

Musikphysiologie

Hand-Wunder - Vom Spitzgriff zur Liszt-Sonate¹

Eckart Altenmüller, Hannover

„Die kompliziertesten und doch am perfektsten koordinierten Willkürbewegungen im ganzen Tierreich sind die Bewegungen der menschlichen Hand und der Finger. Und vielleicht werden bei keiner anderen menschlichen Aktivität die ungeheuren Leistungen des Gedächtnisses, der komplexen Integration und der muskulären Koordination eines professionellen Pianisten übertroffen“.

(Homer W. Smith, übersetzt aus: *From Fish to Philosopher*. Boston, Little Brown, 1953: pp 197)

Einleitung

Das Schwierigste, was der Mensch vollbringen kann, ist professionelles Musizieren auf hohem Niveau. Dieser das oben stehende Motto verkürzende Satz ist provokant formuliert und wird nicht sogleich jedem einleuchten. Der Leser wird fragen, ob nicht die Fingerfertigkeit begnadeter Neurochirurgen oder die Geschicklichkeit großer Jongleure und Puppenspieler mindestens genauso hoch anzusiedeln sind. Und wie steht es mit der Rückhand der jeweils Weltrangersten im Tennisspiel oder mit der feinen Handgelenksbewegung der Spitzengolfspieler beim „Putten“? Zweifellos handelt es sich auch hier um außerordentliche Leistungen, die einige Aspekte mit den „Handwundern“ beim Musizieren gemeinsam haben. Höchste räumliche und zeitliche Präzision des Bewegungsablaufes benötigen auch diese Fertigkeiten, hohe Geschwindigkeit ist zumindest für Neurochirurgen, Jongleure und Puppenspieler sehr wichtig. Auch Kreativität in der Bewegung und starke emotionale Beteiligung wird man wohl keinem der oben genannten „Handwerker“ absprechen können. Das wirklich Einmalige des Musizierens liegt darin, dass die Handbewegungen Musik zum Klingen bringen! Musikerhände unterwerfen sich damit der unerbittlichen Diktatur des Gehörs und werden so von einem Sinnessystem kontrolliert, das über eine überlegene räumlich-zeitliche Auflösung verfügt. Dies bedeutet, dass sensomotorische Abläufe beim Musizieren immer nur Annäherungen an ein gewünschtes Ziel sein können. Das lebenslange Streben nach Vervollkommnung der schöpferischen Handbewegungen ist damit eine der besonderen Daseinsbedingungen des ernsthaften Musikers.

Im Folgenden ersten Abschnitt wird die Frage „was Hände können“ beantwortet werden. Dabei sollen die besonderen Leistungen hochentwickelter menschlicher Handmotorik dargestellt werden und, - soweit bekannt - ihre hirne physiologischen Grundlagen erörtert werden. Thema des zweiten Abschnittes ist, wie Hände dieses Können erwerben und welche neurobiologischen Vorgänge diesem Lernprozess zugrunde liegen. Im dritten Abschnitt soll vom Verlust der Handgeschicklichkeit und vom tragischen Scheitern der Musiker die Rede sein.

1. Was Hände können

1.1. Weltmeisterhände

„Handwunder“ werden im Arbeitsprozess alltäglich von einer großen Anzahl von Menschen erbracht, ohne dass wir dies für besonders erwähnenswert hielten. Sekretärinnen beispielsweise haben nach einem achtstündigen Arbeitstag durchschnittlich 150000 räumlich präzise geführte Fingerbewegungen absolviert. Auskunft über „Weltmeisterhände“ erhält man im Guinness-Buch der Weltrekorde (1996). In der Eintragung zum Schreibmaschinenschreiben ist Carol Forristall Waldschlager in der Disziplin „Mechanische Schreibmaschine über 5 Minuten“ mit 176 Wörtern pro Minute seit 1959 Rekordträgerin. Nimmt man eine durchschnittliche Wortlänge von 4,2 Buchstaben im Englischen an, ergibt dies 740 fehlerfreie Anschläge pro Minute oder 12,3 pro Sekunde. Bisher ist diese Leistung auch von PC-Schreibern noch nicht übertroffen worden. So gelang es dem Rekord-PC-Schreiber Michail Tschsetoff 1993, die Zahlen von 1-795 in 5 Minuten fehlerfrei einzutippen. Dies entspricht „nur“ einer Schnelligkeit von ca. 7,6 Anschlägen pro Sekunde.

¹ Erschienen 1999 in: „Die Hand - Werkzeug des Geistes“. Hrsg. Marco Wehr und Martin Weinmann, Copyright: Spektrum Verlag, Heidelberg, Berlin, Oxford

Man könnte die Liste von Rekordleistungen der Hände noch weiter fortsetzen, vom Stricken (111 Maschen/ Minute) bis zum Briefmarkentrennen (358/ Minute).

Eine Steigerung des Schwierigkeitsgrades tritt ein, wenn die Bewegungen im Raum nicht zu selbstgewählten Zeitpunkten erfolgen können, sondern strenge zeitliche Vorgaben erfüllen müssen, wenn also räumliche und zeitliche Freiheitsgrade wichtig werden. Diese Situation ist zum Beispiel typisch für das Jonglieren oder für den Ballsport. Die in Kanada tätige Gruppe um den Bewegungsforscher J. Hore ließ Hobbysportler mit einem Tennisball auf ein 3 Meter entferntes Ziel werfen und registrierte die Bewegungen mit einem Bewegungsanalyse-System, das die Aufzeichnung von 1000 Bildern in der Sekunde ermöglichte. Um das Ziel zu treffen, musste die Handöffnung in einem sehr engen vorgegebenen Zeitraum von 2 ms erfolgen. Die Werfer verfehlten häufig das Ziel, da der Zeitpunkt ihrer Handöffnung um bis zu 10 ms variierte. (Hore et al. 1995). Man kann mit gutem Grund annehmen, dass hochtrainierte professionelle Spieler in der Lage sind, eine derart präzise zeitliche Steuerung von Handbewegungen reproduzierbar durchzuführen.

1. 2. Musizieren als „Krönung“ menschlicher Handfertigkeiten.

Wenn die Behauptung aufgestellt wird, dass professionelles Musizieren die anspruchsvollste menschliche feinmotorische Leistung ist, so muss zunächst geklärt werden, was das Besondere an der Handmotorik der Musiker ist. Drei besonders wichtige Merkmale sollen hier eingangs genannt und im weiteren dann ausgeführt werden:

der **Aspekt höchster räumlicher und zeitlicher Präzision unter Kontrolle des Gehörs**,

der **sportliche Aspekt** mit nach oben unbegrenzter Erschwerbarkeit der Bewegungsgeschwindigkeit und der Bewegungsformen,

der **emotionale Aspekt**, das heißt Handbewegungen werden zum Mittel, um Gefühlszustände mitzuteilen.

Die ersten beiden Punkte sind dabei durchaus kulturspezifisch und gelten vor allem für die reproduktive „ernste“ Musik der westlichen Zivilisationen, der dritte Punkt umfasst das eigentliche Wesen der Musik und ist allen Musikulturen gemeinsam.

1.2.1. Die Diktatur der Ohren

Professionelles Musizieren erfordert Bewegungen in höchster Präzision. Die räumlich-zeitlichen Rahmenbedingungen sind zumindest im Bereich der klassisch-romantischen Musik exakt vorgegeben. Bei vielen Instrumenten ist darüber hinaus auch die Kraft von Bedeutung, mit der eine Bewegung ausgeführt wird. So steuert der Pianist über seine Anschlagskraft die Lautstärke. Entscheidend ist aber, dass im Gegensatz zu allen anderen menschlichen feinmotorischen Fertigkeiten, die Qualität der Bewegungen für Spieler und Hörer genauestens kontrollierbar ist.

Der Eingangs zitierte Homer B. Smith war mit dem klassischen Pianisten Simon Barere befreundet. Für die Interpretation von Robert Schumanns äußerst virtuoser Toccata in C-Dur, Op. 7 benötigte Barere 4 Minuten und 20 Sekunden. In der Partitur zählte Smith 6266 Noten und errechnete damit eine Zahl von 24,1 Anschlägen pro Sekunde. Er schätzte auf der Grundlage dieser Zahlen, dass eine Geschwindigkeit von 20 bis 30 Noten in der Sekunde etwa 400-600 motorische Aktionen in den Muskelgruppen der Hände, Unterarme und Oberarme erforderten, die aber alle soweit automatisiert waren, dass der Pianist seine Aufmerksamkeit nicht auf einzelne mechanische Details zu richten hatte, sondern sie ganz der Gestaltung des Werkes und der eigentlichen Interpretation widmen konnte (nach H.B. Smith, 1953: 192-199).

Bereits die Quantität der Anschläge unterscheidet den Pianisten Barere von den Weltmeistern im Schreibmaschinenschreiben. Natürlich ist hier der Pianist im Vorteil, da er mehrere Töne gleichzeitig spielen kann, was am PC und an der Schreibmaschine nicht möglich ist. In diesem Sinn sind PC- und Schreibmaschine einstimmige Instrumente, deren Bedienung - wenn man von Leroy Andersons Konzert „Plink-Plank-Plonk - The Typewriter“ für Schreibmaschine und Orchester absieht - nicht einem extern vorgegebenen zeitlichen Muster unterworfen ist. Die Möglichkeit, sehr viele Noten gleichzeitig zu spielen, erschwert das Einhalten der erforderlichen zeitlich-räumlichen Präzision ungemein. Als Beispiel sei an dieser Stelle das typische pianistische Problem der Färbung von Akkorden angeführt. Wird ein Dreitonakkord mit der rechten Hand angeschlagen, so kann ein professioneller Pianist die Klangfarbe des Akkordes dadurch beeinflussen, dass er jeweils einen der drei Teiltöne lauter spielt als die anderen beiden. Ein heller Klang entsteht zum Beispiel dann, wenn der höchste der drei Töne am Lautesten ist. Um den höchsten Ton lauter zu spielen, muss die

Taste schneller niedergedrückt werden. Der Hammer wird mehr beschleunigt und die Saite beim Aufprall des Hammers stärker angeregt. Mit einem in unserem Labor konstruierten Klavier, das mit hochempfindlichen Kraftsensoren an den Tasten und mit Beschleunigungsgebern an den Hammerstielen ausgestattet ist, konnten wir nachweisen, dass die Differenz der Anschlagszeit, die anschlagender Finger und Klaviermechanik bei der Tonerzeugung eines in der Lautstärke um 7 dB(A) veränderten Tones benötigen, nur 6 ms beträgt.

Unter bestimmten Bedingungen kann das menschliche Ohr eine derartige geringe Zeitverschiebung zwischen den Tönen wahrnehmen. So liegt die zeitliche Unterscheidungsschwelle unseres Ohres für zwei mit 85 dB(A) gleichlaut gespielte 50 ms dauernde Sinustöne von 1000 Hertz (Hertz, Abkürzung „Hz“: ein Hz entspricht einer Schwingung pro Sekunde) bei 5 ms, also in dem kritischen Bereich, in dem Zeitunterschiede bei Klangfarbenmodulationen von Akkorden hörbar werden. Mit längerer Dauer der beiden nacheinander gespielten Töne wird die zeitliche Unterscheidungsfähigkeit des Ohres geringer. Bei Tönen, die eine halbe Sekunde klingen, beträgt sie z.B. nur noch 50 ms (Abel, 1987). In der Praxis bedeutet dies jedoch, dass Pianisten bei der Klangfarbengestaltung kurz angeschlagener Akkorde die Laufzeitdifferenzen mit einkalkulieren müssen. Der Finger, der lauter anschlägt muss dann gegenüber den leiser spielenden Fingern mit einer Verzögerung von wenigen Millisekunden die Tasten erreichen. Damit wird eine äußerst differenzierte Innervation der Fingermuskulatur oder eine minimale Drehung der Hand notwendig. Offensichtlich können professionelle Pianisten derartige geringe Zeitverschiebungen gezielt einsetzen. Erwähnenswert ist in diesem Zusammenhang, dass nach psychoakustischen Untersuchungen ein hoher Grad der Gleichzeitigkeit beim Anschlag von Akkorden vom Hörer als „harter Anschlag“ empfunden wird, während „weiches“ Akkordspiel mit einer leichten zeitlichen Desynchronisation der anschlagenden Finger einhergeht.

Dieses Beispiel zeigt nur eine der Schwierigkeiten, die beim professionellen Musizieren auf Grund der Kontrollmöglichkeiten durch den Gehörsinn gemeistert werden müssen. Der vorgegebene zeitliche Rahmen von Hand- oder Fingerbewegungen wird dabei durch die hohe zeitliche Auflösung des Ohres bestimmt. Offensichtlich liegt die Genauigkeitsgrenze der Handmotorik professioneller Musiker bei wenigen Millisekunden. Dies gilt nicht nur für den Zusammenklang von Akkorden, sondern auch für die Gleichmäßigkeit von aufeinanderfol-

genden Finger- und Handbewegungen. Eine der wichtigsten ästhetischen Kategorien des professionellen Instrumentalspiels ist rhythmische Präzision. Dazu gehört die Gleichmäßigkeit, mit der hintereinanderfolgende Töne angeschlagen werden. Eine einfache Trilleraufgabe am Klavier mit schnellem Wechsel von Zeige- und Mittelfinger können geübte Pianisten mit einer Schnelligkeit von bis zu 14 Anschlägen pro Sekunde durchführen, was bedeutet, dass jeder Finger siebenmal pro Sekunde die Klaviertaste niederdrückt. Die Gleichmäßigkeit dieser Fingerbewegungen ist bei guten Pianisten enorm: bei einer Analyse von 3 Sekunden langen schnellen Trillern wichen die Dauern der aus jeweils zwei Tönen bestehenden 18 Trillerzyklen um weniger als eine Millisekunde voneinander ab (Moore, 1992). Bei komplexeren pianistischen Bewegungen wird eine vergleichbare zeitliche Präzision allerdings nicht mehr erreicht. So variieren beim Spiel einer C-Dur-Tonleiter in mittlerem Tempo über 2 Oktaven auch bei professionellen Pianisten die Tonabstände um 6 ms. Bei extrem hohen Geschwindigkeiten von 17 aufeinanderfolgenden Tönen pro Sekunde entstanden sogar noch erheblich höhere Streuungen der Tonabstände um etwa 20 ms und damit deutlich größere Unregelmäßigkeiten als beim mittelschnellen Spiel. Unregelmäßigkeiten in der gleichen Größenordnung traten auch beim langsamen Spiel auf. Wurden die Pianisten gebeten, die gleichen Tonleitern mehrmals hintereinander zu spielen, so zeigte sich, dass die individuellen Unterschiede der jeweiligen Tondauern beim langsamen Spiel groß waren, bei mittelschnellem und sehr schnellem Spiel jedoch sehr gering. Dies spricht für einen höheren Grad der Automatisierung bei schnelleren Tempi. Offenbar werden ab einer bestimmten Schnelligkeitsanforderung die durch jahrelanges Üben erworbenen stereotypen sensorischen Programme abgerufen (Wagner 1971). Wird die Aufgabe allerdings noch komplexer und damit weniger „automatisationsfähig“ - etwa beim Spiel der technisch äußerst komplizierten schnellen Abwärtsläufe der rechten Hand im ersten Satz von Chopins h-moll Klavier-Sonate -, dann steigt die individuelle rhythmische Varianz bei mehrfacher Wiederholung der Figur auch beim schnellen Spiel wieder an. Ab einem bestimmten Komplexitätsgrad nimmt somit selbst bei intensivem Üben die Wiederholgenauigkeit der Zeitstruktur motorischer Programme wieder ab (Wilson 1992).

Nicht nur die zeitliche, auch die räumliche Präzision unterliegt beim Musizieren der Diktatur des Ohres. Es ist nahezu allen Instrumenten gemeinsam, dass Tonhöhen über Raumkoordinaten definiert werden. Das Treffen des rich-

tigen Tones auf der Klaviatur mag dabei noch eine relativ einfache sensomotorische Leistung sein, die erst bei großen und schnellen Sprüngen ihre ganze Schwierigkeit zeigt. Feiner abgestimmt sind die Bewegungen auf dem Griffbrett beim Geiger. Hier können schon Veränderungen der Fingerposition um wenige Bruchteile von Millimetern eine hörbare und unerwünschte Tonhöhenverschiebung zur Folge haben. Interessanterweise bewirkt offensichtlich diese vermehrte Zuwendung der Aufmerksamkeit auf die Tonhöhe auch eine Verbesserung des Gehörs. Daher verfügen Streicher über eine bessere Fähigkeit zur Tonhöhenunterscheidung als Pianisten oder Bläser (Hofmann et al. 1997). Dieser Umstand belegt die wechselseitige Verfeinerung von Gehör und Feinmotorik der Musiker im Laufe des musikalischen Lernens.

1.2.2. Der Beitrag anderer Sinne zum Musizieren.

Am 6. Oktober 1998 spielte das National Symphony Orchestra of America im Saal des Wiener Musikvereins das Konzert für Schlagzeug und großes Orchester von André Jolivet. Das für seine hohen Ansprüche berüchtigte Publikum applaudierte über 12 Minuten begeistert der Solistin Evelyn Glenny. Man könnte dies als mehr oder weniger normales Ereignis in der Musikmetropole verbuchen, wenn nicht ein Detail irritierte: Die britische Schlagzeugin Evelyn Glenny ist taub.

Nachdem oben von der „Diktatur des Gehörs“ über die Handmotorik der Musiker gesprochen wurde, zeigt das Beispiel Evelyn Glennys, dass auch andere Sinne ganz wesentlich beim professionellen Musizieren beteiligt sind. Mit Hilfe einer enorm verfeinerten Körperwahrnehmung und durch visuelle Kontrolle gelang es Evelyn Glenny, selbst schwierigste Partituren im Ensemblespiel mit höchster Präzision zu realisieren und im Verlauf ihrer überaus erfolgreichen Karriere zahlreiche Preise zu erringen.

Die Sinne, die die Grundlage der erstaunlichen Fähigkeiten von Evelyn Glenny bilden, sind die Oberflächen- und die Tiefensensibilität. Zur Oberflächensensibilität zählt man die mechanischen Sinne der Haut, nämlich Druck-, Berührungs- und Vibrationsempfindung sowie den Temperatursinn und den Schmerzsinne. Zur Tiefensensibilität gehören die Gelenk- und Muskelrezeptoren, die über Gelenksstellung, Gelenkbewegung, Sehnenspannung und Muskelspannung informieren. Vor allem die mechanischen Sinne und die Tiefensensibilität spielen für Instrumentalisten eine große Rolle und können im besonderen Fall von Evelyn

Glenny so gut ausgebildet sein, dass Vibrations- und Druckempfindung für die Rückmeldung von Tonhöhen- und Lautstärkeninformation das Gehör ersetzen.

Eine gut trainierte Oberflächen- und Tiefensensibilität ist auch für hörende Berufsmusiker eine Voraussetzung zur feinmotorischen Kontrolle ihrer Bewegungen. Ein Musiker, der während einer lauten Passage im großem Orchester spielt, hört sich selbst nicht und wird seine Feinmotorik im wesentlichen mit Hilfe der Oberflächen- und Tiefensensibilität steuern, insbesondere wenn er z.B. als Cellist nicht einmal über die Möglichkeit der visuellen Kontrolle der Handposition der linken Hand verfügt. Die Leistungsfähigkeit der Eigenwahrnehmung zeigt sich ebenso in der Tatsache, dass zahlreiche Berufsmusiker nach Erblindung weiter auf professionellem Niveau musizieren können.

Während die berufsbedingte Steigerung motorischer Fertigkeiten bei professionellen Musikern durch zahlreiche Untersuchungen belegt ist, finden sich erstaunlicherweise in der Literatur keine Angaben zur überlegenen Oberflächen- und Tiefensensibilität bei Musikern. Vorläufige eigene Untersuchungen sprechen dafür, dass die als Zwei-Punkt-Diskrimination bezeichnete Fähigkeit, zwei nebeneinanderliegende Hautreize an der Fingerspitze noch räumlich aufzulösen und als getrennt zu empfinden, bei Berufsmusikern besonders gut ausgeprägt ist. Dies scheint sich auch in der zentralnervösen Repräsentation der somatosensorischen Handregion widerzuspiegeln, wie weiter unten erläutert werden wird.

Im Gegensatz zur Somatosensibilität spielt der Gesichtssinn für die Ausführung sehr schneller Handbewegungen beim professionellen Musizieren eine untergeordnete Rolle. Nur beim Erlernen eines Instrumentes und beim langsamen Einüben geführter Handbewegungen ist die visuelle Kontrolle von großer Bedeutung. Nach Untersuchungen von Freund (1989) können Handbewegungen nur bis zu einer Wechselfrequenz von 2 Hz noch genau mit der Fovea des Auges, dem Ort der höchsten räumlichen Auflösung, verfolgt werden. Da wir aber oben gesehen haben, dass Finger und Handbewegungen Frequenzen von bis zu 17 Hz erreichen können, entzieht sich ein recht großer Bereich des virtuosen Musizierens der visuellen Kontrolle. Musiker wissen dies: Pianisten, die gut „vom Blatt“ spielen, schauen wesentlich seltener auf die Tastatur als schlechte Prima-Vista-Spieler und orientieren sich im wesentlichen über das somatosensorische System. Je häufiger ein Pianist von den Noten auf sein Instrument schaut, desto höher wird seine Fehlerquote (Übersicht bei Sloboda 1985).

1.2.3. Schneller-Lauter-Länger - Musizieren als Hochleistungssport für Hände?

„Was aber ist das Schwierigste für einen Pianisten? Das Schwierigste ist sehr schnell, sehr laut und sehr lange zu spielen“ (Heinrich Neuhaus, 1967)

Spätestens seit der Periode der Romantik erreichen die zu spielenden Partituren die Grenzen der menschlichen Leistungsfähigkeit hinsichtlich der geforderten Geschwindigkeit, Kraft und Ausdauer. Herausragende Virtuosen wie Nicolo Paganini oder Franz Liszt traten als Komponisten und Interpreten ihrer eigenen Werke auf und setzten Maßstäbe, die für andere unerreichbar blieben. Spielanweisungen wie „*presstissimo possibile*“ (so schnell wie möglich) ließen die Grenzen nach oben offen. Heutzutage wird der ungeheure „artistische“ Leistungsdruck durch die von der Musikindustrie verursachte und von den Musikern in gewissermaßen selbstzerstörerischer Weise mitgetragenen Tonträger-Kultur erzeugt.

Man kann sich die Frage stellen, wodurch die Geschwindigkeit von Hand- und Fingerbewegungen begrenzt wird. Ganz offensichtlich bestehen auch bei professionellen Musikern enorme intraindividuelle Unterschiede in der erreichbaren Geschwindigkeit. Ein pianistisch-artistischer Weltmeister wie Vladimir Horowitz spielt in der Live-Aufnahme des ersten Klavierkonzertes von Tschaikowsky vom 25. April 1943 die kraftvollen Fortissimo-Oktavpassagen mit einer Geschwindigkeit von 13 Anschlägen in der Sekunde. Derartige Oktavläufe sind durch repetierende Bewegungen im Handgelenk durchzuführen, es handelt sich hier also um eine Wechselfrequenz von 13 Hz. Nach anekdotischen Angaben sollen die höchsten Bewegungsfrequenzen, die jemals bei einem professionellen Pianisten gemessen wurden bei 16 Hz liegen (Freund 1989). Der Neurowissenschaftler Freund geht davon aus, dass eine feste Beziehung zwischen der höchsten erreichbaren Geschwindigkeit von Wechselbewegungen und der Frequenz des physiologischen Ruhetremors besteht. Unter dem physiologischen Ruhetremor wird das bei jedem Menschen vorhandene Ruhezittern der Extremitäten verstanden. Dieses Ruhezittern wird ohne spezielle Meßmethoden häufig erst dann sichtbar, wenn die Aktivität der Nervenzellen durch seelische Anspannung oder durch Substanzen wie Koffein oder Nikotin verstärkt wird. Offenbar stellt die individuell konstante Frequenz des Ruhetremors die obere Grenze der schnellstmöglichen willkürlichen Wechselbewegungen dar. Üblicherweise liegt der Frequenzbereich des physiologischen Tremors zwischen 6 und 12 Hz. Messungen der Finger-

klopfgeschwindigkeit an einer großen Gruppe von Nicht-Musikern ergaben, dass die maximale Klopfrequenz in keinem Fall oberhalb der physiologischen Tremorfrequenz der Finger lag. Die neurobiologischen Grundlagen des physiologischen Tremors sind noch nicht in allen Einzelheiten bekannt. Vermutet wird, dass rhythmische Oszillationen der im Vorderhorn des Rückenmark liegenden motorischen Neurone, aber auch das Entladungsverhalten der Muskelspindeln eine Rolle spielen.

Mit Sicherheit ist der physiologische Tremor aber nicht die einzige Determinante der erreichbaren Geschwindigkeit beim Musizieren. Der überwiegende Teil der Instrumentalmotorik erfordert nicht einfache Wechselbewegungen im Handgelenk oder in den Fingergelenken, sondern zusammengesetzte Bewegungsabläufe. So tragen zum Erreichen der Geschwindigkeit der oben erwähnten C-Dur Tonleiter neben den Bewegungen der einzelnen Finger die seitlichen Drehbewegungen (Supinations- und Pronationsbewegungen) im Unterarm zu einem wesentlichen Teil bei. Daraus folgt, dass auch die Fähigkeit zur Koordination verschiedener Anteile des Bewegungsapparates bei Höchstleistungen besonders gut ausgeprägt sein muss.

Die Qualität der Koordination und die Professionalität des Spielers zeigt sich auch in der Fähigkeit, den Bewegungsablauf dadurch zu ökonomisieren, dass möglichst geringe Massen bewegt werden. Die Kräfte, die beim professionellen Musizieren nötig sind, können durchaus erheblich sein. Sieht man von der Haltearbeit eines Geigers oder eines Fagottisten (ein Fagott wiegt um 7 Kilogramm!) ab, so wird zum Niederdrücken von Tasten, Klappen oder Saiten teilweise erhebliche dynamische Kraft erforderlich. Dies sei am Beispiel der Abb. 1 erläutert. In der Abbildung sind die auf zwei Tasten einwirkenden Kräfte während einer von einem professionellen Pianisten (obere Hälfte) und von einem Amateurpianisten (untere Hälfte) gespielten Trillerpassage am Klavier gezeigt. Die Versuchspersonen hatten die Instruktion erhalten, so laut, so schnell und so lange wie möglich mit Zeigefinger und Mittelfinger zu trillern. Dargestellt ist ein Ausschnitt von zweieinhalb Sekunden nach einer vorangegangenen 16 Sekunden langen Trillerbewegung (siehe Beschriftung der x-Achse). Der Kraft-Zeitverlauf der mit dem Zeigefinger gespielten Taste ist durchgezogen, der mit dem Mittelfinger gespielten Taste ist gepunktet dargestellt. Die komplizierten, meist zweigipfligen Kraft-Zeit-Diagramme der Tastendruckkurven (Zeigefinger durchgezogen, Mittelfinger gestrichelt) erklären sich durch die initial benötigte Kraft beim Beschleunigen des

Hammersystems (jeweils erster Gipfel) und durch die Erhöhung der Kraft bei Erreichen des Tastengrunds (jeweils zweiter Gipfel). Die

Feinstruktur der Kraftverläufe ist durch das Hebelsystems der Klaviermechanik und die Eigenresonanz der Klaviertasten bedingt.

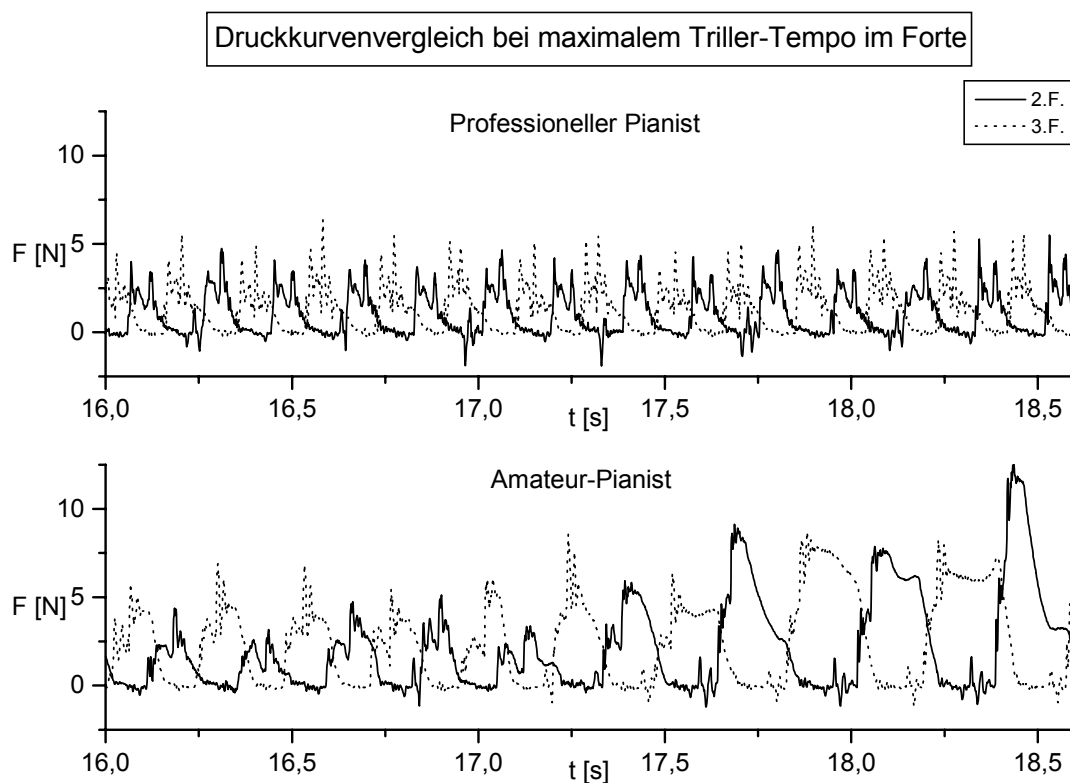


Abb. 1. Ausschnitte von Kraft-Zeitverläufen auf zwei Klaviertasten während einer schnellen und lauten Trillerbewegung mit dem Zeigefinger (durchgezogen) und mit dem Mittelfinger (gepunktet). Oben sind die Kraftwerte bei einem professionellen Pianisten dargestellt, unten bei einem sich zunehmend verkrampfenden Amateur. Weitere Erläuterungen im Text.

Die maximale Kraft der Anschläge beträgt bei dem im oberen Teil der Abbildung dargestellten Pianisten etwa 5 Newton. Würde man diesen Wert über die Zeit und die Anzahl der Bewegungen aufsummieren, dann entspricht dies bei 12 Anschlägen pro Sekunde einer Kraft von 60 Newton (oder von ca. 6 Kilopond), die die Fingerbeugemuskulatur in der Sekunde leisten muss. Unter den Extrembedingungen des schnellen, lauten und langen Klavierspiels wird auch bei dem professionellen Pianisten nach vorangegangenen 16 Sekunden des Trillerns nicht mehr die höchstmögliche zeitliche Präzision der Trillerzyklen und Gleichmäßigkeit der Lautstärke erreicht. Die koordinativen Fertigkeiten sind jedoch ungestört, denn nach wie vor zeigen die Kraftverläufe an der Tastatur

eine rasche Entspannung der Finger bei Erreichen des Tastengrundes nach der jeweils zweiten Kraftspitze. Dies gelingt dem Amateurpianisten nicht, er verlangsamt in dem abgebildeten Zeitabschnitt nach 16 Sekunden langem Trillern die Trillergeschwindigkeit und erhöht zunehmend die Kraftausübung auf die Tastatur. Als Ausdruck dieser durch muskuläre Ermüdung bedingten Verkrampfung steigt vor allem die Haltekraft nach Erreichen des Tastengrundes, obwohl dieser Kraftanteil nicht mehr zur Tonerzeugung beiträgt. In ganz typischer Weise wird hier ein Nachlassen von koordinativen Fertigkeiten im Laufe der Ermüdung durch übermäßigen und inadäquaten Krafteinsatz kompensiert.

1.2.4. Koordination, bimanuelle Fertigkeiten und Händigkeit von Musikern

Die von Musikern zu bewältigenden besonderen Schwierigkeiten liegen nicht nur in den streng vorgegebenen engen zeitlich-räumlichen Rahmenbedingungen und in dem „Schneller-Lauter-Länger“, sondern auch in der Natur der Bewegungen selbst. Christoph Wagner hat in seiner Schrift „Welche Anforderungen stellt das Instrumentalspiel an die menschliche Hand“ (1987) die wesentlichen Merkmale aufgeführt. So werden für die Handmotorik hochkomplizierte Bewegungsformen gefordert, die den isolierten Einsatz einzelner Finger mit gleichzeitig gegensinnigen Bewegungen umfassen. Darauf beruht etwa die Fähigkeit der Pianisten, Terztriller mit Beugung von Zeigefinger und Ringfinger und Streckung von Daumen und Mittelfinger durchzuführen. Ähnliche Bewegungsmuster finden sich auch bei den Gabelgriffen der Blasinstrumente und den Doppelgriffen der Streicher.

Eine weitere Schwierigkeit ergibt sich daraus, dass anatomisch-biomechanisch ungleichartige Finger hinsichtlich Schnelligkeit, Kraft und Koordination gleichartige Aufgaben übernehmen müssen. Es ist allgemein bekannt, dass der Ringfinger für Pianisten ein „Problemfinger“ ist. Durch breite Quersehnen, den sogenannten „Connexus intertendineus“ ist die Strecksehne des Ringfingers mit denen des Kleinfingers und des Mittelfingers verbunden. Daraus resultiert die geringere Beweglichkeit des Ringfingers, der damit häufig auch nicht die Geschwindigkeit und die Kraft der anderen Finger erreicht. Der Vergleich einer „Trillerbewegung“ von Klein- und Ringfinger mit einer schnellen Wechselbewegung von Zeige- und Mittelfinger macht dies jedem Leser deutlich.

Schließlich muss in Gegensatz zu den meisten anderen feinmotorischen Fertigkeiten nicht nur die Beugung, sondern auch die Streckung der Finger bewusst eingesetzt werden. Letzteres ist eine Voraussetzung für virtuoses, gut artikuliertes „Non-legato“-Spiel am Klavier oder für schnelle Triller und Läufe am Griffbrett eines Streichinstrumentes. Spitzenpianisten zeichnen sich nach unseren Messungen der Fingerbeuge- und Streckkraft dadurch aus, dass sie größere Kräfte der Fingerstreckmuskulatur aufweisen als ihre weniger erfolgreichen Kollegen.

Ein bislang noch nicht dargestellter und überhaupt wenig untersuchter Aspekt der spezifischen Handfertigkeiten von Berufsmusikern ist die Notwendigkeit der hochpräzisen Koordination der Bewegungen beider Hände. In der Musik treten dabei zwei grundsätzliche Schwierigkeiten auf. Einerseits müssen unterschiedliche Bewegungen in beiden Händen zeitlich exakt - das heißt im Millisekundenbe-

reich - synchronisiert werden, andererseits müssen beide Hände unabhängig voneinander unterschiedliche zeitliche Muster generieren können. Der erste Fall tritt beim Spiel von Parallelläufen mit beiden Händen auf dem Klavier ein. Ein weiteres Beispiel dafür ist die Koordination zwischen rechter Hand am Bogen und linker Hand am Griffbrett beim schnellen, gut artikulierten „Staccato“ der Geiger. Die zweite Schwierigkeit liegt vor, wenn Schlagzeuger oder Tasteninstrumentalisten z.B. mit der linken Hand drei und gleichzeitig mit der rechten Hand vier Notenwerte pro Zeiteinheit spielen müssen.

Die Synchronisation beider Hände am Klavier mag dem Laien als ein verhältnismäßig einfach zu lösendes Problem erscheinen, ist aber für den Pianisten keineswegs trivial. Spiegelbildliche Bewegungen sind dabei deutlich leichter auszuführen als gleichsinnig-parallele. Klavierkomponisten mit Bevorzugung der Spiegelsymmetrie bei Handbewegungen wie etwa Frederic Chopin gelten deshalb auch als Komponisten, die „gut für das Klavier schreiben“. Eine der Ursachen, warum für die bimanuelle Handmotorik generell eine Bevorzugung von spiegelsymmetrischen Bewegungen besteht, dürfte darin liegen, dass die lange geübten zentralnervösen motorischen Steuerprogramme mit großer Wahrscheinlichkeit als geistige „Bewegungsbilder“ abgelegt sind. Diese „Bewegungsbilder“ - heute würden wir sie „mentale Repräsentationen“ nennen - können dann auf die rechte oder auf die linke Handmotorik, aber auch auf die Fußmotorik übertragen werden können, ohne dass zusätzliche neuronale Ressourcen benötigt werden (Übersicht bei Bernstein, 1987). Werden dagegen parallel geführte Fingerbewegungen eingesetzt, so müssen zwei motorische Steuerprogramme getrennt für die linke und für die rechte Hand zum Einsatz kommen. Darüber hinaus müssen für ein makellostes, gleichklingendes Spiel beider Hände die oben aufgeführten anatomisch-biomechanischen Ungleichartigkeiten der Finger ausgeglichen werden. Beim parallelen Spiel einer C-Dur-Tonleiter mit beiden Händen müssen beispielsweise der Kleinfinger der linken Hand und der Daumen der rechten Hand gleiche Lautstärke und Klangfarbe entfalten.

Hinsichtlich der bimanuellen rhythmischen Synchronisation oder Desynchronisation beim Musizieren liegen noch wenig gesicherte Erkenntnisse vor. Es ist bekannt, dass ab einer bestimmten Schnelligkeit Wechselbewegungen beider Hände zur Synchronisierung neigen. Dies wird dadurch erklärt, dass zentralnervöse Zeitgeber-Neurone unter bestimmten Bedingungen eine starke Kopplungsneigung aufweisen. Offensichtlich können Musiker diese Kopplungen jedoch beeinflussen und selbst

bei sehr hohem Tempo die Unabhängigkeit der Zeitgeber für die linke und die rechte Hand aufrecht erhalten.

Es gibt plausible Gründe zu vermuten, dass Linkshändigkeit für einen Teil der Musiker von Vorteil ist. Streicher beispielsweise müssen die schnellen Fingerbewegungen am Griffbrett mit der linken Hand durchführen. Beurteilt man die Händigkeit von Musikern mit Fragebögen, auf denen standardisierte Handfertigkeiten, z.B. Schreiben, Zähneputzen etc. abgefragt werden, so zeigt sich in der Tat ein leicht erhöhter Anteil von Linkshändern oder Beidhändern unter den Berufsmusikern. Nach Aggleton und Mitarbeitern (1994) finden sich um 12% Linkshänder unter den Berufsmusikern verglichen mit um 8% bei Nicht-Musikern. Die Untersuchungen anderer Gruppen zeigen, dass der höchste Anteil von Linkshändern unter Streichinstrumentalisten, der geringste unter Pianisten zu finden ist. Wesentlich genauer sind Untersuchungen, die nicht auf Fragebögen beruhen, sondern in denen die Handfertigkeit der Musiker direkt gemessen wird. Jähnke und Mitarbeiter (1997) verwendeten einen Hand-Dominanz-Test und konnten zeigen, dass Musiker im Vergleich zu Nichtmusikern eine weniger asymmetrische Verteilung der Handfertigkeiten aufwiesen. Unabhängig von der bevorzugten Schreibhand waren die rechte und die linke Hand ähnlich geschickt. Je früher das Instrumentalspiel begonnen worden war, desto gleichmäßiger waren die „Handfertigkeiten“ auf beide Hände verteilt. Möglicherweise beruhen daher die in den Umfragen gefundenen höheren prozentualen Anteile von Linkshändern oder von Beidhändern unter den Berufsmusikern darauf, dass beide Hände schon sehr früh verstärkt trainiert werden und sich keine eindeutige Handpräferenz herausbildet.

1.2.5. Die Seele in den Händen

Am Klavier sitzend fing er an, wunderbare Regionen zu enthüllen. Wir wurden in immer zauberischere Kreise hineingezogen. Dazu kam ein ganz geniales Spiel, das aus dem Klavier ein Orchester von wehklagenden und laut jubelnden Stimmen machte.

(Robert Schumann über Johannes Brahms, in: Gesammelte Schriften, 1843, VMA-Verlag, Wiesbaden 1962)

Ein Aspekt, der professionelles Musizieren von einem Großteil aller anderen Handtätigkeiten fundamental unterscheidet, ist die enorm starke Kopplung der Bewegung an die Emotion. Musiker führen ihre Bewegungen mit Leidenschaft durch, es sind affektiv geführte Ausdrucksbewegungen. Musiker streben lebens-

lang nach künstlerischem Ausdruck, letztlich sind also die Bewegungen am Instrument immer auch schöpferische Tätigkeit.

Erstaunlich ist, dass diese wichtigen Merkmale der Handmotorik beim Musizieren bislang weder von Motorikforschern noch von Neurobiologen angemessen berücksichtigt wurden. Dabei dokumentieren zahlreiche neuroanatomische Befunde die Existenz von starken Faserverbindungen zwischen dem für die Steuerung der Affekte zuständigen limbischen System und den sensomotorischen Regelkreisen (Übersicht bei Gerhardt Roth, 1996). Die sensomotorischen Regelkreise beziehen nicht nur die Hirnrinde, sondern auch das Kleinhirn und die sogenannten „Basalganglien“ mit ein. Letztere sind große Neuronenansammlungen an der „Basis“ des Endhirns im Inneren des Großhirns. Die Basalganglien sind an mehreren Aspekten der Steuerung von Bewegungen beteiligt. So geht von dort offenbar das interne „Starten“ von Bewegungen aus. Aber auch die Feinabstimmung komplexer, gelernter Bewegungsfolgen wird von diesen Hirnregionen mit reguliert. Erkrankungen der Basalganglien führen zur Parkinson'schen Krankheit oder zum Veitstanz (Chorea). Für die affektive Steuerung der Bewegungen scheinen die zahlreichen direkten Verbindungen vom limbischen „Emotionssystem“ zu den Basalganglien verantwortlich zu sein. Wahrscheinlich nimmt über diese Verbindungen das limbische Bewertungs- und Gedächtnissystem auf unsere Handbewegungen einen entscheidenden Einfluss.

Während die neurobiologischen Grundlagen der emotionalen Handbewegungen am Musikinstrument noch unbekannt sind, befaßt sich die Musikpsychologie schon seit langem mit der musikalischen Ausdrucks- oder Performanceforschung. Dabei wird meist beschrieben, welche akustischen Merkmale ausdrucksvolles Spiel von weniger ausdrucksvollem Spiel unterscheiden. Behne und Wetekam (1994) ließen eine Gruppe von Pianisten den Beginn von Mozarts Sonate A-Dur, KV 331 spielen und gaben die Anweisung, eine Version „ausdrucksvoll“ und eine Version „rhythmisch exakt“ wiederzugeben. Dabei zeigte es sich, dass auch in der rhythmisch exakten Version alle Interpreten genau die Eigenarten zeigten, die die Individualität ihrer ausdrucksvollen Version ausmachte. Mit anderen Worten war es ihnen nicht möglich, „ausdruckslos“ zu spielen. Diese Befunde sprechen dafür, dass zumindest ein Teil der Merkmale emotionalen Spieles bereits in sensomotorischen Steuerprogrammen festgelegt und automatisiert ist.

1.3. Musiker-Gehirne sind anders: Hirnphysiologische Begleiterscheinungen professionellen Musizierens

In den oberen Abschnitten wurde dargelegt, worin das Besondere der Handmotorik beim professionellen Musizieren liegt. Es lag nahe, zu untersuchen, ob die hohen Anforderungen an zeitlich-räumliche Präzision, an die bimanuelle Koordination oder an die Eigenwahrnehmung sich auch in strukturellen oder funktionellen Eigenschaften der beteiligten Hirnregionen niederschlägt.

Die bisherige Kenntnis der Nervenzellnetze, die an der feinmotorischen Steuerung der Hand beteiligt sind, ist noch unvollständig. Es scheint die supplementär-motorische Hirnrinde (SMA) für die Steuerung komplexer Bewegungssequenzen eine große Rolle zu spielen. Nach neuen Befunden wird die SMA in mehrere Untergebiete eingeteilt. Der vorderste Anteil der SMA (rostrale SMA) scheint ein sogenanntes negatives motorisches Feld zu sein, da bei elektrischer Reizung dieser Hirnregion Bewegungen unterbrochen werden. Der dahinter liegende Anteil der SMA (anteriore Anteil der SMA) ist wohl überwiegend bei der Planung von komplexen Bewegungen aktiv, der hinterste Anteil der SMA (posteriore SMA) trägt zur Aufgabenausführung bei. Insbesondere komplexe bimanuelle Aufgaben scheinen dort verarbeitet zu werden. So führte die Reizung dieser Hirnregion zur Unterbrechung beidhändigen Klavierspiels. Offensichtlich ist diese Region auch mit der zeitlichen Synchronisation von beidhändigen Bewegungen befasst. Erhielten Berufsmusiker die Aufgabe, mit beiden Händen unterschiedliche Rhythmen zu klopfen, war nämlich diese Region ebenfalls stark aktiv. An dieser Stelle soll nicht weiter auf die Komplexität der prämotorischen und motorischen Vernetzung eingegangen werden. Es sei nur erwähnt, dass es sicherlich unterschiedliche Nervenzellnetzwerke sind, die von außen - etwa durch einen Dirigenten - veranlasste Bewegungen oder intern generierte Bewegungen nach freiem Entschluss produzieren (Marsden et al. 1996). Mit Sicherheit kontrolliert die SMA nur Teilaspekte der feinmotorischen Steuerung von Handbewegungen. Darüber hinaus leistet das Kleinhirn einen wesentlichen Beitrag zur zeitlichen Organisation von Bewegungen. So sind beispielsweise Patienten mit einer Kleinhirnschädigung nicht mehr in der Lage, mit einem Ball ein Ziel zu treffen, was nach neuen, noch unveröffentlichten Ergebnissen an dem ungenauen „Timing“ der Handöffnung beim Ballwurf liegt.

Während sich die oben genannten Erkenntnisse allgemein auf komplexe feinmotorische Fertigkeiten beziehen, sollen im folgenden die Ergebnisse der Untersuchungen dargestellt

werden, die spezifisch das „Musikergehirn“ zum Thema hatten. Nach neuen Befunden führt langjährige Übung der Feinmotorik bei Musikern zu einer Veränderung der Größe der Handarea in den primären motorischen Arealen (Amunts et al. 1997). Mit Hilfe der Kernspintomographie wurde eine große Gruppe professioneller Pianisten untersucht und mit einer altersgleichen Gruppe von Nicht-Musikern verglichen. Es zeigte sich, dass bei Musikern im Gegensatz zu den Nicht-Musikern keine deutliche Asymmetrie zwischen den rechtshemisphärischen und den linkshemisphärischen motorischen Handarealen nachweisbar war und dass insgesamt die motorische Handregion auf beiden Hirnhälften bei den Musikern etwas größer war. Diese Unterschiede waren besonders bei denjenigen Instrumentalisten deutlich, die vor dem Alter von sieben Jahren mit dem Instrumentalspiel begonnen hatten. Sehr wahrscheinlich handelt es sich hier um eine funktionelle Adaptation der „Hardware“ des Zentralnervensystems an die verstärkten Anforderungen. So ist bekannt, dass die Entwicklung des Stützgewebes und die Bemerkung der Nervenzellfortsätze im Zentralnervensystem bis über das siebte Lebensjahr hinaus andauern und durch adäquate Stimulation gefördert werden können.

Mit der gleichen Meßmethode wurde auch die Größe des Balkens, - der mächtigen Faserverbindung zwischen der rechten und der linken Hirnhälfte - bei Pianisten und bei Geigern im Vergleich zu Nicht-Musikern untersucht (Schlaug et al. 1995). Passend zu den oben dargestellten Ergebnissen fand sich eine Vergrößerung des vorderen Anteils des Balkens bei den Berufsmusikern, die vor dem Alter von sieben Jahren mit dem Instrumentalspiel begonnen hatten. Der vordere Anteil des Balkens führt vor allem die Faserverbindungen, die die motorischen und prämotorischen Rindenfelder beider Hemisphären verbinden. Analog kann hier argumentiert werden, dass die funktionelle Beanspruchung der bimanuellen Koordination mit dem notwendigen raschen Informationsaustausch zwischen beiden Hirnhälften zu einer Verstärkung der Bemerkung dieser Fasern führt, was in einer schnelleren Nervenleitfähigkeit resultiert. Es ist nicht auszuschließen, dass auch der Erhalt von „normalerweise“ - d.h. ohne adäquate Reizung - nach der Geburt untergehenden Axonen zu dieser Vergrößerung des Balkens beiträgt.

Neben den handmotorischen Rindenfeldern und ihren Verbindungen zwischen beiden Hirnhälften ist auch die somatosensible Repräsentation der Handregion bei Musikern vergrößert. Mit Hilfe der Magnetoenzephalographie kann in der somatosensiblen Handarea der Hirnrinde die Größe der Nervenzellpopulationen, die auf einen Gefühlsreiz der Fin-

ger ansprechen abgeschätzt werden. Beim Vergleich der Fingerareale der linken Hand von professionellen Geigern mit altersgleichen nicht musizierenden Kontrollprobanden zeigte sich, dass mit Ausnahme des Daumens die kortikale Repräsentation der Finger bei Geigern deutlich größer war als in der Vergleichsgruppe. Der Größeneffekt war wiederum abhängig vom Alter, in dem die Probanden das Violinspiel begonnen hatten, und am stärksten bei denjenigen, die vor dem Alter von sieben Jahren den ersten Geigenunterricht erhalten hatten (Elbert et al. 1995).

Die drei in diesem Abschnitt berichteten Befunde zeigen, dass beim „Schwierigsten was ein Mensch können kann“ - beim professionellen Musizieren - das Zentralnervensystem strukturelle und funktionelle Adaptationen aufweist. Wie bei allen anderen komplexen Lernvorgängen, die auf Plastizität des Nervensystems beruhen sind die Adaptationsvorgänge im frühen Kindesalter am deutlichsten ausgeprägt: „Was Hänschen nicht lernt, lernt Hans nimmermehr“.

2. Wie Hände lernen

Beyläufig ein Schema meines Studierens: von 7-10 alleiniges Studium im Chopin mit möglichster Ruhe der Hand. Meinen Plan verfolg' ich von Seite zu Seite,nehm' aber dann Stellen zur Uebung mitten heraus. Um 11 Uhr fing ich gewöhnlich mit Czerny's Trillerübung an, die nicht locker, leise und leicht genug gespielt werden kann. Dann kamen die Hummelschen Fingerübungen in den 4 Klassen ihrem Intervallumfang nach, denen ich jeder Tage fünf neue hinzugab. Den Nachmittag hab' ich ganz zur Disposition meiner Laune bestimmt, fahre aber doch sicher und regelmäßig in der Fis-moll Sonate von Hummel fort.

(Robert Schumann, Tagebücher, 9. Juli 1831)

Das Übensum des jugendlichen Robert Schumanns mit täglich etwa acht Stunden Klavierspiel kommt einem Nichtmusiker vielleicht übertrieben vor, war aber in der damaligen Zeit eher noch maßvoll und ist auch heute noch bei vielen begeisterten Musikstudenten an der Tagesordnung. Mit Beginn des neunzehnten Jahrhunderts verlängerten sich allgemein die Übezeiten an den Instrumenten. Die Pianisten Clementi und Czerny sollen schon als Kinder acht Stunden in „Einzelhaft“ am Klavier zugebracht haben, Kalkbrenner soll täglich 12 Stunden, Henselt sogar 16 Stunden geübt haben (zitiert nach Gellrich, 1992). Harte Arbeit wurde damals von jedem gefordert. Eine Gesellschaft, die ihre zehnjährigen Kinder für zwölf Stunden täglich in die Fabrik, in die Weberei oder in das Bergwerk schickte, schonte

auch angehende Musiker nicht. Maßgebliche Künstler und Pädagogen reagierten auf derartige Ausdauerleistungen allerdings eher mit Ironie. Im Vorwort zu seiner Klavierschule schreibt Hummel (1811, zitiert nach Gellrich, 1992): „Ich kann ihnen versichern, dass ein regelmäßiges, tägliches aufmerksames Studium von höchstens drei Stunden zureichend ist; denn längere Übung stumpft den Geist ab, und bewirkt ein mehr maschinenmäßiges als seelenvolles Spiel“.

Unabhängig davon, ob drei oder ob 14 Stunden am Instrument gearbeitet wird, ist offensichtlich, dass hier eine weitere Besonderheiten der Handmotorik von Musikern im Vergleich zu anderen professionellen „Handarbeitern“ vorliegt: Das Training beginnt schon in sehr jungem Alter, und der Erwerb und Erhalt der präzisen Bewegungen erfordern ständige Wiederholung und Automatisierung („Üben“) von früher Kindheit bis zum Ende der Berufstätigkeit. Die präzisen Bewegungen werden dabei im Laufe eines Musiker-Lebens milliardenfach ausgeführt. Man kann sich fragen, was ein Kind dazu bringt, eine derartige Fronarbeit auf sich zu nehmen. Neben dem Einfluss der Eltern ist mit Sicherheit eines der mächtigsten Motive zum Üben der selbstbelohnende Charakter der Musizierens, das Flow-Erleben, wenn alles funktioniert und das Instrument beherrscht wird.

Im folgenden sollen drei Aspekte des Erwerbs besonderer feinmotorischer Leistungen näher beleuchtet werden. Zunächst sollen Faktoren zusammengetragen werden, die Kinder zu „Hand-Wunderkindern“ machen, dann soll das sehr lückenhafte Wissen zum Motorischen Lernen und zur Automatisierung referiert werden. Im dritten Teil sollen die hirnephysiologischen Grundlagen motorischen Lernens ausgeführt werden.

2.1. Macht Übung den Meister?

Meist wird angenommen, dass herausragende menschliche Leistungen auf der einen Seite auf einem Talent, das heißt auf einer besonders günstigen genetischen Veranlagung („Nature“) und auf der anderen Seite auf konsequentem Training in einer günstigen Umgebung („Nuture“) beruhen. Die im amerikanischen Schrifttum als „Expert-Performance-Forschung“ bezeichnete Forschungsrichtung der Psychologie befasst sich mit den Faktoren, die ein Wunderkind hervorbringen. Feldman (1993) stellte einige Charakteristika heraus, die er bei der Analyse der Lebensgeschichte von zwanzig Wunderkindern aus Vergangenheit und Gegenwart fand. So treten Ausnahmeleistungen selten aus dem Nichts heraus auf, sondern es existiert meist eine Familiengeschichte von Interessen auf demselben Ge-

biet. Wunderkinder sind häufiger erstgeborene Söhne aus wohlhabenden Elternhäusern in größeren Städten. Am auffälligsten ist, dass spezialbegabte Kinder ihr Interessengebiet mit einer ganz ungewöhnlichen Zielstrebigkeit und Zähigkeit verfolgen und sich häufig gegen den Widerstand der Eltern durchsetzen, wobei sie ein nahezu unerschütterliches Vertrauen in die eigenen Fähigkeiten besitzen. Wird das Lernverhalten von Musikern, die Ausnahmeleistungen vollbracht haben etwas genauer analysiert, dann ergeben sich weitere Gesetzmäßigkeiten (Ericsson, 1997). So benötigen die im Jugendalter zu beobachtenden musikalischen Hochbegabungen in aller Regel etwa 10 Jahre der Vorbereitung (sogenannte „Ten-Years-Rule“). Die zweite Regel ist, dass Wunderkinder meist einem ständig überwachten, zielgerichteten und problemorientierten Überprozess unter Anleitung eines Mentors unterworfen sind (sogenannte „deliberate practice“). Als Beispiel sei Robert Schumanns Klavierlehrer Friedrich Wieck genannt, der den jungen Robert bei sich zu Hause wohnen ließ und ihm täglich Klavierunterricht erteilte. Ericsson und Mitarbeiter (1993) konnten überzeugend zeigen, dass der Grad der Professionalität von Berufsgeigern hochgradig mit der am Instrument verbrachten kumulativen Übezeit korreliert. Mit 20 Jahren hatten die besten Geiger einer Musikhochschule 10500 kumulative Lebens-Übestunden verbracht, die schlechtesten Geigenstudenten 4000, Amateure nur 1100. Interessant in diesem Zusammenhang ist, dass offenbar die affektive Beziehung zum ersten Instrumentallehrer und dessen Fähigkeit zur Motivation der entscheidende Faktor ist, welcher die kumulative Übezeit und damit letztendlich den Erfolg am Instrument bestimmt (Sloboda und Howe 1991).

Sicherlich ist neben der Lebensübezeit das „Wie des Übens“ wichtig für das Erreichen von professionellen Handfertigkeiten. Trotz zahlreicher instrumentalpädagogischer Schriften auf diesem Gebiet existieren nur wenige gesicherte Erkenntnisse (Übersicht bei Hallam 1997). Wesentlich für den Erfolg des Übens scheint unbestreitbar die Entwicklung einer inneren Klangvorstellung und das Training des Gehörs als Kontrollorgan der Handbewegungen zu sein. Die Schärfung der Wahrnehmung von Muskelspannung, Gelenkstellung etc. ist ebenfalls eine unabdingbare Voraussetzung. Hinsichtlich der konkreten Übepaxis scheint täglich in mehrere Sitzungen aufgeteiltes Üben effizienter zu sein als Üben am Stück. Eine erhöhte Variabilität der zu übenden Bewegungsabläufe fördert wohl darüber hinaus die Entwicklung generalisierter und vielseitig anwendbarer motorischer Steuerprogramme.

Ein Großteil der praktischen Überarbeitung lässt sich aber nicht in feste Regeln fassen, sondern

wird der jeweiligen Situation angepasst. Ob man zum Beispiel eine Klavierpassage zuerst getrennt mit einer Hand oder gleich mit beiden Händen üben soll, kann sich nur aus dem Zusammenhang ergeben. Der Erwerb von instrumentaltechnischen Handfertigkeiten ist ein Musterbeispiel des prozeduralen Lernens, des Lernens durch Tun.

2.2. Üben, Üben, Üben: Zum Wesen der Automatisierung

Musizieren ist eine bewusst vollzogene Tätigkeit. Allerdings kann die Steuerung der Bewegungen bei sehr schnellem Spiel nicht mehr einer bewussten Kontrolle unterworfen sein. Unter diesen Bedingungen ist unser Nervensystem für die Verarbeitung der Rückmeldung und für eine eventuell notwendige rechtzeitige Änderung des geplanten Bewegungsablaufes zu langsam. Selbst die schnellsten Reaktionen der Fingermuskulatur nach einem falsch gespielten Ton benötigen noch mehr als 150 ms Zeit und wären bei der Korrektur von raschen Läufen, von weiten Sprüngen oder von Lagewechseln nutzlos, da sie viel zu spät erfolgen würden. Die Motorikforscher gehen daher davon aus, dass schnelle - sogenannte ballistische - Bewegungen dadurch gesteuert werden, dass bereits zuvor durch Üben erlernte motorische Steuerprogramme abgerufen werden. Diese Programme enthalten die 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“ (R.A. Schmidt, 1982, Seite 299). In der musikalischen Realität erklärt das, warum ein falsch gewähltes motorisches Programm, z.B. ein schneller Lauf in C-Dur statt in D-Dur auf der Klaviertastatur häufig noch nach einigen Tönen korrigiert werden kann. Ein geübter Pianist wird bereits als vierten Ton der Tonleiter das richtige „Fis“ und nicht das zum ursprünglich gewählten Programm gehörende „F“ spielen. Das Üben des Musikers bedeutet also in erster Linie Erarbeiten, Verfeinern und lebenslanges Pflegen hochkomplexer motorischer Steuerprogramme. Das Erarbeiten der Steuerpro-

gramme erfolgt unter ständiger sensorischer Kontrolle. Dabei werden Somatosensorik, visuelle Kontrolle und - als Besonderheit beim Musizieren - das Gehör eingesetzt. Um die anfallenden sensorischen Informationen beim Üben verarbeiten zu können und um in der Lage zu sein, die Bewegungen je nach Rückmeldung zu korrigieren, wird zuerst in langsamen Tempo geübt. Ein wichtiger Aspekt für das Erlernen und Verfeinern der motorischen Steuerprogramme ist hier, dass das Zentralnervensystem vor Ausführung der Bewegung über die vorgesehene Muskelaktivität und die daraus resultierende Bewegung Informationen erhält. Man nimmt an, dass diese Informationen als Kopie der abgeschickten Bewegungsimpulse in unmittelbarer Nachbarschaft der somatosensorischen Zentren des Zentralnervensystems abgespeichert werden. Diese neuronale Repräsentation der geplanten Bewegung und der erwarteten sensorischen Rückmeldung wird Efferenzkopie genannt. Nur durch Abgleich der nach der Bewegung erfolgenden realen Rückmeldung mit der virtuellen Efferenzkopie können fehlerhafte Steuerprogramme 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 übergeführt. 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 schneller Handbewegungen beim Musizieren geschieht also in mehreren Schritten: zunächst wird unter Kontrolle der beteiligten Sinne, - Somatosensorik, Auge, Gehör, - ein grober und nur langsam ausführbarer Entwurf des Bewegungsprogramms erstellt. Die Bewegungen sind noch unkoordiniert und unökonomisch. Für die Handmotorik heißt das, dass die Anzahl der beteiligten Muskeln, die Dauer der Muskelaktivität und die notwendige Muskelkraft noch nicht optimiert sind. 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 „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 gelandeten Außerirdischen über Funkverkehr im Detail

erklären zu müssen, wie ein Streichholz angezündet wird.

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 Bewegungsdächtnis 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.

Der lebenslange Übeprozess beim professionellen Musizieren erfolgt in enger wechselseitiger Beeinflussung von Motorik, Sensorik und Auditorik. Durch den täglichen Umgang mit dem Musikinstrument verfeinern sich nicht nur die motorischen Fertigkeiten sondern auch Gehör und Somatosensorik. Darüber hinaus kommt es zu funktionellen Anpassungen der Muskulatur, der Sehnen und des Bindegewebes. Professionelle Geiger verfügen beispielsweise im linken Unterarm über eine bessere Aussendrehbeweglichkeit (Supinationsfähigkeit) als rechts (Wagner 1988). Dies kann als Anpassung an die berufliche Tätigkeit mit täglich mehrstündiger Außendrehung des linken Unterarms gewertet werden.

2.3. Was geschieht im Gehirn beim Üben?

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 das Kleinhirn und die Basalganglien. 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.

Bereits im letzten Jahrhundert wurde vermutet, dass das Kleinhirn für das motorische Lernen eine große Rolle spielt. Patienten mit Schädigungen des Kleinhirns waren im Gegensatz zu Gesunden nicht mehr in der Lage, durch Üben die Geschwindigkeit einer Serie aufeinanderfolgender komplizierter Fingerbewegungen zu steigern. In weiteren Untersuchungen stellte sich heraus, dass das Kleinhirn für die richtige Auswahl, die richtige Reihenfolge und für das richtige „Timing“ von Bewegungen eine wesentliche Rolle spielt.

Eine weitere für den Erwerb motorischer Programme bedeutsame Hirnstruktur sind die Basalganglien. Ähnlich wie den Patienten mit Kleinhirnschädigungen fällt es Patienten mit Erkrankungen der Basalganglien schwerer, neue Bewegungen zu erlernen. Parkinson-Patienten können durch Üben zwar ihre Bewegungsgeschwindigkeit bei komplexen Folgebewegungen verbessern, bleiben aber immer noch deutlich hinter gesunden Vergleichspersonen zurück (Salmon und Butters 1995). Die oben berichteten Befunde wurden an Patienten mit Hirnschädigungen erhoben und berücksichtigen nicht hochdifferenzierte feinmotorische Handbewegungen. Seit Entwicklung der nicht-invasiven funktionellen bildgebenden Verfahren konnten auch an Gesunden Aufschlüsse über die hirphysiologischen Grundlagen des Erwerbs feinmotorischer Fertigkeiten gewonnen werden. Gegenstand intensiver Forschung waren dabei die durch motorisches Lernen hervorgerufenen Veränderungen im Bereich der sensomotorischen Hirnrindenareale. Mit Hilfe 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 Area 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 kontralateralen 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 die aktivierte Handregion wieder auf den Ausgangswert „geschrumpft“. Wurde die spezifische Wechselbewegung über mehrere Wochen täglich zu Hause 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 (Karni et al. 1995). 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 der supplementär motorischen Area. Vieles spricht dafür, dass die kurzfristigen Effekte in der primär motorischen Area auf eine „Umstimmung“ der neuronalen Netzwerke zurückzuführen sind. Diese „Umstimmung“ besteht vermutlich in einer gesteigerten Reaktionsbereitschaft und erhöhten Empfindlichkeit für eintreffende Informationen aus den sensorischen Rindenarealen, aus der supplementär motorischen Area und wahrscheinlich auch aus dem Kleinhirn und aus den Basalganglien. Die langfristigen Effekte sind mit großer Wahrscheinlichkeit das Korrelat der oben angesprochenen stabilen - „fest verdrahteten“ - motorischen Programme. Die bisher dargestellten Untersuchungen berücksichtigen eine bereits mehrfach herausgestellte Besonderheit der Handbewegungen beim professionellen Musizieren nicht, nämlich die enge Verbindung zwischen Motorik und Gehörseindruck. Üben und Spielen eines Instruments beruhen immer auf einer auditorisch-sensomotorischen Integrationsleitung des Gehirns. Professionelle Pianisten können eindrucksvoll schildern, wie ihnen beim Hören von Klaviermusik die „Finger jucken“, und wie andererseits beim selbstvergessenen Trommeln mit den Fingern auf der Tischplatte vor dem „inneren Ohr“ Klaviermusik erklingt. Marc Bangert aus unserem Labor wies in einer Reihe von Experimenten nach, dass professionelle Pianisten beim Hören von Klaviermusik ihre motorische Handregion und beim lautlosen Klavierspiel auf einer Tastatur ihre Hörinde aktivieren. Ähnlich wie bei der oben geschilderten feinmotorischen Aufgabe kommt es offenbar auch beim Erlernen des Klavierspiels zu kurzfristigen Effekten im Bereich der Großhirnrinde. Bereits nach vier Minuten Klavierüben entsteht bei Anfängern eine funktionelle Kopplung mit gleichzeitiger Aktivierung der Nervenzellverbände in den Hörrinden und den sensomotorischen Arealen, die mit der Methode der Gleichspannungselektroenzephalographie nachweisbar ist (Bangert et al. 1998). In Abb. 2 ist ein Beispiel für einen derartigen raschen Lerneffekt gezeigt. Ein Anfänger hatte die Aufgabe, nach dem Hören einfacher, 3 Sekunden langer Klaviermelodien im Fünf-Ton-Raum diese mit der rechten Hand nachzuspielen. War die Wiedergabe korrekt, wurde der Schwierigkeitsgrad der vorgegebenen Melodien erhöht, bis keine weitere Steigerung der Nachspielleistung mehr erreicht werden konnte. In der Regel war die Leistungsgrenze in einer Übesitzung nach 20 bis 30 Nachspielaufgaben erreicht.

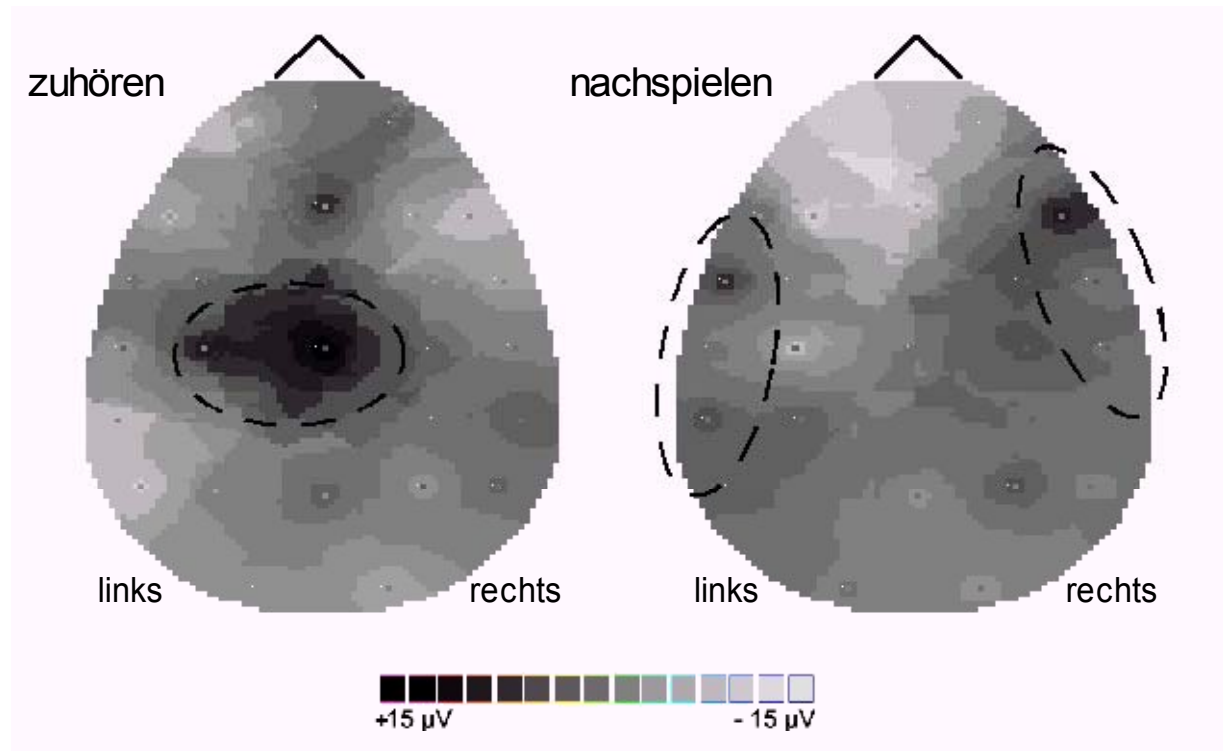


Abb. 2. Mit Hilfe des Gleichspannungs-EEGs gemessene Hirnaktivierungsbilder während des Hörens von einfachen Klaviermelodien (links) und während des Nachspiels dieser Melodien auf dem Klavier mit der rechten Hand (rechts). Abgebildet sind nur die Änderungen, die durch eine 9 Minuten dauernde Klavier-Übessitzung erzeugt werden. Die Diagramme sind als Ansichten von oben auf das Gehirn zu verstehen. Zunahme der Aktivität nach dem Üben ist dunkel dargestellt, Abnahme hell. Man erkennt auf dem linken Diagramm, dass nach dem Üben bereits beim Hören von Klaviermelodien die zentral gelegenen sensomotorischen Areale mit aktiviert werden. Beim Nachspielen kommt es nach dem Üben zur zusätzlichen Aktivierung der seitlich gelegenen Hörinde beider Hirnhälften.

In Abb. 2 sind die Änderungen der Hirnaktivität nach einer acht Minuten dauernden Trainings-sitzung dargestellt. In den beiden symbolisier-ten Kopfdiagrammen ist dabei links die Ände-rung der Hirnaktivierung beim Zuhören, rechts beim Nachspielen dargestellt. Die Kopfdia-gramme sind als Aufsichten auf die Großhirn-rinde zu verstehen (oben entspricht jeweils der Stirnhirnregion, unten der Hinterhauptsregion). Eine Zunahme der Hirnaktivität nach dem Training ist dunkel, eine Abnahme weiß ko-diert. Man erkennt deutlich, dass nach dem Training schon beim Anhören der Aufgabe die zentral gelegenen motorischen Großhirnareale aktiviert werden. Beim Nachspielen dagegen zeigen sich nach dem Training vor allem in den links und rechts seitlich gelegenen Schlä-fenregionen zusätzliche Aktivierungen. Dies entspricht einer verstärkten Aktivierung der Hörinde.

Die Kopfdiagramme können eine Vorstellung geben, welche plastischen Anpassungsvor-gänge in der Großhirnrinde schon nach weni-gen Minuten Üben ablaufen. Sie zeigen aber auch, dass beim Klavierüben weitverzweigte

Nervenzellnetzwerke mit Einbeziehung fast aller Großhirnstrukturen aktiviert werden. Viel-leicht ist dieses „Gehirnjogging“ der Grund, warum Pianisten länger jung bleiben, wie ge-legentlich behauptet wird.

3. Apollos Fluch: Der Verlust von Handfertigkeiten

Mit dem dritten Finger geht's durch die Cigar-renmechanik leidlich. Der Anschlag ist jetzt unabhängig.

Robert Schumann, Tagebücher 7. Mai. 1832

Der dritte Finger ist vollkommen steif.

Robert Schumann, Tagebücher, 14. Juni 1832

„Ich erinnere mich noch ganz genau. Es be-gann morgens während der Generalprobe mit Orchester. Wir probten das Klavierkonzert d-moll von Mozart, ein Stück, das ich ganz be-sonders liebe und über zwanzig mal unter verschiedenen Dirigenten öffentlich gespielt hatte. Schon bei meinem ersten Klaviersolo im ersten Satz bemerkte ich, dass ich mit meinem rechten kleinen Finger die schnellen Sech-

zehntelnoten nicht mehr präzise traf und häufig zwei Noten gleichzeitig anschlug, etwas, das mir noch nie passiert war. Ich hatte das Gefühl, als ob der kleine Finger eine Art Eigenleben entwickelte und außer Kontrolle geriet. Ich stand die Probe durch und führte die Schwierigkeiten auf die anstrengende Flugreise und auf die Zeitverschiebung zurück. Immerhin war es nach meiner inneren Uhr jetzt 4 Uhr morgens. Mittags übte ich das Stück langsam und laut. Das bereitete mir keine Schwierigkeiten. Aber immer, wenn ich die Geschwindigkeit auf das erforderliche Tempo steigerte, zogen sich der kleine Finger und der Ringfinger der rechten Hand unwillkürlich ein, als würden die Fingerbeeren von ungeheuer starken unsichtbaren Magneten zur Handinnenfläche gezogen. Ich war verzweifelt und geriet in Panik. Dann arbeitete ich hektisch alle Fingersätze um und versuchte das Konzert nur mit Daumen, Zeige- und Mittelfinger der rechten Hand zu spielen. Irgendwie überlebte ich das Konzert, aber mein Leidensweg hatte begonnen“.

(R.F., der deutsche Konzertpianist möchte nicht mit vollem Namen genannt werden).

Was Robert Schumann in wenigen Worten seinem Tagebuch anvertraut und was der Konzertpianist R.F. eindrucksvoll schildert, ist das tragische Scheitern am „Schwierigsten, was der Mensch können kann“. Ein derartiger dramatischer Verlust von Handfertigkeiten wird als „Musikerkrampf“ oder „tätigkeitsspezifische fokale Dystonie“ bezeichnet. Darunter versteht man unwillkürliche Fehlbewegungen, muskuläre Verkrampfungen, Verlust der feinmotorischen Kontrolle und der Koordination in Muskelgruppen, die entscheidend am Instrumentalspiel beteiligt sind. Typisch ist, dass die Krankheitserscheinungen immer in gleicher oder sehr ähnlicher Weise bei der Ausführung bestimmter Bewegungen auftreten. Die Symptome können vielfältig sein: Einziehen von Fingern an der Tastatur oder am Griffbrett, „Klebenbleiben“ bei der Ausführung von Trillern, unwillkürliche Daumenbeugung am Streicherbogen oder Abstreckung von Fingern bei schnellen Passagen können auftreten. Selten tritt die Störung als „fokaler Tremor“ mit unkontrolliertem Zittern einzelner Fingern bei Ausführung einer schwierigen Spielbewegung in Erscheinung.

Im typischen Fall bestehen bei derartigen aufgabengebundenen Koordinationsstörungen keine Einbußen des Berührungs- und Schmerzempfindens der Hand, gelegentlich

bemerken die Patienten jedoch eine Veränderung der Eigenwahrnehmung mit oft schwer zu beschreibendem Spannungsgefühl oder eigenartig vibrierenden Mißempfindungen in den betroffenen Muskelpartien. Charakteristisch ist, dass zumindest zu Beginn der Erkrankung die Bewegungsstörung ausschließlich im Zusammenhang mit den langgeübten Bewegungen am Instrument ausgelöst wird und dass andere feinmotorische Fertigkeiten nicht betroffen sind. Meist interpretieren die Betroffenen die Störung zunächst als spieltechnisches Problem und intensivieren die Arbeit am Instrument. Verstärktes Üben führt aber leider in aller Regel nicht zu einer Verbesserung, sondern im Gegenteil zu einer Verschlechterung der Kontrolle der betroffenen Bewegungsabläufe.

Verschiedene Faktoren können das Ausmaß der Bewegungsstörung beeinflussen. Viele Patienten berichten, dass die Störung am Morgen oder nach langem Schlaf weniger stark ist. Psychische Anspannung kann unter Umständen die Bewegungsfähigkeit verbessern, so dass Bewegungsabläufe in Vorspielsituationen besser gelingen als zu Hause. Häufig verändert sich die Symptomatik durch Haltungsänderung, z.B. durch Änderung der Handgelenks- oder Schulterposition bei Pianisten. Auch eine Veränderung der Gefühlsinformation kann das Ausmaß der Bewegungsstörung verändern. Das Klavierspiel mit einem Latex-Handschuh führt häufig zu einer Verbesserung der Symptome, wobei dieser Effekt aber meist nur wenige Minuten anhält. Allen Patienten gemeinsam ist die Erfahrung, dass die willentliche Gegensteuerung der unwillkürlichen Verkrampfung die Symptomatik verstärkt.

In Abb. 3 a-c ist die Bewegungsstörung des oben zitierten Konzertpianisten gezeigt. Der Pianist hat die Aufgabe, mit regulärem Fingersatz eine C-Dur Tonleiter aufwärts zu spielen. Bei Berührung der Tastatur mit dem Daumen (Abb. 3a) ist noch eine reguläre Handhaltung möglich. Bereits beim Anschlag des Zeigefingers (Abb. 3b) kommt es zu unwillkürlichem Einziehen des Ring- und Kleinfingers. Diese Tendenz verstärkt sich noch, wenn der Mittelfinger angeschlagen wird (Abb. 3c). Zusätzlich kommt es zu einer unwillkürlichen Beugung des Handgelenks und zur Anhebung des Handrückens. Tonleiterspiel mit regulärem Fingersatz, aber auch viele andere Spielfiguren können nicht mehr ausgeführt werden.



Abb. 3a



Abb. 3b



Abb. 3c

Abb. 3a-c: Beispiel eines „Musikerkrampfes“ bei einem Konzertpianisten. Die Aufgabe ist, eine C-Dur Tonleiter aufwärts zu spielen. Beim Anschlag mit dem Daumen kann die normale Handposition noch gehalten werden (**Abb. 3a**), beim Anschlag mit dem Zeigefinger (**Abb. 3b**) erkennt man aber bereits das unwillkürliche Einziehen von Ring- und Mittelfinger. Beim Anschlag mit dem Mittelfinger (**Abb. 3c**) entsteht zusätzlich eine unwillkürliche Beugung im Handgelenk. Der Bewegungsablauf ist gestört und ein flüssiges Passagenspiel ist nicht mehr möglich.

Die Erkrankung kann sich auch außerhalb der Handmotorik manifestieren. Bei Blechbläsern und Holzbläsern kommt es zu Störungen der Lippenkontrolle, bei Sängern zu Beeinträchtigungen der Feinmotorik von Stimmbändern und Vokaltrakt. Nicht nur Musiker sind von der Bewegungsstörung betroffen, am verbreitetsten ist das Krankheitsbild als „Schreibkrampf“ mit unwillkürlicher Einkrampfung von Fingern und Handgelenk beim Schreiben. Schließlich tritt die Erkrankung auch beim Sport auf, z.B. als „Yips“ beim Golfspielen. „Yips“ bezeichnet eine unwillkürliche Einkrampfung des Handgelenks beim „Putten“ und wurde durch den davon betroffenen Golfchampion Bernhard Langer bekannt.

3.1 Welche Musiker erkranken?

In der griechischen Göttersage verlieh Apoll als Gott der Musen den Menschen die Gabe

des Musizierens. Gerade die hochbegabten, erfolgreichen Musiker scheinen besonders anfällig für Musikerkrämpfe zu sein. Namhafte Künstler wie Robert Schumann, Glenn Gould, Leon Fleisher, Gary Grafman waren oder sind von der Krankheit betroffen. Mit ihren außergewöhnlichen Fähigkeiten wurde ihnen als „Fluch“ der Keim des Scheiterns in die Wiege gelegt. Nach eigenen Schätzungen sind in Deutschland mindestens 2% der Berufsmusiker erkrankt, d.h. bei ca. 70 000 Berufsmusikern ist derzeit mit 1400 Betroffenen zu rechnen (Altenmüller 1996). Wahrscheinlich ist die Dunkelziffer hoch. Viele Erkrankte wechseln unauffällig die Berufstätigkeit, geben das Konzertieren auf, unterrichten nur noch oder brechen ein Musikstudium ab. Im Vergleich zum Schreibkrampf, der in Nordamerika mit einer Häufigkeit von 1 zu 3500 auftreten soll (Nutt et al. 1988), erkranken Musiker also deutlich häufiger. Interessanterweise ist die Störung bei Jazzmusikern und bei überwiegend improvisie-

renden Musikern eine Rarität. Es liegt nahe, dies mit dem geringeren Kontrolldruck im Jazz in Verbindung zu bringen. Möglicherweise suchen Jazzmusiker aber auch seltener ärztliche Hilfe auf, weil sie durch freiere Auswahl des Repertoires und durch Kreation von individuellen Bewegungsabläufen die Störung besser ausgleichen können.

Es gibt mehrere Risikofaktoren für die Ausbildung der Bewegungsstörung. Männer sind im Verhältnis 5:1 häufiger betroffen als Frauen. Gitarristen und Pianisten sind besonders gefährdet. Wahrscheinlich spielt die gesamte „Lebens-Übedauer“ eine Rolle. Gitarristen und Pianisten erreichen nicht selten tägliche Spielzeiten von mehr als 6 Stunden, während Streicher im Mittel „nur“ zwischen drei und vier Stunden am Instrument verbringen.

Bei ca. 30% der Patienten findet sich in der Vorgeschichte eine Häufung von Schmerzzuständen oder „Sehnenscheidenentzündungen“, selten können auch einmalige Überlastungen die Symptomatik auslösen. In etwa 10% der Fälle tritt die Koordinationsstörung als Folge einer Schädigung peripherer Nerven - meist des Ellenerv - auf und bleibt weiter bestehen, auch wenn der Nerv z.B. durch eine operative Verlagerung wieder entlastet wird. Genetische Faktoren mit familiärer Häufung von Bewegungsstörungen findet man bei 10% der Betroffenen.

Die Persönlichkeitsprofile der Erkrankten weisen fast immer eine sehr starke gefühlmäßige Bindung an die Musik, ein hohes Leistungsniveau und einen hohen Selbstanspruch mit Hang zum Perfektionismus auf. Diese Charaktereigenschaften wurden früher häufig als Argumente für eine rein psychische Ursache der Erkrankung angeführt. Es darf aber nicht vergessen werden, dass gerade diese Persönlichkeitsmerkmale Voraussetzungen für den Erfolg eines Berufsmusikers sind. Musikerkrämpfe sind eine Erkrankung der Solisten, Konzertmeister und der Solobläser. Nur in Ausnahmefällen sind Laien betroffen, die dann aber ebenfalls eine sehr starke emotionale Bindung an die Musik aufweisen.

3.2. Zentralnervöses Fehllernen als Ursache von Musikerkrämpfen

Die besondere Persönlichkeitsstruktur der Betroffenen und die wechselhafte und häufig für die behandelnden Ärzte nicht nachvollziehbare Symptomatik führten dazu, dass die Erkrankung bis in die siebziger Jahre dieses Jahrhunderts meist als psychisches Krankheitsbild gedeutet wurde. Musikerkrämpfe wurden häufig als Konversionssymptom eines ungelösten Ambivalenzkonfliktes gegenüber der einerseits versklavenden, andererseits

aber zugleich belohnenden und lebensnotwendigen Arbeit am Instrument interpretiert.

Der Vorstellung, dass diese Erkrankung rein psychische Ursachen habe setzten die Neurologen Sheehy und Marsden 1982 ein anderes Konzept entgegen: Bewegungsstörungen wie der „Musikerkrampf“ seien Erkrankungen der Basalganglien und gehörten zur Krankheitsgruppe der segmentalen Dystonien. Als Hauptargumente wurden angeführt, dass in psychologischen Untersuchungen bei Betroffenen keine Abnormalitäten des Persönlichkeitsprofils zu beobachten waren und dass psychologische Behandlungsverfahren wie Psychotherapie oder Verhaltenstherapie keine Besserung erbrachten. Auch die Beobachtung, dass gelegentlich eine Ausweitung auf andere Handbewegungen erfolgte, wurde als Argument für eine Organogenese angeführt. Als Entstehungsmechanismus wurde angenommen, dass eine defekte Kontrollwirkung der Basalganglien auf Neuronenschaltkreise des Hirnstamms und Rückenmarks zu einer Störung der im Normalfall vorhandenen gegenseitigen Hemmung von Beuger- und Streckeraktivität der Hand- und Finger Muskulatur bei feinmotorischen Bewegungen führt. Der Effekt der „Verkrampfung“ beim Musizieren wurde folgerichtig mit einer gleichzeitigen Anspannung von Beugern und Streckern erklärt, wobei aufgrund des natürlichen Übergewichts der Beugerkraft letztendlich eine Beugebewegung resultiert.

Neue Befunde der Hirnforschung fordern ein vielschichtigeres Erklärungsmodell. Gegen die Alleingültigkeit der „Basalganglienhypothese“ spricht, dass die gleichzeitige Anspannung antagonistischer Muskelgruppen nicht immer nachweisbar ist und meist erst beim Versuch der aktiven Gegensteuerung gegen die Fehlbewegung eintritt. Darüber hinaus fand man bislang in bildgebenden Verfahren keine Häufung von Abnormalitäten im Bereich der Basalganglien. Dagegen konnten in der motorischen Hirnrinde in einer Reihe von Untersuchungen Veränderungen des neuronalen Erregungsablaufes vor komplexen Handbewegungen nachgewiesen werden. So ist beispielsweise die Aktivität der primär motorischen Areale unmittelbar vor Initiierung einer Fingerbewegung am Klavier gehemmt (Peschel et al. 1998). Weitere Auffälligkeiten wurden im Bereich der primär sensorischen Handregion entdeckt. Magnetoenzephalographische Messungen ergaben, dass bei Patienten mit Musikerkrämpfen die einzelnen Fingerareale der betroffenen Hand im Vergleich zu gesunden Kontrollpersonen nicht klar voneinander getrennt, sondern miteinander verschmolzen waren und dass die gesamte Ausdehnung der sensiblen Handarea vermindert war (Elbert et al. 1998).

Die zunächst verwirrenden Befunde lassen sich erklären, wenn man sich vor Augen führt, welche Hirnareale beim Üben und beim Musizieren beteiligt sind. Unabhängig vom Ort der Störung wird sich eine Fehlfunktion der sensorischen Netzwerke immer auf die Endstrecke der Erregungskette auswirken. Mit anderen Worten werden notwendigerweise immer die in der primär motorischen Area kodierten hochspezialisierten motorischen Programme betroffen sein. Bei einer erblich bedingten Bereitschaft und beim Zusammentreffen mehrerer Risikofaktoren kann ein im Normalfall harmloses passageres Fehllernen, eine vorübergehende Fehlbewegung in ein fixiertes und leider nur selten und dann meist nur unvollständig korrigierbares motorisches Fehlprogramm übergehen. Durch pathologische neuronale Erregungsmuster aus der somatosensorischen Handarea, aus den Basalganglien oder aus den präfrontalen Motivationsarealen entstehen „falsch“ aussprossende synaptische Verschaltungen im Bereich der primär motorischen Area, die sich in der „Einheitsreaktion“ des Musikerkrampfes manifestieren. Die Entdifferenzierung der neuronalen Repräsentation von Feinmotorikprogrammen führt zu einem Rückgriff auf ontogenetisch und phylogenetisch ältere „Kraftprogramme“. Das unwillkürliche Einziehen der Finger ließe sich dann als rudimentäres Greifprogramm deuten - als Atavismus und Gruß aus einer Zeit, als unsere Vorfahren mit ihren Händen noch den Faustkeil führten, lange bevor die ersten Knochenflöten - oder gar Konzertflügel - erfunden waren.

Danksagung

Frau cand. med. Astrid Götze und Herrn Dipl. phys. Wolfgang Trappe sei gedankt für die Erstellung von Abb. 1. Herrn Dipl. phys. Marc Bangert und Herrn Dr. Parlitz verdanke ich Abb. 2. Für kritisches Lesen, Verbesserungsvorschläge und Diskussion sei den vorher Genannten und - last but not least - meiner Frau Bärbel gedankt.

4. Literatur

Abel, S.M. *Duration discrimination of noise and tone bursts*. In: *Journal of the Acoustic Society of America* 82 (1997) S. 465-470.
 Aggleton, J. P.; Kentridge, R.W.; Good, J.M. *Handedness and Musical Ability: A Study of Professional Orchestral Players, Composers and Choir Members*. In: *Psychology of Music* 22 (1994) S. 148-156.

Altenmüller, E. *Fokale Dystonien bei Musikern: Eine Herausforderung für die Musiker-Medizin*. In: *Zeitschrift für Musikphysiologie und Musikmedizin* 3 (1996) S. 29-40.
 Amunts, K.; Schlaug, G.; Jäncke, L.; Steinmetz, H.; Schleicher, A.; Dabringhaus, A.; Zilles, K. *Motor Cortex and Hand Motor Skills: Structural Compliance in the Human Brain*. In: *Human Brain Mapping* 5 (1997) S. 206-215.
 Bangert, M.; Parlitz, D.; Altenmüller, E. *Audio-motor Integration in beginner and expert pianists: a combined DC-EEG and behavioural study*. In: Elsner, N.; Wehner, R.; (Hrsg.) *Göttingen Neurobiology Report*. Stuttgart (Thieme-Verlag) 1998, S. 753.
 Behne, K.E.; Wetekam, B. *Musikpsychologische Interpretationsforschung: Individualität und Intention*. In: Behne, K.E.; Kleinen, G.; de La Motte-Haber H. (Hrsg.) *Jahrbuch Musikpsychologie*, Band 10. Wilhelmshaven, (Florian Noetzel Verlag) 1993. S. 24-37.
 Bernstein, N.A. *Bewegungsphysiologie*. Leipzig (Ambrosius Barth-Verlag) 1988.
 Das Guinness Buch der Rekorde 1997, Hamburg (Guinness Verlag) 1996.
 Elbert, T.; Pantev, Ch.; Wienbruch, Chr.; Rockstroh, B.; Taub, E. *Increased Cortical Representation of the Fingers of the Left Hand in String Players*. In: *Science*, 270 (1995) S. 305-307.
 Elbert, T.; Candia, V.; Altenmüller, E.; Rau, H.; Rockstroh, B.; Pantev, C.; Taub, E. *Focal hand dystonia is related to altered functional organization in the primary somatosensory cortex*. In: *NeuroReport* (1998) in press.
 Ericsson, K.A. *Deliberate practice and the acquisition of expert performance: An overview*. In: Jorgensen, H.; Lehmann, A.C. (Hrsg.) *Does practice make perfect?* Oslo (NMHs skriftserie) 1997 S. 9-51.
 Ericsson, K.A.; Krampe R.T.; Tesch-Römer, C. *The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance*. In: *Psychological reviews* 100 (1993) S.363-406.
 Feldman, D. H. *Mozart als Wunderkind, Mozart als Artefakt*. In: Ostwald, P.; Zegans, L. (Hrsg.) *Mozart - Freuden und Leiden des Genies*. Stuttgart (Kohlhammer Verlag) 1997. S. 39-55.
 Freund, H. J. *Handmotorik und musikalisches Lernen*. In: Petsche H. (Hrsg.) *Musik - Gehirn - Spiel*. Basel (Birkhäuser Verlag) 1989. S. 103-110.
 Gellrich, M. *Üben mit Liszt*. Frauenfeld (Waldgut-Verlag) 1992.
 Hallam, S. *What do we know about practising? Towards a model synthesising the research literature*. In: Jorgensen, H.; Lehmann, A.C. (Hrsg.) *Does practice make perfect?* Oslo (NMHs skriftserie) 1997. S.179-231.

- Hofmann, G.; Mürbe, D.; Kuhlisch, E.; Pabst, F. *Unterschiede des auditiven Frequenzdiskriminationsvermögens bei Musikern verschiedener Fachbereiche*. In: *Folia Phoniatrica et Logopaedica* 49 (1997) S. 21-25.
- Hore, J.; Watts, S.; Martin, J.; Miller, B. *Timing of finger opening and ball release in fast and accurate overarm throws*. In: *Experimental Brain Research* 103 (1995) S. 277-286.
- Jäncke, L.; Schlaug, G.; Steinmetz, H. *Hand Skill Asymmetry in Professional Musicians*. In: *Brain and Cognition* 34, (1997) 424-432.
- Karni, A.; Meyer, G.; Jezard, P.; Adams, M.M.; Turner, R.; Ungerleider, L.G. *Functional MRI evidence for adult motor cortex plasticity during motor skill learning*. In: *Nature* 377 (1995) S. 155-158.
- Marsden, C. D.; Deecke, L.; Freund, H.-J. *The Functions of the Supplementary Motor Area. Summary of a Workshop*. In: Lüders, H. (Hrsg.) *Advances in Neurology, Vol. 70: Supplementary Sensorimotor Area*, Philadelphia (Lippincott-Raven Publishers) 1996. S. 477-487.
- Moore, G. P. *Piano Trills*. In: *Music Perception* 9, (1992) S. 351-360.
- Neuhaus, H. *Die Kunst des Klavierspiels*. Köln (Gerig-Verlag) 1967.
- Nutt, J.G.; Muentner, M.D.; Melton, I.J. *Epidemiology of dystonia in Rochester, Minnesota*. In: *Advances in Neurology* 50 (1988) S. 361-365.
- Peschel, T.; Drescher, D.; Altenmüller, E. *Abnormes Bereitschaftspotential bei Musikern mit fokaler Dystonie*. In: *Aktuelle Neurologie* 25 (1998) S. 223.
- Roth, G. *Das Gehirn des Menschen*. In: Roth, G.; Prinz, W. (Hrsg.) *Kopf-Arbeit. Gehirnfunktionen und kognitive Leistungen*. Heidelberg/Berlin (Spektrum Akademischer Verlag) 1996. S. 119-180.
- Salmon, D.P.; Butters, N. *Neurobiology of skill and habit learning*. In: *Current Opinion in Neurobiology* 5 (1995) S. 184-190.
- Schlaug, G.; Jäncke, L.; Huang, Y.; Steinmetz, H. *Increased Corpus Callosum Size in Musicians*. In: *Neuropsychologia* 33 (1995) S. 1047-1055.
- Schmidt, R.A. *Motor control and learning*. Urbana-Champaign (Human Kinetics Publishers) 1982.
- Schumann, R. *Gesammelte Schriften*, Wiesbaden (VMA-Verlag) 1962.
- Schumann, R. *Tagebücher, Band 1*. Hrsg. von Georg Eismann. Basel (Stroemfeld Roter Stern-Verlag) 1971.
- Sheehy, M.P.; Marsden, C.D. *Writers' Cramp - a focal dystonia*. In: *Brain* 105 (1982) S. 461-480.
- Sloboda, J. *The musical mind*. Oxford (Clarendon-Publishers) 1985.
- Sloboda, J.A.; Howe, M. *Biographical Precursors of Musical Excellence: An Interview Study*. In: *Psychology of Music* 19 (1991) S. 3-21.
- Smith, H.W. *From fish to philosopher*. Boston (Little Brown) 1995. S. 192-199.
- Wagner, Ch. *Welche Anforderungen stellt das Instrumentalspiel an die menschliche Hand?* In: *Handchirurgie* 19 (1987) S. 23-32.
- Wagner, Ch. *The Influence of the Tempo of Playing on the Rhythmic Structure Studied at Pianist's Playing Scales*. In: *Medicine and Sports*, 6 (1971) S. 129-132.
- Wagner, Ch. *The pianist's hand: anthropometry and biomechanics*. In: *Ergonomics* 31 (1988) 97-131.
- Wilson, F. *Digitizing Digital Dexterity: A Novel Application for Midi Recordings of Keyboard Performance*. In: *Psychomusicology*, 11 (1992) S. 79-95.

Anschrift des Autors

Univ.-Prof. Dr. med. Eckart Altenmüller
Hochschule für Musik und Theater Hannover
Institut für Musikphysiologie und Musiker-Medizin
Plathnerstr. 35
30175 Hannover

Fax: 0511 3100 557
e-mail: altenmueller@hmt-hannover.de