

ECKART ALTENMÜLLER

## Hirnpfysiologische Grundlagen des Übens

### 1. Einleitung

Musizieren auf hohem Niveau ist eine der anspruchsvollsten Leistungen des menschlichen Zentralnervensystems. Die koordinierte Aktivierung zahlreicher Muskelgruppen muss mit höchster zeitlicher und räumlicher Präzision und häufig mit sehr hoher Geschwindigkeit geschehen. Dabei unterliegen die Bewegungen einer ständigen Kontrolle durch das Gehör, durch den Gesichtssinn und durch die Körpereigenwahrnehmung. Die an die Muskulatur vermittelte Kraftdosierung muss bis in die kleinste Nuance genau berechnet werden. Ungeheure Mengen an eingehenden Informationen von Millionen Sinneszellen der Haut, der Gelenke, der Sehnen, der Muskelspindeln, der Augen und des Gehörs werden ständig ausgewertet und in die Planung der neuen Bewegungen miteinbezogen. Musizieren setzt voraus, dass die Bewegungen laufend neu an das gerade entstandene klangliche Ergebnis angepasst werden. Die rasche Integration der eingehenden Information in den aktuellen Handlungsplan ermöglicht erst die befriedigende Realisierung eines zentralnervös als Klang- und Bewegungsvorstellung repräsentierten musikalischen Bewegungsablaufs. Dabei ist das Ziel des Musikers nicht eine mathematisch überpräzise Wiedergabe, sondern ein durch Affekte modulierter „sprechender“ Vortrag, der Gefühle durch emotionale Kommunikation vermitteln kann.

Die neuronalen Grundlagen dieses Vorganges sind bislang erst in Ansätzen verstanden. Unbestritten ist, dass Musizieren nahezu alle Hirnareale beansprucht. Sensomotorische, auditive und visuelle Regionen tragen in Wechselwirkung mit dem die Emotionen verarbeitenden limbischen System zu dieser Leistung bei. Die hierarchisch übergeordneten Zentren des Stirnhirnlappens sind an der Planung und Kontrolle der Bewegungsabläufe, an der Steuerung der Aufmerksamkeit und an der Auswertung des Bewegungserfolges stets beteiligt.

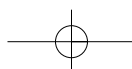
Voraussetzung für die geordnete und fehlerarme Bewältigung derartig vielschichtiger Informationsverarbeitungsprozesse ist ein Lernvorgang, der als „Üben“ bezeichnet wird. Durch Üben werden die sensomotorischen, auditiven und die visuell integrativen Fertigkeiten erworben, die für die Beherrschung eines Instruments oder für das Singen notwendig sind. Gleichzeitig werden Gedächtnissysteme angelegt, strukturell analytische Kenntnisse zur Erfassung eines Musikstücks oder eines Notentextes erlernt und expressives, emotionales Musizieren geübt. Musizieren auf höchstem Niveau bedarf dabei des viele Jahre dauernden intensiven Lernens, in der auch der Prozess des Übens selbst ständig reflektiert und optimiert wird. Aber nicht nur der Erwerb, auch die Erhaltung eines hohen spieltechnischen Niveaus über die Jahre der Ausbildung hinaus beruht auf ständigem Üben.

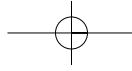
Eine hirnpfysiologische Definition des musikalischen Übens könnte folgendermaßen lauten:

Üben ist eine zielgerichtete musikalische Betätigung, die dem Erwerb, der Verfeinerung und dem Erhalt sensomotorischer, auditiver, visueller, struktureller und emotionaler Repräsentationen von Musik dient.

Diese Definition ist durch folgende Aussagen zu ergänzen:

- Üben setzt dabei nicht immer motorische Tätigkeit voraus, sondern kann auch als rein gedankliche Aktivierung und Verfeinerung dieser Repräsentationen geschehen. Wir sprechen dann von mentalem Üben.
- Durch Üben werden auch die körperlichen Voraussetzungen zur Realisierung der mentalen Repräsentationen in Wechselwirkung von zentralem Nervensystem und Körperperipherie erworben.





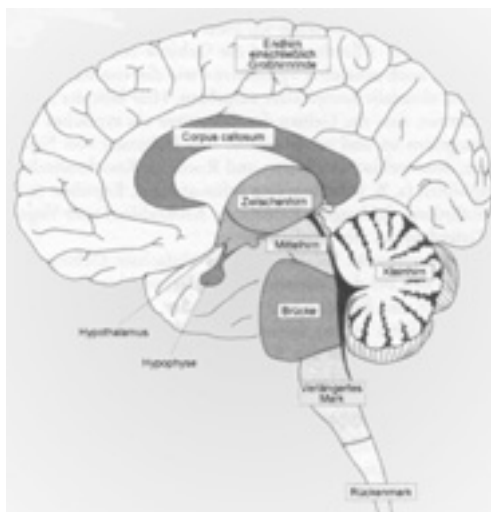
Mentale Repräsentationen von Musik sind als individuell angelegte, weit verzweigte und sich rasch ändernde neuronale Netzwerke zu verstehen, die zahlreiche Regionen beider Hirnhälften umfassen können. Die Lernvorgänge modulieren diese Netzwerke, wobei bereits nach wenigen Minuten des Übens erste, noch nicht stabile Änderungen der Vernetzung nachweisbar sind. Langfristiges Üben führt zu spezifischen neurophysiologischen Anpassungen des Zentralnervensystems mit nachhaltigen Veränderungen verschiedener Hirnfunktionen und sogar der Hirnstruktur. Solche Veränderungsmöglichkeiten werden unter dem Begriff der „Hirnplastizität“ zusammengefasst.

Die Vielfalt der neurophysiologischen Vorgänge beim Üben und ihre Individualität erschweren eine wissenschaftliche Analyse. Bislang am besten erforscht ist die Neurobiologie des sensorimotorischen Lernens. Aber nicht nur die hirnpfysiologischen Grundlagen des musikalischen Übens sind unzureichend erforscht, auch Verhaltensuntersuchungen zur wichtigen Frage des „Wie üben?“ fehlen weitgehend. Hier sind die Sportwissenschaften, insbesondere die amerikanisch geprägte Disziplin der Bewegungswissenschaft (Movement Sciences), sehr viel weiter fortgeschritten. Zahlreiche Erkenntnisse zum feinmotorischen Lernen wurden in diesen Disziplinen in den letzten Jahrzehnten gesammelt und können in Grenzen auch auf das musikalische Üben übertragen werden. Die beiden Bände *Motor Control and Learning* Schmidt et al. (1999) und *Motor Learning and Performance* Schmidt et al. (2000) enthalten exzellente und verständlich beschriebene Zusammenfassungen des aktuellen Kenntnisstandes auf diesem Gebiet.

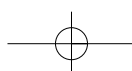
Im Folgenden werden nach einer kurzen Einführung in die Hirnphysiologie zunächst die neurophysiologischen Grundlagen des musikalischen Übens dargestellt. Anschließend sind die Auswirkungen intensiven Übens auf die Funktion und Struktur des Gehirns das Thema. Im letzten Abschnitt wird der Versuch unternommen, die Erkenntnisse der Hirnphysiologie in praktische Hinweise zum effizienten Üben zu übertragen.

## 2. Eine Einführung in die allgemeine Hirnphysiologie

Das menschliche Gehirn gliedert sich in fünf Teile. An das Rückenmark schließen sich als Fortsetzung das verlängerte Mark (Medulla oblongata) und das Mittelhirn (Mesencephalon) mit der dazu gehörenden Brücke (Pons) an. Auf gleicher Höhe wie die Brücke findet sich, nach hinten verlagert, das Kleinhirn (Cerebellum). Kopfwärts folgen auf das Mittelhirn das Zwischenhirn (Diencephalon) und das Endhirn (Telencephalon oder Cerebrum), das aus der linken und der rechten Hirnhälfte (Hemisphären) und aus tiefer liegenden Nervenzell-Kerngebieten besteht (Abb. 1a).



*Abb. 1a*  
Längsschnitt durch das menschliche Gehirn  
Die Gürtelwindung (Cingulum) befindet sich über dem als Corpus Callosum bezeichneten Balken. Im vorderen Anteil liegt dort die cinguläre motorische Area (CMA).



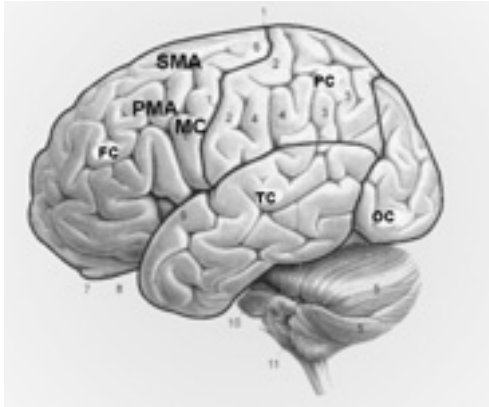
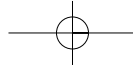


Abb. 1b

Seitenansicht des menschlichen Gehirns

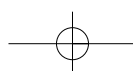
FC ist der Stirnhirnlappen (frontaler Cortex), TC ist der Schläfenlappen (temporaler Cortex), PC ist der Scheitellappen (Parietaler Cortex) und OC ist der Hinterhauptslappen (Okzipitalcortex), die Sehrinde. SMA steht für die supplementär motorische Area, PMA für die prämotorische Area. 1 Zentralfurche, 2 Sensorische Areale (Körperfühlrinde), 3 und 4 Anteile des Scheitellhirns (räumliche Verarbeitung), 5 Kleinhirnhemisphären 6 Primär motorischer Cortex (MC), 7 Riechkolben, 8 Riechhirn, 9 Obere Schläfenwindung.

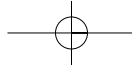
Wie alle anderen Körperorgane besteht das menschliche Gehirn aus Zellen, nämlich aus Nervenzellen (Neurone) und aus dem Stützgewebe (Gliazellen). Nervenzellen sind die Grundbausteine der Hirnfunktionen, während Gliazellen vor allem Versorgungs- und Stützfunktionen übernehmen. Unser Gehirn enthält schätzungsweise 100 Milliarden Nervenzellen, wovon allein 30 Milliarden auf das Kleinhirn entfallen.

Die fünf Teile des Gehirns haben unterschiedliche Funktionen. *Das verlängerte Mark* ist für die reflexartige Regulation lebenswichtiger Körperfunktionen wie Wachen, Schlafen, Atmung, Blutkreislauf, Körpertemperatur und Flüssigkeitshaushalt zuständig. Die schon zum Mittelhirn gehörende *Brücke* ist die wichtigste Schaltzentrale der Verbindung zwischen Großhirnrinde und Kleinhirn. Das *Kleinhirn* ist der Brücke aufgesetzt und an der Haltungsregulation, der Gleichgewichtskontrolle, der Kontrolle von Augenbewegungen und vor allem der Feinabstimmung schneller Bewegungen beteiligt. Neuere Befunde sprechen dafür, dass das Kleinhirn an Denkvorgängen mitwirkt. Man vermutet, dass grundsätzlich die Feinkoordination von zeitlichen Abläufen, seien es Bewegungen, Sprachlaute oder Gedankenketten, Aufgabe des Kleinhirns ist. Im *Mittelhirn* werden auditive, visuelle und sensorische Bahnen miteinander verschaltet und visuell sowie auditiv ausgelöste Blick- und Greifbewegungen programmiert. Die erste unbewusste Verarbeitung der Hörinformation geschieht ebenfalls im Mittelhirn. Nervenzellgruppen des Mittelhirns sind darüber hinaus an motorischen Aufgaben bei der Haltungsregulation beteiligt.

Das *Zwischenhirn* enthält als wichtige Struktur den Thalamus, der auch als das „Tor zur Hirnrinde“ bezeichnet wird. Im *Thalamus* enden die vom Auge, vom Ohr, vom Gleichgewichtsorgan und von der Haut und den Muskeln kommenden sensorischen Bahnen und werden auf Bahnen zur Hirnrinde umgeschaltet. Wichtig ist, dass die „Durchlässigkeit“ dieses Tors von der Großhirnrinde gesteuert werden kann. Durch gezielte Öffnung für spezielle Sinnesinformationen können wir aus der Masse der eingehenden Reize jeweils die für die momentane Situation Wichtigsten auswählen. Das Bild des steuerbaren „Schweinwerfers“ der Aufmerksamkeit, der unter der Kontrolle des Stirnhirns bestimmte Aspekte der eingehenden Sinnesreize anleuchtet und damit bewusst macht, beschreibt diesen Vorgang recht treffend. Dadurch gelingt es beispielsweise, sich im Sinne von Gerhard Mantels rotierender Aufmerksamkeit beim Üben zeitversetzt auf verschiedene Aspekte der Sinnesinformationen zu konzentrieren (Mantel 2001).

Unterhalb des Thalamus liegt der *Hypothalamus*, der als Regulationszentrum für vegetative Funktionen überlebenswichtige Verhaltensweisen wie Flucht, Abwehr, Fortpflanzung, Nahrungsaufnahme und Biorhythmen kontrolliert.



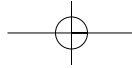


Das *Endhirn* bildet den größten Teil unseres Gehirns und gliedert sich in die Hirnrinde (Kortex) und in Nervenzellgebiete, die von dieser Hirnrinde umschlossen sind und deswegen als „subkortikal“ bezeichnet werden. Die Nervenzellkernegebiete unterhalb der Großhirnrinde bestehen aus den Basalganglien, den Mandelkernen und der Hippokampus-Struktur. Die *Basalganglien* dienen der Steuerung von Bewegungen und sind am prozeduralen Lernen und insbesondere am Üben und Automatisieren von komplexen Bewegungen maßgeblich beteiligt. Darüber hinaus vermutet man in den Basalganglien den Ort der emotionalen Einfärbung von geplanten Bewegungen. Die *Mandelkerne* (Amygdala) haben mit der Steuerung von angeborenem Furcht- und Verteidigungsverhalten zu tun und sind wesentlich am emotionalen Lernen vor allem bei negativen Erfahrungen und an der Angstkonditionierung beteiligt. Der *Hippokampus*, tief an der Innenseite der Schläfenlappen, wird heute als Organisator von Gedächtnisinhalten aufgefasst. Dabei scheint der Hippokampus sowohl für das deklarative Faktengedächtnis als auch für das episodische Gedächtnis festzulegen, welcher Inhalt in welcher Weise und an welchen Orten gespeichert wird. Der eigentliche Ort des Gedächtnisses ist dann die Großhirnrinde. Man könnte die Funktion des Hippokampus also im übertragenen Sinn mit dem Inhaltsverzeichnis eines riesigen Lehrbuchs vergleichen.

Die Großhirnrinde macht etwa die Hälfte des gesamten Hirnvolumens aus. Die Oberfläche der Rinde ist stark gefaltet, sodass zwei Drittel davon in Rindenfalten verborgen sind. Die Hirnrinde besteht aus zwei Hirnhälften, die durch den Hemisphärenspalt voneinander getrennt sind. Jede Hirnhälfte wird in vier Lappen eingeteilt. Der vordere Anteil wird als Stirnlappen (Frontalkortex) bezeichnet, seitlich findet sich unterhalb der Seitenfurche der Schläfenlappen (Temporalkortex). Hinter dem Stirnhirnlappen, abgetrennt durch die Zentralfurche findet sich der Scheitellappen (Parietalkortex „PC“) und am Hinterhaupt der Hinterhauptslappen (Okzipitalkortex „OC“) (Abb. 1b).

Der Frontalkortex dient der Handlungsplanung im weitesten Sinn. Seine Funktionen umfassen die Steuerung des Sozialverhaltens, die Programmierung und Ausführung von Bewegungsfolgen und die Lenkung der Aufmerksamkeit. Als spezielle Funktion ist der linke Frontalkortex (bei Rechtshändern und bei ca. 90% der Linkshänder) an der Produktion erlernter symbolischer Handlungen wie Sprache, Gesten und musikalischen Bewegungsfolgen maßgeblich beteiligt. Hinter der Zentralfurche finden sich im Parietalkortex die Körperfühlrinde und die Zentren, in denen die räumliche Orientierung verarbeitet wird. Der dahinter liegende Okzipitalkortex enthält die für das Sehen zuständigen Rindengebiete. Im Temporalkortex wird die gehörte Information verarbeitet. Zusätzlich enthält er Areale, die dem Gedächtnis und der Emotionsverarbeitung dienen.

Die Großhirnrinde enthält etwa 20 bis 50 Milliarden Nervenzellen. Als Zellart dominieren die erregenden Pyramidenzellen. Sie sind untereinander eng durch Synapsen verbunden, wobei geschätzt wird, dass jede Pyramidenzelle mit ca. 15.000 anderen Zellen verbunden ist. Die Verknüpfungsstruktur ist so überaus dicht, dass man davon ausgeht, dass jedes Neuron der Hirnrinde mit jedem beliebigen anderen Neuron über höchstens zwei Zwischenstationen kommunizieren kann. Zwischen den Pyramidenzellen findet sich eine nicht ganz so große Anzahl erregender und hemmender lokaler Schaltzellen. Grundlage der Kommunikation zwischen zwei Neuronen sind die Synapsen, die sich hinsichtlich ihres Informationsübertragungsverhaltens sekundenschnell verändern können. Bei adäquater Stimulation bilden sich Synapsen innerhalb weniger Minuten neu. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn zwei Neurone, die wichtige Stimuli verarbeiten, in zeitlich und räumlich enger Nachbarschaft regelmäßig zu feuern beginnen. Synapsenbildungen sind dann die physische Entsprechung für assoziative Lernvorgänge, wie sie beim Musizieren beispielsweise bei der Verknüpfung auditiver und motorischer Regionen von großer Bedeutung sind.



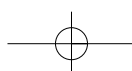
Eine Besonderheit der Großhirnrinde ist, dass nur eine relativ geringe Anzahl von Nervenzellen Verbindungen mit den Sinnesorganen und mit dem Rückenmark hat. Die Anzahl der Ein- und Ausgänge der Hirnrinde in den mächtigen Schaltstationen des Thalamus machen nur ein Hunderttausendstel der Verbindungen innerhalb der Hirnrinde aus. Wie Gerhard Roth treffend sagt, „ist die Beschäftigung des Kortex mit sich selber hunderttausendmal stärker als die Kommunikation mit dem, was außerhalb der Großhirnrinde sonst noch passiert“ (Roth 2003, S. 43). Die Nachverarbeitung von eingehender Information, die Speicherung in den Gedächtnissystemen und die Planung von Handlungen, kurzum die Erstellung und die Verfeinerungen mentaler Repräsentationen, beispielsweise durch Üben, sind also die eigentlichen Aufgaben der Hirnrinde.

Bevor auf die neuroanatomischen Grundlagen des Übens im Detail eingegangen wird, seien fünf Strukturprinzipien der Hirnrinde erwähnt, da sie Bedeutung für die hirnpfysiologischen Vorgänge beim musikalischen Lernen haben.

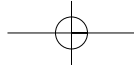
*Erstens* ist jede Hirnhälfte vorwiegend mit der Verarbeitung sensorischer Information und der motorischen Ansteuerung der gegenseitigen Körperhälfte befasst. Beide Hirnhälften kooperieren allerdings eng über die ca. 100 Millionen Nervenzellfasern des Balkens (Corpus Callosum, s. Abb. 1a/b).

*Zweitens* sind beide Hirnhälften nicht gleichwertig, sondern besitzen unterschiedliche Funktionen. Als Faustregel gilt, dass beim Rechtshänder die linke Hirnhälfte stärker sequentielle, nacheinander erfolgende Verarbeitungsschritte und „lokale“ Prozesse programmiert, während die rechte Hirnhälfte eher ganzheitliche und viele Details integrierende „globale“ Prozesse verarbeitet. An einem Beispiel aus der Musik sei dies erläutert: Die linke Hirnhälfte ist überlegen, eine Melodie als Abfolge einzelner Intervalle zu verarbeiten, während die rechte Hirnhälfte besser die globalen Konturen dieser Melodie erfasst.

*Drittens*: die Hirnrinde ist hierarchisch aufgebaut. Die Informationen aus den Sinnesorganen gelangen über den Thalamus zuerst zu den primären Rindenfeldern, wo einfache Verarbeitungsschritte (z. B. im Temporalkortex die Tonhöhenwahrnehmung) erfolgen. Die primären Rindenfelder sind von den sekundären Feldern umgeben, die komplexe Reizmerkmale (z. B. harmonische Verbindungen) analysieren. Diese sekundären Areale sind wiederum von den Assoziationsrindenfeldern umgeben, in denen die Informationen unterschiedlicher Sinne miteinander verknüpft werden und sich Gedächtnisstrukturen aufbauen. Auch die motorischen Zentren folgen diesem hierarchischen Prinzip (s. Abb. 1b). So findet sich im primären motorischen Kortex direkt vor der Zentralfurche das primäre motorische Rindenfeld. Es enthält die Pyramidenzellen, die über das Rückenmark die Muskulatur ansteuern. Direkt vor diesem motorischen Rindenfeld liegt oben auf der Hirnrinde die supplementäre motorische Area (SMA), darunter seitlich die prämotorische Area (PMA) und an der Innenseite des Hemisphärenspaltes, gerade oberhalb des die Hemisphären verbindenden Balkens das motorische Feld der Gürtelwindung, die so genannte cinguläre motorische Area (CMA, s. Abb. 1a). Diese drei Regionen werden auch als sekundäre motorische Areale bezeichnet. SMA und PMA erstellen und speichern gemeinsam Bewegungssteuerprogramme. Die SMA koordiniert beide Hände und ist stärker bei selbst initiierten Bewegungen aktiv, während die PMA bevorzugt durch äußere Reize ausgelöste Bewegungen programmiert. Die Rolle der CMA ist noch umstritten, es wird angenommen, dass hier die motorischen Steuerprogramme mit emotionalem Ausdruck belegt und gelungene oder misslungene Bewegungen emotional bewertet werden. Vor diesen drei Rindenfeldern liegen im vorderen Anteil des Stirnlappens schließlich die Hirnregionen, die übergeordnete Handlungskonzepte erstellen und diese mit den erwarteten Auswirkungen auf die Umgebung und deren Konsequenzen für die eigene Existenz abgleichen. Übertragen auf die Situation beim Spiel eines klassischen Solokonzertes mit Orchester würde also im vorderen Anteil des Stirnhirns die prinzipielle







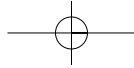
Musik erwähnt. Die neurophysiologischen Grundlagen dieses Lernens und die speziellen Herausforderungen, die das Musizieren mit sich bringt, sollen im Folgenden erläutert werden.

### 3.1. Üben als multisensorisch-motorische Integrationsleistung

Musizieren ist eine bewusst vollzogene Tätigkeit. Allerdings ist die Steuerung der Bewegungen bei schnellen Abläufen nicht mehr bewusst kontrollierbar. Unter solchen Bedingungen ist das Nervensystem zu langsam, um die Rückmeldungen von den Sinnesorganen in den Handlungsplan miteinzubeziehen. Die schnellsten Reaktionen der Fingermuskulatur nach einem falsch gespielten Ton könnten frühestens nach 150 ms erfolgen und wären für eine Korrektur von raschen Läufen, von weiten Sprüngen oder von Lagenwechseln viel zu spät. Man muss also davon ausgehen, dass schnelle, ballistische (von griechisch „ballein“ = werfen) Bewegungsabfolgen dadurch gesteuert werden, dass bereits zuvor durch Üben erlernte motorische Steuerprogramme abgerufen werden. Diese Programme enthalten alle notwendigen Informationen, um Muskelgruppen zum richtigen Zeitpunkt, in der richtigen Reihenfolge und in der richtigen Kraftdosierung zu aktivieren, und benötigen keine aktuelle sensorische Rückmeldung mehr. Der amerikanische Bewegungsforscher R. A. Schmidt definiert motorische Programme als „abstrakte neuronale Repräsentationen von Aktionen, die nach ihrer Aktivierung Bewegungen produzieren, ohne dass sensorische Informationen, die auf einen Fehler in der Programmauswahl hinweisen, berücksichtigt werden. Allerdings können während der Ausführung des Programms zahlreiche Korrekturen kleinerer Fehler vorgenommen werden, die helfen, die Bewegung wie ursprünglich geplant auszuführen.“ (Schmidt 1982, S. 299) In der musikalischen Praxis erklärt das, warum ein falsch gewähltes motorisches Programm, z. B. ein versehentlich in C-dur statt in D-dur begonnener schneller Lauf auf der Klaviertastatur, häufig noch nach einigen Tönen korrigiert werden kann.

Das Erarbeiten derartiger Steuerprogramme erfolgt unter ständiger Wechselwirkung mit den eingehenden Informationen aus den Sinnesorganen. Die Auswertung der Impulse vom Gehör, von den Sinnesorganen der Haut, der Gelenke, Sehnen und Muskeln und vom Auge wird dabei beim Üben ständig verfeinert und ermöglicht ein immer präziseres inneres Bild des gewünschten Bewegungsziels sowie eine immer feinere Kontrolle des zu erfolgenden Bewegungsablaufes. Dabei werden die biomechanischen Eigenschaften der Körperperipherie, also Beweglichkeit von Gelenken, Masse der Gliedmaßen, Kraftentwicklung der Muskulatur, Reibungskräfte der Sehnen etc. über die körpereigene Wahrnehmung automatisch in die zu berechnenden Bewegungskordinaten miteinbezogen. Umgekehrt passen sich durch den Übevorgang die Muskeln, Sehnen und Gelenke an die zentralnervösen Bewegungsvorgaben an. Muskeln bilden sich den Anforderungen entsprechend aus, Sehnen werden geschmeidiger und Gelenke erweitern ihren Bewegungsumfang (Übersicht bei Wagner 1988). Der zielgerichtete Vorgang des Übens beruht also auf wechselseitiger Beeinflussung des zentralen Nervensystems, des Bewegungsapparates und physikalischer Eigenschaften der Welt, zu denen auch die mechanischen Spezifika des Instrumentes gehören.

Um die ungeheuren Mengen der anfallenden sensorischen Informationen beim Üben verarbeiten zu können und um in der Lage zu sein, die Bewegungen je nach Rückmeldung zu korrigieren bzw. um das motorische Steuerprogramm zu optimieren, wird zuerst in einem langsamen Tempo geübt. Ein wichtiger Aspekt des Erlernens und Verfeinerns der motorischen Steuerprogramme ist, dass das Zentralnervensystem *vor Ausführung der Bewegung* über die vorgesehene Muskelaktivität und die daraus resultierende Bewegung Informationen erhält und abspeichert. Man nimmt an, dass diese Informationen als Kopie der abzuschickenden Bewegungsimpulse in unmittelbarer Nachbarschaft der motorischen und sensorischen Zentren des Zentralnervensystems abgespeichert werden. Diese neuronale Repräsentation der geplanten Bewegung und der

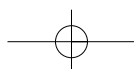


erwarteten sensorischen Rückmeldung wird *Effferenzkopie* genannt. Nur durch den Abgleich der nach der Bewegung erfolgenden Rückmeldung mit der als mentale Repräsentation gespeicherten Effferenzkopie können fehlerhafte Steuerprogramme überhaupt erkannt und verbessert werden. Auf diese Weise wird das zunächst bewusste, aufmerksam gesteuerte und durch eintreffende Sinnesreize kontrollierte Bewegungsprogramm optimiert und nach und nach möglichst korrekt in das Bewegungsgedächtnis überführt. Damit hat sich der Bewegungsablauf „eingepägt“. Die bewusste Kontrolle über die Sinne ist nicht mehr unbedingt notwendig, d. h. der Ablauf ist „*automatisiert*“ und kann mit großer Geschwindigkeit durchgeführt werden.

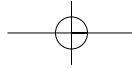
Das Erlernen der Bewegungen beim Musizieren geschieht also in mehreren Schritten: zunächst wird unter Kontrolle der beteiligten Sinne – Gehör, Somatosensorik, Gesichtssinn – ein grober und noch fehlerhafter Entwurf des Bewegungsprogramms erstellt. Die Bewegungen sind unkoordiniert und unökonomisch, denn die Anzahl der beteiligten Muskeln, die Dauer der Muskelaktivität und die notwendige Muskelkraft wurden noch nicht optimiert. Durch Einstudieren des Bewegungsablaufes gelingt es in der zweiten Phase des Lernens, Ökonomie und Koordination zu verbessern und die Bewegungsgeschwindigkeit zu erhöhen. Dieses Lernen muss und soll nicht immer mit einem Bewusstmachen der Bewegungsabläufe im Sinn eines sprachlich vermittelbaren Analysevorganges einhergehen. Es handelt sich hier überwiegend um prozedurales *Lernen durch Tun*. Wie sehr sich dieses Lernen dem verbal-analytischen Zugriff entzieht, kann im Selbstexperiment leicht nachvollzogen werden: Man stelle sich nur vor, einem eben geladenen Außerirdischen über Funkverkehr im Detail erklären zu müssen, wie ein Streichholz anzuzünden ist.

Auch während der Phase des Ökonomisierens und Optimierens werden die Bewegungen noch unter weitgehender Kontrolle der Sinnesorgane durchgeführt. Erst im dritten Schritt sind die Bewegungsfolgen als stabile neuronale Repräsentationen, mit anderen Worten: als *motorische Programme*, im Bewegungsgedächtnis verankert und können automatisiert ohne ständige Beachtung des sensorischen Feedbacks mit großer Geschwindigkeit durchgeführt werden. Abspeicherung und langfristiger Erhalt der Präzision dieser Programme sind aktive Prozesse und beruhen auf der regelmäßigen Aktivierung und gegebenenfalls Korrektur der komplex verschalteten, hochspezifischen neuronalen Netzwerke. Neurophysiologisch beruht der oben geschilderte Vorgang des Einübens von Bewegungen immer auf einer zunehmenden Hemmung unerwünschter muskulärer Aktivitäten: *Üben mit Aufbau von Feinmotorik besteht immer in einer Hemmung der ursprünglich angelegten Grobmotorik!*

Bislang sind viele Detailfragen zum Modell der motorischen Programmierung noch ungeklärt. So weiß man noch nicht, was die kleinste Repräsentation einer als Programm abgespeicherten Bewegung ist. Wenn beispielsweise nur isolierte Fingerbewegungen abgespeichert werden, dann müssen diese Programme bei komplexen Bewegungen erst zu einem Gesamtprogramm zusammengesetzt werden. Dies würde mit zunehmender Komplexität mehr Zeit erfordern. Werden aber beispielsweise ganze Tonleitern als spezifische motorische Repräsentationen abgespeichert, dann müssen hunderttausende derartiger Bewegungsprogramme im Gedächtnis abgespeichert sein, was möglicherweise die Gedächtniskapazität überschreiten und die Zugriffsschnelligkeit verlangsamen würde. Die Bewegungswissenschaften haben daher in den letzten Jahren eine Alternative zum traditionellen Konzept der motorischen Programme entworfen, das aus der Robotik stammt und als „internes motorisches Modell“ bekannt wurde. Nach diesem Konzept muss das Gehirn nur erlernen, die Dynamik der Körpermechanik, also der angreifenden Muskelkräfte, Schwerkkräfte, Zentrifugalkräfte etc. zu berechnen, um dann in der Lage zu sein, jede gewünschte Bewegung präzise durchzuführen. Möglicherweise können damit einfache Bewegungen zufrieden stellend produziert werden, aber die Bewältigung hochkomplexer feinmotorischer Aufgaben der Mund- und Handmotorik beim Musizieren ist besser mit dem







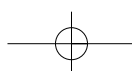
Konzept motorischer Programme zu erklären. Eine ausführliche Diskussion der Vor- und Nachteile beider Modelle findet sich bei Konczak (2002).

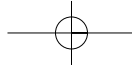
### 3.2. Was geschieht beim Üben im Gehirn?

Nach heutigem Wissen sind am Erwerb neuer feinmotorischer Programme alle Hirnstrukturen beteiligt, die der Steuerung und Kontrolle von Bewegungen dienen. Dazu gehören neben der Großhirnrinde vor allem die Basalganglien und das Kleinhirn. Alle drei Hirnregionen sind durch Rückkopplungsschleifen zum Teil mehrfach miteinander verbunden. Motorisches Lernen kann daher nicht an einer bestimmten Stelle des Zentralnervensystems lokalisiert sein, sondern manifestiert sich immer in allen beteiligten Funktionssystemen.

Seit Entwicklung der funktionellen bildgebenden Verfahren konnten durch Darstellung der Hirnaktivität bei gesunden Menschen Aufschlüsse über die hirnhysiologischen Grundlagen des Erwerbs feinmotorischer Fertigkeiten gewonnen werden. Gegenstand intensiver Forschung waren dabei die durch motorisches Lernen hervorgerufenen Veränderungen im Bereich der sensorischen Hirnrindenareale. Schon vor 25 Jahren hatte Roland in einer bahnbrechenden Untersuchung an gesunden Versuchspersonen nachgewiesen, dass mit der zunehmenden Komplexität von zuvor gelernten Fingerbewegungen die Aktivierung in der SMA (vgl. Abb. 1b) anstieg (Roland et al. 1980). Die Veränderungen der Hirnaktivierung beim Erlernen solcher schnellen Fingerbewegungssequenzen war das Thema der Untersuchungen von Karni und Kollegen (1995). Mit der funktionellen Kernspintomographie, einer Methode, die die Zunahme der Hirndurchblutung bei vermehrter Nervenzellaktivität erfasst, konnten beim Erlernen von schnellen Fingerbewegungssequenzen Änderungen der neuronalen Aktivität im Bereich der primär motorischen Areale nachgewiesen werden. Dabei traten unterschiedliche Effekte auf, je nachdem, ob man die Hirnaktivitäten vor und nach einer einmaligen Übesitzung von wenigen Minuten Dauer oder nach längerem Üben über mehrere Wochen verglich. Wurde eine komplizierte Wechselbewegung der Finger mehrfach hintereinander ausgeführt, fand sich bereits während einer einzigen Übesitzung von nur 30 Minuten Dauer eine Größenzunahme der aktivierten Areale in der Handregion der primär motorischen Hirnrinde. Bei einer als Kontrollaufgabe durchgeführten gleich schwierigen, aber nur einmalig geforderten Folge von Fingerbewegungen war dieser Effekt nicht messbar. Die Größenzunahme blieb allerdings ohne weiteres Üben nur etwa eine Woche bestehen, danach war das Areal der aktivierten Handregion wieder auf den Ausgangswert „geschrumpft“. Wurde die spezifische Wechselbewegung über mehrere Wochen täglich geübt und perfektioniert, so zeigte sich eine langfristige stabile Vergrößerung der aktivierten neuronalen Netzwerke der primären motorischen Hirnrinde. Auch dieser Effekt war spezifisch für die täglich geübte Folge von Fingerbewegungen und trat nicht bei einer gleichartig komplizierten, aber nicht geübten Fingerbewegung auf. Gleichzeitig mit der durch Übung induzierten langfristigen Vergrößerung der neuronalen Netzwerke im Bereich der primär motorischen Rinde verkleinern sich offenbar die beteiligten Nervenzellpopulationen im Bereich des Kleinhirns und in der SMA. Vieles spricht dafür, dass die kurzfristigen Effekte in der primär motorischen Area auf eine „Umstimmung“ der neuronalen Netzwerke zurückzuführen sind. Die Steigerung der neuronalen Erregbarkeit im Bereich der primär motorischen Hirnrindenfelder und die Vergrößerung der an der Bewegung beteiligten neuronalen Ensembles konnte auch beim Erlernen von Musikinstrumenten mit der Methode der Reizung von Nervenzellen durch starke Magnetfelder (Transkranielle Magnetstimulation) eindeutig gezeigt werden (Pascual-Leone et al. 1995). Beide Vorgänge, die Steigerung der Erregbarkeit und die Ausweitung des Nervenzellpools, ermöglichen eine schnellere synaptische Verknüpfung und unterstützen somit den Lernprozess.

Die zeitliche Abfolge dieser Aktivitätsänderungen hängt von der Erfahrung ab. Während eines 35 Minuten dauernden motorischen Kurzzeitrainings von Fingerbewegungssequenzen mit der rechten Hand hatten Laien nur zwischen der siebten und der vierzehnten Minute eine Akti-



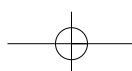


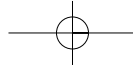
vitätszunahme im primär motorischen Kortex. Geübte Pianisten bewältigten die Aufgabe naturgemäß sehr viel besser und zeigten durchgehend während der 35 Minuten eine Zunahme der Aktivität im primär motorischen Kortex, aber eine viel geringere Aktivierung der SMA und des Kleinhirns im Vergleich zu den Laien. Diese Beobachtungen bestätigen die wichtige Rolle der SMA für die Programmierung komplexer Bewegungsfolgen, bevor diese automatisiert durchgeführt werden. Die Pianisten waren aufgrund ihrer Expertise in der Lage, die Bewegungen am Anfang der Trainingseinheit sehr rasch zu programmieren, und konnten sich dann auf die präzise automatische Ausführung konzentrieren, die im primär motorischen Kortex gesteuert wird (Hundt-Georgiadis et al. 1999). Ein weiteres interessantes Ergebnis dieses Experiments war, dass auch der motorische Kortex der untrainierten Hand an dem Lernvorgang mitbeteiligt war. So führten Laien und Pianisten nach dem Training der rechten Hand die gleiche Aufgabe mit der nicht trainierten linken Hand ebenfalls deutlich besser aus. Dieser Übertrag von erlernten Bewegungsmustern auf andere Gliedmaßen wurde von Rijntjes und Kollegen (1999) systematisch erforscht. Sie baten Versuchspersonen, ihre Unterschrift mit der rechten Hand oder mit der rechten Großzehe zu schreiben. Das Schreiben mit der Großzehe war von einer Aktivierung der vor der Handregion gelegenen prämotorischen Areale begleitet. Offenbar werden Bewegungsprogramme unabhängig von den ausführenden Muskelgruppen als abstrakte *Bewegungsideen* abgelegt, auf die unterschiedliche primär motorische Areale, im vorliegenden Fall die Hand- und die Fußregion, Zugriff haben. Das Konzept der Bewegungsidee würde auch erklären, warum wir blitzschnell in der Lage sind, viel geübte Bewegungsmuster an andere Raumkoordinaten anzupassen. So gelingt dem geübten Flötisten beispielsweise in der Regel ohne Schwierigkeiten die Umstellung der Handmotorik von der großen Boehmflöte auf das kleine Piccolo oder dem geübten Geiger die Umstellung auf die Bratsche.

Alle oben erwähnten Studien untersuchten die Hirnaktivität bei motorischen Aufgaben, die bewusstes, explizites motorisches Lernen in einer kontrollierten Versuchsanordnung mit Feedback über den Bewegungserfolg zum Inhalt hatten. Lenkt man die Aufmerksamkeit der Versuchspersonen während motorischer Aufgaben ab, lässt man sie also unbewusst – prozedural – motorisch lernen, dann korreliert der Lernzuwachs vorwiegend mit einer Aktivierung im Bereich der Basalganglien. Auch das Kleinhirn ist an motorischen Lernprozessen beteiligt, denn es spielt für die richtige Auswahl, die richtige Reihenfolge und für das richtige „Timing“ von Bewegungen eine wesentliche Rolle. Neuere Hirnaktivierungsstudien weisen allerdings darauf hin, dass die Beteiligung des Kleinhirns am Lernvorgang wahrscheinlich nur ganz zu Beginn der Lernphase von Bedeutung ist (Seidler et al. 2002).

### 3.3. Die Sinne vernetzen sich – auditives, observatives und mentales Üben

Die bisher dargestellten Untersuchungen berücksichtigen eine bereits mehrfach herausgestellte Besonderheit der Bewegungen beim professionellen Musizieren nicht, nämlich die enge Verbindung zwischen Motorik und den anderen Sinnen, vor allem dem Gehör. Musikalisches Üben bedeutet auch immer die Vernetzung der verschiedenen mentalen Repräsentationen von Musik. Marc Bangert, Mitarbeiter am Institut für Musikphysiologie und Musiker-Medizin an der Hochschule für Musik und Theater Hannover, zeichnete den Zeitverlauf der Entwicklung auditorisch-sensomotorischer Verknüpfungen beim Klavierüben auf. Neun musikalische Laien wurden in das Labor eingeladen und die Hirnaktivierung getrennt beim Hören einfacher 3 Sekunden langer Klaviermelodien im Fünf-Ton-Raum oder beim Niederdrücken von stumm geschalteten Klaviertasten an einem Computerklavier mit der rechten Hand gemessen. Anschließend absolvierten die Versuchsteilnehmer eine kontrollierte 20-minütige Trainingsphase am Klavier, in der sie die im Fünf-Ton-Raum komponierten Melodien hörten und mit der rechten Hand nachspielten, wobei jetzt das Klavier erklang, die Teilnehmer also ein auditives Feedback erhielten. In der Regel war





die Leistungsgrenze in einer Übesitzung nach 20 bis 30 Nachspielaufgaben erreicht. Anschließend wurde die Hirnaktivierung wieder getrennt für das Hören von Klaviersequenzen und für das Bewegen der rechten Hand auf einer stummen Tastatur gemessen. Insgesamt wurden elf derartiger Trainingssitzungen über mehrere Wochen durchgeführt.



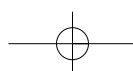
Abb. 3

Veränderungen der Großhirnaktivierung durch Klavierübungen

Die Kopfdiagramme repräsentieren Aufsichten von oben auf ein Gehirn. Die Hirnaktivierungsdaten von acht Anfängern (untere sechs Diagramme) und von acht professionellen Pianisten (obere beide Diagramme) sind dabei in die Darstellungen eingeflossen. Dunkle Regionen sind Bezirke stärkerer Aktivierungen. Man erkennt deutlich, dass beim Hören von einfachen Klaviermelodien nach 20 Tagen die zentral in der Mitte gelegenen motorischen Areale aktiviert werden. Rechts, beim Bewegen auf der stummen Tastatur, entsteht nach dem Üben ebenfalls eine stärker ausgeprägte Aktivierung im Bereich der seitlichen Hörregionen. Die Aktivierungsmuster der ausgebildeten Pianisten (obere Reihe) sind beim Hören und beim Bewegen der Finger nahezu identisch. Als Maß der Ähnlichkeit der Aktivierungsmuster beim Hören und beim Sehen ist rechts als Zahl das „Skalarprodukt“ aufgetragen. Weitere Erläuterungen im Text.

In Abbildung 3 werden die durch Klavierübungen bedingten Veränderungen der neuronalen Vernetzung dargestellt. In der allerersten Messung vor dem Training kommt es beim Hören der Klaviermusik (linke Seite unten) zur diffusen Aktivierung der Stirn- und Schläfenlappen. Bei Bewegungen der Finger der rechten Hand auf der stummen Tastatur (rechte Seite unten) ist die linksseitige sensomotorische Region aktiv. Bereits nach 20 Minuten Training beginnen sich erste Änderungen der auditiven und sensomotorischen Aktivierungsmuster anzudeuten, die dann nach 20 Tagen Training klar erkennbar sind: das Hören der Klaviermusik führt zu einer automatisierten Mitaktivierung der sensomotorischen Hirnregion, ohne dass eine sichtbare oder mit Elektromyogramm messbare Aktivität der Fingermuskulatur besteht. Das stumme Bewegen der Finger wiederum aktiviert zusätzlich die im Schläfenlappen gelegenen auditiven Areale. Vergleicht man die Klavieranfänger mit Konzertpianisten, so zeigt sich, dass die Hirnaktivierungsmuster der letzteren beim Hören von Klaviermusik und beim Bewegen der Finger weitgehend identisch waren. Die Kopfdiagramme können eine Vorstellung geben, welche plastischen Anpassungsvorgänge in der Großhirnrinde schon nach wenigen Minuten Üben ablaufen. Bereits nach fünf Wochen Training am Klavier sind diese zunächst nur vorübergehenden Änderungen der neuronalen Vernetzung stabil und es kommt bei Klavieranfängern dann zu einem ähnlichen Aktivierungsmuster wie bei den professionellen Pianisten (Bangert / Altenmüller 2003).

Zusammenfassend zeigt dieser Versuch eindrucksvoll, wie durch Üben mentale Repräsentationen verschmelzen. Er zeigt auch, dass nach kurzer Zeit des Instrumentalunterrichts allein durch Hören von Musik bereits die Sensomotorik geübt wird! Die starke Korrespondenz der auditiven und der sensomotorischen Repräsentation von Musik lässt sich bei Berufsmusikern in Hirnaktivierungsstudien sehr gut nachweisen. In Abbildung 4a sind die Aktivierungsmuster eines professionellen Pianisten beim reinen Hören einfacher Klaviermelodien dargestellt. Man kann leicht erkennen, wie bereits das Hören zu einer starken Aktivität der primären und sekundären motorischen Rinde führt.



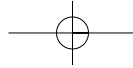


Abb. 4a

Hirnaktivierungsbild von ausgebildeten Pianisten beim Hören von Klaviermusik (oben), Aufsicht auf die linke Hirnhälfte

Es sind die gemittelten Aktivierungsdaten von sieben professionellen Pianisten in dieses Bild eingeflossen. Die dunklen Felder zeigen, dass bereits das Hören von Klaviermusik zu einer Aktivierung der motorischen Areale führt. (Verändert aus Bangert et al. 2005, S. 16)



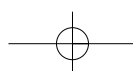
Abb. 4b

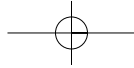
Aufsicht auf die linke Hirnhälfte einer Gruppe von ausgebildeten Pianisten beim Beobachten pianistischer Bewegungen

Es sind die gemittelten Daten einer Gruppe von elf Pianisten in dieses Aktivierungsbild eingegangen. Das reine Beobachten erzeugt bereits eine Aktivierung der motorischen Rindenzonen und der sekundär auditiven Regionen. (Verändert aus Haslinger et al. 2005, S. 286)

Nicht nur durch Hören, auch durch das Beobachten von Musikern wird unwillkürlich die Sensomotorik geübt, vorausgesetzt, man besitzt schon instrumentale Vorkenntnisse. Die hirnhypophysologischen Grundlagen dieses *Lernens durch Beobachtung (observatives Üben)* wurden erst in den letzten Jahren aufgedeckt. In Tierexperimenten konnte ein so genanntes „Spiegelneuron-Netzwerk“ nachgewiesen werden. Wenn Affen ihren Artgenossen bei Bewegungen zusahen, entstanden auch bei den beobachtenden Tieren Aktivierungen der sensomotorischen Zentren, ohne dass sich diese Tiere bewegten. Auch beim Menschen findet man diese Spiegelneurone. Professionelle Pianisten, die in einem Video stumme pianistische Fingerbewegungen auf einer Klaviertastatur beobachteten, zeigten eine starke Aktivitätszunahme der sensomotorischen Handregion des Frontallappens, der sekundären auditiven Regionen des Schläfenlappens und des Kleinhirns, ohne dass sie selbst die Finger bewegten (Abb. 4b, Haslinger et al. 2005). In die Praxis umgesetzt bedeutet dies, dass man als Musiker auch durch sorgfältiges Beobachten anderer Musiker übt, sei es im Unterricht oder bei Konzerten!

Üben durch Hören und Üben durch Beobachten kann man als spezielle Formen des mentalen Übens auffassen. *Mentales Üben* im engen Sinn ist die intensive Vorstellung von Bewegungsabläufen ohne deren praktische Ausführung. (Siehe auch den Beitrag von Christian A. Pohl in diesem Band.) Während einer solchen vorgestellten Bewegung sind im Wesentlichen dieselben Areale aktiv wie während einer tatsächlich ausgeführten Bewegung, nämlich der primäre motorische Kortex, die SMA und das Kleinhirn (Kutz-Buschbeck et al. 2003). Interessant ist, dass die Hirnaktivität mit dem Schwierigkeitsgrad der vorgestellten Bewegungen ansteigt und dass insbesondere auch durch mehrtägiges mentales Üben die beteiligten neuronalen Bezirke plastische Veränderungen aufweisen. Die Veränderungen der Netzwerke bei Vorstellung von Fingerbewegungen sind zwar geringer ausgeprägt als beim Ausführen der Bewegung, führen aber





gleichwohl zu einem deutlichen Übungseffekt, der durch verbesserte Leistungen in Tapping-Tests belegt werden kann. Mentales Üben ist also effektiv, setzt aber voraus, dass die Aufmerksamkeit intensiv auf die jeweils zu übende Aufgabe fokussiert wird.

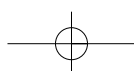
#### 3.4. Veränderung der Hirnstruktur durch das Üben

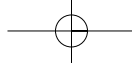
In den vorangegangenen Kapiteln wurden die durch Üben bewirkten Veränderungen der neuronalen Netzwerke des Gehirns geschildert. Aber nicht nur die Funktion von Nervenzellverbänden verändert sich durch das Üben, auch die Struktur des Gehirns wird durch intensives und langfristiges Musizieren modifiziert. So ist bei Nichtmusikern die primäre motorische Handregion stark asymmetrisch ausgebildet (Amunts et al. 1997). Der mit der dominanten rechten Hand korrespondierende linke Handmotorkortex ist sehr viel größer als der rechte. Bei professionellen Pianisten ist die Verteilung dagegen nahezu symmetrisch. Langjährige Übung der Feinmotorik führt bei Pianisten also zu einer Größenzunahme der sensomotorischen Handregionen, insbesondere der nicht dominanten Hand. Diese Unterschiede waren besonders bei denjenigen Instrumentalisten deutlich, die vor dem Alter von sieben Jahren mit dem Instrumentalspiel begonnen hatten. Je mehr die Kinder und Jugendlichen in der frühen Kindheit geübt hatten, desto ausgeprägter war der Effekt. Dies spricht dafür, dass die Veränderungen tatsächlich durch das Üben hervorgerufen wurden und nicht auf angeborenen Merkmalen beruhen. Neue Untersuchungen zeigen, dass nicht nur die Größe des motorischen Kortex bei Musikern zunimmt, sondern auch die Dichte der Nervenzellsubstanz (Gaser und Schlaug 2003), und dass letztere Veränderungen auch noch entstehen, wenn erst im Erwachsenenalter begonnen wird zu üben. Auch das Kleinhirn und der primäre auditive Kortex in der oberen Schläfenwindung sind bei Musikern größer. Die Größe der Hörrinde korreliert dabei sehr gut mit den Hörfertigkeiten, die mit dem AMMA-Test (Advanced Measures of Musical Audiation) von Gordon ermittelt wurden (Schneider et al. 2002).

Aber nicht nur spezielle Bezirke der Großhirnrinde und des Kleinhirns sind bei Musikern vergrößert. Auch der Balken, die wichtigste Faserverbindung zwischen der rechten und der linken Hirnhälfte, ist bei Musikern im Vergleich zu Nichtmusikern kräftiger ausgeprägt (Schlaug et al. 1995). Die Vergrößerung betrifft nur den vorderen Anteil des Balkens, der die motorischen und prämotorischen Rindfelder beider Hemisphären verbindet. Man geht davon aus, dass die funktionelle Beanspruchung durch die präzise bimanuelle Koordination mit dem notwendigen raschen Informationsaustausch zwischen beiden Hirnhälften zu einer Verstärkung der Bemerkung dieser Fasern führt, was eine schnellere Nervenleitfähigkeit bewirkt. Es ist nicht auszuschließen, dass außerdem der Erhalt von normalerweise (d. h. ohne adäquate Reizung) nach der Geburt untergehenden Axonen zu dieser Vergrößerung des Balkens beiträgt.

Es werden aber noch weitere Mechanismen zur Erklärung der oben geschilderten dramatischen Effekte herangezogen. So ist bekannt, dass die Anzahl der Nervenzellverzweigungen (Dendriten) und die Dichte der Synapsen übungsbedingt zunehmen. Schließlich reagiert auch das Stützgewebe des Gehirns auf stärkere Beanspruchung durch vermehrte Bildung von Blutkapillaren. Alle diese Anpassungsvorgänge können bis in das hohe Erwachsenenalter erfolgen. Heftig umstritten ist derzeit, ob sich beim Menschen im Bereich sensorischer und motorischer Hirnrindenabschnitte Nervenzellen nach der Geburt noch neu bilden können, wie dies im Hippokampus und in den Riechzentren des Stirnhirns nachgewiesen wurde. Wahrscheinlich ist die größere Dichte des Nervengewebes bei Musikern eher auf vermindertes Absterben der angelegten Nervenzellen zurückzuführen.

An dieser Stelle sei kurz darauf eingegangen, warum von allen Berufen gerade bei Musikern die stärksten plastischen Anpassungsvorgänge des Nervensystems gefunden werden: Vier wichtige Gründe kann man anführen:





1. Musizieren wird in früher Kindheit begonnen und in aller Regel intensiv durchgeführt. Das Nervensystem wird während seiner wichtigsten Wachstumsphasen vor und während der Pubertät stark stimuliert.
2. Professionelles Musizieren erfordert höchste räumlich-zeitliche Kontrolle zahlreicher neuronaler Systeme und ist daher auf hohe Geschwindigkeit der Informationsverarbeitung zwingend angewiesen. Dadurch werden Bemerkung der Nervenfasern und synaptische Effizienz gefördert.
3. Die präzise Informationsverarbeitung ist für Musiker von großer Bedeutung. Professionelles Musizieren findet in einem rigiden gesellschaftlichen Belohnungs- und Bestrafungssystem statt, in dem wenige Sekunden der Leistungsschwäche oft biographisch wichtige Konsequenzen nach sich ziehen (Probespiel, Wettbewerb). Diese Situation führt zu Hormonausschüttungen, insbesondere der Botenstoffe Adrenalin und Dopamin, die die Neuroplastizität unterstützen.
4. Musizieren ist selbstbelohnend und stellt einen starken emotionalen Reiz dar. Auch hier wirken hormonelle Faktoren wie die Ausschüttung von Dopamin und von Endorphinen auf neuroplastische Vorgänge ein.

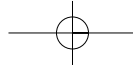
Ein weiterer Grund für das auffällig häufige Finden neuroplastischer Veränderungen bei Musikern liegt in der Methodik der Untersuchungen. In aller Regel werden nämlich die Plastizitätsbefunde als Gruppenvergleich zwischen Berufsmusikern und musikalischen Laien erhoben. Da professionelles Musizieren in jeder Gruppe von Berufsmusikern (Pianisten, Geiger etc.) ähnliche Voraussetzungen mit sich bringt, nämlich früher Beginn des Instrumentalunterrichts, hohe kumulative Lebensübezeit und vergleichbare sensomotorisch-auditive Aktivitäten, können sehr homogene Probandengruppen zusammengestellt werden. Dadurch werden die Effekte deutlicher als in heterogen zusammengesetzten Gruppen, wie wir sie z. B. bei den bildenden Künstlern oder bei den Schriftstellern finden würden.

#### 4. Zur Hirnphysiologie optimaler Übe-Bedingungen

In Abschnitt 3.3. wurde auf die Notwendigkeit aufmerksamen und zielgerichteten Übens hingewiesen. Offensichtlich gibt es aber auch eine Neuorganisation sensomotorischer neuronaler Netzwerke, die unbewusst, ohne Zuwendung von Aufmerksamkeit eintritt. Ein Beispiel dafür ist der *Reminiszenzeffekt*. Jedem Musiker ist bekannt, dass zuvor nicht gemeisterte schwierige Passagen nach einer Pause oder nach ausgiebigem Schlaf plötzlich gelingen. Die Aufklärung der neuronalen Mechanismen des *Lernens im Schlaf* war Gegenstand intensiver Untersuchungen.

##### 4.1. Üben im Schlaf, verteiltes Üben und Üben mit Feedback

Etwa sechs Stunden nach dem Üben einer schwierigen feinmotorischen Aufgabe ließ sich im Bereich des rechten vorderen Stirnhirns ein Hirnareal nachweisen, das neu bei der Ausführung der Aufgabe beteiligt war, ohne dass sich allerdings die motorische Leistung verbesserte. Dies spricht für die unbewusste Erstellung motorischer Steuerprogramme in den Pausen (Schadmehr und Holcomb 1997). Neben den Pausen ist besonders der Schlaf für eine Konsolidierung geübter Fertigkeiten von großer Bedeutung. Schon seit mehreren Jahrzehnten ist bekannt, dass Schlafentzug nach dem Üben die motorische Gedächtnisbildung beeinträchtigt. Besonders wichtig für die Stabilisierung frisch geübter prozeduraler Fertigkeiten scheint dabei die Traumschlafphase, der REM-Schlaf, zu sein (Maquet 2001). In letzter Zeit wurde die Hirnaktivierung nach dem Üben bei Probanden mit und ohne Schlafentzug verglichen. Bei den „Schläfern“ waren nicht nur die Gedächtnisstrukturen des Hippokampus, sondern auch die an der Aufgabe beteiligten sensomotorischen Zentren der Hirnrinde und das Kleinhirn viel stärker aktiviert als bei den Probanden, die nach dem Üben Schlafentzug hatten und in ihrer Leistung gegenüber der



Schlafgruppe abfielen (Maquet et al. 2003).

Nicht nur die Schlafdauer, auch die Art des Übens scheint die motorische Gedächtnisbildung zu beeinflussen. Lange Zeit war man davon ausgegangen, dass das zeitnahe Üben zweier unterschiedlicher Fertigkeiten zu störenden Interferenzen und zu einer weniger stabilen sensomotorischen Repräsentation beider Aufgaben führt. Inzwischen mehren sich die Befunde, die einen positiven Effekt des vermischten Übens unterschiedlicher Aufgaben zeigen. So wird der Lernzuwachs für beide Aufgaben überproportional verstärkt und die nachhaltige Gedächtnisbildung gefördert (Seidler 2004). Unklar bleibt allerdings, inwieweit diese an einfachen sensomotorischen Aufgaben erhobenen Befunde auf das Musizieren übertragbar sind und wie stabil die erworbenen Gedächtnisinhalte durcheinander geübter Fertigkeiten gegenüber Störeinflüssen bleiben. Darüber hinaus spielen mit Sicherheit motivationale Faktoren eine Rolle. So kann begeistertes Üben mit verbesserter Gedächtniskonsolidierung einhergehen im Gegensatz zum Üben im gelangweilten Zustand (Übersicht bei Schmidt/Lee 1999).

Ein wesentlicher Faktor für den Erfolg des Übens ist das Feedback, das der Übende erhält. Allgemein bekannt ist, dass durch verbales Feedback motorische Lernvorgänge nachhaltig beschleunigt werden können. Die neuronalen Grundlagen des auf eine solche Weise unterstützten sensomotorischen Lernens wurden von Kawashima und Mitarbeitern (2000) erforscht. Gegenüber einer Gruppe von Lernern ohne Feedback zeigte die Gruppe, die verbales Feedback über die Durchführung einer visuell-motorischen Aufgabe erhielt, eine zusätzliche Hirnaktivierung im Bereich der vorderen Gürtelwindung (CMA) und in der auditiven Sprachregion des hinteren linken Schläfenlappens. Die CMA-Aktivierung verdeutlicht die Rolle dieser motorischen Region für die emotionale Bewertung einer Bewegung, die ja in der Regel mit Feedback verbunden ist.

#### 4.2. Überüben – weniger ist manchmal mehr

Es ist bekannt, dass übertriebenes Üben nicht immer zu der erhofften Leistungssteigerung führt, sondern dass sogar eine Verschlechterung der Fertigkeiten eintreten kann. Dies wurde bereits 1975 überzeugend von Sportphysiologen gezeigt. Hettinger (Hollmann/Hettinger 2000) ließ Sportstudenten über 14 Tage lang die Fingergeschicklichkeit an einem Steckbrett trainieren. Er teilte die Studenten in acht Gruppen ein, die täglich unterschiedlich lange übten. Die Übenden mit der kürzesten Übezeit füllten das Steckbrett nur zehnmal am Tag aus, diejenigen mit der längsten Übezeit dreihundert Mal (Abb. 5). Trägt man den Zugewinn an Geschicklichkeit nach 14 Tagen Training gegen die Zahl der geforderten Arbeitsbewegungen pro Übungseinheit auf, dann zeigt sich, dass die optimale tägliche Übedauer bei dieser feinmotorischen Aufgabe bei 150 Arbeitseinheiten liegt. Wird länger trainiert, dann wird die feinmotorische Leistung nicht nur nicht besser, sie nimmt sogar wieder ab. In Anlehnung an die griechische Sage der Odyssee wurde dieses Phänomen von mir *Penelope-Effekt* getauft. Wie Penelope nachts das am Tage gewebte Hochzeitsgewand wieder auflöste, um keinen der Freier heiraten zu müssen, so zerstört zu langes Üben die zuvor mühsam erarbeiteten Bewegungsprogramme!

Über die neurophysiologischen Hintergründe dieses Effektes kann derzeit nur spekuliert werden. Vermutlich führt Üben mit nachlassender Aufmerksamkeit zu einer Verschlechterung der zuvor optimierten neuronalen Repräsentation von Bewegungen. Darüber hinaus ist denkbar, dass durch die Ermüdung der Muskulatur und durch Einsatz von ungeübten und ungeeigneten Hilfsmuskeln die Koordination abnimmt. Dieses suboptimale, langsamere motorische Programm wird dann im Bewegungsgedächtnis gespeichert.

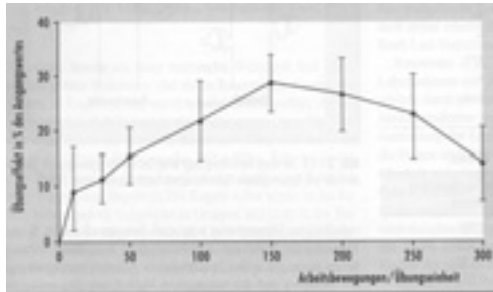
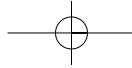


Abb. 5  
Abhängigkeit des Zugewinns an feinmotorischer Fertigkeit von der Anzahl der täglich durchgeführten Übungseinheiten (aus Hollmann / Hettinger 2000, S. 450)

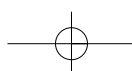
Der Scheitelpunkt der Kurve liegt natürlich je nach Art der Aufgabe, Tagesform und Übestrategie an unterschiedlichen Stellen. Individuelle sensomotorische Geschicklichkeit, Bewegungskompetenz und Ausdauer, Motivation und Konzentrationsfähigkeit sind weitere Faktoren, die den Verlauf der Kurve bestimmen. Es wird deutlich, dass es großer Erfahrung bedarf, bis man gelernt hat, seine optimale Lernkurve zu finden und vor allem im richtigen Moment mit dem Üben aufzuhören.

#### 4.3. Fokale Dystonie

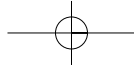
Eine andere, besonders fatale Form des Verlustes feinmotorischer Kontrolle lange geübter Fertigkeiten ist die tätigkeitsspezifische *fokale Dystonie*. Es handelt sich um eine sehr seltene neurologische Erkrankung, die auch „Musikerkrampf“ genannt wird. Man versteht darunter den Verlust der feinmotorischen Kontrolle aufgrund unwillkürlicher muskulärer Verkrampfungen. Die Bewegungsstörung tritt aufgabenspezifisch während des Instrumentalspiels auf und ist in der Regel schmerzlos. Gelegentlich kommt es bei Betroffenen allerdings nach längerem Spielen durch Überlastung der angespannten Muskeln zu muskulärer Ermüdung und zu Schmerzen. Die Musiker-Dystonie kann als Handdystonie (z. B. Geigerkrampf, Pianistenkrampf) oder bei Bläsern als Ansatz-Dystonie auftreten. Die Symptome der Handdystonie sind am Anfang in der Regel sehr subtil. Eine minimale Bewegungserschwerung im Bereich einzelner Finger oder leichte Unregelmäßigkeiten zuvor präzise beherrschter schneller Passagen können auf eine beginnende Dystonie hinweisen. Bei Blechbläsern kann eine unzuverlässige Kontrolle der Tongebung in einem bestimmten Tonhöhenregister das erste Zeichen einer Ansatz-Dystonie sein. Die Diagnose erfolgt durch den Neurologen oder Musiker-Mediziner und erfordert eine Untersuchung am Instrument (Abb. 6). Der übrige neurologische Befund sowie die Ergebnisse gerätetechnischer Zusatzuntersuchungen sind unauffällig.



Abb. 6  
Ausgeprägte fokale Dystonie bei einem Pianisten  
Charakteristisch ist das unwillkürliche Einrollen oder Abstreifen einzelner Finger während des Spiels. Bei diesem Pianisten liegt eine ausgeprägte Beugedystonie des 4. und 5. Fingers, geringer auch des 3. Fingers der rechten Hand vor.





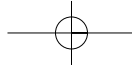


Die Häufigkeit des Auftretens fokaler Dystonien liegt für Instrumentalmusiker in Deutschland zwischen 1:100 und 1:200 und ist damit deutlich höher als z. B. beim Schreibkrampf (1:3400), einer verwandten Störung, die vorwiegend beim Schreiben auftritt. Jüngere Männer (83%), klassische Musiker (89%), Gitarristen, Pianisten und Holzbläser sind am häufigsten betroffen. Risikofaktoren sind chronische Schmerzen in der Vorgeschichte und Dystonien bei Angehörigen (Altenmüller 2003). Offensichtlich ist auch der Bewegungstyp für die Erkrankung von Bedeutung. Räumlich-zeitlich sehr präzise auszuführende repetitive Bewegungen scheinen eine Dystonie zu begünstigen. So ist bei Geigern weitaus häufiger die linke Hand, bei Gitarristen aber die rechte Hand betroffen. Angstbereitschaft und übermäßiger Perfektionismus können den Ausbruch der Erkrankung beschleunigen.

Die Ursache der Erkrankung liegt in einer Störung der zentralnervösen sensomotorischen Steuerprogramme. Dabei werden die Bewegungsimpulse nicht mehr ausreichend präzise an einzelne Muskelgruppen abgegeben, sondern es kommt zur Mitaktivierung benachbarter Muskelgruppen. Die mangelhafte Fokussierung der neuronalen Erregung auf die Zielmuskeln wird mit einer generellen Störung der im Zentralnervensystem normalerweise bestehenden wechselseitigen Hemmung von neuronaler Aktivität in Zusammenhang gebracht. Wie oben betont, besteht ja Feinmotorik in der Unterdrückung von Grobmotorik. Die Dystonie kann also als Rückfall in entwicklungsgeschichtlich ältere Bewegungsprogramme interpretiert werden. Auch in sensorischen Systemen wurde ein derartiges neuronales Hemmungsdefizit festgestellt. So konnte gezeigt werden, dass die beim gesunden Musiker vergrößerten, aber immer noch voneinander abgegrenzten neuronalen Repräsentationen einzelner Finger bei Dystonikern verschmolzen und desorganisiert sind (Übersicht bei Münte et al. 2002). Bislang ungeklärt ist, warum die einmal etablierte Bewegungsstörung sich so fest im Bewegungsgedächtnis verankert, dass sie therapeutisch kaum beeinflussbar ist. Liegt eine Handdystonie vor, kann durch lokale Injektionsbehandlung mit Botulinumtoxin eine Schwächung der sich verkrampfenden Muskeln erzielt werden. Dies führt bei 49% der Betroffenen zu einer Linderung der Bewegungsstörung. Speziell entwickelte Übungsverfahren zur Wiederherstellung der Koordination können bei leichter Ausprägung langfristig im Lauf von ein bis zwei Jahren zu einer Verbesserung und in seltenen Fällen sogar zur Ausheilung führen. Für die fokale Dystonie der Ansatzmuskulatur gibt es bislang noch keine Erfolg versprechenden Therapieansätze (Jabusch et al. 2005).

##### 5. Eine Neurodidaktik des Übens?

Nachdem in den vorangegangenen Abschnitten die neurobiologischen Grundlagen des Übens dargestellt wurden, soll jetzt der Versuch unternommen werden, einige Regeln zum hirnphysiologisch optimierten Üben zu formulieren und den Entwurf einer „*Neurodidaktik des Übens*“ vorzustellen. Allerdings ist große Vorsicht angebracht. Erstens ist das Wissen über den Erwerb musikalischer Fertigkeiten noch sehr unvollständig und der Übertrag aus den Sport- und Bewegungswissenschaften nur in Grenzen möglich. Zweitens wird seit Jahrtausenden geübt, und in den vielen Millionen von Übestunden ist eine riesige Menge an Wissen erworben und von den Lehrern weitergegeben worden. Man denke zum Beispiel an die Traditionen des Klavierspiels, die von Beethoven über Czerny, von Czerny über Liszt und von Liszt über die zahlreichen Liszt-Schüler, Liszt-Enkelschüler und Urenkelschüler in den Lehrbetrieb unserer Musikhochschulen integriert wurden. Übestrategien, die sich bewährt haben, wurden gepflegt und als Geheimtipps an die Schüler weitergegeben; andere, vielleicht weniger günstige, gerieten in Vergessenheit. Diesem kumulativen empirischen Expertenwissen der Pädagogen als Neurowissenschaftler etwas entgegenzusetzen, fällt schwer. Daher sind die Regeln eher angetan, den erfahrenen Pädagogen in seinem bewährten Vorgehen zu bestärken, als neue Erkenntnisse zu liefern. Die Reihenfolge der sieben Regeln ist von mir nach subjektiv empfundener Wichtigkeit gewählt.

**Regel 1:**

Üben wird durch Üben erlernt.

Üben erzeugt prozedurales Handlungswissen und beruht auf prozeduralem Handlungswissen. Üben ist immer auch ein sich selbst organisierender Prozess, bei dem Bewegungssteuerprogramme in Wechselwirkung mit Gehörsinn, Gesichtssinn, Körperwahrnehmung und mit der Körperperipherie, den Muskeln, Gelenken und Sehnen, nach und nach optimiert werden. Die Differenziertheit der Wahrnehmung und die Schnelligkeit der auditiv-sensomotorischen Integration bestimmen wesentlich die Lerngeschwindigkeit.

**Regel 2:**

Jede Übesitzung sollte bei Anzeichen von Ermüdung beendet werden.

Für jede Aufgabe sollte die persönliche Lernkurve ermittelt werden, um so den Penelope-Effekt zu vermeiden. Erfahrungsgemäß kann ein routinierter Instrumentalist die Anzeichen von Ermüdung, beispielsweise ein Nachlassen der muskulären Kraft oder Kontrolle oder ein Abschweifen der Gedanken, rasch erkennen. Als Faustregel sind 45 Minuten pro Übeeinheit für den fortgeschrittenen Schüler häufig ein geeignetes Zeitmaß. Anfänger können in der Regel die Aufmerksamkeit nicht so lange halten und benötigen entsprechend kürzere Übeeinheiten.

**Regel 3:**

Pausen und Schlafen gehören zum Üben.

Da die Konsolidierung der sensomotorischen Steuerprogramme vorwiegend in den Pausen geschieht, sind Pausen unabdingbarer Bestandteil jeder Übesitzung! Glücklicherweise geschieht die Konsolidierung unbewusst. Der Übende kann sich in den Pausen mit gutem Gewissen mit ganz anderen Dingen beschäftigen. Konzentriertes Arbeiten am Instrument macht naturgemäß müde. Ein ausreichender Nachtschlaf verbessert die Lernleistung.

**Regel 4:**

Auch das Hören von Musik und das Beobachten von Musikern gehört zum Üben.

Durch das Spiegelneuronsystem werden beim Hören und Beobachten von Musikern unsere eigenen sensomotorischen Steuerprogramme angesprochen. Für den Pädagogen bedeutet dies, dass er beim Demonstrieren am Instrument auf sorgfältige akustische und optische Wiedergabe achten, d. h. mit hoher Qualität vorspielen sollte.

**Regel 5:**

Mentales Üben ist effektiv.

Die neuronale Repräsentation von musikalischen Bewegungen kann durch mentales Üben verfeinert werden. Mentales Üben ist somit eine optimale Trainingsmöglichkeit, wenn kein Instrument zur Verfügung steht oder wenn man – krankheitsbedingt – nicht am Instrument üben kann.

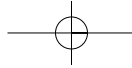
**Regel 6:**

Zeitnahes Üben unterschiedlicher Werke ist wahrscheinlich langfristig effizienter.

In den Bewegungswissenschaften mehren sich die Hinweise, dass durch Üben unterschiedlicher Bewegungsformen schneller gelernt wird. Unklar ist allerdings noch, ob die verteilt geübten Bewegungssteuerprogramme langfristig störanfälliger sind.

**Regel 7:**

Die langsame und die schnelle Ausführung musikalischer Bewegungen beruht auf unterschiedlichen sensomotorischen Programmen



Um komplizierte Abläufe zu erlernen, beginnt man meist zunächst in langsamem Tempo und steigert die Geschwindigkeit dann nach und nach. Nicht selten gelingt der Übertrag in das schnelle Tempo aber nicht. Die Ursache ist, dass je nach der Natur der zu erlernenden Aufgabe der langsame Bewegungsablauf ein anderes motorisches Programm benötigt als der schnelle. Dies betrifft vornehmlich Bewegungen, bei denen tempoabhängig die angreifenden physikalischen Kräfte sehr unterschiedlich sind. Dazu gehören Sprünge, schnelle Unterarmbewegungen, aber auch rasche große Fingerbewegungen. Diese schnellen ballistischen Bewegungsformen sollten daher schon in einem frühen Stadium in schnellem Tempo geübt werden, wobei es dann eventuell nötig ist, den Bewegungsablauf in einzelne überschaubare Anteile zu zerlegen. Exzellente Beispiele für diese Form des Übens finden sich in den Cortot'schen Ausgaben der Etüden von Frédéric Chopin.

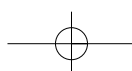
Zum Abschluss möchte ich in Erinnerung rufen, dass der Sinn des Übens mehr ist, als möglichst viele Töne pro Zeiteinheit möglichst korrekt zu spielen. Musizieren ist immer auch emotionale Kommunikation, die aus dem Augenblick schöpft und als Medium davon lebt, was der Spieler aus seinem Inneren mitzuteilen hat. Der emotionale Raum des Spielers entsteht aber nicht in der Übezelle, sondern setzt sich aus der Kraft und Vielfalt von inneren Bildern, aus der Feinheit der Wahrnehmung von Lebensphänomenen, aus subjektiv guten und weniger guten Lebenserfahrungen zusammen. Gerade dies sind Dinge, die man nicht üben kann und die ihre Zeit benötigen. Vielleicht könnte man als achte Regel mit den Worten abschließen: *Nicht nur üben – auch leben.*

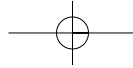
### Danksagung

Zahlreiche Menschen haben zum Gelingen des Artikels beigetragen. Meinen Kollegen Hans-Christian Jabusch und Reinhard Kopiez und den Mitarbeitern des Instituts für Musikphysiologie und Musiker-Medizin der Hochschule für Musik und Theater Hannover sei an dieser Stelle für zahlreiche Diskussionen zum Thema Üben ganz herzlich gedankt. Für konstruktive Hinweise aus der Sichtweise der Praktikerin möchte ich meiner Frau Bärbel danken. Die wichtigsten Lehrmeister waren sicher die Studierenden, die mich seit zehn Jahren jedes Semester durch ihre Fragen zum Thema Üben neu zum Nachdenken bringen.

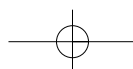
### Literatur

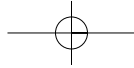
- Altenmüller, E. (2003), Focal Dystonia: *Advances in Brain Imaging and Understanding of Fine Motor Control in Musicians*, in: *Hand Clinics* 19, 2003, S. 1–16
- Amunts, K. / Schlaug, G. / Jäncke, L. / Steinmetz, H. / Schleicher, A. / Dabringhaus, A. / Zilles, K. (1997), *Motor Cortex and Hand Motor Skills: Structural Compliance in the Human Brain*, in: *Human Brain Mapping* 5, 1997, S. 206–215
- Bangert, M. / Altenmüller, E. (2003), *Mapping Perception to Action in Piano Practice: A longitudinal DC-EEG-study*, in: *BMC Neuroscience* 4, 2003, S. 26–36
- Bangert, M. / Peschel, T. / Rotte, M. / Drescher, D. / Hinrichs, H. / Schlaug, G. / Heinze, H. J. / Altenmüller, E. (2005), *Shared networks for auditory and motor processing in professional pianists: Evidence from fMRI conjunction* (eingereicht bei NeuroImage, 2005)
- Gaser, C. / Schlaug, G. (2003), *Brain structures differ between musicians and non-musicians*. in: *Journal of Neuroscience* 23, 2003, S. 9240–9245





- Haslinger, B. / Erhard, P. / Altenmüller, E. / Schroeder, U. / Boecker, H. / Ceballos-Baumann, A. O. (2005), *Transmodal sensorimotor networks during action observation in professional pianists*, in: *Journal of Cognitive Neuroscience* 17, 2005, S. 282–293
- Hollmann, H. / Hettinger, W. (2000), *Sportphysiologie*, Heidelberg
- Hundt-Georgiadis, / M. von Cramon, D. Y. (1999), *Motor-learning-related changes in piano players and non-musicians revealed by functional magnetic-resonance signals*, in: *Experimental Brain Research* 125, 1999, S. 417–425
- Jabusch, H. C. / Zschucke, D. / Schmidt, A. / Schuele, S. / Altenmüller, E. (2005), *Focal dystonia in musicians: treatment strategies and long term outcome in 144 patients*. *Movement Disorders* (im Druck)
- Karni, A. / Meyer, G. / Jezzard, P. / Adams, M. M. / Turner, R. / Ungerleider, L. G. (1995), *Functional MRI evidence for adult motor cortex plasticity during motor skill learning*, in: *Nature* 377, 1995, S. 155–158
- Kawashima, R. / Tajima, N. / Yoshida, H. / Okita, K. / Sasaki, T. / Schormann, T. / Ogawa, A. / Fukuda, H. / Zilles, K. (2000), *The effect of verbal feedback on motor learning – a PET-study*, in: *NeuroImage* 12, 2000, S. 698–706
- Konczak, J. (2002), *Motorische Kontrolle*, in: Müsseler, J. / Prinz, W. (Hrsg.), *Allgemeine Psychologie*, Heidelberg, S. 865–893
- Kuhtz-Buschbeck, J. P. / Mahnkopf, C. / Holzknacht, C. / Siebner, H. / Ulmer, S. / Jansen, O. (2003), *Effector-independent representations of simple and complex imagined finger movements: a combined fMRI and TMS study*, in: *European Journal of Neuroscience* 18, 2003, S. 3375–3387
- Mantel, G. (2001), *Einfach Üben. 185 unübliche Überezepte für Instrumentalisten*, Mainz etc.
- Maquet P. (2001), *The role of sleep in learning and memory*, in: *Science* 294, 2001, S. 1048–1052
- Maquet, P. / Schwartz, S. / Passingham, R. / Frith, C. (2003), *Sleep-related consolidation of a visuo-motor skill: brain mechanisms as assessed by functional magnetic resonance imaging*, in: *Journal of Neuroscience* 23, 2003, S. 1432–1440
- Münte, T. F. / Altenmüller, E. / Jäncke, L. (2002), *The musician's brain as a model of neuroplasticity*, in: *Nature Neuroscience* 3, 2002, S. 473–478
- Pascual-Leone, A. / Dang, N. / Cohen, L. G. / Brasil-Neto, J. P. / Cammarota, A. / Hallett, M. (1995), *Modulation of muscle responses evoked by transcranial magnetic stimulation during the acquisition of new fine motor skills*, in: *Journal of Neurophysiology* 74, 1995, S. 1037–1045
- Rijntjes, M. / Dettmers, C. / Buchel, C. / Kiebel, S. / Frackowiak, R. S. / Weiller, C. (1999), *A blueprint for movement: Functional and anatomical representations in the human motor system*, in: *Journal of Neuroscience* 19, 1999, S. 8043–8048
- Roland, P. E. / Larsen, B. / Lassen, N. A. / Skinhoj, E. (1980), *Supplementary motor area and other cortical areas in the organization of voluntary movements in man*, in: *Journal of Neurophysiology* 43, 1980, S. 118–136
- Roth, G. (2003), *Aus Sicht des Gehirns*, Frankfurt a. M.
- Schadmehr, R. / Holcomb, H. H. (1997), *Neural correlates of motor memory consolidation*, in: *Science* 277, 1997, S. 821–825
- Schlaug, G. / Jäncke, L. / Huang, Y. / Steinmetz, H. (1995), *Increased Corpus Callosum Size in Musicians*, in: *Neuropsychologia* 33, 1995, S. 1047–1055





- Schmidt, R. A. (1982), *Motor control and learning*, Urbana-Champaign (USA)
- Schmidt, R. A. / Lee, T. D. (1999), *Motor Control and Learning*, Urbana-Champaign (USA)
- Schmidt, R. A. / Wrisberg, C. A. (2000), *Motor Learning and Performance*, Urbana-Champaign (USA)
- Schneider, P. / Scherg, M. / Dosch, H. G. / Specht, H. J. / Gutschalk, A. / Rupp, A. (2002), *Morphology of Heschl's gyrus reflects enhanced activation in the auditory cortex of musicians*, in: *Nature Neuroscience* 5, 2002, S. 688–694
- Seidler, R. D. (2004), *Multiple motor learning experiences enhance motor adaptability*, in: *Journal of Cognitive Neuroscience* 16, 2004, S. 65–73
- Seidler, R. D. / Purushotham, A. / Kim, S. G. / Ugurbil, K. / Willingham, D. / Ashe, J. (2002), *Cerebellum Activation associated with performance change but not motor learning*, in: *Science* 296, 2002, S. 2044–2046
- Wagner, C. (1988), *The pianist's hand: anthropometry and biomechanics*, in: *Ergonomics* 31, 1988, S. 97–131
- Wagner, C. (2005), *Hand und Instrument: Musikphysiologische Grundlagen – praktische Konsequenzen*, Wiesbaden

#### Bildnachweise

- Alle Abb. außer Abb. 5: Institut für Musikphysiologie Hannover (IMMM), 2002
- Abb. 5 aus: Hollmann, W., Hettlinger, T. (2000): *Sportmedizin*, Stuttgart, New York, 4. Auflage, S. 144, Abb. 2.1-15. Abdruck mit freundlicher Genehmigung

