14	1,39
4a) Wenn Sie ein Stück auswendig lernen, memorieren Sie dann die Notennamen und Rhythmus?	8	,20	9,30	3,86	3,59
4b) Wenn Sie ein Stück auswendig lernen, memorieren Sie die Bewegungsabläufe, z.B. Fingersätze?	8	1,50	10,00	7,16	2,90
4c) Wenn Sie ein Stück auswendig lernen, machen Sie sich den Aufbau des Werkes klar?	8	1,70	10,00	6,50	3,11
4d) Wenn Sie ein Stück auswendig lernen, stellen Sie sich die Noten visuell vor?	8	2,30	8,80	5,30	2,75
5a) Wenn Sie mental üben, üben Sie hauptsächlich das Auswendiglernen?	8	,60	8,80	4,55	2,91
5b) Wenn Sie mental üben, üben Sie hauptsächlich eher Technik, z.B. einzelne schwere Stellen?	8	2,70	9,40	7,01	2,34
5c) Wenn Sie mental üben, üben Sie hauptsächlich eher musikalische Elemente?	8	,60	10,00	6,44	3,51
6a) Wie ist Ihre Vorstellung, wenn Sie mental üben? Wie oft stellen Sie sich die Bewegungen vor?	8	,00	9,50	6,05	3,48

6b) Wie ist Ihre Vorstellung, wenn Sie mental üben? Hören Sie eher innerlich den Klang?	8	7,20	9,70	8,58	,97
6c) Wie ist Ihre Vorstellung, wenn Sie mental üben? Sehen Sie eher die Noten vor Ihrem inneren Auge?	8	,60	8,00	2,74	2,55
7) Wie oft nehmen Sie sich bewusst Zeit, um ein schweres Stück im Kopf zu üben?	8	,90	9,60	4,18	3,30
8) Wenn Sie eine technisch schwere Stelle erarbeiten müssen, machen Sie sich den Bewegungsablauf auch im Kopf und ohne Instrument klar?	8	2,00	9,60	7,39	2,85
9a) Wenn Sie eine technische Stelle im Kopf üben, bewegen Sie die Finger oder Arme mit?	8	4,50	9,30	6,99	1,58
9b) Wenn Sie eine musikalische Stelle im Kopf üben, bewegen Sie die Finger oder Arme mit?	8	,20	7,80	3,26	2,95
10) Wenn Sie die Bewegungen, z.B. einen Lagenwechsel, im Kopf geübt haben, haben Sie dann das Gefühl, eine schwere Stelle ist nach dem mentalen Üben sicherer oder besser als vorher?	8	2,60	9,80	8,05	2,35
11) Üben Sie mental nur im Zusammenhang mit dem Instrument oder üben Sie auch mental, wenn Ihnen das Instrument nicht zur Verfügung steht, beispielsweise im Auto oder im Zug?	8	,50	9,40	6,39	3,08

5.5. Abbildungen

Abb. 1

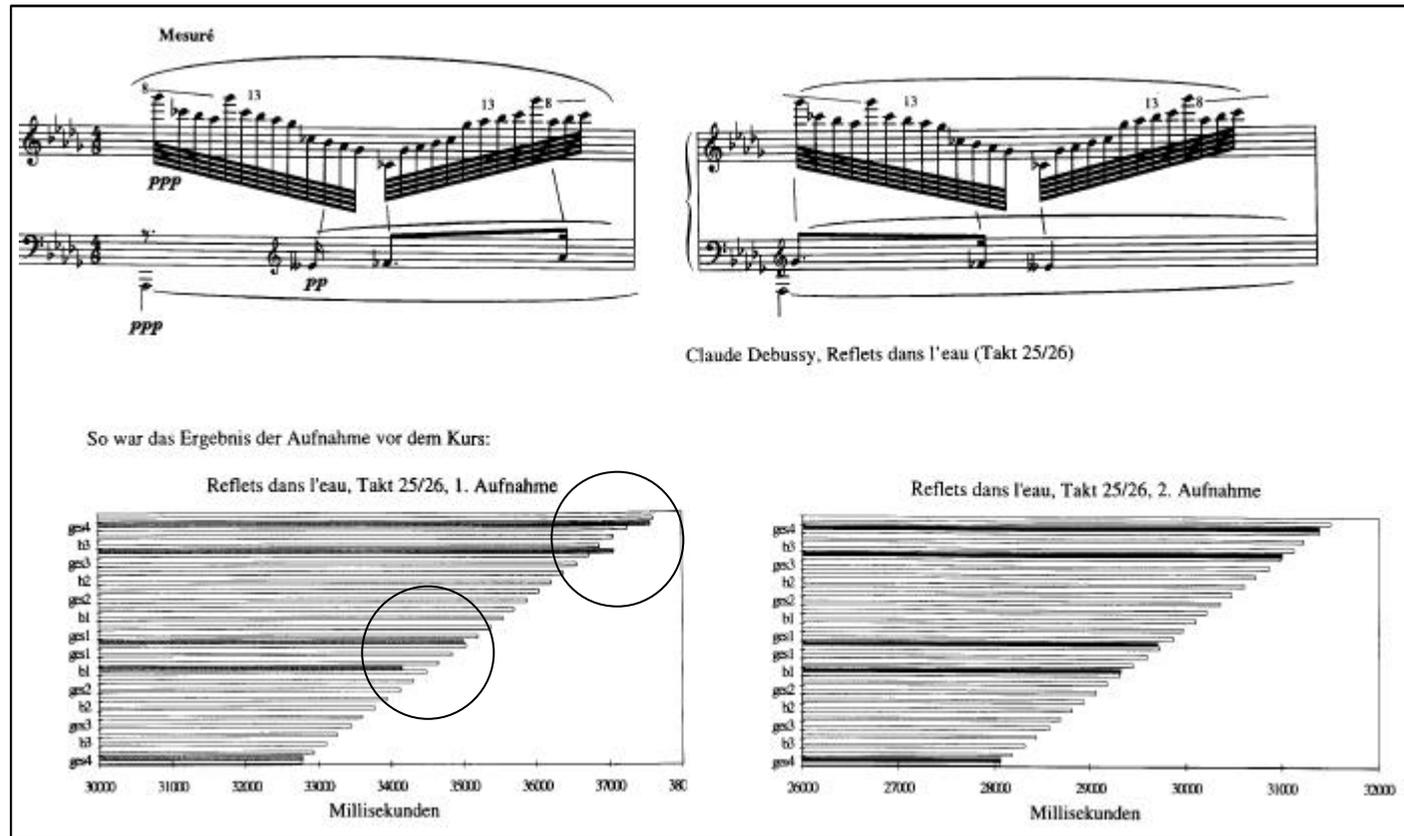


Abb.1: Effektivität mentalen Übens gemessen mit einem MIDI Flügel vor und nach dem Training bei einer Pianistin. Aus dem Buch von R. Klöppel, R. (1996): Mentales Training für Musiker (siehe S. 24)

Abb. 2

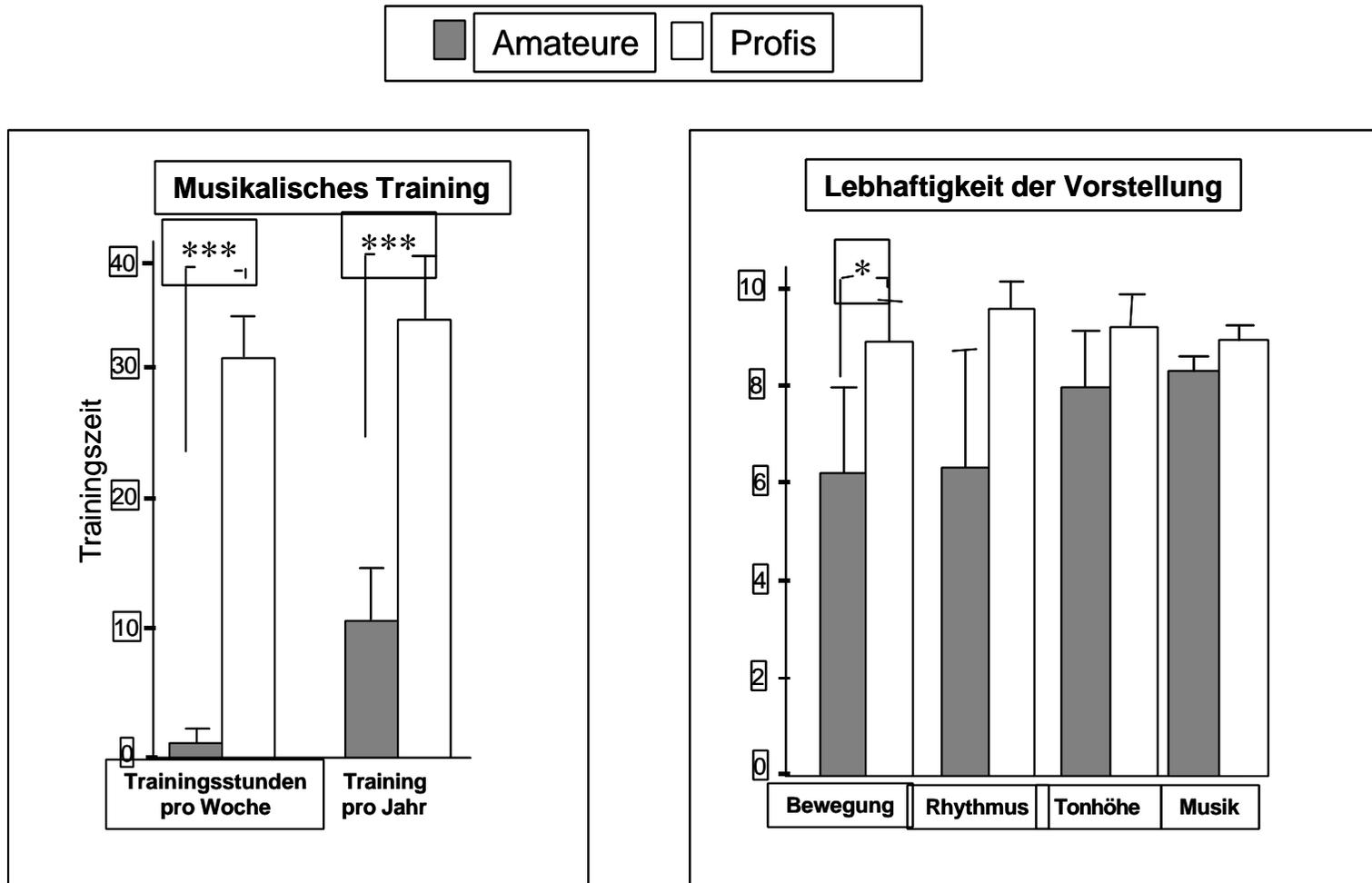


Abb. 3

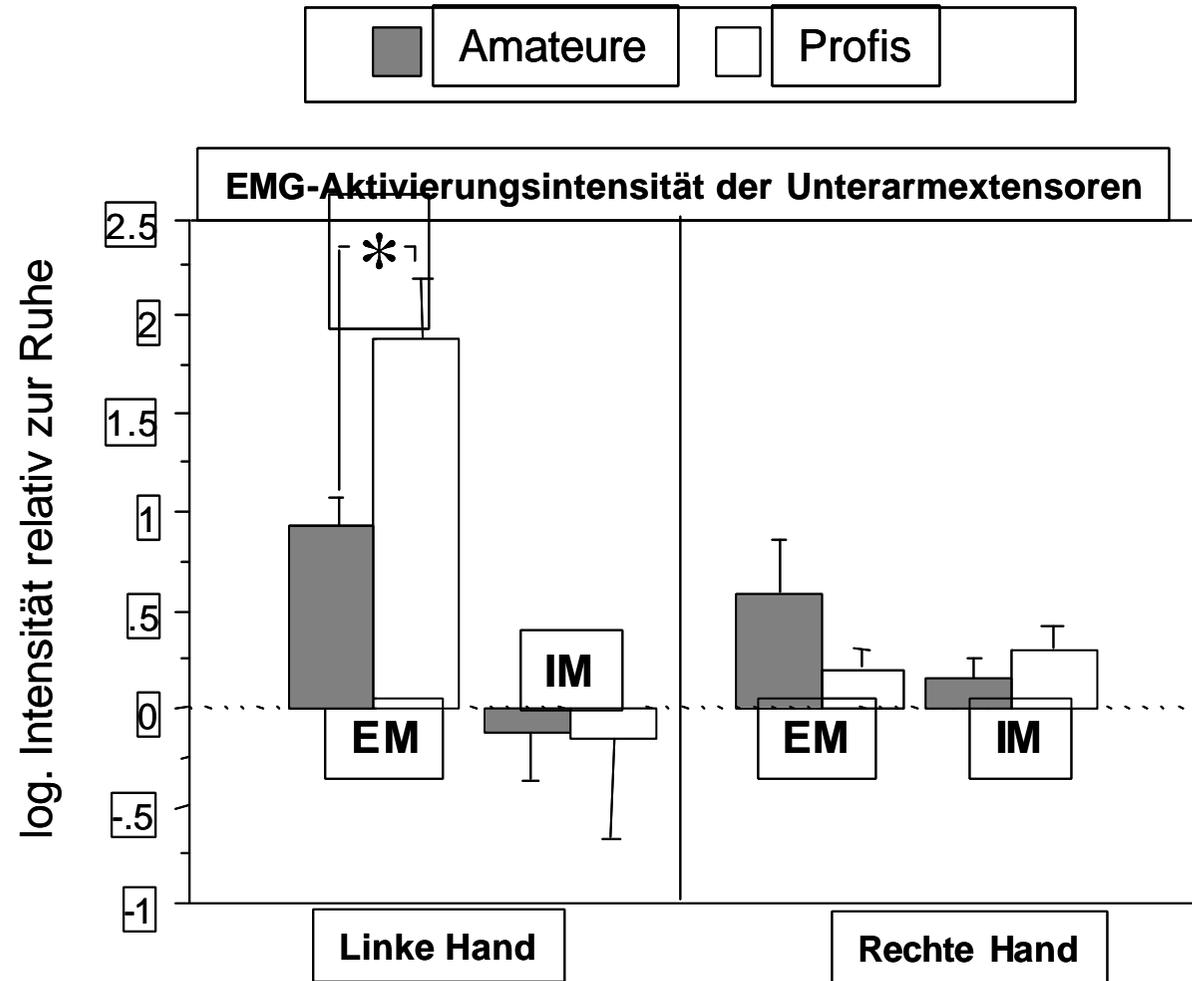


Abb. 4

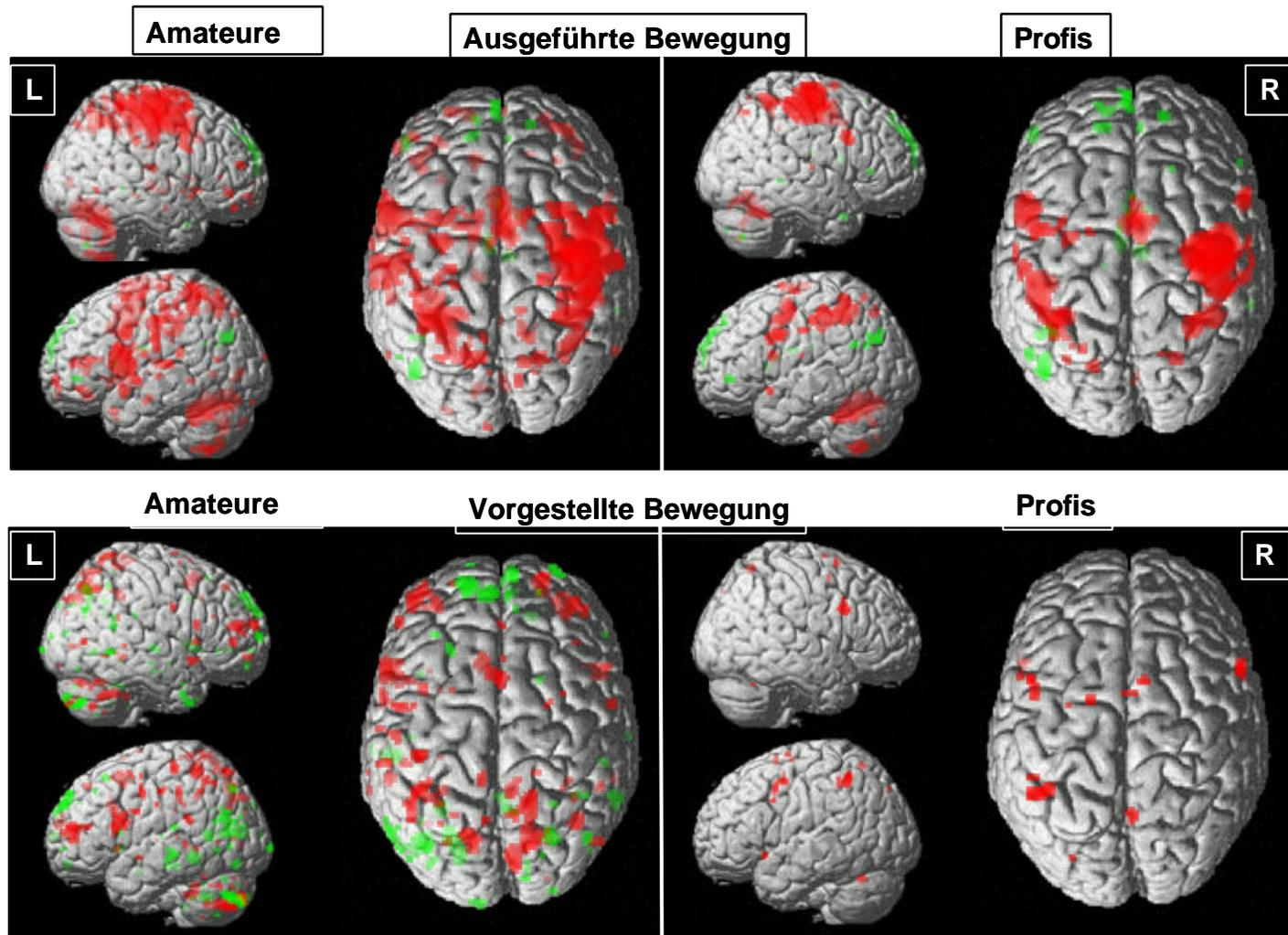


Abb. 4: Haupteffekt
fMRI Aktivierungen von Aktivität gegen Ruhe während ausgeführter (oben) und vorgestellter (unten) Bewegungen bei Amateuren und Profis. Das 3D-segmentierte Gehirn ist von oben, lateral rechts und links dargestellt. Erhöhte BOLD-Effekte während der Aufgaben sind rot dargestellt, erniedrigte BOLD-Effekte grün.

Abb. 5

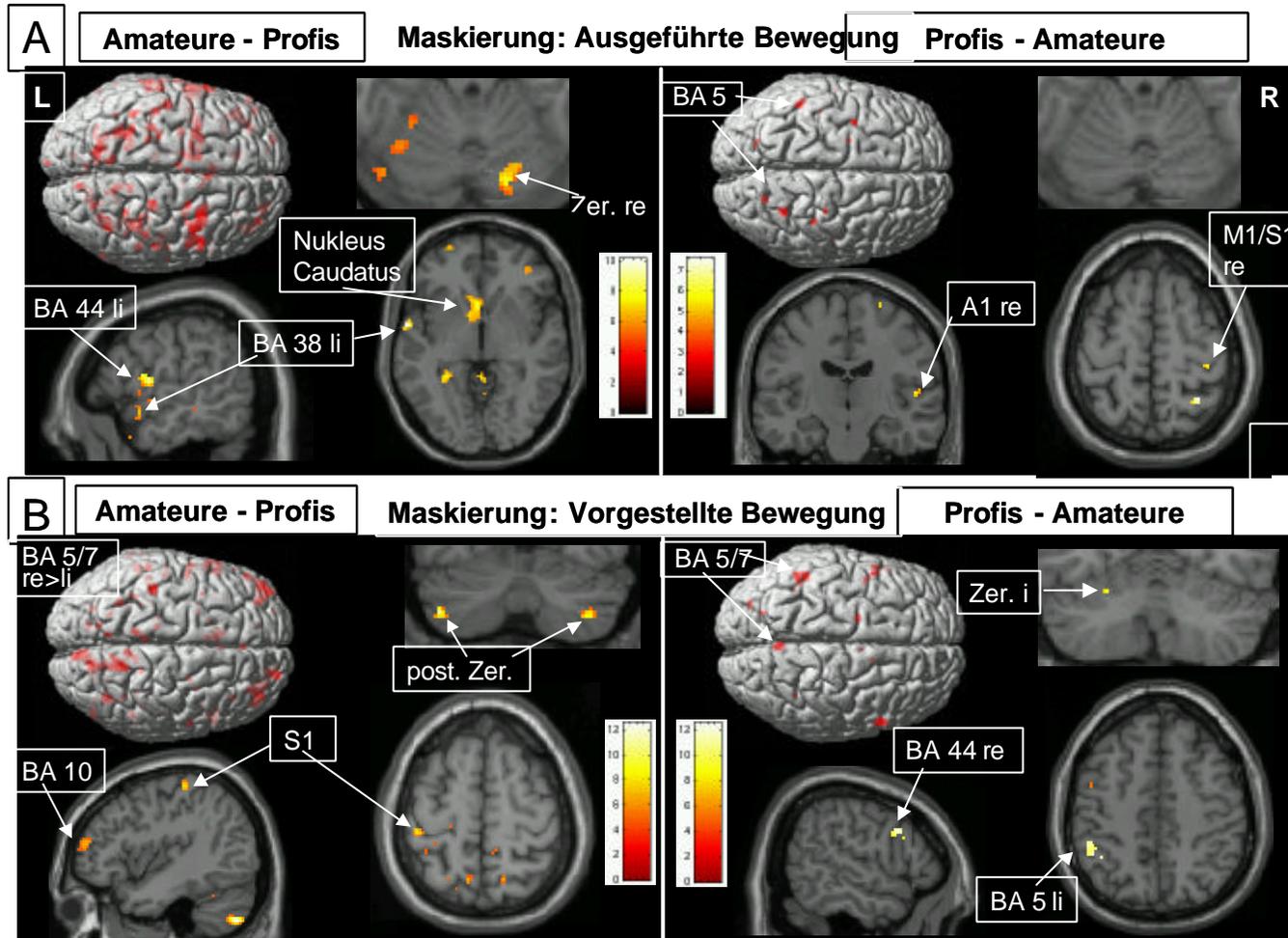


Abb.5: Differenzbild

Exklusive Maskierung zwischen den Aktivierungskarten von Amateuren und Profis. Die Ansicht des Gehirns von oben ist ein segmentiertes SPM Gehirn. Ein individuelles Gehirn und einzelne Schichten stehen für die Ergebnisse der Maskierungen. Nur einige Areale sind mit Pfeilen beschrieben. Die Intensität der Aktivierungen (t Werte), die auf die anatomischen Schichten projiziert sind, sind farbkodiert (rot: schwache Aktivierung; gelb/weiß: starke Aktivierung).

6. Diskussion

In dieser Studie wurden die neuronalen Aktivierungskarten von professionellen Streichern und Amateuren in einer komplexen Vorstellungsaufgabe mittels fMRI untersucht. Es wurde geprüft, welche Areale beim mentalen Üben aktiviert waren und dann verglichen, ob diese denen ähneln, die während der Ausführung dieser Bewegungen aktiviert waren und ob sich die Areale der beiden Gruppen voneinander unterschieden.

Um eine Beteiligung der Muskulatur der Arme, vor allem des linken Armes, beurteilen zu können, wurde während der Vorstellungsaufgabe ein EMG abgeleitet. Es wurden keine höheren Werte im Vergleich zur Ruhebedingung gemessen, was eine Ausführung der Fingerbewegungen während der Vorstellungsaufgabe weitgehend ausschließt (siehe Abb. 3).

Die Aktivierungen beider Gruppen unterschieden sich deutlich. Die Profis zeigten weniger Cluster von BOLD Signalen. Die Amateure zeigten weit verstreute Aktivität in beiden Hemisphären. Die prominenten Deaktivierungen der Amateure lagen in Arealen, die bereits in früheren Studien bei visuellen, motorischen und sprachlichen Aufgaben beschrieben wurden (Gusnard and Raichle 2001) und werden nicht weiter diskutiert, da sie in keinem spezifischen Zusammenhang mit der musikalischen Aufgabe stehen.

Es ist bekannt, dass erfahrene Musiker mentales Üben einsetzen um sowohl die Qualität ihres Musizierens zu verbessern als auch um sich dem ästhetisch emotionalen Konzept des zu spielenden Stückes anzunähern. Profis entwickeln im Lauf der Zeit ein sensibilisiertes Vermögen für die Beurteilung des Feedbacks während des Spielens. Je größer die Erfahrung und die Sensibilität der Wahrnehmung beim Instrumentalspiel sind, desto lebhafter und klarer kann sich die Vorstellung von der Interpretation und deren motorischer Umsetzung entwickeln. Die Profis schätzten die Lebhaftigkeit ihrer Vorstellung für die Bewegungen signifikant höher ein als die Amateure (siehe Abb. 2). Die Vorstellung von Rhythmus und Tonhöhe korrelierte positiv mit der Lebensspielzeit und der Menge des wöchentlichen Trainings. Um die Art und Wichtigkeit des mentalen Übens bei den im mentalen Üben erfahrenen Profis

zu verstehen, wurden sie mit einem a posteriori Fragebogen anhand einer VAS Skala über die Art ihrer mentalen Übungserfahrung befragt. Sie übten bevorzugt schwere Stellen mental, konzentrierten sich auf konkrete Bewegungen und die Tongestaltung und berichteten von einer Verbesserung ihres Spiels nach dem mentalem Training.

Schon früher konnte gezeigt werden, dass die komplexen räumlichen und zeitlichen Komponenten einer musikalischen Darbietung während mentalen Trainings durch ein neuronales Netzwerk koordiniert werden, das supplementär- und prämotorische, laterale zerebelläre, superior parietale und superior frontale Regionen einschließt (Langheim et al. 2002). Die Wissenschaftler folgern, dass bewusste Imagination einer musikalischen Darbietung nicht direkt mit Aktivität in primären motorischen oder auditorischen Arealen zusammenhängt, sondern dass diese Imagination kortikale Netzwerke involviert, die für die Integration von auditorischer Information mit dem zeitlichen und den durch unterschiedliche Tonhöhen bedingten Anforderungen des zu spielenden Stückes zusammenhängen. In dieser Studie wurden durch die komplexe Aufgabenstellung, die mit einer musikalischen Darbietung und deren Imagination verbunden ist, motorische Areale höherer Ordnung aktiviert. Sowohl bei der ausgeführten als auch bei der vorgestellten Bewegung zeigten sich in beiden Gruppen signifikante BOLD-Signale in verschiedenen motorischen Arealen wie dem PMC, der SMA, dem Zerebellum und bilateral im Parietallappen (siehe Abb. 4), welche die Annahme unterstützen, dass ausgeführte und vorgestellte Bewegung ähnliche neuronale Netzwerke aktivieren (Jeannerod 1995; Stephan et al. 1995; Jueptner et al. 1997a; Jueptner et al. 1997b; Luft et al. 1998; Jeannerod and Frak 1999; Lotze et al. 1999; Binkofski et al. 2000; Gerardin et al. 2000; Jeannerod 2001; Naito et al. 2002; Kutz-Buschbeck et al. 2003; Meister et al. 2004). Die erste Hypothese, die ähnlich aktivierte neuronale Netzwerke bei EM und IM vermutete, kann durch diese Ergebnisse bestätigt werden.

Im direkten Vergleich aktivierten die Profis sehr viel weniger und umschriebene Areale als die Amateure, die weit verstreute Aktivierungsregionen zeigten, was sich bei ihnen in einem niedrigeren Einschätzungswert für die

Bewegungsvorstellung widerspiegelte (siehe Abb. 2). Es wird berichtet, dass professionelle Musiker kleinere Areale für komplexe nichtpianistische fingermotorische Aufgaben aktivieren, da aufgrund des motorischen Langzeittrainings für dieselbe Bewegung weniger Neurone rekrutiert werden müssen (Jancke et al. 2000; Krings et al. 2000). Auch scheint bei motorisch hochtrainierten Spezialisten insgesamt die Aktivierung kortikaler Areale ökonomischer zu sein, da sie wegen ausgereifterer Kontrollmodelle weniger kognitiven Aufwand zur Programmierung komplexer Bewegungsabläufe brauchen (Fattapposta et al. 1996), wie auch die Aktivierungen der Profis unserer Studie bei der ausgeführten Bewegung zeigten. Die Ähnlichkeit ihrer Aktivierungsmuster während IM und EM könnte eine Vertrautheit mit den auszuführenden Bewegungen beschreiben. Die durch die Erfahrung verminderte Bedeutung sensorischen Feedbacks ermöglicht ein präzises Bewegungsgefühl und ist offenbar ein entscheidender Parameter, um mentales Training erfolgreich einsetzen zu können (Orloff-Tschekorsky T. 1996; Deiber et al. 1997). Die Distanzierung von den tatsächlichen Bewegungen ist ein Abstraktionsprozess, der von der Vorerfahrung abhängig ist (Mantel 1999; Cumming and Hall 2002) und erklärt, warum sich bei IM nur noch Aktivierungen in Arealen höherer Ordnung zeigten, die mit die mit Bewegungsprogrammen (Zerebellum), Bewegungstrajektorien (parietal superior) und der bimanuellen (PMC) und zeitlichen (SMA, Zerebellum) Koordination in Zusammenhang stehen.



Abb. 6: Haupteffekt
 fMRI Aktivierungsergebnisse bei Amateuren und Profis. Die Aktivierungen Vorstellung gegen Ruhe sind in rot dargestellt, die Deaktivierungen der gleichen Bedingung in grün. Die Amateure zeigten weit verbreitete Aktivität, die Profis umschriebene Aktivierungsareale.

Aufgrund der weniger versierten Technik beim Instrumentalspiel zeigten die Amateure sowohl während EM als auch während IM Aktivierungsareale, die nicht an der direkten Bewegungsausführung beteiligt und besonders aktiv bei der Organisation von Bewegungsabfolgen und der sensorischen Integration von Bewegungen sind (ipsilateraler PMC; SMA, inferiorer Parietallappen bilateral posteriores inferiores Zerebellum).

Primäre sensomotorische Areale

Das Fehlen von Aktivierung in M1 in beiden Gruppen entspricht Beobachtungen von Meister und seinen Kollegen (Meister et al. 2004), die eine Gruppe von Musikstudenten mit einer durchschnittlichen Lebensspielzeit von 18.4 Jahren (Vergleich: die Profis in dieser Studie hatten eine durchschnittliche Lebensspielzeit von 35.6 und die Amateure von 12 Jahren) untersuchten. Alle Studenten in Meisters Studie schätzten die Lebhaftigkeit ihrer Vorstellung als hoch ein. In unserer Studie korrelierte die Selbsteinschätzung der Profis von einer Verbesserung nach mentalem Üben in dieser Studie negativ mit der cM1-Aktivierung während der Imagination. Da alle Profis mentales Training im Rahmen ihrer Berufsausübung regelmäßig einsetzen kann angenommen werden, dass mit steigendem Gebrauch von IM eine niedrigere Aktivität im rechten präzentralen Gyrus einhergeht. Auch wenn in vielen Studien die Beteiligung von M1 bei der Imagination nachgewiesen wurde, wird angenommen, dass die Beteiligung von M1 in Zusammenhang mit der Komplexität der Vorstellungsaufgabe steht. Während mentalen Trainings neu gelernter und einfacher Fingerbewegungen wird häufiger eine M1 Aktivierung beschrieben (Lotze et al. 1999) als bei komplexen Vorstellungsaufgaben wie dem Spielen eines Instrumentes (Langheim et al. 2002). Aktivität in den postzentralen Regionen während IM wurde nur bei den Amateuren gesehen. Über Aktivität in somatosensorischen Regionen während der Bewegungsimagination wird selten berichtet (Shibasaki et al. 1993; Lotze et al. 1999). Für die Amateure ist die Integration des sensorischen Feedbacks jedoch von entscheidender Bedeutung für das Ausführen einer Bewegung (Mantel 1999). Da ohne die entsprechende Erfahrung mental nur ansatzweise trainiert

werden kann, könnte das Bedürfnis nach sensorischem Feedback die Aktivierung in S1 bei den Amateuren während der Vorstellungsaufgabe erklären. Durch die gänzliche fehlende Erfahrung im mentalen Üben und die Konfrontation mit der sehr komplexen Imaginationsübung kann in Zusammenhang mit den weit verstreuten Aktivierungsclustern die Aktivität in S1 einen insgesamt diffuseren Zugang zur Vorstellungsaufgabe beschreiben.

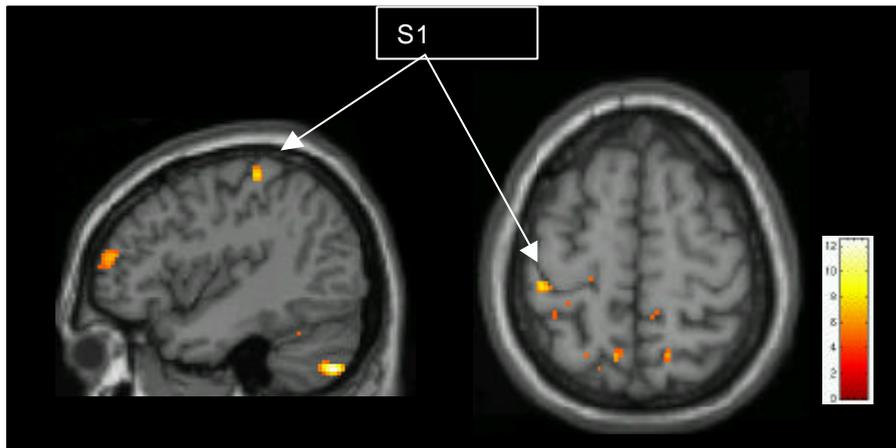


Abb. 7: Haupteffekt
Ipsilaterale Aktivierung in S1 bei den Amateuren

Sekundär motorische Areale

Die verstärkte Aktivierung in der SMA, die bei den Profis beobachtet wurde, kann in enger Beziehung zu ihrer Erfahrung im mentalen Üben gesehen werden. Diese Region wird im Zusammenhang mit motorischer Vorstellung (Tyszka et al. 1994; Deiber et al. 1998; Jeannerod 2001; Ruby and Decety 2001) und mit anspruchsvoller motorischer Kontrolle (Picard and Strick 1996) beschrieben. Aktivierung in der SMA wird auch bei musikalischer Vorstellung berichtet, die möglicherweise das motorische Programm der musikalischen Umsetzung impliziert (Halpern and Zatorre 1999; Halpern and O'Connor 2000). Die Profis berichteten hauptsächlich schwere Stellen, d.h. schnelle und komplizierte Passagen, mental zu üben, deren in der SMA gespeicherte Bewegungsengramme beim mentalen Training abstrahiert überprüft werden können und sich daher nach dem Üben sicherer präsentieren lassen.

Die Aktivierung der Profis und der Amateure im linken PMC korrespondierten mit Ergebnissen früherer Studien, in denen gezeigt wurde, dass der linke PMC eine Rolle bei der Kontrolle beider Hände spielt (Hlustik et al. 2002) und Läsionen des linken PMC zu Koordinationsschwierigkeiten der Hände führen (Halsband and Freund 1993). In Übereinstimmung mit den Ergebnissen von Kutzt-Buschbeck (Kutzt-Buschbeck et al. 2003) konnten wir zeigen, dass bei den Profis nur die anterioren Anteile des PMC während IM aktiviert waren, während bei EM auch posteriore Anteile aktiviert waren. Dieser rostrocaudale Gradient wurde auch von Gerardin (Gerardin et al. 2000) beschrieben. Es wird vermutet, dass in den anterioren Anteilen kognitive Aspekte wie die Bewegungsauswahl, die Bewegungsvorbereitung und mentale Bewegungsvorstellung (Halsband and Freund 1990; Gerardin et al. 2000) und die Imagination komplexer Bewegungen (Catalan et al. 1998; Hanakawa et al. 2003) stattfinden.

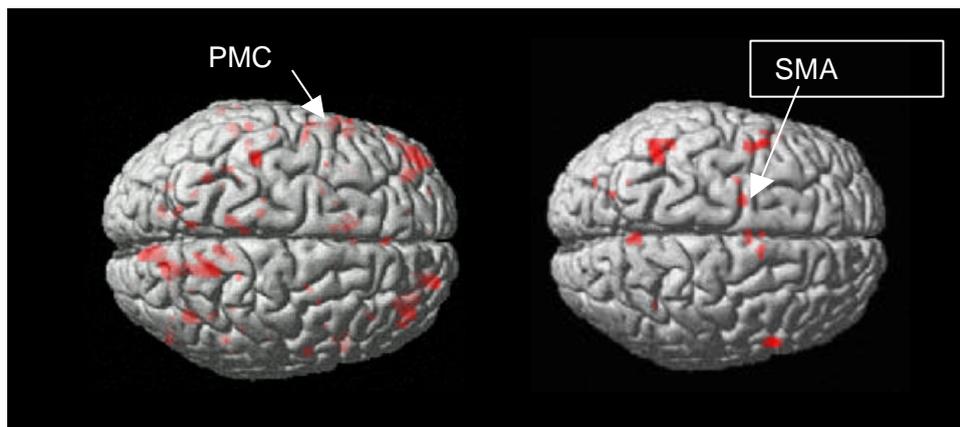


Abb. 8: Haupteffekt
Aktivierung im PMC bei den Amateuren (links) und in der SMA bei den Profis (rechts).

Zerebellum

Im direkten Vergleich zeigten die Profis sehr viel weniger zerebelläre Aktivierungen im Gegensatz zu den Amateuren, die bilateral vor allem auch posteriore Regionen aktivierten. Durch das Zerebellum werden grundlegende zeitliche Informationen einer Bewegung gesteuert (Mathiak et al. 2002) sowie deren genaue Umsetzung in die motorischen Befehle (Kawashima et al. 2000).

Das Zerebellum ist für die Integration einer geplanten Bewegungsrepräsentation mit dem sensorischen Eingang zuständig, der die aktuelle Information für die auszuführende Bewegung liefert (Braitenberg et al. 1997) und ist ein Mediator für den Zirkel von eingehender, fortlaufender und rückkoppelnder Information, der die zeitlich angemessenen motorischen Antworten steuert (Penhune and Doyon 2002). Im Gegensatz zu den Amateuren aktivierten die Profis nur ipsilateral ein Areal in der anterioren zerebellären Region, das auch während EM aktiviert war und in dem Aktivität bei Bewegungen der Hände in der somatosensorischen Handregion des Zerebellums (Grodd et al. 2001) beschrieben wird. Es weist auf ein Zugreifen auf gespeicherte Bewegungsprogramme bei sequentiellen Fingerbewegungen während IM hin.

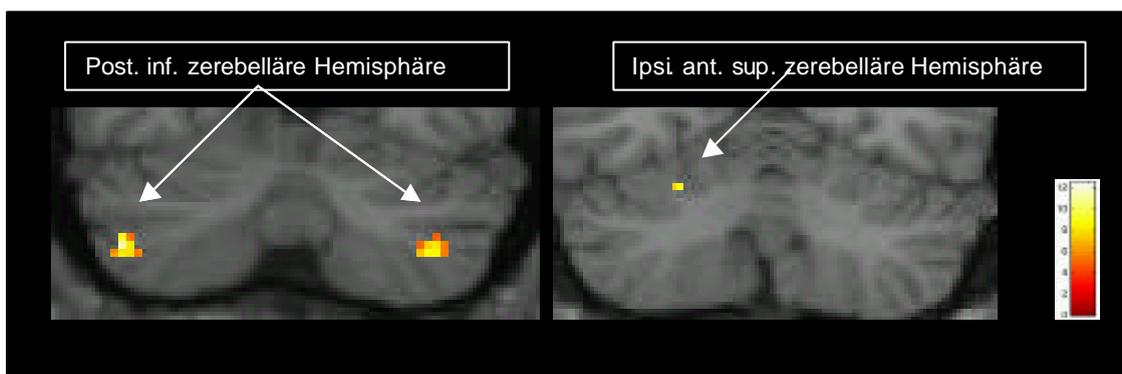


Abb. 9: Differenzbild
Verstärkte Aktivierungen der Amateure (links) und der Profis (rechts) im Zerebellum.

Die höhere posteriore zerebelläre Aktivität bei den Amateuren kann mit einer erhöhten Inhibition zusammenhängen, da sie sich wegen der mangelnden Erfahrung in der Bewegungsvorstellung mehr anstrengen mussten, um eine tatsächliche Bewegung zu vermeiden. Lotze und Kollegen zeigten bereits 1999, dass die Aktivierung in der posterioren zerebellären Hemisphäre (Larsell lobule H VI-VIIc) als Inhibition der aktuellen Bewegung während der Bewegungsvorstellung interpretiert werden kann. Diese Ergebnisse werden durch eine Studie von Sakai und Kollegen (Sakai et al. 1998b) bekräftigt, die Aktivierung in derselben zerebellären Region während eines „No go task“ zeigte. Die Probanden hatten die Aufgabe, die Ausführung einer Bewegung

aktiv zu unterdrücken. Posteriore zerebelläre Aktivierung zeigt sich auch bei neuen schwierigen Aufgabenstellungen, welche Aufmerksamkeit beanspruchen (Allen et al. 1997). Bilaterale zerebelläre posteriore Aktivierung wird bei der Reproduktion komplexer Rhythmen gefunden (Penhune et al. 1998). Im Gegensatz zu unseren Daten fanden Langheim und Kollegen (Langheim et al. 2002) bei allen Probanden bilaterale zerebelläre Aktivierung, was eventuell durch den Unterschied im Studiendesign zu erklären ist. Sie untersuchten keine professionellen Spieler mit so langer Trainingszeit wie wir, sondern Musikstudenten und stellten eine bimanuelle Imaginationsaufgabe. Beide lateralen Areale waren bei den Amateuren während IM stärker aktiviert als während EM.

Auditorischer Kortex

In Übereinstimmung mit der Studie von Langheim und seinen Kollegen (Langheim et al. 2002) war der rechte primäre auditorische Kortex in beiden Gruppen nicht aktiviert, obwohl die Vorstellung von Tonhöhe und Musik während IM hoch eingeschätzt wurde. Während der ausgeführten Bewegung zeigten die Profis hohe Aktivität im rechten Heschelschen Gyrus. Trotz des fehlenden akustischen Feedbacks im MR-Tomographen hatte sich die jahrzehntelange simultane Aktivität zwischen dem motorischen und dem akustischen System zur festen Verarbeitungsschleife eingepreßt (Bangert et al. 2001; Haueisen and Knosche 2001). Bei der Vorstellung hingegen kam es trotz der Praxis der Profis im mentalem Training nicht zu einer Aktivierung der primären akustisch – motorischen Schleife. Diese Verarbeitungsschleife scheint nur dann aktiv zu werden, wenn ein Element tatsächlich angesprochen wird, entweder durch die motorische Ausführung der Fingerbewegungen auf der Geige oder durch das tatsächliche Hören von Musik. Die dritte Hypothese ließ sich daher durch dieses Ergebnis nicht stützen.

Beide Gruppen aktivierten den linken anterioren Temporallappen. Mehr links als rechts wird über Aktivität im anterioren Temporallappen bei Musikern und Nichtmusikern während Gedächtnisaufgaben für Tonhöhenbestimmung berichtet (Gaab and Schlaug 2003). Aktivität in den anterioren Teilen der

superioren Temporallappen werden bei metrischen Aufgaben beschrieben (Liegeois-Chauvel et al. 1998), wie generell die zeitliche Verarbeitung eher dem linken Temporallappen zugeschrieben wird (Zatorre et al. 2002). Ein sicheres Gefühl für ein gleichmäßiges Metrum bildet sich erst nach jahrelangem Training und ermöglicht als notwendiger Hintergrund die agogischen und rhythmischen Variationen eines Musikstückes. Drake und Palmer (Drake and Palmer 2000) haben festgestellt, dass die metrische Unsicherheit einen der signifikanten Unterschiede zwischen Profis und Amateuren darstellt. Da Amateure in geringerem Maße über die Fähigkeit verfügten, während des Spielens kommende Bewegungsprogramme vorzubereiten, müssen sie ihr Spiel unterbrechen, um über anstehende Bewegungen zu entscheiden oder über die Art und Ursache ihrer Fehler nachdenken und sie dann korrigieren zu können. In diesem Zusammenhang muss die Aktivierung im BA 10 bei den Amateuren erwähnt werden, die besonders in Entscheidungssituationen aktiviert ist (Rogers et al. 1999). Die korrekte rhythmische und melodische Umsetzung des Notentextes innerhalb eines festen Metrums bei der Vorstellungsaufgabe kann erklären, dass der linke anteriore Temporallappen sowohl bei den Profis als auch bei den Amateuren aktiviert war, das präfrontale Areal jedoch nur bei den Amateuren. Der posteriore Anteil des superioren Temporallappen, der nur bei den Amateuren aktiviert war, wird beim Verarbeiten des zeitlichen Verlaufs verschiedener Tonhöhen beschrieben (Liegeois-Chauvel et al. 1998). Die besondere Anstrengung der Amateure bei der Vorstellungsaufgabe kann die vermehrte Aktivität in diesen Regionen erklären.

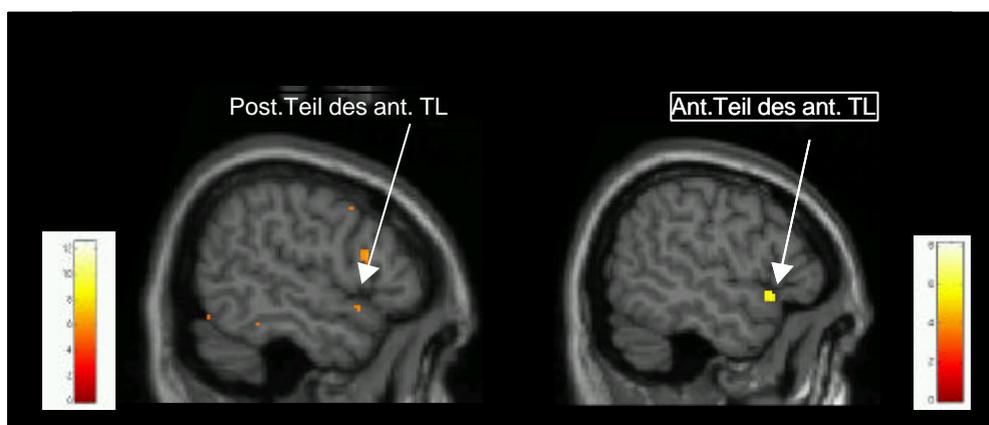


Abb. 10: Differenzbild
Aktivierungen der Amateure im posterioren Teil (links) und der Profis im anterioren Teil des
anterioren Temporallappens.

Parietallappen

Die Profis zeigten umschriebene BOLD Signale bilateral superior und links inferior im Parietallappen, die Amateure weit verstreute bilaterale Aktivierung im superioren und inferioren Parietallappen. Der parietale Kortex und vorzugsweise der linke parietale Kortex scheinen Areale zu sein, in dem motorische Bewegungen in Form von einem internen Modell dieser Bewegung gespeichert sind (Sirigu et al. 1999). Während vor allem der anteriore Anteil (BA 5) die sensomotorischen Programme beim motorischen Lernen speichert (Wolbers et al. 2003), ist der posteriore Anteil (BA 7) auch beim Vorstellen von Bewegungen aktiv (Stephan et al. 1995). Bilaterale Aktivierung im posterioren Parietallappen während mentalen Übens komplexer Fingerbewegungen spiegelt das Abrufen gespeicherter Bewegungssequenzen und die Übersetzung in räumliche Koordinaten und den Bewegungsplan via PMC wieder (Sakai et al. 1998a). In Bezug auf die musikalische Vorstellung wird vermutet, dass der superiore Parietallappen räumlich-analoge Informationen über Tonhöhen speichert und bei der motorischen Ausübung einer musikalischen Aufgabe involviert ist (Sergent et al. 1992; Sergent 1993b), was Langheim und Kollegen in ihrer Studie über mentales Üben bei Musikern bestätigen konnten (Langheim et al. 2002). Die höhere Aktivität der Profis im superioren Parietallappen, die bei der Vorstellung als einzige Regionen während der Vorstellung stärker aktiviert war als bei der Ausführung, weist eventuell auf einen ausgereifteren Zugang zu gespeicherten sensomotorischen Engrammen bezüglich der räumlichen Umsetzung für musikalische Bewegungen hin.

Bei den Amateuren zeigte sich eine höhere Aktivierung im Precuneus und in den inferioren Anteilen des Parietallappens. Aktivierungen im inferioren parietalen Lappen werden während Bewegungsvorbereitung (Decety 1996) und während zielgerichteter Bewegungen (Kawamichi et al. 1998) beschrieben. Aktivierung im Precuneus wurde bei musikalischen Unterscheidungsaufgaben bezüglich Tonhöhe, Rhythmus und Melodien in einer PET Studie nachgewiesen (Platel et al. 1997), in einer MEG Studie folgern Osigo und Kollegen, dass der Precuneus am Wiederfinden der räumlichen Information einer Bewegungen beteiligt ist (Osigo et al. 2000). Aktivierungen im Precuneus werden auch

während visueller Vorstellung beschrieben (Farah 1995). Hohe Einschätzungen für visuelle Aspekte während mentaler Vorstellung korrelieren allerdings nicht mit einer verbesserten motorischen Ausführung nach mentalem motorischem Training (Yaguez et al. 1998; Aleman et al. 2000). Die bei den Amateuren gemessenen Aktivierungen unterstreichen den Eindruck, dass sie auf keine abrufbare Bewegungsvorstellung zugreifen konnten und daher auch eine visuelle Herangehensweise in Anspruch nahmen.

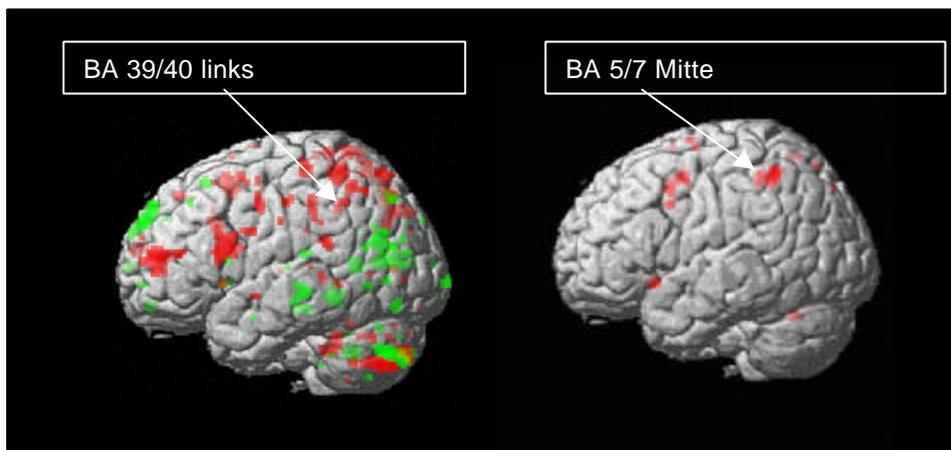


Abb. 11: Haupteffekt
Aktivierungen der Amateure (links) im inferioren und der Profis (rechts) im superioren Parietallappen.

Frontallappen

Die Amateure zeigten eine erhöhte Aktivierung im operkulären Teil des inferioren frontalen Gyrus (BA 44) sowohl bei der Ausführung als auch bei der Vorstellung der Bewegungen. Die Verbindung von musikalischer Darbietung und dem Lernen rhythmischer Sequenzen bei Sprachprozessen wurde von Besson und Schoen (Platel et al. 1997; Besson and Schon 2001), wie auch von Platel und Kollegen (Platel et al. 1997) propagiert. Aktivierung im linken inferioren frontalen Gyrus während Gedächtnisaufgaben werden im Zusammenhang mit subvokaler Sprache berichtet (Fletcher and Henson 2001). Es könnte angenommen werden, dass sich die Amateure während IM internal die Noten eher verbal vorgestellt haben, eine Zugangsweise, die von den Profis jedoch als irrelevant eingestuft wurde (Einschätzungswert 2.73, ± 2.55 bei einem Gesamtbereich von 10). Anderweitig wurden Aktivierungen im linken BA 44 und

ebenso analog auf der rechten Seite, als auch in den operkulären Anteilen des inferioren Frontallappens während der visuellen Vorstellung von Handbewegungen beobachtet (Binkofski et al. 2000). Aktivität im orbitofrontalen Lappen beschreiben Lafleur und Kollegen bei IM in frühen Lernphasen motorischen Lernens (Lafleur et al. 2002). Insbesondere fungiert der PFC auch als Arbeitsgedächtnis für beobachtende und manipulierende (Petrides, 1996) und für räumliche Aufgaben (Middelton, 1994). Die Amateure aktivierten ebenfalls bilateral das BA 10 im dorsolateralen präfrontalen Kortex. Rogers und Kollegen (Rogers et al. 1999) untersuchten präfrontale Aktivierung in einem Belohnungs-Risiko-Experiment mittels PET und fanden bei konfliktträchtigen Entscheidungen präfrontale Areale, vor allem BA 10, aktiviert. Da den Amateuren nur ungenügend trainierte Bewegungsprogramme zur Verfügung standen, deren typische Mängel im Innehalten und bewussten Entscheiden für die nächste Bewegung bestehen (Drake and Palmer 2000), näherten sie sich der Bewegungsimagination eventuell sowohl mit Hilfe sprachlicher und visueller Unterstützung als auch mit Hilfe kognitiver Überlegungsstrategien an.

Die Profis aktivierten hingegen nur den rechten inferioren frontalen Gyrus (BA 44), wobei der rechten Hemisphäre in vielen Studien die Verarbeitung von Musik und Melodie zugeschrieben wird (Messerli et al. 1995). Vergleiche von Tonhöhe und Melodie aktivieren zusätzlich zu auditorischen Areale den inferioren präfrontalen Kortex (Zatorre et al. 1994). Der musikalische Aspekt der Vorstellungsaufgabe könnte die rein rechtseitige Aktivität der Profis erklären. Insgesamt weisen die Aktivierungen im Frontallappen auf die mehr kognitive Herangehensweise der Amateure im Gegensatz zur motorisch-musikalischen der Profis hin.



Abb. 12:
Differenzbild
Aktivierungen
der Amateure
(links)
und der Profis
(rechts) im
Frontallappen.

Basalganglien

Nur die Amateure aktivierten den rechten Nucleus Caudatus in den Basalganglien. Aktivität im Nucleus Caudatus wird beim Neuerwerb motorischer Leistungen beschrieben (Toni and Passingham 1999) und zu mentalem Üben in Beziehung gesetzt, da angenommen wird, dass diese Region bei der Spezifikation von Bewegungen auf der Basis von motorischen Gedächtnisengrammen involviert ist (Jueptner et al. 1997a). Während motorischer Lernphasen wird Aktivität in den Basalganglien bei der Erstellung von motorischen Programmen (Seitz and Roland 1992) und bei der Bewegungsvorbereitung (Krams et al. 1998) beschrieben. Da die Aufgabe in dieser Studie für die Amateure neu war, lässt sich die Aktivierung in diesem Zusammenhang erklären.

Schlussfolgerung

Diese Ergebnisse bestätigen, dass sich aufgrund der unterschiedlichen Trainingszeit und Erfahrung im mentalen Üben deutliche Unterschiede der aktivierten neuronalen Regionen bei Profis und Amateuren zeigen. Die zweite Hypothese, die Unterschiede zwischen den Gruppen erwartete, kann damit unterstützt werden. Im Vergleich der Aktivierungen bei ausgeführter und vorgestellter Bewegung zeigten sich in beiden Gruppen überlappende neuronale Netzwerke. Trotz der intensiven und langjährigen Beschäftigung mit dem Instrument konnte bei den Profis die feste Koaktivierung zwischen motorischen und auditorischen Arealen, die bei der Ausführen der Bewegungen und beim reinen Hören von Musik das jeweils andere Areal aktiviert, bei der Vorstellungsaufgabe nicht nachgewiesen werden.

Die sehr umschriebenen aktivierten Regionen bei den Profis im Gegensatz zu den weit verstreuten der Amateure während der ausgeführten Bewegung scheint die erhöhte sensorische Kontrolle und damit die höhere Qualität des Violinspiels zu charakterisieren, da eine Ökonomisierung der motorischen Steuerung die dafür notwendigen Kapazitäten schafft. Mentales Training hingegen stellt wohl einen von der Vorerfahrung abhängigen Abstraktionsprozess von der tatsächlichen Aufgabe dar, der hilft komplexe

Bewegungssequenzen vorzubereiten und der durch die Distanzierung von den tatsächlichen Bewegungen ermöglicht wird. Besonders interessant sind die Hinweise über mentales Training bei professionellen Musikern, die durch die Konzentration auf wesentlich Anteile der motorischen Bewegungsausführung eine Verbesserung des eigenen Spiel nach der Bewegungsimagination berichten und deren neuronale Korrelate sich auf wenige zumeist sekundäre oder tertiäre motorische Areale konzentrieren.

7. Zusammenfassung

In dieser Studie wurden die unterschiedlichen fMRI Aktivierungen kortikaler und subkortikaler Areale von professionellen Streichern und Amateuren während mentalen Trainings einer Finger-Tapping-Sequenz untersucht, die den ersten 16 Takten des Soloparts aus Mozarts Violinkonzert in G-Dur entsprach. Da bei professionellen Geigern wegen ihres langjährigen Trainings und ihrer Erfahrung im mentalen Training eine andere kortikale Repräsentation der Bewegungsmuster vorausgesetzt werden kann, wurde angenommen, dass sich ihre Aktivierungsmuster von denen der Amateure unterscheiden. Nach gründlicher Erarbeitung der Aufgabenstellung mit den Probanden wurden mittels funktioneller Kernspintomographie die BOLD-Effekte bei der Imagination der Bewegungen aufgezeichnet, nachdem in einer Vorstudie die Exekution derselben Bewegungen gemessen worden waren. Um sicher zu gehen, dass die Finger nicht bewegt wurden, wurde vor und während der Messung ein Elektromyogramm der Unterarmmuskulatur beider Arme abgeleitet.

Die komplexe Vorstellungsaufgabe dieser Studie zeigte in beiden Gruppen eine Erhöhung der kortikalen Aktivierung in supplementär- und prämotorischen, lateralen zerebellären, superior parietalen Regionen. Die Ergebnisse sind in Übereinstimmung mit früheren Studien und untermauern die Ansicht, dass ausgeführte und imaginierte Bewegungen ein ähnliches neuronales Netzwerk aktivieren. Die Aktivierungsmuster innerhalb der unterschiedlich trainierten Gruppen ähnelten sich bei EM und IM. Im direkten Vergleich zeigten sich bei Profis und Amateuren jedoch Unterschiede hinsichtlich ihrer kortikalen und subkortikalen Aktivierungsmuster.

Bei den Profis zeigten sich wenige fokussierte Areale, die insgesamt einem Zugriff auf erlernte und automatisierte Bewegungsprogramme entsprachen (linker PMC, SMA, linkes posteriores Zerebellum, bilateral superior und links inferior parietal, rechts superior frontal, links anterior temporal). Langjähriges musikalisches motorisches Training sowie Erfahrung im mentalen Training gehen anscheinend mit erhöhter neuronaler Effizienz einher. Das Abrufen automatisierter Bewegungen während der ausgeführten Bewegung ermöglicht

eine Umorientierung der Aufmerksamkeit von der motorischen Umsetzung der Noten zu musikalisch inhaltlichen Anteilen der Interpretation und kann die Reaktionsgeschwindigkeit auf das vielfältige Feedback beim Musizieren erhöhen. Das Imaginieren der ausgeführten Bewegung ermöglicht eine mentale Analyse der auszuführenden Bewegungen, da die Bewegungsmuster vorhanden und gefestigt sind und trotz Fehlen des Klangs auf diese Weise objektiver und mit Distanz geübt werden kann. Die bei den Profis feste Koaktivierung von auditorischem und motorischen Kortex während des Hörens oder Ausübens von Musik war bei der reinen Vorstellungsaufgabe jedoch nicht vorhanden.

Die Amateure hingegen zeigten, ähnlich wie bei der Ausführung der Bewegung, weit verstreute Aktivierungen in Arealen, die beim Erlernen neuer Bewegungen beschrieben werden als auch in Regionen, denen sprachliche und visuelle Funktionen zugeschrieben werden (linker PMC und SMA; bilateral sensomotorisch; bilateral posterior zerebellär, bilateral posterior und inferior parietal, operkulär und dorsolateral frontal, links temporal anterior, Nukleus Caudatus). Scheinbar gingen sie in einer kognitiveren Weise an die motorische Aufgabenstellung heran, bei der sie sich der motorischen Vorstellung der Bewegungen nicht nur durch kinästhetische Imagination annäherten, sondern auch sprachliche und visuelle Unterstützung in Anspruch nahmen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die diskutierten Regionen der Amateure mit der in der Literatur über Aktivierungskarten wenig trainierter motorischer Leistung übereinstimmen und dass die neuronale Kapazität gegenüber der der Profis weniger ökonomisch genutzt war. Die aktivierten Areale der Profis hingegen beschreiben einen auf Vorerfahrung basierenden Abstraktionsprozess während mentalen Trainings, dessen neuronale Korrelate in der Aktivierung wesentlicher sekundärer und tertiärer motorische Areale besteht und zu einer durch die Musiker selbst empfundenen Verbesserung ihres Spiels führt.

8. Literaturverzeichnis

- Abbruzzese G., Trompetto C., and Schieppati M. 1996. The excitability of the human motor cortex increases during execution and mental imagination of sequential but not repetitive finger movements. *Exp Brain Res* 111: 465-472.
- Adams J.A. 1971. A closed loop theory of motor learning. *Journal of Motor Behavior* 3: 111-150.
- Adams L., Guz A., Innes J.A., and Murphy K. 1987. The early circulatory and ventilatory response to voluntary and electrically induced exercise in man. *J Physiol* 383: 19-30.
- Aleman A., Nieuwenstein M.R., Bocker K.B., and de Haan E.H. 2000. Music training and mental imagery ability. *Neuropsychologia* 38: 1664-1668.
- Allen G., Buxton R.B., Wong E.C., and Courchesne E. 1997. Attentional activation of the cerebellum independent of motor involvement. *Science* 275: 1940-1943.
- Amunts K., Schlaug G., Schleicher A., Steinmetz H., Dabringhaus A., Roland P.E., and Zilles K. 1996. Asymmetry in the human motor cortex and handedness. *Neuroimage* 4: 216-222.
- Anderson J.R. 1996. *Kognitive Psychologie*, Heidelberg.
- Bangert M., Hauesler U., and Altenmuller E. 2001. On practice: how the brain connects piano keys and piano sounds. *Ann N Y Acad Sci* 930: 425-428.
- Beisteiner R., Hollinger P., Lindinger G., Lang W., and Berthoz A. 1995. Mental representations of movements. Brain potentials associated with imagination of hand movements. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 96: 183-193.
- Bernstein N. 1967. *The Co-ordination and Regulation of Movement*, Oxford, GB.
- Besson M., and Schon D. 2001. Comparison between language and music. *Ann N Y Acad Sci* 930: 232-258.
- Binkofski F., Amunts K., Stephan K.M., Posse S., Schormann T., Freund H.J., Zilles K., and Seitz R.J. 2000. Broca's region subserves imagery of motion: a combined cytoarchitectonic and fMRI study. *Hum Brain Mapp* 11: 273-285.
- Birbaumer N., Schmidt, R.F. 1996. *Biologische Psychologie*, Heidelberg.
- Bliss T.V., and Lomo T. 1973. Long-lasting potentiation of synaptic transmission in the dentate area of the anaesthetized rabbit following stimulation of the perforant path. *J Physiol* 232: 331-356.
- Braitenberg V., Heck D., and Sultan F. 1997. The detection and generation of sequences as a key to cerebellar function: experiments and theory. *Behav Brain Sci* 20: 229-245; discussion 245-277.
- Catalan M.J., Honda M., Weeks R.A., Cohen L.G., and Hallett M. 1998. The functional neuroanatomy of simple and complex sequential finger movements: a PET study. *Brain* 121: 253-264.
- Chen R., Classen J., Gerloff C., Celnik P., Wassermann E.M., Hallett M., and Cohen L.G. 1997. Depression of motor cortex excitability by low-frequency transcranial magnetic stimulation. *Neurology* 48: 1398-1403.
- Crammond D.J. 1997. Motor imagery: never in your wildest dream. *Trends Neurosci* 20: 54-57.
- Cumming J., and Hall C. 2002. Deliberate imagery practice: the development of imagery skills in competitive athletes. *J Sports Sci* 20: 137-145.
- Decety J. 1996. Neural representations for action. *Rev Neurosci* 7: 285-297.
- Decety J., and Boisson D. 1990. Effect of brain and spinal cord injuries on motor imagery. *Eur Arch Psychiatry Clin Neurosci* 240: 39-43.

- Decety J., and Grezes J. 1999. Neural mechanisms subserving the perception of human actions. *Trends Cogn Sci* 3: 172-178.
- Decety J., and Ingvar D.H. 1990. Brain structures participating in mental simulation of motor behavior: a neuropsychological interpretation. *Acta Psychol (Amst)* 73: 13-34.
- Decety J., and Jeannerod M. 1995. Mentally simulated movements in virtual reality: does Fitts's law hold in motor imagery? *Behav Brain Res* 72: 127-134.
- Decety J., Jeannerod M., Durozard D., and Baverel G. 1993. Central activation of autonomic effectors during mental simulation of motor actions in man. *J Physiol* 461: 549-563.
- Decety J., Jeannerod M., Germain M., and Pastene J. 1991. Vegetative response during imagined movement is proportional to mental effort. *Behav Brain Res* 42: 1-5.
- Decety J., and Michel F. 1989. Comparative analysis of actual and mental movement times in two graphic tasks. *Brain Cogn* 11: 87-97.
- Decety J., Perani D., Jeannerod M., Bettinardi V., Tadary B., Woods R., Mazziotta J.C., and Fazio F. 1994. Mapping motor representations with positron emission tomography. *Nature* 371: 600-602.
- Deiber M.P., Ibanez V., Honda M., Sadato N., Raman R., and Hallett M. 1998. Cerebral processes related to visuomotor imagery and generation of simple finger movements studied with positron emission tomography. *Neuroimage* 7: 73-85.
- Deiber M.P., Passingham R.E., Colebatch J.G., Friston K.J., Nixon P.D., and Frackowiak R.S. 1991. Cortical areas and the selection of movement: a study with positron emission tomography. *Exp Brain Res* 84: 393-402.
- Deiber M.P., Wise S.P., Honda M., Catalan M.J., Grafman J., and Hallett M. 1997. Frontal and parietal networks for conditional motor learning: a positron emission tomography study. *J Neurophysiol* 78: 977-991.
- Denis M. 1985. Visual imagery and the use of mental practice in the development of motor skills. *Can J Appl Sport Sci* 10: 4S-16S.
- Doyon J., Owen A.M., Petrides M., Sziklas V., and Evans A.C. 1996. Functional anatomy of visuomotor skill learning in human subjects examined with positron emission tomography. *Eur J Neurosci* 8: 637-648.
- Doyon J., Song A.W., Karni A., Lalonde F., Adams M.M., and Ungerleider L.G. 2002. Experience-dependent changes in cerebellar contributions to motor sequence learning. *Proc Natl Acad Sci U S A* 99: 1017-1022.
- Drake C., and Palmer C. 2000. Skill acquisition in music performance: relations between planning and temporal control. *Cognition* 74: 1-32.
- Eberspächer H. 2001. *Mentales Training*, München.
- Eberspächer H., Immenroth, M., Mayer, J. 2002. Sportpsychologie - ein zentraler Baustein im modernen Leistungssport. *Sportpsychologie* 5: 5-10.
- Elbert T., Pantev C., Wienbruch C., Rockstroh B., and Taub E. 1995. Increased cortical representation of the fingers of the left hand in string players. *Science* 270: 305-307.
- Epstein M. 1980. The relationship of mental imagery and mental rehearsal to performance of a motor task. *Journal of Sport Psychology* 2: 211-220.
- Fadiga L., Buccino G., Craighero L., Fogassi L., Gallese V., and Pavesi G. 1999. Corticospinal excitability is specifically modulated by motor imagery: a magnetic stimulation study. *Neuropsychologia* 37: 147-158.
- Farah M.J. 1995. The neural basis of mental imagery. In *The cognitive Neuroscience*. (ed. G. M), pp. 963-975. MIT Press, Cambridge, London.
- Fattapposta F., Amabile G., Cordischi M.V., Di Venanzio D., Foti A., Pierelli F., D'Alessio C., Pigozzi F., Parisi A., and Morrocutti C. 1996. Long-term practice

- effects on a new skilled motor learning: an electrophysiological study. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 99: 495-507.
- Feltz D.L., Landers D.M. 1983. The Effects of Mental Practice on Motor Skill Learning and Performance: A Meta-analysis. *Journal of Sport Psychology* 5: 25-57.
- Fitts P.M. 1954. The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *J Exp. Psychology* 47: 381-391.
- Fletcher P.C., and Henson R.N. 2001. Frontal lobes and human memory: insights from functional neuroimaging. *Brain* 124: 849-881.
- Gaab N., and Schlaug G. 2003. Musicians differ from nonmusicians in brain activation despite performance matching. *Ann N Y Acad Sci* 999: 385-388.
- Galamian I. 1983. *Grundlagen und Methoden des Violinspiels*, Unterägeri, Schweiz.
- Gandevia S.C., and Rothwell J.C. 1987. Knowledge of motor commands and the recruitment of human motoneurons. *Brain* 110: 1117-1130.
- Gerardin E., Sirigu A., Lehericy S., Poline J.B., Gaymard B., Marsault C., Agid Y., and Le Bihan D. 2000. Partially overlapping neural networks for real and imagined hand movements. *Cereb Cortex* 10: 1093-1104.
- Gerloff C., Corwell B., Chen R., Hallett M., and Cohen L.G. 1998. The role of the human motor cortex in the control of complex and simple finger movement sequences. *Brain* 121: 1695-1709.
- Giesecking W. 1963. *So wurde ich Pianist*, Wiesbaden.
- Gould D., Eklund, R., Jackson, S. 1993. Coping strategies used by more versus less successful U.S. Olympic wrestlers. *Res. Q. Exerc. Sport* 64: 83-93.
- Grafton S.T., Fagg A.H., Woods R.P., and Arbib M.A. 1996. Functional anatomy of pointing and grasping in humans. *Cereb Cortex* 6: 226-237.
- Grafton S.T., Mazziotta J.C., Presty S., Friston K.J., Frackowiak R.S., and Phelps M.E. 1992. Functional anatomy of human procedural learning determined with regional cerebral blood flow and PET. *J Neurosci* 12: 2542-2548.
- Grodd W., Hulsmann E., Lotze M., Wildgruber D., and Erb M. 2001. Sensorimotor mapping of the human cerebellum: fMRI evidence of somatotopic organization. *Hum Brain Mapp* 13: 55-73.
- Gusnard D.A., and Raichle M.E. 2001. Searching for a baseline: functional imaging and the resting human brain. *Nat Rev Neurosci* 2: 685-694.
- Halpern A.R., and O'Connor M.G. 2000. Implicit memory for music in Alzheimer's disease. *Neuropsychology* 14: 391-397.
- Halpern A.R., and Zatorre R.J. 1999. When that tune runs through your head: a PET investigation of auditory imagery for familiar melodies. *Cereb Cortex* 9: 697-704.
- Halsband U. 1992. Left hemisphere preponderance in trajectorial learning. *Neuroreport* 3: 397-400.
- Halsband U., and Freund H.J. 1990. Premotor cortex and conditional motor learning in man. *Brain* 113: 207-222.
- Halsband U., and Freund H.J. 1993. Motor learning. *Curr Opin Neurobiol* 3: 940-949.
- Hanakawa T., Immisch I., Toma K., Dimyan M.A., Van Gelderen P., and Hallett M. 2003. Functional properties of brain areas associated with motor execution and imagery. *J Neurophysiol* 89: 989-1002.
- Hari R., Forss N., Avikainen S., Kirveskari E., Salenius S., and Rizzolatti G. 1998. Activation of human primary motor cortex during action observation: a neuromagnetic study. *Proc Natl Acad Sci U S A* 95: 15061-15065.
- Haueisen J., and Knosche T.R. 2001. Involuntary motor activity in pianists evoked by music perception. *J Cogn Neurosci* 13: 786-792.
- Hebb D.O. 1949. *The Organization of Behaviour*, New York, USA.

- Hlustik P., Solodkin A., Gullapalli R.P., Noll D.C., and Small S.L. 2002. Functional lateralization of the human premotor cortex during sequential movements. *Brain Cogn* 49: 54-62.
- Humberstone M., Sawle G.V., Clare S., Hykin J., Coxon R., Bowtell R., Macdonald I.A., and Morris P.G. 1997. Functional magnetic resonance imaging of single motor events reveals human presupplementary motor area. *Ann Neurol* 42: 632-637.
- Hund-Georgiadis M., and von Cramon D.Y. 1999. Motor-learning-related changes in piano players and non-musicians revealed by functional magnetic-resonance signals. *Exp Brain Res* 125: 417-425.
- Jancke L. 2002. What is special about the brains of musicians? *Neuroreport* 13: 741-742.
- Jancke L., Shah N.J., and Peters M. 2000. Cortical activations in primary and secondary motor areas for complex bimanual movements in professional pianists. *Brain Res Cogn Brain Res* 10: 177-183.
- Jeannerod M. 1995. Mental imagery in the motor context. *Neuropsychologia* 33: 1419-1432.
- Jeannerod M. 2001. Neural simulation of action: a unifying mechanism for motor cognition. *Neuroimage* 14: S103-109.
- Jeannerod M., and Decety J. 1995. Mental motor imagery: a window into the representational stages of action. *Curr Opin Neurobiol* 5: 727-732.
- Jeannerod M., Decety J., and Michel F. 1994. Impairment of grasping movements following a bilateral posterior parietal lesion. *Neuropsychologia* 32: 369-380.
- Jeannerod M., and Frak V. 1999. Mental imaging of motor activity in humans. *Curr Opin Neurobiol* 9: 735-739.
- Jueptner M., Frith C.D., Brooks D.J., Frackowiak R.S., and Passingham R.E. 1997a. Anatomy of motor learning. II. Subcortical structures and learning by trial and error. *J Neurophysiol* 77: 1325-1337.
- Jueptner M., Stephan K.M., Frith C.D., Brooks D.J., Frackowiak R.S., and Passingham R.E. 1997b. Anatomy of motor learning. I. Frontal cortex and attention to action. *J Neurophysiol* 77: 1313-1324.
- Karni A., Meyer G., Rey-Hipolito C., Jezard P., Adams M.M., Turner R., and Ungerleider L.G. 1998. The acquisition of skilled motor performance: fast and slow experience-driven changes in primary motor cortex. *Proc Natl Acad Sci U S A* 95: 861-868.
- Kawamichi H., Kikuchi Y., Endo H., Takeda T., and Yoshizawa S. 1998. Temporal structure of implicit motor imagery in visual hand-shape discrimination as revealed by MEG. *Neuroreport* 9: 1127-1132.
- Kawashima R., Okuda J., Umetsu A., Sugiura M., Inoue K., Suzuki K., Tabuchi M., Tsukiura T., Narayan S.L., Nagasaka T., et al. 2000. Human cerebellum plays an important role in memory-timed finger movement: an fMRI study. *J Neurophysiol* 83: 1079-1087.
- Kim S.G., Ashe J., Hendrich K., Ellermann J.M., Merkle H., Ugurbil K., and Georgopoulos A.P. 1993. Functional magnetic resonance imaging of motor cortex: hemispheric asymmetry and handedness. *Science* 261: 615-617.
- Klöppel R. 1996. *Mentales Training für Musiker*, Kassel.
- Klöppel R. 2003. *Die Kunst des Musizierens*, Mainz.
- Klose U., Erb M., Raddi A., Grodd W. 1999. Funktionelle Bildgebung mit der Magnetresonanztomographie. *electromedia* 1: 27-36.
- Krams M., Rushworth M.F., Deiber M.P., Frackowiak R.S., and Passingham R.E. 1998. The preparation, execution and suppression of copied movements in the human brain. *Exp Brain Res* 120: 386-398.
- Krings T., Topper R., Foltys H., Erberich S., Sparing R., Willmes K., and Thron A. 2000. Cortical activation patterns during complex motor tasks in piano players

- and control subjects. A functional magnetic resonance imaging study. *Neurosci Lett* 278: 189-193.
- Kuhtz-Buschbeck J.P., Mahnkopf C., Holzknacht C., Siebner H., Ulmer S., and Jansen O. 2003. Effector-independent representations of simple and complex imagined finger movements: a combined fMRI and TMS study. *Eur J Neurosci* 18: 3375-3387.
- Lafleur M.F., Jackson P.L., Malouin F., Richards C.L., Evans A.C., and Doyon J. 2002. Motor learning produces parallel dynamic functional changes during the execution and imagination of sequential foot movements. *Neuroimage* 16: 142-157.
- Lang W., Cheyne D., Hollinger P., Gerschlagel W., and Lindinger G. 1996. Electric and magnetic fields of the brain accompanying internal simulation of movement. *Brain Res Cogn Brain Res* 3: 125-129.
- Langheim F.J., Callicott J.H., Mattay V.S., Duyn J.H., and Weinberger D.R. 2002. Cortical systems associated with covert music rehearsal. *Neuroimage* 16: 901-908.
- Lejeune M., Decker C., and Sanchez X. 1994. Mental rehearsal in table tennis performance. *Percept Mot Skills* 79: 627-641.
- Liegeois-Chauvel C., Peretz I., Babai M., Laguitton V., and Chauvel P. 1998. Contribution of different cortical areas in the temporal lobes to music processing. *Brain* 121: 1853-1867.
- Lotze M., Erb M., Flor H., Huelsmann E., Godde B., and Grodd W. 2000. fMRI evaluation of somatotopic representation in human primary motor cortex. *Neuroimage* 11: 473-481.
- Lotze M., Montoya P., Erb M., Hulsmann E., Flor H., Klose U., Birbaumer N., and Grodd W. 1999. Activation of cortical and cerebellar motor areas during executed and imagined hand movements: an fMRI study. *J Cogn Neurosci* 11: 491-501.
- Luft A.R., Skalej M., Stefanou A., Klose U., and Voigt K. 1998. Comparing motion- and imagery-related activation in the human cerebellum: a functional MRI study. *Hum Brain Mapp* 6: 105-113.
- Malouin F., Richards C.L., Jackson P.L., Dumas F., and Doyon J. 2003. Brain activations during motor imagery of locomotor-related tasks: a PET study. *Hum Brain Mapp* 19: 47-62.
- Mantel G. 1999. *Cello üben*. Schott, Mainz.
- Maruff P., Wilson P.H., De Fazio J., Cerritelli B., Hedt A., and Currie J. 1999. Asymmetries between dominant and non-dominant hands in real and imagined motor task performance. *Neuropsychologia* 37: 379-384.
- Mathiak K., Hertrich I., Grodd W., and Ackermann H. 2002. Cerebellum and speech perception: a functional magnetic resonance imaging study. *J Cogn Neurosci* 14: 902-912.
- Meister I.G., Krings T., Foltys H., Boroojerdi B., Muller M., Topper R., and Thron A. 2004. Playing piano in the mind-an fMRI study on music imagery and performance in pianists. *Brain Res Cogn Brain Res* 19: 219-228.
- Mendoza D., and Wichman H. 1978. "Inner" darts: effects of mental practice on performance of dart throwing. *Percept Mot Skills* 47: 1195-1199.
- Messerli P., Pegna A., and Sordet N. 1995. Hemispheric dominance for melody recognition in musicians and non-musicians. *Neuropsychologia* 33: 395-405.
- Millard M., Mahoney C., and Wardrop J. 2001. A preliminary study of mental and physical practice on the kayak wet exit skill. *Percept Mot Skills* 92: 977-984.
- Nair D.G., Purcott K.L., Fuchs A., Steinberg F., and Kelso J.A. 2003. Cortical and cerebellar activity of the human brain during imagined and executed unimanual

- and bimanual action sequences: a functional MRI study. *Brain Res Cogn Brain Res* 15: 250-260.
- Naito E., Kochiyama T., Kitada R., Nakamura S., Matsumura M., Yonekura Y., and Sadato N. 2002. Internally simulated movement sensations during motor imagery activate cortical motor areas and the cerebellum. *J Neurosci* 22: 3683-3691.
- Ogiso T., Kobayashi K., and Sugishita M. 2000. The precuneus in motor imagery: a magnetoencephalographic study. *Neuroreport* 11: 1345-1349.
- Oldfield R.C. 1971. The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia* 9: 97-113.
- Orloff-Tschekorsky T. 1996. *Mentales Training in der musikalischen Ausbildung*, Aarau, Schweiz.
- Page S.J., Levine P., Sisto S.A., and Johnston M. V. 2001. Mental practice combined with physical practice for upper-limb motor deficit in subacute stroke. *Phys Ther* 81: 1455-1462.
- Pantev C., Engelien A., Candia V., and Elbert T. 2001. Representational cortex in musicians. Plastic alterations in response to musical practice. *Ann N Y Acad Sci* 930: 300-314.
- Pantev C., Oostenveld R., Engelien A., Ross B., Roberts L.E., and Hoke M. 1998. Increased auditory cortical representation in musicians. *Nature* 392: 811-814.
- Pascual-Leone A., Nguyet D., Cohen L.G., Brasil-Neto J.P., Cammarota A., and Hallett M. 1995. Modulation of muscle responses evoked by transcranial magnetic stimulation during the acquisition of new fine motor skills. *J Neurophysiol* 74: 1037-1045.
- Passingham R.E. 1996. Attention to action. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 351: 1473-1479.
- Penhune V.B., and Doyon J. 2002. Dynamic cortical and subcortical networks in learning and delayed recall of timed motor sequences. *J Neurosci* 22: 1397-1406.
- Penhune V.B., Zattore R.J., and Evans A.C. 1998. Cerebellar contributions to motor timing: a PET study of auditory and visual rhythm reproduction. *J Cogn Neurosci* 10: 752-765.
- Picard N., and Strick P.L. 1996. Motor areas of the medial wall: a review of their location and functional activation. *Cereb Cortex* 6: 342-353.
- Platel H., Price C., Baron J.C., Wise R., Lambert J., Frackowiak R.S., Lechevalier B., and Eustache F. 1997. The structural components of music perception. A functional anatomical study. *Brain* 120: 229-243.
- Porro C.A., Cettolo V., Francescato M.P., and Baraldi P. 2000. Ipsilateral involvement of primary motor cortex during motor imagery. *Eur J Neurosci* 12: 3059-3063.
- Porro C.A., Francescato M.P., Cettolo V., Diamond M.E., Baraldi P., Zuiani C., Bazzocchi M., and di Prampero P.E. 1996. Primary motor and sensory cortex activation during motor performance and motor imagery: a functional magnetic resonance imaging study. *J Neurosci* 16: 7688-7698.
- Rao S.M., Binder J.R., Bandettini P.A., Hammeke T.A., Yetkin F.Z., Jesmanowicz A., Lisk L.M., Morris G.L., Mueller W.M., Estkowski L.D., et al. 1993. Functional magnetic resonance imaging of complex human movements. *Neurology* 43: 2311-2318.
- Rizzolatti G., and Arbib M.A. 1998. Language within our grasp. *Trends Neurosci* 21: 188-194.
- Rogers R.D., Owen A.M., Middleton H.C., Williams E.J., Pickard J.D., Sahakian B.J., and Robbins T.W. 1999. Choosing between small, likely rewards and large, unlikely rewards activates inferior and orbital prefrontal cortex. *J Neurosci* 19: 9029-9038.

- Roth M., Decety J., Raybaudi M., Massarelli R., Delon-Martin C., Segebarth C., Morand S., Gemignani A., Decorps M., and Jeannerod M. 1996. Possible involvement of primary motor cortex in mentally simulated movement: a functional magnetic resonance imaging study. *Neuroreport* 7: 1280-1284.
- Roure R., Collet C., Deschaumes-Molinari C., Delhomme G., Dittmar A., and Vernet-Maury E. 1999. Imagery quality estimated by autonomic response is correlated to sporting performance enhancement. *Physiol Behav* 66: 63-72.
- Roure R., Collet C., Deschaumes-Molinari C., Dittmar A., Rada H., Delhomme G., and Vernet-Maury E. 1998. Autonomic nervous system responses correlate with mental rehearsal in volleyball training. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 78: 99-108.
- Ruby P., and Decety J. 2001. Effect of subjective perspective taking during simulation of action: a PET investigation of agency. *Nat Neurosci* 4: 546-550.
- Ryding E., Decety J., Sjöholm H., Stenberg G., and Ingvar D.H. 1993. Motor imagery activates the cerebellum regionally. A SPECT rCBF study with 99mTc-HMPAO. *Brain Res Cogn Brain Res* 1: 94-99.
- Sabbah P., Simond G., Levrier O., Habib M., Trabaud V., Murayama N., Mazoyer B.M., Briant J.F., Raybaud C., and Salamon G. 1995. Functional magnetic resonance imaging at 1.5 T during sensorimotor and cognitive task. *Eur Neurol* 35: 131-136.
- Sadato N., Ibanez V., Deiber M.P., Campbell G., Leonardo M., and Hallett M. 1996. Frequency-dependent changes of regional cerebral blood flow during finger movements. *J Cereb Blood Flow Metab* 16: 23-33.
- Sakai K., Hikosaka O., Miyauchi S., Takino R., Sasaki Y., and Putz B. 1998a. Transition of brain activation from frontal to parietal areas in visuomotor sequence learning. *J Neurosci* 18: 1827-1840.
- Sakai K., Takino R., Hikosaka O., Miyauchi S., Sasaki Y., Putz B., and Fujimaki N. 1998b. Separate cerebellar areas for motor control. *Neuroreport* 9: 2359-2363.
- Savoy C., Beitel, P. 1996. Mental Imagery for Basketball. *Journal of Sport Psychology*: 454-462.
- Schlaug G., Jancke L., Huang Y., Staiger J.F., and Steinmetz H. 1995. Increased corpus callosum size in musicians. *Neuropsychologia* 33: 1047-1055.
- Schnitzler A., Salenius S., Salmelin R., Jousmaki V., and Hari R. 1997. Involvement of primary motor cortex in motor imagery: a neuromagnetic study. *Neuroimage* 6: 201-208.
- Schoenberg H. 1987. *Great Pianists*, St. Louis, USA.
- Seitz R.J., Canavan A.G., Yaguez L., Herzog H., Tellmann L., Knorr U., Huang Y., and Homberg V. 1997. Representations of graphomotor trajectories in the human parietal cortex: evidence for controlled processing and automatic performance. *Eur J Neurosci* 9: 378-389.
- Seitz R.J., and Roland P.E. 1992. Learning of Sequential Finger Movements in Man: A Combined Kinematic and Positron Emission Tomography (PET) Study. *Eur J Neurosci* 4: 154-165.
- Sergent J. 1993a. Mapping the musicians brain. *Human Brain Mapping* 1: 20-39.
- Sergent J. 1993b. Music, the brain and Ravel. *Trends Neurosci* 16: 168-172.
- Sergent J., Zuck E., Terriah S., and MacDonald B. 1992. Distributed neural network underlying musical sight-reading and keyboard performance. *Science* 257: 106-109.
- Shadmehr R., and Holcomb H.H. 1997. Neural correlates of motor memory consolidation. *Science* 277: 821-825.
- Shibasaki H., Sadato N., Lyshkow H., Yonekura Y., Honda M., Nagamine T., Suwazono S., Magata Y., Ikeda A., Miyazaki M., et al. 1993. Both primary motor

- cortex and supplementary motor area play an important role in complex finger movement. *Brain* 116: 1387-1398.
- Shima K., Mushiake H., Saito N., and Tanji J. 1996. Role for cells in the presupplementary motor area in updating motor plans. *Proc Natl Acad Sci U S A* 93: 8694-8698.
- Sirigu A., Cohen L., Duhamel J.R., Pillon B., Dubois B., Agid Y., and Pierrot-Deseilligny C. 1995. Congruent unilateral impairments for real and imagined hand movements. *Neuroreport* 6: 997-1001.
- Sirigu A., Daprati E., Pradat-Diehl P., Franck N., and Jeannerod M. 1999. Perception of self-generated movement following left parietal lesion. *Brain* 122: 1867-1874.
- Sirigu A., Duhamel J.R., Cohen L., Pillon B., Dubois B., and Agid Y. 1996. The mental representation of hand movements after parietal cortex damage. *Science* 273: 1564-1568.
- Stephan K.M., Fink G.R., Passingham R.E., Silbersweig D., Ceballos-Baumann A.O., Frith C.D., and Frackowiak R.S. 1995. Functional anatomy of the mental representation of upper extremity movements in healthy subjects. *J Neurophysiol* 73: 373-386.
- Suinn R.M. 1984. Visual motor behaviour rehearsal: The basic technique. *Scandinavian Journal of Behaviour* 13: 131-142.
- Szende O., Nemessuri, M. 1971. *The Physiology of Violin Playing*, London.
- Talairach J., Tournoux, P. 1988. *Co-planar Stereotactic Atlas of the Human Brain*, New York.
- Tanji J., Shima K., and Mushiake H. 1996. Multiple cortical motor areas and temporal sequencing of movements. *Brain Res Cogn Brain Res* 5: 117-122.
- Toni I., and Passingham R.E. 1999. Prefrontal-basal ganglia pathways are involved in the learning of arbitrary visuomotor associations: a PET study. *Exp Brain Res* 127: 19-32.
- Tyszka J.M., Grafton S.T., Chew W., Woods R.P., and Colletti P.M. 1994. Parceling of mesial frontal motor areas during ideation and movement using functional magnetic resonance imaging at 1.5 tesla. *Ann Neurol* 35: 746-749.
- Vanecek E. 1994. Zu den kognitiven Grundlagen der Virtuosität. *Kunstpunkt, Hochschule für Musik und darstellende Kunst, Wien 7*.
- Volpert W. 1976. *Optimierung von Trainingsprogrammen. Untersuchungen über den Einsatz mentalen Trainings beim Erwerb einer sensumotorischen Fertigkeit.*, Lolach/Lahn.
- Wehner T., Vogt S., and Stadler M. 1984. Task-specific EMG-characteristics during mental training. *Psychol Res* 46: 389-401.
- Weinberg R., Hanks, D. and Jackson A. 1991. Effect of the Length and Temporal Location of the mental preparation interval on Basjetball Shooting Performance. *Journal of Sport Psychology* 23: 3-14.
- Wolbers T., Weiller C., and Buchel C. 2003. Contralateral coding of imagined body parts in the superior parietal lobe. *Cereb Cortex* 13: 392-399.
- Wuyam B., Moosavi S.H., Decety J., Adams L., Lansing R.W., and Guz A. 1995. Imagination of dynamic exercise produced ventilatory responses which were more apparent in competitive sportsmen. *J Physiol* 482: 713-724.
- Yaguez L., Nagel D., Hoffman H., Canavan A.G., Wist E., and Homberg V. 1998. A mental route to motor learning: improving trajectorial kinematics through imagery training. *Behav Brain Res* 90: 95-106.
- Zatorre R.J., Belin P., and Penhune V.B. 2002. Structure and function of auditory cortex: music and speech. *Trends Cogn Sci* 6: 37-46.
- Zatorre R.J., Evans A.C., and Meyer E. 1994. Neural mechanisms underlying melodic perception and memory for pitch. *J Neurosci* 14: 1908-1919.

Danksagung

Ich möchte mich bei allen bedanken, die mich bei der Vorbereitung und Durchführung dieser Arbeit mit Rat und Tat unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt vor allem Herrn PD Dr. Martin Lotze, mit dem ich den praktischen Teil der Studie, die Messungen der Musiker und Amateure mittels fMRI, durchführen konnte und der mir bei dieser Arbeit stets beratend und helfend als Freund und Mentor zur Seite stand. Seine Anregungen, die Diskussionen mit ihm und seine wertvolle Kritik hat meine wissenschaftliche Ausbildung in jeder Hinsicht gefördert.

Mein besonderer Dank gilt auch meinem Mann, ohne dessen tatkräftige und liebevolle Unterstützung und Geduld ich nicht die Möglichkeit gehabt hätte, diese Doktorarbeit zu schreiben. Ich danke auch meinen Kindern, die für diese Arbeit oft ihre eigenen Bedürfnisse hintangestellt haben und meinen wissenschaftlichen Interessen immer Verständnis entgegen brachten.

Mein Dank gilt allen meinen Musiker-Kollegen, ohne die diese Studie nicht hätte stattfinden können und die sich zwischen Proben und Konzerten die Zeit genommen haben, nach Tübingen zu kommen um sich messen zu lassen.

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr. N. Birbaumer, der diese Studie in Tübingen mit großem Interesse betreute, in Gesprächen viele wertvolle Anregungen gab und mich in jeder Hinsicht unterstützte.

Gabriela Scheler

LEBENS LAUF

- 1957 geb. am 25.08. in Mainz
Eltern: Almut Moster, geb. Brachmann; Heinz Moster
- 06/1976 Abitur am Rhabanus-Maurus-Gymnasium in Mainz
- 09/1976 Musikstudium (Hauptfach Violine) an der Hochschule für Musik und Theater in Hannover
- 09/1977 Fortsetzung des Studiums an der Hochschule der Künste in Berlin
- 09/1982 Engagement bei den Nürnberger Philharmonikern
- 11/1996 Studium im Fach Psychologie an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
- 07/1998 Vordiplom
- 08/1998 Praktikum im Institut für Medizinische Psychologie und Verhaltensneurobiologie der Friedrich-Karls-Universität Tübingen
- 06/2001 Diplom im Studienfach Psychologie an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
- 09/2001 Anstellung als wissenschaftliche Mitarbeiterin im Arbeitskreis für Biomagnetismus, Zentrum Epilepsie Erlangen, Neurologische Universitätsklinik Erlangen-Nürnberg
- 01/2003 Leitung des Biomagnetismus-Labors, Zentrum Epilepsie Erlangen, Neurologische Universitätsklinik Erlangen-Nürnberg