

musikalischen Laien, Amateurmusikern und Profimusikern gibt es unterschiedliche Stufen musikalischer Expertise, was es ermöglicht, Einflüsse von Training und Lernen auf das Beherrschen nicht alltäglicher Fertigkeiten<sup>1</sup> zu betrachten. Der Vergleich dieser Gruppen kann zeigen, wie das Gehirn funktionelle und strukturelle Anpassungen an außerordentliche Herausforderungen realisiert.

Lernen ist die Fähigkeit, neue Informationen aufzunehmen und für eine spätere Nutzung im Langzeitgedächtnis zu behalten (GAZZANIGA/IVRY/MANGUN 1998). Es ist die Grundlage für Erziehung und Bildung – den lebensbegleitenden Entwicklungsprozess des Menschen. In diesem Prozess erweitert ein Individuum seine geistigen, kulturellen und lebenspraktischen Fertigkeiten und seine personalen und sozialen Kompetenzen.

Kortikale Repräsentationen und deren Verbindungen werden durch Anlagen zwar zum Teil determiniert, sie werden aber auch durch individuelle Erfahrung und die Umwelt modifiziert (BUONOMANO/MERZENICH 1998; PANTEV et al. 2001a). Die Anpassung sensorischer oder motorischer kortikaler Repräsentationen an Umwelteinflüsse wird dabei als Plastizität bezeichnet. Sie ist verbunden mit der Stärkung bestehender oder der Formation neuer Nervenverbindungen (HEBB 1949) und der Akquisition zusätzlichen Hirngewebes. Plastizität spielt eine entscheidende Rolle für die kortikale Entwicklung. Das Wahrnehmen und Ausüben von Musik führt zur vermehrten Verarbeitung somatosensorischer und auditorischer Informationen, der Integration dieser Informationen und der Überwachung der eigenen Ausführung. Da Musiker oft bereits in sehr jungem Alter beginnen ein Instrument zu lernen und mehrere Stunden am Tag mit Üben verbringen, stellen sie ein ideales Modell dar, Plastizität zu untersuchen (PANTEV et al. 2001a; SCHLAUG 2001; MÜNTE/ALTENMÜLLER/JÄNCKE 2002).

In diesem Artikel soll die Plastizität als Folge musikalischen Trainings und die Veränderungen im Entwicklungsverlauf betrachtet werden. Beide führen zur Modifikation der während des Wahrnehmens und Ausübens von Musik ablaufenden Kognitionsprozesse. Hiermit verbunden sind funktionelle und anatomische Veränderungen im Gehirn. Der Darstellung des Einflusses von musikalischem Training widmen sich die beiden nächsten Abschnitte. Auf Veränderungen innerhalb der Entwicklung geht der dritte Abschnitt ein.

Um Kognitionsprozesse – darunter auch die beim Wahrnehmen oder Ausführen von Musik ablaufenden – besser zu verstehen, nutzen die Neurowissenschaften verschiedene Methoden, beispielsweise Verhaltensstudien, Lösionsstudien, bildgebende Verfahren (PET, MRT), elektrophysiologische Methoden (EEG, MEG) oder Modellierung im Computer (z.B. neuronale Netze). Sie arbeiten außerdem mit verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen – beispielsweise Psychoakustik, Psychologie, Medizin und Neurophysiologie – zusammen. Zwei für die Hirnforschung besonders wichtige Verfahren sollen etwas genauer vorgestellt werden. Die Magnetsonanatomografie (MRT) ist ein nicht-invasives<sup>2</sup> Verfahren zur Darstellung von anatomischen Strukturen im Inneren des Körpers. Bei der Untersuchung der Frage, welche anatomischen Unterschiede zwischen den Gehirnen von Musikern und Nichtmusikern bestehen, finden oft morphometrische Verfahren Anwendung. Zunächst werden dabei anatomische Aufnahmen der Gehirne individueller Musiker und Nichtmusiker auf ein Standardgehirn projiziert (um sie miteinander vergleichbar zu machen). Dann wird untersucht, inwiefern sich die Größe bestimmter Gehirnareale zwischen diesen beiden Gruppen unterscheidet. MRT lässt sich aber nicht nur zur Untersuchung der Gehirnanatomie nutzen, sondern funktionelle MRT (fMRT) erlaubt auch Aussagen darüber, welche Hirnregionen bei bestimmten

Sebastian Jentschke/Stefan Koelsch

## Gehirn, Musik, Plastizität und Entwicklung

**Schlüsselbegriffe:** Beziehung Neurowissenschaft/Erziehungswissenschaft, Musik, Gehirn, Lernen, Plastizität

### Zusammenfassung

Musik ist eine wichtige menschliche Fähigkeit, die sowohl kulturgeschichtlich sehr alt als auch kulturübergreifend ist. Das Wahrnehmen und Ausüben von Musik ist eine für das Gehirn äußerst aufwändige Aufgabe, die eine Vielzahl kognitiver Prozesse erfordert. Unterschiedliche Stufen musikalischer Expertise erlauben, Einflüsse von Training und Lernen auf das Beherrschen nicht alltäglicher Fertigkeiten zu betrachten und zu zeigen, wie das Gehirn funktionelle und strukturelle Anpassungen an außerordentliche Herausforderungen realisiert. Eine Vielzahl von Befunden konnte anatomische und funktionelle Unterschiede in der neuronalen Verarbeitung zwischen Musikern und Nichtmusikern nachweisen. Die Unterschiede zeigen sich auf verschiedenen Ebenen der Wahrnehmung und der Produktion von Musik. Diese Verarbeitungsprozesse laufen in Musikern schneller und effizienter ab, als in Nichtmusikern. Auch bei der Betrachtung des Entwicklungsverlaufs der Musikwahrnehmung finden sich Hinweise, dass die Verarbeitungsprozesse mit zunehmendem Alter effizienter ablaufen oder dass Fertigkeiten hinzugewonnen werden, die zu neuen oder veränderten Verarbeitungsprozessen führen.

### Summary

Music is an important human ability, which is both culture-historically very old and transcends cultures. Perceiving and practicing music is an extremely complex task for the brain, which necessitates numerous cognitive processes. Differing levels of musical expertise enable the investigation of the impact of training and learning on the mastery of non-common competences. Through such research, the way the brain realizes functional and structural adaptation of exceptional challenges can be shown. Numerous findings in terms of anatomical and functional differences between musicians and non-musicians can be demonstrated. These differences can be observed at various levels of perception and production of music. These processes run faster and more efficiently in musicians than in non-musicians. Also by observing the development of musical perception, there are signs that such processes become more efficient with a person's age and that new competences can be gained, which lead to new or modified processes of perception and practice.

### 1 Einleitung

Musik ist ein kulturübergreifendes und kulturgeschichtlich sehr altes Phänomen. Menschen singen, sie lernen ein Instrument zu spielen, sie musizieren in Gruppen und einige komponieren Musik. Das Wahrnehmen von Musik und noch mehr das Singen und Musizieren ist für das Gehirn eine immens aufwändige Aufgabe, welche eine Vielzahl kognitiver Prozesse erfordert. Musik erlaubt so, die menschliche Kognition und die ihr zugrundeliegenden Verarbeitungsprozesse sowie Plastizität im Gehirn zu untersuchen. Mit

Aufgaben aktiviert sind. Dies geschieht auf der Basis des Sauerstoffgehalts des Bluts – die Aktivierung von Nervenzellen bedingt eine stärkere Versorgung dieser Hirnregion mit sauerstoffreichem Blut, welches andere magnetische Eigenschaften hat als sauerstoffarmes Blut. Die fMRT erlaubt eine gute Lokalisierung von Hirnaktivität, hat aber nur eine geringe zeitliche Auflösung (meist einige Sekunden). Elektroenzephalographie (EEG) bzw. Magnetenzephalographie (MEG) haben im Gegensatz dazu eine hohe zeitliche (im Millisekunden-Bereich), erlaubt aber meist nur eine weniger genaue Lokalisation. EEG ist die Aufzeichnung der elektrischen Aktivität des Gehirns durch Elektroden auf der Kopfoberfläche<sup>3</sup>. Auf diese Weise lassen sich Aussagen über die Gehirnaktivität ableiten, da die elektrische Aktivität an das Ausmaß der Aktivierung von Nervenzellen gebunden ist. Eine spezielle Form des EEG sind ereigniskorrelierte Potentiale (EKP, *event-related potentials*)<sup>4</sup>. Hierbei wird eine große Anzahl von Stimuli des gleichen Typs präsentiert (z.B. ein bestimmter Ton) und anschließend der Mittelwert der EEG-Aktivität für einen bestimmten Zeitbereich nach dem Einsetzen dieses Stimulus ermittelt. Dadurch wird die Gehirnaktivität sichtbar, die mit der Verarbeitung dieses Stimulus korreliert.

## 2 Anatomische Unterschiede zwischen den Gehirnen von Musikern und Nichtmusikern

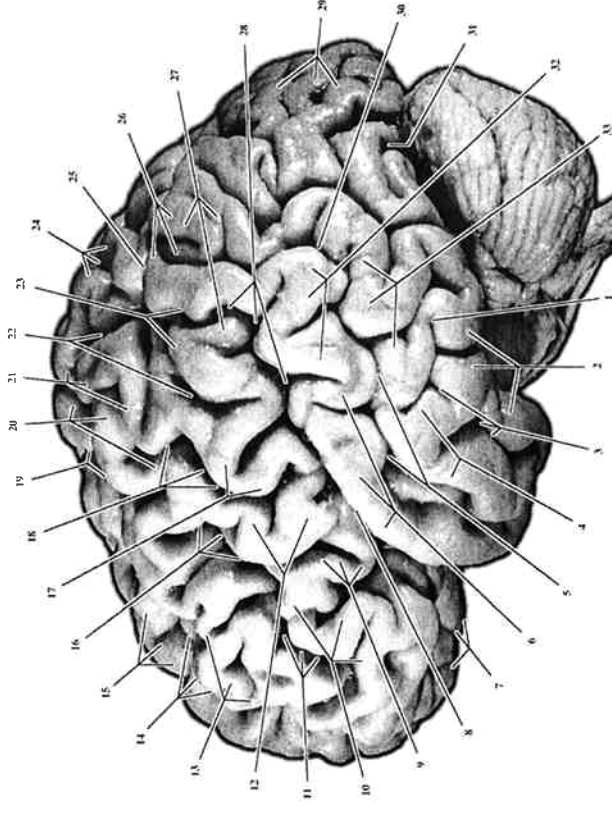
Musizieren ist eine äußerst komplexe Tätigkeit, die eine Vielzahl kognitiver Prozesse erfordert und zu einer Reihe funktioneller und struktureller Anpassungen des Gehirns führt. Die Untersuchung von Unterschieden zwischen Musikern und Nichtmusikern baut auf Studien zur Plastizität des Gehirns auf. Zum einen konnte Plastizität – als funktionelle Reorganisation des Gehirns – in Folge ausgefallener neuronaler Verbindungen nachgewiesen werden:

- (1) Im motorischen Bereich, z.B. als Folge von Amputationen (bei Tieren z.B. von KE-LAHAN/DOETSCH 1984; MERZENICH et al. 1984; PONS et al. 1991; bei Menschen z.B. von RAMACHANDRAN et al. 1992; FLOR et al. 1995).
- (2) Im auditorischen Bereich z.B. nach Läsionen von Teilen der Cochlea (ROBERTSON/IRVINE 1989).

Zum anderen konnte sie auch als Folge zusätzlichen Trainings nachgewiesen werden:

- (1) Im motorischen Bereich z.B. nach Training in einer Feinmotorikaufgabe oder nach dem Erlernen von Braille-Schrift (bei Tieren z.B. von JENKINS et al. 1990; RECANZONE et al. 1992a, 1992b; bei Menschen z.B. von PASCUAL-LEONE/TORRES 1993; PASCUAL-LEONE et al. 1995; KARNI et al. 1995; WANG et al. 1995).
- (2) Im auditorischen Bereich z.B. nach Training in einer Frequenzdiskriminationsaufgabe (bei Tieren z.B. RECANZONE/SCHREINER/MERZENICH 1993; bei Menschen z.B. CANSINO/WILLIAMSON 1997) oder nachdem Ratten einer Umgebung mit komplexen Tönen ausgesetzt wurden (ENGINEER et al. 2004). Auch Rückbildungen kortikaler Repräsentationen finden sich, z.B. wenn Ratten einer Umgebung mit ständigem moderaten Lärm ausgesetzt wurden (CHANG/MERZENICH 2003) oder nach dem Hören von Musik, aus der eine Frequenz entfernt wurde (PANTEV et al. 1999).

Abb. 1: Laterale Ansicht des Gehirns (modifiziert nach WARNER 2001) – [1, 3] *sulcus temporalis medium*; [2] *gyrus temporalis inferior*; [4, 33] *gyrus temporalis superior*; [7] *gyri orbitofrontalis*; [8, 28] Sylvische Fissur; [9] *gyrus frontalis inferior, pars opercularis*; [10] *gyrus frontalis inferior*; [11] *sulcus frontalis inferior*; [12, 20] *gyrus precentralis*; [13] *gyrus frontalis medium*; [14] *sulcus frontalis superior*; [15] *gyrus frontalis superior*; [16, 19] *sulcus precentralis*; [17, 21] *gyrus postcentralis*; [18] Rolandische Fissur (*sulcus centralis*); [22] *sulcus postcentralis*; [23] *gyrus supra-marginalis*; [24] *lobulus parietalis superior*; [25] *sulcus interparietalis*; [26] *gyrus angularis*; [27] *lobulus parietalis inferior*; [29] *gyri occipitalis lateralis*; [31] *incisura preoccipitalis*



Quelle:

Unterschiede zwischen den Gruppen mit unterschiedlicher musikalischer Expertise sollen sich besonders deutlich für die Planung und Ausführung motorischer Bewegungen und für die auditorische Verarbeitung nachweisen lassen. Für beide Bereiche existieren daher eine Vielzahl von Studien, die in den folgenden Absätzen überblicksartig dargestellt werden.

Einen wichtigen Fragenkomplex neurokognitiver Forschung zu den Einflüssen musikalischer Trainings stellt die Untersuchung von Unterschieden in Bezug auf die Planung und Ausführung motorischer Bewegungen dar. Die erhöhten Anforderungen an

die motorische Verarbeitung bei Musikern ist u.a. verbunden mit einem höheren Ausmaß an zu verarbeitenden somatosensorischen Informationen.

In einer Morphometrie-Studie von SCHLAUG et al. (1995) wurden Unterschiede im *corpus callosum* (einem Bündel von Faserverbindungen zwischen den beiden Hirnhemisphären) berichtet. Bedingt ist diese Veränderung dadurch, dass Musizieren oft komplexe beidhändige Bewegungen erfordert, die eine stärkere inter-hemisphärische Kommunikation notwendig machen. Vergleichbare Ergebnisse fanden LEE/CHEN/SCHLAUG (2003), OZTURK et al. (2002) und SCHMITHORST/WILKE (2002). BANGERT und ALTENMÜLLER (2003) trainierten zwei Gruppen von Personen, die begannen, ein Instrument zu lernen. Eine Gruppe lernte das Klavierspielen über die übliche Tonhöhe-zu-Tastenzuordnung. In der anderen Gruppe war die Zuordnung eines Tones zu einer Taste zufällig und wurde in jeder Trainingssitzung verändert. Nur für die Gruppe mit der festen Zuordnung zeigte sich eine stärkere Aktivierung rechts-anteriorer Regionen, die der Integration auditorischer und motorischer Informationen dienen. Die Ergebnisse zeigten eine stabile (auch nach fünf Wochen noch erhaltene) und schnelle Veränderung (bereits nach 20 min Training) der zugrundeliegenden Verarbeitungsprozesse.

HUTCHINSON et al. (2003) konnten neben signifikanten Unterschieden zwischen Musikern und Nichtmusikern im absoluten und im relativen Volumen des Cerebellums<sup>5</sup> auch eine positive Korrelation des relativen Volumens mit der Intensität des Übens nachweisen. Verhaltensstudien konnten zeigen, dass Klavierspieler eine größere Genauigkeit bei Bewegungen haben und leichter einzelne Finger unabhängig voneinander bewegen können (SLOBOUNOV et al. 2002). Überraschenderweise geht die größere Schnelligkeit und Genauigkeit der Ausführung von Bewegungen bei Klavierspielern mit einem verringerten Ausmaß an Gehirnaktivität einher (KRINGS et al. 2000). Vermutlich führt das Üben zu einer starken Automatisierung, verbunden mit einer erhöhten Effizienz der Bewegungen, die sich in der Verringerung der zerebralen Aktivierung widerspiegelt. RAGERT et al. (2004) konnten außerdem zeigen, dass professionelle Pianisten eine deutlich erhöhte Berührungsempfindlichkeit ihrer Finger aufwiesen. Diese erhöhte Empfindlichkeit korrelierte mit dem Umfang des täglichen Übens während der Jahre intensiven musikalischen Trainings. Nicht zuletzt, scheint es für Musiker einfacher zu sein, mentale Pläne (mit denen eine bestimmte Handlung vorbereitet wird) auf andere Handlungen zu transferieren (PALMER/MEYER 2000).

ELBERT et al. (1995) konnten nachweisen, dass die somatosensorischen Repräsentationen der Finger der linken Hand bei Musikern vergrößert sind. Die Größe der kortikalen Repräsentation war negativ mit dem Zeitpunkt korreliert, zu dem mit dem Spielen eines Instruments begonnen wurde. Das heißt, je länger ein Instrument gespielt wurde, desto größer war das Areal, in dem die Verarbeitung dieser motorischen Aktivität kortikal repräsentiert wurde. AMUNTS et al. (1997) fanden ein vergleichbares Ergebnis, als sie die anatomische Struktur des motorischen Kortex<sup>6</sup> bei Klavierspielern und Nichtmusikern verglichen. Sie beobachteten dabei eine geringere Links-Rechts-Asymmetrie bei Klavierspielern als bei Nichtmusikern.<sup>6</sup> Auch JÄNCKE/SCHLAUG/STEINMETZ (1997) fanden bei Musikern ein geringeres Maß an Links-Rechts-Asymmetrie. In beiden Fällen war das Ausmaß der Asymmetrie negativ mit dem Beginn des musikalischen Trainings korreliert. Das bedeutet, je früher begonnen wurde ein Instrument zu spielen, desto geringer war die Asymmetrie bzw. desto stärker waren Areale, welche die linke Hand repräsentieren, vergrößert.

Die Unterschiede in der Verarbeitung auditorischer Reize aufgrund musikalischen Trainings stellen den zweiten Schwerpunkt neurokognitiver Forschung dar. SCHNEIDER et al. (2002) konnten nachweisen, dass professionelle Musiker mehr graue Substanz im primären auditorischen Kortex haben, dessen Umfang mit musikalischer Fertigkeit korrelierte. Des weiteren zeigten JÄNCKE et al. (2001) in einem fMRT-Experiment, dass das Ausmaß der Aktivierung im auditorischen Kortex nach einem Frequenzdiskriminationstraining verringert war und dass die Aktivierung sich am stärksten bei den Tönen verminderte, die am leichtesten unterschieden werden konnten, was eine vereinfachte und verbesserte Verarbeitung dieser Töne indiziert.

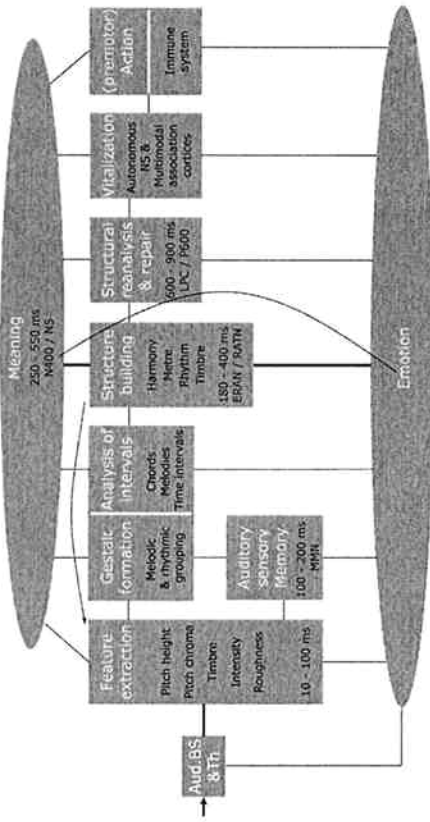
Bei der Betrachtung von anatomischen Differenzen zwischen Musikern und Nichtmusikern im gesamten Gehirn konnten GASER/SCHLAUG (2003) Unterschiede in einer Vielzahl von Arealen nachweisen. Im Einklang mit den zuvor beschriebenen Befunden fanden sich Unterschiede in Regionen, die der motorischen und auditorischen Verarbeitung dienen. Neben diesen Differenzen fanden sich aber auch Unterschiede in Regionen, die der Integration von Informationen aus verschiedenen Sinnesbereichen dienen. Dabei konnten zum einen Differenzen in anterior-superioren parietalen Arealen nachgewiesen werden, in denen visuell-räumliche Verarbeitung stattfindet und die der Integration von Informationen aus verschiedenen Sinnesbereichen dienen. Außerdem fanden sich auch Unterschiede im linken *gyrus frontalis inferior*. Teil dieser Hirnregion ist das Broca-Areal, für welches SLUMING et al. (2002) Unterschiede zwischen Musikern und Nichtmusikern fanden. Es ist wichtig für bestimmte Aspekte der Sprachverarbeitung.

### 3 Funktionelle Unterschiede zwischen Musikern und Nichtmusikern bei der Wahrnehmung und Produktion von Musik

Die im vorigen Abschnitt dargestellten anatomischen Unterschiede gehen oft mit funktionellen Unterschieden einher. Aus diesem Bereich gibt es eine Vielzahl von Studien, oft unter Verwendung von EEG-Messungen, da diese – wie beschrieben – eine hohe zeitliche Auflösung erlauben. Betrachten lassen sich hierbei zum einen Aspekte der zeitlichen Abfolge, der Schnelligkeit und Effizienz dieser Prozesse, die sich z.B. durch kürzere Latenzen oder eine größere Amplitude der gemessenen EKP-Komponenten nachweisen lassen. Es kann aber zum anderen auch der Frage nachgegangen werden, ob sich die zugrundeliegenden Verarbeitungsprozesse unterscheiden, z.B. indem sich unterschiedliche EKP-Komponenten in den beiden Gruppen zeigen. Zur Beschreibung der Prozesse, die bei der Wahrnehmung und der Produktion von Musik ablaufen, wurde in unserer Arbeitsgruppe ein Modell entwickelt (s. Abb. 2, KOELSCH, eingereicht).

Eine frühe, subkortikale Verarbeitung der auditorischen Signale erfolgt bereits im auditorischen Hirnstamm und im Thalamus. Die erste Stufe der kortikalen Verarbeitung ist die Merkmalsextraktion (*feature extraction*). Diese findet v.a. im primären und sekundären auditorischen Kortex statt. Dabei werden bestimmte Merkmale des auditorischen Signals extrahiert und repräsentiert. Dazu gehören z.B. die Höhe und das Chroma eines Tons (z.B. c4 oder e3), seine Klangfarbe (z.B. welches Instrument und welche Vortragsart, z.B. *pizzicato*), seine Intensität und seine Rauigkeit (z.B. ein Klaverton vs. das Kratzen von Kreide auf einer Tafel). Die hiermit verbundenen Verarbeitungs-

Abb. 2: Modell zur Beschreibung der bei der Wahrnehmung und der Produktion von Musik ablaufenden Verarbeitungsprozesse.



Quelle: KOELSCH, ...

prozesse finden in den ersten ca. 100 ms nach Beginn eines Tons statt. Sie zeigen sich deshalb v.a. in frühen EKP-Komponenten, die auch als exogene Komponenten bezeichnet werden, da sie stark von den physikalischen Eigenschaften des Stimulus' abhängen (DONCHIN/RITTER/MCCALLUM 1978).

In einer Studie von PANTEV et al. (1998) wurden in einem MEG-Experiment Unterschiede in den kortikalen Repräsentationen von Klavier- und Sinustönen bei Musikern und Nichtmusikern untersucht. Die untersuchte EKP-Komponente N1 reflektiert die Detektion einer Veränderung des auditorischen Signals, z.B. Beginn, Ende oder Frequenzänderung. Die zugrundeliegenden Verarbeitungsprozesse sind nicht-aktiv (und erfordern keine Aufmerksamkeitszuwendung). Die N1-Amplitude war bei Musikern für Klaviertöne um 25% erhöht, während sich für Sinustöne kein Unterschied fand. Das unterschiedliche Ausmaß der Aktivierung war korreliert mit dem Alter, in dem begonnen wurde, ein Instrument zu lernen. Daher lassen sich die Unterschiede als eine Konsequenz musikalischen Trainings und damit einhergehender funktioneller Reorganisation beschreiben. In einem Folgeexperiment (PANTEV et al. 2001b) konnte gezeigt werden, dass die stärkere Aktivierung sich v.a. beim „eigenen“ Instrument zeigt, was erneut auf die Einflüsse musikalischen Trainings und die der besonderen akustischen Umwelt von Musikern hindeutet. Unterschiede lassen sich aber auch für die Verarbeitung einfacher musikalisch-akustischer Reize (Sinustöne) finden. SCHNEIDER et al. (2002) konnten so zeigen, dass die N19-P30-Amplituden (frühe EKP-Komponenten, welche die Aktivität im primären auditorischen Kortex reflektieren) bei Musikern doppelt so groß ist wie bei Nichtmusikern. Die vergrößerte Amplitude sowie ein damit einhergehendes größeres Volumen an grauer Substanz im primären auditorischen Kortex sind positiv mit musikalischen Fertigkeiten korreliert. Weitere Unterschiede zeigten sich auch in behavioralen Experimenten, in denen eine bessere Unterscheidung des instrumentalen Timbres bei

Musikern nachgewiesen werden konnte (DOWLING 1984). Unterschiede fanden sich nicht nur auf Grund von musikalischer Expertise sondern auch in Folge von Training in einer Frequenzdiskriminationsaufgabe. BOSNYAK/EATON/ROBERTS (2004) konnten so zeigen, dass Nichtmusiker, die trainiert wurden amplitudenmodulierte Sinustöne zu differenzieren, verbesserte Leistungen bei der Frequenzdiskrimination zeigten, die sich auch in höheren Amplituden der untersuchten EKP-Komponenten widerspiegelten.

Die zweite Stufe des Modells (*Gestalt formation, analysis of intervals*) beschreibt das Zusammensetzen der auf der ersten Stufe extrahierten Merkmale zu auditorischen Gestalten (melodische und rhythmische Abschnitte). Des Weiteren werden auf dieser Stufe Intervalle, z.B. in Akkorden, in melodischen oder in rhythmischen Abschnitten analysiert. Eine wichtige Verarbeitungsinstanz auf dieser Stufe ist das auditorisch-sensorische Gedächtnis. Viele Experimente zur Untersuchung der Arbeitsweise des auditorischen Gedächtnisses verwenden MMN-Paradigmen (*mismatch negativity*; NÄÄ-TÄNEN 2000; vgl. auch ALHO 1995; CSEPE 1995). Bei der MMN handelt es sich um eine EKP-Komponente, die entsteht, wenn ein (z.B. in Frequenz, Dauer, etc.) abweichender auditorisch dargebotener Reiz innerhalb einer Reihe von Standardreizen dargeboten wird. Diese Reaktion des Gehirns entsteht auch, wenn Probanden die auditorischen Stimuli nicht beachten.

In einer Studie von KOELSCH/SCHRÖGER/TERVANIEMI (1999) hörten Violinisten und Nichtmusiker entweder reine oder leicht verstimmte Dur-Dreiklänge (ca. 4 Hz Abweichung beim mittleren Ton). Letztere riefen nur in Musikern eine MMN hervor. Beide Gruppen sind jedoch in der Lage, die Frequenzen, wenn sie als Einzeltöne gespielt werden, zu unterscheiden, denn in diesem Fall findet sich für beide Gruppen eine MMN. Wurden beide Gruppen gebeten, durch Tastendruck auf leicht verstimmte Akkorde zu reagieren, erkannten Nichtmusiker weniger als 1% der abweichenden Akkorde korrekt, Musiker hingegen im Mittel 83%. RÜSELER et al. (2001) präsentierten Musikern und Nichtmusikern Tonsequenzen mit unterschiedlichen zeitlichen Abständen zwischen den Tönen. Wurden Töne ausgelassen oder der Pausenabstand variiert, zeigte sich bei Musikern in allen Bedingungen eine MMN, bei Nichtmusikern erst bei erheblichen Unterschieden. Diese Ergebnisse belegen, dass Musiker ein besseres auditorisches Gedächtnis besitzen, so dass sie die gehörten Töne über längere Zeiträume integrieren und Abweichungen im Metrum besser registrieren können als die Kontrollgruppe. MÜNTE et al. (2001) fanden, dass auch die Fertigkeit von Dirigenten Klänge genau zu lokalisieren mit höheren Amplituden der gemessenen EEG-Reaktion verbunden war.

GAAB/SCHLAUG (2003) wiesen nach, dass Musiker und Nichtmusiker beim Erinnern von Tonhöhen verschiedene Hirnregionen nutzen, obwohl die Gruppen so gewählt wurden, dass die Leistungen beim Erinnern vergleichbar waren. Andere Studien konnten zeigen, dass Musiker und Nichtmusiker melodische und harmonische Aspekte von Musik unterschiedlich verarbeiten, auch wenn sie passiv Musik hören (SCHMITHORST/HOLLAND 2003). Die dargestellten Studien stützen die Annahme, dass Musiker und Nichtmusiker unterschiedliche zugrunde liegende Verarbeitungsprozesse nutzen, wenn sie Musik wahrnehmen. Der Grund hierfür sind vermutlich Unterschiede in der Art, die Musik zu analysieren und umfangreichere oder andere Assoziationen.

Die dritte Stufe des Modells (*structure building*) beschreibt die Verarbeitung struktureller Merkmale längerer Abschnitte von Musik (z.B. der Tonartzugehörigkeit von musikalischen Phrasen). Ähnlich wie Sprache besteht Musik aus einzelnen Elementen, die in hierarchisch strukturierten Sequenzen aufgebaut sind (PATEL 2003). Syntax bezeich-

net das Regelsystem für die Anordnung dieser Elemente in Sequenzen. Analog zur Sprache, wo festgelegt ist, an welcher Stelle bestimmte Wortklassen im Satz vorkommen dürfen, existieren für Musik Regeln – z.B. für angemessene Folgen von Akkorden oder rhythmische Gruppierungen – die als musikalische Struktur oder musikalische Syntax bezeichnet werden können (RIEMANN 1877).

KOELSCH/SCHMIDT/KANSOK (2002) verglichen in einem EEG-Experiment Musiker und Nichtmusiker, denen Akkordsequenzen vorgespielt wurden, die entweder auf einer regulären oder einem irregulären Akkord endeten. Hierbei zeigten Musiker mit einer größeren Amplitude der ERAN (early right anterior negativity), dass sie auf Verletzungen der musikalischen Struktur neuronal stärker reagieren als Nichtmusiker. Die ERAN ist eine EKP-Komponente, die durch schnelle und relativ automatische Prozesse der Verarbeitung musikalischer Struktur entsteht (vgl. KOELSCH et al. 2000; MAESS et al. 2001) und sich sowohl bei Musikern als auch bei Nichtmusikern nachweisen lässt. Gehörte Musik wird auf der Basis des meist impliziten Regelwissens über musikalische Struktur verarbeitet. Musiker verfügen auf Grund ihres umfangreicheren impliziten und expliziten musikalischen Wissens über spezifischere Strukturwartungen, so dass Verletzungen dieser Erwartungen zur beobachteten vergrößerten Amplitude der ERAN führen. Dies steht im Einklang mit einer Reihe von Befunden, die indizieren, dass Musiker bessere Strategien besitzen, Musik wahrzunehmen und zu erinnern (SIEGEL/SIEGEL 1977; BARTLETT/DOWLING 1980; DOWLING/LUNG/HERBOLD 1987; CARTERETTE/KENDALL 1999). Der Unterschied in der ERAN-Amplitude geht auch einher mit einer besseren behavioralen Performanz beim Beurteilen, ob es sich beim letzten Akkord einer Sequenz um ein angemessenes oder ein unangemessenes Ende handelt (KOELSCH/JENTSCHKE/SAMMLER, eingereicht). In einer fMRT-Folgestudie (KOELSCH et al. 2005) fand sich eine stärkere Aktivierung des linken und des rechten inferioren frontolateralen Kortex (*pars opercularis*) und des anterioren Teils des rechten *gyrus temporalis superior*, also von Gehirnbereichen, welche musikalische Regularitäten verarbeiten.

In einem der wenigen Experimente zum Transfer zwischen Musik und einem anderen kognitiven Bereich konnten MAGNE/SCHÖN/BESSON (2003; vgl. auch SCHÖN/MAGNE/BESSON 2004) zeigen, dass sich bei Kindern mit musikalischem Training neben besseren Leistungen beim Differenzieren kongruenter bzw. inkongruenter Enden von musikalischen und sprachlichem Material auch unterschiedliche EKP-Komponenten finden lassen, die Differenzen in der Verarbeitung in den beiden Gruppen indizieren. Die suprasgmentalen Merkmale der Sprache – ihre Prosodie – stellen so etwas wie die Musik der Sprache dar und werden wie Musik eher rechtshemisphärisch verarbeitet (vgl. FRIEDERICI/ALTER 2004). Auf Grund ähnlicher neuronaler Ressourcen dieser Verarbeitungsprozesse war es plausibel, zu erwarten, dass Kinder mit musikalischem Training auch eine veränderte Verarbeitung prosodischer Eigenschaften von Sprache haben. Im Experiment wurden zum einen Sprachstimuli (Sätze aus Kinderbüchern) verwendet, bei denen die Grundfrequenz<sup>8</sup> des letzten Wortes nicht verändert wurde, eine leichte Erhöhung (35%) oder eine deutliche Erhöhung (120%) erfuhr. Zum anderen wurden Musikstimuli (Kinderlieder) genutzt, bei denen die letzte Note nicht verändert, leicht erhöht (1/5-Ton) oder deutlich erhöht (1/2-Ton) wurde. Aufgabe der Probanden war, die inkongruenten Stimuli zu erkennen. Generell waren die Leistungen in der Prosodie-Aufgabe besser als in der Musik-Aufgabe. Musiker hatten generell bessere Leistungen als Nichtmusiker, besonders bei schwacher Inkongruität. Für die Verarbeitung von Musik fand sich nur bei Kindern mit musikalischem Training eine frühe Negativierung (maxi-

mal um 200 ms, vergleichbar der ERAN [s. oben]), gefolgt von einer Positivierung (P3a) in beiden Gruppen, die eine Aufmerksamkeitszuwendung widerspiegelt. Für sprachliches Material zeigte sich für Kinder ohne musikalisches Training eine stärkere Negativierung (möglichweise eine N400), die eine verstärkte Konzentration auf die Semantik in dieser Gruppe nahe legt und erneut ein P3a-ähnliches Muster. Die Studie weist nach, dass beide Gruppen vermutlich unterschiedliche Verarbeitungsstrategien für das Ausführen der gleichen Aufgabe nutzen.

Neben den dargestellten Studien konnten auch weitere EEG-Studien Unterschiede in den Verarbeitungsstrategien von Musikern und Nichtmusikern aufzeigen, die sich in quantitativer (z.B. Latenz, Amplitude) oder qualitativer unterschiedlicher Ausprägungen der untersuchten EKP-Komponenten äußerten (vgl. MÜNTE et al. 2003; PANTEV et al. 2003).

#### 4 Entwicklung der Musikwahrnehmung

Ähnlich wie die Betrachtung von Plastizität Einblicke erlaubt, welche Veränderungen im Gehirn die Folge vermehrten musikalischen Trainings sind, erlaubt auch der Blick auf Veränderungen im Entwicklungsverlauf Rückschlüsse auf eine Modifikation der neuronalen Verarbeitungsprozesse. Bei den Prinzipien des Wahrnehmens und des Erinnerns von Musik lassen sich angeborene Dispositionen und Erfahrungen mit der Musik der eigenen Kultur unterscheiden. So lassen sich Merkmale finden, die in fast jeder musikalischen Kultur vorkommen (z.B. melodische Konturen) und Merkmale, die eher typisch für bestimmte musikalische Kulturen sind (z.B. Dur-moll-tonale Harmonie in westlicher Musik). Merkmale, die kulturübergreifend vorkommen, sind meist einfacher wahrnehmbar, so dass Kinder leichter die melodische Kontur eines Stückes erinnern und Verletzungen der Kontur erkennen können. Sie verarbeiten Musik meist in ähnlicher Weise wie Erwachsene. Die Unterschiede, die sich innerhalb der Entwicklung finden lassen, ergeben sich auf Grund des unterschiedlichen Ausmaßes an Erfahrungen mit der Musik der eigenen Kultur. Durch das Akumulieren solcher Erfahrung entstehen oder verändern sich die zugrundeliegenden neuronalen Repräsentationen.

Säuglinge bevorzugen die „musikalische“ Gestaltung von sprachlichen Mitteilungen ihrer Eltern („motherese“ oder „babytalk“). Diese zeichnen sich durch eine erhöhte Tonlage, starke Variationen der Grundfrequenz, verlangsamtes Tempo, betonte Rhythmik, viele Wiederholungen und einen starken emotionalen Gehalt aus. Kinder wenden sich diesen Nachrichten affektiv und attentional stärker zu. Wahrscheinlich erleichtern diese musikalischen Merkmale der Sprache die Segmentierung des Sprachflusses und das Extrahieren von Sinn aus sprachlichen Mitteilungen (*prosodic bootstrapping*-Theorien; vgl. PINKER 1989; MORGAN/DEMUTH 1996; HÖHLE/WEISSENBORN 1999). Daher sind psychologische Qualitäten von Klängen (z.B. Tonhöhe, Dauer, Lautstärke und Klangfarbe) nicht nur für Musik sondern auch für Sprache bedeutsam (TREHUB 2000). Sich wiederholende Sequenzen von Tönen werden auf Grund von ähnlichen Tonhöhen, Klangfarben etc. gruppiert, wobei die Wahrnehmung melodischer und rhythmischer Muster interagiert und fehlende Übereinstimmung beider Muster zu schlechterer Verarbeitung führt. Diese Einflüsse des auditorischen Kontexts haben Parallelen in der Sprachverarbeitung – so lenken Rhythmusvariationen die Aufmerksamkeit auf wichtige Teile der Nachricht und die Bildung perzeptueller Kategorien und Äquivalenzklassen

beruht auf der Auswertung der zeitlichen Struktur. Ähnlich wie Erwachsene (PERETZ/MORAI 1980; PERETZ 1987) zeigen bereits Säuglinge (im achten Lebensmonat; BALABAN/ANDERSON/WISNIEWSKI 1998) eine Präferenz des linken Ohrs für die Verarbeitung von Konturen und des rechten Ohrs für die von Intervallen.

Wie zuvor bei der Betrachtung der Auswirkungen musikalischen Trainings soll wieder das dort vorgestellte Modell (Abbildung 2) zu Hilfe genommen werden, um die Besonderheiten der kindlichen Wahrnehmung von Musik auf den verschiedenen Verarbeitungsebenen darzustellen.

Die Verarbeitungsschritte der Merkmalsextraktion (*feature extraction*) sind nicht nur für das Wahrnehmen von Musik wichtig, sondern auch für die Verarbeitung von Sprache. KRUMHANSL/JUSCZYK (1990) konnten zeigen, dass bereits Säuglinge (im sechsten Lebensmonat) erkennen können, ob sich die Pausen in musikalischen Phrasen an angemessenen Stellen befinden. Die Säuglinge nutzen zur Segmentierung und Gruppierung der gehörten Musik vermutlich verschiedene Hinweisreize, wie Veränderungen der Tonhöhe, der Dynamik und des Timbres, Verlängerung der letzten Note und Veränderungen der melodischen Kontur bzw. der metrischen, tonalen oder harmonischen Betonung. Sie bevorzugen daher natürliche Pausen und wenden natürlich gegliederten Stücken länger ihre Aufmerksamkeit zu. Dieser Befund bedeutet auch, dass die Segmentierung von Musik keine ausgeprägte musikalische Erfahrung zu benötigen scheint. Stattdessen scheinen die beschriebenen Hinweisreize eine angemessene Segmentierung des musikalischen Stroms zu ermöglichen. Eine große Bedeutung hat die Verwendung dieser Hinweisreize auch beim Erlernen von Sprache (s. oben, *prosodic-bootsstrapping*-Theorien).

Eine EEG-Studie von PANG/TAYLOR (2000) geht der Frage nach, wie sich die NI entwickelt. Im Laufe der Entwicklung wird zunächst eine höhere Zahl von Synapsen (~150%) für die Generierung dieser Reaktion verwendet, diese Anzahl verringert sich jedoch und führt mit ca. 3 Jahren zu einer Reaktion, die der NI von Erwachsenen ähnelt. SHAHIN/ROBERTS/TRAINOR (2004) gingen einer Veränderung der auditorisch evozierbaren Potentiale (AEP) im Entwicklungsverlauf und in Abhängigkeit von musikalischem Training nach. Gemessen wurden diese Potentiale bei Klavier-, Violin- und Sinustönen. Einige der gemessenen Potentiale (P1) waren bei Kindern, welche musikalisches Training erhielten, für alle verwendeten Töne vergrößert, bei anderen (P2) zeigte sich ein spezifischer Einfluss des gelehrten Instruments. Die AEPs von vier bis fünf Jahre alten Kindern, die ein Instrument lernten, waren vergleichbar denen von 3 Jahre älteren Kindern. Dies indiziert, dass die Entwicklung der für die Verarbeitung von Tönen verwendete Neuronenpopulation vom Ausmaß der Erfahrung abhängig ist. Kinder, die kein musikalisches Training erhielten, müssen die notwendige Erfahrung daher über einen längeren Zeitraum akkumulieren und erreichen daher eine vergleichbare Stufe der Entwicklung dieser Verarbeitungsprozesse erst zu einem späteren Zeitpunkt.

Für die Stufe der Merkmalsintegration (*Gestalt formation, analysis of intervals*) existiert eine Reihe von Kinder-Studien mit MMN-Paradigmen. Darunter gibt es kaum Studien zur Musikwahrnehmung, aber einige Studien zur Verarbeitung prosodischer Elemente (Betonung, Rhythmen, etc.) der Sprache. In einer solchen Studie verglichen WEBER et al. (2004) die beiden Betonungsmuster des Trochäus (erste Silbe betont, [baa-baa]) und des Jambus (zweite Silbe betont [ba-baa]). Säuglinge im vierten Lebensmonat zeigen keine erkennbare Detektionsreaktion (MMN) wenn ein einzelner Stimulus des abweichenden Betonungsmusters innerhalb vieler Stimuli des anderen Musters darge-

botten werden (z.B. ein einzelner Trochäus in einer Reihe von Jamben und *vice versa*). Im fünften Lebensmonat sind sie dagegen in der Lage, den Trochäus (d.h. das im Deutschen häufiger vorkommende Betonungsmuster) in einer Reihe von Jamben zu detektieren.

In den Bereich der Verarbeitung musikalischer Struktur (*structure building*) gehören z.B. das Erkennen von Veränderungen einer Melodie oder das Erkennen von Ausschnitten aus Musikstücken. Kinder haben zunächst ein geringes implizites Wissen über Tonartzugehörigkeit (KRUMHANSL/KEIL 1982; TRAINOR/TREHUB 1992; 1993; 1994). Der Erwerb solcher – die musikalische Struktur betreffender – Regeln wird dadurch erleichtert, dass die meisten Kinderlieder häufige Wiederholungen musikalischer Muster enthalten und dass sie strukturell eher einfach aufgebaut sind, z.B. enden die Lieder meist auf einer Tonika und weisen viele Wiederholungen von Tönen auf. Dieser Lernprozess ist vermutlich primär gebunden an Häufigkeitsverteilungen (vgl. TILLMANN/BHARUCHA/BIGAND 2000), aber auch deren Interaktion mit Wahrnehmungsdispositionen. Auf Grund solcher Dispositionen verarbeiten Kinder Musik bevorzugt relational und bevorzugen einfache Frequenz- und Rhythmusbeziehungen (vgl. TREHUB 2000). Die Verarbeitung von Melodie und Rhythmus basiert auf der Extraktion der Beziehungen zwischen den einzelnen Tönen. Die Gruppierung erfolgt oft in Anlehnung an Gestaltungsprinzipien, d.h. auf Grund von Nähe, Kontinuität, Zusammenhang, Ähnlichkeit und Geschlossenheit. Bei der Rhythmusverarbeitung werden die Töne aufgrund von Frequenz, Dauer und Intensität gruppiert. Das Erkennen einer Melodie basiert meist auf einer abstrakten Repräsentation der melodischen Kontur, d.h. von Informationen über den Verlauf der Tonhöhe.

Kinder beurteilen daher Musik, deren Kontur oder deren Rhythmus verändert wurde, als ungleich. TRAINOR/TREHUB (1992) untersuchten die Fähigkeit von Kindern und Erwachsenen, herauszufinden, ob Melodien sich gleichen oder ob sie verändert wurden. Die Melodien blieben gleich oder ein Ton der Melodie wurde so modifiziert, dass er entweder weiter zur Tonart der Melodie gehörte oder nicht. Kinder sind in der Lage, beide Arten von Abweichung zu detektieren – anders als Erwachsene, die eher Veränderungen, die mit dem Verlassen der Tonart verbunden sind, erkennen.

SAFFRAN/LOMAN/ROBERTSON (2000) konnten zeigen, dass bereits Säuglinge (im siebten Lebensmonat) in der Lage sind, längere Passagen aus einem Musikstück wiederzuerkennen. Die Kinder wurden 14 Tage lang mit Passagen aus Klaviersonaten (20 sec aus der Satzmitte) vertraut gemacht. Danach zeigten sie eine Präferenz für neue Passagen, vermutlich wegen der Unnatürlichkeit der Wahl der Ausschnitte (aus der Mitte des Satzes). Wurde dagegen der Beginn der Sonatensätze gewählt ergab sich eine deutliche Präferenz für die bekannten Passagen. Dies erlaubt drei Schlussfolgerungen: (1) Kinder erinnern gehörte Musik, (2) der Kontext ist relevant, z.B. ob der Beginn oder die Mitte eines Musikstücks erinnert werden soll und (3) Kinder haben hoch entwickelte Fähigkeiten der Musikwahrnehmung, d.h. sie hören nicht undifferenziert Sequenzen von Tönen, sondern setzen Passagen zu kohärenten musikalischen Ereignissen zusammen. Dies steht im Einklang mit Befunden, die zeigen, dass Kinder strukturierte Informationen leichter implizit lernen und erinnern.

Neben Verhaltensstudien existieren auch EEG- und fMRT-Studien, in denen die Verarbeitung musikalischer Struktur bei Kindern untersucht wurde. Verwendet wurden hier – wie im oben beschriebenen Experiment (KOELSCH et al. 2002) – Akkordsequenzen, die entweder mit einem regulären oder einem irregulären Akkord endeten.

KOELSCH et al. (2003) wiesen nach, dass bereits Fünfjährige mit einer ERAN auf diese Strukturverletzung reagieren und daher Repräsentationen musikalischer Regularitäten besitzen und dass die ERAN-Amplitude sich in Abhängigkeit vom Grad der Verletzung der musikalischen Struktur verändert. KOELSCH et al. (2005) konnten außerdem zeigen, dass Kinder im wesentlichen dasselbe kortikale Netzwerk zur Verarbeitung musikalischer Struktur nutzen wie Erwachsene.

JENTSCHKE/KOELSCH/FRIEDERICI (2005) untersuchten (1) den Entwicklungsverlauf der Prozesse, die der Verarbeitung musikalischer und linguistischer Syntax zugrunde liegen, (2) Unterschiede in diesen Verarbeitungsprozessen bei Kindern mit und ohne musikalischen Training und (3) ob sich ein positiver Transfereffekt von Musik zur Sprache als Folge musikalischen Trainings finden lässt. Ausgehend von dem Wissen, dass die Verarbeitungsprozesse von sprachlicher Syntax und musikalischer Struktur eine Reihe von Gemeinsamkeiten aufweisen und in vergleichbaren Hirnregionen ablaufen, war es plausibel anzunehmen, dass es solche Transfereffekte geben könnte. Eine weitere Fragestellung war, ob Kinder mit einer Sprachentwicklungsstörung, sowohl bei der Verarbeitung von sprachlicher als auch von musikalischer Struktur Auffälligkeiten aufweisen. Versuchsteilnehmer waren zum einen Kinder mit und ohne musikalisches Training (zehntes bis elftes Lebensjahr), zum anderen Kinder mit einer Sprachentwicklungsstörung und sprachnormale Kinder (viertes bis fünftes Lebensjahr). Diesen Kindern wurden in einem Experiment Akkordsequenzen dargeboten, die entweder ein reguläres oder ein irreguläres Ende aufwiesen (bei einem irregulären Ende bildete eine Subdominante parallel den Abschluss der Sequenz, diese tritt normalerweise nicht am Ende von musikalischen Phrasen auf). In einem zweiten Experiment hörten sie syntaktisch korrekte bzw. inkorrekte Sätze (vgl. HAHNE/ECKSTEIN/FRIEDERICI 2004; z. B. „Die Forelle wurde geangelt.“ vs. „Der Karpfen wurde im geangelt.“). Die musikalisch trainierten Kinder zeigten eine größere ERAN-Amplitude. Daraus lässt sich ableiten, bereits einige Jahre musikalischen Trainings bei Kindern ausreichen, um die in der ERAN reflektierten Prozesse der Verarbeitung musikalischer Struktur bei diesen Kindern effizienter ablaufen zu lassen. Außerdem zeigte sich auch eine größere Amplitude der syntaktischen Negativierung, die mit Prozessen der sprachlichen Syntaxverarbeitung verbunden ist. Kinder mit musikalischem Training zeigen daher auch eine effizientere Verarbeitung sprachlicher Syntax. Somit ließ sich ein positiver Transfer von der Musik- in die Sprachdomäne nachweisen. Musikalisches Training kann also nicht nur zur Veränderung der Verarbeitungsprozesse bei der Musikwahrnehmung führen, sondern auch Prozesse der Syntaxverarbeitung im Sprachbereich fördern. Umgekehrt zeigte sich bei den sprachentwicklungsgestörten Kindern keine ERAN. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass sprachlicher Syntax- und musikalischer Strukturverarbeitung ähnliche neuronale Prozesse zugrunde liegen.

Musik ist auch in der Lage Emotionen (*emotion* in Abbildung 2) hervorzurufen und Stimmungen zu verändern. Repräsentationen auf annähernd allen Verarbeitungsstufen der Musikwahrnehmung können Emotionen auslösen, z. B. durch Konsonanz bzw. Dissonanz (KOELSCH/FRITZ 2003) oder durch die Erfüllung oder Nichterfüllung musikalischer Erwartungen, die zum Empfinden von Anspannung oder Entspannung führen (MEYER 1956). Beispielsweise werden durch Kinderlieder die Stimmung und die Aufmerksamkeit des Kindes moduliert (z. B. sind schnelles Tempo und hohe Tonlage mit Fröhlichkeit, Zuneigung, Zärtlichkeit und erhöhter Erregung [*arousal*] verbunden; TREHUB 2000). DALLA BELLA et al. (2001) untersuchten, wie sehr der affektive Gehalt von

Musikstücken durch das Tempo und den Modus (Dur vs. moll) bestimmt wird. Die Gewichtung beider Einflussgrößen ändert sich im Laufe der Entwicklung: Erwachsene reagieren auf Veränderungen des Modus stärker als auf Tempovariationen, ältere Kinder (sechstes bis achttes Lebensjahr) sind sensitiv für beide Faktoren und jüngere Kinder (fünftes Lebensjahr) gründen ihre Beurteilung eher auf Tempoveränderungen. Diese Befunde zeigen, dass auch komplexe, gelernte Repräsentationen (z. B. musikalischer Regularitäten) beim Empfinden einer Emotion eine Rolle spielen können – Kinder reagieren zwar bereits im ersten Lebensjahr auf Veränderungen des Tempos (BARUCH/DRAKE 1997), strukturelle Eigenschaften der Musik (z. B. Modus) werden erst später auf Grund zunehmender Erfahrung mit Musik der eigenen Kultur erworben.

RAUSCHER/SHAW/KY (1993) meinten, einen „Mozart-Effekt“ nachweisen zu können. Sie fanden verbesserte Leistungen beim räumlichen Denken nach dem Hören eines zehnmütigen Ausschnitts aus Mozarts Sonate für zwei Klaviere (D-Dur, KV 448). Wiederholungen des Experiments mit erweiterter Instruktoren (u. a. der Instruktoren, sich zu entspannen) und zusätzlichem Versuchsmaterial (z. B. ein Ausschnitt aus einer Erzählung von Stephen King, „*Music with Changing Parts*“ von Philip Glass und Entspannungsmusik) konnten aber nicht replizieren, dass der Effekt mit dem Hören Mozartscher Musik verbunden ist (STEELE et al. 1999; NANTAIS/SHELLENBERG 1999). Stattdessen konnten THOMPSON/SHELLENBERG/HUSAIN (2001) zeigen, dass die Leistungen beim räumlichen Denken abhängig von der durch die Musik induzierten Freude, Erregung [*arousal*] und Stimmungslage waren. Würden Unterschiede in diesen Einflussgrößen statistisch kontrolliert, verschwand der „Mozart-Effekt“. Eine ähnliche Erklärung (Freude und Erregung als Moderator) fand eine Meta-Analyse verschiedener Replikationsversuche des Mozart-Effekts von CHABRIS (1999).

## 5 Schlussfolgerungen

Dargestellt wurden in den vorangegangenen Abschnitten Studien, in den anatomische und funktionelle Unterschiede von Musikern und Nichtmusikern sowie Veränderungen im Entwicklungsverlauf.

In den ersten beiden Abschnitten konnte beim Vergleich von Musikern und Nichtmusikern eine Vielzahl von anatomischen und funktionalen Unterschieden in der neuronalen Verarbeitung gezeigt werden. Diese Unterschiede zeigen sich auch auf verschiedenen Verarbeitungsebenen – sowohl bei einfachen (z. B. Repräsentation von Tonhöhen) und komplexen Merkmalen akustischer Reize (z. B. Intervallbeziehungen, metrische Beziehungen und räumliche Lokalisation) als auch auf der Ebene struktureller Beziehungen (musikalische Syntax) und bei der Vorbereitung und Ausführung motorischer Handlungen. Ähnlich wie sich ein Zusammenhang zwischen herausragenden Fertigkeiten und dem Ausmaß des Übens nachweisen ließ (ERICSSON/KRAMPE/TERSCHE-RÖMER 1996) sind die Veränderungen neuronaler Verarbeitungsprozesse höchstwahrscheinlich nicht Voraussetzung sondern Ergebnis musikalischen Trainings. Das zeigen besonders die Studien, welche eine korrelative Beziehung zwischen der Veränderung der Verarbeitungsprozesse und ihren neuronalen Grundlagen mit dem Ausmaß des musikalischen Trainings nachweisen konnten (ELBERT et al. 1995; AMUNTS et al. 1997; RAGERT et al. 2004). Weitere Evidenz hierfür bieten Studien, die instrumentspezifische Unterschiede in der Verarbeitung nachweisen konnten (PANTEV et al. 2001b; MÜNTE et al.

2003). Nicht zuletzt gehen unterschiedliche neuronale Verarbeitungsmechanismen mit zahlreichen behavioralen Unterschieden zwischen Musikern und Nichtmusikern einher, für die sich (zumindest zum Teil) eine Beziehung mit der Intensität des Übens oder bestimmten Fertigkeiten finden lässt (AMUNTS et al. 1997; SCHNEIDER et al. 2002). Musiker sind also aufgrund ihres intensiven Trainings in der Lage, viele der Verarbeitungsprozesse, die der Wahrnehmung und der Produktion von Musik dienen, schneller und effizienter auszuführen als Nichtmusiker. Die Befunde zeigen, dass das Ausführen komplexer, herausfordernder Aufgaben und die besonderen Fertigkeiten von Musikern eher Lernprozessen zuzuschreiben sind und dass Begabung eine untergeordnete Rolle spielen dürfte (vgl. KOELSCH 2001).

Ebenso wie zuvor für anatomische und funktionelle Unterschiede zwischen Musikern und Nichtmusikern finden sich auch bei einer Betrachtung des Entwicklungsverlaufs der Musikwahrnehmung Hinweise auf eine Anpassung des Gehirns an die zu leistenden Verarbeitungsprozesse. Diese laufen oft mit zunehmendem Alter schneller und genauer ab oder Kinder gewinnen Fertigkeiten hinzu, die sich in neuen oder veränderten neuronalen Verarbeitungsprozessen äußern.

Sowohl für die Auswirkungen musikalischen Trainings als auch für Entwicklungsveränderungen findet sich eine Vielzahl von Hinweisen auf eine Anpassung des Gehirns und der Verarbeitungsprozesse an die Anforderungen der Umwelt. Die bessere Verarbeitung von Musik bei Musikern resultiert dabei nicht allein aus musikalischen Fertigkeiten sondern auch aus deren Verknüpfung mit anderen Fähigkeiten. Obwohl einleuchtend ist, dass Musik auch zur Modulation von Stimmungen beiträgt und dass Musizieren in einer Gruppe Prozesse des sozialen Zusammenhalts fördert, gibt es leider kaum Studien, die solche komplexeren kognitiven Prozesse untersuchen und die uns Aufschluss über die dabei zugrundeliegenden Verarbeitungsprozesse im Gehirn geben. Zwar gibt es bisher nur wenige Studien zum Transfer durch musikalisches Training erwerbener oder veränderter Verarbeitungsprozesse auf andere kognitive Bereiche. MAGNE et al. (2003), SCHÖN et al. (2004) und JENTSCHKE et al. (2005) konnten aber solche Transfereffekte für bestimmte Aspekte der Musik- und Sprachverarbeitung nachweisen. Ein wichtiges Fazit aus den dargestellten Studien ist, dass herausragende Fertigkeiten gelernt werden können. Hirnforschung kann – durch Aufdecken der zugrundeliegenden Verarbeitungsmechanismen – helfen, diese Lernprozesse besser zu verstehen. Sie kann so der Pädagogik bei ihrer Aufgabe helfen, den Erwerb grundlegender und besonderer Fertigkeiten zu unterstützen.

## Anmerkungen

- 1 Im Gegensatz zu Fähigkeiten, bei denen es sich um angeborene Attribute handelt, werden Fertigkeiten erlernt. Das Erlernen einer Fertigkeit ist aber nicht ausschließlich von Fähigkeiten abhängig, sondern auch von Übung, bereits Erlerntem und inneren Voraussetzungen (z.B. Motivation). Der Begriff der Begabung als spezielle oder überdurchschnittliche Fähigkeit ist umstritten, eine kni-sche Diskussion findet sich in KOELSCH (2001).
- 2 Nicht-invasiv bedeutet, dass für eine Anwendung von MRT keine Gegenstände oder Medikamente in den Körper eingeführt werden müssen (z.B. werden keine Kontrastmittel injiziert) und dass auch keine (in höheren Dosen gewebsbeschädigenden) Röntgenstrahlen genutzt werden.
- 3 MEG ähnelt in seiner Funktionsweise dem EEG, bei MEG werden jedoch an Stelle von Spannungsdifferenzen Unterschieden in der magnetischen Feldstärke gemessen.

- 4 Ereigniskorrelierte Potentiale (EKP) sind Wellenformen im EEG, die entweder von Sinneswahrnehmungen ausgelöst oder mit kognitiven Prozessen korreliert sind. Komponenten sind Teile dieser Wellenformen, die in einem zeitlich umschriebenen Bereich auftreten (z.B. 80-100 ms nach dem Reiz) und die eine bestimmte Polarität aufweisen (Positivierung oder Negativierung, dies bedeutet z.B. eine verstärkte Aktivierung von Nervenzellen bzw. Faserverbindungen). Beispiele für EKPs sind: P1, N1, P2, MMN oder ERAN.
- 5 Das Cerebellum dient der unbewussten Steuerung der Motorik, dem motorischen Lernen, der sensorimotorischen Integration und der Zeitanpassung motorischer Reaktionen. Relatives Volumen bezeichnet das Volumen des Cerebellum relativ zur Größe des gesamten Gehirns.
- 6 Nichtmusiker sind meist Rechtshänder und weisen daher vergrößerte motorische Repräsentationen in der linken Hemisphäre auf. Die Asymmetrie ist bei rechtshändigen Klavierspielern nicht so deutlich ausgeprägt.
- 7 Detektion ist die Fähigkeit des Entdeckens oder Registrierens von Unterschieden.
- 8 Veränderungen in der Grundfrequenz ( $F_0$ ) sind z.B. entscheidend für die Klassifikation in Aussagen und Fragesätze, so dass parametrische Veränderungen der  $F_0$  verwendet werden können, um zu untersuchen, ob solche Veränderungen für Sprache und Musik vergleichbare Auswirkungen haben.
- 9 Bei AEPs handelt es sich um Potentiale, die exogen, d.h. z.B. durch das Hören eines Tones evoziert werden.

## Danksagung

Wir möchten Katrin Schulze für ihre Hilfe bei der Darstellung von Studien zur Plastizität danken. Julia Griener, Clemens Maidhof, Julia Neugebauer, Stephan Sallat und Andrea Thamm danken wir für ihre Hinweise bei der Überarbeitung dieses Manuskripts. Die Arbeit von Sebastian Jentschke wird gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (KO 2266/2-1/2).

## Literatur

- ALHO, K. (1995): Cerebral generators of mismatch negativity (MMN) and its magnetic counterpart (MMNm) elicited by sound changes. In: *Ear and Hearing*, 16, S. 38-51.
- AMUNTS, K./SCHLAUG, G./JANCKE, L./STEINMETZ, H./SCHLEICHER, A./DABRINGHAUS, A./ZILLES, K. (1997): Motor cortex and hand motor skills – structural compliance in the human brain. In: *Human Brain Mapping*, 5, S. 206-215.
- BALABAN, M.T./ANDERSON, L.M./WISNIEWSKI, A.B. (1998): Lateral asymmetries in infant melody perception. In: *Developmental Psychology*, 34, S. 39-48.
- BANGERT, M./ALTENMÜLLER, E. (2003): Mapping perception to action in piano practice – a longitudinal DC-EEG study. In: *BMC Neuroscience*, 4, S. 1-14.
- BARTLETT, J.C./DOWLING, W.J. (1980): The recognition of transposed melodies – A key-distance effect in developmental perspective. In: *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 6, S. 501-515.
- BARUCH, C./DRAKE, C. (1997): Tempo discrimination in infants. In: *Infant Behavior and Development*, 20, S. 573-577.
- BOSNYAK, D.J./JEATON, R.A./ROBERTS, L.E. (2004): Distributed auditory cortical representations are modified when non-musicians are trained at pitch discrimination with a 40 Hz amplitude modulated tones. In: *Cerebral Cortex*, 14, S. 1088-1099.
- BUONOMOANO, D.V./MERZENICH, M.M. (1998): Cortical plasticity – from synapses to maps. *Annual Review of Neuroscience*, 21, S. 149-186.
- CANSINO, S./WILLIAMSON, S.J. (1997): Neuromagnetic fields reveal cortical plasticity when learning an auditory discrimination task. In: *Brain Research*, 764, S. 53-66.
- CARTERETTE, E.C./KENDALL, R.A. (1999): *Comparative Music – Perception and Cognition*. In: DEUTSCH, D. (Hrsg.): *The Psychology of Music*. – San Diego, S. 725-791.



- CHABRIS, C.F. (1999): 'Prelude or requiem for the 'Mozart effect'? In: *Nature*, 400, S. 826.
- CHANG, E.F./MERZENICH, M.M. (2003): Environmental noise retards auditory cortical development. In: *Science*, 300, S. 498-502.
- CSEPE, V. (1995): On the origin and development of the mismatch negativity. In: *Ear and Hearing*, 16, S. 91-104.
- DALLA BELLA, S./PERETZ, I./ROUSSEAU, L./GOSSELIN, N. (2001): A developmental study of the affective value of tempo and mode in music. In: *Cognition*, 80, B1-10.
- DONCHIN, E./RITTER, W./MCALLUM, W. (1978): Cognitive Psychology – the endogenous components of the ERP. In: CALLAWAY, E./TUETING, P./KOSLOW, S. (Hrsg.): *Event-related brain potentials in man*. – New York, S. 349-411.
- DOWLING, W.J. (1984): Assimilation of tonal structure: Comment on Castellano, Bharucha and Krumhansl. In: *Journal of Experimental Psychology*, General, 113, S. 417-420.
- DOWLING, W.J./LUNG, K.M./HERBOLD, S. (1987): Aiming attention in pitch and time in the perception of interleaved melodies. In: *Perception and Psychophysics*, 41, S. 642-656.
- ELBERT, T./PANTEV, C./WIENBRUCH, C./ROCKSTROH, B./TAUB, E. (1995): Increased cortical representation of the fingers of the left hand in string players. In: *Science*, 270, S. 305-307.
- ENGINEER, N.D./PERCACCO, C.R./PANDYA, P.K./MOUCHA, R./RATHBUN, D.L./KILGARD, M.P. (2004): Environmental enrichment improves strength, threshold, selectivity, and latency of auditory cortex neurons. In: *Journal of Neurophysiology*, 92, S. 73-82.
- ERICSSON, K.A./KRAMPE, R.T./TESCH-RÖMER, C. (1993): The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance. In: *Psychological Review*, 100, S. 363-406.
- FLOR, H./ELBERT, T./KNECHT, S./WIENBRUCH, C./PANTEV, C./BIRBAUMER, N./LARBIG, W./TAUB, E. (1995): Phantom-limb pain as a preceptual correlate of cortical reorganisation following arm amputation. In: *Nature*, 375, S. 482-484.
- FRIEDERICI, A.D./ALTER, K. (2004): Lateralization of auditory language functions: A dynamic dual pathway view. In: *Brain and Language*, 89, S. 267-276.
- GAAB, N./SCHLAUG, G. (2003): The effect of musicianship in performance matched groups. In: *Neuroreport*, 14, S. 2291-2295.
- GASER, C./SCHLAUG, G. (2003): Brain structures differ between musicians and nonmusicians. In: *The Journal of Neuroscience*, 23, S. 9240-9245.
- GAZZANIGA, M.S./IVRY, R.B./MANGUN, G.R. (1998): *Cognitive neuroscience – the biology of the mind*. – New York.
- HAHNE, A./ECKSTEIN, K./FRIEDERICI, A.D. (2004): Brain signatures of syntactic and semantic processes during children's language development. In: *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16, S. 1302-1318.
- HEBB, D. (1949): *The organization of behavior: a neuropsychological theory*. – New York.
- HOHLE, B./WEISSENBORN, J. (1999): Discovering grammar: Prosodic and morpho-syntactic aspects of rule formation in first language acquisition. In: FRIEDERICI, A.D./MENZEL, R. (Hrsg.): *Learning: Rule extraction and representation*. – Berlin, S. 37-69.
- HUTCHINSON, S./HUI-LIN, L./GAAB, N./SCHLAUG, G. (2003): Cerebellar volume of musicians. In: *Cerebral Cortex*, 13, S. 943-949.
- JANCKE, L./GAAB, N./WUSTENBERG, T./SCHEICH, H./HEINZE, H.J. (2001): Short-term functional plasticity in the human auditory cortex: an fMRI study. In: *Cognitive Brain Research*, 12, S. 479-485.
- JANCKE, L./SCHLAUG, G./STEINMETZ, H. (1997): Hand skill asymmetry in professional musicians. In: *Brain and Cognition*, 34, S. 424-432.
- JENKINS, W.M./MERZENICH, M.M./OCHS, M.T./ALLARD, T./GUIC-ROBLES, E. (1990): Functional reorganisation of primary somatosensory cortex in adult owl monkeys after behaviorally controlled tactile stimulation. In: *Journal of Neurophysiology*, 63, S. 82-104.
- JENTSCHKE, S./KOELSCH, S./FRIEDERICI, A.D. (2005): Children Processing Structure in Music and Language – Influences of Musical Training and Language Impairment. Vortrag gehalten auf der Konferenz „Neurosciences and Music II“, Leipzig, 5.-8. Mai 2005.
- KARNI, A./MEYER, G./JEZZARD, P./ADAMS, M.M./TURNER, R./JUNGERLEIDER, L.G. (1995): Functional MRI evidence for adult motor cortex plasticity during motor skill learning. In: *Nature*, 377, S. 155-158.
- KELAHAN, A./DOETSCH, G.S. (1984): Time-dependent changes in the functional organization of somatosensory cerebral cortex following digit amputation in racoons. In: *Somatosensory Research*, 2, S. 49-81.
- 105 S. Jentschke/S. Koelsch: Gehirn, Musik, Plastizität und Entwicklung
- KOELSCH, S.: Towards a neural basis of music perception. Zur Veröffentlichung eingereichtes Manuskript.
- KOELSCH, S. (2001): Der soziale Umgang mit Fähigkeit: die geschlossene Gesellschaft und ihre Freunde. – Wiesbaden.
- KOELSCH, S./FRITZ, T. (2003): Untersuchung von Emotion mit Musik: eine funktionell-bildgebende Studie. In: *Sprache, Stimme, Gehör*, 27, S. 62-65.
- KOELSCH, S./FRITZ, T./SCHULZE, K./ALSOP, D./SCHLAUG, G. (2005): Adults and children processing music: An fMRI study. In: *NeuroImage*, 25, S. 1068-1076.
- KOELSCH, S./GROSSMANN, T./GUNTER, T.C./HAHNE, A./SCHROGER, E./FRIEDERICI, A.D. (2003): Children processing music: Electric brain responses reveal musical competence and gender differences. In: *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15, S. 683-693.
- KOELSCH, S./GUNTER, T.C./FRIEDERICI, A.D./SCHROGER, E. (2000): Brain indices of music processing: Non-musicians are musical. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12, S. 520-541.
- KOELSCH, S./JENTSCHKE, S./SAMMLER, D.: Investigating abstract auditory information processing with a music-syntactic mismatch negativity. Zur Veröffentlichung eingereichtes Manuskript.
- KOELSCH, S./SCHMIDT, B.-H./KANSOK, J. (2002): Effects of musical expertise on the early right anterior negativity: an event-related brain potential study. In: *Psychophysiology*, 39, S. 657-663.
- KOELSCH, S./SCHROGER, E./TERVANIEMI, M. (1999): Superior pre-attentive auditory processing in musicians. In: *Neuroreport*, 10, S. 1309-1313.
- KRINGS, T./TÖPPER, R./FOLTY, H./ERBERICH, S./SPARING, R./WILLMES, K./THRON, A. (2000): Cortical activation patterns during complex motor tasks in piano players and control subjects: A functional magnetic resonance imaging study. In: *Neuroscience Letters*, 278, S. 189-193.
- KRUMHANSL, C.L./JUSCZYK, P.W. (1990): Infants' perception of phrase structure in music. In: *Psychological Science*, 1, S. 70-73.
- KRUMHANSL, C.L./KEIL, F.C. (1982): Acquisition of the hierarchy of tonal functions in music. In: *Memory & Cognition*, 10, S. 243-251.
- LEE, D.J./CHEN, Y./SCHLAUG, G. (2003): Corpus callosum: musicians and gender effects. In: *Neuroreport*, 14, S. 205-209.
- MAESS, B./KOELSCH, S./GUNTER, T.C./FRIEDERICI, A.D. (2001): Musical syntax is processed in the area of Broca: An MEG study. In: *Nature Neuroscience*, 4, S. 540-545.
- MAGNE, C./SCHÖN, D./BESSON, M. (2003): Prosodic and melodic processing in adults and children. Behavioral and electrophysiologic approaches. In: *Annals of the New York Academy of Sciences*, 999, S. 461-476.
- MERZENICH, M.M./NELSON, R.J./STRYKER, M.P./CYNADER, M.S./SCHOPPMANN, A./ZOOK, J.M. (1984): Somatosensory map changes following digit amputation in adult monkeys. In: *Journal of Comparative Neurology*, 224, S. 591-605.
- MEYER, L. (1956): *Emotion and meaning in music*. – Chicago.
- MORGAN, J.L./DEMUTH, K. (1996): Signal to syntax: Bootstrapping from speech to grammar in early acquisition. – Hillsdale.
- MÜNTE, T.F./ALTENMÜLLER, E./JANCKE, L. (2002): The musician's brain as a model of neuroplasticity. In: *Nature Reviews Neuroscience*, 3, S. 473-478.
- MÜNTE, T.F./KOHLMETZ, C./NAGER, W./ALTENMÜLLER, E. (2001): Superior auditory spatial tuning in conductors. In: *Nature*, 409, S. 580.
- MÜNTE, T.F./NAGER, W./BEISS, T./SCHROEDER, C./ALTENMÜLLER, E. (2003): Specialization of the Specialized: electrophysiological investigations in professional musicians. In: *Annals of the New York Academy of Sciences*, 999, S. 131-139.
- NAATANEN, R. (2000): Mismatch negativity (MMN): perspectives for application. In: *International Journal of Psychophysiology*, 37, S. 3-10.
- NANTAIS, K.M./SCHELLENBERG, E.G. (1999): The Mozart effect: An artifact of preference. In: *Psychological Science*, 10, S. 370-373.
- OZTURK, A.H./TASCIOGLU, B./KURTOGLU, Z./ERDEN, I. (2002): Morphometric comparison of the human corpus callosum in professional musicians and non-musicians by using in vivo magnetic resonance imaging. In: *Journal of Neuroradiology*, 29, S. 29-32.
- PALMER, C./MEYER, R.K. (2000): Conceptual and motor learning in music performance. In: *Psychological Science*, 11, S. 63-68.
- PANG, E.W./TAYLOR, M.J. (2000): Tracking the development of the N1 from age 3 to adulthood: an examination of speech and non-speech stimuli. In: *Clinical Neurophysiology*, 111, S. 388-397.

- PANTEV, C./ENGELIEN, A./CANDIA, V./ELBERT, T. (2001a): Representational cortex in musicians. In: ZATORRE, R./PERETZ, I. (Hrsg.): *The cognitive neuroscience of Music*. – Oxford, S. 382-395.
- PANTEV, C./OSTENWELD, R./ENGELIEN, A./ROSS, B./ROBERTS, L.E./HOKE, M. (1998): Increased auditory cortical representation in musicians. In: *Nature*, 392, S. 811-814.
- PANTEV, C./ROBERTS, L.E./SCHULZ, M./ENGELIEN, A./ROSS, B. (2001b): Timbre specific enhancement of auditory cortical representations in musicians. In: *Neuroreport*, 12, S. 169-174.
- PANTEV, C./ROSS, B./FUJIOKA, T./TRAINOR, L.J./SCHULTE, M./SCHULZ, M. (2003): Music learning-induced cortical plasticity. In: *Annals of the New York Academy of Sciences*, 999, S. 438-450.
- PANTEV, C./WOLLBRINK, A./ROBERTS, L.E./ENGELIEN, A./LÜTKENHÖNER, B. (1999): Short-term plasticity of the human auditory cortex. In: *Brain Research*, 842, S. 192-199.
- PASCUAL-LEONE, A./NGUYET, D./COHEN, L.G./BRASIL-NETO, J.P./CAMMAROTA, A./HALLETT, M. (1995): Modulation of muscle responses evoked by transcranial magnetic stimulation during the acquisition of new fine motor skills. In: *Journal of Neurophysiology*, 74, S. 1037-1045.
- PASCUAL-LEONE, A./TORRES, F. (1993): Plasticity of the sensorimotor cortex representation of the reading finger in Braille readers. In: *Brain*, 116, S. 39-52.
- PATEL, A.D. (2003): Language, music, syntax and the brain. In: *Nature Neuroscience*, 6, S. 674-681.
- PERETZ, I. (1987): Shifting ear-asymmetry in melody comparison through transposition. In: *Cortex*, 23, S. 317-323.
- PERETZ, I./MORAIS, J. (1980): Modes of processing melodies and ear-asymmetry in nonmusicians. In: *Neuropsychologia*, 20, S. 477-489.
- PINKER, S. (1989): Language acquisition. In: POSNER, M. (Hrsg.): *Foundations of cognitive science*. – Cambridge, S. 359-399.
- PONS, T.P./GARRAGHTY, P.E./OMMAYA, A.K./KAAS, J.H./TAUB, E./MISHKIN, M. (1991): Massive cortical reorganisation after sensory deafferentation in adult macaques. In: *Science*, 252, S. 1857-1860.
- RAGERT, P./SCHMIDT, A./ALTENMÜLLER, E./DINSE, H.R. (2004): Superior tactile performance and learning in professional pianists: evidence for meta-plasticity in musicians. In: *European Journal of Neuroscience*, 19, S. 473-478.
- RAMCHANDRAN, V.S./ROGER-RAMACHANDRAN, D./STEWART, M./PONS, T.P. (1992): Perceptual correlates of massive cortical reorganisation. In: *Science*, 258, S. 1159-1160.
- RAUSCHER, F.H./SHAW, G.L./KY, K.N. (1993): Music and spatial task performance. In: *Nature*, 365, S. 611.
- RECANZONE, G.H./JENKINS, W.M./HRADEK, G.H./MERZENICH, M.M. (1992a): Progressive improvement in discriminative abilities in adult owl monkeys performing a tactile frequency discrimination task. In: *Journal of Neurophysiology*, 67, S. 1015-1030.
- RECANZONE, G.H./MERZENICH, M.M./JENKINS, W.M./GRAJSKI, K.A./DINSE, H.R. (1992b): Topographic reorganisation of the hand representation in cortical area 3b of owl monkeys trained in a frequency-discrimination task. In: *Journal of Neurophysiology*, 67, S. 1031-1056.
- RECANZONE, G.H./SCHREINER, C.E./MERZENICH, M.M. (1993): Plasticity in the frequency representation of primary auditory cortex following discrimination training in adult owl monkeys. In: *Journal of Neuroscience*, 13, S. 87-104.
- RIEMANN, H. (1877): *Musikalische Syntaxis: Grundriss einer harmonischen Satzbildungslehre*. – Leipzig: Niederwallut [Reprint 1971].
- ROBERTSON, D./IRVINE, D. (1989): Plasticity of frequency organization in auditory cortex of guinea pigs with partial unilateral deafness. In: *Journal of Comparative Neurology*, 282, S. 456-471.
- RUSSELLER, J./ALTENMÜLLER, E./NAGER, W./KOHLMETZ, C./MÜNTE, T. F. (2001): Event-related potentials to sound omissions differ in musicians and nonmusicians. In: *Neuroscience Letters*, 308, S. 33-36.
- SAFFRAN, J.R./LOMAN, M.M./ROBERTSON, R.R. (2000): Infant memory for musical experiences. In: *Cognition*, 77, B15-23.
- SCHLAUG, G. (2001): The brain of musicians – a model for functional and structural adaptation. In: *Annals of the New York Academy of Sciences*, 999, S. 281-299.
- SCHLAUG, G./JANCKE, J./HUANG, Y./STAIGER, J.F./STEINMETZ, H. (1995): Increased corpus callosum size in musicians. In: *Neuropsychologia*, 33, S. 1047-1055.
- SCHMITTHORST, V./HOLLAND, S.K. (2003): The effect of musical training on music processing: a functional magnetic resonance imaging study in humans. In: *Neuroscience Letters*, 11, S. 65-68.
- SCHMITTHORST, V./WILKE, M. (2002): Differences in white matter architecture between musicians and non-musicians: a diffusion tensor imaging study. In: *Neuroscience Letters*, 321, S. 57-60.
- SCHNEIDER, P./SCHERG, M./DOSCH, H.G./SPECHT, H.J./GUTSCHALK, A./RUPP, A. (2002): Morphology of Heschl's gyrus reflects enhanced activation in the auditory cortex of musicians. In: *Nature Neuroscience*, 5, S. 688-694.
- SCHÖN, D./MAGNE, C./BESSON, M. (2004): The music of speech: Music training facilitates pitch processing in both music and language. In: *Psychophysiology*, 41, S. 341-349.
- SHAHIN, A./ROBERTS, L.E./TRAINOR, L.J. (2004): Enhancement of cortical development by musical experience in children. In: *Neuroreport*, 15, S. 1917-1921.
- SIEGEL, J. A./SIEGEL, W. (1977): Absolute identification of notes and intervals by musicians. In: *Perception & Psychophysics*, 21, S. 143-152.
- SLOBONOV, S./CHIANG, H./JOHNSTON, J./RAY, W. (2002): Modulated cortical control of individual fingers in experienced musicians: an EEG study. In: *Clinical Neurophysiology*, 113, S. 2013-2024.
- SLUMING, V./BARRICK, T./HOWARD, M./CEZA YIRLI, E./MAYES, A./ROBERTS, N. (2002): Voxel-based morphometry reveals increased gray matter density in Broca's area in male symphony orchestra musicians. In: *Neuroimage*, 17, S. 1613-1622.
- STEELE, K. M./DALLA BELLA, S./PERETZ, I./DUNLOP, T./DAWE, L.A./HUMPHREY, G.K./SHANNON, R.A./KIRBY, J.L./OLMSTEAD, C.G. (1999): Prelude or requiem for the 'Mozart effect'? In: *Nature*, 400, S. 827.
- THOMPSON, W.F./SCHELLENBERG, E.G./HUSAIN, G. (2001): Arousal, mood, and the Mozart effect. In: *Psychological Science*, 12, S. 248-251.
- TILLMANN, B./BHARUCHA, J.J./BIGAND, E. (2000): Implicit learning of tonality: A self-organizing approach. In: *Psychological Review*, 107, S. 885-913.
- TRAINOR, L.J./TREVHUB, S.E. (1992): A comparison of infants' and adults' sensitivity to Western musical structure. In: *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18, S. 394-402.
- TRAINOR, L.J./TREVHUB, S.E. (1993): Musical context effects in infants and adults: Key distance. In: *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 19, S. 615-626.
- TRAINOR, L.J./TREVHUB, S.E. (1994): Key membership and implied harmony in Western tonal music: Developmental perspectives. In: *Perception & Psychophysics*, 56, S. 125-132.
- TREVHUB, S.E. (2000): Human processing predispositions and musical universals. In: WALLIN, N.L./MERKER, B./BROWN, S. (Hrsg.): *The Origins of Music*. – Cambridge, S. 427-448.
- WANG, X./MERZENICH, M.M./SAMESHIMA, K./JENKINS, W.M. (1995): Remodeling of hand presentation in adult cortex determined by timing of tactile stimulation. In: *Nature*, 378, S. 71-75.
- WARNER, J.J. (2001): *Atlas of Neuroanatomy: With Systems Organization and Case Correlation*. – Boston.
- WEBER, C./HAHNE, A./FRIEDRICH, M./FRIEDERICI, A.D. (2004): Discrimination of word stress in early infant perception: Electrophysiological evidence. In: *Cognitive Brain Research*, 18, S. 149-161.
- Anschrift der Verfasser: Dr. Sebastian Jentschke / PD Dr. Stefan Koelsch, MPI für Kognitionswissenschaften, Stephanstr. 1A, D-04103 Leipzig, E-Mail: jentschke@cbs.mpg.de*