

Stefan Koelsch & Erich Schröger

## **Neurowissenschaftliche Grundlagen der Musikverarbeitung**

(21.02.2007, 36.583 Zeichen)

### **Zum Thema**

Wenn wir Musik hören, führt unser Gehirn eine Vielzahl komplexer Funktionen aus. Diese dienen der akustischen Analyse, dem auditorischen Gedächtnis, der auditorischen Gestaltbildung, sowie der Verarbeitung musikalischer Syntax und Semantik. Außerdem kann das Hören von Musik Effekte haben auf Emotionen, das vegetative Nervensystem, das Hormon- und das Immunsystem. Schließlich kann die Wahrnehmung von Musik zur Bewegung anregen (z. B. Mitsingen, Mittanzen oder Mitklatschen). Dieses Kapitel stellt die unterschiedlichen neuronalen Module vor, die in die Wahrnehmung von Musik involviert sind. Außerdem wird gezeigt, zu welchem Zeitpunkt nach Eintreffen des Hörreizes diese Module aktiv sind und wo im Gehirn diese Module wahrscheinlich lokalisiert sind.

### **1. Einleitung**

Musik ist einer der ältesten und grundlegenden sozial-kognitiven Bereiche des Menschen. Die musikalischen Fähigkeiten des Menschen hatten wahrscheinlich schon bei der Evolution von Sprache eine Schlüsselrolle. Kinder lernen z. B. Sprache zunächst durch ihre musikalischen („prosodischen“) Aspekte. In allen menschlichen Kulturen haben Menschen Musik gemacht bzw. sich an Musik erfreut und gemeinschaftliches Musizieren hatte (und hat) wichtige evolutionäre Funktionen wie z. B. in der Kommunikation, Kooperation, Gruppenkoordination und bei der Herstellung sozialer Kohäsion. Aber wie und wo wird Musik im Gehirn verarbeitet? Wie entschlüsselt das Gehirn Töne und Akkorde, wie versteht es die Struktur und die Bedeutung von Musik und wie löst Musik Emotionen aus? Antworten auf diese Fragen können uns nicht nur helfen, das Phänomen der Musik besser zu verstehen (z. B. wie und wieso bestimmte Klänge

bestimmte Assoziationen und Emotionen hervorrufen), sondern sie können auch helfen, das menschliche Gehirn - und damit die Spezies Mensch - besser zu verstehen. Um diese Fragen zu beantworten, teilen wir die Wahrnehmung von Musik in unterschiedliche Verarbeitungsprozesse ein (s. Abbildung 1).

## **2. Neuronale Korrelate der Musikwahrnehmung**

### *Verarbeitung akustischer Eigenschaften*

Akustische Information (d. h. Luftdruckschwankungen) werden zunächst im Innenohr in neuronale Impulse umgewandelt. Diese erreichen dann über den Hirnstamm und den Thalamus vor allem den (primären) auditorischen Kortex. Bereits die Colliculi inferiores des Hirnstamms und der Thalamus sind in der Lage, gefährliche und unangenehme akustische Reize zu erkennen und diese – außer in den auditorischen Kortex – auch unmittelbar in Strukturen des Gehirns weiterzuleiten, die entscheidend in emotionale Prozesse und in die Kontrolle emotionalen Verhaltens involviert sind. Diese Strukturen sind z. B. die Amygdala (eine tiefer im Gehirn gelegene Struktur, die für Emotionen wichtig ist) und der Orbitofrontalkortex (eine Struktur des Frontalhirns, die z. B. wichtig ist für die emotionale Bewertung und Kontrolle emotionalen Verhaltens, s. auch Abbildung 2).

Im auditorischen Kortex (höchstwahrscheinlich in primären und angrenzenden sekundären auditorischen Feldern) werden akustische Merkmale wie Tonhöhe, Tonchroma, Timbre, Intensität und Rauigkeit extrahiert. Diese Extraktion akustischer Merkmale geschieht ca. 12-100 Millisekunden (ms) nach Eintreffen eines akustischen Reizes und kann mittels sogenannter evozierter Potentiale im EEG gemessen werden (z. B. P1 und N1 Potentiale; s. die Infobox " Grundbegriffe der neurowissenschaftlichen Musikforschung". Für Details zu einzelnen neurowissenschaftlichen Messmethoden s. die Tabelle am Ende des Artikels, zur Lokalisation des auditorischen Kortex' im Gehirn siehe Abbildung 2). Interessanterweise kann bereits ein

einzigster Ton (d. h. ein Bruchteil derjenigen akustischen Information, die z. B. ein Wort ausmacht) bedeutungstragende Information wie “hohl”, “rauh”, “spitz”, oder “hell” vermitteln und wir können oft anhand eines einzigen Tons ein Instrument erkennen. Das heißt, dass basale akustische Parameter uns manchmal schneller semantische Informationen übermitteln können als dies Sprache tut.

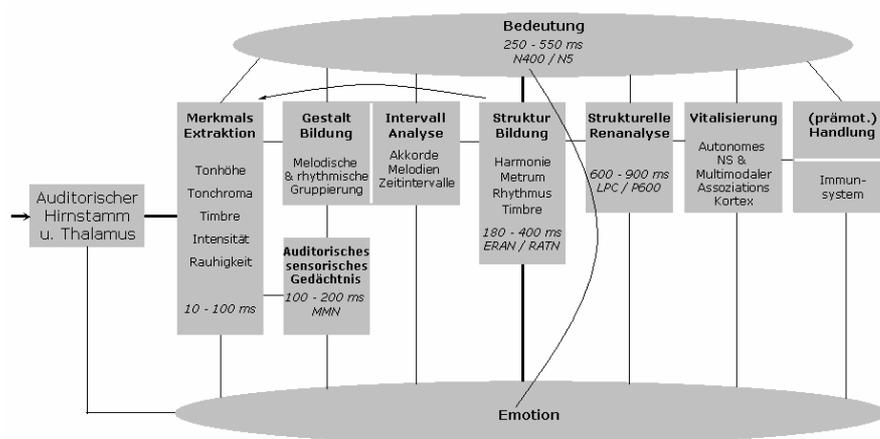


Abbildung 1: Das neurokognitive Modell der Musikwahrnehmung und seine einzelnen Verarbeitungsstufen (nach Koelsch & Siebel, 2005, S. 579). Für die Erklärung der Abkürzungen s. die Infobox "Grundbegriffe der neurowissenschaftlichen Musikforschung".

### *Sensorisches Gedächtnis und Bildung auditorischer Gestalten*

Bereits während der Analyse elementarer akustischer Merkmale (s. Abbildung 1) erreicht die auditorische Information das „auditorische sensorische Gedächtnis“ und diejenigen Verarbeitungsstufen, in welchen auditorische Gestalten gebildet werden. Das auditorische sensorische Gedächtnis erfüllt die beiden wichtigen Funktionen, eintreffende akustische Information über die Zeit zu integrieren und für einige Sekunden lang verfügbar zu halten. Akustische Information kann nur über die Zeit hinweg mitgeteilt werden, daher ist zeitliche Integration

notwendig, um in der kontinuierlichen Information des akustischen Stroms zusammenhängende Elemente zu erkennen. Dies passiert ständig, ohne dass es uns bewusst wird, z. B. wenn wir wahrnehmen, wie sich Lautstärke ändert, oder wenn wir Konsonanten, Silben und Wörter erkennen. Das kurzfristige (mehrere Sekunden lange) Verfügbarhalten der Information ist auch wichtig, um Höreindrücke mit Inhalten des Langzeitgedächtnisses in Beziehung zu setzen. Letztlich ist das Ergebnis der auditiven sensorischen Gedächtnisprozesse die Erstellung einer reichhaltigen Repräsentation des Gehörten, in die sowohl die Vorverarbeitung in den einzelnen Stationen der Hörbahn wie auch unser Wissen über früher Gehörtes eingeht. Die Vorgänge im auditorischen sensorischen Gedächtnis können elektrophysiologisch (also z. B. anhand des EEGs) mit der sog. Mismatch-Negativität (MMN) untersucht werden (Schröger, 2005). Die MMN ist eine Komponente des "ereigniskorrelierten Hirnpotentials" (EKP).

Die Hauptgeneratoren der MMN wurden im auditorischen Kortex lokalisiert (innerhalb und in direkter Nachbarschaft des primären auditorischen Kortex). Neurone, die sich im frontalen Kortex befinden, scheinen ebenfalls entscheidend in die Generierung der MMN involviert zu sein. Dabei spielen z. B. der inferiore frontolaterale Kortex, wahrscheinlich auch der dorsolaterale präfrontale Kortex und der Orbitofrontalkortex eine Rolle (siehe auch Abbildung 2).

Die Bildung "auditorischer Gestalten", d. h. die Verbindung einzelner akustischer Ereignisse zu zusammenhängenden auditorischen Ereigniseinheiten (wie z. B. zu Motiven oder Melodien) beinhaltet Prozesse melodischer und rhythmischer Gruppierung. Diese Bildung von Zusammenhängen wird auch als "Auditorische Szenenanalyse" (engl. "Auditory scene analysis") bezeichnet. Die Bildung auditorischer Gestalten folgt den Gestaltprinzipien von z. B. Ähnlichkeit, Nähe oder Kontinuität. Hierzu einige Beispiele: (1) die Einzeltöne eines Akkordes werden als Akkord wahrgenommen, weil sie zeitgleich gespielt werden; (2) spielt man zu einer Akkordfolge in tiefer

Lage die Töne einer Melodie in hoher Lage, werden die Melodietöne aufgrund des Prinzips der Nähe als zur Melodie zugehörig wahrgenommen (und nicht als Bestandteile der Akkorde); (3) spielt man die Melodietöne auf dem Cello und zeitgleich die Akkorde auf dem Klavier, werden die Cellotöne wegen ihres ähnlichen Timbres als Melodie gehört (Gestaltprinzip der Ähnlichkeit); (4) kreuzen sich zwei Melodielinien (wenn sie z. B. auf zwei Flöten gespielt werden), wird die eine Melodielinie als fallend und die andere als aufsteigend empfunden (Gestaltprinzip der Kontinuität).

Die Prozesse auditorischer Gestaltbildung sind nicht nur für die Wahrnehmung von Musik wichtig, sondern auch im alltäglichen Leben von großer Bedeutung. Dadurch können beim Hören akustische Objekte verfolgt und eine kognitive Repräsentation der akustischen Umwelt aufgebaut werden (z. B. um die Stimme eines Gesprächspartners von den Umgebungsgeräuschen zu trennen). Die Bildung auditorischer Gestalten ist wahrscheinlich eng an eine Verarbeitungsstufe der genaueren Analyse von Intervallen gebunden, wie z. B. einer detaillierteren Verarbeitung von Tonhöhen-Relationen zwischen den Tönen eines Akkordes (um zu bestimmen, ob es sich z. B. um einen Dur- oder Mollakkord handelt).

In die auditorische Gestaltbildung ist insbesondere das Planum temporale involviert, ein Areal des auditorischen Kortex, das posterior vom primären auditorischen Kortex liegt (Griffiths & Warren, 2002; siehe auch Abbildung 2). Eine Funktion des Planum temporale ist die Integration mehrerer akustischer Reize zu einem auditorischen Objekt (hierfür wird natürlich auch das auditorische sensorische Gedächtnis benötigt, das wie erwähnt mittels der MMN untersucht werden kann). Für die genauere Analyse von Intervallen scheint zusätzlich auch das Planum polare (das anterior vom primären auditorischen Kortex liegt) eine Rolle zu spielen (Peretz & Zatorre, 2005).

### **Unter der Lupe: Grundbegriffe der neurowissenschaftlichen Musikforschung**

- **EKP/ERP:** *Ereigniskorreliertes Potential* (engl. ERP, Event-related potential), bezeichnet Änderungen im Elektroenzephalogramm (EEG), die als Reaktion auf äußere oder innere Ereignisse (Reize) auftreten. Das EKP bildet die elektrische Aktivität von Nervenzellen ab, die mit der Verarbeitung von Reizen in Zusammenhang steht.
- **(auditorische) N1:** Eine EKP-Komponente mit negativer Polarität an frontozentralen Elektrodenpositionen, die ca. 100 ms nach Beginn eines Hörreizes auftritt. Sie wird als ein Korrelat perzeptueller Verarbeitung betrachtet. Die N1 hängt von den physikalischen Eigenschaften des Hörreizes ab, aber auch (in geringerem Ausmaß) von der kognitiven Verarbeitung durch den Hörer: Sie ist z. B. bei lauten Reizen größer als bei leisen Reizen (physikalischer Einfluss) und bei Reizen, denen Aufmerksamkeit geschenkt wird größer, als bei solchen, die ignoriert werden (kognitiver Einfluss). Die N1 besteht aus unterschiedlichen Teilkomponenten, die v. a. im auditorischen Kortex erzeugt werden.
- **MMN:** *Mismatch-Negativität*. Eine Komponente im EKP mit negativer Polarität an frontozentralen Elektrodenpositionen, die etwa 100 bis 250 ms nach Beginn eines Hörreizes ausgelöst wird. Sie ist eine Reaktion auf die Abweichung eines Reizes, der in einer Serie von sich wiederholenden Standardtönen von diesen abweicht. Solche Wiederholungen können durch physikalische Merkmale gekennzeichnet sein (z. B. gleiche Tonhöhe oder gleiche Lautstärke von Tönen). So löst etwa ein Ton mit einer Frequenz von 1.050 Hz eine MMN aus, wenn er innerhalb einer Sequenz von Tönen mit einer Frequenz von 1.000 Hz dargeboten wird. MMN kann aber auch als Reaktion auf die Verletzung abstrakter Regularitäten auftreten, etwa wenn ein Tonpaar mit absteigender Frequenz in einer Serie von Tonpaaren mit aufsteigender Frequenz auftritt. Die MMN entsteht, wenn das Hörsystem eine

Nichtübereinstimmung (Mismatch) zwischen einem Modell, das die Regularitäten der akustischen Umwelt abbildet und der Repräsentation des aktuellen Reizes feststellt. Die MMN ist also ein objektiver Indikator für Inhalte und Prozesse des auditiven sensorischen Gedächtnisses.

- **ERAN:** *Early right anterior negativity*. Eine EKP-Komponente, die etwa 150-200 ms nach einer musiksyntaktischen Verletzung in einer Akkordfolge auftritt. Sie weist eine anteriore Verteilung auf, häufig mit leicht rechtshemisphärischer Dominanz. Sie gilt als musikalisches Pendant der ELAN.
- **ELAN:** *Early left anterior negativity*. Eine EKP-Komponente, die etwa 150-200 ms nach einer syntaktischen Verletzung in einem gesprochenen Satz auftritt. Sie weist eine anteriore, oft leicht linkslateralisierte Verteilung auf. Sie gilt als sprachliches Pendant der ERAN. Die ELAN zeigt Verletzungen der Wortkategorie an. Beispielsweise tritt eine ELAN auf das Wort „gebügelt“ im Satz „Das Hemd wurde am gebügelt“ relativ zum Wort „gebügelt“ im Satz „Das Hemd wurde gebügelt“ auf. Wenn auf eine syntaktische Verletzung die ELAN folgt, weiß man, dass spätestens zu diesem Zeitpunkt die Identifikation der Wortkategorie stattgefunden haben muss. Die ELAN wird in Regionen des Gehirns generiert, die auf die Verarbeitung von Sprache spezialisiert sind.
- **N400:** Eine Welle im EKP mit negativer Polarität, die etwa 250-400 ms nach Beginn eines Wortes auftritt, das semantisch unerwartet und somit semantisch nicht oder nur schwer zu integrieren ist. Beispielsweise löst das Wort „gebügelt“ im Satz „Das Kaninchen wurde gebügelt“ relativ zum Wort „gebügelt“ im Satz „Das Hemd wurde gebügelt“ eine N400-Welle aus.
- **N5:** Diese Welle spiegelt Prozesse harmonischer Integration beim Hören von Musik wider, die meist auf die Detektion eines irregulären Akkordes folgen. Diese Prozesse stehen auch mit dem Entstehen musikalischer Bedeutung in Beziehung (z.

B. kann ein unerwarteter Akkord Spannung auslösen, die eine Bedeutung für den Hörer hat (s. den Abschnitt zur musikalischen Bedeutung). Daher reflektiert die N5 - ähnlich wie die N400 im Bereich der Sprache - möglicherweise auch musik-semantische Verarbeitungsprozesse.

- **P600, auch SPC** (Syntactic positive shift) oder **LPC** (Late positive component): Eine Komponente des EKPs, die durch Wörter in gesprochenen Sätzen nach ca. 600 ms ausgelöst wird, welche Phrasenstrukturverletzungen aufweisen. Das EKP auf ein Wort, das eine Phrasenstrukturverletzung in einem Satz darstellt oder syntaktisch untypisch ist, weist im Vergleich zu Sätzen mit einem syntaktisch leichter zu integrierenden Wort an frontozentralen und zentroparietalen Elektrodenpositionen eine relative Positivierung auf. Sie wird mit der syntaktischen Reanalyse bzw. Reparatur eines Satzes in Zusammenhang gebracht, für den keine adäquate Interpretation zur Verfügung steht. Beispielsweise tritt eine P600 auf das Wort „gebügelt“ im Satz „Das Hemd wurde am gebügelt“ relativ zum Wort „gebügelt“ im Satz „Das Hemd wurde gebügelt“ auf, wenn Personen beurteilen sollen, ob dieser Satz syntaktisch korrekt oder inkorrekt ist. In der Musikforschung wurde die P600 als Reaktion auf musik-syntaktische Irregularitäten gefunden (und dann oft LPC genannt), wenn z. B. Versuchspersonen beurteilen sollten, ob ein Akkord innerhalb einer Kadenz korrekt oder inkorrekt ist. Möglicherweise werden dabei musik-syntaktische Irregularitäten strukturell integriert.
- **CPS: Closure positive shift.** Eine Komponente des EKPs, die durch intonationsbedingte Phrasengrenzen in Sprache und Musik nach ungefähr 450-600 ms ausgelöst wird. Sie wird interpretiert als die Beendigung der Verarbeitung einer Phrasengrenze, die eher auf prosodische als auf syntaktische Eigenschaften anspricht.

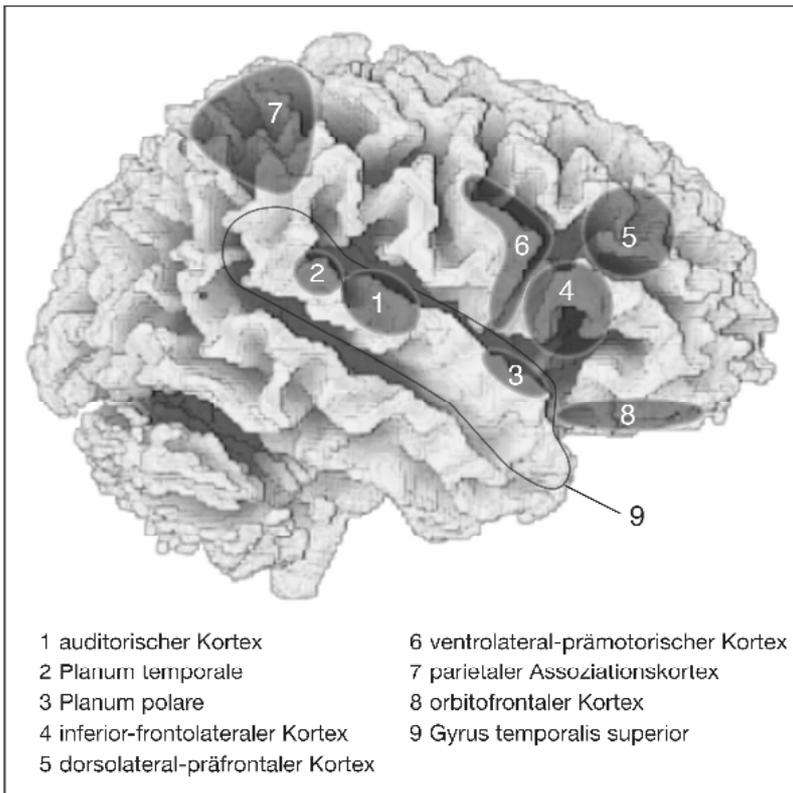


Abbildung 2: Lokalisation einiger Hirnareale mit wichtigen Funktionen für die Verarbeitung von Musik.

### *Die Verarbeitung musikalischer Syntax ("Satzbauregeln")*

Beim Hören von Musik werden im Anschluss an die frühen Verarbeitungsstufen die musikalische Ereignisse musiksyntaxtisch (d. h. entsprechend einer „Satzstruktur“) analysiert und eingeordnet (s. Abbildung 1). Mit anderen Worten: in jeder Art von Musik werden einzelne Elemente wie z. B. Töne, Intervalle oder Akkorde entsprechend musikalisch-syntaxtischer Regeln zu zusammenhängenden Strukturen verbunden (Koelsch, 2005; Koelsch & Siebel, 2005; Patel, 2003). Diese Herstellung von Bezügen zwischen den Einzelementen der musikalischen Struktur erfordert ein Regelsystem, das auch als musikalische Syntax bezeichnet wird (siehe dazu auch Riemann, 1877/1971).

So müssen beispielsweise Akkorde in Beziehung zu den vorhergehenden gesetzt, oder Phrasengrenzen im Musikstrom entdeckt werden. Musik-syntaktische Regularitäten gibt es selbstverständlich nicht nur für Harmonien, sondern auch für andere musikalische Aspekte wie Rhythmus und Metrum.

Der Verarbeitung musikalischer Syntax scheint stark automatisierten neuronale Prozessen zu unterliegen: so wurden elektrophysiologische Effekte (EEG) der Verarbeitung musikalischer Syntax selbst dann beobachtet, wenn die Versuchspersonen beim Musikhören ein Buch lasen, oder ein Video-Spiel spielten (Koelsch & Siebel, 2005). Nicht nur ausgebildete Musiker, sondern auch sog. Nichtmusiker (d. h. Personen ohne formales musikalisches Training) haben ein erstaunlich genaues (implizites) Wissen über die Regeln der musikalischen Syntax (Koelsch, 2005). Dieses Wissen über die Regeln der Musik wird wahrscheinlich durch Hörerfahrung im Alltagsleben erworben.

### **Unter der Lupe: Die Verarbeitung der musikalischen Syntax**

In dur-moll-tonaler Musik folgen Akkordfunktionen entsprechend bestimmter Regularitäten aufeinander. Innerhalb einer Kadenz bildet z. B. die Dominante-Tonika-Fortschreitung ein reguläres Kadenzende. Im Vergleich dazu ist die Fortschreitung von der Dominante zur Subdominantparallele am Ende einer Kadenz irregulär (siehe auch Abbildung 3a, b; der Pfeil zeigt die irreguläre Akkordfunktion an). Harmonische Regularitäten bilden lediglich einen Teil der musikalischen Syntax. Andere strukturelle Aspekte umfassen melodische, rhythmische und metrische Strukturen. EEG- und MEG-Studien haben gezeigt, dass musik-syntaktische Irregularitäten Hirnaktivitäten hervorrufen, die in frontalen Gebieten des Gehirns maximal sind und im Zeitbereich von 170-350 ms nach der Darbietung eines unerwarteten Akkords auftreten (Koelsch, 2005; Maess u. a., 2001; Koelsch & Siebel, 2005; hirnelektrische Antworten auf irreguläre Akkordfunktionen sind in Abbildung 3c dargestellt).

Funktionell-bildgebende Studien zeigen, dass vor allem der inferiore frontolaterale Kortex in die Verarbeitung musikalischer Syntax involviert ist (bilateral, mit rechts-hemisphärischer Gewichtung, s. Abbildung 3d). In der linken Hemisphäre wird dieses Areal auch „Broca-Areal“ genannt. Außer dieser Struktur scheinen auch der vordere Anteil des Gyrus temporalis superior (GTS) und der ventro-laterale prämotorische Kortex (vlPMC) eine wichtige Rolle bei der musik-syntaktischen Verarbeitung zu spielen (s. auch Abbildung 2). Das Broca-Areal und der vordere Anteil des GTS sind auch wichtig für die syntaktische Verarbeitung von Sprache (Friederici, 2002).

Das Ergebnis musik-syntaktischer Verarbeitungsprozesse kann auch von emotionalen Effekten begleitet werden (→ Beitrag "Musik und Emotion"), oder die Musik kann eine (semantische) Bedeutung bekommen: ein irregulärer Akkord kann z. B. überraschen und die Muster von Spannung und Entspannung, die durch irreguläre Akkorde und deren Auflösung induziert werden, haben eine musikalische Bedeutung (Meyer, 1956). Weitere

syntaktische Verarbeitungsstufen können auch Prozesse struktureller Re-Analyse von Ereignissen umfassen: solche zeitlich rückwärts orientierten Prozesse spiegeln sich im EKP z. B. in späten Positivierungen wider, vor allem in der sog. P600, die auch als „Late positive component“, (LPC) bezeichnet wird, (Besson & Faita, 1995).

Die genannten Strukturen spielen also nicht nur eine Rolle für die syntaktische Verarbeitung von Musik, sondern auch für die syntaktische Verarbeitung von Sprache. Aktivierungen des Broca-Areals und des vIPMC wurden tatsächlich auch für die Verarbeitung von Tonsequenzen, Tonunterscheidungs-Aufgaben, und Aufgaben zur seriellen Prädiktion gefunden (Janata & Grafton, 2003). Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Verarbeitung struktureller Aspekte sequentieller Information und die Detektion struktureller Irregularitäten das Herstellen struktureller Relationen zwischen aufeinanderfolgenden Ereignissen erfordert. Beim Musikhören erfordert z. B. die musikstrukturelle Analyse von Akkordfunktionen eine Verarbeitung der harmonischen Relation zwischen einer Akkordfunktion und dem vorhergehenden harmonischen Kontext. Diese Verarbeitung ist für irreguläre Akkorde schwieriger als für reguläre, z. B. weil die Verarbeitung der musik-syntaktischen Relation für irreguläre Akkorde ungewöhnlicher ist. Diese Schwierigkeit des Herstellens der Relation zwischen einer irregulären Akkordfunktion und einem vorhergehendem harmonischem Kontext scheint zu einer stärkeren Aktivierung der genannten Regionen zu führen. Als Effekt werden die musik-syntaktisch irregulären Akkorde als unerwartet wahrgenommen.

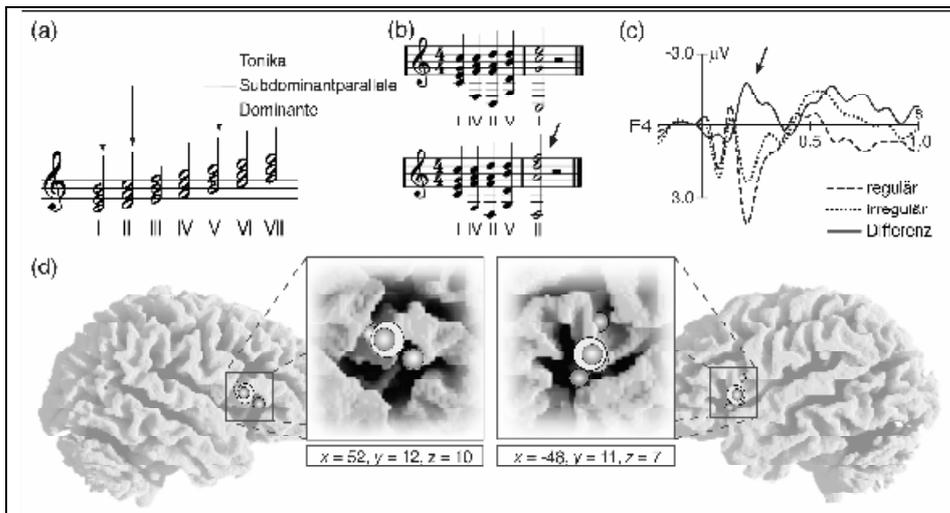


Abbildung 3: Beispiele für Akkordfunktionen und ihre Beziehung zu hirnelektrischen Aktivitäten: (a) der Akkord auf der ersten Skalenstufe wird als Tonika bezeichnet, der Akkord auf dem zweiten Skalenton als Subdominantparallele, der Akkord auf dem fünften Skalenton als Dominante; (b) reguläre Dominante-Tonika-Fortschreitung am Kadenzende (oben) und weniger reguläre Fortschreitung von der Dominante zur Subdominantparallele (unten, der Pfeil zeigt die weniger reguläre Akkordfunktion an), (c) hirnelektrische Antworten, die durch den jeweils letzten Akkord der in (b) dargestellten Akkordfolgen evoziert wurden. Im Experiment wurden beide Kadenztypen in zufälliger Reihenfolge, mit gleicher Auftrittswahrscheinlichkeit, in allen zwölf Durtonarten von einem Computer gespielt. Versuchspersonen waren 20 Nichtmusiker, die nicht über die unterschiedlichen Akkorde informiert wurden und auch keine Höraufgabe zu diesen Akkorden hatten. Die hirnelektrischen Antworten auf die irregulären Akkorde unterscheiden sich deutlich von denen auf reguläre Akkorde (am besten in der schwarzen Differenzkurve zu sehen, in der die Potentiale der regulären Akkorde von denen der irregulären Akkorde subtrahiert sind). Der erste Unterschied zwischen den beiden Kurven hat ein Maximum bei ca. 200 ms nach der Darbietung des fünften Akkordes (Pfeil) und spiegelt musik-syntaktische Verarbeitungsprozesse wider; (d) Aktivierungen (kleinere graue Kugeln), die in funktionell-bildgebenden Studien im Zusammenhang mit musik-syntaktischen Verarbeitungsprozessen beobachtet wurden. Die größeren hellen Kreise zeigen die Mittelung der Koordinaten der kleineren Kugeln. Daraus wird deutlich, dass der inferioren frontolaterale Kortex eine wichtige Rolle bei der musik-syntaktischen Verarbeitung spielt.

### *Die Verarbeitung der musikalischen Bedeutung (Semantik)*

Musik ist ein Mittel zur Kommunikation, welches zwar anders als gesprochene Sprache funktioniert, jedoch ebenfalls Bedeutung übermitteln kann. Ein Mensch, der Musik spielt oder komponiert, möchte sich ausdrücken bzw. etwas mitteilen. Das, was mitgeteilt werden soll, wird „musikalische Bedeutung“ oder auch „musikalische Semantik“ genannt. Theoretisch können unterschiedliche Aspekte musikalischer Semantik unterschieden werden: (a) musikalische Semantik wird durch Informationen übermittelt, die an Objekte erinnern (z. B. an einen Vogel), oder durch Informationen, die Eigenschaften bezeichnen (z. B. hell, dumpf, schnell, spitz, weich, warm); (b) musikalische Semantik wird vermittelt durch das Hervorrufen bzw. das Erkennen einer Stimmung (z. B. fröhlich). Hier ist die Ähnlichkeit zur emotionalen Prosodie (also zur sprechmotorischen Aktivität), und/oder die Ähnlichkeit zu gestischem Ausdruck (also ebenfalls Motorik) von Bedeutung (z. B. die Imitation einer ausschweifenden, hektischen, heldenhaften, eleganten, ruckartigen oder behäbigen Geste). Außerdem spielen möglicherweise auch Ähnlichkeiten zwischen Musik und körperlichen Empfindungen eine Rolle, die wir von unterschiedlichen Stimmungen her kennen (Herzklopfen, Herzstolpern, flaches Atmen, tiefes Durchatmen, warmes, kaltes oder taubes Körpergefühl, etc.); (c) musikalische Bedeutung wird vermittelt durch extramusikalische Assoziationen, sowohl durch explizite (z. B. eine Nationalhymne) sowie implizite (ein Kirchenchoral erweckt Assoziationen an Kirche, auch wenn man diesen Choral vorher noch nie gehört hat. Es ist ausreichend zu erkennen, dass es sich hier um Kirchenmusik handelt). Im Gegensatz zu den drei vorher aufgeführten Übermittlungsformen musikalischer Bedeutung müssen extramusikalische Assoziationen selbstverständlich kulturell erworben werden.

Bedeutung, die durch das Arrangement formaler Strukturen entsteht (Spannung, Auflösung, Überraschung durch einen unerwarteten Akkord, usw.) bezeichnet man musikwissenschaftlich auch als Bedeutung von Musik „sui generis“.

### **Unter der Lupe: Die Untersuchung der Wahrnehmung musikalischer Semantik mittels Priming-Experimenten**

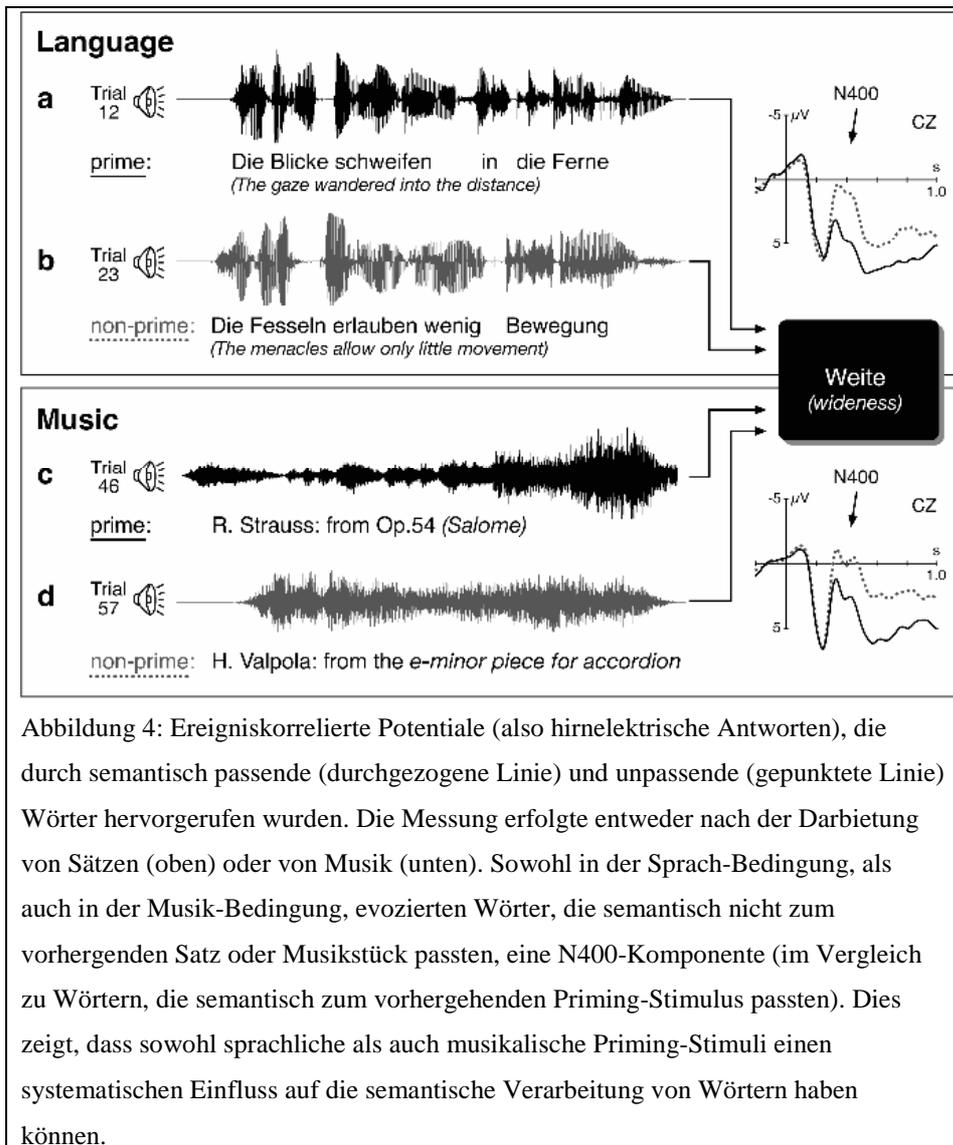
Im Bereich der Sprache können semantische Verarbeitungsprozesse mit sogenannten „Priming-Experimenten“ untersucht werden. Priming bezeichnet ein experimentelles Vorgehen, bei dem die Wahrnehmung einer Versuchsperson durch einen vorhergehenden Stimulus in eine bestimmte Richtung gelenkt wird. Erst danach folgt der eigentlich Testreiz. Wenn man z. B. einen Satz hört wie "Der Junge singt ein Lied" erwartet man das Wort "Musik" eher als das Wort "Stift". Dieser Effekt wird als semantischer Priming-Effekt bezeichnet. Er hat zur Folge, dass Wörter mit semantisch enger Relation zu einem vorhergehenden Kontext schneller und leichter verarbeitet werden, als semantisch unverwandte Wörter. Ein elektro-physiologischer Index semantischen Primings ist die N400-Komponente des ereigniskorrelierten elektrischen Hirnpotentials. Die N400-Welle entsteht im Gehirn normalerweise ca. 250-400 Millisekunden (ms) nach der Darbietung eines Worts. Die durch Wörter evozier- te N400 ist sensitiv für Manipulationen semantischer Relationen: sie ist größer, wenn auf einen Satz wie "Der Junge singt ein Lied" ein Zielwort ohne semantische Relation zu dem Satz folgt (z. B. "Stift") und kleiner, wenn das Zielwort einen engen semantischen Bezug zum Satz hat (z. B. "Musik", siehe auch Abbildung 4 rechts oben).

Bei bestimmten Passagen von Beethoven-Symphonien denken wir z. B. eher an "Held" als an "Floh" und bei bestimmten Passagen von Mozart-Symphonien denken wir eher an "Engel" als an "Flegel". Gezeigt wurde dies mit semantischen Priming-Experimenten, in denen Sätze sowie kurze musikalische Exzerpte als Priming-Stimuli präsentiert wurden (Koelsch u. a., 2004; siehe

auch Abbildung 4). Ähnlich wie vorher beschrieben, hatten diese Priming-Stimuli semantisch entweder einen starken, oder einen schwachen Bezug zu einem Zielwort. Zielwörter waren abstrakte und konkrete Wörter (z. B. Illusion, Weite, Keller, König, Nadel, Treppe, Fluss, Mann). In der Sprachbedingung (in der die Zielwörter der Darbietung von Sätzen folgten), evozierten die semantisch unpassenden Wörter eine deutliche N400-Komponente (d. h. ein negatives hirnelektrisches Potential, dessen Maximum ca. 400 ms nach der Darbietung eines Wortes liegt, siehe Abbildung 4 rechts oben). Dieser Befund repliziert den klassischen semantischen Priming-Effekt aus Sprachexperimenten, bei dem Wörter, die semantisch nicht zum vorhergehenden Kontext passen, ebenfalls ein N400-Potential hervorrufen.

In der Musik-Bedingung (als die Zielwörter also nicht der Darbietung von Sätzen, sondern der Darbietung von ca. zehn Sekunden langen musikalischen Exzerpten folgten), wurde der gleiche N400-Effekt durch Wörter hervorgerufen, die semantisch nicht zur Bedeutung der vorher gespielten Musik passten (ähnlich wie wenn auf ein heroisches Beethoven-Exzerpt nicht das Wort „Held“, sondern das Wort „Floh“ folgt, s. Abbildung 4 rechts unten).

Die N400-Effekte unterschieden sich nicht zwischen Zielwörtern mit und ohne emotionalen Gehalt, was zeigt, dass musikalische Bedeutung nicht auf emotionale Aspekte beschränkt ist. Insgesamt zeigten die Ergebnisse, dass Musik Repräsentationen bedeutungsvoller Konzepte aktivieren kann und Musik einen systematischen Einfluss auf die semantische Verarbeitung von Wörtern haben kann. Musik kann also bedeutungstragende (d. h. semantische) Informationen übermitteln und musikalisches Priming kann identische Effekte auf die semantische Verarbeitung von Wörtern haben wie sprachliches Priming.



### *Vegetative und hormonelle Wirkungen von Musik*

Eine weitere Dimension der Verarbeitung musikalischer Informationen umfasst die mögliche Vitalisierung des Hörers durch die Aktivität des vegetativen Nervensystems (das vegetative Nervensystem ist an der Regulation der Aktivität praktisch aller Organe im Körper beteiligt und moduliert z. B.

Herzschlag, Atmung, Blutdruck, Verdauung und Stoffwechsel). Solch physiologische Effekte des Musikhörens treten im Zusammenhang mit der Integration musikalischer und nicht-musikalischer Inhalte in sogenannten Assoziationskortex des Gehirns (wahrscheinlich in den parietalen Assoziationskortex im Bereich der Brodmann-Area 7, s. auch Abbildung 2) auf (→ Beitrag "Musik und Emotion"). Schließlich können die neuronalen Aktivitäten der späten Phasen der Musikverarbeitung identisch sein mit den neuronalen Aktivitäten der frühen Stadien der Handlungsplanung und -initiierung (z. B. der prämotorischen Planung und Vorbereitung von Tanzbewegungen, oder der prämotorischen Aktivierung des Kehlkopfs beim Hören von Melodien; s. Koelsch u. a., 2006). Die motorische Anregung durch Musikhören, wie sie sich z. B. beim Mitbewegen, Tanzen, oder Mitsingen zeigt, hat für den Organismus wahrscheinlich nicht nur eine regenerative Funktion (wegen der Freude beim Tanzen oder Singen), sondern auch eine soziale Funktion wie z. B. das Herstellen von Gemeinschaft. Die enge Verbindung von Musikwahrnehmung und Handlungsplanung wurde besonders durch Studien deutlich, die gezeigt haben, dass das Hören von Klaviermusik bei Pianisten auch prämotorische Aktivierungen der Finger hervorruft (Haueisen & Knösche, 2001). Diese Handlungsinduktion wird wahrscheinlich begleitet von neuronalen Impulsen in den Hirnstamm (Formatio reticularis) der z. B. für die Freisetzung von Energie bei freudiger Erregung bedeutsam ist. Von diesem Teil des Hirnstamms gibt es wahrscheinlich Verbindungen zu Strukturen des auditorischen Hirnstamms, welche wiederum die Verarbeitung neu eintreffender akustischer Information beeinflussen können.

### **3. Zusammenfassung und Ausblick**

Die in diesem Kapitel vorgestellten Daten geben eine Idee davon, wie und wo Musik im Gehirn verarbeitet wird. Dabei fällt auf, dass Sprache und Musik im Gehirn sehr eng miteinander

verbunden sind. Die Verarbeitung von Sprache und Musik basiert auf stark überlappenden (teilweise sogar identischen) neuronalen Ressourcen und die Netzwerke im Gehirn, die bisher speziell für die Verarbeitung von Sprache zuständig zu sein schienen, verarbeiten offensichtlich auch (oder erst recht) Musik. Auch wenn funktionell-bildgebende Studien oft eine links-hemisphärische Gewichtung für die Verarbeitung von Sprache, und eine eher rechts-hemisphärische Gewichtung für die Verarbeitung von Musik zeigen, sind oft beide Hemisphären in die Verarbeitung sowohl von Sprache als auch von Musik involviert. Aus evolutionärer Sicht baut Musik daher nicht auf der Entwicklung von Sprache auf, sondern Musik ist tatsächlich Grundlage der Sprache.

Schließlich bleibt noch anzumerken, dass die meisten Probanden der hier vorgestellten Studien sogenannte „Nichtmusiker“ waren (also Personen ohne formale musikalische Ausbildung, von denen sich viele selber für „unmusikalisch“ hielten). Die Ergebnisse der Experimente zeigen daher, dass auch Nichtmusiker sehr genaue kognitive Repräsentationen musikalischer Regularitäten (d. h. musikalischer Syntax) besitzen, dass sie musik-syntaktische Information schnell und genau anhand dieser Repräsentationen verarbeiten können und dass auch Nichtmusiker die Bedeutung von Musik sehr genau verstehen können. In dieser Hinsicht zeigen die hier vorgestellten Daten auch, dass sogenannte Nichtmusiker tatsächlich sehr musikalisch sind, oder in anderen Worten: dass Musikalität eine natürliche Fähigkeit des menschlichen Gehirns ist.

Klangbeispiele der Stimuli und Manuskripte der Studien sind erhältlich über die Homepage <http://www.stefan-koelsch.de>.

Tabelle: Neurowissenschaftliche Messmethoden.

<b>Bezeichnung</b>	<b>Bedeutung</b>	<b>Vorteile</b>	<b>Nachteile</b>
EEG (Elektro- Enzephalogramm)	Misst die Änderung der hirnelektrischen Aktivität an der Oberfläche der Kopfhaut.	Hohe zeitliche Auflösung im Millisekunden-Bereich.	
fMRT/fMRI (Funktionelle Magnetresonanz- Tomographie)	Bestimmung von Orten neuronaler Aktivität im gesamten Kortex und in einigen subkortikalen Strukturen durch Messung des Sauerstoffgehalts des Blutes in wenigen Kubikmillimeter großen Volumina der jeweiligen Hirngebiete.	Hohe räumliche Auflösung, auch subkortikaler Strukturen.	Niedrige zeitliche Auflösung des Verlaufs zerebraler Aktivität.
PET (Positronen Emissions- Tomographie)	Misst über die Verteilung einer radioaktiv markierten Substanz die relative Durchblutung im Gehirn, die wiederum mit der relativen neuronalen	Räumliche Auflösung in der Größenordnung des fMRT	Zeitliche Auflösung im Minutenbereich

	Aktivität korreliert.		
MEG (Magnet-Enzephalogramm)	Misst die durch die elektrische Aktivität von Neuronen produzierten magnetischen Felder (ähnlich dem EEG).	Räumliche Auflösung besser als beim EEG, sensitiver für bestimmte neuronale Aktivitäten.	
Nahinfrarot-Spektroskopie (NIRS), auch als Optical Topography (OT) bezeichnet	Erfasst Veränderungen der optischen Eigenschaften (Lichtreflexionen) des Gehirns. Diese sind sensitiv für durch neuronale Aktivität bedingte Veränderungen des Sauerstoffgehaltes des Blutes.	Nicht invasiv mit hoher zeitlicher Auflösung	Relativ schlechte räumliche Auflösung
EROS (Event-Related Optical Signalling)	NIRS-ähnliche Methode, die Veränderungen im Membranpotential während Aktionspotentialen erfassen kann	Nichtinvasiv mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung.	Erfasst nur Signale die nahe der Kopfoberfläche erzeugt werden; (noch) nicht sehr verbreitet
Transkranielle Magnetstimulation (TMS)	Durch starke Magnetfelder wird neuronale Aktivität in bestimmten	Nichtinvasiv, hohe zeitliche und räumliche Auflösung	Mögliche negative Nebenwirkungen schränken die Anwendbarkeit

	Gehirnregionen induziert. So kann u. a. die Funktion bestimmter Regionen ermittelt werden.		(etwas) ein
--	--	--	-------------

### Literatur:

Besson, M. & Faita, F. (1995). An event-related potential study of musical expectancy: Comparison of musicians with nonmusicians. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21 (6), 1278-1296.

Friederici, A. D. (2002). Towards a neural basis of auditory sentence processing. *Trends in Cognitive Science*, 6 (2), 78-84.

Griffiths, T. D. & Warren, J. D. (2002). The planum temporale as a computational hub. *Trends in Neuroscience*, 25 (7), 348-353.

Haueisen, J. & Knoesche, T. R. (2001). Involuntary motor activity in pianists evoked by music perception. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 13 (6), 786-792.

Janata, P. & Grafton, S. T. (2003). Swinging in the brain: Shared neural substrates for behaviors related to sequencing and music. *Nature Neuroscience*, 6 (7), 682-687.

Koelsch, S. (2005). Neural substrates of processing syntax and semantics in music. *Current Opinion in Neurobiology*, 15, 1-6.

Koelsch, S. & Siebel, W. (2005). Towards a neural basis of music perception. *Trends in Cognitive Science*, 9 (12), 578-584.

Koelsch, S., Kasper, E., Sammler, D., Schulez, K., Gunter, T. &

- Friderici, A. D. (2004). Music, language, and meaning: Brain signatures of semantic processing. *Nature Neuroscience*, 7 (3), 302-307.
- Koelsch, S., Fritz, T., von Cramon, D. Y., Müller, K. & Friederici, A. D. (2006). Investigating emotion with music: An fMRI study. *Human Brain Mapping*, 27 (3), 239-250.
- Maess, B., Koelsch, S., Gunter, T. C. & Friderici, A. D. (2001). 'Musical Syntax' is processed in the area of Broca: An MEG-study. *Nature Neuroscience*, 4 (5), 540-545.
- Meyer, L. B. (1956). *Emotion and Meaning in Music*. Chicago: University of Chicago Press.
- Patel, A. D. (2003). Language, music, syntax and the brain. *Nature Neuroscience*, 6 (7), 674–681.
- Peretz, I. & Zatorre, R. J. (2005). Brain organization for music processing. *Annual Review of Psychology*, 56, 89-114
- Riemann, H. (1877/1971). *Musikalische Syntaxis: Grundriss einer harmonischen Satzbildungslehre*. Niederwalluf: Sändig.
- Schröger, E. (2005). The mismatch negativity as a tool to study auditory processing. *Acta Acustica*, 91 (3), 490-501.