

Hirnphysiologische Korrelate musikalischer Begabung: Gibt es eine Haydn-Windung?

Eckart Altenmüller, Hannover

Haydn's Schädel – Eine Einleitung

Hoch betagt und hoch geehrt starb am 31. Mai 1809 der Komponist Joseph Haydn in Wien. Neben Mozart und Beethoven gehört er zu den „Big Three“, den drei bedeutendsten Vertretern der sogenannten ‚Wiener Klassik‘. Joseph Haydn wurde auf dem Hundstürmer Friedhof in Wien beigesetzt, wo sein Grab zunächst von der Familie seines Dienstherrn und Förderers Graf Esterhazy nicht mehr beachtet wurde. Erst die Bewunderung des Herzogs von Cambridge erinnerte Fürst Nikolaus II. wieder an den ehemaligen Bediensteten und an dessen großartige kompositorische Leistungen. Er ließ Joseph Haydn 1820 exhumieren und nach Eisenstadt in die Bergkirche überführen. Dort hätte er in Frieden ruhen können, wenn nicht beim Öffnen des Sargs der Schädel des Komponisten gefehlt hätte. Wen konnte der Schädel des alten Herrn interessieren? Haydn war ein Opfer der fortschrittlichsten Wissenschaft seiner Zeit, die als Morgenröte der Neurowissenschaft bezeichnet werden könnte: Er war posthum als Versuchsobjekt der „Schädellehre“ enthauptet worden. Nachforschungen ergaben nämlich, dass der Sekretär des Fürsten Esterházy, Joseph Carl Rosenbaum ein Anhänger dieser von Franz Gall begründeten Schädellehre war. Er hatte den Totengräber, einen Gefängnisverwalter sowie zwei Wiener Beamte bestochen, acht Tage nach der Beisetzung heimlich noch einmal das Grab zu öffnen und den Schädel zu stehlen. Sein Ziel war, den Schädel zu untersuchen, um an den Ausbeulungen der Kalotte Zeichen der herausragenden Musikalität des greisen Maestros zu finden. Das Versteck des gestohlenen Schädels konnte zunächst nicht ermittelt werden, und so wurde der Leichnam ohne Schädel nach Eisenstadt überführt und dort beigesetzt.

Dieser Artikel erschien in leicht veränderter Form in dem Band: Begabungsförderung und Begabungsforschung in der Musik. Herausgegeben von Heiner Gembris. In : Schriften des Instituts für Begabungsforschung in der Musik, Band 2. LIT Verlag Dr. W. Hopf, Berlin 2010. Seite 81-98. Mit Erlaubnis des Herausgebers und des Verlags.

Später übergab der Gefängnisverwalter Johann Peter der Polizei einen angeblichen Schädel Haydns. Den echten Schädel hinterließ der Sekretär Rosenbaum seinem Freund Peter mit dem Auftrag, die Reliquie dem Musikkonservatorium zu vermachen. Doch weder Peter noch seine Witwe wagten die Herausgabe; der Schädel wanderte noch durch etliche Hände, bis er 1895 in den Besitz der Gesellschaft der Musikfreunde in Wien gelangte, in deren Museum er sich bis 1953 befand. Nachdem schon einmal eine Rückgabe des Schädels in letzter Minute gescheitert war, konnte im Jahr 1954 nach einem Festzug von Wien nach Eisenstadt Schädel mit dem Rest der Gebeine vereint werden. Der Bildhauer Gustinus Ambrosi durfte ihn in den Sarkophag legen und damit endlich nach 145 Jahren die Totenruhe von Joseph Haydn herstellen.¹ Welche Schlüsse Rosenbaum aus der Struktur von Haydn's Schädel gezogen hatte, wurde nie bekannt.

Die Disziplin, die sich mit Schädeln befasste, nannte sich Phrenologie, Schädelkunde, und war in der Anatomie angesiedelt. Der Begründer dieser Forschungsrichtung, Franz Gall, war in seiner Phrenologie davon ausgegangen, dass bestimmte Charakterzüge und erworbene Fertigkeiten mit einer lokalen Vergrößerung von Hirngewebe einhergehen. Diese Verdichtung des Nervengewebes erzeugte nach seiner Auffassung durch Druck Ausbeulungen der Schädelknochen. Aus den „Beulen“ an der Schädeloberfläche schloss Gall auf Charaktereigenschaften und besondere Begabungen von Menschen und wurde so der geistige Vater einer ganzen Generation von „Schädelleseern“, die unter anderem „wissenschaftlich fundierte“ Heiraten vermittelten und kommerziell Charakteranalysen anboten. Interessanterweise haben Gall und seine Schüler mit der musikalischen Begabung gewissermassen einen Zufallstreffer gelandet:

¹ Eine exzellente Zusammenfassung des Lebens von Joseph Haydn und seiner „posthumen“ Geschichte findet man im Internet unter „EsterhazyWiki“ <http://de.esterhazy.net/index.php> (20. 8. 2009). Es handelt sich um eine sorgfältig gestaltete und exzellent recherchierte Familienchronik der Familie Esterhazy. Die oben geschilderte Episode bezieht sich überwiegend auf Informationen aus dieser Webseite.

der „Tonsinn“ ist durch eine Ausbeulung am Übergang vom vorderen Schläfenlappen zum Stirnhirnlappen charakterisiert, just die Region, in der nach neuen Befunden musikalisches Gedächtnis lokalisiert wird.

Interessanterweise hielt sich Gall in der Frage der Ausnahmebegabungen bedeckt. Einen Ort für Kompositionstalent oder überragende musikalische Performanz bestimmte er nicht und in seinen Originalpublikationen findet sich an der Schädeloberfläche auch keine Eintragung für allgemeine „künstlerische“ Eigenschaften, wie z.B. „Kreativität“, wiewohl „Willenskraft“, „Ehrgeiz“, „Energie“, und „Denken“ repräsentiert sind. Gall's englischer Schüler Fowler fügte seinem Schädel dann doch noch eine Region der „Kreativität“ am Hinterkopf hinzu (Überblick dazu bei Temkin, 1947), wohl wissend, dass dies die Heiratschancen manch aufstrebenden jungen Mannes verbessern konnte.

Heute haben wir andere und bessere Methoden, um der Frage nachzugehen, ob eine „Haydn-Windung“ als neurobiologisches Korrelat herausragender musikalischer Begabung existiert. Spannend ist hier die Frage, ob sich musikalische Begabung schon frühzeitig, bei Kindern oder Adoleszenten in bestimmten Strukturmerkmalen des Gehirns widerspiegelt, etwa in anlagebedingten „a-priori“ vergrößerten Hirnregionen. Wäre das der Fall, so würde es für einen starken „Anlage“- Faktor in der „Anlage- Umwelt“-Debatte der musikalischen Begabung sprechen. Andererseits könnte sich die Anlage zu einer besonderen musikalischen Befähigung auch darin zeigen, dass bestimmte Hirnregionen bei entsprechender musikalischer Unterweisung besonders bildungsfähig sind und sich besonders stark plastisch anpassen können. Nach jahre- und jahrzehntelangem Training würden sich dann derartige plastische Anpassungsprozesse in einer „Haydn-Windung“ manifestieren.

Ich möchte im Folgenden nicht ausführlich auf den Begriff der „musikalischen Begabung“ eingehen. Hier sei auf den exzellenten Übersichtsartikel von Rolf Örtter und Andreas Lehmann zu diesem Thema findet im Ro-Ro-Band „Musikpsychologie“².

² Rolf Örtter und Andreas C. Lehmann „Musikalische Begabung“ In: Herbert Bruhn, Reinhard Kopiez und Andreas C. Lehmann (Herausgeber) „Musikpsychologie“. Rowohlt's Enzyklopädie, Reinbek bei Hamburg, Seiten 88-104 (2008).

Zusammenfassend möchte ich mit Örtter und Lehmann musikalische Hochleistungen als Fertigkeit oder Expertise verstehen, „die sich erst in lang währendender intensiver Praxis entwickelt (...).

Das anlagebedingte, genetische Potenzial kann also nur dann zur Entfaltung gelangen, wenn entsprechende Umwelt- und Lernbedingungen gegeben sind.“ Ich möchte daher im Folgenden referieren, wie sich Musizieren und Musikerziehung auf das Gehirn auswirken, wie also Umwelt- und Lernbedingungen Gehirnvernetzung und Gehirnstruktur formen.

Auf dem Weg zur Haydn-Windung: neuronale Korrelate besonderer Hörfertigkeiten

Noch vor zwanzig Jahren wäre ein Neurowissenschaftler ausgelacht worden, wenn er behauptet hätte, dass sich die Größe von Hirnwindungen in Abhängigkeit von spezialisierten Hirnfunktionen, zum Beispiel von Hörfertigkeiten, verändern. Ihm wäre vorgeworfen worden, er wäre ein „Neophrenologe“, in der direkten Nachfolge des Schädellesers Franz Gall. Erst durch moderne bildgebende Verfahren sind wir in der Lage, derartige übungsabhängige Veränderungen festzustellen.

Einen sehr eindrucksvollen Beleg für die Anpassungen der Hörregionen von Musikern an die Spezialanforderungen erbrachte Peter Schneider und seine Kollegen aus Heidelberg (2002). Sie zeigten nämlich, dass die Ausdehnung der primären Hörrinde in der Heschl'schen Querwindung der oberen Schläfenwindung bei Berufsmusikern mehr als doppelt so groß ist wie bei Nichtmusikern. Dabei erschöpfen sich die Anzeichen für eine Spezialisierung der Hörregionen nicht in anatomischen Unterschieden. Zusätzlich konnten Schneider und Kollegen nämlich mit dem Magnetoenzephalogramm die Reaktionspotentiale der primären auditiven Regionen auf einfache akustische Reize, wie z.B. auf Sinustöne messen. Dabei traten bei Musikern doppelt so hohe Aktivierungsamplituden wie bei Nichtmusikern auf, was wiederum einer Aktivierung von etwa doppelt so vielen auditiven Neuronen entspricht. Die absolute Größe der primären Hörrinde korrelierte sehr gut mit Hörfertigkeiten. So war die Größe der Heschl'schen Querwindung hochgradig positiv korreliert mit dem Abschneiden in dem

„Advanced Measures of Audiation“ Test (AMMA) von Edwin Gordon. Dieser Test prüft vor allem die Fähigkeit, melodisches Material im Arbeitsgedächtnis zu behalten und mental zu bearbeiten, zum Beispiel die Variation einer gehörten Melodie zu erkennen, – eine Fertigkeit, die zum Genuss von Musik unabdingbar ist. Bemerkenswert an dieser Studie ist, dass hier der erste Nachweis des Zusammenhangs zwischen vergrößerter Hirnstruktur, erhöhter neuronaler Aktivität und verbesserter auditiv-musikalischer Leistung erbracht wurde. Es nutzt wirklich etwas, wenn man einen großen Schläfenlappen hat!

Ein weiteres Beispiel für die hochgradig übungsabhängige Spezialisierung des Hörsystems bei bestimmten Gruppen von Berufsmusikern bietet das Richtungshören. Dirigenten in einem großen Symphonieorchester müssen Schallquellen sehr präzise orten können, um den Klang des Orchesters zu formen. Eine typische Aufgabe für den Dirigenten ist zum Beispiel die Entscheidung, ob die seitlich links sitzenden ersten Geigen und die neben ihnen sitzenden zweiten Geigen die richtige Lautstärkebalance aufweisen. Dazu muss das Richtungshören sehr verfeinert sein, denn nur durch die korrekte räumliche Zuordnung der Klangquelle wird er die entsprechenden Anweisungen durch seine Gesten geben können. In einem Versuch wurde diese Situation im Labor nachgestellt. In Abbildung 1 ist der Versuchsaufbau gezeigt. Aus drei seitlich nebeneinander und drei vor den Dirigenten aufgestellten Lautsprechern wurden hintereinander kurze Geräuschketten, - rosa Rauschen – gespielt. Dabei war nicht vorhersagbar, aus welchem Lautsprecher jeweils die Geräusche erklangen. Aufgabe der Dirigenten war, einen Knopf zu drücken, wenn aus den seitlich aufgestellten Lautsprechern ein Geräusch erklang. Bei dieser Aufgabe zeigten die Dirigenten im Vergleich zu den Pianisten nicht nur eine bessere Leistung in der Ortslokalisierung. Die Messung der ereigniskorrelierten Potentiale ergab auch eine viel stärkere Reaktion auditiver Neurone (Münste et al. 2001). Offenbar wird durch die Jahrzehnte lange Übung nicht nur der Hörkortex größer, sondern sogar innerhalb der Musikergruppen zeigen sich Anpassungen an die speziellen Aufgaben, eben zum Beispiel an die Notwendigkeit, auch im peripheren Hörfeld eine sehr gute räumliche Auflösung zu erreichen.

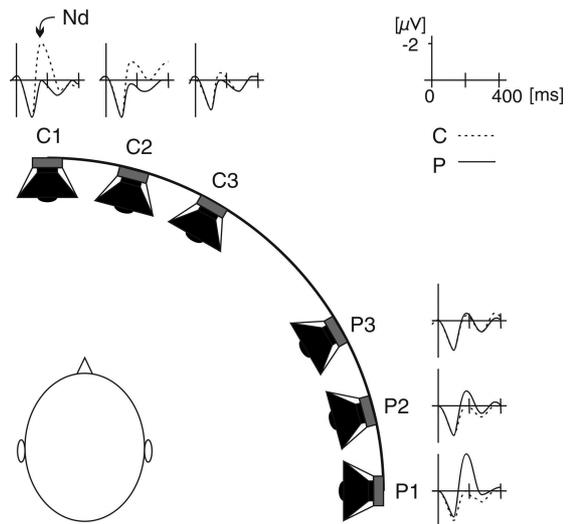


Abbildung 1:

Versuchsanordnung des Dirigentenversuchs und die Reaktionspotentiale der Dirigenten. Eine Gruppe von Dirigenten, eine Gruppe Pianisten und eine Gruppe Nicht-Musiker hörten kurz Rauschstimuli in zufällig vermischter Reihenfolge aus den sechs Lautsprechern. Die Aufgabe war in der ersten Bedingung, einen Knopf nur dann zu drücken, wenn die akustischen Reize aus dem Lautsprecher C1 kamen. Die entstehenden Reaktionswellen sind gestrichelt dargestellt („C“). Die Lenkung der Aufmerksamkeit auf diesen Lautsprecher führte bei allen Versuchspersonen zu einer größeren Reaktionswelle, wie man leicht an der Kurve oben links erkennen kann. Die vermehrte Aktivierung bei Aufmerksamkeit wird als Nd – Welle oder „Negative Differenzwelle“ bezeichnet. In der zweiten Bedingung „P“ sollte die Aufmerksamkeit nur auf die peripheren Lautsprecher gerichtet werden. Diese Reaktionspotentiale sind durchgezogen dargestellt. Hier zeigten sich grosse Unterschiede, denn nur die Dirigenten, nicht aber die Pianisten und Nicht-Musiker waren in der Lage, ihre Aufmerksamkeit gezielt auf den peripheren Lautsprecher P1 zu lenken. Die Hirnreaktionen zeigten daher nur bei den Dirigenten die durchgezogene Nd-Welle bei dem peripheren Lautsprecher P1 an. Dieses Experiment zeigt, dass Dirigenten in der Peripherie des Hörfeldes ein anderes Musikern überlegenes räumliches Auflösungsvermögen haben.

Einige Berufsmusiker besitzen eine besondere Hörfertigkeit, das absolute Gehör. Darunter versteht man die Fähigkeit, Tonhöhen ohne einen zuvor gehörten und benannten Vergleichston korrekt zu benennen. Diese kategoriale Zuordnung der Tonhöhe erfolgt sehr rasch, gelingt bei den typischen Absoluthörern auch bei Sinustönen und wird nur bei extrem hohen oder tiefen Tönen unsicher. Manche Absoluthörer neigen allenfalls dazu, die Oktavposition von Tönen zu verwechseln, was dann als Oktav- oder Chromafehler bezeichnet wird. Das absolute Gehör gilt in vielen Kulturen als Zeichen einer besonders hohen Musikalität. Es wird nach meiner Meinung in seiner Bedeutung oft überschätzt. So versetzt es zwar den Besitzer in die Lage, die einzelnen Töne in einem komplizierten Mehrklang zu benennen oder bei einem Notendiktat auch mehrere Stimmen auf Anhieb richtig zuzuordnen und zu notieren, aber das sind Fertigkeiten, die vor allem im Tonsatz- und Gehörbildungsunterricht an einer Musikhochschule Vorteile mit sich bringen, die aber im sonstigen Musikerdasein wenig bedeutsam sind. Zahlreiche herausragende Musiker besaßen kein absolutes Gehör, zum Beispiel die Komponisten Richard Wagner und Robert Schumann. Manchmal ist das absolute Gehör sogar hinderlich, nämlich dann, wenn Musiker auf unterschiedlichen Instrumenten mit verschiedener Stimmung spielen müssen, etwa beim Spiel auf der Barockflöte, die von der modernen Böhmflöte in der Stimmung um mehr als einen Halbton nach unten abweicht. Es kommt dann beim Spielen zum Widerspruch zwischen der gehörten absoluten Kategorie (z.B. Ton „h“) und der im Notenbild notierten Kategorie, z.B. Ton „c“. Dies wird von vielen Musikern als äußerst lästig empfunden.

Versuche, im Erwachsenenalter durch Training ein absolutes Gehör zu erwerben sind in der Regel vergeblich. Die dafür angebotenen teuren Kurse trainieren meist das relative Gehör, aber eine stabile Verankerung der Zuordnung von Tonhöhe und Notennahme gelingt dadurch nicht. Häufig werden aber bestimmte Hilfstechniken geübt. So können manche Menschen ein Gefühl für die Stimmbandspannung bei bestimmten selbst gesungenen Tönen entwickeln und dies als „Referenz“ für die gehörten Tonhöhen benutzen, gewissermaßen durch innerliches Mitsingen. Andere benutzen die charakteristischen Klangfarben von bestimmten Tönen auf dem Instrument für die Zuordnung von Notennamen. So klingt auf der Querflöte der Ton „Es“ in der zweiten und dritten Oktave auf ganz charakteristische Weise dunkel, was die Zuordnung dieser Tonhöhe zu dem Notennamen „Es“ erleichtert.

Die anderen Töne der Querflöte können dann durch ein geübtes relatives Gehör rasch identifiziert werden. Natürlich funktioniert dieses „absolute“ Gehör dann nur für die Querflöte. Damit ist es eben auch kein absolutes Gehör im eigentlichen Sinn, denn das sollte definitionsgemäß ja auch für die Benennung der Tonhöhen von Sinustönen zuverlässig sein. Fast jedes Instrument hat derartige charakteristische Töne, die eine Zuordnung zu den Notennamen erleichtern. Bei den Streichinstrumenten sind es beispielsweise die „leeren“ Saiten, die keine Verkürzung durch die Finger benötigen und damit besonders brillant klingen, beim Klavier ist es der Übergang von dem mit 2 Saiten bespannten Bassregister zum mit drei Saiten bespannten Tenor-Register.

Die neurobiologischen Grundlagen des absoluten Gehörs sind immer noch umstritten. Drei Theorien werden diskutiert. Die genetische Theorie geht davon aus, dass das absolute Gehör vererbt wird, die Prägungstheorie besagt, dass es durch frühe musikalische Prägung erworben wird und die Verlerntheorie betont Befunde, die dafür sprechen, dass viele Säuglinge über absolutes Gehör verfügen, diese Fähigkeit aber im Laufe der Kindheit verlieren. Für die Vererbungstheorie sprechen Studien, die eine Übereinstimmung von absolutem Gehör bei Geschwistern zwischen 8% -15% finden, auch wenn sie getrennt aufwachsen (Zatorre, 2003). Für die genetische Komponente spricht auch, dass absolutes Gehör in Japan, China, Korea und Vietnam weitaus häufiger auftritt als bei kaukasischen Volksgruppen. Dabei ist es nur von untergeordneter Bedeutung, ob es sich bei den Landessprachen um tonale Sprachen handelt, bei denen Tonhöhen Wortbedeutungen kodieren, wie dies im Chinesischen der Fall ist. So sind Japanisch und Koreanisch keine tonalen Sprachen, und auch bei englischsprachig aufgewachsenen Chinesen findet sich ein höherer Anteil von Absoluthörern. Ganz offensichtlich ist aber der ererbte Anteil nur eine Komponente, denn eine weitere wichtige Voraussetzung scheint frühes musikalisches Training zu sein. Die Prägungsperiode liegt zwischen dem Kleinkindalter und etwa 9 Jahren. Ab dem Alter von 12 Jahren kann das absolute Gehör meist nicht mehr erworben werden. Grosses Aufsehen erregte eine Untersuchung, die von Saffran und Griepentrog (2001) durchgeführt wurde. Sie berichteten über acht Monate alte Kinder, die in einem Test auf eine Tonhöhenverschiebung bekannter Dreitonmelodien so reagierten, als seien dies vollkommen neue Melodien. Dieses Ergebnis lässt sich im Sinne der „Verlernhypothese“

interpretieren, denn nur Absolut Hörer können wahrnehmen, dass die Tonhöhen verschoben waren.

Für unser Thema von Bedeutung ist, dass Absolut Hörer auch neuroanatomische Besonderheiten aufweisen. So besitzen sie eine verstärkte Asymmetrie des oberen Anteils des Schläfenlappens. Auf der linken Hirnhälfte ist der Bezirk hinter dem Heschl-Gyrus in der oberen Temporalhirnrinde relativ größer, bzw. auf der rechten Hirnhälfte kleiner. Diese Region wird „Planum Temporale“ genannt. Die verstärkte Asymmetrie wird wie die oben aufgeführte Vergrößerung der Heschl-Region als Ausdruck einer Struktur-Anpassung des Nervensystems auf frühes Training gewertet. Passend dazu fand sich in neurophysiologischen Messungen im Bereich der linken oberen Temporalhirnwindung bei Absolut Hörern im Vergleich zu Relativ Hörern eine Verlagerung der für die Analyse komplexer Töne und Geräusche zuständigen Neurone nach hinten (Hirata et al. 1999). In funktionellen Aktivierungsstudien mit der PET-Methode konnte gezeigt werden, dass Absolut Hörer bei der Identifikation von Tonhöhen in der hinteren linken seitlichen Stirnhirnregion ein Aktivitätsmaximum zeigten, welches bei Relativ Hörern fehlte. Wurden Relativ Hörer aber trainiert, bestimmte Klänge mit willkürlich ausgesuchten Ziffern zu assoziieren, dann zeigte sich bei ihnen genau das gleiche Aktivierungsmaximum. Dies spricht dafür, dass die gelernte Assoziation eines Klanges mit einem Namen in dieser Region erfolgt (Bermudez und Zatorre 2005). Absolutes Gehör ist übrigens nicht auf Menschen beschränkt. Zahlreiche Tierarten, insbesondere Vögel, aber auch manche Fledermaus- und Affenarten, ja sogar Ratten und Hunde besitzen absolutes Gehör. Allerdings ist bislang nicht bewiesen, dass Tiere in der Lage sind, wie die Menschen die große Anzahl von über 80 Kategorien zu unterscheiden.

Zusammenfassend ergibt sich damit für unsere Fragestellung folgendes Bild: wahrscheinlich besitzen die meisten Menschen bei der Geburt erblich bedingt ein unterschiedlich stabiles Potential zum Absolut Hören, das sich in der Regel in der Kindheit verliert. Bei intensiver musikalischer Unterweisung stabilisiert sich das absolute Gehör im Gedächtnis. Dieser Vorgang ist von plastischen Anpassungen der Struktur und Funktion vor allem des linken Schläfenlappens begleitet und schließt neuronale Netzwerke der linken Stirnhirnregion mit ein. Generalisiert man diese Erkenntnisse allgemein auf den Erwerb spezialisierter Hörfertigkeiten, wie sie in diesem Kapitel

beschrieben worden sind, dann ist vermutlich das Potenzial zur Ausprägung einer neuroanatomischen Spezialisierung, einer „Haydn-Windung“ genetisch bedingt. Die zielgerichtete Unterweisung ist Voraussetzung, dass dieses Potenzial ausgeschöpft wird.

Musizieren als Plastizitätsmotor

Musizieren gilt als starker Anreiz für plastische Veränderungen des Zentralnervensystems. Unter Neuroplastizität versteht man die funktionelle und strukturelle Anpassung des Nervensystems an Spezialanforderungen, die in aller Regel relevante und komplexe Informationsverarbeitung einschließen müssen. Plastizität kann in allen Zeitbereichen beobachtet werden und ist begleitet von kurz- und langfristigen Lernvorgängen. Die Mechanismen der Plastizität schließen rasche Veränderungen synaptischen Signalverhaltens im Sekundenbereich, Wachstum von Synapsen und Dendriten über Stunden bis Tage, verstärkte axonale Myelinisierung mit Verbesserung der neuronalen Signalübertragung über Wochen und verringertes (physiologisches) Absterben von Neuronen im Jahresbereich ein. Begleitet werden diese Veränderungen von Anpassung der Blutkapillaren und des Stützgewebes im ZNS.

Der Einfluß musikalisch-sensomotorischen Lernens auf die neuronalen Netzwerke wurde an Erwachsenen beim Erlernen des Klavierspiels nachgewiesen (Bangert und Altenmüller 2003). Überraschend ist dabei die Dynamik der Veränderungen: Bereits nach 20 Minuten Klavierübungen entsteht bei Anfängern eine funktionelle Kopplung mit gleichzeitiger Aktivierung der Nervenzellverbände in den Hörrinden und in den sensomotorischen Arealen. Nach fünf Wochen Training am Klavier sind diese zunächst nur vorübergehenden Änderungen der neuronalen Vernetzung stabil und es kommt zu einer Zunahme der neuronalen Kohärenz und der Geschwindigkeit der neuronalen Leitungsgeschwindigkeit zwischen den Hör- und Bewegungsregionen (Bangert 2001). Bei ausgebildeten Pianisten kommt es beim Hören von Klaviermusik (Bangert et al. 2005) oder beim Betrachten pianistischer Bewegung (Haslinger et al. 2005) zu einer starken Mitaktivierung der sensomotorischen Handregion, ohne dass Bewegungen sichtbar sind. Umgekehrt führen bei professionellen Klavierspielern pianistische Handbewegungen auf einer stimmten Tastatur zu einer Aktivierung der Hörregionen. Diese Befunde dokumentieren die durch musikalische Training verursachte enge Kopplung von

neuronalen Repräsentationen im Dienste der auditiv-senso-motorischen Integration. Interessanterweise zeigten Pianisten beim Spiel auf einer stummen Tastatur oder beim Beobachten pianistischer Bewegungen auch eine Aktivierung der linkshemisphärischen Broca-Regionen im Stirnhirnbereich. Dies hat zu einer Neubewertung der Funktion dieser Hirnregionen geführt. So wird heute die Broca Region in einem erweiterten Verständnis übergreifend als Ort der Programmierung geübter symbolhaltiger Bewegungssequenzen interpretiert.

Jahrelanges Üben auf dem Instrument führt zu strukturellen Anpassungen des ZNS, die sich mit den neuen Methoden der Kernspintomographie sehr gut abbilden lassen. Langjährige Übung der Feinmotorik führt bei Pianisten und Geigern zu einer Größenzunahme der sensomotorischen Handregionen. Interessanterweise gibt es dabei instrumententypische Unterschiede. Streicher haben eine größere motorische Handregion über der rechten Hirnhälfte, zuständig für die linke Hand, Pianisten über der linken Hirnhälfte, zuständig für die rechte Hand (Bangert und Schlaug 2005). Das lässt wichtige Rückschlüsse auf den „Wachstumsreiz“ für die neuroplastischen Anpassung zu: offenbar sind es die schnellen, zeitlich räumlich präzisen Bewegungen der linken Hand bei Streichern bzw. der rechten Hand bei Pianisten, die zu einer Größenzunahme der Neurone im motorischen Kortex führen. Die mindestens genauso schwierigen, aber eher genaue Kraftdosierung und Balance erfordernden Bewegungen der Bogenhand sind kein spezifischer Stimulus für das Nervenzellwachstum.

Natürlich könnte man gegen diese Studien wieder ins Feld führen, dass möglicherweise nur diejenigen Geiger den Sprung in das Profilage schaffen, die von Geburt an eine grosse motorische Handregion in der rechten Hirnhälfte haben. Gegen diese „Anlage-Theorie“ spricht aber, dass in allen Studien zur Neuroplastizität bei Musikern die Stärke der Anpassungen mit der kumulativen Lebensübezeit positiv korreliert. Darüber hinaus sind die Effekte besonders bei denjenigen Instrumentalisten deutlich, die vor dem Alter von sieben Jahren mit dem Instrumentalspiel begonnen hatten.

Neue Untersuchungen mit der „Voxel-basierten Morphometrie“ (VBM) zeigen, dass nicht nur die anatomische Größe des motorischen Kortex bei Musikern zunimmt, sondern auch die Dichte und/oder Größe der Neuronen

(Gaser und Schlaug 2003). Ganz neue Daten aus der Harvard-Universität belegen, dass derartige Veränderungen auch bei musikalisch nicht besonders talentierten Kindern auftreten, wenn sie denn nur musizieren. So untersuchten Hyde und Kollegen (2009) fünfzehn Kinder mit einem Durchschnittsalter von 6 Jahren und verglichen sie mit gleich alten Kontrollen. Der sozioökonomische Hintergrund der Eltern war in beiden Gruppen gleich und die Vermessung der Hirnregionen zeigte vor Beginn des musikalischen Trainings keine Unterschiede. Nach fünfzehn Monaten Klavierunterricht zeigte sich bei den Musikkindern im Vergleich zu den Kontrollen eine Vergrößerung der Handrepräsentation im motorischen Kortex und der Hörregion in der oberen Schläfenwindung. Ausserdem war die Faser Verbindung zwischen der rechten und der linken Handregion beider Hirnhälften verstärkt. Die Musik Kinder schnitten auch in Hörtests und in Feinmotoriktests besser ab, als ihre untrainierten Altersgenossen. Interessanterweise waren die Kinder keinem sehr intensiven Training ausgesetzt: sie erhielten wöchentlich 30 Minuten Klavierunterricht, über häusliches Üben ist in der Veröffentlichung nichts vermerkt!

Bei älteren Berufsmusikern findet man zahlreiche derartige Anpassungen: Ihr Broca-Areal der linken Stirnhirnregion, das Kleinhirn, und der primäre auditive Kortex weisen eine größere neuronale Dichte auf. Übungsabhängige plastische Anpassungen des Nervensystems betreffen auch die Faserstruktur: Die beide Hirnhälften verbindende Nervenfaserverbrücke des Balkens ist bei Musikern im Vergleich zu Nichtmusikern deutlich kräftiger ausgeprägt. Mit Hilfe der Faserdarstellung (Diffusion Tensor Imaging oder „DTI“) konnte unlängst gezeigt werden, dass diese Größenzunahme vor allem diejenigen Anteile des Balkens betreffen, die die Handregionen und Hörregionen beider Hemisphären verbinden. Auch die Pyramidenbahn vom primär motorischen Kortex zu den Vorderhornregionen des Rückenmarkes ist bei Pianisten stärker ausgeprägt als bei nicht musizierenden Kontrollen (Bengtsson et al. 2005).

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

1. Musizieren wird in früher Kindheit begonnen und in aller Regel von zukünftigen Berufsmusikern 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. In Tierversuchen konnte nachgewiesen werden, dass diese Bedingungen die Bemerkung der Nervenfasern und die synaptische Effizienz fördern (Fields und Grahams 2002).

3. Die präzise Informationsverarbeitung ist für Musiker von großer Bedeutung. Professionelles Musizieren findet in einem unnachgiebigen 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 dafür, dass man gerade bei klassisch ausgebildeten Musikern bevorzugt neuroplastische Veränderungen findet liegt in der Methodik der Untersuchungen. In aller Regel werden nämlich die Plastizitätsbefunde als Gruppenvergleich zwischen klassisch ausgebildeten Berufsmusikern und musikalischen Laien erhoben. Da professionelles Musizieren klassisch ausgebildeter Musiker auf einem mehr oder weniger kanonischen Ausbildungsweg beruht, der in der Gruppe starke Gemeinsamkeiten aufweist, nämlich früher Beginn des Instrumentalunterrichts, hohe kumulative Lebensübzeit 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.

Anzumerken ist hier, dass bei Zusammenstellung ähnlich homogener Gruppen in anderen Fertigungsdomänen ähnliche strukturelle Anpassungen des Gehirns nachweisbar sind. So fanden Maguire et al. (2000) bei Londoner Taxifahrern eine Vergrößerung von Gedächtnisstrukturen im Hippocampus, die vermutlich der räumlichen Orientierung und Navigation dienen. Sechs

Wochen dauerndes Training im Jonglieren führte bei Erwachsenen zu einer Vermehrung der neuronalen grauen Substanz im Übergangsbereich zwischen Sehrinde und Scheitelregion. Diese Regionen dienen der visuell-räumlich-motorischen Integration (Draganski et al. 2004). Interessanterweise konnte im letzten Jahr die gleiche Gruppe auch bei 60-jährigen ähnliche Effekte nachweisen. Sie liessen die Senioren drei Monate das Jonglieren mit drei Bällen lernen und fanden bei den erfolgreichen Lernern eine Vergrößerung der Hirnregionen im Bereich der visuo-motorischen Areale, der Gedächtnisregionen des Hippokampus und im Bereich der Motivationsareale des Accumbens-Kerns (Boyke et al. 2008).

In der Laienpresse werden diese Anpassungsvorgänge häufig als sehr positiv bewertet, letztendlich sind es jedoch Phänomene von eher geringem Aussagewert. Sie zeigen, dass sich das Gehirn, - wie andere Organe - stärker in der Kindheit, aber auch im Erwachsenenalter an Spezialanforderungen anpasst. Die zu Grunde liegenden überraschend dynamischen Mechanismen sind derzeit nur in Teilen aufgeklärt. Unser Gehirn spiegelt das wider, mit dem wir uns im Leben intensiv beschäftigen, es ist Struktur gewordene Lebensgeschichte. Die mit der Spezialisierung einhergehende Vergrößerung oder neuronale Verdichtung bestimmter Zentren bringt vermutlich in anderen Hirnbereichen funktionelle Verkleinerungen mit sich. Um das zu verdeutlichen denke man nur daran, dass ein Konzertpianist nicht auch noch intensiv Zeit investieren könnte, um in London Taxi zu fahren. Das würde man ihm auch gar nicht wünschen.

Finale: Gibt es eine Haydn-Windung?

Die zahlreichen referierten Untersuchungen belegen die Besonderheiten der Musikergehirne, die letztlich Ausdruck der Neuroplastizität, der Anpassungsfähigkeit des zentralen Nervensystems sind. Diese Anpassungen finden sich auch bei nicht sonderlich begabten Kindern, die Klavierunterricht erhalten. Offen bleiben muss, welcher Anteil an diesen Veränderungen genetisch bedingt ist, da dazu bislang Forschungsergebnisse fehlen. So ist theoretisch denkbar, dass „Begabung“ sich gerade in einer genetisch angelegten Bereitschaft zur spezifischen oder generellen Neuroplastizität niederschlägt. Allerdings sollte

man auch die möglichen negativen Auswirkungen der plastischen Anpassungen nicht verschweigen. Bei Musikern tritt in etwa 1% der Fälle ein Verlust der feinmotorischen Kontrolle lang geübter Bewegungen auf. Diese als „fokale Dystonie“ oder als „Musikerkrampf“ bezeichnete Erkrankung ist als dysfunktionelle, maladaptive Neuroplastizität interpretierbar (Altenmüller und Jabusch 2009). Auch andere Folgen des Übertrainings sind denkbar. So können chronische Schmerzen oder Angsterkrankungen auch bei Berufsmusikern überdurchschnittlich häufig beobachtet werden (Übersicht in Blum 1995).

Zusammenfassend können wir für alle wesentlichen Anteile musikalischer Fertigkeiten hirnphysiologische Korrelate finden. Aber damit sind nur die notwendigen Voraussetzungen für eine besonders herausragende musikalische Leistung beschrieben. Der eigentliche künstlerische und kreative Prozess wird nicht abgebildet. Howard Gardner hat dieses Dilemma der neurobiologischen Kreativitätsforschung treffend formuliert: „Selbst wenn wir jeden Bruchteil jedes einzelnen Neurons kennen würden, selbst wenn wir jedes Detail der neuronalen Netzwerke eines Menschen erfasst hätten, würden wir doch nicht wissen, ob dieser Mensch kreativ ist“ (zitiert nach Pfenninger und Shubik, 2001, Seite XII)

Es gibt also keine Haydn-Windung, es gibt keinen Ort der musikalischen Hochbegabung im Hirn, allenfalls Orte, oder Netzwerke, die aber hochgradig individuell angelegt sind und die sich einer wissenschaftlichen Analyse entziehen. Die bislang verfügbaren Ergebnisse der Hirnforschung liefern allenfalls Einsichten in notwendige Voraussetzungen, aber keine hinreichenden Erklärungen für musikalische Ausnahmeleistungen. Die großartigen Leistungen der Spitzenmusiker, die Raffinesse ihrer Klangfarben, die Kraft, mit Tönen emotionale Zustände hervorzurufen, Lebensgefühle einer ganzen Epoche wider zu spiegeln und ganz Grundsätzliches über die menschliche Natur auszusagen sind seit Jahrtausenden von den Menschen zu Recht bewundert worden, – eine naturwissenschaftlich befriedigende Erklärung für sie gibt es nicht.

Literaturhinweise

Altenmüller, E. & Jabusch, H.C. (2009). Focal hand dystonia in musicians: phenomenology, etiology, and psychological trigger factors. *J. Hand Ther.* 22: 144-154 (2009)

Bangert, M. (2001). Auditiv-sensomotorische Integration bei komplexen hochtrainierten Wahrnehmungs- und Verhaltensleistungen: Analyse kortikaler Koaktivierungsprozesse am Beispiel des Klavierspiels. Universität Hannover, Institut für Physik.

Bangert, M. & Altenmüller, E. (2003). Mapping Perception to Action in Piano Practice: A longitudinal DC-EEG-study. *BMC Neuroscience* 4: 26-36.

Bangert, M., & Schlaug, G. (2006). Specialization of the specialized in features of external human brain morphology. *European Journal of Neuroscience*, 24: 1832-1834.

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. *Neuroimage* 15: 917-926.

Bengtsson, S., Nagy, Z., Skare, S., Forsman, L., Forssberg, H., Ullen, F. (2005). Extensive Piano practicing has regionally specific effects on white matter development. *Nat Neurosci*, 8: 1148-1150.

Bermudez, P. & Zatorre, R. (2005) Conditional associative memory for musical stimuli in non-musicians: Implications for absolute pitch. *J Neurosci* 25: 7718-7723.

Blum J.(1995) Medizinische Probleme bei Musikern. Thieme Stuttgart, New York.

Boyke, J., Driemeyer, J., Gaser, C., Büchel, C., May A. (2008): Training-Induced Brain Structure Changes in the Elderly. *J. Neurosci.* 28: 7031–7035

Draganski, B., Gaser, C., Busch, V., Schuierer, G., Bogdahn, U., May, A. (2004). Neuroplasticity: Changes in grey matter induced by training. *Nature* 427:311-312.

Fields, R.D. & Stevens-Graham, B. (2002). New Insights into Neuron-Glia Communication. *Science* 298: 556-562.

Gaser, C. & Schlaug, G. (2003). Brain structures differ between musicians and non-musicians. *J. Neurosci.* 23: 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. *J. Cogn. Neuroscience*: 17: 282-293.

Hirata, Y., Kuriki, S., Pantev, C. (1999). Musicians with absolute pitch show distinct neural activities in the auditory cortex. *Neuroreport* 10: 999-1002.

Hyde, K.L., Lerch, J., Norton, A., Forgeard, M., Winner, E., Evans, A.C., Schlaug, G. (2009). Musical Training Shapes Structural Brain Development. *J. Neurosci.* 29:3019–3025.

Maguire, E.A., Spiers, H.J., Good, C.D., Hartley, T., Frackowiak, R.S., Burgess, N. (2003). Navigation expertise and the human hippocampus: a structural brain imaging analysis. *Hippocampus* 13:250-259.

Münste, T.F., Kohlmetz, C., Nager, W., Altenmüller, E. (2001). Superior auditory spatial tuning in professional conductors. *Nature* 409: 580.

Pfenninger, K.H. & Schubik, V.R. (2001). *The origins of creativity*. Oxford University Press, Oxford.

Saffran, J.R. & Griepentrog, G.J. (2001). Absolute pitch in infant auditory learning. Evidence for developmental reorganization. *Developmental Psychology* 37: 74-85.

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. *Nat Neurosci* 5: 688-694.

Temkin, O. (1947) Gall and the Phrenologic Movement. *Bull. Hist. Med.* 21: 275-312.

Zatorre, R.J. (2003) Absolute pitch: a model for understanding the influence of genes and development on neural and cognitive function. *Nat Neurosci Rev* 6: 692-695.

Korrespondenzadresse

Univ. Prof. Dr. med. Eckart Altenmüller
Institut für Musikphysiologie und Musiker-
Medizin,
Hochschule für Musik und Theater Hannover,
Postadresse:
Emmichplatz 1
30175 Hannover
Gebäudeadresse:
Schiffgraben 48
30175 Hannover.
Tel.: 0511 3100 552, Fax: 0511 3100 557,
e-mail: altenmueller@hmt-hannover.de