Stefan Koelsch und Tom Fritz

Musik verstehen – Eine neurowissenschaftliche Perspektive

1. Einleitung

Kognitionswissenschaften befassen sich traditionell mit Bereichen wie Sprache, Handlung, Denken (Problemlösen, Entscheiden, Urteilen), Gedächtnis und Lernen. Es gibt jedoch noch einen weiteren kognitiven Bereich, der untersucht werden kann, um menschliche Kognition und zugrundeliegende Hirnmechanismen verstehen zu lernen, und das ist Musik. Musik ist einer der ältesten und grundlegendsten sozial-kognitiven Bereiche des Menschen. Es ist plausibel, daß die menschlichen musikalischen Fähigkeiten eine phylogenetische Schlüsselrolle für die Evolution von Sprache hatten, und daß gemeinschaftliches Musizieren wichtige evolutionäre Funktionen wie Gruppenkoordination und sozialen Zusammenhalt hatte bzw. hat (die vier »Ks«: Kommunikation, Kooperation, Koordination, und Kohäsion).[1] Ähnlich wird angenommen, daß im Hinblick auf die Ontogenese Kleinkinder Sprache auf Basis prosodischer Information erwerben,[2] und daß musikalische Kommunikation in früher Kindheit (wie z. B. Spiel-, Wiegen- und Schlaflieder) eine entscheidende Rolle für die Entwicklung emotionaler, kognitiver und sozialer Fertigkeiten von Kindern spielen.[3]

Musik ist ein allgegenwärtiges Phänomen: In allen menschlichen Kulturen haben Menschen Musik gemacht und sich an Musik erfreut. Menschen komponieren, erlernen das Spielen von Musikinstrumenten und machen Musik in Gruppen. Gemeinschaftliches Musikmachen ist eine höchst anspruchsvolle Aufgabe für das menschliche Gehirn, an dem praktisch alle uns bekannten kognitiven Prozesse beteiligt sind: Musikmachen involviert Wahrnehmung, Handlung, soziale Kognition, Emotion, Lernen, Gedächtnis, usw. Dieser Reichtum macht Musik zu einem idealen Instrument zur Erforschung des menschlichen Gehirns. Dieses Kapitel stellt vor allem Zusammenhänge zwischen Musik und Sprache, sowie zwischen Musik und Emotion dar.[4]

1 Vgl. Koelsch/Siebel (2005) und Zatorre/Peretz (Hg.) (2001).
2 Vgl. Soderstrom et al. (2003).
3 Vgl. Trehub (2003).

2. Verarbeitung musikalischer Syntax

In dur-moll-tonaler Musik werden Akkordfunktionen innerhalb harmonischer Fortschreitungen entsprechend bestimmter Regularitäten arrangiert. Das Regularitäten-basierte Arrangement von Akkordfunktionen kann auch als Teil einer musikalischen Syntax bezeichnet werden,[5] (Akkordfunktionen sind z. B. Akkorde, die auf den Tönen der Tonleiter aufgebaut sind, siehe auch Abb. 1a). Der Akkord auf dem ersten Tonleiterton wird Tonika genannt, der auf dem fünften Tonleiterton Dominante. Ein Beispiel für eine Regularität harmonischer Fortschreitung ist, daß die Dominante oft direkt der Subdominante folgt, aber die Subdominante nur sehr selten direkt der Dominante. Die Dominante-Tonika Fortschreitung wird häufig eingesetzt, um das Ende einer harmonischen Sequenz anzuzeigen, das Ende einer harmonischen Sequenz (oder gar eines Musikstückes) wird jedoch nie durch eine Tonika-Dominante Fortschreitung angezeigt.

4 Zur Übersicht über frühe Stufen akustischer Verarbeitung und für Untersuchungen zur Musikproduktion siehe z. B. Koelsch/Siebel (2005), Bangert/Altenmüller (2003) sowie Repp/Knoblich (2004).
5 Vgl. Riemann (1877), Koelsch (2005) und Koelsch/Siebel (2005).

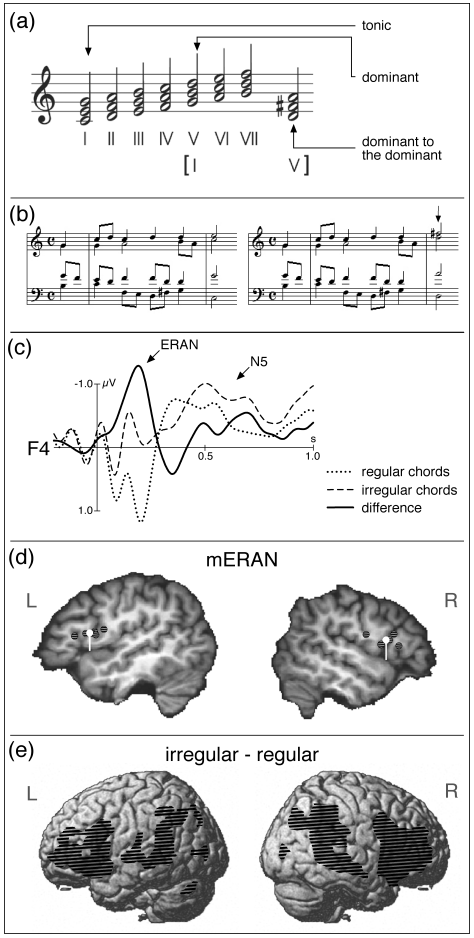

Abb. 1: In dur-moll-tonaler Musik werden Akkordfunktionen innerhalb harmonischer Sequenzen entsprechend bestimmter Regularitäten arrangiert. Akkordfunktionen sind z. B. Akkorde, die auf den Tönen der Tonleiter aufgebaut sind. (a) Der Akkord auf dem ersten Tonleiterton wird Tonika genannt, der auf dem fünften Tonleiterton Dominante. Der Durakkord auf dem zweiten Ton einer Tonleiter wird auch als Doppeldominante bezeichnet. Die Akkordsequenz im linken Teil von (b) endet auf einer Dominante-Tonika Fortschreitung (reguläres Sequenzende). Der Schlußakkord der Akkordsequenz auf der rechten Seite von (b) ist eine Doppeldominante (irreguläres Ende[6]). (c) Hirnelektrische Potentiale, die durch die Schlußakkorde von (b) evoziert wurden. (d) Quell-Lokalisation der early right anterior negativity (ERAN) durch MEG.[7] Die Quell-Lokalisationen einzelner Versuchspersonen sind durch die gestreiften Kreise dargestellt, die weißen Dipole zeigen die Mittelung dieser individuellen Quell-Lokalisationen. (e) fMRT-Daten, die Aktivierungen im Gehirn als Reaktion auf das Hören musik-syntaktisch irregulärer Akkorde zeigen (Aktivierungen durch musik-syntaktisch irreguläre Akkorde sind kontrastiert mit Aktivierungen musik-syntaktisch regulärer Akkorde, d. h. die Aktivierungen zeigen, welche Strukturen des Gehirns beim Hören irregulärer Akkorde stärker aktiviert sind als beim Hören regulärer Akkorde).[8]

Abb. 1b zeigt zwei Sequenztypen aus Experimenten zur Untersuchung musik-syntaktischer Verarbeitung. Beide Sequenzen bestehen aus sechs Akkordfunktionen, die ersten fünf Akkorde unterscheiden sich nicht zwischen den beiden Sequenztypen. Der fünfte Akkord des Sequenztyps A ist eine Tonika (reguläres Ende, linke Sequenz in Abb. 1b). Der Schlußakkord des Sequenztyps B ist eine Doppeldominante (irreguläres Ende, rechte Sequenz in Abb. 1b). In einem typischen Experiment werden beide Sequenztypen in allen zwölf Durtonarten präsentiert (jede Sequenz wird in einer anderen Tonart als der Tonart der vorhergehenden Sequenz präsentiert), die Auftrittswahrscheinlichkeit für beide Sequenztypen ist 50%, und die Abfolge von regulären und irregulären Sequenzen ist zufällig.

Abb. 1c zeigt hirnelektrische Potentiale (aufgezeichnet mit Electroencephalographie, EEG), die durch die Schlußakkorde der Sequenztypen A und B evoziert wurden. Die Versuchspersonen waren sog. Nichtmusiker, d. h. Personen, die nicht erklären können, was eine »Tonika« oder eine »Dominante« ist, die keine Noten lesen können, oder nicht gelernt haben, ein Musikinstrument zu spielen. Die gepunktete Linie zeigt die ereigniskorrelierten Hirnpotentiale (EKPs), die durch die regulären Akkorde evoziert wurden, die gestrichelte Linie zeigt die EKPs der irregulären Akkorde. Die beiden Kurvenli-

6 Klangbeispiele unter www.stefan-koelsch.de/TC_DD.
7 Übernommen aus Maess et al. (2001).
8 Abbildung modifiziert aus Koelsch (2005).

nien unterscheiden sich deutlich voneinander (angezeigt durch die dicke Differenz-Kurve). Dies zeigt an, daß die irregulären Akkorde anders verarbeitet wurden als die regulären, obwohl (a) die Versuchspersonen sog. »Nichtmusiker« waren, (b) die musik-syntaktische Irregularität sehr unauffällig war, und (c) der irreguläre Akkord nicht einfach einen physikalischen Abweichler darstellte. Der erste Unterschied zwischen den beiden Kurvenlinien ist um ca. 200 Millisekunden (ms) maximal. Das negative Potential, das durch den irregulären Akkord in dieser Zeitspanne evoziert wurde, hat eine rechts-frontale Schädelverteilung und wurde deshalb als *early right anterior negativity* (ERAN)[9] bezeichnet.[10] Diese frühe, rechts-anteriore Negativierung wird normalerweise gefolgt von einer späteren Negativierung, der sog. N5 (kurzer Pfeil in Abb. 1c). Die ERAN wird interpretiert als Korrelat neuronaler Aktivität musik-syntaktischer Verarbeitungsprozesse, die N5 als Korrelat harmonischer Integrationsprozesse.[11]

Wie bereits oben erwähnt waren die Versuchspersonen des Experiments aus Abb. 1b sog. Nichtmusiker. Interessanterweise verarbeiteten diese Personen die musik-syntaktische Information schnell und genau entsprechend komplexer musikalischer Regularitäten. Das implizite Wissen über musikalische Regularitäten wird wahrscheinlich durch alltägliche Hörerfahrungen erworben[12] (siehe aber auch Anmerkungen zur Universalität dur-moll-tonaler Syntaxverarbeitung weiter unten). Dieses Wissen führt auch bei Nichtmusikern zu hochsensitiven Reaktionen des Gehirns auf musik-syntaktische Irregularitäten, selbst dann, wenn sie es selbst nicht bewußt bemerken.

Der Befund, daß auch Nichtmusiker sehr musikalisch auf Musik reagieren stimmt mit zahlreichen Studien überein, die zeigen, daß die Fähigkeit, ein sehr genaues implizites Wissen über musikalische Regularitäten zu erwerben, und die Fähigkeit, musikalische Information schnell und genau entsprechend dieses Wissens zu verarbeiten, eine allgemeine Fähigkeit des menschlichen Gehirns ist.[13] Diese allgemeine menschliche Musikalität unterstreicht die biologische Relevanz von Musik. Nota bene erfordert die oben dargestellte musik-syntaktische Verarbeitung das Herstellen komplexer, weitreichender harmonischer Relationen innerhalb musikalischer Sequenzen (z. B. ist ein D-Dur Akkord nach einem G-Dur Akkord ja nur irregulär, wenn vor dem G-Dur Akkord ein C-Dur Kontext hergestellt wurde, siehe auch Abb. 1). Inwieweit nicht-menschliche Primaten in der Lage sind, solche Relationen zu erfassen, ist zwar noch nicht geklärt, u. E. jedoch sehr unwahrscheinlich.[14] Dem Gehirn des Menschen fällt es aufgrund seiner Intelligenz jedenfalls leicht, diese Relationen zu erfassen.

Die in der »ERAN« widergespiegelte neuronale Aktivität kann evoziert werden während Versuchspersonen ein Buch lesen oder ein Videospiel spielen, sowie unter leichter Propofol-Sedierung.[15] Dies bedeutet, daß die neuronalen Mechanismen, die der Erzeugung der ERAN zugrunde liegen, relativ unabhängig von Aufmerksamkeit aktiv sind. D. h. selbst wenn wir uns gar nicht auf das Hören von Musik konzentrieren, und selbst wenn wir musik-syntaktische Information gar nicht wahrnehmen wollen, wird sie dennoch schnell und genau im Gehirn verarbeitet. Der Vollständigkeit halber möchten wir noch erwähnen, daß die ERAN (1) auch beim Hören »echter«, expressiv gespielter Musik evoziert werden kann (z. B. durch Musik von Bach, Haydn, Mozart und Beethoven, also nicht nur durch unsere etwas artifiziell anmutenden Stimuli), (2) größer bei Musikern als bei Nichtmusikern ist (wahrscheinlich weil Musiker spezifischere Repräsentationen musik-syntaktischer Regularitäten haben und dadurch sensitiver auf Verletzungen dieser Regularitäten reagieren), und (3) auch bei fünfjährigen Kindern (wahrscheinlich sogar schon viel jüngeren Kindern), beobachtet werden kann.[16]

Der Frage, ob die Verarbeitung dur-moll-tonaler Regularitäten an kulturelle Erfahrungen gebunden ist, ist Tom Fritz im Rahmen einer Expedition zum Volk der Mafa in Nordkamerun nachgegangen. Er spielte dort einigen Mafa (die noch nie zuvor westliche Musik gehört hatten) die Stimuli aus unseren Experimenten zur musikalischen Syntaxverarbeitung vor (ähnlich denen aus Abb. 1). Wenn die Personen gefragt wurden, einen Knopf für das richtige, und einen für das falsche Ende zu drücken, konnten die allermeisten von ihnen

9 Für Überblicksarbeiten siehe Koelsch/Friederici (2003), Koelsch/Siebel (2005) und Koelsch (2005).
10 Vgl. Koelsch et al. (2000).
11 Vgl. Koelsch/Friederici (2003), Koelsch/Siebel (2005) und Koelsch (2005).
12 Vgl. Tillmann et al. (2000).
13 Vgl. Koelsch/Siebel (2005), Koelsch (2005), Koelsch/Friederici (2003) sowie Tillmann et al. (2000).
14 siehe dazu auch Fitch/Hauser (2004).
15 Vgl. Heinke et al. (2004).
16 Vgl. Koelsch et al. (2003).

reguläre von irregulären Akkorden nicht unterscheiden, selbst nach mehr als halbstündiger Übung nicht, und selbst dann nicht, wenn die Sequenzen auf dem Durakkord der erniedrigten zweiten Stufe endeten (also z. B. in C-Dur auf einem Cis-Dur Akkord), einer für uns eher schauerlichen Endung, die Versuchspersonen unseres Kulturkreises deutlich detektieren können (mit ca. 80-prozentiger Trefferquote[17]).

Höchst bemerkenswerter Weise zeigten die Mafa jedoch einen deutlichen Unterschied zwischen regulären und irregulären Akkorden (und zwar sogar wenn die irregulären Akkorde relativ unauffällige Doppeldominanten waren) in einem Experiment mit einer impliziten Syntax-Aufgabe: In diesem Experiment war die Aufgabe nicht, auf die regulären oder irregulären Akkorde mit einem Tastendruck zu reagieren. Statt dessen wurde die Hälfte der Schlußakkorde mit einem normalen Klavierklang gespielt und die andere Hälfte der Schlußakkorde mit einem Harfenklang. Die Aufgabe war, eine Taste für die Schlußakkorde mit Klavierklang, und eine für die Schlußakkorde mit Harfenklang zu drücken. Bei diesem Experiment waren die Reaktionszeiten für das Tastendrücken deutlich länger, wenn der letzte Akkord auf einer Doppeldominante endete, als wenn er auf einem Tonika-Akkord endete. Dies demonstriert, daß die unterschiedlichen Akkordfunktionen (reguläre Tonika und irreguläre Doppeldominante) kognitiv unterschiedlich verarbeitet wurden, und daß also dur-moll-tonale harmonische Relationen vom menschlichen Gehirn erkannt werden, selbst wenn ein Mensch noch nie vorher dur-moll-tonale Musik gehört hat. Bei Hörer/innen unseres Kulturkreises, die dur-moll-tonale Musik schon jahrelang gehört haben, spielen dann natürlich auch Erfahrungen und Lernprozesse bei der Verarbeitung dur-moll-tonaler musikalischer Struktur eine Rolle.

Die ERAN ist nicht der einzige elektrophysiologische Index musiksyntaktischer Verarbeitung: Studien, die mit Hilfe ereigniskorrelierter Hirnpotentiale (EKPs) die neuralen Mechanismen der Verarbeitung musikalischer Syntax untersuchten, zeigten, daß die Verarbeitung musikalischer Information in einer Vielzahl von EKP Komponenten widergespiegelt werden kann, z. B. P300,[18] LPC (»late positive

17 Vgl. Koelsch et al. (2000).
18 Vgl. Janata (1995).

component«),[19] und RATN (»right anterior temporal negativity«[20]).

Mittels magnetoencephalographischer (MEG) Methoden wurde die ERAN im inferioren frontolateralen Cortex lokalisiert (Abb. 1d).[21] Dieser Teil des Gehirns ist interessanterweise auch entscheidend in die Verarbeitung sprachlicher Syntax involviert[22] (in der linken Hemisphäre wird das Areal, in dem die Quellen der ERAN lokalisiert wurden, auch als *Broca Areal* bezeichnet). D. h., musiksyntaktisch irreguläre Akkorde werden in Hirnstrukturen verarbeitet, die auch entscheidend in die Verarbeitung syntaktisch irregulärer Wörter involviert sind.

Diese Quell-Lokalisation der ERAN wurde durch Experimente mit funktioneller Magnetresonanztomographie (fMRT) gestützt: Abb. 1e zeigt fMRT Daten von zwanzig Versuchspersonen, gemessen mit einem ähnlichen Akkord-Sequenz Paradigma wie in Abb. 1a (die gestreiften Bereiche zeigen, welche Strukturen des Gehirns beim Hören irregulärer Akkorde stärker Aktiviert sind als beim Hören regulärer Akkorde). Übereinstimmend mit den MEG Daten zeigen die fMRT Daten Aktivierungen des inferioren frontolateralen Cortex. Die fMRT Daten zeigen auch, daß die Verarbeitung musiksyntaktisch irregulärer Akkorde nicht nur das Broca Areal aktiviert (und das homotope Areal in der rechten Hemisphäre), sondern auch posterior-temporale Areale.[23] Diese posterior-temporalen Areale werden in der linken Hemisphäre auch als *Wernicke Areal* bezeichnet. Sowohl das Broca- als auch das Wernicke Areal sind entscheidend in die Wahrnehmung und die Produktion von Sprache involviert;[24] das Zusammenspiel zwischen diesen Strukturen wurde lange Zeit für sprachspezifisch gehalten. Die Daten der Abb. 1e zeigen, daß das kortikale »Sprach-Netzwerk« auch der Verarbeitung von Musik dient. In Sprachexperimenten ist dieses Netzwerk oft in der linken Hemisphäre stärker aktiviert als in der rechten, in Musik-Experimenten ist es meist in der rechten Hemisphäre etwas stärker aktiviert als in der linken.

Musikpsychologisch ist auch erwähnenswert, daß das Ergebnis

19 Vgl. Besson/Faita (1995), Patel et al. (1998), Regnault et al. (2001).
20 Patel et al. (1998).
21 Vgl. Maess et al. (2001).
22 Vgl. Friederici (2002).
23 Vgl. Koelsch et al. (2002).
24 Vgl. Friederici (2002).

musik-syntaktischer Verarbeitungsprozesse emotionale Effekte und eine (semantische) Bedeutung haben kann:[25] Ein strukturell irreguläres musikalisches Ereignis (z. B. eine irreguläre Akkordfunktion) kann eine emotionale (oder affektive) Reaktion hervorrufen, und solche Ereignisse können eine musikalische Bedeutung haben (Komponisten benutzen solche Ereignisse als Ausdrucksmittel). Die Prozesse der Verarbeitung dieser Art musikalischer Bedeutung sind möglicherweise in der sog. N5-Komponente reflektiert (kurzer Pfeil in Abb. 1c). Weitere Aspekte musik-semantischer Verarbeitung werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

3. Verarbeitung musikalischer Semantik

Wenn ich einen Satz höre wie *Der Junge singt ein Lied* erwarte ich das Wort *Musik* eher als das Wort *Stift*. Dieser Effekt ist der semantische Priming-Effekt, er hat zur Folge, daß Wörter mit semantisch enger Relation zu einem vorhergehenden Kontext schneller und leichter verarbeitet werden als semantisch unverwandte Wörter.[26]

Ein elektrophysiologischer Index semantischen Primings ist die »N400« Komponente des ereigniskorrelierten elektrischen Hirnpotentials. Die N400 entsteht im Gehirn normalerweise um ca. 250-400 Millisekunden (ms) nach der Darbietung eines Wortes. Die durch Wörter evozierte N400 ist sensitiv für Manipulationen semantischer Relationen: sie ist kleiner, wenn auf einen Satz wie *Der Junge singt ein Lied* ein Wort mit enger semantischer Relation zu dem Satz folgt (z. B. *Musik*), und größer, wenn das Wort keinen semantischen Bezug zum Satz hat (z. B. *Stift*).[27] Eine der ersten EKP-Studien zur sprachlichen Semantik benutzte Sätze wie »Er bestrich sein Brot mit warmen Socken«, wobei das Wort »Socken« eine deutliche N400 hervorrief.[28]

Semantik ist selbstverständlich eine basale Dimension der Sprache, und für viele Menschen ist der Gedanke ungewohnt, daß auch Musik semantische Informationen vermittelt. Musik ist jedoch in erster Linie Mittel der Kommunikation, und Komponisten nutzen Musik als Mittel des Ausdrucks. Theoretisch können unterschiedliche Aspekte musikalischer Semantik unterschieden werden:[29] (1) Musikalische Semantik übermittelt durch Information, die an Objekte erinnert (z. B. an einen Vogel), oder musikalische Information, die Eigenschaften bezeichnet (z. B. *hell, dumpf, schnell, spitz, weich, warm*). (2) Musikalische Semantik, die durch das Entstehen bzw. das Erkennen einer Stimmung vermittelt wird (z. B. *fröhlich*); hier ist die Ähnlichkeit zur emotionalen Prosodie (also sprechmotorischer 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 vielleicht 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.). (3) Bedeutung durch extramusikalische Assoziationen, und zwar explizite (z. B. eine Nationalhymne) sowie implizite (ein Kirchenchoral erweckt Assoziationen an Kirche, auch wenn ich diesen Choral vorher noch nie gehört habe – es reicht aus, daß ich erkenne, daß es sich hier um Kirchenmusik handelt). Extramusikalische Assoziationen müssen selbstverständlich kulturell erworben werden, im Gegensatz zu (1) und (2). (4) Bedeutung, die durch das Arrangement formaler Strukturen entsteht (Spannung, Auflösung, Überraschung durch einen unerwarteten Akkord, usw.), dieser Aspekt wird in der Musikwissenschaft auch als Bedeutung von Musik »sui generis« bezeichnet.[30]

Intuitiv scheint es plausibel, daß auch Musik semantische Information übermitteln kann: Bei bestimmten Passagen von Beethoven-Symphonien z. B. denken wir eher an *Held* als an *Floh*, und bei bestimmten Passagen von Mozart-Symphonien denken wir eher an *Engel* als an *Flegel*. Wie kommt es jedoch zu solchen semantischen Assoziationen beim Hören von Musik? Und sind die kognitiven Mechanismen, die beim Hören von Musik semantische Informationen entschlüsseln dieselben Mechanismen, die auch der Verarbeitung sprachlicher Semantik dienen?

Zu dieser Frage wurde ein semantisches Priming-Experiment durchgeführt, in dem (a) Sätze sowie (b) kurze musikalische Exzerp-

25 Vgl. Meyer (1956).
26 Vgl. Kellenbach et al. (2000), Osterhout/Holcomb (1995).
27 Vgl. Kellenbach et al. (2000), Osterhout/Holcomb (1995).
28 Vgl. Kutas/Hillyard (1980).

29 Vgl. Koelsch et al. (2004).
30 Vgl. Meyer (1956).

te als »Prime-Stimuli« präsentiert wurden (die Exzerpte wurden von normalen Musik-CDs aufgenommen).[31] Diese Prime-Stimuli hatten semantisch entweder einen starken, oder einen schwachen Bezug zu einem Zielwort (Abb. 2, in dem Beispiel der Abbildung hat das Zielwort *Weite* einen starken semantischen Bezug zum Satz *Die Blicke schweifen in die Ferne*, und einen schwachen Bezug zum Satz *Die Fesseln erlauben wenig Bewegung*). Zielwörter waren 44 Wörter (z. B. *Illusion, Weite, Keller, König, Nadel, Treppe, Fluß, Mann*), die Hälfte der Wörter waren konkrete Wörter, die andere Hälfte abstrakte Wörter.

Die musikalischen Prime-Stimuli wurden aufgrund musiktheoretischer Terminologie, oder aufgrund von Aussagen von Komponisten über ihre Stücke ausgewählt. Zum Beispiel war der musikalische Prime-Stimulus für das Wort *Nadel* eine Passage aus einem Streichtrio von A. Schönberg, in dem Schönberg Stiche beschrieb, die er während einer Herzattacke empfand.[32] In dem Exzerpt von R. Strauss aus Abb. 2 sind die Akkorde in weiter Lage gesetzt (die Töne umfassen also ein weites Frequenzspektrum), daher wurde dieses Exzerpt als Prime-Stimulus für das Wort *Weite* benutzt. Einige der musikalischen Prime-Stimuli erinnerten an Klänge von Objekten (z. B. Vogel), oder an Objektqualitäten (z. B. tiefe Töne und *Keller*, aufsteigende Intervallstufen und *Treppe*). Andere musikalische Prime-Stimuli (besonders diejenigen für abstrakte Wörter) erinnerten an prosodische und gestische Merkmale, die mit bestimmten Wörtern assoziiert sind (z. B. *Seufzer, Trost*). Außerdem wurden musikalische Prime-Stimuli eingesetzt, die typische musikalische Stile und Formen repräsentieren, die üblicherweise mit bestimmten Wörtern assoziiert werden (z. B. ein Kirchenchoral und das Wort *Andacht*).

Abb. 2 (rechts oben) zeigt die EKPs, die durch Zielwörter evoziert wurden, die entweder eine starke (schwarze Linie) oder schwache (gepunktete Linie) semantische Relation zu einem Prime-Satz hatten. Verglichen mit passenden Wörtern evozierten semantisch unpassende Wörter eine deutliche N400 Komponente. Dies ist der klassische semantische Priming-Effekt, bei dem Wörter, die semantisch nicht zum vorhergehenden Kontext passen, ein N400 Potential evozieren. Der Effekt zeigt, daß kognitive Prozesse semantischer Verarbeitung

31 Vgl. Koelsch et al. (2004).
32 Beispiele unter www.stefan-koelsch.de.

abhängig waren vom Grad der semantischen Relation zwischen Zielwort und vorhergehendem Satz.

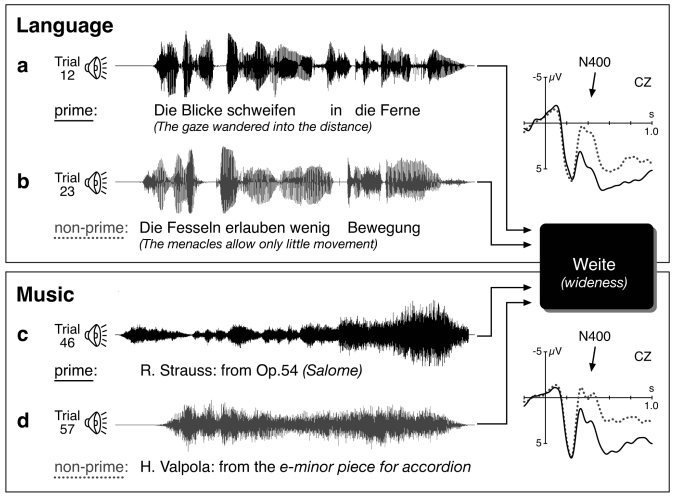

Abb. 2 Links: Beispiele der vier Experimentalbedingungen des Semantik-Experiments. Rechts: Ereigniskorrelierte elektrische Hirnpotentiale, die durch semantisch passende (schwarze Linie) und unpassende (gepunktete Linie) Wörter evoziert wurden, nach der Darbietung von Sätzen (oben) und Musik (unten). Sowohl in der Sprach-Bedingung, als auch in der Musik-Bedingung, evozierten Wörter, die semantisch nicht zum vorhergehenden Satz oder Musikstück paßten, eine sog. N400 Komponente (im Vergleich zu Wörtern, die semantisch zum vorhergehenden Prime-Stimulus paßten, Pfeil). Dies zeigt, daß sowohl sprachliche, als auch musikalische Prime-Stimuli einen systematischen Einfluß auf die semantische Verarbeitung von Wörtern haben können.

Wir wollten herausfinden, ob solch ein semantischer Priming-Effekt auch beobachtet werden kann, wenn die Zielwörter nach einem musikalischen Exzerpt präsentiert werden. Der untere Teil von Abb. 2 (rechts) zeigt EKPs, die durch Zielwörter evoziert wurden, die entweder eine starke (schwarze Linie) oder schwache (graue Linie) semantische Relation zu einem musikalischen Prime-Stimulus hatten. Erstaunlicherweise evozierten Wörter, die semantisch nicht zu

dem vorhergehenden musikalischen Exzerpt paßten, ebenfalls eine deutliche N400 (ähnlich wie wenn nach einem kurzen heldenhaften Ausschnitt einer Beethoven-Symphonie das Wort »Floh« erscheinen würde). Der N400 Effekt unterschied sich nicht zwischen der Sprach-Bedingung (in der die Zielwörter den Sätzen folgten) und der Musik-Bedingung (in der die Zielwörter der Musik folgten): der Unterschied zwischen den Potentialen evoziert durch semantisch passende und unpassende Wörter hatte den gleichen Amplituden-Wert, die gleiche Latenz, und die gleiche Schädelverteilung in der Sprach- wie in der Musik-Bedingung. Auch die neuronalen Generatoren der N400 unterschieden sich nicht zwischen der Sprach-Bedingung und der Musik-Bedingung: In beiden Bedingungen wurden die primären Quellen der N400 bilateral im posterioren Anteil des Gyrus temporalis medius lokalisiert (Brodmann-Areal 21/37). Von diesen Regionen ist bekannt, daß sie in die Verarbeitung semantischer Information während der Perzeption von Sprache involviert sind.[33]

Der N400-Effekt wurde sowohl bei abstrakten als auch bei konkreten Wörtern beobachtet, was bedeutet, daß Musik sowohl abstrakte als auch konkrete semantische Information vermitteln kann. Außerdem wurde der Effekt auch unabhängig von emotionalen Beziehungen zwischen Prime-Stimuli und Zielwörtern gemessen, was bedeutet, daß Musik nicht nur emotionale Information vermitteln kann.

Der N400-Effekt in der Musik-Bedingung zeigt, daß musikalische Information einen systematischen Einfluß auf die semantische Verarbeitung von Wörtern haben kann. Der Befund, daß sich der N400 Effekt nicht zwischen Sprach- und Musikbedingung unterscheidet, zeigt, daß musikalische Information dieselben Effekte auf semantische Verarbeitungsprozesse haben kann wie sprachliche Information. Die Daten demonstrieren also, daß Musik systematisch Repräsentationen semantischer Konzepte aktivieren kann, und daß daher Musik auch semantische Information vermitteln kann. Es ist durchaus möglich, daß semantische Konzepte als mentale Repräsentationen auch »sprachfrei« (z. B. als Bilder) gespeichert sind, und daß diese Konzepte bzw. deren Repräsentationen sowohl durch Musik, als auch durch Wörter aktiviert werden können. Dies würde die starke Ähnlichkeit der semantischen Verarbeitungsprozesse zwischen Sprach- und Musikbedingung in dem vorgestellten Experiment erklären. Diese Sicht schließt natürlich nicht aus, daß Musik Bedeutung auch noch auf andere Weise übermitteln kann (z. B. direkte Projektion besonders relevanter akustischer Signale vom auditorischen Hirnstamm und Thalamus in die Amygdala, und spätere semantische Interpretation der sich daraus ergebenden Wahrnehmungen und Empfindungen).

Einige der Stimuli des vorgestellten Semantik-Experiments hat Tom Fritz ebenfalls mit den Mafa in Kamerun getestet. Im Gegensatz zu vielen Personen unseres Kulturkreises war den Mafa ganz selbstverständlich, daß Musik eine Bedeutung hat, die man manchmal halt auch mit Worten beschreiben kann (unsere Versuchspersonen in Leipzig haben sich meist eher über das Experiment gewundert, weil »Musik doch schließlich gar keine Bedeutung« habe, und »Musik doch schließlich gar nichts mit Sprache zu tun« habe). Einigen der verwendeten Musikstücke wurde auch von den Mafa deutlich die Bedeutung zugesprochen, die wir in unserem Kulturkreis mit dieser Musik verbinden. Dies zeigt, daß bestimmte semantische Informationen kulturübergreifend durch Musik zum Ausdruck gebracht werden können. Eine detaillierte Analyse dieses Experiments ist jedoch noch nicht abgeschlossen und kann daher hier noch nicht veröffentlicht werden.

Die in den letzten beiden Abschnitten vorgestellten Befunde zeigen, daß das menschliche Gehirn Musik und Sprache teilweise mit denselben kognitiven Prozessen, und in denselben Strukturen des Gehirns verarbeitet.[34] Außerdem stützen die Befunde die Annahme, daß eine (phylogenetisch betrachtet) höchst entwickelte Musikalität eine natürliche und allgemeine Fähigkeit des menschlichen Gehirns ist.[35] Diese Annahme ist kompatibel mit Studien, die nahe legen, daß die musikalischen Fähigkeiten des Menschen eine Voraussetzung sind für Spracherwerb und –verarbeitung: Säuglinge und Kleinkinder akquirieren beträchtliche Information über Wort- und Phrasengrenzen (möglicherweise auch über Wortbedeutung) durch unterschiedliche prosodische Informationen.[36] Außerdem ist eine

33 Zur funktionellen Architektur semantischer Verarbeitung auf Wortniveau siehe Friederici (2002), Démonet et al. (1992), Friederici et al. (2000) und Price et al.(1997); auf Satzniveau siehe Baumgaertner et al. (2002), Halgren et al. (2002), Helenius et al. (1998), Kuperberg et al.(2000) sowie Ni et al. (2000).

34 Siehe auch Koelsch/Siebel (2005), Koelsch (2005) und Patel (2003).

35 Vgl. Koelsch/Siebel (2005).

36 D. h. über die musikalischen Aspekte der Sprache wie z. B. Sprechmelodie, -metrum, -rhythmus, und -timbre; siehe z. B. Jusczyk (1999) und Soderstrom et al. (2003).

genaue Wahrnehmung von Tonhöhenrelationen wichtig für das Verständnis (und das Sprechen) von Tonsprachen (d. h. von Sprachen, in denen die Semantik eines Wortes auch durch Sprechmelodie vermittelt wird). Selbstverständlich erfordern auch andere Sprachen eine akkurate Analyse der Prosodie (d. h. der musikalischen Information der Sprache, z. B. Melodie und Metrum), um die Struktur und Bedeutung gesprochener Sprache zu verstehen. Die Annahme eine engen Verbindung zwischen Sprache und Musik wird auch unterstützt durch Befunde weiterer stark überlappender (und teilweise identischer) neuronaler Ressourcen für die Verarbeitung von Sprache und Musik sowohl bei Erwachsenen, als auch bei Kindern.[37] Mein Kollege W.A. Siebel bemerkte dazu einmal, daß dies nahe legt, daß das menschliche Gehirn (zumindest im Kindesalter) Musik und Sprache nicht als separate Domänen versteht, sondern eher Sprache als einen Sonderfall der Musik.

4. Musik und Emotion

Musik ist ein ideales Werkzeug zur Erforschung von Emotion, vor allem weil Musik in der Lage ist, starke Emotionen interindividuell konsistent zu evozieren,[38] Dennoch gibt es bisher nur sehr wenige funktionell-bildgebende Studien, die Emotion mit Musik erforscht haben. Blood et al.[39] untersuchten neurophysiologische Korrelate der emotionalen Dimension angenehm/unangenehm mit Sequenzen harmonisierter Melodien. Die Stimuli variierten in ihrem Grad der (permanenten) Dissonanz, und wurden entsprechend als mehr oder weniger unangenehm empfunden (Stimuli mit dem höchsten Grad permanenter Dissonanz wurden von den Versuchspersonen als am unangenehmsten eingestuft). Die Stimuli wurden computergesteuert ohne musikalischen Ausdruck dargeboten (d. h. ohne Dynamik und ohne Agogik). Diese Stimuli waren daher eher für die Induktion unangenehmer als angenehmer Emotion geeignet. Zunehmender Grad an Unangenehmheit der Stimuli korrelierte mit Aktivierungen des rechten Gyrus parahippocampalis (und Regionen des Precuneus),

37 Maess et al. (2001), Koelsch et al. (2003), Koelsch et al. (2002), Schoen et al. (2004), Koelsch et al. (2005).
38 Vgl. Krumhansl (1997) und Panksepp (1995).
39 Blood et al. (1999).

und abnehmender Grad an Unangenehmheit korrelierte mit Aktivierungen des orbitofrontalen und frontopolaren Cortex, sowie des subcallosalen cingulären Cortex.

In einer anderen Studie untersuchten Blood und Zatorre[40] Änderungen im regionalen cerebralen Blutfluß (rCBF) während besonders angenehmer emotionaler Erlebnisse beim Hören von Musik (sogenannter »chills«[41]). In dieser Studie hörten Versuchspersonen ihre eigene Lieblingsmusik (als Kontrollbedingung hörten sie die Lieblingsmusik einer anderen Versuchsperson). Während der »chills« wurden rCBF-Änderungen im Bereich der Insel, des rechten orbitofrontalen Cortex, der rechten Amygdala, und des ventromedialen präfrontalen Cortex gemessen (Blood und Zatorre bemerkten dazu, daß von diesen Regionen des Gehirns angenommen wird, daß sie in Verarbeitung von Belohnung und Emotion involviert sind).

Im folgenden stellen wir kurz eine eigene Studie mit funktioneller Magnetresonanztomographie (fMRT) vor, in der Emotion durch angenehme und unangenehme musikalische Stimuli induziert wurde.[42] Im Gegensatz zur Studie von Blood et al.[43] waren die angenehmen musikalischen Stimuli nicht computergesteuerte Klänge, sondern natürliche Musikstücke (fröhliche Instrumental-Tanzstücke, von kommerziell erhältlichen CDs aufgenommen). Unangenehme Stimuli waren elektronisch manipulierte, kakophone (permanent dissonante) Gegenstücke dieser Musikstücke. Verglichen mit den Stimuli von Blood et al. sollten die hier eingesetzten Stimuli nicht nur unangenehme Affekte induzieren, sondern auch angenehme Emotionen (als Antwort auf die fröhliche Musik).

Während des Hörens unangenehmer Musik (im Kontrast zu angenehmer Musik, *unangenehm* > *angenehm*) wurden Aktivierungen des Hippocampus, des Gyrus parahippocampalis, und der Amygdala (in beiden Hemisphären) gemessen. Der umgekehrte Kontrast (*angenehm* > *unangenehm*) zeigte in der rechten Hemisphäre Aktivierungen der anterior-superioren Insel, und des anterior frontolateralen Cortex, sowie bilaterale Aktivierungen der Heschlschen Gyri und des Rolandischen Operculums (im zentralen Operculum/Gyrus subcentralis, BA 43, Abb. 3).

40 Blood/Zatorre (2001).
41 Das Wort »chill« kann mit »Erschauern« übersetzt werden.
42 Koelsch et al. (2006).
43 Vgl. Blood et al. (1999).

Aktivitätsänderungen wurden also zum einen in limbischen und paralimbischen Strukturen gemessen (Amygdala, Hippocampus, Gyrus parahippocampalis und anteriore Insel); von diesen Strukturen ist bekannt, daß sie eine zentrale Bedeutung für die Entstehung und Verarbeitung von Emotion haben.[44] Die vorliegenden Daten zeigen, daß die emotionale Verarbeitung von Musik ein Netzwerk aktivieren kann, daß diese zahlreichen Strukturen umfaßt.

Im Rahmen seiner Expedition zum Volk der Mafa in Nordkamerun ist Tom Fritz auch der Frage nachgegangen, ob permanente Dissonanz (psychoakustisch auch Rauhigkeit genannt) nur von Menschen unseres Kulturkreises als unangenehm, oder universell von Menschen als weniger angenehm empfunden wird. Er spielte dort einigen Mafa (die noch nie zuvor westliche Musik gehört hatten) die Stimuli aus unserem Kernspinexperiment vor, und es zeigte sich, daß auch die Mafa die permanent dissonante Musik weniger angenehm fanden, als die überwiegend konsonante Musik. Allerdings machten die Menschen dort für die westliche Musik im Vergleich zu deutschen Versuchspersonen erheblich weniger große Bewertungsunterschiede zwischen den eher konsonanten und den permanent dissonanten Musikstücken. Diese Befunde zeigen, daß permanente Dissonanz (also ein permanent hoher Grad an Rauhigkeit) universell von Menschen (und wahrscheinlich auch von nichtmenschlichen Säugern[45]) als unangenehm empfunden wird. Übrigens klingt Musik des zwanzigsten Jahrhunderts zwar für viele Menschen dissonant, sie ist aber meist nicht permanent dissonant, also daher bitte diese Musik nicht mit den vorliegenden fMRT Ergebnissen in Zusammenhang bringen. . . Schließlich ist noch interessant, daß Schmerz- und Stresslaute auch einen höheren Grad an Rauhigkeit haben (vor allem wegen der Verkrampfung des Vokaltraktes), von daher ist es phylogenetisch sinnvoll, daß wir Signale mit stärkerer Rauhigkeit als unangenehmer empfinden, so daß uns Stresslaute unserer Artgenossen (z. B. von Babies) zur Hilfe motivieren. Übrigens haben viele Akkorde und harmonische Wendungen, die der Musik Spannung und damit Würze verleihen, einen höheren Grad an Dissonanz (z. B. Dominantseptakkord, Subdominante mit hinzugefügter Sexte, etc.). Die stärkere Rauhigkeit dieser Dissonanz aktiviert phylogenetisch alte Mechanismen, deren Aktivität wir als Spannung empfinden (zum zerebralen Netzwerk siehe Abb. 3), die Aufhebung dieser Aktivität empfinden wir als Entspannung. Diese Effekte der Rauhigkeit machen einige Aspekte dur-moll-tonaler Musik wahrscheinlich universell dem Menschen verständlich.

44 Vgl. Blood et al. (1999), Blood/Zatorre (2001), Royet et al. (2000), Zald/Pardo (2002), Siebel (1994), Siebel/Winkler (1996).

45 Vgl. Koelsch et al. (2006).

Interessanterweise zeigen die Daten unseres fMRT Experiments auch starke bilaterale Aktivierungen im Bereich des Rolandischen Operculums während des Hörens angenehmer (aber nicht unangenehmer) Musik. In diesem Areal befindet sich die Repräsentation des Kehlkopfes (der Larynx), d. h. die Repräsentation eines (stimmlichen) Effektors, der in die Produktion von Vokalisationen involviert ist. Die Larynx enthält die Stimmbänder, deren Schwingungen stimmlichen Klang produzieren. Die Frequenz dieser Schwingungen bestimmt die Höhe des stimmlichen Klangs, d. h. musikalische und sprachliche Stimmmelodie wird durch die dynamische Aktivität der Larynx produziert.

Nota bene haben die Versuchspersonen während des Experiments nicht wirklich gesungen (dies kann durch Mikrophone und die Aufzeichnung von Muskelpotentialen kontrolliert werden, außerdem haben die Proband/innen nach dem Experiment auf Befragung hin bestätigt, daß sie nicht gesungen haben). Die vorliegenden Daten zeigen daher, daß die Probanden vokale Klangproduktion kodiert haben (ohne begleitende motorische Aktivität), während sie die emotionalen musikalischen Stimuli (die von anderen Individuen zuvor komponiert und produziert worden sind) hörten (vgl. auch Abb. 3). Interessanterweise existiert ein analoges Phänomen in der visuellen Domäne: Beim Menschen und bei nichtmenschlichen Primaten führt bereits das Beobachten einer Handlung zur Aktivierung prämotorischer Areale.[46] Diese Aktivierung ist identisch mit derjenigen, die bei der tatsächlichen Ausführung dieser Handlung beobachtet wird. Der prämotorische Cortex (PMC) ist unter anderem involviert in die Vorbereitung und Ausführung von Handlungen, die aber nicht notwendigerweise tatsächlich motorisch ausgeführt werden. Das bedeutet, daß die Neuronen im PMC aktiv sind, wenn eine Handlung ausgeführt wird, aber auch bereits, wenn sie lediglich vorgestellt oder beobachtet wird. Ähnlich führt bereits die Beobachtung oder sogar lediglich die Nennung von Werkzeugen zur Aktivierung

46 Vgl. Rizzolatti/Craighero (2004).

prämotorischer Areale, ebenfalls ohne tatsächliche Aktivität motorischer Effektoren.

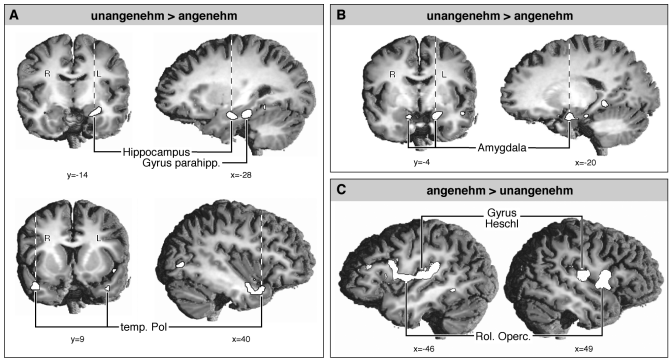

Abb. 3 Aktivitätsänderungen beim Hören angenehmer und unangenehmer Musik während der ersten 30 Sekunden eines Musikstückes (A) und im weiteren Verlauf des Hörens (B und C). (A) und (B) zeigen Aktivität, die beim Hören unangenehmer Musik stärker ist als beim Hören angenehmer Musik. (C) zeigt Aktivität, die beim Hören angenehmer Musik stärker ist als beim Hören unangenehmer Musik.

Wenn Individuen also visuell eine Handlung oder ein Objekt, das stark mit einer Handlung assoziiert wird, perzipieren, wird automatisch eine interne Replik dieser Handlung im PMC erstellt. Analog wurde in unserem Experiment die Perzeption und Analyse der musikalischen Information begleitet von subvokaler Aktivierung der Larynxrepräsentation, d. h. eines Effektors (melodischer) vokaler Klangproduktion. Das Perzeptions-Aktions-System (PAS), d. h. das System, das Perzeption zur Aktion dadurch vermittelt, daß es perzeptuelle Information während des Analysevorganges früh auf mögliche Effektoren überträgt, wird als basales System für das Erkennen und das Lernen von Handlungen angenommen (bei menschlichen sowie nicht-menschlichen Primaten). Es wurde berichtet, daß solch ein System nicht nur in der visuellen Domäne[47] sondern auch in der

47 Vgl. Rizzolatti/Craighero (2004), Buccino et al. (2001), Decety/Grezes (1999), Fadiga et al. (1995).

auditorischen existiert,[48] Die vorliegenden Daten zeigen, daß bereits das Hören angenehmer Musik ein Areal aktiviert, das in die Produktion von Vokalisationen involviert ist; die Resultate liefern daher Evidenz für ein auditorisches PAS, das auf Repräsentationen von Vokalisationen basiert, die bereits aktiviert werden, wenn vokalisierbare auditorische Information wahrgenommen wird, sogar wenn diese Information nicht-sprachlich bzw. nicht-linguistisch ist.

Dieser Befund stützt auch die Annahme, daß ein PAS nicht nur für die Kodierung von Handlungen existiert, sondern auch für die Kodierung phonetischer Gesten, und daß ein solches System möglicherweise ein neurophysiologisches Substrat der Sprachperzeption repräsentiert,[49] Nota bene sind die dem PAS zugrunde liegenden Mechanismen nicht auf Handmotorik beschränkt, sondern involvieren eine Vielzahl somatotopisch organisierter motorischer Verschaltungen, die ein großes Repertoire (»körperlicher«) motorischer Aktionen vermitteln. Z. B. ist die phonetische Analyse sprachlicher Klänge wahrscheinlich eng an Prozesse der Sprachproduktion gebunden (die phonetische Analyse von Sprache aktiviert automatisch prämotorische, möglicherweise auch motorische kortikale Areale).[50]

Wie bereits erwähnt wird die Aktivierung motorischer Repräsentationen während der Perzeption von Handlungen in der visuellen Domäne als neurophysiologische Basis für das Verstehen und das Lernen dieser Handlungen angenommen, da Beobachter möglicherweise Handlungen anderer Individuen über die gleiche neuronale Kodierung verstehen, die sie benutzen, um diese Handlung zu imitieren bzw. selber zu produzieren. Analog wird ein auditorisches PAS angenommen, das dem Verständnis von Sprache zugrunde liegt. Der Mensch hat die Fähigkeit zu höchst differenzierter vokaler Imitation, welche wahrscheinlich eine notwendige Voraussetzung für das Erlernen und die Produktion kulturspezifischer vokaler Klänge ist. Interkulturell umfassen diese Klänge phonemische Sprachklänge, prosodische Elemente der Sprache (d. h. musikalische Elemente der Sprache wie z. B. Sprachmelodie und –timbre) und Gesang. Vokale Imitation als Voraussetzung für die Akquisition von Sprache (insbesondere der Prosodie) und Gesang basiert auf neuronalen Substraten, die bisher nur wenig bekannt sind. Die vorliegenden Daten liefern

48 Vgl. Kohler et al. (2002), Wilson et al. (2004).
49 Vgl. Gallese et al. (1996) und Liberman/Mattingly (1985).
50 Vgl. Wilson et al. (2004).

Evidenz für ein PAS im Bereich musikalischer Information, was dadurch indiziert wird, daß vokalisierbare auditorische Information die Larynx-Repräsentation aktiviert und somit einen Effektor, der in die Produktion von (Sprach-)Melodie involviert ist.

Die Ergebnisse dieser Emotionsstudie sind im Zusammenhang dieses Buches deshalb relevant, weil die hier beschriebene emotionale Aktivität zur Handlung motiviert und diese Motivation eine Bedeutung für das musikhörende Individuum hat. Darüber hinaus ist emotionale Aktivität immer mit körperlichen Reaktionen verbunden, deren Wahrnehmung ebenfalls eine Bedeutung hat. Im folgenden Abschnitt wird daher noch kurz auf solche körperlichen Reaktionen eingegangen.[51]

5. Wie der Körper auf Musik reagiert

Emotionale Aktivität beim Hören von Musik hat immer Effekte auf das vegetative Nervensystem. Dabei besteht die Möglichkeit der Vitalisierung des Individuums durch Aktivität des vegetativen Nervensystems im Zusammenhang mit der Integration musikalischer und nicht-musikalischer (geistiger, körperlicher und emotionaler) Informationen (wahrscheinlich in den multimodalen parietalen Assoziationskortizes im Bereich der BA 7). Effekte der Verarbeitung von Musik auf das vegetative Nervensystem wurden bisher vor allem durch Messungen der elektrodermalen Aktivität und der Herzrate untersucht.[52]

Prozesse innerhalb des vegetativen Nervensystems (und damit auch Prozesse der Vitalisierung) haben Einfluß auf Prozesse innerhalb des Immunsystems. Wirkungen der Musikwahrnehmung auf das Immunsystem sind z. B. anhand von Konzentrations-Änderungen von Immunglobulin A im Speichel gemessen worden.[53]

Interessanterweise werden wahrscheinlich Prozessen innerhalb des Immunsystems positiv beeinflußt von (prä)motorischer Aktivität beim Musikmachen.[54] Dabei können die neuronalen Aktivitäten

51 Er ist im wesentlichen übernommen aus Koelsch/Siebel (2005).
52 Vgl. Pankseep/Bernatzky (2002), Kalfha et al. (2002), Sloboda (1991) sowie Blood/Zatorre (2001).
53 Vgl. Hucklebridge et al. (2000), McCraty et al. (1996) und Kreutz et al. (2004).
54 Vgl. Kreutz et al. (2004).

der späten Stadien der Musik-Perzeption identisch sein mit den neuronalen Aktivitäten der frühen Stadien der Handlungsplanung und –initiierung[55] (siehe auch Abschnitt *Musik und Emotion* in diesem Kapitel). Mittlerweile wurde gezeigt, daß Musikperzeption mit Handlungsplanung interferieren kann,[56] daß bereits das bloße Hören von Klavierstücken zu (prä)motorischer Aktivität von Fingerrepräsentationen bei Pianisten führen kann, und daß bereits lediglich das Hören von Musik auch bei sog. Nichtmusikern zu (prä)motorischer Aktivität der Repräsentation des Kehlkopfes führen kann (siehe Abschnitt 4).

Neben der Bedeutung für das Individuum hat Handlungsinduktion durch Musikperzeption (z. B. Mitwippen, Mitklatschen, Mittanzen, oder Mitsingen) hat wahrscheinlich auch soziale Funktionen wie z. B. das Herstellen von Bindungen zwischen Individuen einer Gruppe, oder auch zwischen Individuen unterschiedlicher Gruppen[57] (und solche sozialen Effekte haben wiederum Bedeutung für das Individuum). Interessanterweise werden diese evolutionär vorteilhaften sozialen Aspekte des Musikmachens begleitet von positiven Effekten auf das Immunsystem; diese positiven Effekte repräsentieren möglicherweise einen wichtigen Ursprung der Evolution kooperativen, gemeinschaftlichen Musikmachens beim Menschen. Mit anderen Worten: Unser Organismus ist derart gestaltet, daß auf Gemeinschaft hin orientierte soziale Aktivität sich regenerativ auf eine vitales System unseres Organismus auswirkt: auf das Immunsystem. Gemeinschaftliches Musikmachen – also interaktive, feinfühlende, kooperative Aktivität – repräsentiert eine solche auf Gemeinschaft hin orientierte Aktivität.

Schlußfolgerungen

Die vorgestellten Studien zeigen, daß das menschliche Gehirn Musik und Sprache zum großen Teil mit denselben kognitiven Prozessen verarbeitet (mit zum großen Teil denselben zerebralen Strukturen). Diese Befunde bedeuten, daß Musik und Sprache im Gehirn eng

55 Vgl. Rizzolatti/Craighero (2004), Janata et al. (2002).
56 Drost et al. (2005) und Drost et al.(im Erscheinen).
57 Vgl. Hagen/Bryant (2003).

miteinander verknüpft sind, und daß das Gehirn oft keinen wesentlichen Unterschied zwischen Sprache und Musik macht.

Interessanterweise waren alle Teilnehmer der hier vorgestellten Studien sogenannte Nichtmusiker, d. h. Menschen ohne formale musikalische Ausbildung. Die Ergebnisse zeigen, daß auch Nichtmusiker musikalische Syntax akkurat verarbeiten und musikalische Semantik verstehen können. Das implizite musik-syntaktische Wissen wird wahrscheinlich zu einem wesentlichen Teil durch alltägliche Hörerfahrungen erworben (übrigens ganz selbstverständlich, nebenbei, ohne jede Anstrengung, und oft ohne daß wir es überhaupt merken). Diese Annahmen stimmen mit Studien überein, die zeigen, daß die Fähigkeit zum Erwerb von Wissen über musikalische Regularitäten, und die Fähigkeit, musikalische Information schnell und genau entsprechend dieses Wissens zu verarbeiten, eine allgemeine Fähigkeit des menschlichen Gehirns ist. Anders gesagt: die vorgestellten Ergebnisse zeigen unseres Erachtens, daß ein ausgeprägtes Interesse an Musik eine grundlegende Eigenschaft des Gehirns, und daß eine ausgeprägte Musikalität eine ganz natürliche Fähigkeit des menschlichen Gehirns ist. Diese allgemeine menschliche Fähigkeit unterstreicht die biologische Relevanz von Musik.

Die Studien zur Emotion mit Musik zeigen, daß Musik ein extensives Netzwerk limbischer und para-limbischer Strukturen (also der Hirnstrukturen, die zentral für die Verarbeitung von Emotion sind) aktivieren kann, und daß das Hören angenehmer Musik automatisch zu prämotorischer Aktivität (im Fall der vorgestellten Studie der Larynxrepräsentation) führen kann. Emotionale Aktivität, prämotorische Aktivität, sowie körperliche Reaktionen emotionaler Aktivität haben ebenfalls eine Bedeutung für das musikhörende Individuum. Das Entschlüsseln dieser Bedeutung erleben wir wahrscheinlich auch als Verstehen von Musik.[58]

58 Die im Text zitierten Veröffentlichungen der Autoren können kostenlos heruntergeladen werden von www.stefan-koelsch.de

Literatur

Bangert, M./Altenmüller, E.O. (2003): »Mapping perception to action in piano practice: A longitudinal DC-EEG study«, in: *BMC Neurosci* 4(26), S. 4-26.

Baumgaertner, A./Weiller, C./Büchel, C. (2002): »Even-related fMRI reveals cortical sites involved in contextual sentence integration«, in: *NeuroImage* 16, S. 736-345.

Besson, M./Faita, F. (1995): »An event-related potential study of musical expectancy: Comparison of musicians with nonmusicians«, in: *J Exp Psych: Hum Perc Perf* 21(6), S. 1278-1296.

Blood, A.J./Zatorre, R.J./Bermudez, P./Evans, A.C. (1999): »Emotional responses to pleasant and unpleasant music correlate with activity in paralimbic brain regions«, in: *Nature Neurosci* 2(4), S. 382-387.

Blood, A.J./Zatorre, R.J. (2001): »Intensely pleasurable responses to music correlate with activity in brain regions implicated in reward and emotion«, in: *PNAS* 98(20), S. 11818-11823.

Buccino, G./Binkofsky, F./Fink, G.R./Fadiga, L./Fogassi, L./Gallese, V./Seitz, R./Zilles, K./Rizzolatti, G./Freund, H.J. (2001): »Action observation activates premotor and parietal areas in a somatotopic manner: An fMRI study«, in: *Europ J Neurosci* 13, S. 400-404.

Decety, J./Grezes, J. (1999): »Neural mechanisms subserving the perception of human actions«, in: *Trends Cogn Sci* 3(5), S. 172-178.

Démonet, J./Chollet, F./Ramsay, S./Cardebat, D./Nespoulous, J.L./Wise, R./Rascol, A./Frackowiak, R. (1992): »The anatomy of phonological and semantic processing in normal subjects«, in: *Brain* 115, S. 1753-1768.

Drost, U.C./Rieger, M./Brass, M./Gunter, T.C./Prinz, W. (2005): »Action-effect coupling in pianists«, in: *Psychol Res*69(4), S. 233-241.

Drost, U.C./Rieger, M./Braß, M./Gunter, T.C./Prinz, W. (im Erscheinen): »When hearing turns into playing: Movement induction by auditory stimuli in pianists«, in: *Quart J Exp Psych*.

Fadiga, L./Fogassi, L./Pavesi, G./Rizzolatti, G. (1995): »Motor facilitation during action observation: A magnetic stimulation study«, in: *J Neurophys* 73, S. 2608-2611.

Fitch, W.T./Hauser, M.D. (2004): »Computational constraints on syntactic processing in a nonhuman primate«, in: *Science*, S. 377-380.

Friederici, A.D./Opitz, B./von Cramon, D.Y. (2000): »Segregating semantic and syntactic aspects of processing in the human brain: An fMRI investigation of different word types«, in: *Cereb Cortex* 10, S. 698-705.

Friederici, A.D. (2002): »Towards a neural basis of auditory sentence processing«, in: *Trends Cogn Sci* 6(2), S. 78-84.

Gallese, V./Fadiga, L./Fogassi, L./Rizzolatti, G. (1996): »Action recognition in the premotor cortex«, in: *Brain* 119, S. 593-609.
Hagen, E.H./Bryant, G.A. (2003): »Music and dance as a coalition signaling system«, in: *Human Nature* 14, S. 21-51.
Halgren, E./Dhond, R.P./Christensen, N./Van Petten, C./Marinkovic, K./Lewine, J.D./Dale, A.M. (2002): »N400-like magnetoencephalography responses modulated by semantic context, word frequency, and lexical class in sentences«, in: *NeuroImage* 17, S. 1101-1116.
Heinke, W./Kenntner, R./Gunter, T.C./Sammler, D./Olthoff, D./Koelsch, S. (2004): »Differential effects of increasing propofol sedation on frontal and temporal cortices: An ERP study«, in: *Anesthesiol* 100, S. 617-625.
Helenius, P./Salmelin, R./Service, E./Connolly, J.F. (1998): »Distinct time courses of word and context comprehension in the left temporal cortex«, in: *Brain* 121, S. 1133-1142.
Hucklebridge, F./Lambert, S./Clow, A./Warburton, D.M./Evans, P.D./Sherwood, N. (2000): »Modulation of secretory immunoglobulin A in saliva; response to manipulation of mood«, in: *Biol Psych* 53, S. 25-35.
Janata, P. (1995): »ERP measures assay the degree of expectancy violation of harmonic contexts in music«, in: *J Cogn Neurosci* 7(2), S. 153-164.
Jusczyk, P.W. (1999): »How infants begin to extract words from speech«, in: *Trends Cogn Sci* 3(9), S. 323-328.
Kalfha, S./Peretz, I./Blondin, J.-P./Manon, R. (2002): »Event-related skin conductance responses to musical emotions in humans«, in: *Neurosci Letters* 328, S. 145-149.
Kellenbach, M./Wijers, A./Mulder, G. (2000): »Visual semantic features are activated during the processing of concrete words: event-related potential evidence for perceptual semantic priming«, in: *Cogn Brain* Res 10, S. 67-75.
Koelsch, S./Gunter, T.C./Friederici, A.D./Schröger, E. (2000): »Brain indices of music processing: ›Non-musicians‹ are musical«, in: *J Cogn Neurosci* 12(3), S. 520-541.
Koelsch, S./Gunter, T.C./von Cramon, D.Y./Zysset, S./Lohmann, G./Friederici, A.D. (2002): »Bach speaks: a cortical ›language-network‹ serves the processing of music.« in: *NeuroImage* 17, S. 956-966.
Koelsch, S./Friederici, A.D. (2003): »Towards the neural basis of processing structure in music: Comparative results of different neurophysiological investigation methods«, in: *Ann New York Acad Sci*, S. 15-27.
Koelsch, S./Grossmann, T./Gunter, T.C./Hahne, A./Friederici, A.D. (2003): »Children processing music: Electric brain responses reveal musical competence and gender differences«, in: *J Cogn Neurosci* 15(5), S. 683-693.
Koelsch, S./Kasper, E./Sammler, D./Schulze, K./Gunter, T.C./Friederici, A.D. (2004): »Music, language, and meaning: Brain signatures of semantic processing.« in: *Nat Neurosci* 7(3), S. 302-307.

Koelsch, S./Siebel, W. (2005): »Towards a neural basis of music perception«, in: *Trends Cogn Sci* 9, S. 578-584.
Koelsch, S. (2005): »Neural Substrates of Processing Syntax and Semantics in Music«, in: *Current Opinion in Neurobiology* 15, S. 1-6.
Koelsch, S./Fritz, T./Schulze, K./Alsop, D./Schlaug, G. (2005): »Adults and children processing music: An fMRI study«, in: NeuroImage 25(4), S. 1068-1076.
Koelsch, S./Fritz, T./von Cramon, D.Y./Müller, K./Friederici, A.D. (2006): »Investigating emotion with music: an fMRI study«, in: Human Brain Mapping 27, S. 239-250.
Kohler, E./Keysers, C./Umilta, M.A./Fogassi, L./Gallese, V./Rizzolatti, G. (2002): »Hearing sounds, understanding actions: Action representation in mirror neurons«, in: *Science* 297, S. 846-848.
Kreutz, G./Bongard, S./Rohrmann, S./Hodapp, V./Grehe, D. (2004): »Effects of choir singing or listening on secretary immunoglobin A, cortisol, and emotional state«, in: *J Behav Med* 27, S. 623-635.
Krumhansl, C.L. (1997): »An exploratory study of musical emotions and psychophysiology«, in: *Can J Exp Psychol* 51, S. 336-352.
Kuperberg, G./McGuire, P.K./Bullmore, E.T./Brammer, M.J./Rabe-Hesketh, S./Wright, I.C./Lythgoe, D.J./Williams, S.C.R./David, A.S. (2000): »Common and distinct neural substrates for pragmatic, semantic and syntactic processing of spoken sentences: An fMRI study«, in: *J Cog Neurosci* 12(2), S. 321-341.
Kutas, M./Hillyard, S. (1980): »Reading senseless sentences: Brain potentials reflect semantic incongruity«, in: *Science* 207, S. 203-205.
Janata, P./Tillmann, B./Bharucha, J. (2002): »Listening to polyphonic music recruits domain-general attention and working memory circuits«, in: *CABN* 2(2), S. 121-140.
Liberman, A.M./Mattingly, I.G. (1985): »The motor theory of speech perception revised«, in: *Cognition* 21, S. 1-36.
Maess, B./Koelsch, S./Gunter, T.C./Friederici, A.D. (2001): »Musical Syntax is processed in Broca's area: An MEG-study«, in: *Nature Neurosci* 4(5), S. 540-545.
McCraty, R./Atkinson, M./Rein, G./Watkins, A.D. (1996): »Music enhances the effect of positive emotional states on salivary IgA«, in: *Stress Medicine* 12, S. 167-175.
Meyer, L.B. (1956): *Emotion and Meaning in Music*. Chicago: University of Chicago Press.
Ni, W./Constable, R.T./Mencl, W.E./Pugh, K.R./Fulbright, R.K./Shaywitz, B.A./Gore, J.C./Shankweiler, D. (2000): »An even-related neuroimaging study distinguishing form and content in sentence processing«, in: *J Cog Neurosci* 12(1), S. 120-133.

Osterhout, L./Holcomb, P. (1995): »ERPs and language comprehension«, in: M. Rugg/M. Coles (Hg.): *Electrophysiology of Mind. Event-Related Potentials and Cognition*. Oxford: Oxford University Press, S. 192-208.
Panksepp, J. (1995): »The emotional sources of »chills« induced by music«, in: *Music Perc* 13, S. 171-208.
Pankseep, J./Bernatzky, G. (2002): »Emotional sounds and the brain: the neuro-affective foundations of musical appreciation«, in: *Behav Proc* 60, S. 133-155.
Patel, A.D./Gibson, E./Ratner, J./Besson, M./Holcomb, P.J. (1998): »Processing syntactic relations in language and music: An event-related potential study«, in: *J Cogn Neurosci* 10(6), S. 717-733.
Patel, A. (2003): »Language, music, syntax and the brain«, in: *Nature Neurosci* 6(7), S. 674-681.
Price, C./Moore, C./Humphreys, G./Wise, R. (1997): »Segregating semantic from phonological processes during reading«, in: *J Cog Neurosci* 9(6), S. 727-733.
Regnault, P./Bigand, E./Besson, M. (2001): »Different brain mechanisms mediate sensitivity to sensory consonance and harmonic context: Evidence from auditory event-related brain potentials«, in: *J Cogn Neurosci* 13(2), S. 241-255.
Repp, B.H./Knoblich, G. (2004): »Perceiving action identity: How pianists recognize their own performance«, in: *Psychol Science* 15(9), S. 604-609.
Riemann, H. (1877): *Musikalische Syntaxis: Grundriss einer harmonischen Satzbildungslehre*. Niederwalluf: Sändig 1971.
Rizzolatti, G./Craighero L. (2004): »The mirror-neuron system«, in: *Annual Review of Neuroscience* 27, S. 169-192.
Royet, J.P./Zald, D./Versace, R./Costes, N./Lavenne, F./Koenig, O./Gervais, R. (2000): »Emotional responses to pleasant and unpleasant olfactory, visual, and auditory stimuli: A positron emission tomography study«, in: *J Neurosci* 20(20), S. 7752-7759.
Schoen, D./Magne, C./Besson, M. (2004): »The music of speech: Music training facilitates pitch processing in both music and language«, in: *Psychophys* 41(3), S. 341-349.
Siebel, W.A. (1994): *Human Interaction: Introduction to a new psychological theory of cognition*, Langwedel: Glaser-Verlag.
Siebel, W.A./Winkler, T. (1996): *Noosomatik V*, (2. Aufl.), Wiesbaden: Glaser-Verlag.
Sloboda, J.A. (1991): »Music Structure and Emotional Response: Some Empirical Findings«, in: Psychology of Music 19(2), S. 110-120.
Soderstrom, M./Seidl, A./Kemler Nelson, D.G./Jusczyk, P.W. (2003). »The prosodic bootstrapping of phrases: Evidence from prelinguistic infants«, in: *Journal of Memory and Language* 49(2), S. 249-267.

Tillmann, B./Bharucha, J./Bigand,E. (2000): »Implicit learning of tonality: A self-organized approach«, in: *Psych Review* 107(4), S. 885-913.
Trehub, S. (2003): »The developmental origins of musicality«, in: *Nature Neurosci* 6(7), S. 669-673.
Wilson, S.M./Saygin, A.P./Sereno, M./Iacoboni, M. (2004): »Listening to speech activates motor areas involved in speech production«, in: *Nature Neurosci* 7(7), S. 701-702.
Zald, D.H./Pardo, J.V. (2002): »The neural correlates of aversive auditory stimulation«, in: *NeuroImage* 16, S. 746-753.
Zatorre, R.J./Peretz, I. (Hg.)(2001): *The Biological Foundations of Music*, (Ann New York Acad Sci, vol. 930). New York, USA: The New York Academy of Sciences.