

Peter Schneider

Neurowissenschaftliche Beiträge zur Wirkungsforschung in der Kulturellen Bildung

Neuronale Grundlagen der individuellen Klangwahrnehmung und das zerebrale Symphonieorchester

- Die musikalische Tonhöhe von harmonischen Klängen unterscheidet sich um bis zu drei oder vier Oktaven, wenn derselbe Klang unterschiedlichen Hörern vorgespielt wird. Anhand eines neuen, multimodalen neurowissenschaftlichen Ansatzes soll insbesondere die musikpädagogische und therapeutische Relevanz der neuronalen Forschung dargestellt werden. Im Mittelpunkt steht die Frage nach der Wechselwirkung zwischen Klangwahrnehmung und den zugrundeliegenden neuroanatomischen sowie physiologischen Merkmalen im Gehirn. Der Ansatz per se ist als transdisziplinärer neurowissenschaftlicher Ansatz besonders aussichtsreich, weil er Wahrnehmung, Neurophysiologie und Morphologie verbindet. Quer- und Längsschnittstudien mit musizierenden Kindern, MusikstudentInnen und ProfimusikerInnen sollen klären, inwieweit neuroplastische oder genetisch bedingte Eigenschaften des auditorischen Cortex als Prädiktor für das musikalische Lernen angesehen werden können. Beispielsweise folgt die Sitzordnung in einem modernen Symphonieorchester der Fähigkeit zur individuellen Tonwahrnehmung, die in der linken oder rechten Gehirnhälfte verankert ist. Die einwandfreie Identifizierung des Hörtyps würde den musikalischen Reifungsprozess erleichtern und zur natürlichen Entwicklung der Musikalität, der Wahl geeigneter Musikinstrumente, einer adäquaten Lernstrategie sowie der Entfaltung der eigenen musikalischen Sprache beitragen.

Welche musikpädagogischen Fragen können mit neurowissenschaftlichen Methoden bearbeitet werden?

Seit etwa zwanzig Jahren wird in vielfältiger Weise der Einfluss des neurologischen Wissens auf musikpädagogische und erziehungswissenschaftliche Fragen zum Teil kontrovers diskutiert. Einerseits geht es um die grundsätzliche Frage, welchen Beitrag die Erkenntnisse der Neurowissenschaften zur Verbesserung der Pädagogik bzw. Didaktik leisten („pädagogische Neurobiologie“), zweitens um spezielle Ratgeber zum „hirngerechten Lernen (brain based learning)“ und drittens um „neuropädagogisch-neurodidaktische“ Konzepte (vgl. Gruhn/Rauscher 2008, Roth 2011). Leider werden die vielfältigen Errungenschaften der Gehirnforschung oft zur unnötigen Polemisierung und zum Anfachen der Grabenkämpfe zwischen PädagogInnen und NeurologInnen missbraucht, etwa durch die Ansicht, die gesamte „Pädagogik und Didaktik könne schlicht durch Hirnforschung ersetzt werden“ (Spitzer 2003), welche zurecht von BildungsforscherInnen scharf kritisiert wird (vgl. Stern 2005). Die bisherigen unter „hirngerechtem Lernen“ bekannt gewordenen Lernmethoden (Superlearning, EduKinestetik, Brain Gym) basieren bislang nur teilweise oder unberechtigt auf neuro-

wissenschaftlichen Konzepten (vgl. Becker 2006). Umgekehrt wird die tatsächliche Relevanz der hemisphärenspezifischen Verarbeitung (vgl. Altenmüller/Gruhn 1997), der Rechts- bzw. Linkshändigkeit (vgl. Rösel-Tabken 2012) und der Subjektivität der auditorischen Verarbeitung (vgl. Schneider et al. 2009) in bisherigen neurodidaktischen Ansätzen weitgehend vernachlässigt. Meine eigenen aktuellen Forschungsprojekte zur neuronalen Basis der individuellen Klangwahrnehmung sollen exemplarisch darlegen, dass neurowissenschaftliche Forschungsansätze entscheidend dabei helfen können, derartige Fragen zu beantworten. Insbesondere sollen folgende musikpädagogisch relevanten Aspekte unserer Forschung näher betrachtet werden: (1) Welche Besonderheiten lassen sich im Gehirn von MusikerInnen nachweisen? (2) Wie wirken sich musikalische Begabung und regelmäßiges Musizieren auf die basale und komplexe auditorische Informationsverarbeitung aus, sei es auf die primäre Sensibilisierung des Gehörs oder im Sinne von Transfereffekten auf die Entwicklung allgemein kognitiver Fähigkeiten (Intelligenz, Kreativität, Aufmerksamkeit, Sprachfähigkeit)? Und (3) wie wirkt sich die subjektive Klangverarbeitung auf die Präferenz von Musikinstrumenten, die Präferenz von Musikstilen, die Klangvorstellung und das SchülerInnen-LehrerInnenverhältnis aus?

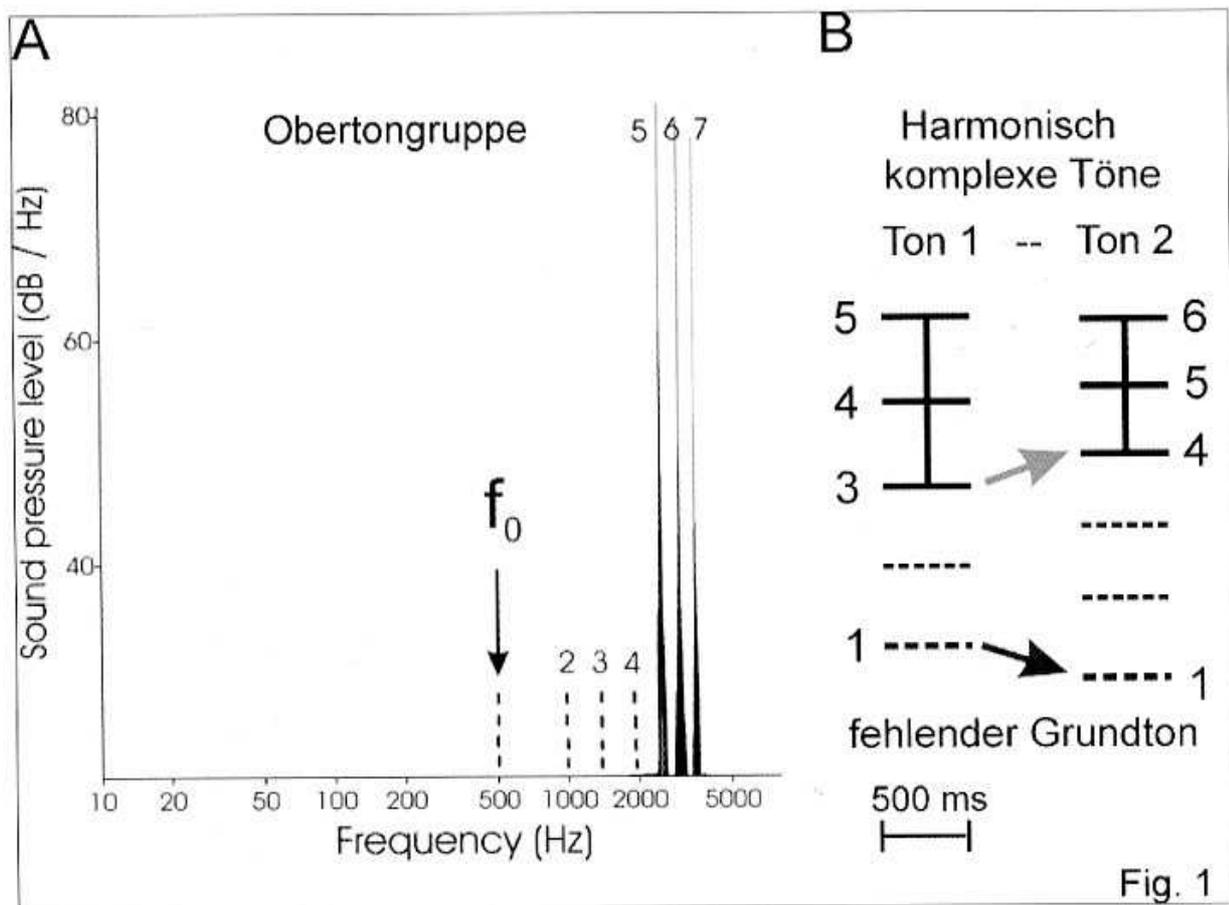
Heidelberger Tradition der Hörforschung

Die Heidelberger Tradition der Hörforschung geht zurück auf das interdisziplinäre Kolloquium „Physikalische Grundlagen der Musik – Helmholtz und danach“, welches im Jahre 1994 anlässlich des 100. Todesjahres des Heidelberger Physiologen Hermann von Helmholtz von den Physikern Hans Joachim Specht und Hans Günter Dosch an der Fakultät für Physik und Astronomie der Universität Heidelberg veranstaltet wurde. Für mich als Kirchenmusiker und Physiker war dies ein geeigneter Anlass, in Kooperation mit der Physikalischen Fakultät, der Neurologischen Klinik und der Hochschule für Kirchenmusik in Heidelberg die bisherigen empirischen, psychoakustischen Studien zur Unterscheidung „objektiver und subjektiver Aspekte der Klangwahrnehmung“ zu erweitern und um neurowissenschaftliche Messmethoden zu ergänzen. Bereits Hermann von Helmholtz wies in seinem Buch „Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik“ (von Helmholtz 1863) auf subjektive Klangwahrnehmungsunterschiede hin, die er einerseits als eine ‚synthetische‘ Klangwahrnehmung beschrieb – gemeint war damit die Verschmelzung der Wahrnehmungskomponenten zu einer ‚Klangmasse‘ – und andererseits als eine ‚analytische‘ Wahrnehmung, d. h., dass einzelne Obertöne eines Klanges zur bewussten Wahrnehmung gebracht werden können. Er nahm mit diesen beiden Wahrnehmungsformen Bezug auf die *Perzeption* bzw. *Apperzeption* im Leibnizschen Sinne.

In den darauf folgenden Jahren war es möglich, internationale Kooperationsprojekte aufzubauen, um sowohl die Wirkung von Musik auf die Gehirne von Profimusikern einerseits als auch die Auswirkung der Disposition musikspezifischer Gehirnareale auf die Wahrnehmung von Musik andererseits zu untersuchen und zu verstehen. So wurde beispielsweise im Vergleich zwischen den Gehirnen der Orchestermusiker des *Liverpool Royal Philharmonic Orchestra* und den Gehirnen der Orchester-

musiker des *Mannheimer Nationaltheaters* eine Reihe auffälliger Unterschiede gefunden: erstens spezifische Unterschiede auf neuronaler Ebene, zweitens unterschiedliche Klangwahrnehmungsprofile auf perzeptueller Ebene, und drittens auffällige Diskrepanzen bezüglich ihrer Spielweise oder Klangvorstellung (vgl. Schneider et al. 2006).

Darüber hinaus entstand in Zusammenarbeit mit zahlreichen Musikhochschulen, insbesondere mit Elke Hofmann an der Hochschule für Musik der Musik-Akademie

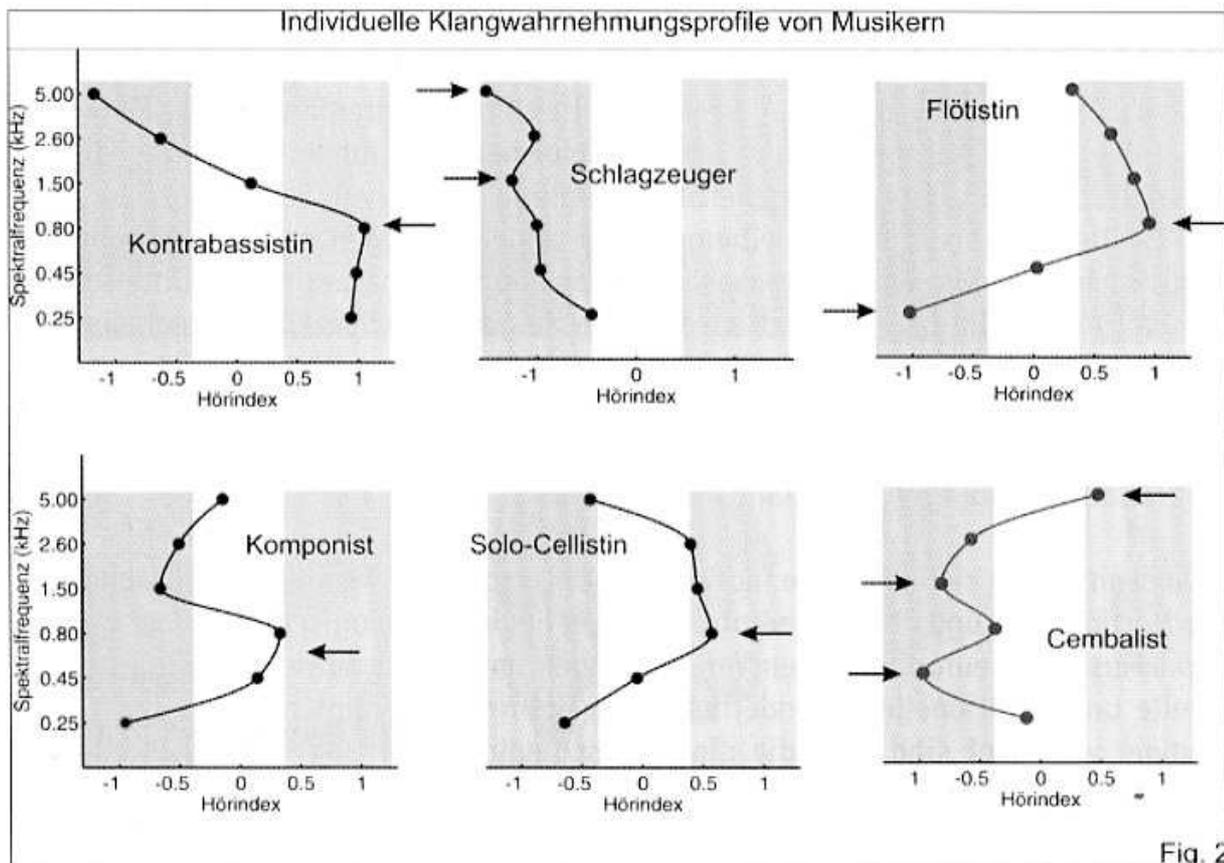


Basel sowie Doris Geller an der Staatlichen Hochschule für Musik und Darstellende Kunst Mannheim, eine transdisziplinäre Forschungsschnittstelle, nicht zuletzt, um die Relevanz der individuellen Klangverarbeitungsformen für die musikpädagogische Forschung zu thematisieren. Wirkungsforschung ist im Rahmen der Verwertung der derzeitigen Forschungsprojekte vorgesehen, allerdings muss die Grundlagenforschung, insbesondere mit Blick auf das Verständnis der individuellen Klangwahrnehmungsunterschiede auf neuronaler Ebene, zunächst die nötigen Voraussetzungen für die Bildungsforschung schaffen, bevor die pädagogische, therapeutische und klinische Relevanz musikalischer Förderung in ihrer breiten Vielfalt diskutiert werden kann.

Subjektive und objektive Komponenten der Klangwahrnehmung

In Fig. 1 A wird das unseren Experimenten zur Messung der Klangwahrnehmung zugrundeliegende Klangmaterial graphisch dargestellt, nämlich Obertongruppen mit wenigen benachbarten Harmonischen (Obertönen), in diesem Fall einer Oberton-

gruppe mit dem 5. bis 7. Oberton, relativ zu einer Grundfrequenz $f(0)$ und weiteren tieferen Teiltönen (2.–4. Oberton), die selbst physikalisch gar nicht vorhanden sind (gestrichelte Linien). Die präsentierten Obertongruppen weisen formantähnliche, für die Klangfarben- und Tonhöhenwahrnehmung relevante Strukturmerkmale auf, wie sie charakteristisch für Instrumentalklänge und stimmhafte Sprachlaute sind. Die musikalische Tonhöhe derartiger unvollständiger harmonischer Klänge unterscheidet



sich um bis zu drei oder vier Oktaven, wenn derselbe Klang unterschiedlichen HörerInnen vorgespielt wird. Manche HörerInnen hören nichts anderes als einen Mehrklang der Obertöne, andere rekonstruieren im Gehirn den fehlenden Grundton und empfinden diesen als die dominant wahrgenommene Tonhöhe des Gesamtklangs. Solche Wahrnehmungsunterschiede wurden von unserer Forschergruppe „Musik und Gehirn“ in der Heidelberger Kopfklinik im Rahmen der Entwicklung eines neuen Klangwahrnehmungstests zum Oberton- und Grundtonhören (vgl. Schneider et al. 2005) an mittlerweile über 7000 ProbandInnen beobachtet und quantifiziert. Bei diesem Test wird die Tonhöhenwahrnehmung indirekt aus der *Tonrichtungswahrnehmung* für jeweils zwei aufeinander folgende unvollständige harmonische Klänge bestimmt (Fig. 1 B). Durch eine gegenläufige Verschiebung der Obertongruppen und des fehlenden Grundtones war es möglich, mit insgesamt 162 Items den Grad an grund- oder obertonbezogenem Hören zu bestimmen. Dabei wird für jeden Probanden und jede Probandin ein frequenzabhängiges Profil des „Hörindex der Klangwahrnehmung“ berechnet, dessen Wertebereich zwischen -1 (nur Grundtöne gehört) und +1 (nur Obertöne gehört) liegt (Fig. 2). Die Testpersonen waren vorwiegend ProfimusikerInnen, darunter

OrchestermusikerInnen, RockmusikerInnen, DirigentInnen, KomponistInnen, MusikhochschuldozentInnen und -StudentInnen, aber auch AmateurmusikerInnen und NichtmusikerInnen. Generell wurde unabhängig vom Alter eine sehr breite, zum Teil komplementäre Verteilung der Höreigenschaften gemessen. Ein gewisser Anteil an Personen ist extrem hörend, d. h. im gesamten Testbereich wurden ausschließlich Obertöne oder Grundtöne gehört. Manche HörerInnen waren im tiefen Frequenzbereich GrundtonhörerInnen und im hohen Frequenzbereich ObertonhörerInnen, andere genau umgekehrt, sodass sich je nach Hörtyp völlig unterschiedliche Klangwahrnehmungsprofile darstellen ließen. Einige individuelle Hörprofile sind in Fig. 2 zusammengestellt. Die Grazer Psychologin Annemarie Seither-Preisler interpretierte das Phänomen der ambivalenten Wahrnehmung physikalisch gleicher Reize auf der Basis lernbedingter Plastizität der holistischen, ganzheitlichen Wahrnehmung (vgl. Seither-Preisler et al. 2007). Die Ergebnisse des Heidelberger Tests zeigen hingegen unter der besonderen Berücksichtigung von Oktavierungsphänomenen und frequenzspezifischer Unterschiede bei ProfimusikerInnen eine deutlich stärkere Neigung zur Spektralwahrnehmung im mittleren Frequenzbereich (vgl. Gruhn et al. 2012).

Neuronale Grundlagen der Klangwahrnehmung

Inwieweit lassen sich derartige individuelle Unterschiede in der Klangwahrnehmung, der Hörfähigkeit und der Hörbeeinträchtigung neurophysiologisch erklären? Was bewirkt Musik an neuroplastischen Veränderungen im Gehirn? Inwieweit gibt es strukturelle und funktionelle Besonderheiten im Gehirn, die möglicherweise mehr oder weniger veranlagt sind, und die die unterschiedliche Wirkung von Musik erklären können?

Als Pionier der neuronalen Klangforschung verwendete Lawrence Parsons aus Texas die Positronenemissionstomographie (PET), um die Wirkung auswendig gespielter virtuoser Klaviermusik auf das Gehirn zu untersuchen. ProfipianistInnen wurden mit einem metallfreien Klaviatur-Imitat in den Scanner gelegt und sollten den dritten Satz des Italienischen Konzertes von Johann Sebastian Bach spielen (vgl. Parsons et al. 2005). In einer Kontrastbedingung wurde den Pianisten das Spielen von einfachen Tonleitern abverlangt. Als Ergebnis zeigte sich beim Auswendigspielen eine Aufmerksamkeitsfokussierung auf die wesentlichen Aktivierungszentren, beim Tonleiterspielen hingegen eine zusätzliche Aktivierung irrelevanter Areale. Der kanadische Forscher Robert Zatorre ging einen Schritt weiter und untersuchte die unterschiedliche Verarbeitung spektraler und zeitlicher Aspekte der Klangwahrnehmung (vgl. Zatorre/Belin 2001). Dabei bildeten sich die Tonlänge und der Rhythmus vorwiegend in der linken Hemisphäre ab, hingegen spektrale Komponenten wie Klangfarbe und Melodiekontur in der rechten Hemisphäre. Eine genauere Analyse ergab, dass der Schwerpunkt der auditorischen Verarbeitung im seitlichen Bereich des auditorischen Cortex lokalisiert werden kann.

Da die Wahrnehmung der Grundfrequenz einer Obertonreihe eher zeitliche Aspekte abbildet, nämlich die Periodizitätsfrequenz der Schallwelle, die Wahrnehmung von Obertönen hingegen spektrale Aspekte, die mit der Struktur des Frequenzspektrums

zusammenhängen, lag es nahe, die Hypothese aufzustellen, dass das „Grundtonhören“ eine linkshemisphärische und das „Obertonhören“ eine rechtshemisphärische Eigenschaft sein müsste. An diesem Punkt setzen unsere Forschungsprojekte in Heidelberg an. Unser transdisziplinärer, multimodaler, neurowissenschaftlicher Ansatz ist besonders aussichtsreich, weil er Wahrnehmung, Neurophysiologie und Morphologie verbindet.

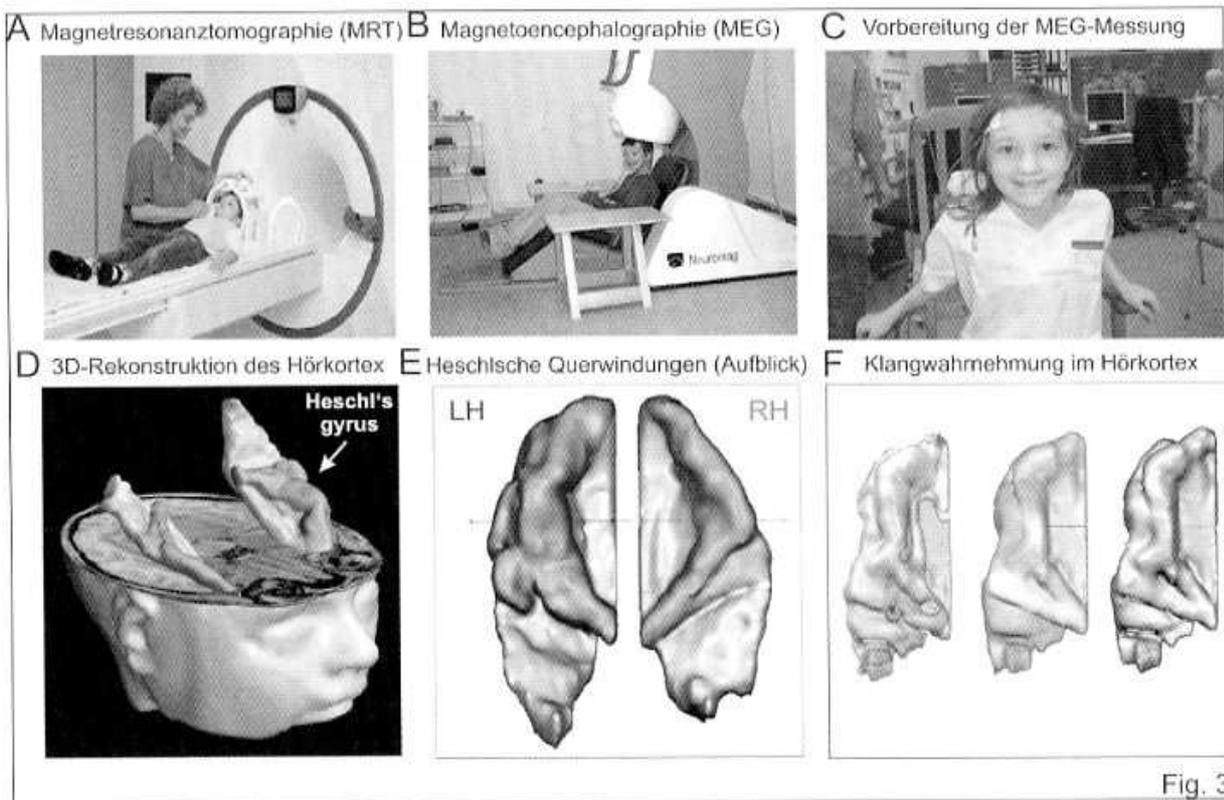
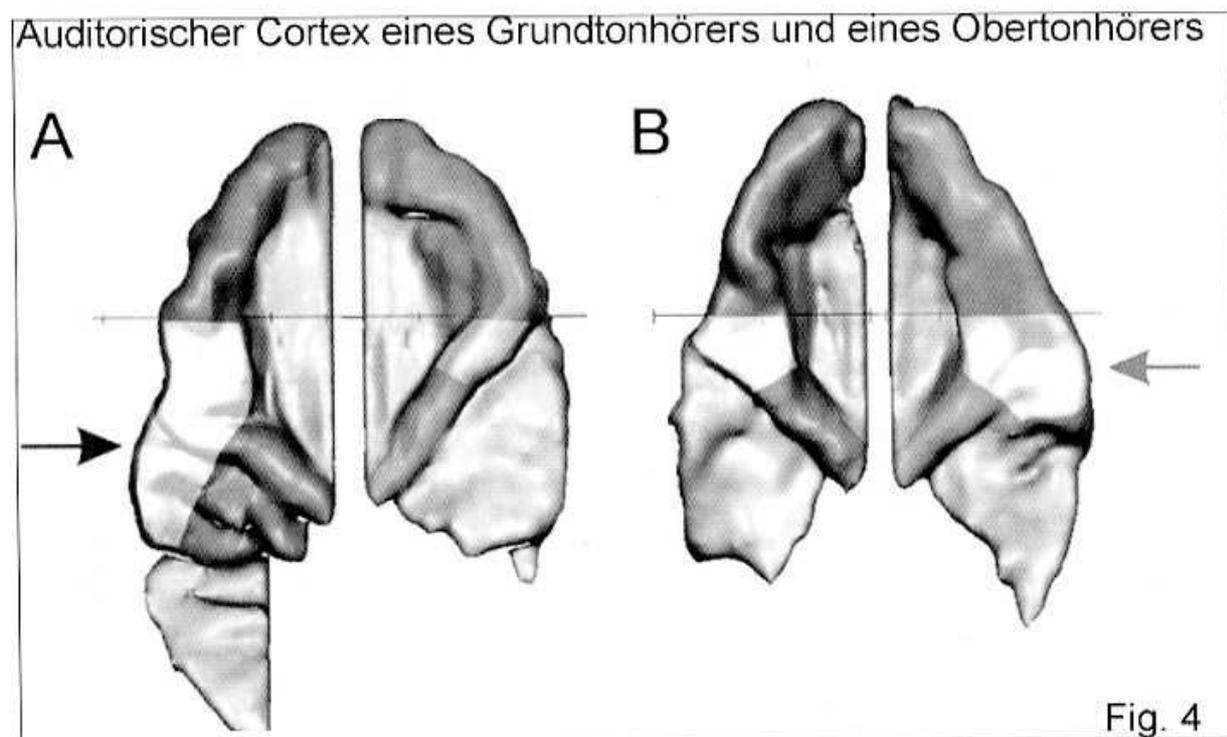


Fig. 3

In den Heidelberger Kernspintomographen „Trio und Symphony“, dem „Porsche“ der bildgebenden Verfahren, kann in etwa fünf Minuten die gesamte anatomische Gehirnstruktur in 1 mm Auflösung eingescannt werden. Unter diesen Voraussetzungen können nicht nur erwachsene ProbandInnen, sondern auch sehr gut Kinder im Grundschulalter an den Messungen teilnehmen. Manche Kinder haben das Gefühl, sie würden in einer „Rakete“ fliegen, weil sie einen Helm aufhaben (Fig. 3 A). Der Bereich des Großhirns, der für die Verarbeitung von Höreigenschaften zuständig ist, der „Hörkortex“, liegt auf der Oberseite des Temporallappens. Nach schichtweiser Segmentierung mit dem Programm BrainVoyager (Brain Innovation, Rainer Goebel, Maastricht) wird die graue und weiße Substanz separat gekennzeichnet und danach der gesamte Hörkortex dreidimensional rekonstruiert, in Fig. 3 D am Beispiel eines achtjährigen Kindes. Der Hörkortex liegt wie eine Art „inneres Ohr“ im Großhirn und ragt als „Asterix- oder Hermes-Flügel“ aus dem Querschnitt heraus. Im Zentrum befinden sich die für die Klang- und Musikverarbeitung zuständigen „Heschlschen Querwindungen“ (Fig. 3 E), benannt nach dem Wiener Anatom Richard Ladislaus Heschl, der als erster systematisch dieses Gehirnareal erforscht hat (vgl. Heschl 1878). Interessanterweise sind bei musikalischen Kindern bereits zu Beginn des formalen Musikunterrichts die musikalitätsspezifischen anatomischen Unterschiede sichtbar, was auf

eine starke musikalische Veranlagungskomponente hinweist. Die zugrundeliegende kortikale Dicke sowie die gemessene funktionelle Aktivierung wird hingegen als Indikator für Neuroplastizität angesehen (Fig. 3 F).

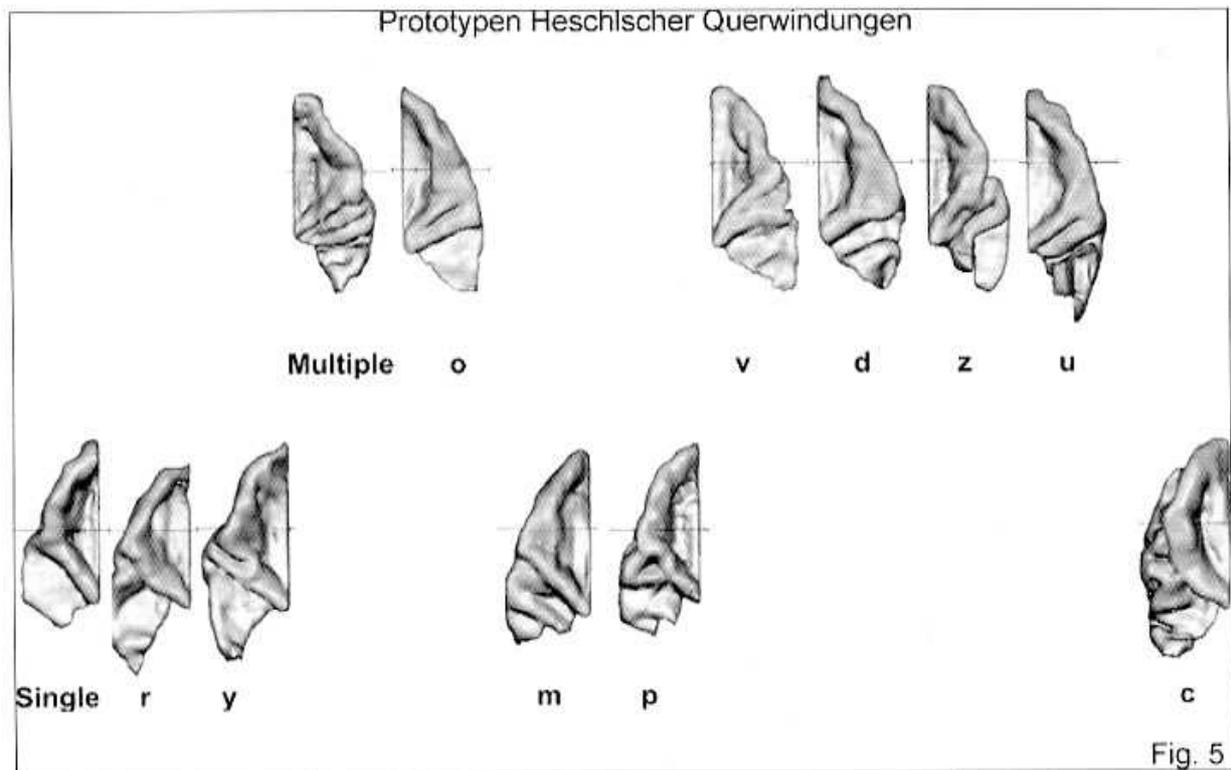
Das zweite neurologische Messverfahren in unseren Studien ist die Magnetoencephalographie (MEG). Fig. 3 B zeigt einen Blick in die MEG-Messkabine der Sektion Biomagnetismus des Heidelberger Universitätsklinikums. Hier werden die Gehirnströ-



me beim Hören von harmonischen komplexen Tönen und Instrumentalklängen gemessen. Die Versuchspersonen ziehen im Vorfeld zur Untersuchung metallfreie Baumwollkleidung an und bekommen an die Schläfen und hinter die Ohren insgesamt 4 Elektroden geklebt (Fig. 3 C), damit während der MEG-Messung die genaue Position des Kopfes im Gerät bestimmt werden kann. Danach werden die Probanden in die vom Erdmagnetfeld abgeschirmte Messkabine geführt und aufgefordert, sich entspannt unter die MEG-Haube zu setzen. Die Töne werden über Schläuche zum Ohr geführt, und während der passiven Messungen darf ein Stummfilm gesehen werden. Innerhalb der Haube befinden sich 122 supraleitende Spulen, die mit flüssigem Helium auf -270 °C herabgekühlt werden. Die Spulen werden dadurch supraleitend und können so erst die winzigen Gehirnströme erfassen, die als Magnetfeldänderungen mit einer Abtastfrequenz von 1000 Hz außerhalb des Kopfes gemessen werden. Mit dem Programm BESA (Brain Electromagnetic Source Analysis, Michael Scherg, Gräfelfing) werden daraufhin aus den aufgezeichneten Signalen die zugrundeliegende zeitliche Dynamik und räumliche Verteilung der Gehirnströme, die auditorisch evozierten Felder (Quellenwellenformen) berechnet. Die individuellen Antworten der Klangverarbeitungsareale sehen bei identischer akustischer Stimulation äußerst verschieden aus, sie spiegeln wie ein Fingerabdruck das individuelle Wahrnehmungsprofil. Gerade die Kombination von MEG- und strukturellen und funktionellen kernspintomographischen

(f)MRT-Messungen mit denselben ProbandInnen ist in unseren Projekten besonders effektiv, da das MEG eine hohe zeitliche Präzision liefert, während die (f)MRT-Messung die erforderliche räumliche Auflösung zur Lokalisierung der gemessenen Aktivität gewährleistet.

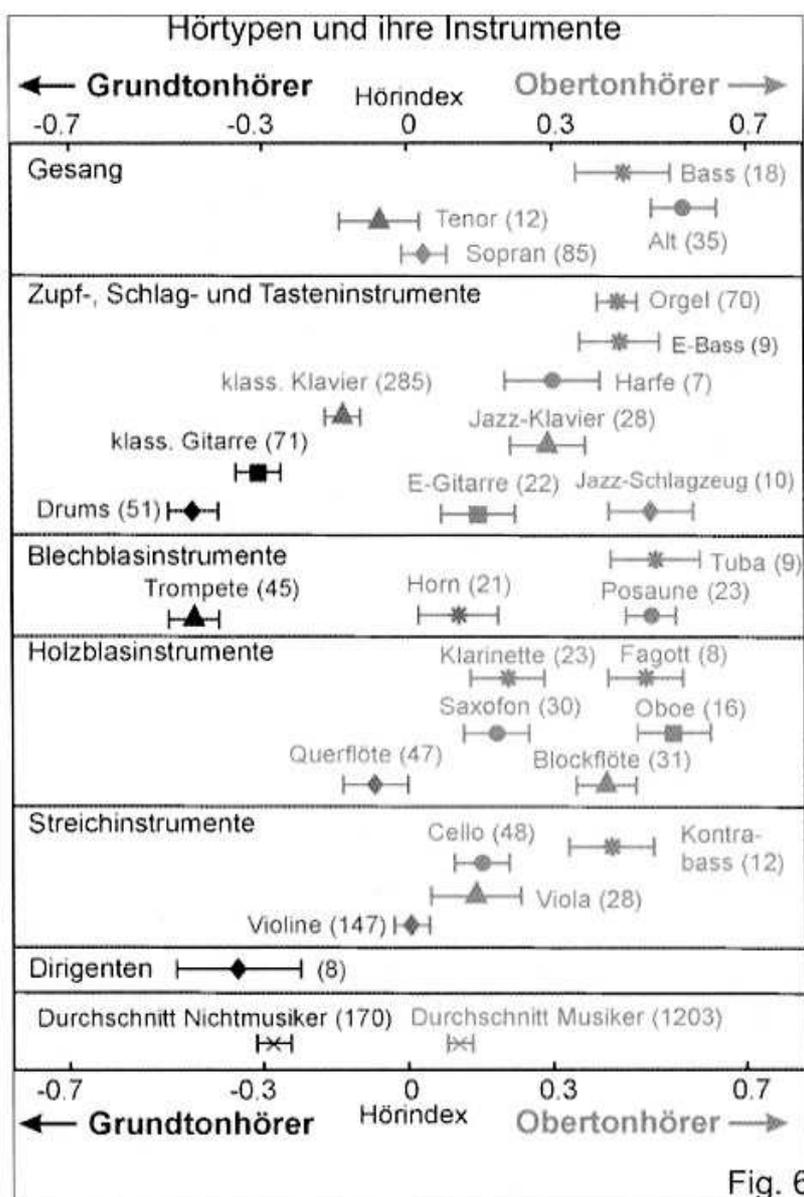
Die GrundtonhörerInnen zeigten systematisch eine größere und aktivere linke Heschlsche Querwindung, die ObertonhörerInnen hingegen einen in der rechten Hemi-



sphäre vergrößerten Heschl Gyrus (grau gefärbte Areale in Fig. 4). Mit einer Datensammlung von über 500 MusikerInnen-Gehirnen konnten systematische Gruppenunterschiede untersucht werden. ProfimusikerInnen zeigten unabhängig vom Training im Mittel 130 % mehr graue Substanz in der Heschlschen Querwindung als NichtmusikerInnen (vgl. Schneider et al. 2002). Die Größe des Hörkortex korrelierte dabei stark mit der musikalischen Begabung, gemessen mit dem „Advanced Measure of Music Audiation“-Test des amerikanischen Musikpsychologen Edwin Elias Gordon. Dieser Test besteht aus 30 kurzen Melodiepaaren. Die wiederholte Melodie ist entweder exakt gleich oder enthält lokale rhythmische oder melodische Änderungen. Die *Audiation*, ein von Gordon geprägter Begriff, quantifiziert dabei die „innere Klangvorstellung“ (Gordon 1998). Derzeit laufende und weitere geplante Verlaufsstudien mit Grundschulkindern und MusikstudentInnen werden in diesem Zusammenhang neue wichtige Erkenntnisse zur „Nature/Nurture-Debatte“ beitragen. Die bisherigen Zwischenergebnisse führen zu der Hypothese, dass die zu erwartende Neuroplastizität proportional zum veranlagten Potential ansteigen müsste.

Neben der Größe spielt auch die anatomische Form der Heschlschen Querwindungen eine entscheidende Rolle. Innerhalb der bisherigen Sammlung segmentierter Heschlscher Querwindungen kristallisierten sich etwa 12 Grundformen (Prototypen) heraus (Fig. 5), von „calzone“- (c), löffel- (d) und pistolenförmig (p) bis hin zur einfachen

schlichten Ausführung („single“-Form). Manche Heschlsche Querwindungen haben einen gemeinsamen Stamm („Common Stem“) und verzweigen sich nach außen hin (hier als v-Form oder als seitliche Gabelung, y-Form, dargestellt). Andere Heschl Gyri haben vollständige posteriore Duplikaturen („multiple“-Form). Diese Daten dokumentieren nachhaltig, welche wichtige Rolle *Subjektivität* und *Individualität* bereits auf der neuronalen Ebene spielen, die sich aber auch auf andere Ebenen auswirken



müsste. Als weiteres Beispiel für die Spiegelung des individuellen Begabungsprofils in der Struktur des menschlichen Gehirns sei der visuelle Kortex genannt. Auch hier weisen eigene Pilotstudien in Zusammenarbeit mit Raphael Rosenberg (Wien) eindeutig darauf hin, dass die Größe der primären visuellen Areale, insbesondere der primären visuellen Areale um den Sulcus calcarinus, stark mit der Begabung zu Bildender Kunst korrelieren müsste, in ähnlicher Weise wie die musikalische Begabung mit der Größe des primären Hörkortex.

Interessanterweise zeigte sich ein direkter Zusammenhang zwischen dem dominanten Hörmodus und der Präferenz für bestimmte Musikinstrumente (vgl. Schneider

et al. 2005a, Gruhn et al. 2012). GrundtonhörerInnen bevorzugten oft Musikinstrumente, die kurze, scharfe oder impulsive Töne produzieren (Schlagzeug, Gitarre, Klavier, Trompete, Querflöte oder hohe Soloinstrumente) und neigten darüber hinaus zu virtuoser, impulsiver und zeitlich synchroner Spielweise. ObertonhörerInnen bevorzugten hingegen eher Musikinstrumente, die länger ausgehaltene Töne mit charakteristischen Klangfarben oder Formanten im Spektrum produzieren (Streich-, Blech- oder Holzblasinstrumente in tieferen Lagen, Orgel oder Gesang). Innerhalb der einzelnen Instrumentenfamilien waren die SpielerInnen der jeweiligen Instrumente mit dem höchsten Register (Geige, Querflöte, Trompete) die stärksten GrundtonhörerInnen (Fig. 6). JazzmusikerInnen tanzten allerdings aus der Reihe: Trotz perkussiver Instrumentenwahl waren die gestesteten JazzschlagzeugerInnen, Jazz-GitarristInnen und JazzpianistInnen fast ausschließlich ObertonhörerInnen. Möglicherweise profitieren sie als ObertonhörerInnen entscheidend von dem Vorteil, die charakteristischen Jazzakkorde („Voicings“) in ihrem mehrschichtigen Aufbau von Septimen und Nonen sauber auflösen zu können. Bei den JazzschlagzeugerInnen stand eher die klangfarbenbetonte Spielweise des Beckens im Mittelpunkt, im Gegensatz dazu bei den grundtonhörenden SchlagzeugerInnen die Base-Drum betonte Spielweise. Eine stark spektral hörende Paukistin beschrieb den Klang ihres Paukenschlags als 10–20stimmige Melodieschichtung, und konnte nicht verstehen, dass andere Hörer nur einen Ton wahrnehmen konnten. MusikerInnen, die das gleiche Hauptinstrument spielten, aber unterschiedlich hörten, unterschieden sich sowohl in ihrer musikalischen Klangvorstellung als auch in ihrer Musizierpraxis: GrundtonhörerInnen spielten tendenziell lieber virtuos oder rhythmisch betont, ObertonhörerInnen interessierten sich mehr für zarte Klangfarbenänderungen, die Gestaltung einzelner Klangereignisse, einen weicheren Tonansatz, historische Aufführungspraxis oder die Hervorhebung von polyphonen Melodieverläufen.

Diese Ergebnisse lassen sich sowohl anlagebedingt als auch lernbedingt deuten, wobei entweder die Wahl eines bestimmten Musikinstrumentes oder sogar die Eignungsprüfung zur Aufnahme an einer bestimmte Musikschule durch die Art des Hörens beeinflusst werden könnte, umgekehrt aber auch die Art des Hörens sich aus dem Umgang mit einem bestimmten Instrument oder einem speziellen musikpädagogischen Unterrichtsansatz ergeben könnte. Auch bezüglich der Musikstil-Präferenz gab es überraschende Ergebnisse: Hardrock-Fans waren eher GrundtonhörerInnen, Opern-Fans ObertonhörerInnen. Nach der Testung von 5700 LeserInnen der Zeitschrift *Audio* zeigte sich als weitere indirekte Auswirkung der unterschiedlichen Hörweisen eine Präferenz für bestimmte Hi-Fi-Anlagen: GrundtonhörerInnen kauften tendenziell billigere, ObertonhörerInnen teurere Anlagen. Diese Beobachtung lässt sich leicht unter der Annahme verstehen, dass die Herstellung von Hi-Fi-Anlagen mit differenzierter Wiedergabe der Spektralstruktur einen entsprechenden technischen Zusatzaufwand erfordert (vgl. Tantschinez 2006).

Manche Musikerguppen, Chöre, Symphonie- oder OpernorchestermusikerInnen zeigten überraschend homogene Höreigenschaften. So waren die OrchestermusikerInnen des *Royal Liverpool Philharmonic Orchestra* fast alle ObertonhörerInnen, die OrchestermusikerInnen des *Mannheimer Nationaltheaters* hingegen überwiegend GrundtonhörerInnen (vgl. Schneider/Wengenroth 2010, Gruhn et al. 2012). Auch die Jazz-

und Popschulen zeigten komplementäre Verteilungen: Die gemessenen SchlagzeugerInnen der Popakademie in Mannheim waren zu 85 % GrundtonhörerInnen, die SchlagzeugerInnen der Frankfurter Musikwerkstatt hingegen zu 90 % ObertonhörerInnen. Hier stellt sich die ebenso spannende wie in ihren Konsequenzen weitreichende Frage, ob die gemessenen Unterschiede anlagebedingt vorgegeben sind oder erst als Folge der Instrumentenwahl hervorgerufen und verstärkt werden. Wählt ein Musiker also sein Instrument, weil er einem bestimmten Hörtyp entspricht, oder wird er erst durch den langjährigen Umgang mit der besonderen Klangstruktur seines Instruments zum Grund- oder Obertonhörer? Wählt ein Schüler aufgrund des Hörtyps einen bestimmten Instrumentallehrer? Eine laufende Promotionsarbeit im Rahmen unserer Heidelberger Arbeitsgruppe „Musik und Gehirn“ beschäftigt sich derzeit mit der Frage, wie sich der Hörtyp auf das SchülerInnen-LehrerInnenverhältnis auswirkt. Tendenziell zeigt sich, dass sich SchülerInnen und LehrerInnen mit ähnlichem Hörtyp in ihrem musikalischen Grundverständnis und bezüglich ihrer Klangvorstellung besser verstehen als SchülerInnen und LehrerInnen, deren Klangwahrnehmungseigenschaften sich unterscheiden.

Neuronale Prädiktoren für spezielle Hörfähigkeiten und Hördefizite

An dieser Stelle sollen einige neuere eigene Studien mit Probandengruppen mit speziellen Höreigenschaften referiert werden, mit der Frage, inwieweit neuroplastische oder genetisch bedingte Eigenschaften des Hörkortex als Prädiktor für das musikalische Lernen angesehen werden können:

(1) Als erste spezielle Höreigenschaft sei das *absolute Gehör* genannt, d. h. die Fähigkeit, einen gegebenen Ton unmittelbar und mühelos ohne äußere Hilfsmittel identifizieren oder einen genannten Ton produzieren zu können. Dieses seltene Phänomen tritt unter MusikerInnen weitaus häufiger auf als bei NichtmusikerInnen. Um die graduelle Ausprägung quantitativ erfassen zu können, wurde ein neuer Absoluthörertest entwickelt. Auf neuroanatomischer Ebene korreliert die Fähigkeit des absoluten Gehörs mit einer spezifischen Vergrößerung, Verdopplung und posterioren Verzweigung des rechten Heschl Gyrus. Es zeigt sich darüber hinaus auf funktioneller Ebene am dorsalen Ende dieses Areals ein zusätzliches Verarbeitungszentrum im rechten Planum Temporale, welches mit einem Netzwerk motorischer, sensorischer und visueller Areale synchron verschaltet ist (vgl. Wengenroth et al. 2012).

(2) Die Entstehung von *Tinnitus* und damit verbundene Phantomgeräusche, das Klingeln, Pfeifen und Rauschen der Ohren sowie die Neigung zu Geräuschempfindlichkeit stehen in direktem Zusammenhang mit einer spezifischen Volumenreduktion der klangverarbeitenden Areale. Dies wurde in einer neuen Forschungsstudie unserer Arbeitsgruppe in Zusammenarbeit mit dem Zentralinstitut für seelische Gesundheit in Mannheim mit hörgeschädigten RockmusikerInnen, OrchestermusikerInnen und NichtmusikerInnen untersucht (vgl. Schneider et al. 2009). Tinnitus-PatientInnen zeigten eine signifikante Volumenreduktion an grauer Substanz um ca. 60 % im Bereich des primären auditorischen Cortex ipsilateral zum Tinnitusohr. Die Volumenreduktion war am stärksten im posteromedialen Abschnitt der vordersten Heschl-

schen Querwindung, die entsprechend der tonotopen Organisation für die Verarbeitung hoher Frequenzen zuständig ist. Diese Ergebnisse sind besonders erstaunlich, da sie im Zusammenhang mit Verlaufsdaten in einem Folgeprojekt eindeutig auf eine zentrale Ursache des Tinnitus im primären Bereich der Verarbeitung hoher Frequenzen hindeuten, während vorausgegangene Arbeiten den Grund entweder in einer Störung peripherer Verarbeitungseigenschaften suchten oder strukturelle Unterschiede im Gehirn von Tinnitusprobanden als Folge des Tinnitus interpretierten (vgl. Mühlau et al. 2006). Interessanterweise zeigen betroffene MusikerInnen im Vergleich zu NichtmusikerInnen insgesamt eine weitaus geringere Gefährdung zu Tinnitus, emotionale Belastung durch und Chronizität des Tinnitus, so dass von diesem „*protektiven Effekt des Musizierens*“ möglicherweise auch neue Therapieansätze in der Tinnitus-Forschung abgeleitet werden können (vgl. Schneider/Hammel 2009).

(3) Eine ganz besondere Affinität zu Musik und Alltagsgeräuschen zeigen PatientInnen mit dem genetischen Defekt „*Williams-Beuron-Syndrom*“ (WBS). Diese PatientInnen weisen aufgrund einer Mutation am Chromosom 7 ein besonderes neuropsychologisches Profil auf, bei dem ausgeprägte Schwächen in der logisch-räumlichen Domäne und charakteristische Stärken im musikalisch-sprachlichen Bereich einander gegenüberstehen. Bereits in früher Kindheit sind WBS-Betroffene begeistert von stark rhythmusbetonten Musikrichtungen wie Schlager, Volksmusik, Country und Rock und zeigen bei den neuronalen Messungen eine auffällige auditorische Linksasymmetrie. Ihre Heschl Gyri zeigen eine charakteristische verwurzelte Gyrierung, die derjenigen von MusikerInnen entspricht. Da WBS-ProbandInnen aufgrund psychomotorischer Defizite nicht in der Lage sind, an einem klassischen Musikunterrichtsprogramm teilzunehmen, lassen sich die neurologischen Resultate als genetisches Modell der Musikalität interpretieren und liefern einen wertvollen Hinweis zur genetischen (da trainingsunabhängigen) Komponente von musikalischer Begabung und Größe des auditorischen Kortex (vgl. Wengenroth et al. 2010).

Audio- und Neuroplastizität des musikalischen Lernens (AMseL)

Als besonderer Forschungsschwerpunkt soll das BMBF Verbundprojekt „Audio- und Neuroplastizität des musikalischen Lernens“ (AMseL-Projekt, siehe www.am-sel.org) vorgestellt werden, welches im Rahmen des JeKi-Forschungsprogramms zur kulturellen Bildungsinitiative „Jedem Kind ein Instrument“ (JeKi) in NRW und Hamburg seit 2009 in Kooperation der Universitäten Heidelberg und Graz untersucht, wie sich regelmäßiges Musizieren im Grundschulalter auf das Hörvermögen und auf außermusikalische Fähigkeiten (Kreativität, Intelligenz, Aufmerksamkeit, Lesen, Rechtschreiben, Rechnen) auswirkt. Insbesondere soll dabei erforscht werden, ob sich solche Lerneffekte auch im Gehirn zeigen. Gerade der Einbezug der Gehirnforschung als relevanter Zweig der Bildungsforschung ermöglicht es, die Mechanismen der auditiv bedingten Veranlagung und Plastizität auf der Ebene der dem Verhalten zugrundeliegenden Gehirnfunktionen zu erforschen und festzustellen, ob frühes Instrumentalspiel zu neuroplastischen Veränderungen des kindlichen Gehirns führt. Das Teilprojekt 1 an der Universität Heidelberg erforscht kortikale Korrelate von elementaren Hörleistun-

gen, das Teilprojekt 2 an der Universität Graz beschäftigt sich schwerpunktmäßig mit der Messung komplexer Hörleistungen im Zusammenhang mit Sprache und Musik. Um langzeitige Wirkungen zu verstehen, wurden innerhalb von drei Jahren etwa 150 Nicht-JeKi- und JeKi-Kinder im Verlauf untersucht, darunter 110 schulisch unauffällige Kinder, zur Hälfte intensiv musizierend, und 40 auffällige Kinder (25 ADHS-betroffene und 15 legasthene Kinder). Sowohl die unauffälligen als auch die auffälli-

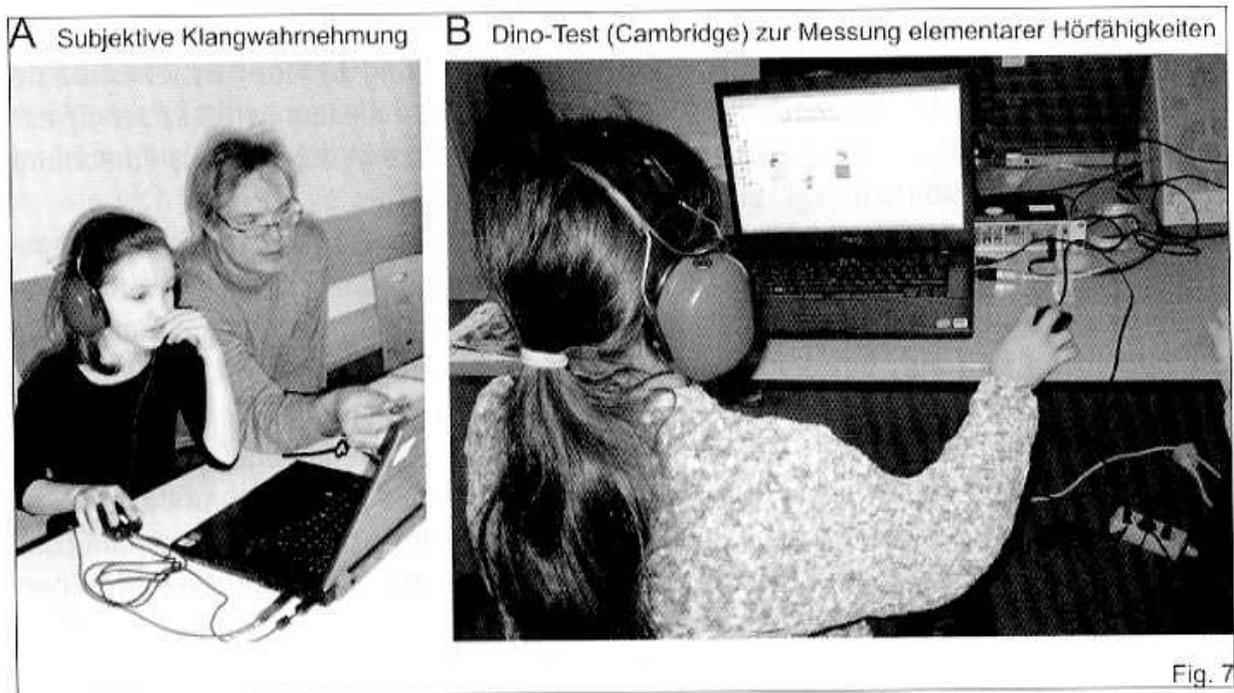


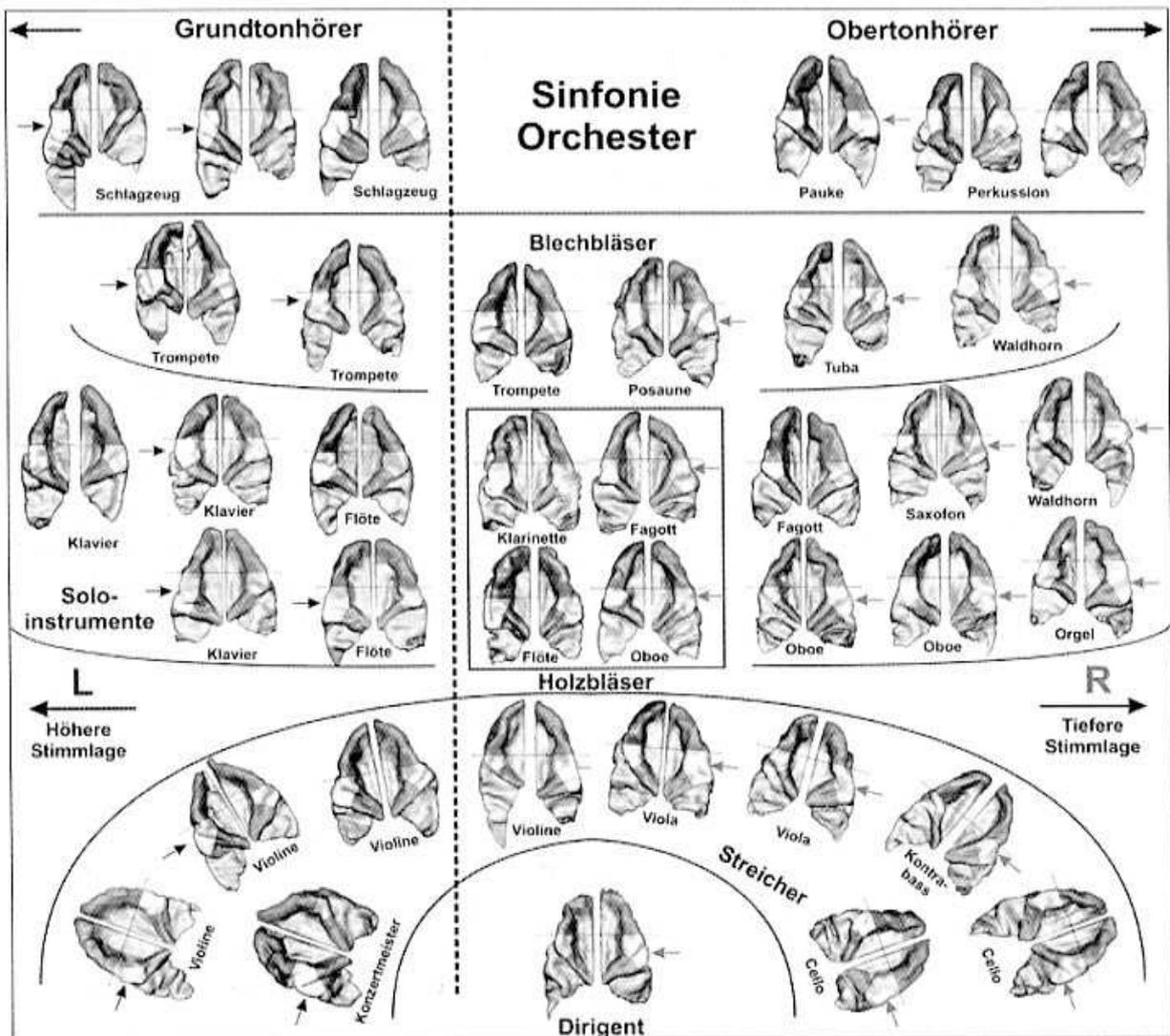
Fig. 7

gen Kinder stammten jeweils etwa zur Hälfte aus den JeKi-Interventionen in NRW und Hamburg und zur anderen Hälfte als Kontrollprobanden aus Heidelberg und Umgebung. Die Kinder reisten in Kleingruppen zu maximal 7–9 Kindern verteilt auf 46 Mess-Wochenenden jeweils zweimal nach Heidelberg und wurden dort im Rahmen eines kombinierten Quer- und Längsschnittsdesign mit psychoakustischen und neurowissenschaftlichen Messungen untersucht. Die Erhebungsinstrumente des AMseL-Projekts sind von neurologischer Seite erneut die Kernspintomographie und die Magnetoencephalographie; ferner werden psychoakustische Forschungsinstrumente zur Erfassung der Klangwahrnehmung, psychologische Tests, Kreativitätstests und Fragebögen zum persönlichen und schulischen Umfeld eingesetzt. Das AMseL-Projekt setzt ebenso wie die oben beschriebenen vorangehenden Forschungsprojekte zur Musikalität primär an der Erforschung der neuronalen Grundlagen der Klangwahrnehmung und der individuellen Hörfähigkeiten an. In Fig. 7 ist der experimentelle Aufbau der Messstationen mit PC, externer Soundkarte und dynamischen, geschlossenen Kopfhörern (Sennheiser HDA 200) zu sehen, wie er derzeit zur Durchführung der psychometrischen Testungen verwendet wird (Dino- und Metric-Test, Usha Goswami, Cambridge 2010; Continuous Attention Performance (CAPT)-Test zur Messung der auditorischen und visuellen Aufmerksamkeit; eigene Testverfahren zur Erfassung der Fähigkeit zum holistischen und spektralen Hören).

Zusätzlich wurden an den Schulen vor Ort durch das Grazer Team unter der Anleitung von Annemarie Seither-Preisler psychologische und weitere psychometrische

Testungen durchgeführt. Als Ziel soll mithilfe der neurologischen Erhebungsinstrumente herausgefunden werden, wie sich die musikalische Früherziehung, insbesondere die JeKi-Intervention, auf die Sensibilisierung des Gehörs und die Verbesserung allgemein-kognitiver Leistungen auswirkt.

Die Zwischenergebnisse des AMseL-Projekts zeigen deutlich, dass intensives Musizieren mit folgenden Veränderungen einhergeht: (1) bessere Leistungen bezüglich



Aufmerksamkeit, Lesen und Rechtschreiben, (2) bessere Schulnoten, (3) erheblich verbesserte Hörfähigkeit (in Bezug auf Tonhöhe, Klangspektrum, Rhythmus, Tonlänge) als Voraussetzung für die phonologische Bewusstheit, (4) neuroanatomische und -funktionelle Besonderheiten des für Sprache und Musik wichtigen Hörkortex. Vermutlich lässt sich ein Teil dieser Transfereffekte indirekt durch eine musikalitätsbedingt gesteigerte Aufmerksamkeit bzw. ein erhöhtes Konzentrationsvermögen erklären. Umgekehrt sind bei Kindern mit ADHS und Legasthenie in den Hörarealen Defizite in der zeitlichen Zusammenarbeit beider Gehirnhemisphären nachzuweisen. Bei ADHS-Kindern reagiert tendenziell die linke Hemisphäre deutlich verspätet, bei legasthenen Kindern eher die rechte Hemisphäre verspätet, während bei unauffälligen Kindern die auditorisch evozierten Antworten im rechten und linken Hörkortex

synchronisiert, d. h. gleichzeitig ablaufen. Sowohl die hemisphärenspezifischen Unterschiede in der Anatomie des auditorischen Kortex als auch die Defizite in der zeitlichen Zusammenarbeit beider Gehirnhemisphären sind für eine objektive Frühdiagnostik hochgradig relevant. Als weiteres Zwischenergebnis der neuroanatomischen Auswertungen (Morphologie, Morphometrie, kortikale Dicke) der musizierenden Kinder zeigt sich, dass bereits im Alter von 7 Jahren, d. h. vor Beginn des formalen Musikunterrichts, die musikalitätsspezifischen anatomischen Merkmale wie bei erwachsenen Gehirnen vollständig erkennbar sind. Das spricht dafür, dass die auditorischen Profile schon in frühester Kindheit angelegt sind. Die funktionellen Messungen der Gehirnströme im MEG erfassen nicht nur die auditorisch evozierten Felder, sondern auch synchrone Aktivitätszentren in unterschiedlichen anderen Gehirnarealen. Insbesondere bei intensiv musizierenden Kindern zeigen sich zusätzliche spezifische neuronale Netzwerke, welche auditorische, motorische, sprachliche und visuelle Verarbeitungsprozesse miteinander verknüpfen. Die bisherige Dropout-Quote unseres AMseL-Projektes mit JeKi-Kindern ist mit nur ca. 4% wesentlich niedriger als erwartet und die TeilnehmerInnen sind hoch motiviert. Es ist gelungen, einen stabilen Pool an Untersuchungspersonen aufzubauen, mit dem auch in Zukunft effizient Folgemessungen durchgeführt werden können. Im Rahmen der weiteren bevorstehenden Auswertungen werden wir u. a. die Frage stellen, inwieweit musikalisches Lernen zu einem Ausgleich der hemisphärenspezifischen Unterschiede führen könnte. Die musikpädagogische und klinische Verwertung der Forschungsergebnisse des AMseL-Projekts erfordert in Zukunft eine interdisziplinäre Kooperation mit neurologischer, genetischer, musikalischer und therapeutischer Expertise.

Das zerebrale Symphonieorchester

Am Beispiel des *zerebralen Symphonieorchesters* (vgl. Schneider et al. 2005a) kann die Bedeutung der wechselseitigen Wirkung zwischen Gehirn, Mensch, Musik und Performance besonders schön veranschaulicht werden: Die Sitzordnung in einem modernen Symphonieorchester folgt scheinbar der Fähigkeit zur individuellen Tonwahrnehmung, die in der linken oder rechten Gehirnhälfte verankert ist. GrundtonhörerInnen mit hohen Instrumenten (z. B. Geige, Querflöte, Trompete) sitzen typischerweise links vom Dirigenten/von der Dirigentin und die ObertonhörerInnen (z. B. Bratsche, Cello, Kontrabass, Fagott, Tuba) rechts (Fig. 8). Auffällig sind darüber hinaus orchesterspezifische Unterschiede. Die von unserer Liverpools Kollegin Vanessa Sluming untersuchten OrchestermusikerInnen des *Royal Liverpool Philharmonic Orchestra* (RLPO) waren fast ausnahmslos ObertonhörerInnen, die MusikerInnen des *Mannheimer Nationaltheaters* hingegen zu 80 % GrundtonhörerInnen. Eine Cellistin dieses Orchesters schrieb dazu: „Bei uns wird meiner Ansicht nach viel lebendiger und feuriger gespielt, und in dem Schwung geht auch mal etwas verloren, so auch das eine oder andere piano.“ Die Mannheimer Orchestermusiker stehen nicht zuletzt im Erbe der zur Zeiten der Mannheimer Schule bekannt gewordenen „*Mannheimer Rakete*“, einem arpeggiert nach oben schnellenden energischen Impulsgeber zur Initialzündung von Musikstücken (vgl. Schneider et al. 2006). In kleineren, kammermusikalischen Beset-

zungen ergänzen sich tendenziell entgegengesetzte Hörtypen besser, idealerweise so, dass die SolistInnen grundtöner hören und die BegleiterInnen obertöner.

Weitere Quer- und Längsschnittstudien mit musizierenden Kindern, MusikstudentInnen und ProfimusikerInnen sollen in Zukunft klären, inwieweit sich die individuellen Eigenschaften der Hörwahrnehmung auf die Art des Musizierens auswirken und aus pädagogischer, therapeutischer und klinischer Sicht die Entwicklung von speziellen, individuell angepassten musikalischen Trainingsprogrammen erfordern.

Literatur

- Altenmüller, Eckart/Gruhn, Wilfried (1997): *Music, the brain and music learning*. Chicago: GIA Publ., Vol. 2.
- Becker, Nicole (2006): *Die neurowissenschaftliche Herausforderung der Pädagogik*. Bad Heilbrunn: Julius Klinkhardt.
- Gordon, Edwin Elias (1998): *Introduction to Research and the Psychology of Music*. Chicago: GIA.
- Gruhn, Wilfried/Hofmann, Elke/Schneider, Peter (2012): Grundtonhören und Obertonhören. Hörtypen und ihre Instrumente. *Üben und Musizieren* 1/2012. Mainz: Schott.
- Gruhn, Wilfried/Rauscher, Frances H. (2008): *Neurosciences in Music Pedagogy*. New York: Nova Biomedical.
- Heschl, Richard Ladislaus (1878): *Über die vordere quere Schläfenwindung*, Dissertation, Wien.
- Mühlau, Mark/Rauschecker, Josef et al. (2006): "Structural brain changes in tinnitus", in: *Cerebral Cortex* 16, 1283–1288.
- Parsons, Lawrence/Sergent, Justine/Hodges, Donald A./Fox, Peter T. (2005): "The brain basis of piano performance", in: *Neuropsychology* 43, 199–215.
- Rösel-Tabken, Corinna (2012): *Kosmos-Chor – Chorrekter Umgang. Wie Musik im Chor möglich wird*. München: Strube.
- Roth, Gerhard (2011): *Bildung braucht Persönlichkeit. Wie Lernen gelingt*. Stuttgart: Klett-Cotta.
- Schneider, Peter/Scherg, Michael/Dosch, Hans Guenter/Specht, Hans Joachim/Gutschalk, Alexander/Rupp, André (2002): "Morphology of Heschl's Gyrus reflects enhanced activation in the auditory cortex of musicians", in: *Nature Neuroscience* 5, 688–694.
- Schneider, Peter/Sluming, Vanessa/Roberts, Neil/Scherg, Michael/Dosch, Hans Guenter/Specht, Hans Joachim/Bleeck, Stefan/Goebel, Rainer/Stippich, Christoph/Rupp, André (2005): "Structural and functional asymmetry in lateral Heschl's gyrus predicts pitch perception preference", in: *Nature Neuroscience* 8, 1241–1247.
- Schneider, Peter/Sluming, Vanessa/Roberts, Neil/Bleeck, Stefan/Rupp, André (2005a): "Structural, functional and perceptual differences in Heschl's gyrus and Musical Instrument preference", in: *Annals of New York Academy of Science* 1060, 387–394.

- Schneider, Peter/Andermann, Martin/Engelmann, Dorte/Schneider, Renate/Rupp, André (2006): „Musik im Kopf. Individuelle Unterschiede in der Klangwahrnehmung und das zerebrale Sinfonieorchester (Music in the brain – individual differences in sound perception and the cortical symphony orchestra)“, in: *Dtsch Med Wochenschr* 131, 2895–2897.
- Schneider, Peter/Andermann Martin/Wengenroth, Martina/Goebel, Rainer/Flor, Herta/Rupp, André/Diesch, Eugen (2009): „Reduced volume of Heschl’s gyrus in tinnitus“, in: *Neuroimage* 45, 927–939.
- Schneider, Peter/Hammel, Stefan (2009): „Musik, von Engeln vorgesungen“, in: *Musica sacra* 04/2009, 220–224.
- Schneider, Peter/Wengenroth, Martina (2010): Neural basis of individual holistic and spectral sound perception. *Contemporary Music Review*, 28 (3), 315–328.
- Seither-Preisler, Annemarie/Johnson, Linda/Krumbholz, Katrin/Nobbe, Andrea/Patterson, Roy/Seither, Stefan/Lütkenhöner, Bernd (2007): “Tone sequences with conflicting fundamental pitch and timbre changes are heard differently by musicians and nonmusicians”, in: *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 33 (3), 743–751.
- Spitzer, Manfred (2003): „Medizin für die Pädagogik“, in: *Die Zeit*, 2003/39.
- Stern, Elsbeth (2005): “Pedagogy Meets Neuroscience”, in: *Science* 310, 745.
- Tantschinez, Christine (2006): „Welcher Hörtyp sind Sie?“ in: *Audio* 6/2006, 8–16
- von Helmholtz, Hermann (1863): *Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*. Braunschweig: Vieweg.
- Wengenroth, Martina/Blatow, Maria/Bendszus, Martin/Schneider, Peter (2010): “Leftward Lateralization of Auditory Cortex Underlies Holistic Sound Perception in Williams Syndrome”, *PLoS ONE* 5 (8): e12326.
- Wengenroth, Martina/Blatow, Maria/Heinecke, Armin/Hofmann, Elke/Reinhardt, Julia/Stippich, Christoph/Schneider, Peter (2012, submitted): “Increased volume and function of right auditory cortex in absolute pitch”.
- Zatorre, Robert J./Belin, Pascal (2001): “Spectral and temporal processing in human auditory cortex”, in: *Cerebral Cortex* 11, 946–953.