

Sprach- und Musikverarbeitung bei Kindern: Einflüsse musikalischen Trainings¹

Abstract

Music and language are basic, very old and culturally cross-cultural human capabilities. Both are important communication systems of the human species and very closely connected cognitive domains. Cognitive processes and their underlying neural correlates change during ontogenesis and due to learning processes. This is associated with functional and structural adaptations of the brain. Music and language have a number of similarities: It is assumed, e.g., that they evolved from a common ancestor, and that musical and linguistic syntax are processed in strongly overlapping brain regions. This motivated us to explore possible transfer effects between the processing of musical and linguistic syntax. We present evidence showing that in children with musical training, the neurophysiological correlates of both music-syntactic and language-syntactic processing are developed earlier, and more strongly, compared to children without musical training. Conversely, children with specific language impairment (SLI) also showed difficulties in the processing of musical syntax (mirroring their difficulties in the processing of linguistic syntax).

Musik und Sprache sind grundlegende, kulturgeschichtlich sehr alte und kulturübergreifende menschliche Fähigkeiten. Entwicklungsveränderungen und das Erwerben von Fertigkeiten führt dazu, dass kognitive Prozesse und ihre neuronalen Grundlagen sich verändern oder neu bilden. Dies ist verbunden mit funktionellen und strukturellen Anpassungen des Gehirns. Musik und Sprache weisen eine Vielzahl von Gemeinsamkeiten auf und es wird angenommen, dass sie sich aus einem gemeinsamen Vorläufer entwickelt haben. Für die Verarbeitung musikalischer und sprachlicher Syntax wird angenommen, dass sie in teilweise identischen Hirnregionen stattfindet. Bei Kindern mit musikalischem Training konnte daher eine verbesserte Verarbeitung nicht nur musikalischer Syntax sondern auch sprachlicher Syntax nachgewiesen werden. Umgekehrt hatten Kinder mit einer spezifischen Sprachentwicklungsstörung (SLI, engl. specific language impairment) neben ihren Schwierigkeiten bei der Verarbeitung sprachlicher Syntax auch Schwierigkeiten bei der Verarbeitung musikalischer Syntax

¹ Geänderte und aktualisierte Fassung von Sebastian Jentschke und Stefan Koelsch (2007), „Einflüsse von Entwicklungsveränderungen auf die Musikwahrnehmung und die Beziehung von Musik und Sprache“. Kontakt: Sebastian Jentschke, Max Planck Institute für Kognitions- und Neurowissenschaften, Stephanstr. 1A, D-04103 Leipzig (jentschke@cbs.mpg.de) oder Stefan Koelsch (koelsch@cbs.mpg.de)

1. Einführung

Die Verarbeitung von Musik und Sprache sind kulturübergreifende und kulturgeschichtlich alte menschliche Fertigkeiten. Menschen hören und machen Musik, d.h. sie singen, sie lernen ein Instrument zu spielen und sie musizieren in Gruppen. Das Hören und Ausüben von Musik erfüllt evolutionär wichtige Funktionen wie Kommunikation, Koordination von Gruppen und das Schaffen von Gruppenzusammenhalt (Koelsch & Siebel, 2005). Außerdem spielen musikalische Fertigkeiten eine entscheidende Rolle für die Entwicklung der Sprache (Brown, 2000; Koelsch & Siebel, 2005). Sprache dient der Kommunikation und dem Austausch von Informationen mit anderen Menschen. Darüber hinaus sind weite Teile unseres Wissens und unserer Erinnerungen in sprachlicher Form gespeichert.

In der Evolutionsforschung gibt es Diskussionen über gemeinsame Wurzeln von Musik und Sprache, wobei von Musik und Sprache als unterschiedlichen Spezialisierungen eines gemeinsamen referentiell-emotiven² Vorgängers ausgegangen wird (Brown, 2000). Danach hat sich Musik eher zur Vermittlung emotiver Bedeutung hin entwickelt, während in der Sprache eher die referentiell-inhaltliche Bedeutung betont wird. Außerdem belegt eine Reihe von Studien die hohe Bedeutung der Verarbeitung musikalischer Parameter von Sprache während der Sprachentwicklung (Fernald, 1989; Jusczyk, 2002; Jusczyk et al., 1992; Krumhansl & Jusczyk, 1990). Beispielsweise gehen *prosodic-bootstrapping*-Theorien davon aus, dass es während des Spracherwerbs gerade prosodische Merkmale sind, die dabei helfen, Sprache zu segmentieren und die Bedeutung des Gehörten zu verarbeiten (vgl. Morgan, Meier, & Newport, 1987; Pinker, 1989).

Sprache und Musik sind außerdem Beispiele für stark strukturierte Systeme, mit denen wir ständig umgehen. Beide sind aufgebaut aus Einzelementen (z.B. Phoneme oder Töne), welche zu immer komplexeren hierarchisch strukturierten Sequenzen zusammengesetzt werden. Ein als „Syntax“ bezeichnetes Regelsystem bestimmt, auf welche Art die einzelnen Elemente gruppiert werden und welche Funktion den einzelnen Elementen zugewiesen wird. So wird die Beziehung der einzelnen Komponenten bestimmt. Das Gehirn erkennt und internalisiert die mit diesen Regeln verbundene Struktur und das so gewonnene implizite

² Emotive (engl. „gefühlbetont“) sind Sprachlaute, die die emotionale Haltung des Sprechers transportieren (z.B. „ah“, „oh“).

Wissen³ beeinflusst die Wahrnehmung und das Ableiten weiterer, komplexerer Regularitäten (vgl. Saffran, 2001, 2003; Saffran, Aslin, & Newport, 1996; Tillmann, Bharucha, & Bigand, 2000; Tillmann, Janata, Birk, & Bharucha, 2003).

Das Wahrnehmen von Musik und noch mehr das Singen und Musizieren sind für das Gehirn komplexe Aufgaben, an denen eine Vielzahl kognitiver Prozesse beteiligt ist (z.B. Wahrnehmen, Lernen und Gedächtnis sowie das Planen und Ausführen von Handlungen). Daher ist es möglich, menschliche Kognitionen und die ihnen zu Grunde liegenden neuronalen Prozesse durch eine Betrachtung der Verarbeitung von Musik zu untersuchen. Dies dürfte einer der Gründe für den deutlichen Anstieg der Zahl von Forschungsprojekten auf diesem Gebiet sein (Deutsch, 1999b; Juslin & Sloboda, 2001; Koelsch & Siebel, 2005; Peretz & Zatorre, 2003; Wallin, Merker, & Brown, 2000; Zatorre & Peretz, 2001).

Musikalische Laien, Amateurmusiker und Profimusiker haben unterschiedliche Grade musikalischer Expertise. Das macht es möglich, Einflüsse von Training und Lernen auf das Beherrschen musikalischer Fertigkeiten⁴ zu betrachten. Durch einen Vergleich dieser Gruppen lässt sich nachvollziehen, wie das Gehirn Anpassungen an außerordentliche Herausforderungen realisiert. Diese Anpassung wird als „Plastizität“ bezeichnet. Sie ist verbunden mit der Stärkung bestehender oder der Formation neuer Nervenverbindungen (vgl. Hebb, 1949) und dem Hinzugewinnen von Hirngewebe. Plastizität spielt eine entscheidende Rolle für die kortikale Entwicklung. Das Wahrnehmen und Ausüben von Musik führt zur vermehrten Verarbeitung auditorischer, motorischer und somatosensorischer Informationen, der Integration dieser Informationen sowie der Kontrolle und Korrektur 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, die Plastizität des Gehirns zu untersuchen (Münste, Altenmüller, & Jäncke, 2002; Pantev, Engelen, Candia, & Elbert, 2001; Schlaug, 2001). Musiker sind auf Grund ihres intensiven Trainings in der Lage, viele der

³ Implizites Wissen ist nicht formalisiertes Wissen, also v.a. Kenntnisse oder Fähigkeiten, die nicht explizit formulierbar sind (z.B. Prozeduren, Bewegungsabläufe). Explizites Wissen bezeichnet dagegen mittels Zeichen (Sprache, Schrift) eindeutig kommunizierbares Wissen.

⁴ 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 kritische Diskussion findet sich in Koelsch (2001).

Verarbeitungsprozesse, die der Wahrnehmung und der Produktion von Musik dienen, noch schneller und effizienter auszuführen als Nichtmusiker.

Veränderungen im Entwicklungsverlauf führen zur Modifikation der während des Wahrnehmens und Ausübens von Musik ablaufenden Kognitionsprozesse. In diesem Zusammenhang werden im Folgenden auch Aspekte der Beziehung von Musik und Sprache dargestellt und gemeinsame Grundlagen der neuronalen Verarbeitung in beiden Domänen diskutiert.

Methoden der Neurowissenschaften

Verschiedene Wissenschaftsdisziplinen (wie Psychoakustik, Psychologie, Medizin und Neurobiologie) arbeiten zusammen, um die neuronalen Grundlagen von Kognitionsprozessen besser zu verstehen. Zu den verwendeten Methoden zählen z.B. Läsionsstudien (Studien bei Patienten mit Hirnverletzungen), bildgebende Verfahren (Positronenemissionstomographie, Magnetresonanztomographie), elektrophysiologische Methoden (Elektroencephalographie, Magnetencephalographie) oder die Modellierung im Computer (neuronalen Netze). Zwei für die Hirnforschung besonders wichtige Verfahren, die Magnetresonanztomographie und die Elektroenzephalographie, sollen etwas genauer vorgestellt werden. Die Magnetresonanztomografie (MRT) ist ein nicht-invasives⁵ Verfahren zur Darstellung von anatomischen Strukturen im Inneren des Körpers. Sie erlaubt als funktionelle MRT (fMRT) aber auch Aussagen darüber, welche Hirnregionen bei bestimmten 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). Im Gegensatz zu MRT haben die Elektroenzephalographie (EEG) und die Magnetenzephalographie (MEG) eine hohe zeitliche Auflösung (im Millisekunden-Bereich). Sie erlauben aber nur eine weniger genaue Lokalisation. Ihre Grundlage ist eine Aufzeichnung der elektrischen Aktivität des Gehirns durch Elektroden auf der Kopfoberfläche.⁶ Hieraus lassen sich Aussagen über die Gehirnaktivität ableiten, da die elektrische Aktivität an das Ausmaß der Aktivierung von Nervenzellen gebunden ist.

⁵ 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 gewebschädigenden) Röntgenstrahlen genutzt werden.

⁶ MEG ähnelt in seiner Funktionsweise dem EEG, bei MEG werden jedoch an Stelle von Spannungsdifferenzen Unterschieden in der magnetischen Feldstärke gemessen.

Eine spezielle Form des EEG sind ereigniskorrelierte Potentiale (EKP / ERP, engl. „*event-related potentials*“)⁷. Hier wird eine große Anzahl von Stimuli des gleichen Typs präsentiert (z.B. ein bestimmter Akkord) und anschließend der Mittelwert der EEG-Aktivität in einen bestimmten Zeitbereich nach dem Einsetzen dieses Stimulus ermittelt. Dadurch wird der Teil der elektrische Gehirnaktivität sichtbar, der an die Verarbeitung dieses Stimulus gebunden ist.

Entwicklung der Musikwahrnehmung

Das Wahrnehmen und Erinnern von Musik beruht auf Verarbeitungsmechanismen, die sich zum einen auf angeborene Dispositionen (z.B. die Tendenz, Töne zu Melodien zu gruppieren), zum anderen auf Erfahrungen mit der Musik der eigenen Kultur zurückführen lassen. Kinder verarbeiten Musik in ähnlicher Weise wie Erwachsene und die Unterschiede ergeben sich auf Grund des unterschiedlichen Ausmaßes an Erfahrungen mit der Musik der eigenen Kultur. Durch das Sammeln solcher Erfahrung (sowie durch die weitere Hirnreifung) im Verlaufe der Entwicklung entstehen oder verändern sich auch die zu Grunde liegenden neuronalen Repräsentationen und Verarbeitungsmechanismen. Einige Merkmale von Musik kommen in fast jeder musikalischen Kultur vor (z.B. melodische Konturen) während andere eher typisch für bestimmte musikalische Kulturen sind (z.B. dur-moll-tonale harmonische Beziehungen in westlicher Musik). Dabei sind Merkmale, die kulturübergreifend vorkommen, meist einfacher wahrnehmbar.

Es gibt eine Reihe von Dispositionen, die das Erwerben neuer Repräsentationen und Verarbeitungsmechanismen erleichtern oder erst ermöglichen. Beispielsweise werden sich wiederholende Sequenzen von Tönen 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. Bereits Säuglinge (im 6. LM) können erkennen, ob sich die Pausen in musikalischen Phrasen an angemessenen

⁷ 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.

Stellen befinden (Krumhansl & Jusczyk, 1990). Sie 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 (vgl. die *prosodic-bootstrapping*-Theorien).

Zur Beschreibung der Prozesse, die bei der Wahrnehmung und der Produktion von Musik ablaufen, wurde in unserer Arbeitsgruppe ein Modell entwickelt (Abbildung 1 in Koelsch & Siebel, 2005). Es soll zu Hilfe genommen werden, um die Entwicklung der kindlichen Wahrnehmung von Musik auf den verschiedenen Verarbeitungsstufen darzustellen.

Nach einer frühen, subkortikalen Verarbeitung der auditorischen Signale im auditorischen Hirnstamm und im Thalamus folgt als erste Stufe der kortikalen Verarbeitung die Merkmalsextraktion (***feature extraction***). Sie findet v.a. im primären und sekundären auditorischen Kortex statt. Dabei werden bestimmte Merkmale des auditorischen Signals extrahiert und repräsentiert. Dazu gehören z.B. Höhe, Chroma, Klangfarbe, Intensität und Rauigkeit eines Tons. Die hiermit verbundenen Verarbeitungsprozesse finden ungefähr in den ersten 100 ms nach Beginn eines Tons statt. Die extrahierten Merkmale sind nicht nur für das Wahrnehmen von Musik wichtig, sondern auch für die Verarbeitung von Sprache. In einer weiteren Studie wurden Kindern Klavier-, Violin- und Sinustöne vorgespielt, um die Veränderung der EKPs im Entwicklungsverlauf und in Abhängigkeit von musikalischem Training zu untersuchen. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass einige der gemessenen Potentiale (P1) bei Kindern, welche musikalisches Training erhielten, für alle verwendeten Töne vergrößert waren, bei anderen Potentialen (P2) zeigte sich ein spezifischer Einfluss des gelernten Instruments (Shahin, Roberts, & Trainor, 2004). Generell waren dabei die EKPs von vier bis fünf Jahre alten Kindern, die ein Instrument lernten, vergleichbar mit denen von 3 Jahre älteren Kindern ohne musikalisches Training. Dies bedeutet, dass die Entwicklung der neuronalen Ressourcen, die für die Verarbeitung von Tönen verwendet werden, vom Ausmaß der Erfahrung abhängig ist. Kinder, die kein musikalisches Training erhielten, müssen die notwendige Erfahrung daher

über einen längeren Zeitraum ansammeln und erreichen eine vergleichbare Stufe der Entwicklung dieser Verarbeitungsprozesse erst zu einem späteren Zeitpunkt.

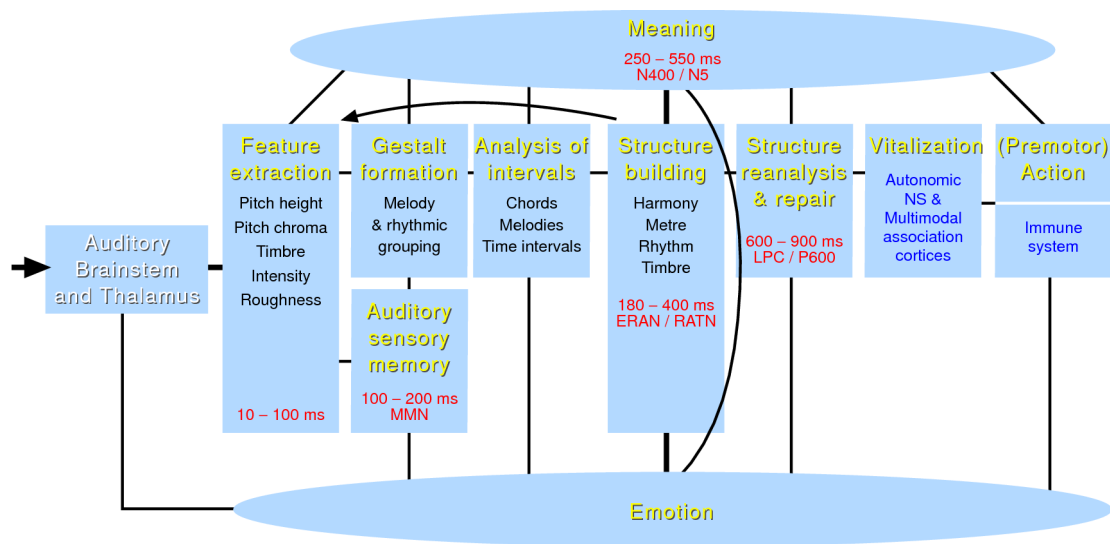


Abb. 1. Modell zur Beschreibung der bei der Wahrnehmung und der Produktion von Musik ablaufenden Verarbeitungsprozesse (modifiziert nach Koelsch & Siebel, 2005).

Die zweite kortikale Verarbeitungsstufe des Modells (**Gestalt formation, analysis of intervals**) beschreibt die Analyse melodischer und rhythmischer Intervalle und das Zusammensetzen der auf der ersten Stufe extrahierten Merkmale zu auditorischen Gestalten (melodische und rhythmische Abschnitte). Eine wichtige Verarbeitungsinstanz auf dieser Stufe ist das auditorisch-sensorische Gedächtnis. Viele Experimente zur Untersuchung der Arbeitsweise des auditorisch-sensorischen Gedächtnisses verwenden MMN (*mismatch negativity*)-Paradigmen (Alho, 1995; Csepe, 1995; Näätänen, 2000). Bei der MMN handelt es sich um eine EKP-Komponente, die auftritt, wenn innerhalb einer Reihe von akustischen Standardreizen ein physikalisch (z.B. in Frequenz, Dauer, etc.) abweichender (akustischer) Reiz dargeboten wird. Es gibt es kaum MMN-Studien zur Musikwahrnehmung bei Kindern, aber einige Studien zur Verarbeitung prosodischer Elemente der Sprache (Betonung, Rhythmen, etc.). Werden die beiden Betonungsmuster des Trochäus' (erste Silbe betont, [baa-ba]) und des Jambus' (zweite Silbe betont [ba-baa]) miteinander verglichen, so zeigen Säuglinge im 4. LM keine erkennbare Detektionsreaktion (MMN) auf einen einzelnen Stimulus des abweichenden Betonungsmusters innerhalb vieler Stimuli des anderen Musters (z.B. ein einzelner Trochäus in einer Reihe von Jamben und *vice versa*) während sie

im 5. LM in der Lage sind, den Trochäus (d.h. das im Deutschen häufiger vorkommende Betonungsmuster) in einer Reihe von Jamben zu detektieren (Weber, Hahne, Friedrich, & Friederici, 2004).

Die dritte Stufe des Modells (**structure building**) beschreibt die Verarbeitung struktureller Merkmale musikalischer Phrasen (z.B. harmonischer Beziehungen). Wie bei der Sprache sind in der Musik einzelne Elementen entsprechend bestimmter Regularitäten innerhalb von Sequenzen angeordnet (Koelsch, 2005), diese Regularitäten können auch im Bereich der Musik als Syntax bezeichnet werden (Riemann, 1877). Zum Bereich der Verarbeitung musikalischer Struktur gehört z.B. das Erkennen einer Akkordfunktion, die an einer bestimmten Stelle einer Akkordsequenz unangemessen ist (aber an einer anderen Stelle angemessen sein kann).

Vor allem jüngere Kinder haben ein geringes implizites Wissen über Tonartzugehörigkeit (Krumhansl & Keil, 1982; Trainor & Trehub, 1992, 1993, 1994). Das Wissen um harmonische Regularitäten wird z.B. dadurch erworben, dass die meisten Kinderlieder häufige Wiederholungen musikalischer Muster enthalten und dass sie strukturell eher einfach aufgebaut sind und viele Wiederholungen von Tönen aufweisen. Dieser Lernprozess ist daher vermutlich primär an Häufigkeitsverteilungen gebunden (vgl. Tillmann et al., 2000). Entscheidend für die Verarbeitung von Melodie und Rhythmus ist die Extraktion von Beziehungen zwischen Tönen, wobei die Gruppierung oft in Anlehnung an Gestaltprinzipien erfolgt, d.h. auf Grund von Nähe, Kontinuität, Zusammenhang, Ähnlichkeit und Geschlossenheit (Deutsch, 1999a). Bei der Rhythmusverarbeitung werden die Töne auf Grund von Frequenz, Dauer und Intensität gruppiert und das Erinnern einer Melodie basiert meist auf einer abstrakten Repräsentation der melodischen Kontur, d.h. Informationen über den Verlauf der Tonhöhe. Kinder beurteilen daher Musik, deren Kontur oder deren Rhythmus verändert wurde, als ungleich. Mit einfachen Melodien wurde die Fähigkeit von Kindern und Erwachsenen untersucht, Veränderungen einer Melodie zu detektieren. Während Erwachsene fast nur Veränderungen erkennen, die mit dem Verlassen der Tonart verbunden sind, sind Kinder auch in der Lage, Abweichungen zu detektieren, bei denen der veränderte Ton zur Tonart der Melodie gehört (Trainor & Trehub, 1992).

Bereits im 7. LM sind Säuglinge in der Lage, längere Passagen aus einem Musikstück wieder zu erkennen (Saffran, Loman, & Robertson, 2000). Dabei wurden den Kindern 14 Tage lang zwei Sätze aus Mozart-Klaversonaten vorgespielt. Weitere 14 Tage später wurden die Behaltensleistungen geprüft. Dabei wurden Passagen aus der Satzmitte der gehörten Sonaten mit vergleichbaren unbekanntem Ausschnitten

verglichen. Hier zeigten die Kinder eine Präferenz für die unbekannteren Passagen, die vermutlich auf die Unnatürlichkeit der gewählten Ausschnitte (aus der Mitte des Satzes) zurückzuführen ist. Deshalb wurden in einem weiteren Experiment beim Prüfen der Behaltensleistungen Ausschnitte vom Beginn der Sonatensätze benutzt. In diesem Fall ergab sich eine deutliche Präferenz für die bekannten Passagen. Dies zeigt, dass Kinder eine hoch entwickelte Fähigkeiten der Musikwahrnehmung haben, d.h. sie hören nicht undifferenziert Sequenzen von Tönen, sondern verbinden gehörte Musik mit Musik, die sie bereits im Gedächtnis gespeichert haben, und sie setzen Passagen zu kohärenten musikalischen Ereignissen zusammen.

Auch Befunde aus anderen Studien 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 Akkordsequenzen, die entweder mit einem regulären oder einem irregulären Akkord endeten. Dabei reagieren bereits Fünfjährige mit einer ERAN (early right anterior negativity) auf diese Strukturverletzung, d.h. sie besitzen Repräsentationen musikalischer Regularitäten (Koelsch et al., 2003). Auf die ERAN wird im folgenden Abschnitt „Beziehungen von Musik und Sprache“ noch genauer eingegangen. Kinder benutzen außerdem zur Verarbeitung musikalischer Struktur im Wesentlichen dasselbe kortikale Netzwerk wie Erwachsene (Koelsch, Fritz, Schulze, Alsop, & Schlaug, 2005).

Die Verarbeitung von Prosodie wurde untersucht, indem Kindern Sätze und Melodien vorgespielt, bei denen der letzte Ton bzw. das letzte Wort in seiner Grundfrequenz verändert wurde. Kinder mit musikalischem Training unterschieden sich durch bessere Leistungen beim Differenzieren der unveränderten vs. der veränderten Enden bei musikalischem und sprachlichem Material von musikalisch nicht trainierten Kindern. Außerdem zeigten beide Gruppen unterschiedliche EKP-Komponenten, die vermuten lassen, dass beide Gruppen unterschiedliche Verarbeitungsstrategien für das Ausführen der gleichen Aufgabe nutzen (Magne, Schön, & Besson, 2003; vgl. auch Magne, Schön, & Besson, 2006). Suprasegmentale 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.

Musik ist in der Lage, Emotionen (**emotion**) hervorzurufen und Stimmungen zu verändern. Repräsentationen auf annähernd allen Verarbeitungsstufen der Musikwahrnehmung können Emotionen auslösen, z.B. durch Konsonanz bzw. Dissonanz (Koelsch, Fritz, von Cramon, Müller, & Friederici, 2006) oder durch die Erfüllung oder Nichterfüllung musikalischer Erwartungen, die zum Empfinden von Anspannung oder Entspannung führen (Meyer, 1956).

Durch Kinderlieder kann beispielsweise die Stimmung und die Aufnahmefähigkeit von Kindern moduliert werden (z.B. sind schnelle Tempi und hohe Tonlage mit Fröhlichkeit, Zuneigung, Zärtlichkeit und erhöhter Erregung [arousal] verbunden, vgl. Trehub, 2000). Der affektive Gehalt von Musikstücken wird v.a. durch das Tempo und den Modus (Dur vs. moll) bestimmt, wobei beide Einflussgrößen ihre Gewichtung im Laufe der Entwicklung verändern. Während Erwachsene auf Veränderungen des Modus' stärker als auf Tempovariationen reagieren, sind ältere Kinder (6.-8. Lj) sensitiv für beide Faktoren und jüngere Kinder (5. Lj) gründen ihre Beurteilung eher auf Tempoveränderungen (Dalla Bella, Peretz, Rousseau, & Gosselin, 2001). Die strukturellen Eigenschaften von Musik (z.B. Modus) werden erst durch zunehmende Erfahrung mit der Musik der eigenen Kultur erworben, sie spielen dann aber eine große Rolle beim Hervorrufen von Emotionen durch Musik. Dagegen lassen sich Reaktionen auf Veränderungen des Tempos bereits bei Kindern im ersten Lebensjahr nachweisen (Baruch & Drake, 1997).

Beziehungen von Musik und Sprache

Es gibt Überlegungen, dass dem Erwerb von Wissen und dem Etablieren bestimmter Verarbeitungsprozesse bei der Wahrnehmung von Musik und Sprache ähnliche Mechanismen zu Grunde liegen (für eine Diskussion dieser Annahme, siehe McMullen & Saffran, 2004). Basis hierfür ist die Idee, dass sich Sprache und Musik aus einem gemeinsamen kommunikativen Vorgänger entwickelt haben (Brown, 2000). Bevor andere Kommunikationsformen verfügbar sind, stellt die prosodische Kontur (für die Sprache) bzw. die melodische Kontur (für die Musik) ein wichtiges Mittel der Vermittlung von Emotionen dar und affektive Eigenschaften des Sprachregisters sind entscheidend in der Kommunikation mit dem Kind (Trehub, 2003). Prosodische Hinweisreize sind oft ein Indikator für strukturelle Grenzen innerhalb der wahrgenommenen Information (z.B. eine kurze Pause vor einem Nebensatz). Das erlaubt das Erkennen von Satzstruktur. Ergebnisse aus EEG-Studien zeigen, dass es eine vergleichbare Reaktion (*closure positive shift*) auf Phrasengrenzen in Sprache und Music gibt (Knösche et al., 2005). Außerdem konnte gezeigt werden, dass die Verarbeitung von Prosodie durch musikalisches Training

beeinflusst wird (Magne et al., 2003, 2006; Patel, Peretz, Tramo, & Labreque, 1998; Schön, Magne, & Besson, 2004; Thompson, Schellenberg, & Husain, 2004).

Trotz der engen Beziehung von Sprache und Musik ist die Zahl der Studien, die den neuronalen Korrelaten der Beziehung von Sprache und Musik nachgehen, bisher vergleichbar gering. Allerdings konnte in diesen Studien gezeigt werden, dass die Verarbeitungsprozesse von musikalischer Struktur und sprachlicher Syntax eine Reihe von Gemeinsamkeiten haben und dass sie in vergleichbaren Hirnregionen stattfinden. So stellt die Hirnreaktion auf eine Irregularität sprachlicher Syntax (ELAN) ein Pendant zur Reaktion auf eine Irregularität der musikalischen Syntax (ERAN) dar. Beide spiegeln Prozesse kontextunabhängiger, automatischer Syntaxverarbeitung wider. Das bedeutet, in beiden Fällen muss der gerade gehörte Akkord oder das gehörte Wort klassifiziert und in den bestehenden Kontext einer musikalischen Phrase oder eines Satzteils integriert werden. ERAN und ELAN haben eine Reihe gemeinsamer Eigenschaften: beide zeigen sich am Stärksten über den frontalen Elektroden (im vorderen Kopfteil) und haben einen ähnlichen Zeitverlauf mit einem Maximum der Reaktion um 200 ms (vgl. Friederici, Pfeifer, & Hahne, 1993; Koelsch, Gunter, Friederici, & Schröger, 2000). Außerdem findet die Verarbeitung von musikalischer und sprachlicher Syntax (die sich in ERAN und ELAN widerspiegelt) zumindest zum Teil in ähnlichen Hirnregionen statt (Friederici, Wang, Herrmann, Maess, & Oertel, 2000; Heim, Opitz, & Friederici, 2003; Koelsch et al., 2005; Koelsch et al., 2002; Maess, Koelsch, Gunter, & Friederici, 2001; Tillmann, Janata, & Bharucha, 2003). Aus diesem Grund haben wir untersucht, ob sich Transfereffekte zwischen der Verarbeitung musikalischer und linguistischer Syntax nachweisen lassen.

Außerdem konnte gezeigt werden, dass Musiker auf Verletzungen der musikalischen Struktur neuronal stärker (d.h. mit einer vergrößerten ERAN-Amplitude) reagieren als Nichtmusiker. Dieser Unterschied lässt sich darauf zurückführen, dass gehörte Musik auf der Basis ihres Regelwissens über musikalische Struktur verarbeitet wird, da Musiker auf Grund ihres umfangreicheren impliziten und expliziten musikalischen Wissens über spezifischere Erwartungen an die musikalische Struktur verfügen.

Ausgehend von den dargestellten Gemeinsamkeiten von Sprache und Musik, insbesondere den Befunden gemeinsamer neuronaler Mechanismen der Verarbeitung von sprachlicher und musikalischer Syntax, untersuchten wir den Entwicklungsverlauf der neuronalen Prozesse, die der Verarbeitung musikalischer und linguistischer Syntax bei Kindern zugrunde liegen (Jentschke & Koelsch, 2009; Jentschke, Koelsch, Sallat, &

Friederici, 2008). Da gezeigt werden konnte, dass (erwachsene) Musiker sensitiver als Nichtmusikern auf eine musik-syntaktische Irregularitäten reagieren, war eine weitere Frage, ob sich Unterschiede in der Verarbeitung musikalischer Syntax bereits bei Kindern mit und ohne musikalischem Training finden lassen (und ob sich auf Grund der gemeinsamen neuronalen Ressourcen ein positiver Transfereffekt von Musik zur Sprache als Folge musikalischen Trainings finden lässt). Umgekehrt ergab sich eine weitere Fragestellung für Kinder mit einer spezifischen Sprachentwicklungsstörung (SLI) - untersucht werden sollte, ob diese sowohl bei der Verarbeitung von sprachlicher als auch von musikalischer Struktur Auffälligkeiten aufweisen.

Musikexperiment:

The image shows three musical stimuli labeled A, B, and C. Stimuli A and B are short sequences of chords in 2/4 time, with a triangle marking the end. Stimulus C is a longer sequence of chords in 2/4 time, showing a more complex progression.

Sprachexperiment:

reguläre Sätze: Die Tante wurde geärgert.

irreguläre Sätze: Die Mutter wurde im geärgert.

filler-Sätze: Der Onkel wurde im Bett geärgert.

Nominal-	Hilfs-	Präp.	Subst.	Partizip
phrase	verb			

Abb. 2. Beispiele der im Experiment verwendeten Stimuli; **oben:** Beispiele der Akkordsequenzen aus dem Musikexperiment (die Beispiele können unter www.stefan-koelsch.de/kinderstudie angehört werden); **unten:** Beispielsätze aus dem Sprachexperiment

Versuchsteilnehmer waren zum einen Kinder mit und ohne musikalisches Training (10. - 11. Lj; zum Teil Mitglieder des Leipziger Thomanerchors), zum anderen Kinder mit einer Sprachentwicklungsstörung und sprachnormale Kinder (4. - 5. Lj).

Diesen Kindern wurden in einem Experiment Akkordsequenzen dargeboten, die entweder ein reguläres oder ein irreguläres Ende aufwiesen (Abb. 2, links). Die Sequenz wurde bei einem regulären Ende mit einer Tonika [A], bei einem irregulären Ende mit einer Subdominantparallele [B] abgeschlossen. Insgesamt wurden den Kindern in ca. 15 - 20 min 192 solche Akkordsequenzen vorgespielt (jeweils 8 Wiederholungen jeder Sequenz [A] und [B], die in jede Tonart transponiert waren; s. Beispiel [C]). In einem zweiten Experiment hörten die älteren Kinder (10. - 11. Lj) syntaktisch korrekte bzw. inkorrekte Sätze (siehe Abb. 2, rechts). Den Kindern wurden in ca. 20 min 240 verschiedene Sätze vorgespielt (jeweils 96 korrekte, 96 inkorrekte und 48 Filler-Sätze).

Eine Übersicht der Ergebnisse ist in Abbildung 3 dargestellt (für Details s. Jentschke & Koelsch, 2009; Jentschke et al., 2008). Die musikalisch trainierten Kinder zeigten eine deutlichere hirnelektrische Antwort auf die irregulären Akkorde (d.h. diese Kinder zeigten eine größere ERAN-Amplitude; Abb. 3, links). Daraus lässt sich ableiten, dass bereits einige Jahre musikalischen Trainings bei Kindern ausreichen, um die in der ERAN reflektierten Prozesse der Verarbeitung musikalischer Struktur effizienter ablaufen zu lassen. Trotz der relativ kurzen Dauer des musikalischen Trainings haben diese Kinder bereits spezifischere Repräsentationen musik-syntaktischer Syntax erworben, als Kinder ohne musikalisches Training (hierzu gehören z.B. implizites und explizites Wissen über harmonische Gesetze, auf denen westlich-tonale Musik beruht und Repräsentationen spezifischer harmonischer Beziehungen).

Interessanterweise zeigten die Kinder mit musikalischem Training auch eine größere Amplitude der syntaktischen Negativierung, die mit Prozessen der sprachlichen Syntaxverarbeitung verbunden ist (Abb. 3, Mitte). Kinder mit musikalischem Training zeigen also auch eine früher und stärker entwickelte Verarbeitung sprachlicher Syntax. Wir führen dieses Ergebnis auf die ähnlichen neuronalen Ressourcen zurück, die der Verarbeitung musikalischer und linguistischer Syntax zu Grunde liegen. Die Ergebnisse bedeuten, dass musikalisches Training nicht nur zur Veränderung der Verarbeitungsprozesse bei der Musikwahrnehmung führt, sondern auch Prozesse der Syntaxverarbeitung im Sprachbereich fördert.

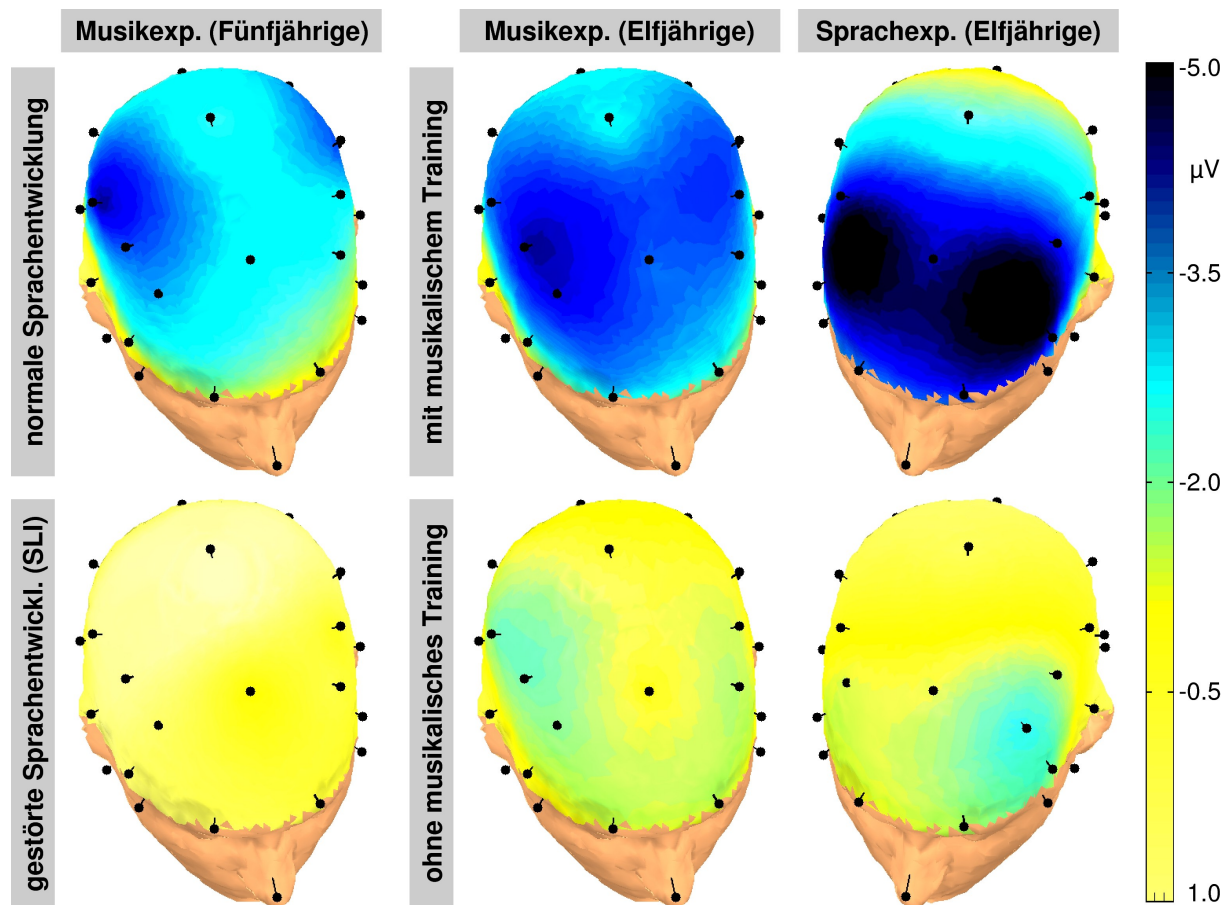


Abb. 3. Ergebnisse der Studie: Unterschiede in den Hirnreaktionen zwischen den irregulär endenden und den regulär endenden Akkordsequenzen bzw. Sätzen; je mehr Nervenzellen aktiviert sind, desto negativer sind die Spannungsunterschiede (s. Skala) und desto dunkler sind die entsprechenden Stellen auf der Kopfoberfläche; **links:** Ergebnisse des Musikexperiments in der Altersgruppe der elfjährigen Kinder (musikalisch trainierte im Vergleich zu nicht musikalisch trainierten Kindern); **Mitte:** Ergebnisse des Sprachexperiments in der Altersgruppe der elfjährigen Kinder; **rechts:** Ergebnisse des Musikexperiments in der Altersgruppe der fünfjährigen Kinder (Kinder mit einer normalen Sprachentwicklung im Vergleich zu spezifisch sprachentwicklungsgestörten Kindern)

Drittens zeigten die spezifisch sprachentwicklungsgestörten Kinder (SLI) keine hirnelektrische Antwort auf die irregulären Akkorde (d.h. keine ERAN), während sie bei Kindern mit einer normalen Sprachentwicklung deutlich zu beobachten war (Abb. 3, rechts). Kinder dieser Altersgruppe mit normaler Sprachentwicklung (4.-5. LJ) sind also in der Lage, musikalische Syntax schnell und genau zu verarbeiten. Dies ist

bemerkenswert, weil eine Reihe theoretischer Ansätze davon ausgeht, dass das Erwerben des Regelsystems, das westlich-tonaler Musik zu Grunde liegt, langsam verläuft und erst zwischen dem 6. und 7. Lebensjahr abgeschlossen ist. Das Fehlen der ERAN bei den Kindern mit SLI deutet darauf hin, dass diese Kinder auch Auffälligkeiten bei der Verarbeitung musikalischer Syntax zeigen. Grammatikalische Defizite sind ein zentraler Aspekt von SLI (Joanisse & Seidenberg, 1998; Leonard & Eyer, 1996; Tomblin & Pandich, 1999; van der Lely, 2005). Besondere Schwierigkeiten haben Kinder mit SLI beim Verstehen syntaktischer Relationen und bei der Verarbeitung konfiguratoraler Aspekte von Grammatik (Joanisse & Seidenberg, 2003). Das Fehlen der ERAN bei Kindern mit SLI passt gut zur Annahme genereller grammatikalischer Defizite, insbesondere wenn man die Gemeinsamkeiten in der neuronalen Verarbeitung in den beiden Domänen berücksichtigt.

Diese Ergebnisse stützen die Annahme, dass sprachliche und musikalische Strukturverarbeitung eng miteinander verknüpft sind und dass ihnen ähnliche neuronale Prozesse zugrunde liegen. Zusätzlich zeigen die Ergebnisse, dass Kinder von musikalischem Training profitieren und dadurch nicht nur eine verbesserte Verarbeitung musikalischer Syntax resultiert, sondern auch ein positiver Einfluss auf die Verarbeitung linguistischer Syntax. Wir meinen, dass diese Beziehung sprachlicher und musikalischer Syntax auch zur Therapie sprachentwicklungsgestörter Kinder genutzt werden sollte.

Schlussfolgerungen

Während des Entwicklungsverlaufs der Musikwahrnehmung passt sich das Gehirn an die zu leistenden Verarbeitungsprozesse an, so dass diese Prozesse mit zunehmendem Alter schneller und genauer ablaufen. Außerdem gewinnen Kinder Fertigkeiten hinzu, die sich dann in neuen oder veränderten neuronalen Verarbeitungsprozessen äußern. Diese Unterschiede zeigen sich 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 und bei der Verarbeitung durch Musik hervorgerufener Emotionen.

In unserer Studie konnte gezeigt werden, dass musikalisch trainierte Kinder eine deutlichere hirnelektrische Antwort auf eine Verletzung der musikalischen Syntax zeigen. Das zeigt, dass herausragende (musikalische) Fertigkeiten gelernt werden und dass sich diese

Fertigkeiten auch in einer verbesserten neuronalen Verarbeitung widerspiegeln. Kinder mit musikalischem Training zeigten auch eine ausgeprägtere Reaktion auf eine Verletzung der sprachlichen Syntax. Das heißt, dass sich die durch musikalisches Training erworbenen Fertigkeiten zumindest teilweise auch auf Verarbeitungsprozesse in anderen kognitiven Domänen (wie Sprache) übertragen lassen. Umgekehrt zeigten spezifisch sprachentwicklungsgestörte Kinder (SLI) keine hirnelektrische Antwort auf eine Verletzung der musikalischen Syntax, während diese bei Kindern mit einer normalen Sprachentwicklung deutlich zu beobachten war. Während Kinder mit normaler Sprachentwicklung bereits im 4. - 5. Lebensjahr in der Lage sind, musikalische Syntax schnell und genau zu verarbeiten, haben Kinder mit SLI bei der Verarbeitung musikalischer Syntax vergleichbare Schwierigkeiten wie bei der Verarbeitung sprachlicher Syntax. Diese Schwierigkeiten sind wie die verbesserte Verarbeitung sprachlicher Syntax bei Kindern mit musikalischem Training ein Hinweis auf die enge Beziehung von Musik und Sprache, die sich z.B. auch in der Annahme gemeinsamer evolutionärer Wurzeln, einer besonderen Bedeutung von musikalischen Parametern der Sprache beim Spracherwerb und Gemeinsamkeiten in der neuronalen Verarbeitung äußert.

Hirnforschung hilft, Kognition und Lernen besser zu verstehen, indem sie, beispielsweise durch die Untersuchung der Verarbeitung von Musik, grundlegende Verarbeitungsmechanismen aufdeckt. Außerdem kann sie Hinweise geben, wie grundlegende und außergewöhnliche Fertigkeiten erworben werden und gefördert werden können und wie Fertigkeiten, die durch den Umgang mit Musik erworben wurden, die Verarbeitung in anderen kognitiven Domänen positiv beeinflussen.

Literatur:

- Alho, K. (1995). Cerebral generators of mismatch negativity (MMN) and its magnetic counterpart (MMNm) elicited by sound changes. *Ear and Hearing, 16*(1), 38-51.
- Baruch, C., & Drake, C. (1997). Tempo discrimination in infants. *Infant Behavior and Development, 20*(4), 573-577.
- Brown, S. (2000). The "Musilanguage" Model of Music Evolution. In N. L. Wallin, B. Merker & S. Brown (Eds.), *The Origins of Music* (pp. 271-300.). Cambridge: MIT Press.
- Csepe, V. (1995). On the origin and development of the mismatch negativity. *Ear and Hearing, 16*(1), 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. *Cognition, 80*(3), B1-10.
- Deutsch, D. (1999a). Grouping mechanisms in music. In D. Deutsch (Ed.), *The psychology of music* (2nd ed., pp. 299-348). San Diego: Academic Press.
- Deutsch, D. (1999b). *The psychology of music* (2nd ed.). San Diego: Academic Press.
- Fernald, A. (1989). Intonation and communicative intent in mothers' speech to infants: is the melody the message? *Child Development, 60*(6), 1497-1510.
- Friederici, A. D., & Alter, K. (2004). Lateralization of auditory language functions: a dynamic dual pathway model. *Brain and Language, 89*(2), 267-276.
- Friederici, A. D., Pfeifer, E., & Hahne, A. (1993). Event-related brain potentials during natural speech processing: effects of semantic, morphological and syntactic violations. *Brain Res Cogn Brain Res, 1*(3), 183-192.
- Friederici, A. D., Wang, Y., Herrmann, C. S., Maess, B., & Oertel, U. (2000). Localization of early syntactic processes in frontal and temporal cortical areas: a magnetoencephalographic study. *Hum Brain Mapp, 11*(1), 1-11.
- Hebb, D. O. (1949). *The organization of behavior; a neuropsychological theory*. New York,: Wiley.
- Heim, S., Opitz, B., & Friederici, A. D. (2003). Distributed cortical networks for syntax processing: Broca's area as the common denominator. *Brain and Language, 85*(3), 402-408.
- Jentschke, S., & Koelsch, S. (2007). Einflüsse von Entwicklungsveränderungen auf die Musikwahrnehmung und die Beziehung von Musik und Sprache. In M. Fuchs (Ed.), *Kinder- und Jugendstimme* (Vol. 1: Singen und lernen, pp. 67-90). Berlin: Logos.
- Jentschke, S., & Koelsch, S. (2009). Musical training modulates the development of syntax processing in children. *Neuroimage, 47*(2), 735-744.
- Jentschke, S., Koelsch, S., Sallat, S., & Friederici, A. D. (2008). Children with specific language impairment also show impairment of music-syntactic processing. *Journal of Cognitive Neuroscience, 20*(11), 1940-1951.
- Joanisse, M. F., & Seidenberg, M. S. (1998). Specific language impairment: A deficit in grammar or processing? *Trends in Cognitive Sciences, 2*(7), 240-247.

- Joanisse, M. F., & Seidenberg, M. S. (2003). Phonology and syntax in specific language impairment: evidence from a connectionist model. *Brain Lang*, 86(1), 40-56.
- Jusczyk, P. W. (2002). How Infants Adapt Speech-Processing Capacities to Native-Language Structure. *Current Directions in Psychological Science*, 11(1), 15-18.
- Jusczyk, P. W., Hirsh-Pasek, K., Nelson, D. G., Kennedy, L. J., Woodward, A., & Piwoz, J. (1992). Perception of acoustic correlates of major phrasal units by young infants. *Cognitive Psychology*, 24(2), 252-293.
- Juslin, P. N., & Sloboda, J. A. (2001). *Music and emotion : theory and research*. Oxford, New York: Oxford University Press.
- Knösche, T. R., Neuhaus, C., Haueisen, J., Alter, K., Maess, B., Witte, O. W., et al. (2005). Perception of phrase structure in music. *Human Brain Mapping*, 24(4), 259-273.
- Koelsch, S. (2001). *Der soziale Umgang mit Fähigkeit: die geschlossene Gesellschaft und ihre Freunde*. Wiesbaden: Dareschta-Verlag.
- Koelsch, S. (2005). Neural substrates of processing syntax and semantics in music. *Current Opinion in Neurobiology*, 15(2), 207-212.
- Koelsch, S., Fritz, T., Schulze, K., Alsop, D., & Schlaug, G. (2005). Adults and children processing music: an fMRI study. *Neuroimage*, 25(4), 1068-1076.
- Koelsch, S., Fritz, T., von Cramon, D. Y., Müller, K., & Friederici, A. D. (2006). Investigating emotion with music: an fMRI study. *Hum Brain Mapp*, 27(3), 239-250.
- Koelsch, S., Grossmann, T., Gunter, T. C., Hahne, A., Schröger, E., & Friederici, A. D. (2003). Children processing music: electric brain responses reveal musical competence and gender differences. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15(5), 683-693.
- Koelsch, S., Gunter, T., Friederici, A. D., & Schröger, E. (2000). Brain indices of music processing: "nonmusicians" are musical. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12(3), 520-541.
- Koelsch, S., Gunter, T. C., v Cramon, D. Y., Zysset, S., Lohmann, G., & Friederici, A. D. (2002). Bach speaks: a cortical "language-network" serves the processing of music. *Neuroimage*, 17(2), 956-966.
- Koelsch, S., & Siebel, W. A. (2005). Towards a neural basis of music perception. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(12), 578-584.
- Krumhansl, C. L., & Jusczyk, P. W. (1990). Infants' perception of phrase structure in music. *Psychological Science*, 1(1), 70-73.
- Krumhansl, C. L., & Keil, F. C. (1982). Acquisition of the hierarchy of tonal functions in music. *Memory and Cognition*, 10(3), 243-251.
- Leonard, L. B., & Eyer, J. A. (1996). Deficits of grammatical morphology in children with specific language impairment and their implications for notions of bootstrapping. In J. L. Morgan & K. Demuth (Eds.), *Signal to syntax* (pp. 233-248). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Maess, B., Koelsch, S., Gunter, T. C., & Friederici, A. D. (2001). Musical syntax is processed in Broca's area: an MEG study. *Nature Neuroscience*, 4(5), 540-545.
- Magne, C., Schön, D., & Besson, M. (2003). Prosodic and melodic processing in adults and children. Behavioral and electrophysiologic approaches. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 999, 461-476.
- Magne, C., Schön, D., & Besson, M. (2006). Musician children detect pitch violations in both music and language better than nonmusician children: behavioral and electrophysiological approaches. *J Cogn Neurosci*, 18(2), 199-211.

- McMullen, E., & Saffran, J. R. (2004). Music and Language: A Developmental Comparison. *Music Perception, 21*(3), 289-311.
- Meyer, L. B. (1956). *Emotion and meaning in music*. Chicago: University of Chicago Press.
- Morgan, J. L., Meier, R. P., & Newport, E. L. (1987). Structural packaging in the input to language learning: Contributions of prosodic and morphological marking of phrases to the acquisition of language. *Cognitive Psychology, 19*(4), 498-550.
- Münste, T. F., Altenmüller, E., & Jäncke, L. (2002). The musician's brain as a model of neuroplasticity. *Nature Reviews Neuroscience, 3*(6), 473-478.
- Näätänen, R. (2000). Mismatch negativity (MMN): perspectives for application. *International Journal of Psychophysiology, 37*(1), 3-10.
- Pantev, C., Engelien, A., Candia, V., & Elbert, T. (2001). Representational cortex in musicians. Plastic alterations in response to musical practice. *Annals of the New York Academy of Sciences, 930*, 300-314.
- Patel, A. D., Peretz, I., Tramo, M., & Labreque, R. (1998). Processing prosodic and musical patterns: a neuropsychological investigation. *Brain Lang, 61*(1), 123-144.
- Peretz, I., & Zatorre, R. J. (2003). *The cognitive neuroscience of music*. Oxford, New York: Oxford University Press.
- Pinker, S. (1989). Language acquisition. In M. Posner (Ed.), *Foundations of cognitive science*. (pp. 359-399). Cambridge, MA: MIT Press.
- Riemann, H. (1877). *Musikalische Syntaxis. Grundriss einer harmonischen Satzbildungslehre*. Leipzig: Breitkopf und Härtel.
- Saffran, J. R. (2001). Words in a sea of sounds: the output of infant statistical learning. *Cognition, 81*(2), 149-169.
- Saffran, J. R. (2003). Musical learning and language development. *Ann N Y Acad Sci, 999*, 397-401.
- Saffran, J. R., Aslin, R. N., & Newport, E. L. (1996). Statistical learning by 8-month-old infants. *Science, 274*(5294), 1926-1928.
- Saffran, J. R., Loman, M. M., & Robertson, R. R. (2000). Infant memory for musical experiences. *Cognition, 77*(1), B15-23.
- Schlaug, G. (2001). The brain of musicians. A model for functional and structural adaptation. *Annals of the New York Academy of Sciences, 930*, 281-299.
- Schön, D., Magne, C., & Besson, M. (2004). The music of speech: music training facilitates pitch processing in both music and language. *Psychophysiology, 41*(3), 341-349.
- Shahin, A., Roberts, L. E., & Trainor, L. J. (2004). Enhancement of auditory cortical development by musical experience in children. *Neuroreport, 15*(12), 1917-1921.
- Thompson, W. F., Schellenberg, E. G., & Husain, G. (2004). Decoding speech prosody: do music lessons help? *Emotion, 4*(1), 46-64.
- Tillmann, B., Bharucha, J. J., & Bigand, E. (2000). Implicit learning of tonality: a self-organizing approach. *Psychol Rev, 107*(4), 885-913.
- Tillmann, B., Janata, P., & Bharucha, J. J. (2003). Activation of the inferior frontal cortex in musical priming. *Cogn Brain Res, 16*(2), 145-161.
- Tillmann, B., Janata, P., Birk, J., & Bharucha, J. J. (2003). The costs and benefits of tonal centers for chord processing. *J Exp Psychol Hum Percept Perform, 29*(2), 470-482.
- Tomblin, J. B., & Pandich, J. (1999). Lessons from children with specific language impairment. *Trends Cogn Sci, 3*(8), 283-285.

- Trainor, L. J., & Trehub, S. E. (1992). A comparison of infants' and adults' sensitivity to western musical structure. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 18(2), 394-402.
- Trainor, L. J., & Trehub, S. E. (1993). Musical context effects in infants and adults: key distance. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 19(3), 615-626.
- Trainor, L. J., & Trehub, S. E. (1994). Key membership and implied harmony in Western tonal music: developmental perspectives. *Percept Psychophys*, 56(2), 125-132.
- Trehub, S. E. (2000). Human processing predispositions and musical universals. In N. L. Wallin, B. Merker & S. Brown (Eds.), *The Origins of Music* (pp. 271-300.). Cambridge: MIT Press.
- Trehub, S. E. (2003). Musical predispositions in infancy: An update. In I. Peretz & R. J. Zatorre (Eds.), *The cognitive neuroscience of music* (pp. 3-20). Oxford: Oxford University Press.
- van der Lely, H. K. (2005). Domain-specific cognitive systems: insight from Grammatical-SLI. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(2), 53-59.
- Wallin, N. L., Merker, B., & Brown, S. (2000). *The origins of music*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Weber, C., Hahne, A., Friedrich, M., & Friederici, A. D. (2004). Discrimination of word stress in early infant perception: electrophysiological evidence. *Brain Res Cogn Brain Res*, 18(2), 149-161.
- Zatorre, R. J., & Peretz, I. (2001). The biological foundations of music. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 930.