

# Audio- und Neuroplastizität der Klangwahrnehmung

Peter Schneider, Jan Benner, Bettina Zeidler, Markus Christiner, Annemarie Seither-Preisler, Dorte Engelmann

Das Musikergehirn erweist sich als exzellentes Modell, um die komplexe Wechselwirkung zwischen veranlagten musischen und kognitiven Potentialen, entwicklungsbedingten Reifeprozessen und lernbedingter Plastizität umfassend zu verstehen. In diesem Beitrag stellen wir einen neuen Ansatz zur Erforschung der neuronalen Grundlagen der Klang- und Musikwahrnehmung vor, der weitreichende Implikationen für die Begabungs- und Lernforschung, sowie für klinisch-diagnostische und pädagogische Anwendungen mit sich bringt und bislang zu einer Fülle neuer Erkenntnisse führte: (1) Der Hörkortex von Musikern zeigt ein um 130% vergrößertes Volumen an grauer Substanz; (2) Individuelle Besonderheiten in der Klangwahrnehmung (absolutes und relatives Gehör, Oberton- und Grundtonerkennung, Sensitivität für Melodien und Klangfarben) spiegeln sich in Anatomie und Funktion des Hörkortex wider; (3) Bei Hördefiziten wirkt sich Musizieren protektiv gegenüber Hörverlust, Tinnitus und Geräuschempfindlichkeit aus; (4) Bei viel musizierenden Kindern arbeiten der rechte und linke Hörkortex synchron, während Kinder mit Lese-Rechtschreibschwäche oder AD(H)S eine extreme Zeitverschiebung erkennen lassen. Musizieren scheint auf neurologischer Ebene solchen Entwicklungsauffälligkeiten direkt entgegenzuwirken. Die in kombinierten Längs- und Querschnittsuntersuchungen beobachteten subjektiven, individuellen Eigenschaften der Hörverarbeitung werden im Rahmen eines neurokognitiven Entwicklungsmodells zusammengeführt.

## Einführung

Das musikalische Gehirn hat sich zu einem beliebten Forschungsmodell entwickelt, um die wechselseitige Beziehung zwischen veranlagten und trainingsbedingten Faktoren des Lernens und Verhaltens systematisch zu erforschen [1–5]. Der musikalische Mensch hat sich insbesondere deshalb als ideales Paradigma erwiesen, weil professionellen Musikern in der Regel Höchstleistungen abverlangt werden, die ein präzises Zusammenspiel und eine Optimierung verschiedenster Gehirnfunktionen erfordern [6]. Diese setzen einerseits günstige anfängliche Dispositionen, andererseits eine über viele Jahre durch intensives Training erworbene Expertise voraus, Eigenschaften, die als Modell für das Verhältnis von Anlage und Umwelt in der Nutzung menschlicher Gehirnfunktionen in einem weiter gefassten Rahmen dienen können.

## Audio- and Neuroplasticity of Sound Perception

It is becoming increasingly clear that the brains of musicians are an excellent model for understanding the complex interplay among learning-induced plasticity, maturational factors of neurocognitive functions, and predispositional factors. In this article, we outline a new approach to explore the neural basis of auditory processing with respect to both outstanding musical skills and auditory dysfunction with considerable potential for pedagogic, therapeutic, diagnostic and clinical applications. The consequent implementation of this approach has led to a cascade of new findings: (1) The auditory cortex of musically gifted subjects contains on average 130% more gray matter volume as compared to non-musicians; (2) individual differences of sound perception (absolute and relative pitch, fundamental and spectral pitch, discrimination of melodies and timbre) are associated with specific neurological characteristics of auditory cortex; (3) in subjects with auditory dysfunction, musicality has been found to reduce the incidence of auditory impairments including tinnitus and hyperacusis; (4) musically trained children demonstrated a better synchronization of right and left auditory cortex, whereas in the case of dyslexia and attention deficit (hyperactivity) disorder a remarkable desynchronization has been observed. Playing a musical instrument therefore seems to counteract these deficits on the neuronal level. Overall, the results of the combined cross-sectional and longitudinal studies are put together in a neurocognitive model of aptitude and competence.

reerseits eine über viele Jahre durch intensives Training erworbene Expertise voraus, Eigenschaften, die als Modell für das Verhältnis von Anlage und Umwelt in der Nutzung menschlicher Gehirnfunktionen in einem weiter gefassten Rahmen dienen können.

## Besonderheiten des musikalischen Gehirns

Im Zuge der Erforschung von Gehirnfunktionen, die in das aktive Musizieren einbezogen sind, ist es zunehmend gelungen, die Komplexität und Multimodalität der auditorischen Verarbeitung zu verste-

hen [7]. Es gibt zahlreiche neurowissenschaftliche Querschnittsstudien, die in der Kindheit positive Zusammenhänge zwischen Musizieren und auditorischen [8, 9], sprachlichen [10–12], motorischen [13] und allgemein-kognitiven [14, 15] Fähigkeiten nachweisen konnten. Auch bei erwachsenen Probanden wurden in großem Umfang Besonderheiten des musikalischen Gehirns entdeckt. Bildgebende Verfahren, insbesondere strukturelle und funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT) sowie Positron-emissionstomographie (PET) führten zu der Erkenntnis, dass die auditorischen oder auditorisch assoziierten Areale von Musikern größer sind [16–18], lokal verstärkte Aktivierungsmuster zeigen [19–21] und sich in der kortikalen Dicke der grauen Substanz unterscheiden [22]. Mittels elektrophysiologischer Verfahren (Elektroencephalographie / EEG und Magnetoencephalographie / MEG) fand man, dass die auditorisch evozierten Potentiale und Felder beim Hören von Sinustönen und Instrumentalklängen bei Musikern höhere Amplituden aufweisen, was eine stärkere Sensibilität anzeigt [23–26]. Darüber hinaus wurde innerhalb der auditorischen Netzwerke eine ausgeprägtere strukturelle und funktionelle Konnektivität [27–31] und intrazerebrale Synchronisation [32, 33] festgestellt. Messungen der Funk-

tionen des Hirnstamms weisen auf einen positiven Einfluss des Musizierens auf die Unterscheidung von elementaren Hörereignissen, die Wahrnehmung von akustischen Signalen unter Störbedingungen, das auditive Arbeitsgedächtnis und bestimmte kognitive Leistungen hin [34, 35]. Des Weiteren gelang es, die neurologischen Ursachen von Hördefiziten besser zu verstehen und sinnvolle Therapien zu entwickeln [36]. Auf Verhaltensebene gibt es vielfältige Evidenz, dass intensives Instrumentalspiel auch zu Transfereffekten in allgemein kognitive Domänen führen kann [37–42]. Auf Querschnittsstudien beruhende Unterschiede zwischen Musikern und Nichtmusikern werden in der Regel lernbedingt gedeutet und auf langjähriges und intensives musikalisches Training zurückgeführt. Häufig wird in diesem Zusammenhang auf die Expertiseforschung verwiesen, deren bekannteste Vertreter [43] davon ausgehen, dass jeder Mensch durch ausdauerndes und zielgerichtetes Üben ('deliberate practice') in einer bestimmten Domäne zum Experten wird, wobei hierfür ein Zeithorizont von einem Jahrzehnt angenommen wird ('10-Jahres-Regel'). Allerdings weisen jüngere Zwillingstudien [44], genetische Untersuchungen [45–47], sowie Studien zur strukturellen Plastizität [48–51] darauf hin, dass auditorische und musikali-

Regupur®

## REGUPUR® AUSGLEICHSSCHÜTTUNG

**Regupur® comfort S1** » wasserfreier Einbau » nachhaltig » gesundheitlich unbedenklich » schnell und kostensparend » trittschalldämmend



sche Fähigkeiten darüber hinaus auch entscheidend durch prädispositionelle und genetische Faktoren beeinflusst werden.

### Wechselspiel zwischen Veranlagung, Reifeprozessen und lernbedingter Expertise

Genaugenommen erlauben es reine Querschnittstudien nicht, Rückschlüsse auf das Ausmaß lernbedingter plastischer Prozesse zu ziehen, da es sich um 'Momentaufnahmen' handelt. Sie sagen nichts über die Ursachen und die zeitliche Veränderlichkeit der beobachteten individuellen Unterschiede aus. Um die Wechselbeziehung zwischen veranlagten Potentialen, motivationalen Faktoren und trainingsbedingter Expertise wirklich zu verstehen, ist eine Langzeitperspektive erforderlich, die aufzeigt, unter welchen Umständen bestimmte Menschen besondere musikalische Talente entwickeln und Leistungen erbringen, während andere mittelmäßig bleiben oder wenig Erfolg haben. Ähnliches gilt für die Frage, warum bei Menschen, die in der Kindheit von auditiven Verarbeitungs- und Wahrnehmungsstörungen betroffen waren, manchmal eine gravierende Besserung eintritt, während in anderen Fällen zeitlebens Beeinträchtigungen bestehen bleiben. Hängt dies davon ab, wann solche Probleme erkannt werden und ob rechtzeitig geeignete Lernmöglichkeiten zur Verfügung stehen?

Aus den genannten Gründen sind während der letzten zehn Jahre neurowissenschaftliche Längsschnittstudien zum Einfluss des Musizierens im Kindesalter zunehmend populär geworden. Diese Arbeiten zeigten umfassende trainingsbedingte Plastizitätseffekte in auditorischen [52], motorischen [13], sprachlichen [53–57] und allgemein-kognitiven [58, 59] Domänen. Im Vergleich dazu gibt es nur sehr wenige Längsschnittstudien mit Erwachsenen. Herdener und Kollegen beobachteten in einer solchen Untersuchung bei Jazzmusikstudenten trainingsbedingte Änderungen im Hippocampus und in sprachrelevanten Arealen [60, 61]. Herholz und Kollegen identifizierten kortikale und subkortikale Areale, deren Aktivitäten das musikalische Trainingsverhalten vorhersagten [62].

Kortikale Entwicklungsverläufe können sich von der pränatalen Phase bis ins junge Erwachsenenalter erstrecken, wobei in der Pubertät eine besonders sensible Phase durchlaufen wird, in welcher wichtige neuronale Schaltkreise häufig nochmals einer Umstrukturierung unterworfen werden [63, 64]. Daher sind vor allem Langzeitstudien von Interesse, welche diese wichtige Phase des Umbruchs mit einbeziehen. Leider wurde dieser Aspekt in Bezug auf die Hörverarbeitung bislang noch nicht systematisch erforscht.

Bisherige neuroanatomische Langzeitstudien zur Entwicklung des menschlichen Gehirns weisen allerdings darauf hin, dass der präfrontale Kortex während der Pubertätsphase eine besondere Rolle spielt. Im Alter von ca. 11–12 Jahren wird im dorso-medialen präfrontalen und auch im parietalen Kortex ein Maximum an Dichte der grauen Substanz und der Dendriten erreicht, das dann in eine stabile Plateauphase übergeht und danach wieder abnimmt [63, 65], während die Dichte an weißer Substanz weiter anwächst [66, 67]. In temporalen Bereichen schreitet die Reifung der grauen Substanz hingegen weiter fort [68] und nimmt erst im Alter von ca. 17 Jahren ihren maximalen Plateauwert an [63]. Dies deutet darauf hin, dass sich die zur Reifung vieler kognitiver Fähigkeiten erforderlichen audio-motorischen und multisensorischen kortikalen Netzwerke in dieser sensiblen Übergangsphase noch im Aufbau befinden [69–71]. Daher sollte ein intensives musikalisches Training in diesem Alter eine ganz besondere Schlüsselrolle für die volle Ausreifung der genannten Funktionen und für entsprechende Transfereffekte in kognitive Bereiche spielen.

### Subjektive und objektive Aspekte der Klangwahrnehmung

Die Arbeitsgruppe 'Musik und Gehirn' an der Heidelberger Kopfklinik beschäftigt sich seit Anfang des dritten Jahrtausends im Rahmen einer ausgedehnten transdisziplinären, transalpinen Kooperation mit den Universitäten Basel, Genf, Zürich, Graz, Wien, sowie den Musikhochschulen in Basel, Mannheim und Riga mit der Erforschung der neuronalen Grundlagen subjektiver und objektiver Aspekte des Hörens und der Klangwahrnehmung. Im Rahmen des seit 2016 laufenden Heisenberg-Programms (Titel: „Klangwahrnehmung zwischen außergewöhnlicher Musikalität und Defiziten in der auditorischen Verarbeitung: Neuronale Grundlagen individueller Veranlagung, entwicklungsbedingter Reifung und lernbedingter Plastizität in der Lebenszeitperspektive“) wird mit der Erforschung des neuro-auditorischen Netzwerks ein großer Bogen von der Kindheit über die Pubertät bis zum Erwachsenenalter gespannt. Die Wichtigkeit solcher systematischen Langzeitstudien wird innerhalb der wissenschaftlichen Community zunehmend hochgehalten [72, 73]. Im Zusammenhang mit der Gegenüberstellung lernbedingter und prädispositioneller Faktoren wird es außerdem zunehmend relevant, die interindividuelle Variabilität der zugrundeliegenden anatomischen und funktionellen Merkmale zu berücksichtigen [68, 74, 75]. Die aktuell in Heidelberg durchgeführten Langzeitstudien zielen darauf ab, die Entwicklung des menschlichen Hörsystems auf behavioraler und

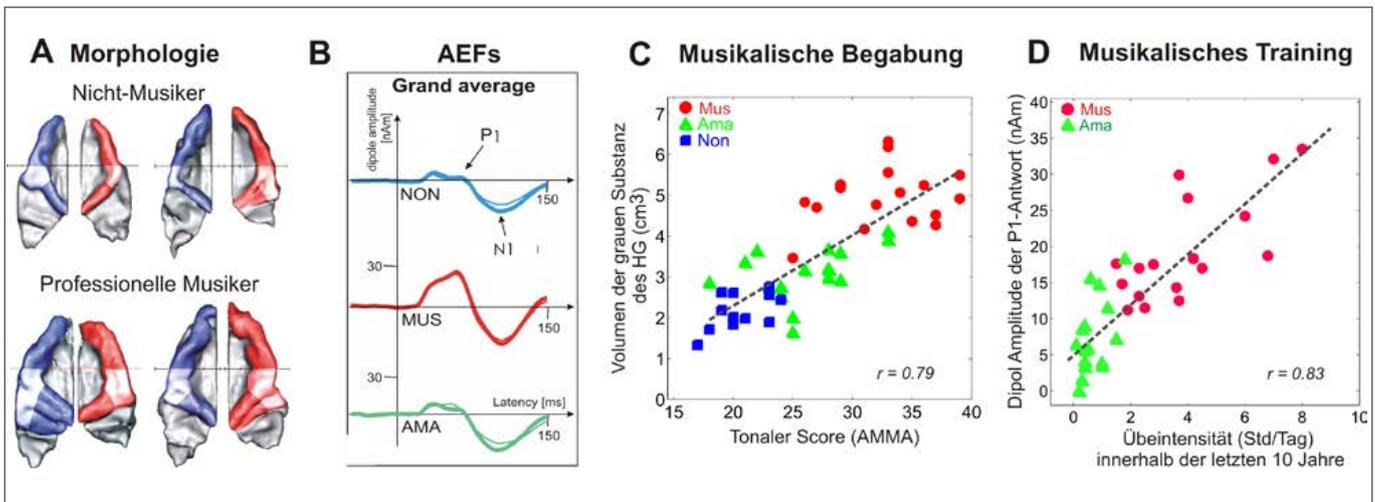


Abb. 1: Morphologie und Funktion des auditorischen Kortex bei Musikern und Nichtmusikern.

- (A) Aufblick auf den Hörkortex zweier Nichtmusiker (oben) und zweier Profimusiker (unten). Die Heschlschen Querwindungen sind farbig markiert (rot: rechte Hemisphäre, blau: linke Hemisphäre); das dahinter liegende Planum temporale ist grau dargestellt.
- (B) Magnet-encephalografisch erfasste auditorisch evozierte Felder (AEF) der im auditorischen Kortex modellierten Gehirnaktivität beim passiven Hören von harmonisch-komplexen Tönen. Die Amplitude der ersten positiven P1 Antwort (ca. 30–70 ms nach Tonbeginn) war bei Profimusikern (Mus, rot) drei- bis fünffach größer als bei Nichtmusikern (Non, blau) und Amateurmusikern (Ama, grün).
- (C) Korrelationsplot für das Volumen an grauer Substanz innerhalb der Heschlschen Querwindung und die mit dem AMMA-Test von E. Gordon erfasste musikalische Begabung.
- (D) Korrelation der P1-Amplitude der AEFs mit der musikalischen Langzeitpraxis.

kortikaler Ebene umfassend zu verstehen. Dazu wurde ein umfassendes Testprogramm zur Erhebung der individuellen Höreigenschaften durchgeführt. Ziel war es, einerseits Klangwahrnehmungseigenschaften [76–78], besondere Aspekte des musikalischen Hörens [79, 80], und andererseits auditive Beeinträchtigungen zu erfassen. Letztere umfassen die Bereiche (a) Hörverlust, Geräuschempfindlichkeit, Misophonie und Tinnitus [81], (b) auditorische Verarbeitung im Zusammenhang mit psychomotorischen Defiziten (Williams-Beuren-Syndrom) [82], (c) auditive Verarbeitungs- und Wahrnehmungsstörungen [83] sowie (d) phonologische Bewusstheit und Legasthenie [83–85].

### Strukturelle und funktionelle Unterschiede im Hörkortex von Musikern

In der Anfangsphase wurde ein besonderes Augenmerk auf individuelle Besonderheiten von grundlegenden strukturellen und funktionellen Merkmalen des Hörkortex gerichtet. Dabei zeigte sich, dass Profimusiker im Vergleich zu Nichtmusikern ein um 130% vergrößertes Volumen an grauer Substanz in den Heschlschen Querwindungen (Heschl Gyrus, HG) aufweisen [76]. Darüber hinaus zeigten die mittels MEG gemessenen frühen auditorisch evozierten Felder (AEF) bei Profimusikern im Zeitfenster von 30–70 ms nach Tonbeginn (primäre P1 Antwort) eine drei- bis fünffach vergrößerte Dipolamplitude. Dies bestätigte frühe exemplarische Befunde histo-

rischer Post mortem - Untersuchungen [86,87] und spätere planimetrische [16] und elektrophysiologische Ergebnisse [23]. Als wichtiger neuer Aspekt ließ sich zum ersten Mal eine funktionell-strukturelle Trennung von musikalischer Begabung einerseits und trainingsbedingter musikalischer Expertise andererseits ableiten.

Die musikalische Begabung wurde mit dem international standardisierten Test 'Advanced Measures of Music Audiation' (AMMA) des amerikanischen Musikpsychologen Edwin E. Gordon bestimmt. Nach Gordon bildet das Ergebnis des Tests die Fähigkeit ab, sich Klänge oder Musik mental vorstellen zu können ('Audiation', [88]). Während der tonale Subscore des AMMA-Tests – als Indikator musikalischer Begabung – stark mit der Morphologie und dem Volumen an grauer Substanz der Heschlschen Querwindungen korrelierte, spiegelte sich das Ausmaß der musikalischen Langzeitpraxis – auch nach Herausparialisierung des Begabungseinflusses – hochsignifikant in der magnetencephalografisch erfassten Aktivierung in Form der primären auditorisch evozierten Antwort P1 wider (Abb. 1).

### Oberton- und Grundtonerkennung

Als besonders zielführend erwies sich die Entwicklung eines Tests zur subjektiven Klangwahrnehmung (Oberton- versus Grundtonerkennung, [77]), der heute an vielen Musik(hoch)schulen und in zahlreichen internationalen Kooperationsprojekten als

Standardverfahren eingesetzt wird. Eine Kurzform dieses Test ist auf der Homepage unserer Arbeitsgruppe zu finden [89]. Dabei wird die subjektive Wahrnehmung des Tonhöhenverlaufs für jeweils zwei aufeinander folgende unvollständige harmonische Klänge bestimmt, bei denen die Grundtöne fehlen. Die präsentierten Obertongruppen weisen formantähnliche Strukturen auf, welche charakteristisch für Instrumentalklänge und stimmhafte Sprachlaute sind. Eine jeweils gegenläufige Verschiebung der Obertongruppen und des fehlenden Grundtones ermöglicht es, mit insgesamt 162 unterschiedlichen Tonpaaren den Grad an grund- oder obertonbezogenem Hören zu quantifizieren und vergleichend für verschiedene Personen einen 'Index der Klangwahrnehmung' zu berechnen [77, 78]. Die Testpersonen waren bisher vorwiegend Profimusiker, darunter Orchestermusiker, Rockmusiker, Dirigenten, Komponisten, Musikhochschuldozenten und -studenten, aber auch Amateure und Nichtmusiker. U.a. konnten auch die Gehirne der Musiker des Royal Liverpool Philharmonic Orchestra mit denen des Mannheimer Nationaltheaters verglichen werden. Interessanterweise zeigte sich nach der Auswertung der neurologischen und hörakustischen Daten, dass die Orchester sehr homogene, hemisphären-spezifische Unterschiede aufwiesen. Im Mannheimer Orchester zeigte sich nach der Analyse der neuroanatomischen und physiologischen Messungen eine linkshemisphärische Dominanz, verbunden mit zeitlich präziser, rhythmischer Spielweise, im Liverpools Orchester eine größere Dominanz der rechten Gehirnhälfte, verbunden mit der bewussten Hervorhebung spektraler Klangelemente.

Sowohl bei Musikern als auch bei Nichtmusikern wurde unabhängig vom Alter eine sehr breite Verteilung der Höreigenschaften mit unterschiedlich verlaufenden Grenzen zwischen Grundton- und Obertonwahrnehmung festgestellt. Die ersten Beschreibungen solch außergewöhnlicher subjektiver Unterschiede in der Klangwahrnehmung gehen bereits auf Hermann v. Helmholtz [90] zurück. Er wies zum einen auf die 'synthetische' Klangwahrnehmung hin, bei der die Wahrnehmungskomponenten zu einer 'Klangmasse' verschmelzen, zum anderen auf eine 'analytische' Wahrnehmung, bei der einzelne Obertöne eines Klanges zur bewussten Wahrnehmung gebracht werden. Die beiden Wahrnehmungsattribute Tonhöhe und Klangfarbe verhalten sich dabei komplementär. Grundtonhörer können die Tonhöhe und die Klangfarbe weitgehend unabhängig voneinander wahrnehmen, während sich für Obertonhörer die Tonhöhe und Klangfarbe wie zwei konjugierte Variable im Sinne der Heisenberg'schen Unschärferelation verhalten, d.h. bei der verschärf-

ten Wahrnehmung der einen Komponente tritt die andere Komponente in den Hintergrund.

In Anlehnung an Helmholtz beschrieb der Komponist und Musiker Arnold Schönberg das Konzept der 'Klangfarbenmelodien' [91]. Für Schönberg war die Klangfarbe in der Wahrnehmung wichtiger als die Tonhöhe. Er schrieb in seiner Harmonielehre „der Ton macht sich bemerkbar durch die Klangfarbe, deren eine Dimension die Klanghöhe ist“. Aus der Perspektive der Gehirnforschung bildet der Begriff 'Klang-Farbe' ebenso wie der Begriff 'Farb-Ton' eine Brücke zwischen Gehörtem (Klang) und Gesehenem (Farbe). Die Kopplung zu Emotionen hat der Psychologe Wilhelm Wundt in seinem Buch 'Grundzüge der physiologischen Psychologie' [92] als 'System der Klanggefühle' beschrieben, mit einer Polarität zwischen großer Klangstärke (energischer Gefühlston) und geringer Klangstärke (sanfter Gefühlston), Erregung und Beruhigung, Lust und Unlust bzw. Lösung und Spannung.

### Präferenzen für bestimmte Musikinstrumente

Im Rahmen unserer Langzeitstudien gelang es mittlerweile für verschiedene zeitlich stabile Wahrnehmungsformen neurologische Korrelate zu identifizieren, wobei die Balance zwischen rechts-hemisphärisch-klangfarbenbezogenen und linkshemisphärisch-grundtonbezogenen Prozessen offenbar eine entscheidende Rolle spielt [76]. Darüber hinaus zeigte sich, dass die Hörweise auch der lernbedingten Plastizität unterliegt, wobei musikalisches Training häufig eine Verschiebung von einer konkret-spektralen hin zu einer eher abstrakt-grundtonbezogenen Wahrnehmung bewirkt [93, 94]. Die perzeptiv, strukturell und funktionell erfassten individuellen neuro-auditorischen Profile erlaubten es außerdem zuverlässig Präferenzen für bestimmte Musikinstrumente und Musikstile abzuleiten [95, 96]. Grundtonhörer bevorzugen oft Musikinstrumente, die kurze, scharfe, oder impulsive Töne produzieren (Schlagzeug, Gitarre, Klavier, Trompete, Querflöte und hohe Soloinstrumente) und neigen darüber hinaus zu virtuoser, impulsiver, zeitlich synchroner Spielweise. Obertonhörer bevorzugen hingegen in der Regel Musikinstrumente, die länger ausgehaltene Töne mit charakteristischen Klangfarben oder Formanten im Spektrum produzieren (Streich-, Blech- und Holzblasinstrumente in tieferen Lagen, Orgel oder Gesang).

### Klinische Relevanz der Klangwahrnehmungsforschung

Während die frühen Untersuchungen vorwiegend auf Unterschiede zwischen Profi-, Amateur- und

Nichtmusikern fokussierten, zeigte sich zunehmend auch die klinische Relevanz des von mir entwickelten Forschungsansatzes. Dies wird besonders in zwei Projekten deutlich:

- Bei hörgeschädigten Orchestermusikern, Rockmusikern und Nichtmusikern untersuchten wir die neuronalen Korrelate von Tinnitus und Geräuschempfindlichkeit. Tinnitus-Patienten ließen eine systematische Reduktion des Volumens an grauer Substanz um ca. 60 % im Bereich des posteromedialen Abschnitts der vordersten Heschlschen Querwindung erkennen [81]. Interessanterweise zeigten betroffene Musiker im Vergleich zu Nichtmusikern eine weitaus geringere Gefährdung und emotionale Belastung sowie ein reduziertes Risiko für die Chronifizierung der Erkrankung, sodass insgesamt von einem 'protektiven Effekt' des Musizierens ausgegangen werden kann.
- Probanden mit dem genetischen Defekt 'Williams-Beuren-Syndrom' (WBS) zeigen eine ganz besondere Affinität zu Musik und Alltagsgeräuschen. Diese Probanden weisen aufgrund einer Mutation auf Chromosom 7 ein besonderes neuropsychologisches Profil auf, bei welchem ausgeprägte Schwächen in der logisch-räumlichen Domäne und psychomotorische Defizite mit charakteristischen Stärken im musikalisch-sprachlichen Bereich einhergehen. Bereits in der frühen Kindheit sind WBS-Betroffene meist begeistert von stark rhythmusbetonten Musikrichtungen wie Schlagern, Volksmusik, Country und Rock. Bei den in unserem Projekt durchgeführten MEG- und fMRT-Messungen zeigte sich eine auffällige Linksasymmetrie der auditorischen Verarbeitung während des Hörens musikalischer Klänge, verbunden mit einer extremen, nahezu homogenen grundtonbezogenen Klangwahrnehmung [82]. Zudem wiesen die Heschl Gyri der WBS-Patienten eine charakteristische Größe und Faltung ('Gyrierung') auf und waren wie bei Profimusikern oft verdoppelt oder verdreifacht. Da WBS-Patienten aufgrund psychomotorischer Defizite nicht in der Lage sind am normalen Musikunterricht teilzunehmen, lassen sich diese neurologischen Resultate als genetisches Modell für Musikalität interpretieren.

### Audio- und Neuroplastizität des musikalischen Lernens

Seit 2009 führte die Heidelberger AG 'Musik und Gehirn' zwei umfassende Längsschnittstudien zur Neuroplastizität des musikalischen Lernens durch. Vorrangiges Ziel war die Aufklärung von Mechanismen plastischer Reife- und musikalischer Lernpro-

zesse auf der Ebene des beobachtbaren Verhaltens und der diesem Verhalten zu Grunde liegenden Gehirnfunktionen. Zum einen handelt es sich um die vom BMBF geförderte Studie „AMseL: Audio- und Neuroplastizität des musikalischen Lernens“ (Laufzeit 2009–2015), welche als Verbundprojekt mit der Universität Graz (PD Dr. A. Seither-Preisler) konzipiert wurde und mit dem von der DFG geförderten Projekt „Plastizität des neuro-auditorischen Netzwerks bei musizierenden Jugendlichen“ fortgesetzt werden konnte (Laufzeit 2016–2019). Die AMseL-Studie ist Teil des deutschen BMBF-Begleitforschungsprogramms zu dem musikpädagogischen Großprogramm „Jedem Kind ein Instrument (JeKi)“ [97] an dem bisher über 60.000 Grundschulkindern aus dem Raum Nordrhein-Westfalen und Hamburg teilgenommen haben. Ziel des AMseL-Projekts ist es, systematisch zu untersuchen, wie sich regelmäßiges Musizieren im Rahmen von privatem Instrumentalunterricht und schulischem JeKi-Unterricht auf folgende Bereiche auswirkt: (a) Morphologie des Hörkortex, (b) funktionelle Gehirnakтивierung durch musikalische Klänge, (c) Sensibilität des Gehörs (Unterscheidung von Tonhöhen, Klangfarben, Tonlängen, Lautheit, Melodien und Rhythmen), (d) allgemeine kognitive Fähigkeiten (Intelligenz, Kreativität, Aufmerksamkeit, Lesen, Rechtschreiben, Rechnen), (e) Lern- und Entwicklungsauffälligkeiten (Aufmerksamkeitsstörungen, Hyperaktivität, Impulsivität, Lese-Rechtschreibschwäche). Im Fokus der Längsschnitterhebungen stehen das Zusammenwirken von musikalischem Potential (Begabung), entwicklungsbedingter Reifung und trainingsbedingter Plastizität von relevanten Hirnstrukturen und -funktionen sowie mögliche Transfereffekte in nicht-auditive Domänen. Dafür wurden insgesamt 220 wenig und viel musizierende Kinder im Alter von 7–17 Jahren in 4 Erhebungswellen im Abstand von jeweils 1–3 Jahren hinsichtlich ihres neurologischen, hörakustischen, musikalischen und allgemein-kognitiven Entwicklungsstandes untersucht. Zum ersten Messzeitpunkt waren die Teilnehmer alle Zweit- oder Drittklässler (Alter 7–9 Jahre), zum derzeit abgeschlossenen vierten Messzeitpunkt sind sie 15–17 Jahre alt. Es ist geplant, ab 2019 mit allen Probanden eine weitere, fünfte Wiederholungsmessung im jungen Erwachsenenalter durchzuführen. Damit liegt ein einzigartiges Probandenkollektiv vor, an dem die Wechselwirkung veranlagter und entwicklungsbedingter Faktoren systematisch im Verlauf vom Grundschulzeitalter bis zum Erwachsenenwerden untersucht werden kann. Die Messungen fanden vorwiegend in der Heidelberger Kopfklinik statt. Dazu wurden musizierende Kinder aus den am Forschungsschwerpunkt mitwirkenden JeKi-Schu-

len aus Hamburg und Nordrhein-Westfalen sowie Kontrollkinder nach Heidelberg eingeladen. Die Messungen erfolgten im Rahmen von zweitägigen Mess-Wochenenden in Kleingruppen von jeweils ca. 5–10 Teilnehmern. Insgesamt fanden im Rahmen der Studie bisher 99 Mess-Wochenenden statt. Um zu gewährleisten, dass die Abstände zwischen den beiden Verlaufsmessungen über die Gruppen hinweg vergleichbar sind, wurden die Teilnehmer in etwa in chronologisch gleicher Reihenfolge einbestellt. Die kernspintomographischen Messungen (MRT, fMRT) wurden dabei jeweils am Freitagnachmittag / -abend am Forschungsscanner der Neuroradiologischen Klinik der Heidelberger Universitätsklinik durchgeführt, die magnetencephalographischen Messungen (MEG) am darauffolgenden Samstag im Labor der Sektion Biomagnetismus. Ausserdem gab es an beiden Tagen hörakustische und psychologische Testungen, Tests zur musikalischen Begabung, Fragebogenerhebungen, und seit der 4. Messreihe zusätzlich eine Testbatterie zur Erhebung sprachlicher Fähigkeiten. Die Sprachfähigkeit wurde in Form von Perzeptionstests durchgeführt, die Sprachmaterial beinhalten, welches für die Probanden nicht verständlich ist, um deren Begabung und Potential zu messen. Dabei wurden, ähnlich wie bei den Musiktests, Sprachen ausgewählt, welche sich rhythmisch, basierend auf linguistischen Kategorien, unterscheiden. Darüber hinaus fanden auch Tonsprachen Verwendung [98].

Die Ergebnisse der ersten beiden Messphasen des AMseL-Projekts [83–85] zeigen erstmals, dass es im rechten Hörkortex stabile neuroanatomische Marker für Musikalität gibt, welche bereits vor dem Beginn des formalen Musikunterrichts vorliegen und zu einem hohen Grad vorhersagen, ob und wie viel Zeit ein Kind in das Erlernen eines Instruments investieren wird. Je günstiger die neuroanatomischen Voraussetzungen sind, desto mehr Interesse zeigen Kinder in der Regel an musikalischen Aktivitäten. Daher sind die identifizierten neurologischen Merkmale als Ausdruck besonderer musikalischer Begabung oder Musikaffinität zu interpretieren. Andererseits konnte nachgewiesen werden, dass neben der Begabung auch das musikalische Üben eine wesentliche Rolle spielt. Je mehr die Kinder musizierten, desto rascher vollzog sich die biologische Reifung der hörbezogenen Gehirnfunktionen, da diese plastisch auf die neuen Lernerfahrungen reagierten. Dies schlug sich auch in entsprechend deutlichen Vorteilen musizierender Kinder bei der Sprach- und Musikwahrnehmung, bei Aufmerksamkeitsleistungen und im Lese-Rechtschreibbereich nieder. Umgekehrt konnte gezeigt werden, dass bei entwicklungsauffälligen Kindern mit AD(H)S [83] oder Legasthenie [80]

sowohl die anatomischen Merkmale der Hörrinde (Heschl Gyri und Plana temporalia) als auch die auditorisch evozierten Antworten der links- und rechtshemisphärischen Hörareale verändert sind. Dies erklärt das in der Literatur beschriebene Phänomen, dass auditive Verarbeitungs- und Wahrnehmungsstörungen (AVWS) häufig gemeinsam mit AD(H)S [99] und Legasthenie [100] einhergehen. Die Ergebnisse der AMseL-Studie lassen eindeutig darauf schließen, dass neurologisch bedingte Probleme in der Hörverarbeitung Folgeprobleme im Bereich der auditiven Aufmerksamkeit und der Lese-Rechtschreibkompetenz nach sich ziehen, so dass es sich lohnt, therapeutisch bereits auf der Ebene der elementaren Hörwahrnehmung anzusetzen. Dieser Weg wird beim Training legasthener Kinder bereits vereinzelt erfolgreich beschritten, während er im Bereich der AD(H)S-Therapie bisher aufgrund fehlender wissenschaftlicher Studien noch nicht in Betracht gezogen wurde. Besonders interessant ist, dass die untersuchten AD(H)S-Kinder und Legasthener einen neurologischen Entwicklungsrückstand eben jener Gehirnfunktionen aufwiesen, welche bei Musizierenden besonders gut ausgebildet waren. Daher ist es naheliegend, diesen Problemen mit frühem Musizieren zu begegnen. Die wesentlichste Chance, die diese Forschungsergebnisse eröffnen, liegt aber wohl in einer objektiven neuro-auditiven Frühdiagnostik der Prädiktoren von AD(H)S und Legasthenie, welche noch vor Schuleintritt Kinder mit besonderem auditivem Trainingsbedarf identifizieren und so das Risiko für spätere Lernprobleme senken kann. Die bereits publizierten Ergebnisse zeigen, dass es allein mit Hilfe bestimmter neurologischer Marker der Hörrinde möglich ist, unauffällige Kinder von AD(H)S-Kindern mit einer Sicherheit (d. h. in Übereinstimmung mit ärztlichen bzw. psychologischen Diagnosen) von etwa 90 % zu unterscheiden. Zudem zeigen aktuelle Ergebnisse [80], dass es sogar möglich ist, auf dieser Basis eine präzise Differenzialdiagnostik für die drei Störungsbilder ADHS (mit Hyperaktivität), ADS (reine Aufmerksamkeitsstörung) und Legasthenie zu erreichen, deren Genauigkeit ähnlich hoch ist. Konkret ließen sich – unter zusätzlicher Einbeziehung einfacher Hörtests – in unserer Stichprobe die Störungsbilder mit folgender Präzision voneinander abgrenzen: Legasthenie vs. ADHS: 98%; Legasthenie vs. ADS: 91%; ADHS vs. ADS: 89%. Bedenkt man, dass auch ärztliche Diagnosen, die hier die Referenz bildeten, nicht unfehlbar sind, so ist diese Trefferquote extrem hoch. Dies lässt darauf schließen, dass es mit Hilfe unserer langjährig entwickelten neurologischen Analysemethoden prinzipiell möglich ist, die genannten Störungsbilder nicht nur objektiv, sondern auch sehr valide zu diagnostizieren.

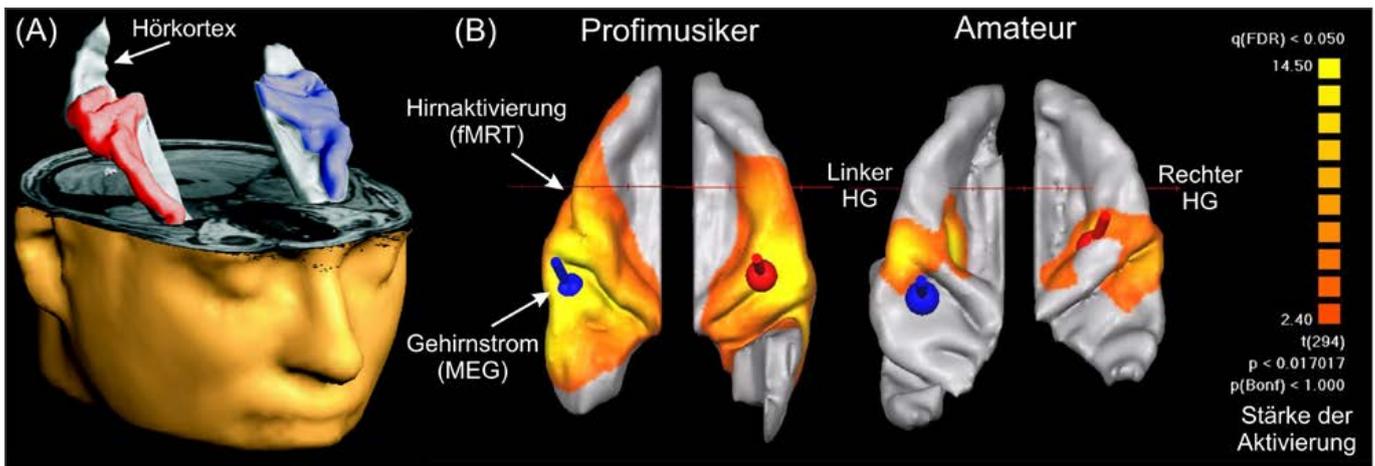


Abb. 2: (A) 3D-Rekonstruktionen des rechten und linken Hörkortex eines Pianisten. (B) Darstellung der fMRT-Aktivität (gelb) und Lokalisation der im MEG gemessenen auditorisch evozierten Felder (roter und blauer Dipol) eines Profimusikers und eines Amateurs beim Hören von Instrumentalklänge und komplexen harmonischen Tönen.

### Auditorische Netzwerke des absoluten und relativen Gehörs

Zum anderen wurde im Rahmen eines vom Schweizer Nationalfond (SNF) und der DFG geförderten Langzeitstudie mit dem Titel „Auditorische Plastizität des erwachsenen musikalischen Gehirns“ in Kooperation mit dem Unispital Basel (PD Dr. M. Blatow), der Musikakademie Basel (Prof. E. Hofmann, Musikhochschule Basel und Prof. H.-P. Weber, Schola Cantorum Basiliensis) und der Universität Heidelberg durchgeführt. Hierfür wurden 30 Musikstudenten im Verlauf ihres Studiums in drei Erhebungswellen neurologisch, hörakustisch und musikalisch untersucht. Zum Vergleich wurde eine bezüglich Alter, Geschlecht und Musikalität parallelisierte Gruppe von 30 Medizinstudenten hinzugezogen. Zum Einsatz kamen neurophysiologische (MEG), neuroradiologische (fMRT), Diffusion Tensor Imaging (DTI), resting-state MRT (fcMRT) und psychoakustische Messungen. Ein besonderer Fokus der Studie lag dabei auf der Entwicklung des relativen Gehörs während des Musikstudiums. Beim relativen Gehör kommt es im Gegensatz zum absoluten Gehör auf die Fähigkeit an, musikalische Intervalle korrekt zu erkennen und bezeichnen zu können. Die ersten Ergebnisse wurden auf der Neuromusic-V Konferenz 2014 in Dijon sowie der Human Brain Mapping Konferenz 2015 in Hawaii vorgestellt und bestätigen zunächst eine spezifische Kongruenz der im fMRT und MEG gemessenen Schwerpunkttaktivierungen auditorischer Areale (siehe Abb. 2) in Übereinstimmung mit anderen Studien [101,102]. Die MEG-Daten ermöglichten es darüberhinaus erstmals, die zeitliche Hierarchie der beteiligten primären, sekundären und über den auditorischen Kortex hinausgehenden kognitiven Verarbeitungsprozesse abzuleiten. Dabei zeigten sich mittlerweile

deutliche Tendenzen, dass sich die Entwicklung des relativen Gehörs in linkshemisphärischen Netzwerken zwischen auditorischem Kortex und dem Intraparietalen Sulcus (IPS) abbildet, während beim absoluten Hören ein spezifisches rechtshemisphärisches Netzwerk involviert ist, deren primäre auditorische, sensomotorische und sprachliche Areale synchron verschaltet sind [79].

### Individuelle neuro-auditorische Profile

Ein wesentlicher Aspekt des beschriebenen Forschungsansatzes der Heidelberger AG 'Musik und Gehirn' fokussiert auf interindividuelle Unterschiede in der elementaren Hörverarbeitung, der subjektiven Klangwahrnehmung, sowie deren Verarbeitung im Gehirn. Auf der einen Seite des Spektrums stehen Personen mit außerordentlicher Expertise - also Profimusiker - auf der anderen Seite Menschen mit Wahrnehmungsdefiziten (auditive Verarbeitungs- und Wahrnehmungsstörungen / AVWS, Tinnitus, Amusie etc.). Eine Gegenüberstellung der Hörprofile, der hirnanatomischen Merkmale und der neuronalen Aktivierungsmuster dieser besonderen Gruppen mit denen von normalhörenden Laien, lässt erstmals klare Aussagen zum Verhältnis von Anlage und Umwelt, sowie zum Ausmaß möglicher trainingsbedingter neuroplastischer Veränderungen zu. Hieraus ergeben sich wichtige pädagogische und klinisch-therapeutische Implikationen. Die erhebliche strukturelle Variabilität der Heschlschen Querwindungen zeigt sich erst nach der 3D-Rekonstruktion der Oberflächenstruktur, in Übereinstimmung mit zytoarchitektonischen Studien [103,104]. Abbildung 3 (siehe folgende Seite) zeigt exemplarisch die anatomische Variabilität der auditorischen Subareale (Heschlsche Querwindung, Planum temporale, anteriorer supratemporaler Gyrus), die sich in ihrer Größe,

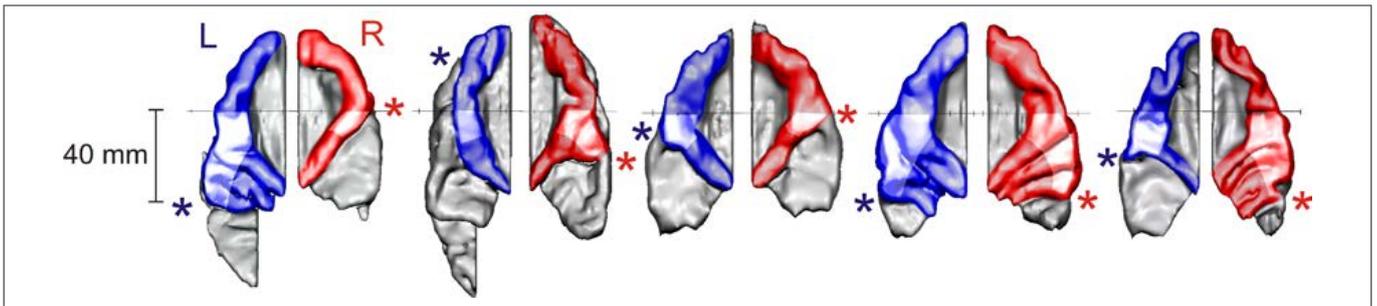


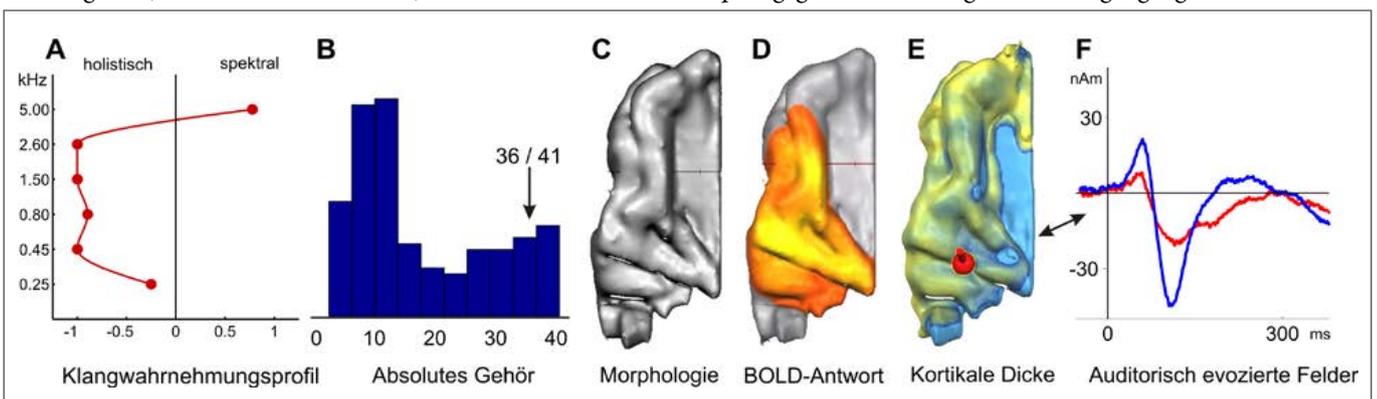
Abb. 3: Fünf individuelle 3D-Rekonstruktionen des rechten und linken Hörkortex (von links nach rechts: Schlagzeuger (25 J.), Kind mit LRS (8 J.), Nichtmusikerin (9 J.), musikalisch hochbegabter Amateurmusiker (48 J.), Konzert-Organist (85 J.)). Die Heschlschen Querwindungen im Zentrum des Hörkortex einschließlich dem anterior anschließenden supratemporalen Gyrus sind farbig gekennzeichnet. Das dahinterliegende Planum temporale ist grau dargestellt. Die Asterisken (\*) kennzeichnen das seitliche Ende des ersten vollständigen Heschl Sulcus, der die Heschlschen Querwindungen einschließlich potentieller Duplikaturen vom dahinter liegenden Planum temporale trennt.

Rechts-Links-Asymmetrie, Ausmaß der Gyrierung (Gyrifizierungsfaktor, [50]), Position, sowie Neigungswinkel individuell beträchtlich unterschieden. Auch die Stärke und Ausdehnung der auditorischen Aktivierungsmuster richten sich in gewissen Grenzen nach der Form der Heschlschen Querwindungen [79, 105–107]. Es zeigte sich nach der Auswertung der individuellen Gyrierung, Form und Größe der Heschlschen Querwindungen immer wieder, dass es einen direkten Zusammenhang zwischen neuroanatomischen, neurofunktionellen und perceptiven Merkmalen gibt [76, 77, 79, 108]. So spiegelt sich die Asymmetrie des Volumens an grauer Substanz zwischen den tonhöhenverarbeitenden Arealen des rechten und linken Hörkortex in der Art der subjektiven Klangwahrnehmung wider. Darüber hinaus zeigte sich, dass bestimmte perceptive Merkmale extrem großen Schwankungen unterliegen. So variiert die Frequenzunterschiedsschwelle, d.h. die Fähigkeit, die Tonhöhe zweier nacheinander gespiel-

ter Töne zu unterscheiden, von 2–3 Halbtönen bei einigen Nichtmusikern und Tinnituspatienten bis hin zu nur 1.3 Cent (= ca. 1/80 Halbtone) bei einer Solo-Geigerin eines Symphonieorchesters. Die mit unterschiedlichen neurologischen und behavioralen Verfahren gewonnenen Daten lassen sich allgemein zu einem individuellen 'neurologisch-perzeptiven Gesamtprofil' zusammenfassen. Abbildung 4 zeigt am Beispiel einer Dirigentin ein spezifisches individuelles 'neuro-auditorisches Profil'.

Inwieweit eine derartige anatomische und funktionelle Variabilität auch in anderen Bereichen des Gehirns zu finden sein könnte, ist bislang weitgehend unerforscht. Einige Pilotstudien unserer Arbeitsgruppe weisen darauf hin, dass die charakteristischen anatomischen Merkmale übergreifend im ganzen Gehirn zu finden sein müssten. Abbildung 5 zeigt als Beispiel verschiedene hirnanatomische Merkmale von künstlerisch (Abb. 5, A), motorisch (B) und musikalisch und kognitiv (C) hochbegabten Jugend-

Abb. 4: Neuro-auditorisches Gesamtprofil einer Dirigentin. (A) Klangwahrnehmungsprofil (Oberton-Grundtontest, Schneider et al., 2005). (B) Graduelle Ausprägung des absoluten Gehörs (Wengenroth et al., 2013). (C) Morphologie des Hörkortex. (D) fMRT-Aktivierung (BOLD-Antwort) beim Hören von Klängen. (E) Kortikale Dicke [109] und Lokalisierung des MEG-Dipols (rote Kugel). (F) Zeitabhängigkeit der auditorisch evozierten Antworten der rechten (rote Linie) und der linken (blaue Linie) Hemisphäre beim Hören von Instrumentalklängen. Die dargestellten individuellen Charakteristika der neurologischen und testpsychologischen Komponenten erlauben u. a. Prognosen, welches Musikinstrument, welcher Musikstil und welche pädagogische Lernstrategie besonders gut geeignet sein könnten.



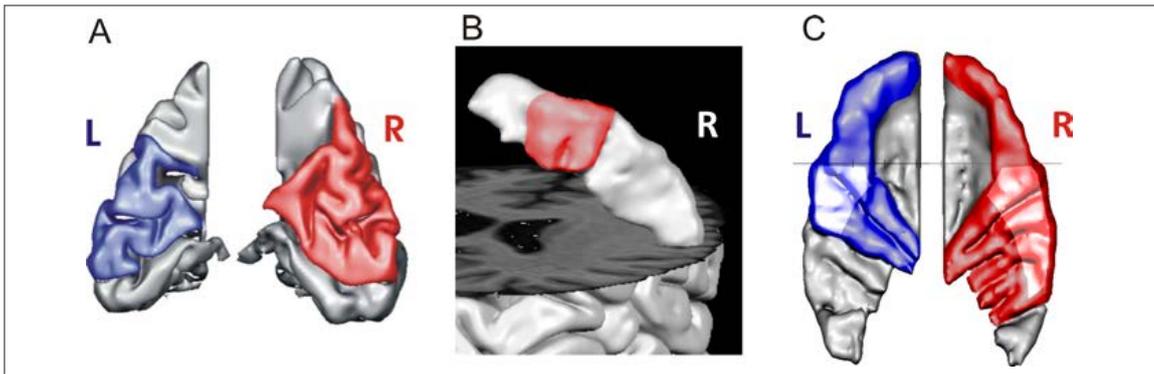


Abb. 5: Beispiele für charakteristische morphologische Profile in der Sehrinde, der Zentralfurche und dem Hörkortex hochbegabter Jugendlicher. (A) segmentierter visueller Kortex; farbig markiert ist der aufgeklappte Bereich zwischen Sulcus calcarinus und Sulcus parieto-occipitalis. (B) Segmentierter rechter Handknopf, Ansicht von hinten auf den präzentralen Gyrus. (C) Heschlsche Querwindungen; Aufsicht von oben

lichen. In allen Fällen zeigen sich als übergreifendes Muster diverse Mehrfach- oder Multigyrierungen, sei es bezogen auf die Auffächerung des Sulcus calcarinus im primären visuellen Kortex (A), auf das Handknopf-Areal im präzentralen Gyrus (B) oder die Häufung von Duplikaturen im Hörkortex (C). Allein aus klinischer Sicht wäre es hochgradig relevant, solche individuelle Besonderheiten zu kennen, um diese z. B. im Rahmen der prächirurgischen Diagnostik vor operativen Eingriffen berücksichtigen zu können [110].

Dies wirft die Frage auf, ob es sich um Einzelfälle handelt oder ob es typische Konstellationen gibt, bei denen beispielsweise eine Multigyrierung der Heschlschen Querwindung mit entsprechenden Multigyrierungen motorischer, sprachlicher, präfrontaler oder/und visueller Areale zusammenhängt. In weiterführenden Studien soll untersucht werden, ob es übergreifende architektonische bzw. phänotypologische Merkmale im Aufbau des menschlichen Gehirns gibt, und – falls ja – in welchem Zusammenhang diese zu speziellen Fähigkeiten, Hochbegabungen oder kognitiven Defiziten stehen. Sollte es möglich sein, von den Eigenschaften eines speziellen Gehirnbereichs (z. B. des Hörkortex) auf andere Gehirnbereiche zurückzuschließen und damit auf der Basis von individuellen auditorischen Fähigkeiten auf sprachliche, visuell-räumliche oder numerisch-mathematische Potentiale zu schließen, könnten in Zukunft wichtige neue Zusammenhänge zwischen spezifischen Besonderheiten und globalen, modalitäts-übergreifenden, persönlichkeitspezifischen Merkmalen entlarvt werden.

### Neurokognitive Modelle individueller Begabungs- und Kompetenzprofile

Die anhand der Verlaufsdaten mit musizierenden Kindern und Musikstudenten gefundenen Zusammenhänge führten zur Erstellung eines neurokognitiven Modells der individuellen Reife- und Lernprozesse

[83, 111], welches deutlich weitreichendere Aussagen ermöglicht als es bisher auf der Ebene reiner Verhaltensbeobachtungen und psychologischer Tests möglich war. Das in der Neuropädagogik weit verbreitete Modell des trainingsbedingten Lernerfolgs geht davon aus, dass dieser in erster Linie durch langfristiges, zielgerichtetes Üben (Expertise durch ‘deliberate practice’, [112]) zustande kommt. Neurophysiologisch bildet sich die Wirkung der ‘deliberate practice’ in unseren Längsschnittstudien als beschleunigter Reifeprozess der Hörfunktionen als Folge intensiven Musizierens ab. Das Ausmaß der natürlichen Latenzverkürzung der im MEG gemessenen evozierten Antwortkomponenten mit steigendem Lebensalter hängt außerdem linear von der Intensität des musikalischen Übeverhaltens ab. Die Ergebnisse der AMseL-Studie zeigen darüber hinaus, dass im Hörkortex auch zuverlässige neuroanatomische Marker für musikalische Begabung existieren, welche ihrerseits Einfluss auf das Lernverhalten nehmen [49, 50, 73]. Solche morphologischen Merkmale liegen bereits vor dem Beginn des formalen Musikunterrichts stabil vor und sagen zu einem hohen Grad vorher, wie viel Zeit ein Kind in das Erlernen eines Instruments investieren wird [83]. Je günstiger die neuroanatomischen Voraussetzungen in der Hörrinde sind, desto mehr Interesse zeigen die Kinder in der Regel an musikalischen Aktivitäten. Anders als in bisherigen Begabungsmodellen [113–115] ist die Motivation, welche die Intensität zielgerichteten Übens bestimmt, hier kein allgemeines Persönlichkeitsmerkmal, sondern hängt ihrerseits von der zugrundeliegenden Begabung in einem bestimmten Bereich ab [116]. Aufgrund von regressionsanalytischen Berechnungen unserer Daten konnte die Eigenmotivation zu musizieren (häusliche Übeintensität) etwa zu 60 % durch neuroanatomisch vorgegebene und zu 40 % durch mittels Fragebögen erhobene Umweltfaktoren vorhergesagt werden.

In diesem Modell wird davon ausgegangen, dass die

Pädagogik auf die verschiedenen Ebenen Einfluss nehmen kann und so die lerninduzierten Entwicklungsprozesse fördern oder unter ungünstigen Umständen auch hemmen kann. Auf unterster Ebene gilt es, latente Begabungen möglichst frühzeitig zu erkennen. Wichtige Hinweise können Beobachtungen liefern, womit sich ein Kind von sich aus besonders gern und ausdauernd beschäftigt (intrinsische Motivation, [117]). Mit steigendem Lebensalter kann darauf aufbauend das konkrete Übeverhalten durch die Vermittlung von deklarativem und prozeduralem Wissen, also durch Theorie und Praxis, pädagogisch angeleitet und unterstützt werden. Dies sollte wiederum neuroplastische Lernvorgänge unterstützen und beschleunigen, mit dem Ziel, die bereits im Begabungsprofil latent angelegten Potentiale durch Expertise möglichst vollständig zur Geltung zu bringen. Als Konsequenz sollte es nicht so sehr darauf ankommen, alle Kinder in gleicher Weise möglichst früh und intensiv zu trainieren, sondern eher darauf, das individuelle Begabungsprofil (musikalisch, bildnerisch, sprachlich etc.) zu erkennen und gezielt zu fördern. Da sich der Lernerfolg und das Ausmaß an Neuroplastizität vermutlich direkt proportional zum veranlagten Potential verhalten, erscheint es zielführend, pädagogisch an jenen Punkten anzusetzen, an denen die stärksten Begabungen erkennbar sind und davon auszugehen, dass eher defizitäre Bereiche von dieser Förderung mit profitieren [84].

Die für den auditorischen Bereich gefundenen Zusammenhänge zwischen Struktur, Funktion und Wahrnehmung sollten prinzipiell auch auf weitere Systeme, wie sensomotorische, räumlich-visuelle, sprachliche oder multisensorische Netzwerke übertragbar sein. Daher ist es ein vielversprechendes Forschungsziel, die im Rahmen der Musikalitätsforschung entwickelte Methodik auch auf andere Bereiche, wie künstlerische, tänzerische, sportliche, sprachliche oder mathematische Begabungen zu übertragen. Dies würde die Möglichkeit eröffnen, zukünftig auf neurologischer Basis mehrdimensionale individuelle Begabungs- und Kompetenzprofile zu erstellen.

### Literatur

- [1] Münte, T. F.; Altenmüller, E.; Jäncke, L.: The musician's brain as a model for neuroplasticity. *Nature Neuroscience Reviews* 3: S. 473–478, 2002.
- [2] Stewart, L.: Medicine, Music and the mind. Do musicians have different brains? *Clinical Medicine*, 8, S. 304–308, 2008.
- [3] Jäncke, L.: The plastic brain. *Restor Neurol Neurosci* 27(5): S. 521–538, 2009.
- [4] Zatorre, R. J.; Chen, J. L.; Penhune, V. B.: When the brain plays music. *Auditory-motor interac-*

- tions in music perception and production. Nature Reviews Neuroscience* 8: S. 547–558, 2007.
- [5] Strait, D. L.; Kraus, N.: Biological impact of auditory expertise across the life span: musicians as a model of auditory learning. *Hearing research*, 308, S. 109–121, 2014.
- [6] Gruhn, W.; Seither-Preisler, A. (Eds.): *Der musikalische Mensch: Evolution, Biologie und Pädagogik musikalischer Begabung* (Vol. 9). Georg Olms Verlag 2014.
- [7] Scheich, H.; Brechmann, A.; Brosch, M.; Buidinger, E.; Ohl, F. W.; Selezneva, E.; Wetzel, W.: Behavioral semantics of learning and cross-modal processing in auditory cortex: the semantic processor concept. *Hearing research*, 271(1), S. 3–15, 2011.
- [8] Overy, K.; Norton, A. C.; Cronin, K. T.; Gaab, N.; Alsop, D. C.; Winner, E.; Schlaug, G.: Imaging melody and rhythm processing in young children. *Neuroreport* 15: S. 1.723–1.726, 2004.
- [9] Kraus, N.; Chandrasekaran, B.: Music training for the development of auditory skills. *Nature Neuroscience Reviews*, 11, S. 599–605, 2010.
- [10] Norton, A.; Winner, E.; Cronin, K.; Overy, K.; Lee, D. J.; Schlaug, G.: Are there pre-existing neural, cognitive, or motoric markers for musical ability? *Brain and Cognition* 59: S. 124–134, 2005.
- [11] Overy, K.; Molnar-Szakacs, I.: Being together in time: musical experience and the mirror neuron system. 2009.
- [12] Jentschke, S.; Koelsch, S.: Musical training modulates the development of syntax processing in children. *NeuroImage*, 47(2), S. 735–744, 2009.
- [13] Jabusch, H. C.; Alpers, H.; Kopiez, R.; Vauth, H., Altenmüller, E.: The influence of practice on the development of motor skills in pianists: a longitudinal study in a selected motor task. *Human movement science*, 28(1), S. 74–84, 2009.
- [14] Trainor, L. J.; Shahin, A. J.; Roberts, L. E.: Understanding the benefits of musical training. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1169(1), S. 133–142, 2009.
- [15] Moreno, S.; Bidelman, G. M.: Examining neural plasticity and cognitive benefit through the unique lens of musical training. *Hearing research*, 308, S. 84–97, 2014.
- [16] Schlaug, G.; Jäncke, L.; Huang, Y.; Steinmetz, H.: In vivo evidence of structural brain asymmetry in musicians. *Science* 267: S. 699–701, 1995.
- [17] Sluming, V.; Barrick, T.; Howard, M.; Cezayirli, E.; Mayes, A.; Roberts, N.: Voxel-based morphometry reveals increased gray matter density in Broca's area in male symphony orchestra musicians. *Neuroimage* 17: S. 1.613–1.622, 2002.
- [18] Gaser, C.; Schlaug, G.: Gray matter differences

- between musicians and nonmusicians. *Ann. N Y Acad. Sci.* 999: S. 514–517, 2003.
- [19] Zatorre, R. J.; Belin, P.; Penhune, V. B.: Structure and function of auditory cortex: music and speech. *Trends in cognitive sciences*, 6(1), S. 37–46, 2002.
- [20] Sluming, V.; Brooks, J.; Howard, M.; Downes, J.; Roberts, N.: Broca's area supports enhanced visuospatial cognition in musicians. *Journal of Neuroscience* 27(14): S. 3.799–3.806, 2007.
- [21] Baumann, S.; Meyer, M.; Jancke, L.: Enhancement of auditory-evoked potentials in musicians reflects an influence of expertise but not selective attention. *Journal of Cognitive Neuroscience* 20: S. 2.238–2.249, 2008.
- [22] Bermudez, P.; Lerch, J.P.; Evans, A. C.; Zatorre, R.J.: Neuroanatomical correlates of musicianship as revealed by cortical thickness and voxel-based morphometry. *Cerebral Cortex*, 19(7), S. 1.583–1.596, 2009.
- [23] Pantev, C.; Oostenveld, R.; Engelien, A.; Ross, B.; Roberts, L.E.; Hoke, M.: Increased auditory cortical representation in musicians. *Nature*, 392(6678), S. 811–814, 1998.
- [24] Pantev C.; Roberts, L.E.; Schulz, M.; Engelien, A.; Ross, B.: Timbre-specific enhancement of auditory cortical representations in musicians. *Neuroreport* 12: S. 921–937, 2001.
- [25] Münte, T. F., Kohlmetz, C., Nager, W., Altenmüller, E.: Neuroperception: Superior auditory spatial tuning in conductors. *Nature*, 409(6820), S. 580, 2001.
- [26] Shahin, A.; Roberts, L. E.; Trainor, L. J.: Enhancement of auditory cortical development by musical experience in children. *Neuroreport*, 15(12), S. 1.917–1.921, 2004.
- [27] Bengtsson, S. L.; Nagy, Z.; Skare, S.; Forsman, L.; Forssberg, H.; Ullén, F.: Extensive piano practicing has regionally specific effects on white matter development. *Nature neuroscience*, 8(9), S. 1.148–1.150, 2005.
- [28] Altenmüller, E.: Neurology of musical performance. *Clin Med* 8: S. 410–413, 2008.
- [29] Oechslin, M. S.; Imfeld, A.; Loenneker, T.; Meyer, M.; Jäncke, L.: The plasticity of the superior longitudinal fasciculus as a function of musical expertise: a diffusion tensor imaging study. *Frontiers in Human Neuroscience*, 3. 2009.
- [30] Halwani, G. F.; Loui, P.; Rüber, T.; Schlaug, G.: Effects of practice and experience on the arcuate fasciculus: comparing singers, instrumentalists, and non-musicians. *Frontiers in Psychology*, 2. 2011.
- [31] Pinho, A. L.; de Manzano, Ö.; Fransson, P.; Eriksson, H.; Ullén, F.: Connecting to create: expertise in musical improvisation is associated with increased functional connectivity between premotor and prefrontal areas. *The Journal of Neuroscience*, 34(18), S. 6.156–6.163, 2014.
- [32] Elmer, S.; Hänggi, J.; Jäncke, L.: Processing demands upon cognitive, linguistic, and articulatory functions promote grey matter plasticity in the adult multilingual brain: Insights from simultaneous interpreters. *Cortex*, 54, S. 179–189, 2014.
- [33] Elmer, S.; Rogenmoser, L.; Kühnis, J.; Jäncke, L.: Bridging the gap between perceptual and cognitive perspectives on absolute pitch. *The Journal of Neuroscience*, 35(1), S. 366–371, 2015.
- [34] Kraus, N.; Hornickel, J.; Strait, D. L.; Slater, J.; Thompson, E.: Engagement in community music classes sparks neuroplasticity and language development in children from disadvantaged backgrounds. *Frontiers in psychology*, 5. 2014.
- [35] Kraus, N.; Slater, J.; Thompson, E. C.; Hornickel, J.; Strait, D. L.; Nicol, T.; White-Schwoch, T.: Music enrichment programs improve the neural encoding of speech in at-risk children. *The Journal of Neuroscience*, 34(36), S. 11.913–11.918, 2014.
- [36] Strait, D. L.; Kraus, N.: Biological impact of auditory expertise across the life span: musicians as a model of auditory learning. *Hearing research*, 308, S. 109–121, 2014.
- [37] Ho, Y. C.; Cheung, M. C.; Chan, A. S.: Music training improves verbal but not visual memory: cross-sectional and longitudinal explorations in children. *Neuropsychology*, 17(3), S. 439, 2003.
- [38] Schumacher, R.: *Macht Mozart schlau. Die Förderung kognitiver Kompetenzen durch Musik.* BMBF, Berlin. 2006.
- [39] Jäncke, L.: *Macht Musik schlau. Neue Erkenntnisse aus den Neurowissenschaften und der kognitiven Psychologie.* Huber, Bern. 2008.
- [40] Rittelmeyer, C.: *Warum und wozu ästhetische Bildung. Über Transferwirkungen künstlerischer Tätigkeiten. Ein Forschungsüberblick.* Oberhausen. 2010.
- [41] Schellenberg, E. G.: Examining the association between music lessons and intelligence. *British Journal of Psychology*, 102(3), S. 283–302, 2011.
- [42] Corrigall, K. A.; Schellenberg, E. G.; Misura, N. M.: Music training, cognition, and personality. *Frontiers in psychology*, 4. 2013.
- [43] Ericsson, K. A.; Krampe, R. T.; Tesch-Römer, C.: The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance. *Psychological review*, 100(3), S. 363, 1993.
- [44] Mosing, M. A.; Madison, G.; Pedersen, N. L.; Kuja-Halkola, R.; Ullén, F.: Practice does not make perfect: no causal effect of music practice on music ability. *Psychological science*, 25(9),

- S. 1.795–1.803, 2014.
- [45] Pulli, K.; Karma, K.; Norio, R.; Sistonon, P.; Goring, H. H.; Jarvela, I.: Genome-wide linkage scan for loci of musical aptitude in Finnish families: evidence for a major locus at 4q22. *J. Med. Genet.* 45: S. 451–456, 2008.
- [46] Ukkola, L. T.; Onkamo, P.; Raijas, P.; Karma, K.; Järvelä, I.: Musical aptitude is associated with AVPR1A-haplotypes. *PLoS One*, 4(5), S. e5534, 2009.
- [47] Oikkonen, J.; Järvelä, I.: Genomics approaches to study musical aptitude. *Bioessays*, 36(11), S. 1.102–1.108, 2014.
- [48] Golestani, N.; Zatorre, R. J.: Learning new sounds of speech: Reallocation of neural substrates. *Neuroimage* 21(2): S. 494–506, 2004.
- [49] Golestani, N.; Molko, N.; Pallier, C.; Dehaene, S.; Le Bihan, D.: Brain structure predicts the learning of foreign speech sounds. *Cerebral Cortex* 17(3): S. 575–582, 2007.
- [50] Golestani, N.; Price, C. J.; Scott, S. K.: Born with an ear for dialects? Structural plasticity in the expert phonetician brain. *The Journal of Neuroscience*, 31(11), S. 4.213–4.220, 2011.
- [51] Cai, D. C.; Fonteijn, H.; Guadalupe, T.; Zwiers, M.; Wittfeld, K.; Teumer, A.; Hagoort, P.: A genome-wide search for quantitative trait loci affecting the cortical surface area and thickness of Heschl's gyrus. *Genes, Brain and Behavior*, 13(7), S. 675–685, 2014.
- [52] Ellis, R. J.; Bruijn, B.; Norton, A. C.; Winner, E.; Schlaug, G.: Training-mediated leftward asymmetries during music processing: a cross-sectional and longitudinal fMRI analysis. *Neuroimage*, 75, S. 97–107, 2013.
- [53] Moreno, S.; Marques, C.; Santos, A.; Santos, M.; Castro, S. L.; Besson, M.: Musical training influences linguistic abilities in 8-year-old children: more evidence for brain plasticity. *Cerebral Cortex*, 19(3), S. 712–723, 2009.
- [54] Hyde, K. L.; Lerch, J. P.; Norton, A.; Forgeard, M.; Winner, E.; Evans, A. C.; Schlaug, G.: Musical Training Shapes Structural Brain Development. *Journal of Neuroscience* 29(10): S. 3.019–3.025, 2009.
- [55] Strait, D. L.; O'Connell, S.; Parbery-Clark, A.; Kraus, N.: Musicians' enhanced neural differentiation of speech sounds arises early in life: developmental evidence from ages 3 to 30. *Cerebral Cortex*, 24(9), S. 2.512–2.521, 2014.
- [56] Chobert, J.; François, C.; Velay, J. L.; Besson, M.: Twelve months of active musical training in 8- to 10-year-old children enhances the preattentive processing of syllabic duration and voice onset time. *Cerebral Cortex*, 24(4), S. 956–967, 2014.
- [57] Slater, J.; Skoe, E.; Strait, D. L.; O'Connell, S.; Thompson, E.; Kraus, N.: Music training improves speech-in-noise perception: Longitudinal evidence from a community-based music program. *Behavioural brain research*, 291, S. 244–252, 2015.
- [58] Schlaug, G.; Norton, A.; Overy, K.; Winner, E.: Effects of music training on the child's brain and cognitive development. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1060(1), S. 219–230, 2005.
- [59] Schellenberg, E. G.: Long-term positive associations between music lessons and IQ. *Journal of Educational Psychology*, 98(2), S. 457, 2006.
- [60] Herdener, M.; Esposito, F.; di Salle, F.; Boller, C.; Hilti, C. C.; Habermeyer, B.; Cattapan-Ludewig, K.: Musical training induces functional plasticity in human hippocampus. *Journal of Neuroscience*, 30(4), S. 1.377–1.384, 2010.
- [61] Herdener, M.; Humbel, T.; Esposito, F.; Habermeyer, B.; Cattapan-Ludewig, K.; Seifritz, E.: Jazz drummers recruit language-specific areas for the processing of rhythmic structure. *Cerebral Cortex*, 24(3), S. 836–843, 2014.
- [62] Herholz, S. C.; Coffey, E. B.; Pantev, C.; Zatorre, R. J.: Dissociation of Neural Networks for Predisposition and for Training-Related Plasticity in Auditory-Motor Learning. *Cerebral Cortex*, 26(7), S. 3.125–3.134, 2015.
- [63] Giedd, J. N.; Blumenthal, J.; Jeffries, N. O.; Castellanos, F. X.; Liu, H.; Zijdenbos, A.; Rapoport, J. L.: Brain development during childhood and adolescence: a longitudinal MRI study. *Nature neuroscience*, 2(10), S. 861–863, 1999.
- [64] Blakemore, S. J.: Imaging brain development: the adolescent brain. *Neuroimage*, 61(2), S. 397–406, 2012.
- [65] Petanjek, Z.; Judaš, M.; Šimić, G.; Rašin, M. R.; Uylings, H. B.; Rakic, P.; Kostović, I.: Extraordinary neoteny of synaptic spines in the human prefrontal cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(32), S. 13.281–13.286, 2011.
- [66] Barnea-Goraly, N.; Menon, V.; Eckert, M.; Tamm, L.; Bammer, R.; Karchemskiy, A.; Reiss, A. L.: White matter development during childhood and adolescence: a cross-sectional diffusion tensor imaging study. *Cerebral cortex*, 15(12), S. 1.848–1.854, 2005.
- [67] Sowell, E. R.; Thompson, P. M.; Holmes, C. J.; Jernigan, T. L.; Toga, A. W.: In vivo evidence for post-adolescent brain maturation in frontal and striatal regions. *Nature neuroscience*, 2(10), S. 859–861, 1999.
- [68] Bonte, M.; Frost, M. A.; Rutten, S.; Ley, A.; Formisano, E.; Goebel, R.: Development from

- childhood to adulthood increases morphological and functional inter-individual variability in the right superior temporal cortex. *Neuroimage*, 83, S. 739–750, 2013.
- [69] Altenmüller, E.; Wiesendanger, M.; Kesselring, J.: *Music, motor control and the brain*. Oxford, New York: Oxford University Press. 2006.
- [70] Zatorre, R.J.; Chen, J.L.; Penhune, V. B.: When the brain plays music: auditory–motor interactions in music perception and production. *Nature reviews neuroscience*, 8(7), S. 547, 2007.
- [71] Rodriguez-Fornells, A.; Rojo, N.; Amengual, J. L.; Ripollés, P.; Altenmüller, E.; Münte, T. F.: The involvement of audio–motor coupling in the music-supported therapy applied to stroke patients. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1252(1), S. 282–293, 2012.
- [72] Skoe, E.; Kraus, N.: A little goes a long way: how the adult brain is shaped by musical training in childhood. *The Journal of Neuroscience*, 32(34), S. 11.507–11.510, 2012.
- [73] Zatorre, R.J.: Predispositions and plasticity in music and speech learning: neural correlates and implications. *Science*, 342(6158), S. 585–589, 2013.
- [74] Kanai, R.; Rees, G.: The structural basis of inter-individual differences in human behaviour and cognition. *Nature Reviews Neuroscience*, 12(4), S. 231–242, 2011.
- [75] Zatorre, R. J.; Fields, R. D.; Johansen-Berg, H. : Plasticity in gray and white: neuroimaging changes in brain structure during learning. *Nature neuroscience*, 15(4), S. 528–536, 2012.
- [76] Schneider, P.; Scherg, M.; Dosch, H. G.; Specht, H. J.; Gutschalk, A.; Rupp, A.: Morphology of Heschl's Gyrus reflects enhanced activation in the auditory cortex of musicians. *Nature Neuroscience* 5: S. 688–694, 2002.
- [77] Schneider, P.; Sluming, V.; Roberts, N.; Scherg, M.; Dosch, H. G.; Specht, H. J.; Bleeck, S.; Goebel, R.; Stippich, C.; Rupp, A.: Structural and functional asymmetry in lateral Heschl's gyrus predicts pitch perception preference. *Nature Neuroscience* 8: S. 1.241–1.247, 2005.
- [78] Schneider, P.; Wengenroth, M.: The neural basis of individual holistic and spectral sound perception. *Contemporary music review*, 28(3), S. 315–328, 2009.
- [79] Wengenroth, M.; Blatow, M.; Heinecke, A.; Reinhardt, J.; Stippich, C.; Hofmann, E.; Schneider, P.: Increased volume and function of right auditory cortex as a marker for absolute pitch. *Cerebral Cortex*, 24(5), S. 1.127–1.137, 2013.
- [80] Serrallach, B.; Gross, T.; Bernofs, V.; Engelmann, D.; Benner, J.; Brunner, M.; Wengenroth, M.; Seitz, A.; Parncutt, R.; Schneider, P.; Seither-Preisler, A.: Neural biomarkers of AD(H)D and dyslexia in the auditory cortex of children. *Frontiers in Neuroscience*, 2016.
- [81] Schneider, P.; Andermann, M.; Wengenroth, M.; Goebel, R.; Flor, H.; Rupp, A.; Diesch, E.: Reduced volume of Heschl's gyrus in tinnitus. *Neuroimage* 45: S. 927–939, 2009.
- [82] Wengenroth, M.; Blatow, M.; Bendszus, M.; Schneider, P.: Leftward lateralization of auditory cortex underlies holistic sound perception in Williams syndrome. *PLoS ONE* 5 (8): S. e12.326, 2010.
- [83] Seither-Preisler, A.; Parncutt, R.; Schneider, P.: Size and synchronization of auditory cortex promotes musical, literacy, and attentional skills in children. *The Journal of Neuroscience*, 34(33), S. 10.937–10.949, 2014.
- [84] Seither-Preisler, A.; Schneider, P.: Positive Effekte des Musizierens auf Wahrnehmung und Kognition aus neurowissenschaftlicher Perspektive. In G. Bernatzky & G. Kreutz (Eds.), *Musik in der Medizin – Chancen für Prävention, Therapie und Bildung*; Springer. S. 375–393, 2015.
- [85] Schneider, P.; Seither-Preisler, A.: Neurokognitive Korrelate von JeKi-bezogenem und außerschulischem Musizieren. Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg). *Ergebnisse des JeKi-Forschungsschwerpunktes (Empirische Bildungsforschung)*, Berlin, 2015.
- [86] Auerbach, S.: Zur Lokalisation des musikalischen Talentes im Gehirn und am Schädel. *Archives of Anatomy and Physiology*, 1906, S. 197–230; 1908, S. 31–8; 1911, S. 1–10; 1913 (Suppl), S. 89–96.
- [87] Critchley, M.; Henson, R.A. (eds): *Music and the Brain. The search for a morphological substrate in the brains of eminent persons including musicians: a historical review*. S. 255–281. Heinemann, London. 1977.
- [88] Gordon, E. E.: *Introduction to research and the psychology of music*. GIA, Chicago. 1998.
- [89] <http://www.musicandbrain.de>
- [90] Von Helmholtz, H.: *Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*. F. Vieweg und Sohn. 1863.
- [91] Schönberg, A.: *Harmonielehre* (Wien). 1911.
- [92] Wundt, W.M.: *Grundzüge de physiologischen Psychologie* (Vol. 1). W. Engelman. 1874.
- [93] Seither-Preisler, A.; Johnson, L.; Krumbholz, K.; Nobbe, A.; Patterson, R.; Seither, S.; Lütkenhöner, B.: Tone sequences with conflicting fundamental pitch and timbre changes are heard differently by musicians and nonmusicians. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception*

**PD Dr. rer. nat.****Peter Schneider**

Neurologische Klinik  
und Neuroradio-  
logische Klinik,  
Universitätsklinikum  
Heidelberg

**Jan Benner**

Neurologische Klinik  
und Neuroradio-  
logische Klinik,  
Universitätsklinikum  
Heidelberg

**Bettina Zeidler**

Neurologische Klinik  
und Neuroradio-  
logische Klinik,  
Universitätsklinikum  
Heidelberg; Uni-  
versität Hamburg,  
Institut für Musik-  
wissenschaft

**Markus Christiner**

Universität Wien,  
Institut für Sprach-  
wissenschaft

**Annemarie****Seither-Preisler**

Universität Graz,  
Institut für systema-  
tische Musikwissen-  
schaft

**Dorte Engelmann**

Neurologische Klinik  
und Neuroradio-  
logische Klinik,  
Universitätsklinikum  
Heidelberg

and Performance, 33(3), S. 743, 2007.

- [94] Seither-Preisler, A.; Johnson, L.; Seither, S.; Lütkenhöner, B.: The perception of dual aspect tone sequences changes with stimulus exposure. *Brain Research Journal*, 2(3), S. 125–148, 2008.
- [95] Schneider, P.; Sluming, V.; Roberts, N.; Bleeck, S.; Rupp, A.: Structural, functional and perceptual differences in Heschl's gyrus and Musical Instrument preference, *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1060: S. 387–394, 2005.
- [96] Gruhn, W.; Hofmann, E.; Schneider, P.: Grundtonhören und Obertonhören. *Hörtypen und ihre Instrumente. Üben und Musizieren*, 1(12), S. 1-7, 2012.
- [97] <http://www.jedemkind.de>
- [98] Christiner, M.; Reiterer, S. M.: MULT/AP multilingual aptitude test. Vienna: Christiner Questionnaires. 2017.
- [99] Riccio, C.A.; Cohen, M.J.; Garrison, T.; Smith, B.: Auditory processing measures: correlation with neuropsychological measures of attention, memory, and behavior. *Child Neuropsychol.*, 11, S. 363–372, 2005.
- [100] Hämäläinen, J. A.; Salminen, H. K.; Leppänen, P. H. T.: Basic auditory processing deficits in dyslexia: Systematic review of the behavioral and event related potential/field evidence. *J. Learn. Disabil.*, 46, S. 413–427, 2013.
- [101] Mukamel, R.; Gelbard, H.; Arieli, A.; Hasson, U.; Fried, I.; Malach, R.: Coupling between neuronal firing, field potentials, and fMRI in human auditory cortex. *Science*, 309(5.736), S. 951–954, 2005.
- [102] Hipp, J. F.; Siegel, M.: BOLD fMRI Correlation Reflects Frequency-Specific Neuronal Correlation. *Current Biology*. 2015.
- [103] Steinmetz, H.; Rademacher, J.; Huang, Y.; Hefter, H.; Zilles, K.; Thron, A.; Freund, H. J.: Cerebral Asymmetry: MR Planimetry of the Human Planum Temporale. *J. Comp. Assist. Tom.* 13: S. 996–1.005, 1989.
- [104] Rademacher, J.; Morosan, P.; Schormann, T.; Schleicher, A.; Werner, C.; Freund, H. J.; Zilles, K.: Probabilistic mapping and volume measurement of human primary auditory cortex. *Neuroimage*, 13(4), S. 669–683, 2001.
- [105] Warrier, C.; Wong, P.; Penhune, V.; Zatorre, R.; Parrish, T.; Abrams, D.; Kraus, N.: Relating structure to function: Heschl's gyrus and acoustic processing. *J. Neurosci* 29: S. 61–69, 2009.
- [106] Da Costa, S.; van der Zwaag, W.; Marques, J. P.; Frackowiak, R. S.; Clarke, S.; Saenz, M.: Human Primary Auditory Cortex Follows the Shape of Heschl's Gyrus. *J. Neurosci* 31, S. 14.067–14.075, 2011.
- [107] Benner, J.; Wengenroth, M.; Reinhardt, J.; Stippich, C.; Schneider, P.; Blatow, M.: Prevalence and function of Heschl's gyrus morphotypes in musicians. *Brain Structure and Function*, 222(8), S. 3.587–3.603, 2017.
- [108] Turker, S.; Reiterer, S. M.; Seither-Preisler, A.; Schneider, P.: „When music speaks”: Auditory cortex morphology as a neuroanatomical marker of language aptitude and musicality. *Frontiers in Psychology*, 8, S. 2.096, 2017.
- [109] Zoellner, S.; Benner, J.; Zeidler, B.; Goebel, R.; Heinecke, A.; Wengenroth, M.; Blatow, M.; Schneider, P.: Reduced cortical thickness in Heschl's gyrus as an in vivo marker for human primary auditory cortex. 2018. (Human Brain Mapping, in review).
- [110] Stippich, C.; Blatow, M.; Durst, A.; Dreyhaupt, J.; Sartor, K.: Global activation of primary motor cortex during voluntary movements in man. *NeuroImage* 34: S. 1.227–1.237, 2007.
- [111] Seither-Preisler, A.; Schneider, P.: Neurokognitive Aspekte musikalischer Begabung. In W. Gruhn & A. Seither-Preisler (Eds.), *Der musikalische Mensch: Evolution, Biologie und Pädagogik musikalischer Begabung*. Hildesheim: Olms. 2014.
- [112] Ericsson, K. A.; Krampe, R. T.; Tesch-Römer, C.: The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance. *Psychological review*, 100(3), S. 363, 1993.
- [113] Gagné, M.; Deci, E. L.: Self-determination theory and work motivation. *Journal of Organizational Behavior*, 26(4), S. 331–362, 2005.
- [114] Gembris, H.: Begabungsforschung und Begabungsförderung in der Musik. *Gegenwärtige Forschungssituation und aktuelle Entwicklungen in der Praxis. Individuelle Förderung multipler Begabungen: fachbezogene Förder- und Förderkonzepte*, S. 17–53, 2012.
- [115] Heller, K. A.; Hany, E. A.: Psychologische Modelle der Hochbegabtenförderung. *Psychologie des Lernens und der Instruktion*, Bd. 2, S. 477–513, 1996.
- [116] Winner, E.: The rage to master: The decisive role of talents in the visual arts. In K. A. Ericsson (Ed.), *The road to excellence. The acquisition of expert performance in the arts and sciences, sports, and games* (S. 271–301). Mahwah, NJ: Erlbaum. 1996.
- [117] Olbertz, F.: Hochbegabung, Wunderkinder und Inselbegabungen. In W. Gruhn & A. Seither-Preisler (Eds.), *Der musikalische Mensch: Evolution, Biologie und Pädagogik musikalischer Begabung*. Hildesheim: Olms. 2014 ■