

Zur Bedeutung bildgebender und elektromagnetischer Verfahren für Musik und Musiktherapie

Thomas Stegemann, Hamburg

Zusammenfassung

Ziel dieses Artikels soll zum einen sein, eine Einführung in die Grundlagen der Gehirnanatomie und -funktionen zu geben, um darauf aufbauend eine Verknüpfung zu elektromagnetischen und bildgebenden Verfahren herzustellen. Zum anderen sollen beispielhaft Ergebnisse aus neurowissenschaftlichen Studien aus den Bereichen Musikphysiologie, Musikmedizin und Musiktherapie referiert werden, um Chancen und Limitationen der verschiedenen methodischen Ansätze sowie deren Bedeutung für Forschung und weitere Entwicklung der Musiktherapie auszuloten.

Abstract

The Role of Neuroimaging and Electromagnetic Techniques in Music and Music Therapy

The purpose of this study is to present an introduction to fundamental brain structure and function as a basis for, and in combination with, electromagnetic and neuroimaging techniques. Furthermore, exemplary results from neuroscientific research in the areas of neurobiological music processing, music medicine and music therapy are reviewed, illustrating the possibilities and limitations of these methods, as well as their significance to further development and research in music therapy.

Einleitung

„Es pflegen etliche Ärzte ihre Patienten durch eine liebliche Musik zu kurieren. Wie kann die Musik in eines anderen Menschen Leib wirken? (...)“

Johannes Kepler (1571–1630)

Diese Frage war weder zur Zeit Keplers ein neuer Gedanke, noch könnte behauptet werden, sie wäre heute schon zu beantworten. Nichtsdestotrotz stellt sie für die Musiktherapie eine, wenn nicht *die* zentrale Frage dar. Auf der Suche nach Antworten auf diese Frage (nach dem, was wir bisher wissen, scheint zumindest klar, dass es nicht *die* Antwort geben kann) muss es zunächst einmal darum gehen, das geeignete Vehikel für diesen Weg auszumachen. Auch hier können wir davon ausgehen, dass es unterschiedlicher Ansätze zur Annäherung an diese Fragestellung bedarf.

Ein Ansatz, der aus der Hirnforschung kommt, versucht zu ergründen, wie Musik im Gehirn wahrgenommen, verarbeitet und entziffert wird. Der letzte Schritt – die Entzifferung oder Dekodierung von Musik – ist vielleicht das größte Geheimnis. Denn es gibt in unserem Gehirn, von außen betrachtet, keine Töne, keine Farben, keine Wärme oder Kälte, keinen Geruch und keinen Geschmack, sondern lediglich

elektro-chemische Impulse, die sich substanzuell nicht voneinander unterscheiden. Was aber macht dann den Unterschied zwischen einer Beethoven-Sonate und einem Fünf-Gänge-Menü aus? Ein entscheidendes Moment für die Differenzierung dessen, was wir wahrnehmen, fühlen und erleben, ist die Lokalisation von Erregungsimpulsen innerhalb bestimmter Gehirnareale.

Die Suche nach dem Ort eines „Musikzentrums“, so Altenmüller (2002), also nach Großhirnarealen, in denen Musik verarbeitet wird, begann bereits im 19. Jahrhundert anhand von Hirnläsionsstudien. Dabei wurde das Verhalten hirngeschädigter Patienten untersucht. Aus den Leistungseinbußen – etwa der Unfähigkeit, ein Lied zu erkennen – wurde geschlossen, dass der Ort der Schädigung mit der betreffenden Fähigkeit zusammenhängen müsse. Obwohl diese Methode verschiedensten Einschränkungen unterworfen ist, konnten Wissenschaftler zum Beispiel die Orte der Sprachverarbeitung im Gehirn schon damals recht gut bestimmen. Wo und wie das Gehirn Musik verarbeitet, blieb dagegen auf Grund widersprüchlicher Befunde unklar. Es zeigte sich, dass musikalische Leistungen sowohl nach Schädigung der linken als auch der rechten Hirnhälfte ausfallen können. Solche Defekte treten nicht nur bei Beeinträchtigung der Hörareale des Temporal-Lappens auf, sondern auch dann, wenn Frontalhirn und Parietalregionen betroffen sind.

Weitere Fortschritte, so führt Spitzer (2002) aus, wurden erst erzielt, als es im Rahmen von Operationen am Gehirn möglich wurde, das Gehirn direkt elektrisch zu stimulieren. Dieses Verfahren dient in erster Linie dazu, anhand der Reaktion des Patienten genau festzulegen, wo beispielsweise ein bestimmter Schnitt im Gehirn gemacht werden kann, ohne wesentliche Hirnfunktionen zu beeinträchtigen. Die wissenschaftlichen Erkenntnisse, die sich daraus ergeben, sind also eher ein „Nebenprodukt“. Tatsächlich fand man aber bei der Reizung mancher Patienten während der Operation am Temporal-Lappen musikalisches Erleben, wie in einer Beschreibung von Penfield & Perot (1963) dargestellt: „Bei der Patientin N. C. kam es bei Stimulation des Punktes Nr. 23 auf der ersten Temporalwindung jedes Mal zum musikalischen Empfinden, und das Orchester spielte immer solange wie die Stimulation andauerte.“ (zitiert nach Spitzer (2002, S. 180)).

Mit diesen und ähnlichen Untersuchungen konnte somit eindeutig nachgewiesen werden, dass das Erleben von Musik – wie auch das Erleben anderer Sinnesmodalitäten – durch direkte Reizung bestimmter Regionen des Gehirns (re-)produziert werden kann.

Mittlerweile stehen der Hirnforschung mit EEG und moderneren bildgebenden Verfahren Möglichkeiten zur Verfügung, die die Untersuchung von Struktur und Funktionen des menschlichen Gehirns nicht-invasiv und in vivo erlauben.

Hirnphysiologische Grundlagen

Im Folgenden sollen die Charakteristika der Hirnanatomie und -physiologie erläutert werden, die als Grundlage zum Verständnis der elektromagnetischen und bildgebenden Verfahren in der Hirnforschung notwendig erscheinen. Wie fast überall in der Natur zeigt sich auch beim Menschen eine klar gegliederte Struktur:

sein Körper setzt sich aus unterschiedlichen Organen und Organsystemen zusammen. Ein Organ wird aus verschiedenen Geweben gebildet. Als Gewebe bezeichnet man einen Verbund von Zellen mit gleicher Funktion und Bauart. Die Zellen schließlich sind die kleinsten Bau- und Funktionseinheiten des Organismus. Diese Einteilung soll als Raster dienen, um Struktur und Funktion des Gehirns, seiner Gewebetypen und der Nervenzelle zu beleuchten.

Gehirn und Neuroplastizität

Offensichtlich ist das Gehirn mehr als nur die Summe seiner Teile. Gäbe man in einer 8-Millionen-Stadt wie New York jedem Einwohner 10.000 Schnüre in die Hand, um sich mit anderen Einwohnern zu verbinden, so müsste man sich das Netzwerk des menschlichen Gehirns immer noch um ein Tausendfaches größer vorstellen. Laut Spitzer (2002) entspricht die Aufnahme- und Verarbeitungskapazität unseres Gehirns in etwa der Informationsmenge von 300 Megabyte pro Sekunde. Diese enorme Leistungskapazität des menschlichen Gehirns wird durch eine außerordentliche Fähigkeit zu neuronalen und genetischen Anpassungsvorgängen im Zentralnervensystem noch um ein Vielfaches erhöht. Diese Adaptationsprozesse an die Lebenserfahrung eines Organismus werden als Neuroplastizität bezeichnet. Erstaunlicherweise sind diese Erkenntnisse relativ neu. Bis vor etwa 20 Jahren ging die Wissenschaft noch davon aus, dass es sich beim Gehirn um ein überwiegend statisches Organ handelt, dessen Zellen die Fähigkeit zur Regeneration verloren haben. Dass dieses Dogma widerlegt werden konnte, gehört bisher sicherlich mit zu den wichtigsten Ergebnissen, die durch die wissenschaftlichen Anstrengungen während der letzten Jahre erzielt werden konnten. Neuroplastizität findet auf verschiedenen Ebenen (Synapse, Nervenzelle, kortikale Karte) und in verschiedenen Zeiträumen (Sekunden und Stunden bis Monate und Jahre) praktisch zeitlebens statt. Die Verarbeitung von Musik durch das Gehirn sowie die durch Musik hervorgerufenen Veränderungen desselben stellen ein als ideal zu bezeichnendes Modell für die Neuroplastizität dar. Bezogen auf die Musik bedeutet dies nicht mehr und nicht weniger, als dass jede Form von gehörter und gemachter Musik zu funktionellen und / oder strukturellen Veränderungen im menschlichen Gehirn führt. Dies zeigt sich z. B. im Vergleich zwischen Musikern und Nicht-Musikern: Schlaug et al. (1995) fanden bei ersterer Gruppe einen vergrößerten vorderen Balken (Corpus callosum), der wichtigsten Verbindung zwischen den beiden Hirnhälften. Elbert et al. (1995) konnten zeigen, dass sich das für die Finger der linken Hand zuständige kortikale Areal bei Gitarristen und Geigespielern um 1,5 bis 3,5 cm vergrößert, wenn vom frühen Kindesalter an viel geübt wurde.

Das Wissen um diese Vorgänge ist nicht nur grundlagen-theoretisch, sondern auch klinisch-praktisch von Interesse. Zum Beispiel für die Rehabilitationstherapie nach Schlaganfällen, aber zunehmend auch für die Konzeption, Durchführung und Evaluierung von Psychotherapie.

Hirngewebe und Blut

Das Nervengewebe von Gehirn und Rückenmark ist in graue und weiße Substanz aufgeteilt, wobei sich die graue Substanz hauptsächlich aus den Zellkörpern der Nervenzellen (Neurone) zusammensetzt und die weiße aus langen Fortsätzen, den Axonfasern. Die Axone fast aller Neurone sind von einer lipidhaltigen Substanz umgeben, die ihnen die weißliche Farbe verleiht.

Außer dem Nervengewebe finden sich noch weitere Gewebetypen im Gehirn, bzw. an dieses angrenzend. Dazu gehören das Epithelgewebe (z. B. von Blutgefäßen), Binde- und Stützgewebe (z. B. Knochenstrukturen) und Muskelgewebe. Daneben lassen sich verschiedene Flüssigkeiten (v. a. Blut und Liquor) differenzieren. Die aufgeführten Gewebearten zeichnen sich u. a. dadurch aus, dass sie sich in ihrem Wassergehalt unterscheiden. Dies ist, wie wir noch sehen werden, ein entscheidendes Merkmal für die bildliche Darstellung weißer und grauer Substanz in der Kernspintomographie.

Das Blut hat im menschlichen Organismus vielfältige Aufgaben zu erfüllen. Eine der wichtigsten stellt die Transportfunktion dar: das Blut befördert Sauerstoff und Nährstoffe (z. B. Glukose) zu den Zellen und führt gleichzeitig Kohlendioxid und Stoffwechselabfallprodukte wieder ab. Obwohl das Gehirn bei einem durchschnittlichen Gewicht von ca. 1300 Gramm mit nur 2% am Körpergewicht beteiligt ist, verbraucht es 15 bis 20 Prozent des Herzminutenvolumens, womit die Bedeutung der Blutversorgung des Gehirns dokumentiert wird. Dabei werden insbesondere die Regionen mit Sauerstoff und Glukose angereichertem Blut versorgt, die gerade besonders aktiv sind. Dieser inzwischen auch experimentell nachgewiesene Zusammenhang zwischen Blutfluss und Hirnaktivierung ist das wesentliche Paradigma, auf das sich die funktionelle Bildgebung stützt. In diesem Zusammenhang ist noch eine Besonderheit zu erwähnen: der Chemiker und Doppelnobelpreisträger Linus Pauling hatte herausgefunden, dass sauerstoffreiches Blut geringfügig andere magnetische Eigenschaften besitzt als sauerstoffarmes – eine Erkenntnis, die etwa ein halbes Jahrhundert später zur Entwicklung der funktionellen Kernspintomographie führen sollte.

Nervenzelle (Neuron)

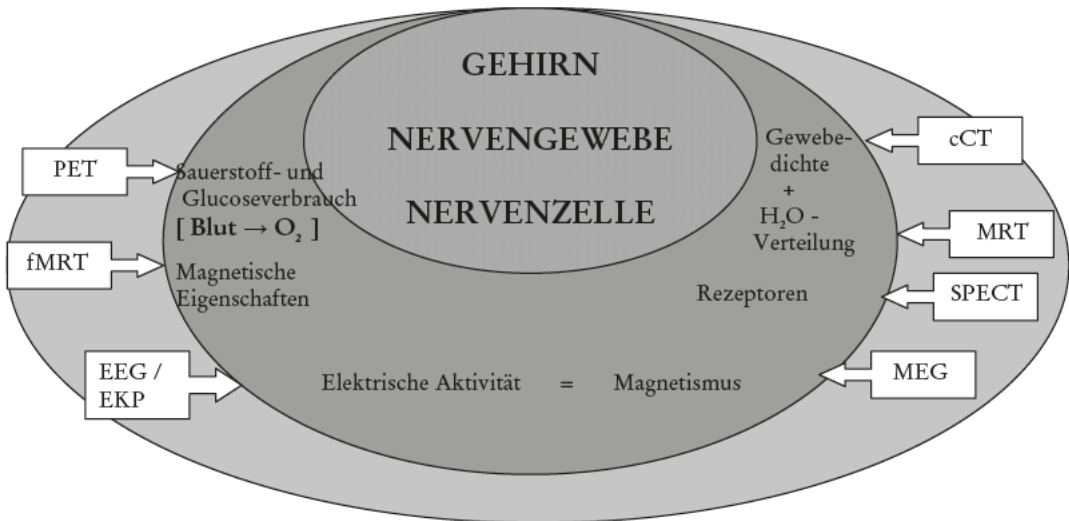
Bei einem Neuron handelt es sich um einen speziellen Typ einer lebenden Zelle, die auf Erregung und Erregbarkeit spezialisiert ist. Das typische Neuron besteht aus einem Zellkörper, von dem mehrere kurze Fortsätze, die Dendriten, sowie ein einziger langer Fortsatz, das Axon, ausgehen. Die Dendriten erhalten elektrische Impulse von anderen Neuronen und leiten diese weiter an den Zellkörper. Das Axon leitet die Erregungen in die entgegen gesetzte Richtung, nämlich vom Zellkörper zu den Dendriten anderer Neurone und zu Muskeln und Drüsen. Diese Erregung ist ein mit empfindlichen Instrumenten messbarer elektrischer Strom, das so genannte Aktionspotenzial. Das bedeutet, dass sich in Regionen mit erhöhter Hirnaktivität ein zeitlich synchrones Muster von elektrischen Entladungen fin-

den und registrieren lässt. Bereits im 19. Jahrhundert zeigte der dänische Chemiker und Physiker Ørsted, dass elektrischer Strom ein Magnetfeld erzeugt. Auch dieses Phänomen konnte sich die Bildgebung durch das Verfahren der Magnetenzephalographie (MEG) zu Nutze machen.

Zusammenfassend lässt sich konstatieren, dass die Zellen in unseren Sinnesorganen distinkte physikalische Reize in Impulse umwandeln, welche von unserem Nervensystem weiterverarbeitet werden. Hinter diesem, auf den ersten Blick einfachen Prinzip steckt jedoch ein komplexes System von Verarbeitungsmodi. Spitzer (2002, S. 173) schreibt dazu: „Auf der Ebene einzelner Neuronen des Hörkortex lassen sich beispielsweise zwar solche finden, die bei einem Ton einer bestimmten Frequenz anfangen zu feuern und aufhören, wenn der Ton aufhört. Dies ist aber nur eine Möglichkeit der ‚Antwort‘ kortikaler Neurone. Andere feuern dauernd mit einer bestimmten Rate und hören damit auf, wenn der Ton kommt. Wieder andere feuern nur dann, wenn sich gerade etwas ändert. Wie diese Codes dann miteinander im Einzelnen verrechnet werden, um zu einer einheitlichen Wahrnehmung zu führen, ist noch nicht völlig geklärt. Noch bis vor etwa zwei Jahrzehnten lag es daher im Bereich der Spekulation, wie das Gehirn mit Tönen und Musik umgeht. Dies hat sich geändert. (...)“

Eine Synopsis der dargestellten Prinzipien der Hirnphysiologie gibt die folgende Abbildung:

Abb. 1 Grundlagen der Hirnphysiologie. Innerer Ring: Strukturebenen. Mittlerer Ring: Gewebe- und Zellcharakteristika. Äußerer Ring: Bildgebende Verfahren.



Legende: PET = Positronen-Emissions-Tomographie, fMRT = funktionelle Magnetresonanz-Tomographie, EEG = Elektroenzephalogramm, EKP = Ereigniskorrelierte Potentiale, cCT = kraniale Computertomographie, MRT = Magnetresonanztomographie, SPECT = Single-Photon-Emissions-Computertomographie, MEG = Magnet-Enzephalographie

Zu diesen Fortschritten in Bezug auf das Verständnis der Enkodierung und der Repräsentation von Musik im Gehirn während der letzten zwei Jahrzehnte haben die elektromagnetischen und bildgebenden Verfahren einen nicht unwichtigen Beitrag geleistet. Die wichtigsten dieser Methoden sollen im Folgenden kurz dargestellt werden.

Elektromagnetische und bildgebende Verfahren

Elektromagnetische Verfahren

Die Elektroenzephalographie (EEG) registriert die bioelektrischen Erscheinungen der Hirntätigkeit, wie das EKG die der Herzaktion aufzeichnet. Dabei werden Potentialschwankungen der Hirnrinde (Eindringtiefe 1–2 cm) im μV -Bereich gemessen, was in etwa einem Zehntel der Spannung des EKG entspricht. Während das klinische Routine-EEG mit einer Ableitung von 15–25 Elektroden auskommt, werden für wissenschaftliche Fragestellungen bis zu 256 Elektroden verwendet, was die Ortsauflösung und „Tiefenschärfe“ erheblich verbessert. Trotzdem bleibt die räumliche Auflösung im Vergleich zu den bildgebenden Verfahren eher mäßig. Der große Vorteil des EEG liegt in der zeitlichen Auflösung, die im Millisekunden-Bereich liegt.

Field et al. (1998) untersuchten 14 chronisch depressive, weibliche Jugendliche mittels EEG und Speichelproben im Ruhezustand, während und nach dem Hören einer 23-minütigen Rockmusik-Aufnahme. Es zeigte sich, dass die mit negativem Affekt einhergehende und für Depressive typische rechtsseitig frontal akzentuierte Aktivierung abnahm und auch der Level des Stresshormons Cortisol in der Speichelprobe sank. Die Autoren schlossen aus ihrer Untersuchung, dass ein positiver Effekt der Musik auf die physiologischen und biochemischen Parameter schon nachweisbar war, obwohl sich subjektiv bei den untersuchten Patientinnen noch keine Stimmungsveränderung bemerkbar gemacht hatte.

Die Ereigniskorrelierten Potentiale (EKP) sind eine Sonderform des EEG und verkörpern einen eigenständigen Forschungsansatz. Unter ereigniskorrelierter Aktivität versteht man hirnelektrische Potenzialverschiebungen, die bei sensorischer Reizung (z. B. durch akustische (AEP) oder visuelle Stimuli (VEP) wiederholbar und mit gleicher Charakteristik auftreten. Die Isolation dieser umschriebenen Potentiale erfolgt durch eine Mittelungstechnik, wodurch die charakteristischen Kurven aus dem Rauschen der Spontanaktivität extrahiert und sichtbar gemacht werden können. Den einzelnen Komponenten der EKP können spezifische kognitive Funktionen zugeordnet werden, z. B. bei der Sprach- und Musikverarbeitung, bei Gedächtnisaufgaben und Prozessen der visuellen Aufmerksamkeit.

In einer Untersuchung an insgesamt 62 Männern und Frauen konnten Koelsch et al. (2003) mittels EKP erstmals Geschlechtsunterschiede in der Verarbeitung von Musik nachweisen. Die in eine harmonische Akkordfolge eingefügten Neapolitanischen Akkorde bzw. Halbton-Cluster führten bei Frauen zu einer bilateralen

Generierung der music-syntactic mismatch negativity (MMN), bei Männern dagegen zu einer überwiegend rechts-hemisphärisch ausgeprägten Aktivierung.

Die Magnetenzephalographie (MEG) ist ein neueres Verfahren, das die Ableitung der magnetischen Aktivität des Gehirns ermöglicht. Grundlage des Biomagnetismus sind homogen ausgerichtete Neuronenverbände, deren Aktivierungen sich durch postsynaptische Potenziale makroskopisch addieren und orthogonal zu den Stromquellen des EEG stehen (Boelmans und Meuth, 2003). Ein Vorteil des MEG gegenüber dem EEG ist die höhere räumliche Auflösung.

Gunji et al. (2003) präsentierten in einem Experiment 11 Probanden unterschiedliche Klänge, die von Streichinstrumenten bzw. der menschlichen Stimme (professionelle Sängern) erzeugt wurden. Es zeigte sich, dass die durch die menschliche Stimme hervorgerufene Aktivierung (sustained field, SF) bilateral stärker ausgeprägt war als die durch die instrumentalen Klänge evozierte. Dieses Ergebnis wird von den Autoren dahingehend interpretiert, dass die Verarbeitung der menschlichen Stimme (ohne phonologische Information) mit einer spezifischen Aktivierung der auditorischen Cortices in beiden Hemisphären einhergeht. Dies unterstreicht die besondere biologische Bedeutung humaner Laute für den Menschen.

Strukturelle bildgebende Verfahren

Unter die strukturellen bildgebenden Verfahren fallen Methoden, mit denen es möglich ist, das Gehirn in vivo abzubilden. Der Durchbruch auf diesem Gebiet wurde erst durch die Einführung computergestützter Verfahren Ende der 1960er Jahre erreicht. Während man bei konventionellen Röntgenaufnahmen etwa 20–30 Graustufen unterscheiden kann, entwickelten Cormack und Hounsfield eine Röntgen-Technik, mit der mehr als 200 Abstufungen ermöglicht wurden: die Computer-Tomographie (CT).

Bei der CT wird mittels Röntgenstrahlen eine Serie von Schnittbildern des Gehirns aufgenommen. Der Patient liegt mit seinem Kopf im zylindrischen Innenraum des Tomographen. Auf der einen Seite befindet sich eine Röntgenröhre, deren Strahlung den Kopf des Patienten durchdringt und auf der anderen Seite von einem Röntgendetektor aufgefangen wird. Der Detektor ist jedoch keine Fotoplatte wie beim konventionellen Röntgen, sondern ein Sensor, der mit einem Computer verbunden und weit empfindlicher ist. Röntgenröhre und Sensor drehen sich automatisch um den Kopf des Patienten. Alle Messergebnisse werden in den Computer eingespeist und dort zu einem CT-Scan verrechnet. Anschließend wird die Röhre entlang der Körperachse parallel verschoben und das Verfahren mehrmals wiederholt. Aus diesen Schnittbildern kombiniert der Computer dann ein mehrdimensionales Bild des Gehirns.

Die Magnetresonanztomographie (MRT) oder Kernspintomographie beruht auf den magnetischen Eigenschaften der Körpergewebe, die mit dem Kernspin der Wasserstoffatome zusammenhängen. Werden diese einem starken Magnetfeld ausgesetzt (ein Kernspintomograph ist letztendlich ein großer Magnet, dessen Anzie-

hungskraft tausendmal größer ist als das Magnetfeld der Erde), so verhalten sich die Atomkerne wie winzige Kompassnadeln und richten sich nach dem äußeren Magnetfeld aus. Durch Einstrahlung eines Hochfrequenzpulses – im Prinzip einer Radiowelle – wird die durch das permanente Magnetfeld bestehende Längsmagnetisierung in eine Quermagnetisierung umgewandelt. Die Atomkerne werden in ihrem Spin (einer Art Kreiselbewegung) gekippt. Wird dieser Hochfrequenzpuls wieder abgeschaltet, kippen die Atomkerne wieder in ihren Ausgangszustand zurück und senden nun selber eine elektromagnetische Welle aus. Diese Welle wird von Spulen im MR-Gerät gemessen und dient als Grundlage der Signaldetektion. Da die Dichte der Wasserstoffatome abhängig vom Gewebetyp unterschiedlich ist, entstehen Bilder mit unterschiedlichen Graustufen, die hochauflösende Abbildungen des Gehirns ermöglichen. Da das Verfahren auf der Reagibilität des Gewebes gegenüber wechselnder Magnetfelder beruht, kann der Einsatz von Röntgentechnik und der damit verbundenen Strahlenbelastung vermieden werden, was einen wesentlichen Vorteil für die Anwendbarkeit darstellt.

1995 konnten Schlaug et al. mittels MRT zeigen, dass Musiker (im Vergleich zu Nicht-Musikern) einen vergrößerten Balken (Corpus Callosum) aufweisen. Diese Untersuchung und spätere Befunde sprechen dafür, dass mit der ausgeprägteren Verbindung der beiden Hirnhälften auch eine verbesserte Integration der motorischen Fähigkeiten (z. B. beim Klavierspielen) einhergeht.

Zu den neueren Verfahren gehört das Diffusion Tensor Imaging (DTI), welches gleichfalls auf dem Prinzip der MR-Technik beruht. Es erlaubt die Darstellung von Nervenfaserverbindungen in der weißen Substanz im lebenden Gehirn.

Hierzu liegt bislang lediglich eine einzige Studie vor: Schmithorst und Wilke (2002) untersuchten mit DTI ebenfalls Musiker und Nicht-Musiker. Die gefundenen Veränderungen der Architektur der weißen Substanz (u. a. auch im vorderen Bereich des Corpus callosum) wurden dem musikalischen Training zugeschrieben.

Funktionelle bildgebende Verfahren

Im Gegensatz zu den strukturellen Verfahren, mit Hilfe derer sich anatomische Gehirnbilder erzeugen lassen, bieten die funktionellen Verfahren die Möglichkeit, dem Gehirn „bei der Arbeit zuzusehen“.

Zu den Methoden aus dem nuklearmedizinischen Bereich gehören die Positronen-Emissions-Tomographie (PET) sowie die Einzelphotonen-Emissionstomographie (SPECT).

Grundprinzip der PET ist die radioaktive Markierung von Sauerstoff oder Glukose, so dass sich die jeweilige Substanz gut verfolgen lässt. Als Marker wird in diesem Fall ein radioaktives Atom (Beta-Plus-Strahler) verwendet, das einen instabilen Kern enthält, der mit sehr hoher Geschwindigkeit Positronen aussendet. Positronen sind den Elektronen ähnliche Elementarteilchen, die sich von diesen darin unterscheiden, dass sie nicht negativ, sondern positiv geladen sind.

Der radioaktive Marker wird intravenös injiziert und gelangt mit dem Blutstrom ins Gehirn. Die ausgesandten Positronen stoßen mit Elektronen in anderen Molekülen im Gehirn zusammen. Die Elektronen und Positronen vernichten sich dabei gegenseitig – man sagt sie „zerstrahlen“ – und bilden zwei Photonen mit charakteristischer Energie (Gamma-Strahlung). Da diese hochenergetischen Gamma-Strahlen weite Strecken zurücklegen können, passieren sie problemlos die Schädeldecke und treffen anschließend auf Sensoren, aus deren Signalen ein Bild des arbeitenden Gehirns errechnet wird. Glukose bzw. Sauerstoff reichern sich vorwiegend in den Gehirnregionen mit dem aktuell höchsten Bedarf an – also dort, wo „am schwersten gearbeitet“ wird. Dies macht man sich zu Nutze, indem man die gewonnenen Bilder mit Aufnahmen aus dem Ruhezustand vergleicht. Daraus ergeben sich Hinweise, wo genau im Gehirn bei einer bestimmten Leistung oder einem definierten Erlebnis eine Aktivierung stattfindet.

Blood und Zatorre (2001) untersuchten 10 Musiker mit PET, während diese ein jeweils selbst ausgewähltes klassisches Musikstück hörten, das stark positiv konnotiert sein und beim Hören eine „Gänsehaut“ hervorrufen sollte (was in 77% der Fälle auch tatsächlich eintrat). Einen mit der Stärke dieser Emotionen assoziierten Durchblutungsanstieg fanden die Autoren in Gehirnarealen, die Teil des „Belohnungssystems“ darstellen, welches durch biologisch relevante Stimuli – wie Sex und Essen – oder auch Drogen aktiviert wird.

Die SPECT arbeitet nach einem ähnlichen Prinzip und wird am häufigsten für Rezeptorligandenstudien eingesetzt, welche z. B. Aussagen über die Verteilung von Rezeptoren in bestimmten Arealen des Gehirns erlauben.

In einer Einzelfallstudie untersuchten Genc et al. (2001) eine 48-jährige Patientin, die seit ihrem 32. Lebensjahr unter musikogenen epileptischen Anfällen litt. Darunter wird eine besondere Form der Epilepsie verstanden, bei der die Anfälle durch Musik ausgelöst werden. Außer einer CT und MRT wurde auch eine SPECT vor und während des Anfalls durchgeführt. In der SPECT-Untersuchung zeigte sich eine vermehrte Durchblutung im Bereich des rechten vorderen und medialen Schläfenlappens. Diese Ergebnisse unterstützen die Annahme, dass der rechte Schläfenlappen eine wichtige Rolle in der Musikverarbeitung spielt und dass mediale Strukturen in Bezug auf den affektiven Inhalt von Musik bei musikogener Epilepsie von Bedeutung sein könnten.

Die derzeit vielversprechendste Methode stellt die funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRI) dar. Diese macht sich die oben bereits erwähnten besonderen magnetischen Eigenschaften des Blutes zu Nutze. Vom roten Blutfarbstoff, dem Hämoglobin, ist bekannt, dass es abhängig vom Oxigenierungsgrad, also der Beladung mit Sauerstoff, seine Struktur ändert. Dies hat einen Einfluss auf seine magnetischen Eigenschaften. Mit Hilfe der MR-Technik können feinste Änderungen des magnetischen Feldes detektiert werden, wie sie beispielsweise abhängig vom Sauerstoffverbrauch in den betreffenden Hirnarealen verursacht werden. Somit kann das Blut als körpereigenes Kontrastmittel genutzt werden. Dieser Me-

chanismus wird als Blood-Oxygenation-Level-Dependent-Effect (BOLD-Effekt) bezeichnet. Mittels der fMRI ist es möglich, kognitive Funktionen und auch emotionale Prozesse des Gehirns mit einer räumlichen Auflösung im Bereich von einem Millimeter und einer zeitlichen Auflösung im Bereich von einer Sekunde zu kartieren.

In Science wurde 2002 eine fMRI-Studie veröffentlicht, in der Janata et al. eine Region im rostromedialen präfrontalen Kortex identifizieren konnten, in der die zwölf Dur- und Molltonarten selektiv repräsentiert sind. Herausgefunden hatten die Autoren dies, indem sie 8 Probanden im Kernspintomographen Melodien vorspielten, die systematisch durch alle Tonarten modulierten. Dieses Paradigma war, mit verschiedenen expliziten Aufgabenstellungen (z. B. Erkennen eines Klangwechsels (Flöte statt Klarinette)) verbunden, mehrfach wiederholt worden. Mittels einer Regressionsanalyse ließen sich die Areale isolieren, die spezifisch beim Wechsel in eine bestimmte Tonart aktiviert wurden. Die Repräsentation tonaler Strukturen scheint aber im Gegensatz z. B. zu visuellen Objekten topographisch nicht absolut, sondern dynamisch angelegt zu sein. Die Ergebnisse der Studie unterstützen Hinweise darauf, dass der mediale präfrontale Kortex eine wichtige Schnittstelle in der Verschaltung sensorischer, kognitiver und affektiver Informationen bei der Musikrezeption darstellt.

Wichtig ist dabei zu bedenken, dass es sich auch bei der fMRI nur um eine indirekte Darstellung von Hirnaktivierung handelt. Walter (2003, S. 67) schreibt dazu: „Die fMRT misst kein absolutes Signal, sondern nur relative Unterschiede. Die ‚Aktivitätskarten‘ des Gehirns sind in Wirklichkeit farbkodierte statistische Signifikanzkarten“.

„Fenster des Geistes“ und „Musik im Kopf“ – Implikationen für die Musiktherapie

Wenngleich die neurobiologische Forschung in der Musik(-therapie) noch immer am Anfang steht, kristallisieren sich doch allmählich bestimmte Konzepte heraus, die bei aller Vorsicht als Fundament für weiterführende Studien angenommen werden können. Es kann heute davon ausgegangen werden, dass es im Gehirn nicht ein „Musikzentrum“ gibt, sondern dass Musikrezeption und aktives Musizieren zum einen modular organisiert sind, und zum anderen sich überlappend auf verschiedenen Ebenen hierarchisch angeordnet sind (Altenmüller, 2003). Des Weiteren kann als wahrscheinlich gelten, dass – wie bei anderen komplexen Fähigkeiten (z. B. der Sprache) auch – umschriebene Hirnareale bzw. distinkte Verbindungen zwischen Neuronengruppen (Schleifen oder circuits) existieren, die spezifische Aufgaben innerhalb des „musikalischen Netzwerkes“ innehaben. Dieser Prozess der Spezialisierung spiegelt sich auch in der Lateralisierung von Hirnfunktionen wider (d. h. bei bestimmten Aufgaben lässt sich eine stärkere Aktivierung der einen oder anderen Hemisphäre finden).

Während das Konzept einer einfachen Links-Rechts-Dichotomisierung in Bezug auf Sprach- und Musikrepräsentation im Gehirn als überholt gelten darf, zeigt sich die Lateralisierung von umschriebenen Funktionen z. B. in der Verarbeitung von Tonhöhenänderungen (sequential pitch variations) in posterioren Bereichen des rechten oberen Temporallappens. Dagegen wurde für die Interpretation von Zeitstrukturen (metric interpretation) eine bilaterale Repräsentation im anterioren oberen Temporallappen gefunden (Liégeois-Chauvel et al., 1998).

Zudem scheint es so zu sein, dass individuelle Muster der Musikprozessierung in hohem Maße abhängig von den subjektiven Vorerfahrungen (z. B. der Lernbiographie) sind, wie Altenmüller et al. (1997) in einer EEG-Studie nachweisen konnten. Hüther (2004, S. 19) spricht in diesem Zusammenhang von „erfahrungsabhängiger Plastizität neuronaler Verschaltungen“.

Abschließend soll die Frage behandelt werden, inwiefern die Musiktherapie im Allgemeinen, aber auch der praktisch tätige Musiktherapeut im Besonderen, von den oben aufgeführten Verfahren bzw. von dem Wissen um diese profitieren kann. Nicht nur unter den Vorzeichen einer auf (Kosten-)Effizienz zielenden Gesundheitspolitik, sondern auch auf den Anspruch einer wissenschaftlich begründeten Therapieform bezogen, wird es für die Musiktherapie in Zukunft darum gehen, ein möglichst einheitliches Konzept zu Wirkungen und Nebenwirkungen, Indikationen und Kontraindikationen sowie Heilungschancen und Grenzen der musiktherapeutischen Behandlung vorzulegen und öffentlich zu vertreten. Damit kommen wir wieder zur eingangs von Johannes Kepler aufgeworfenen Frage: „Wie kann die Musik in eines anderen Menschen Leib wirken?“ oder moderner formuliert „Was wirkt wie?“. Die elektromagnetischen und bildgebenden Verfahren bieten eine Reihe vielversprechender Ansätze, der Beantwortung dieser Kernfrage für die Musiktherapie näher zu kommen. Daher möchte ich der „3-W-Frage“ eine „3-E-Antwort“ gegenüber stellen.

1. Evolution

Obwohl die Musiktherapie zusammen mit der verbalen Psychotherapie zu den ältesten psychosozialen Therapieformen gezählt werden darf, steckt sie als wissenschaftliche Disziplin noch immer in den Kinderschuhen. Die dafür angeführten Gründe sind so vielfältig wie widersprüchlich. Es wird dann eine Zukunft für die Musiktherapie (auch im deutschen Gesundheitswesen) geben, wenn sie sich einem „Evolutionprozess“ nicht verschließt. Dazu bedarf es einer Fort- und Weiterentwicklung in Praxis und Theorie. Insbesondere für den Bereich der Grundlagenforschung könnten neurowissenschaftliche Methoden einen entscheidenden Beitrag leisten.

2. Evidenz

Die Forderung nach einer „evidenz-basierten Musiktherapie“ würde wohl ähnlich wie in der Medizin zunächst eher Kopfschütteln und Stirnrunzeln verursachen. Andererseits muss die Erwartung (z. B. von Patientenseite) an den Therapeuten

legitim sein, dass dieser eine Vorstellung hat von dem, was er bei jenem „auslöst“. Und zwar nicht nur auf der Verhaltensebene, sondern auch auf neurobiologischer Ebene. Diese „Erkenntnis“ sollte nicht rein empirisch, sondern auch wissenschaftlich nachweisbar belegt sein.

3. Evaluation

Von zunehmender Wichtigkeit für den Stellenwert therapeutischer Verfahren stellt sich der Wirksamkeitsnachweis dar. Das bedeutet: eine Behandlungsmethode wird dann angewendet (und bezahlt) werden, wenn sie einer anderen in ihrem „outcome“ überlegen ist. Daran wird sich auch die Musiktherapie messen lassen müssen. Deshalb sind Evaluationsstudien im Bereich der Musiktherapie und Musikmedizin von höchster Priorität für die kommenden Jahre. Dass die Auswirkungen von Musik oder musiktherapeutischen Interventionen auf den einzelnen Patienten zum einen schwer zu objektivieren, zum anderen noch schwieriger zu validieren sind, wird niemand ernsthaft anzweifeln. Daher wird es notwendig sein, qualitative und quantitative Forschungsansätze in einer Weise zu verbinden, die es erlaubt, individuellen und musiktherapie-immanenten Besonderheiten ebenso Rechnung zu tragen wie psychologisch-medizinischen Forschungsstandards in der Psychotherapie-Evaluation.

Für Evolution, Evidenz und Evaluation von Praxis und Forschung in der Musiktherapie stellen die elektromagnetischen und bildgebenden Verfahren eine große Chance dar. Gerade die nicht-invasiven Methoden ermöglichen einen Blick durch die „Fenster des Geistes“ und bieten die Gelegenheit, der „Musik im Kopf“ und ihren Auswirkungen nachzuspüren. Diese Verfahren werden interdisziplinär eine immer größere Rolle nicht nur in der Grundlagenforschung, sondern in absehbarer Zukunft auch in Diagnostik, Therapieplanung und -evaluation und schließlich auch in der Prävention spielen. Zudem können einige Methoden auch selbst als therapeutische Verfahren eingesetzt werden (z. B. Transkranielle Magnetstimulation (TMS) oder auch Formen des EEG (z. B. Meister et al., 1999)).

Literatur:

- Altenmüller, E., Gruhn, W., Parlitz D. et al. (1997): Music learning produces changes in brain activation patterns: a longitudinal DC-EEG-study. *Int. J. Arts Med.* 5, 28–34
- Altenmüller, E. (2002): Musik im Kopf. *Gehirn & Geist* 1, 18–25
- Altenmüller, E. (2003): How many music centres are in the brain? In: Peretz, I., Zatorre, R. (Hg.): *The cognitive neuroscience of music*. New York
- Blood, A., Zatorre, R. (2001): Intensely pleasurable responses to music correlate with activity in brain regions implicated in reward and emotion. *PNAS* 98(20), 11818–11823
- Boelmans, K., Meuth, S. (2003): Bildgebung auf makroskopischer Ebene. In: Budde, T., Meuth, S. (Hg.): *Fragen und Antworten zu den Neurowissenschaften*. Bern
- Elbert, T., Pantev, C., Wienbruch, C., Rockstroh, B., Taub, E. (1995): Increased cortical representation of the fingers of the left hand in string players. *Science* 270 (5234), 305–7

- Field, T., Martinez, A., Nawrocki, T., Pickens, J., Fox, N., Schanberg, S. (1998): Music shifts frontal EEG in depressed adolescents. *Adolescence* 33(129), 109–116
- Genc, B. O., Genc, E., Tastekin, G., Iihan, N. (2001): Musicogenic epilepsy with ictal single photon emission computed tomography (SPECT): could these cases contribute to our knowledge of music processing? *Eur J Neurol* 8(2), 191–194
- Gunji, A., Koyama, S., Ishii, R., Levy, D., Okamoto, H., Kagigi, R. et al. (2003): Magnetoencephalographic study of the cortical activity elicited in human voice. *Neurosci Lett*, 348(1), 13–16
- Hüther, G. (2004): Ebenen salutogenetischer Wirkungen von Musik auf das Gehirn. *Musiktherapeutische Umschau* 25,1, 16–26
- Janata, P., Birk J. L., Van Horn, J. D., Leman, M., Tillmann, B., Bharucha, J. J. (2002): The cortical topography of tonal structures underlying western music. *Science* 298, 2167–70
- Koelsch, S., Maess, B., Grossmann, T., Friederici, A. (2003): Electric brain responses reveal gender differences in music processing. *Neuroreport* 14(5), 709–713
- Liégeois-Chauvel, C., Peretz, I., Babai, M., Laguitton, V., Chauvel, P. (1998): Contribution of different cortical areas in the temporal lobes to music processing. *Brain* 121, 1853–67
- Meister, M., Einsle, R., Brunner, J., Rhyner, K. (1999): Psychofonie – eine Neurophysiologische Klangtherapie bei Migräne. *Praxis* 88, 946–49
- Schlaug, G., Jancke, L., Huang, Y., Staiger, J., Steinmetz, H. (1995): Increased corpus callosum size in musicians. *Neuropsychologia* 33(8), 1047–1055
- Schmithorst, V., Wilke, M. (2002): Differences in white matter architecture between musicians and non-musicians: a diffusion tensor imaging study. *Neurosci Lett* 321(1–2), 57–60
- Spitzer, M. (2002): *Musik im Kopf*. Stuttgart
- Walter, H. (2003): Können Hirnforscher Gedanken lesen? *Psychologie heute* 30, 64–69

Dr. med. Thomas Stegemann, Im Tale 20, 20251 Hamburg, tstegemann@gmx.de