

Hirnelektrische Korrelate der cerebralen Musikverarbeitung beim Menschen

Eckart Altenmüller*

Abteilung Neurophysiologie der Universität Freiburg, Sonderforschungsbereich 70 „Hirnforschung und Sinnesphysiologie“, D-7800 Freiburg, Bundesrepublik Deutschland

Electrophysiological Correlates of Music Processing in the Human Brain

Summary. (1) Slow brain potentials were recorded during musical tasks in 60 healthy subjects (42 right-handers and 18 left-handers). In period I the tasks (pitch comparison or distinguishing of chords) were solved and in period II the results were written down. Eye movements and vocalizations were avoided. (2) Unilateral lateralizations of negative potentials, recorded in transversal leads between corresponding brain regions, were determined from a baseline measured in a 3 s pre-test period. Left-sided or right-sided lateralizations in frontal, precentral, parietal and temporal regions were taken as evidence for a stronger activation of the underlying cortical areas. (3) During period I, music tasks caused a right-sided lateralization in 53%, a left-sided one in 39% and no lateralization in 8% of the subjects. Language and calculation tasks, however, showed >80% left-sided lateralizations in the same subjects. In period II lateralizations appeared contralateral to the writing hand, mainly in pre-central leads. (4) The subjects ($N = 60$) were divided into 3 groups on the basis of their musical training: 20 non-musicians, 20 amateurs and 20 professional musicians were compared. A right-sided lateralization occurred more often in non-musicians and amateurs than in professionals. (5) Right-handers and left-handers had about equal right-sided lateralizations in musical tests. But in left-handers bilateral negativity without lateralization occurred more often and left-sided lateralization less often than in right-handers. (6) In 20 right-handers the passive experience or enjoyment of music was investigated. While only listening to music without tasks performance 8 subjects had a right-sided lateralization, 6 a left-sided one and 6 had bilateral negativity without lateralization. (7) We conclude that music processing, unlike language processing, is *not* dominant in one hemisphere. It is suggested that electrophysiological correlates of hemispheric lateralization during musical tests may depend on musical training and handedness, but statistical significance needs further investigations on more subjects.

Key words: Slow brain potentials – Lateralization – Music processing – Musical training – Hemispheric dominance

Zusammenfassung. Von 60 gesunden Probanden (42 Rechtshänder und 18 Linkshänder) wurden langsame Hirnpotentiale

bei Musikaufgaben in Periode I (Vergleich von Tonhöhen und Unterscheidung von Akkorden) und beim Schreiben der Ergebnisse in Periode II aufsummiert und gemittelt. (2) Einseitiges Überwiegen negativer Potentiale (Lateralisierung rechts oder links) wurde in Querableitungen zwischen korrespondierenden Hirnregionen frontal, präzentral, parietal und temporal links und rechts registriert. Die Lateralisierung wurde nach dem mittleren Potential einer Vorperiode von 3 s gemessen. Einseitige Lateralisierungen werden als hirnelektrische Korrelate vermehrter Aktivierung der darunter liegenden Rindenfelder gedeutet. (3) Bei *Musikaufgaben* der Periode I zeigten 53% der Probanden vorwiegende Rechtslateralisation, 39% Linkslateralisation und 8% keine Seitendifferenz. Sprach- und Rechenaufgaben machten bei den gleichen Probanden über 80% Linkslateralisation. In der Schreibperiode II war die Lateralisierung jeweils kontralateral zur schreibenden Hand und maximal über der motorischen Handregion. (4) Nach ihrer Musikausbildung wurden drei Gruppen unterschieden: 20 *Musiklaien*, 20 *Musikamateure* und 20 *Berufsmusiker*. Musiklaien und Musikamateure zeigten häufigere Rechtslateralisierung als Berufsmusiker. (5) Rechtshänder und Linkshänder hatten mit 51 und 56% etwa gleichhäufige Rechtslateralisation bei analytischen Musiktests. Doch waren bei den Linkshändern bilateral gleiche Potentiale häufiger und Linkslateralisation seltener als bei Rechtshändern. (6) Bei 20 Rechtshändern wurde das passive, gefühlsbetonte *Musikhören* ohne Testaufgabe untersucht. Dabei hatten nur 8 Probanden eine Rechtslateralisation, 6 eine Linkslateralisation und 6 keine Seitendifferenz. (7) Im Gegensatz zur Linksdominanz der Sprache ist Musikverarbeitung *keine* konstante Dominanzfunktion einer Großhirnseite. Es wird angenommen, daß die hirnelektrische Großhirnlateralisierung bei analytischen Musikaufgaben von der Musikausbildung und der Händigkeit beeinflußt werden kann. Doch sind die Unterschiede der drei Ausbildungsgruppen noch nicht statistisch signifikant und an größeren Probandenzahlen zu kontrollieren.

Schlüsselwörter: Langsame Hirnpotentiale – Lateralisation – Musikverarbeitung – Musikausbildung – Großhirndominanz

Einleitung

Die Aufsummierung langsamer Hirnpotentiale über beiden Großhirnhemisphären ergab bei Sprach- und Rechenaufgaben ein Linksüberwiegen negativer Potentiale [3, 20–22]. Dies wurde als elektrophysiologisches Korrelat der bekannten

* *Sonderdruckanforderung* an die gegenwärtige Adresse: Neurologische Universitätsklinik, Liebermeisterstrasse 18–20, D-7400 Tübingen, Bundesrepublik Deutschland

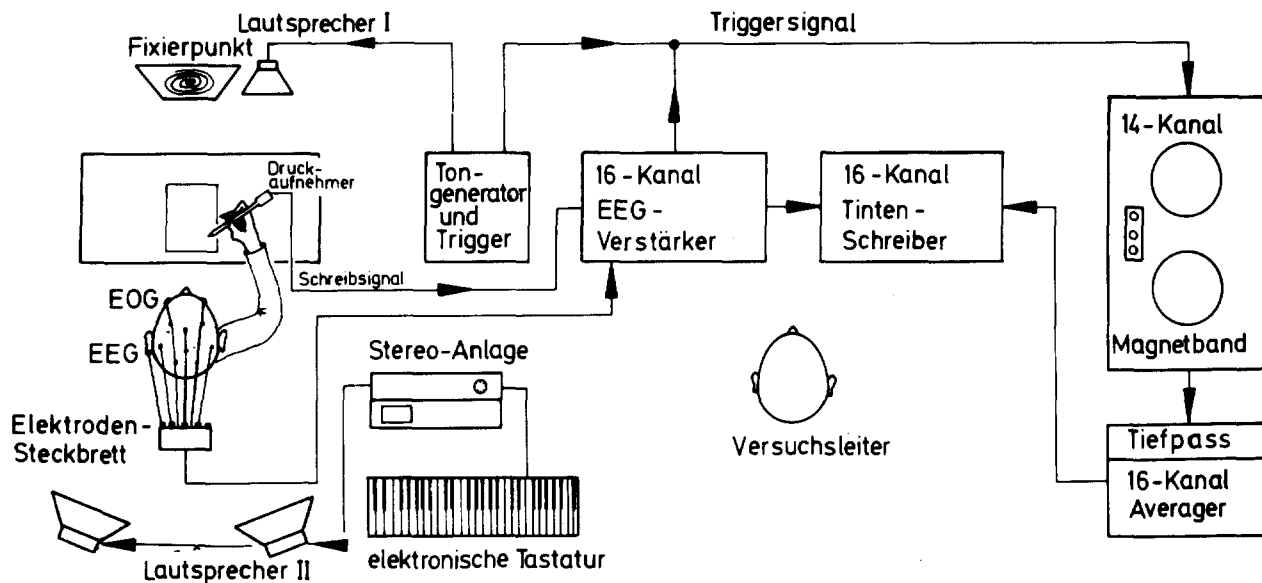


Abb. 1. Methodik und Versuchsaufbau der hirnelektrischen Musikuntersuchungen. Bei allen Probanden wurde das EEG von etwa 18 Kopfhaut-elektroden mit 7 Querableitungen symmetrischer Hirnregionen mit EOG und Schreibdruckkurve zum Eingang eines 16 Kanal EEG-Verstärkers geleitet. Die Meßdaten wurden auf einem 14 Kanal Magnetband gespeichert und On-line einem 16 Kanal Averager eingegeben. Parallel dazu registrierte ein 16 Kanal Tintenschreiber (Mingograph), die EEG-, EOG-, GHR-, Atmungs- und Schreibdruckkurven (Abb. 2) die so vom Versuchsleiter überwacht wurden. Nach Triggerung einer Vorperiode mit Fixation ohne Reiz wurden die Musikaufgaben nach dem akustischen Start-signal (Lautsprecher I) mit einer elektronischen Tastatur gespielt und durch zwei schräg hinter dem Probanden angebrachte Lautsprecher (II) dargeboten. Alle Ableitungen wurden von der Vorperiode bis Ende der Periode II aufsummiert. Nach jeder Serie von 15 oder 30 Reizen wurde die gemittelte Summationskurve wieder durch den Tintenschreiber aufgezeichnet (Abb. 3–7)

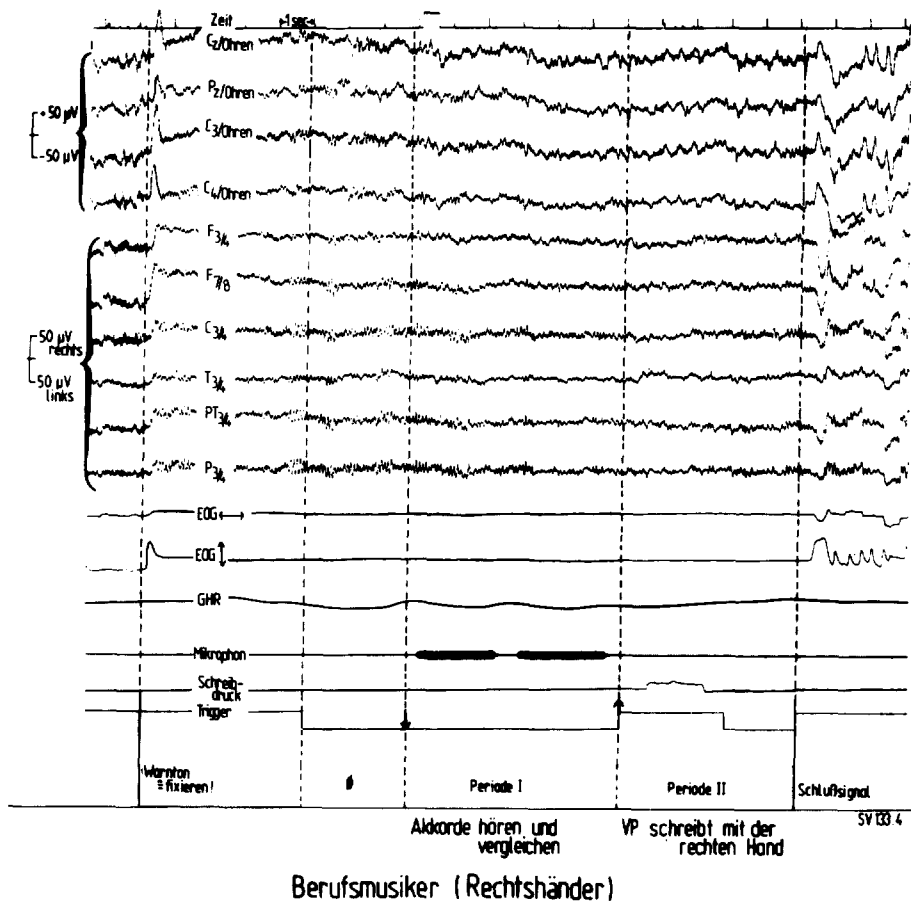


Abb. 2. Polygraphische Registrierung eines Musikexperiments (Akkordunterscheidung) bei einem 25jährigen, rechtshändigen Berufsmusiker (gleicher Versuch wie in Abb. 5C). Vier EEG-Ableitungen „unipolar“ gegen beide Ohren, 6 bipolare Querableitungen zwischen symmetrischen Hirnregionen links und rechts, horizontales (\leftrightarrow) und vertikales (\updownarrow) Elektrooculogramm, galvanischer Hautreflex (GHR), Mikrophon, Schreibdruck und Triggersignal werden registriert. Zur Schaltungsvereinfachung sind in den unipolaren Referenzableitungen gegen beide Ohren Oberflächennegativität und in den Querableitungen Linksüberwiegen der Oberflächennegativität nach unten gerichtet, umgekehrt zu den aufsummierten Kurven der Abb. 3–7. Nach dem Warnton entsteht ein Lidschlag und eine kleine horizontale Blickbewegung zum Fixierpunkt. Bei stabiler Grundlinie des EEG wird nach 4,8 s das Triggersignal zur Aufsummierung ausgelöst. Nach der Vorperiode von 3 s (\oslash) wird ein Signalton (\downarrow) für die Höraufgabe in Periode I gegeben. In Periode II schreibt die Versuchsperson nach einem weiteren Signalton (\uparrow) das Ergebnis auf. Nach dem Schlußsignal sind Lidschläge und horizontale Augenbewegungen wieder erlaubt. Beim Hören des zweiten Akkordes und der Vergleichsaufgabe kommt es zur Oberflächennegativierung in den Referenzableitungen, in den posterioren Querableitungen zur Desynchronisation des Alpharhythmus

Sprachdominanz der linken Großhirnhemisphäre bei Rechtshändern [3, 20] und Linkshändern [23] gedeutet. Eine hirnelektrische Dominanz der rechten Hemisphäre fanden wir dagegen in vorläufigen Untersuchungen bei Raumorientierung [2, 26] und Musikleistungen [1, 2]. Die rechtsseitige Dominanz der Musikverarbeitung, die klinisch aufgrund von Hirnläsionen mit Amusien [16, 24, 42] diskutiert wird, ist noch umstritten.

Wir haben daher versucht, mit hirnelektrischen Methoden bei Gesunden eine Rechtsdominanz bei Musikaufgaben nachzuweisen. Hirnmetabolische Befunde mit der Sokoloff-Methode (Mazziotta und Mitarbeiter [31]) und Hirndurchblutungsmessungen (Ingvar und Mitarbeiter [19, 32, 33]) hatten bereits auf vorwiegend rechtsseitige Aktivierungen frontaler und temporaler Hirnregionen bei Musikverarbeitung hingewiesen. Mazziotta fand seitenverschiedene Befunde bei musikalischen Laien und Berufsmusikern [31] und Ergebnisse dichotischer Hörtests [5] und der Alpha-Asymmetrie im EEG [17] sprechen auch für eine Abhängigkeit der Lateralisierung vom musikalischen Ausbildungsgrad der Versuchspersonen.

Die langsamen Hirnpotentiale oberflächennaher Cortexregionen wurden im Seitenvergleich bei 60 gesunden Probanden unterschiedlicher musikalischer Vorbildung mit Musiktests

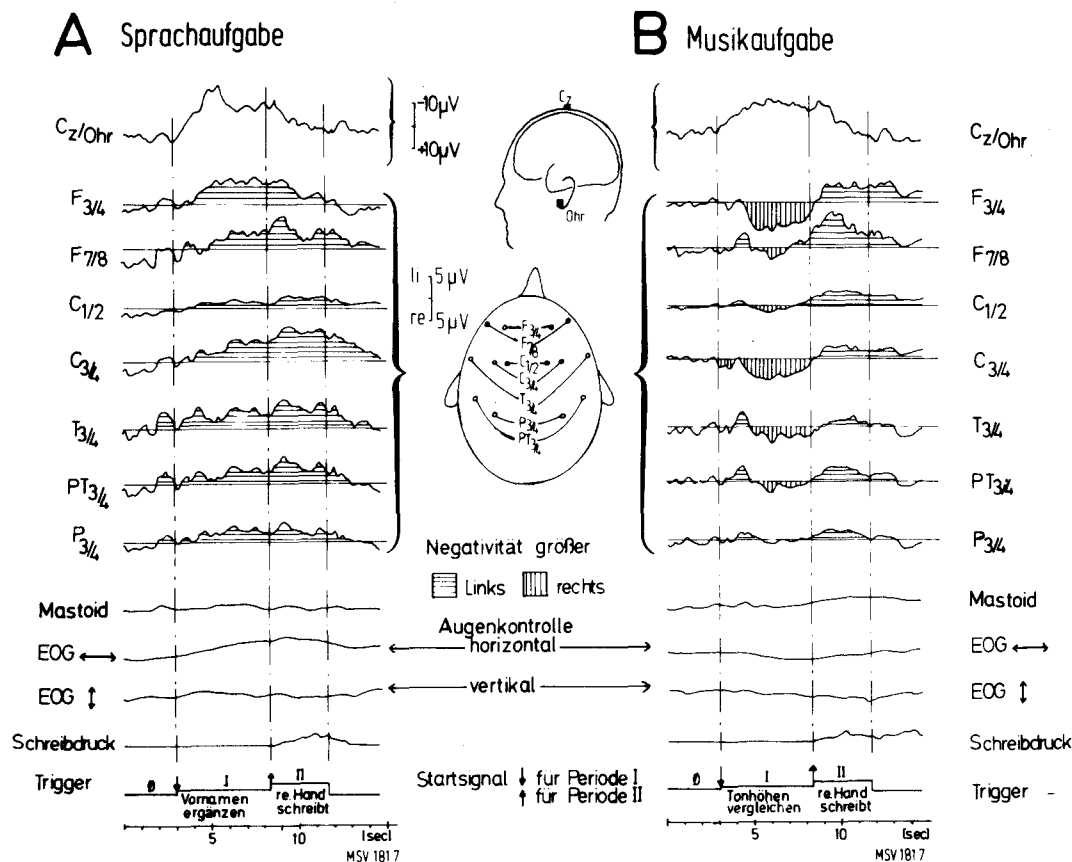
untersucht. Je 20 waren Musiklaien, Musikamateure oder Berufsmusiker. Die aufsummierten langsamen Hirnpotentiale über beiden Großhirnseiten bei verschiedenen Musikaufgaben wurden mit der Lokalisation bei Sprach- oder Rechenaufgaben verglichen.

Methodik und Versuchspersonen

Über ein 16-Kanal-EEG-Gerät (Mingograph, Siemens) wurden EEG, horizontale und vertikale Augenbewegungen, Atmung, galvanischer Hautreflex, Schreibdruck und Triggersignal registriert, zusätzlich auf Magnetband gespeichert und durch Averager summiert und gemittelt (Abb. 1). Die in früheren Arbeiten [20, 21] beschriebenen 2 Testperioden der Aufgabenlösung (I) und des Aufschreibens der Resultate (II) wurden durch eine 3 s dauernde Vorperiode mit Blickfixation ergänzt (Abb. 2–7).

EEG-Ableitungen

Langsame Hirnpotentiale wurden von 14–18 gesinterten AgCl/Ag-Oberflächenelektroden auf der Kopfhaut mit langer



Musiklaie (Rechtshänderin)

Abb. 3A, B. Hirnelektrische Lateralisierung beim Sprachtest (A) und Musiktest (B) eines rechtshändigen Musiklaien. Die aufsummierten und gemittelten Kurven einer 26jährigen Rechtshänderin ohne Musikkennntnisse zeigen bei randomisiert gemischt gegebenen Sprach- und Musikaufgaben deutliche Linkslateralisierung aller Querableitungen beim Wortergänzen (A). Beim Tonhöhenvergleich (B) kommt es am stärksten frontal und zentral zur Rechtslateralisierung. In (A) wird die Linkslateralisierung beim Wortschreiben mit der rechten Hand in Periode II größer, vor allem über der motorischen Zentralregion. In (B) invertiert die Rechtslateralisierung beim Tonhöhenvergleich der Periode I zur Linkslateralisierung in der Schreibperiode II. Die unipolare Ableitung Cz/Ohr zeigt in (A) größere oberflächennegative Potentiale in der ersten Hälfte der Sprachaufgabe, in (B) dagegen kommt es erst in der zweiten Hälfte der Musikaufgabe der Periode I, wenn der letzte Ton der Tonfolge mit dem ersten verglichen werden muß, zur höchsten Oberflächennegativität

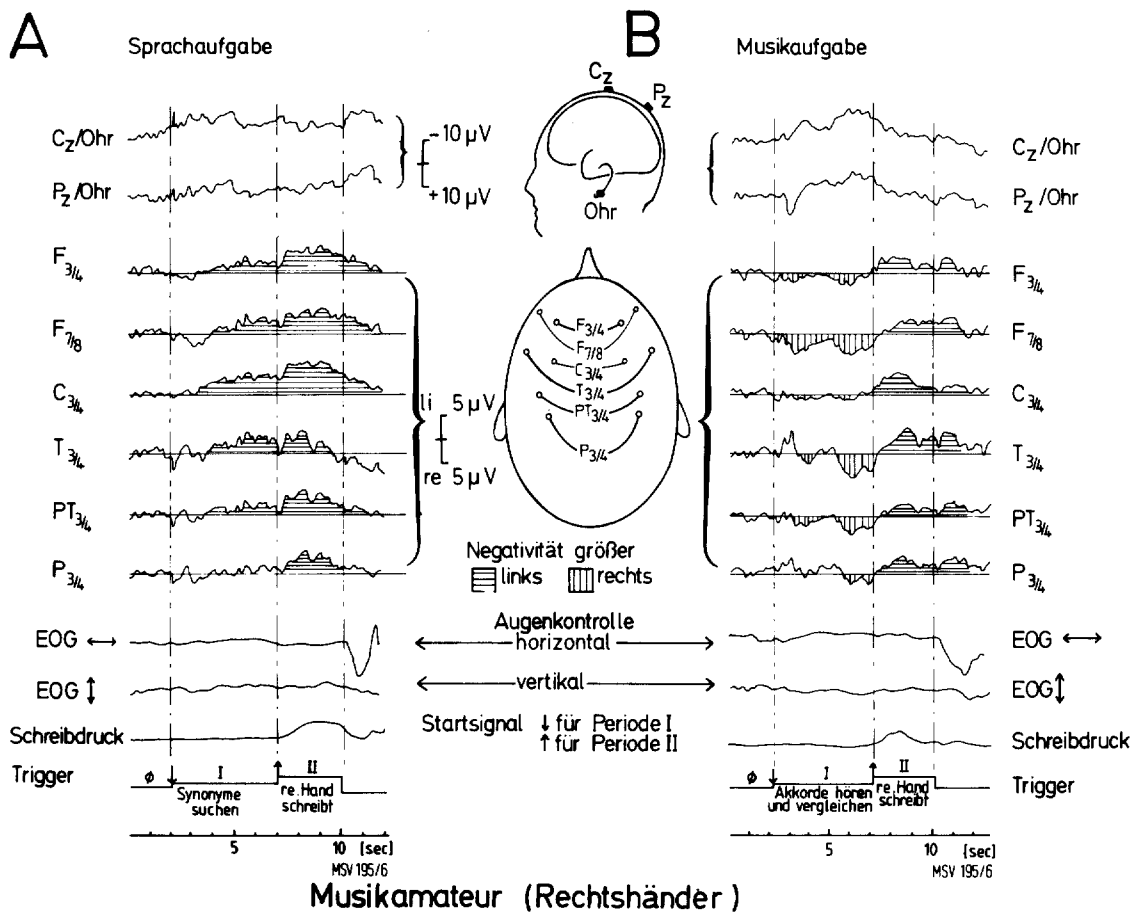


Abb. 4A, B. Gegensätzliche Lateralisierungen bei Sprachaufgaben und Musikanalysen eines Musikamateurs (27-jähriger klavierspielender Rechtshänder). **(A)** Bei der Sprachaufgabe I entstehen Linkslateralisationen vor allem frontal, zentral und temporal. Beim Schreiben mit der rechten Hand wird die Linkslateralisierung größer und zeigt ein Maximum über der Zentralregion. **(B)** Beim Akkordvergleich entsteht frontal, temporal und parietotemporal eine Rechtslateralisation, die sich in der zweiten Hälfte der Periode I, beim Hören und Vergleichen des zweiten Akkords noch verstärkt. Die Schreibpotentiale der Periode II sind kleiner als die Musikpotentiale der Periode I. In den Mittellinien-Ableitungen präzentral (Cz) und parietal (Pz) gegen Ohr erscheinen nach den Startsignalen akustisch evozierte Potentiale. Danach folgt in **A** eine leichte Negativierung, in **B** nach etwa 300 ms eine in Pz größere Positivierung von 1 s Dauer, die einer P 300 entspricht [38, 39]. Erst danach kommt es zur Oberflächennegativierung

Zeitkonstante ($\Delta t = 5$ s) oder Gleichspannungsverstärkern registriert. Der Übergangswiderstand unter jeder Elektrode wurde durch Abreiben und Entfetten der Haut auf 1,5–3 k Ω vermindert. Gleichspannungsregistrierungen mit Potentialverschiebungen von > 100 μ V/min wurden auf einen RC-Verstärker mit langer Zeitkonstante geschaltet.

Die Elektrodenlagen (10/20 System) hatten folgende Schaltungen:

a) *Referenzableitungen* „unipolar“ [40] von der Schädelkonvexität (meistens Mittellinie Cz) gegen 2 gemeinsame basale Elektroden an beiden Ohren mit Zwischenwiderstand von 2 k Ω hinter jeder Ohrelektrode. Negative Potentiale der Konvexitätslektrode gegenüber den Ohrelektroden waren in den aufsummierten Kurven nach oben gerichtet (Abb. 3–6).

b) *Querableitungen transversal bilateral* zwischen symmetrischen Hirnregionen links und rechts, um die relative Lateralisation negativer Potentiale darzustellen: F3/F4, F7/F8, C3/C4, T3/T4, PT3/PT4 und P3/P4. Die summierten Kurven der transversalen Querableitungen wurden so gepolt, daß links größere Oberflächennegativität nach oben, rechts größere Oberflächennegativität nach unten gerichtet ist (Abb. 3–7). Negative Potentialverschiebungen – über der Mittellinie =

Linkslateralisierung, unter der Mittellinie = Rechtslateralisierung – nach links wurden horizontal, nach rechts vertikal schraffiert. Als Mittellinie galt das Potentialniveau der Vorperiode von 3 s mit gleicher Blickfixation wie bei der folgenden Aufgabenstellung.

Artefaktkontrolle

Extracerebrale Potentialschwankungen durch Augenbewegungen, Zungenbewegungen, Atmung und galvanische Hautreflexe wurden registriert und als Störung eliminiert.

EOG

Die horizontalen Blickbewegungen wurden bitemporal durch zwei Schläfenelektroden, die vertikalen durch zwei Elektroden über und unter einem Auge registriert.

Atmung

Die Registrierung durch einen den Thorax umspannenden Dehnungsmeßstreifen zeigte ohne Vokalisation keine At-

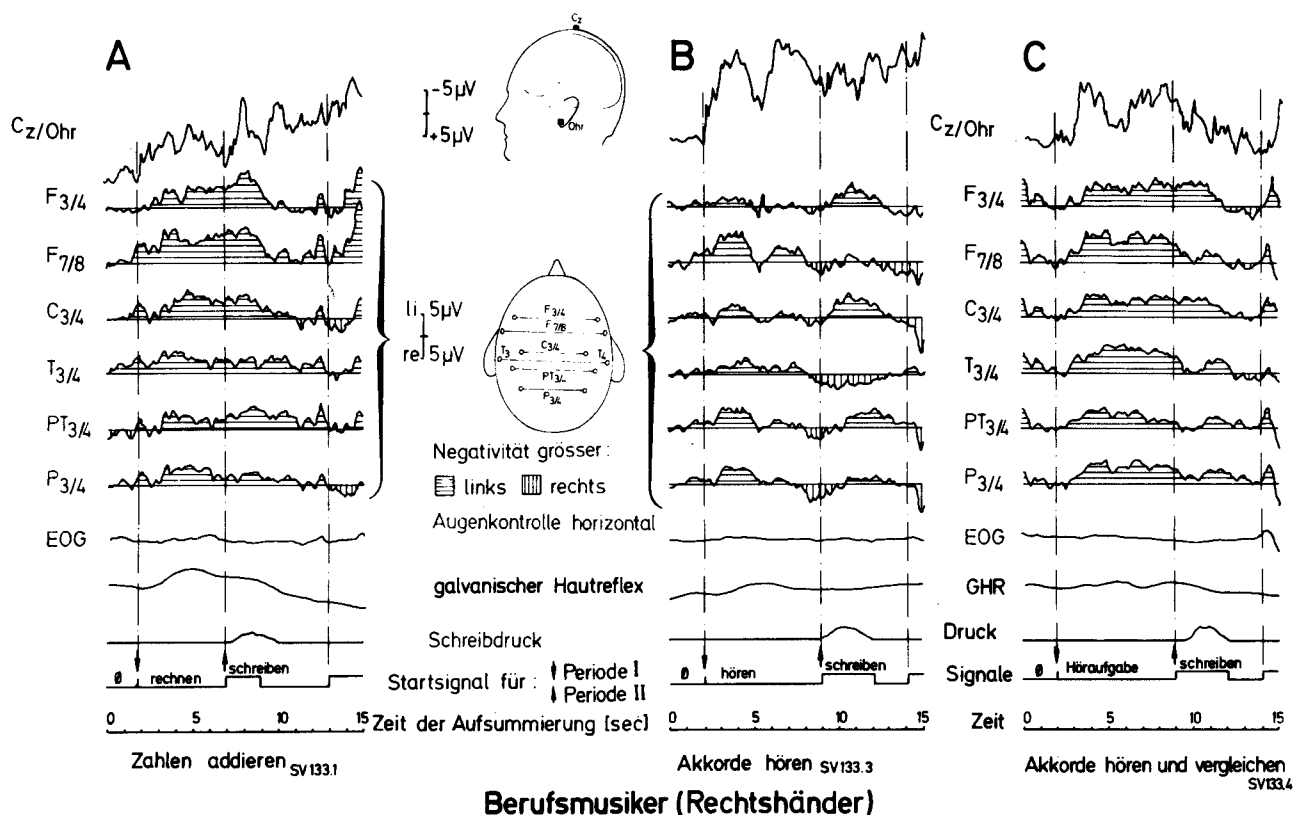


Abb. 5A–C. Linkslateralisierung bei Rechenaufgaben (A) und Musikaufgaben (B, C) eines Berufsmusikers (25-jähriger, Oboe spielender Rechtshänder). (A) Beim Rechnen entsteht in Periode I eine starke Linkslateralisation, die in Periode II beim Schreiben der Resultate frontal etwas größer wird. (B) Bei der Kontrollbedingung – Akkordhören ohne Vergleichsaufgabe – entsteht eine kürzere Linkslateralisation mit großen negativen Vertexpotentialen in Cz/Ohr. (C) Beim Akkordhören mit Vergleichsaufgabe sind die Linkslateralisationen in allen Querableitungen von frontal bis parietal länger. In Periode II fehlt die Linkslateralisation beim Schreiben, nur fronto-basal (F7/8) und temporal (T3/4) entsteht eine leichte Rechtslateralisation. Die negativen Scheitelpotentiale (Referenzableitung Cz gegen Ohr) sind am größten in B und haben einen zweigipfligen Verlauf entsprechend dem Hören der beiden Akkorde

mungsartefakte in der EEG-Registrierung. Atmungsabflachung oder Atmungsstopp waren vereinzelt zu Beginn der Versuchsserie zu registrieren. Verwertbare Korrelationen der summierten Atmungskurve mit den langsamen Hirnpotentialen waren nicht erkennbar.

GHR

Der galvanische Hautreflex an der Hand zeigte bei einigen Probanden vor allem bei emotional gefärbter passiver Musikrezeption höhere Potentiale. Solche Probanden wurden von der Versuchsserie ausgeschlossen. Bei anderen Aufgaben waren galvanische Hautreflexe selten und nach den ersten Durchgängen nicht mehr registrierbar.

Zungen-Artefakte konnten durch Vermeiden von Vokalisation und Zungenbewegungen bei leicht geöffnetem Mund vermieden werden.

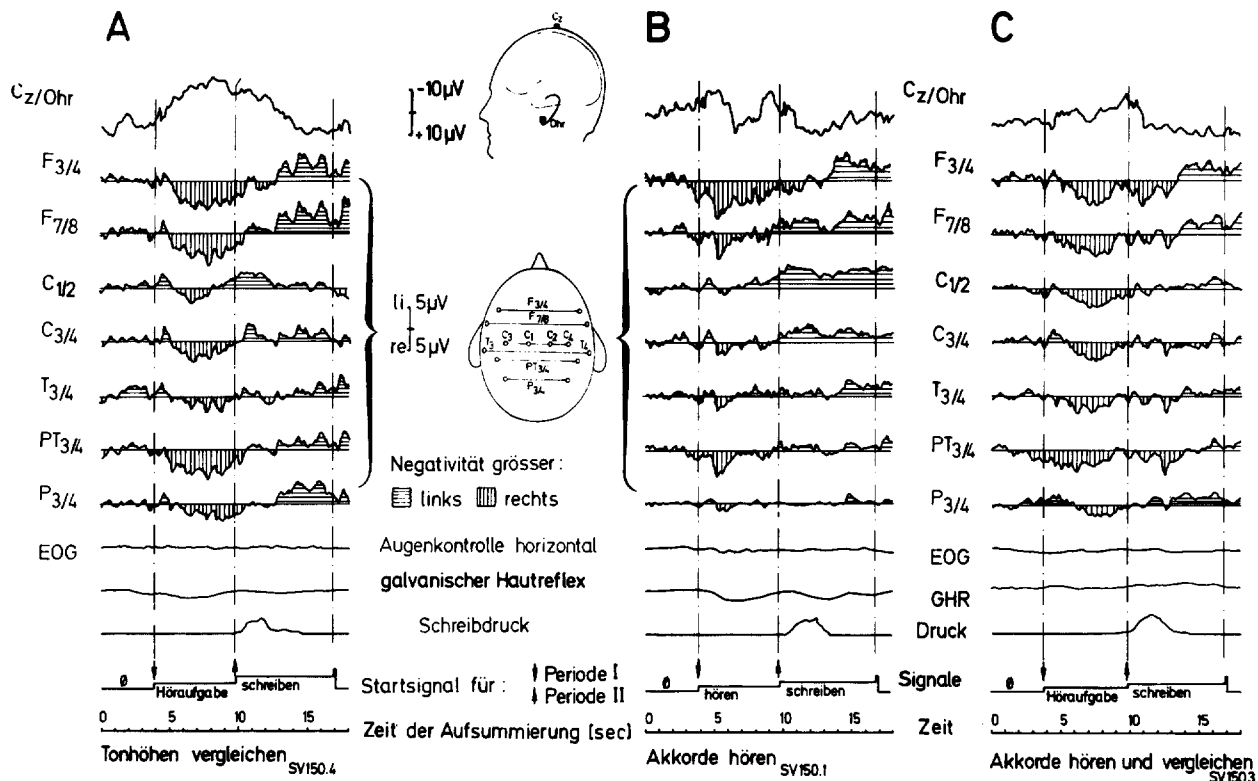
Summierung und Auswertung langsamer Hirnpotentiale

In der Regel wurden 10 EEG-Ableitungen mit den horizontalen und vertikalen EOG, Schreibdruck und Triggersignal, dazu entweder GHR oder Atmung durch einen 16-Kanal-Averager (WLD-Zeittechnik Freiburg) summiert und gemittelt. Die Eingangsspannung betrug ± 5 V. Die Meßzeit der

Einzeltrials (dwell-time) war 12–25 s. Es wurden jeweils 15, gelegentlich 30 Aufgaben summiert und gemittelt. Das gemittelte Potential wurde anschließend mit dem Schreibsystem des Mingographen ausgezeichnet. Die Abbildungen 3–7 zeigten typische Ergebnisse der Mittelung. Zur besseren Darstellung wurde zwischen Verstärkerausgang und Averager ein Hochfrequenzfilter eingeschaltet (obere Grenzfrequenz 8 Hz). Die summierten Kurven wurden so geglättet und hochfrequente evozierte Potentiale unterdrückt. Alle Daten wurden ungefiltert auf ein 14-Kanal-Magnetband (Ampex FR 1300) für weitere Auswertungen gespeichert (Erstellung von Grand-averages, Abb. 7). Einzelaufgaben, die Artefakte (Blickbewegungen, Zinkern, GHR oder mechanische Störungen) enthielten wurden verworfen und nicht aufsummiert.

Lateralisationskriterium

Seitendifferenzen der langsamen Hirnpotentiale wurden nur bei > 2 s dauerndem Seitenüberwiegen von $2\text{--}10\text{ }\mu\text{V}$ als gesichert akzeptiert. Seitendifferenzen $< 2\text{ }\mu\text{V}$ und geringe Seitenunterschiede von einer oder zwei Querableitungen galten als bilaterale Aktivität ohne Lateralisation. Rechts- oder linksseitige Lateralisation wurde daher nur bei sicherem Seitenüberwiegen ($> 2\text{ }\mu\text{V}$ über > 2 sec) über mindestens drei Hirnregionen in einer Versuchsserie angenommen.



Berufsmusiker (rechtsschreibender Linkshänder)

Abb. 6A–C. Rechtslateralisierung bei drei Musiktests eines linkshändigen, ausgebildeten Musikers. Der 28jährige Linkshänder, der Querflöte spielt und rechts schreibt, zeigt in der Kontrollperiode vor den Aufgaben ein stabiles Mittelniveau aller Querableitungen. In den Mittellinienableitungen (Cz gegen Ohr) der Vorperiode entstehen leichte Negativierungen, die den Erwartungspotentialen Walters [41] entsprechen. (A) Beim Tonhöhenvergleich entsteht deutliche Rechtslateralisation vorwiegend frontal und parieto-temporal. (B) Beim einfachen Hören der beiden Akkorde ohne Vergleichsaufgabe entsteht nur frontal eine lokale Rechtslateralisation. (C) Bei der Musikanalyse mit Akkordunterscheidung ist die Rechtslateralisation ausgedehnter als beim Musikhören (B) und ähnlich dem Tonhöhenvergleich (A). In Periode II entsteht beim Schreiben rechts nur präzentral (C3/4) eine geringe Linkslateralisierung

Probanden

Versuchspersonen waren 60 gesunde Erwachsene (s. Tabelle 1). Die Händigkeit wurde in einem Fragebogen nach Anamnese und Handgeschicklichkeit beurteilt.

Je nach musikalischer Vorbildung wurden drei Gruppen unterschieden:

- (1) 20 *Musiklaien*, die nie ein Instrument gespielt, nie im Chor gesungen und keine Gehörschulung mitgemacht haben.
- (2) 20 *Musikamateure*, die Instrumente spielen oder im Chor singen.
- (3) 20 *ausgebildete Musiker* (Berufsmusiker und Musikstudenten), die mindestens ein Musikinstrument sehr gut beherrschen und zusätzlich eine Spezialausbildung in Gehörschulung besitzen.

Versuchsaufgaben

Die Lateralisierung langsamer Hirnpotentiale beim analytischen Hören wurden mit zwei standardisierten Musikaufgaben untersucht und bei den gleichen Probanden mit Rechenaufgaben (Addieren zweistelliger Zahlen) oder Sprachaufgaben verglichen. Eine dritte Musikuntersuchung war passives Hören von Orchestermusik ohne Analyse.

- (1) *Tonhöhenunterscheidung in einer Tonfolge.* Beim Hören einer Tonfolge von 8–16 Tönen sollte der Proband in Periode

Tabelle 1. Die Probanden, gruppiert nach Musikausbildung und Händigkeit. Die drei Gruppen sind für Anzahl und Alter gleich, doch für Händigkeit und Geschlecht verschieden

Versuchspersonen				
	<i>n</i>	♂	♀	Ø Alter
<i>Gesamt</i>	60	25	35	26 Jahre
Rechtshänder	42	16	26	26 Jahre
Linkshänder	18	9	9	27 Jahre
<i>Musiklaien</i>	20	5	15	24 Jahre
Rechtshänder	16	4	12	26 Jahre
Linkshänder	4	1	3	22 Jahre
<i>Musikamateure</i>	20	9	11	29 Jahre
Rechtshänder	10	4	6	26 Jahre
Linkshänder	10	5	5	32 Jahre
<i>Berufsmusiker</i>	20	11	9	26 Jahre
Rechtshänder	16	8	8	25 Jahre
Linkshänder	4	3	1	27 Jahre

I erkennen, ob der letzte Ton höher, tiefer oder gleich hoch wie der erste Ton der Folge war. In der Schreibperiode II schrieb der Proband die Worte „hoch“, „tief“ oder „gleich“. Diese Aufgaben wurden im Schwierigkeitsgrad entsprechend

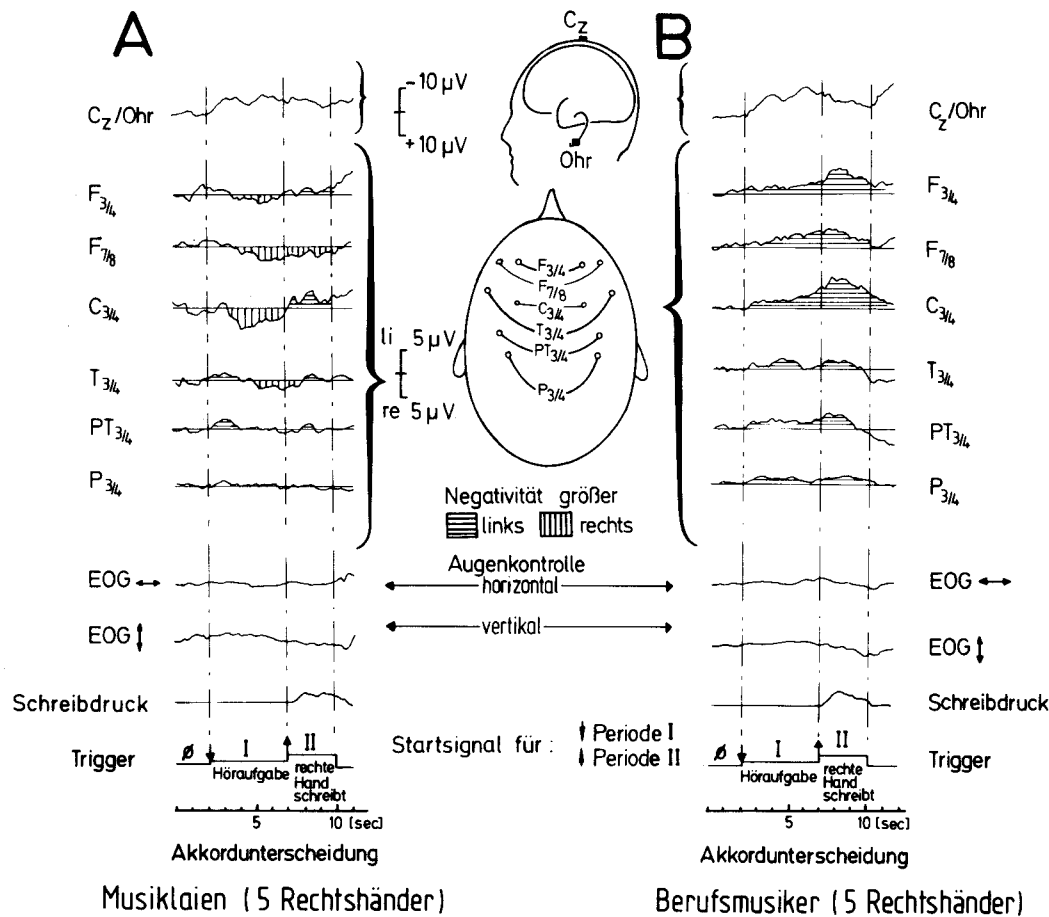


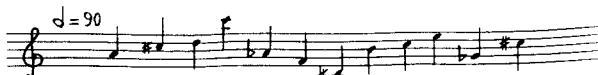
Abb. 7. Rechtslateralisierung bei 5 Musiklaien und Linkslateralisierung bei 5 Berufsmusikern im Akkordunterscheidungstest. Beim „grand average“ von je 5 rechtshändigen Musiklaien und Berufsmusikern erkennt man bei den Laien die *Rechtslateralisierung* am besten fronto-basal (F7/8) und zentral (C3/4). Umgekehrt entsteht bei den Berufsmusikern in den Ableitungen die deutlichste *Linkslateralisierung*. In der Schreibperiode II zeigen beide Gruppen höhere Linkslateralisierungen über der Zentralregion (C3/4). Die Referenzableitungen Cz/Ohr zeigen beim Hören der Akkorde zwei negative Gipfel in Periode I. Beim Vergleichen der beiden Akkorde ist die Oberflächennegativierung bei den Berufsmusikern etwas stärker ausgeprägt

dem Ergebnis eines vor der Registrierung durchgeführten Gehörtests so variiert, daß die Versuchspersonen nur bei genauem Hinhören die Aufgaben richtig lösen konnten. Die folgenden Notenbeispiele zeigen je eine leichte, mittelschwere und schwere Versuchsaufgabe:

leicht:



mittelschwer:



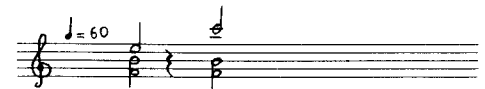
schwer:



(2) *Akkordunterscheidung*. Zwei aus drei Tönen gebildete Akkorde sollten in Periode I verglichen werden. Im zweiten Akkord wird einer der drei Töne des ersten Akkords verändert. Die Probanden sollten erkennen, ob der obere, mittlere oder untere Ton verändert worden war. Zwischen beiden Ak-

korden bestand eine kurze Pause von etwa 1 s, wie die Mikrofonkurve der Abb. 2 zeigt. In Periode II schrieb die Versuchsperson „unten“, „mitte“, „oben“ entsprechend dem veränderten Ton. Auch dieser Aufgabentyp wurde im Schwierigkeitsgrad der Feinheit des Gehörs der Probanden angepaßt.

leicht:



mittelschwer:



schwer:



Beide Höraufgaben wurden auf einer elektronischen Orgel (Eigenbau der Werkstatt von Brenneisen) vom Versuchsleiter gespielt und über zwei, schräg hinter der Versuchsperson angebrachte Lautsprecher (Abb. 1) mit einer Lautstärke von 70–76 dBA binaural dargeboten. Die Einzeltöne wurden nicht als Sinusschwingungen, sondern rechteckförmig frequenzgeneriert.

(3) *Einfaches Musikhören.* Passives, gefühlsbetontes Musikhören verlangte eine längere Dauer der Periode I und daher war auch die Blickfixation schwieriger. Die Reizdauer der Periode I war mit 14–18 s dreifach länger als bei den Aufgaben 1 und 2. Nur Probanden, die gleichzeitig der Musik zuhören, sich gefühlsmäßig auf sie einstellen und dabei entspannt fixieren konnten, waren für diese Versuchsserie geeignet.

Es wurden rhythmisch wenig profilierte langsame Passagen aus der Tannhäuser-Overtüre von Richard Wagner und aus dem Nocturne für Orchester „Sirènes“ von Claude Debussy von Tonband stereophonisch vorgespielt. Der Schalldruckpegel schwankte während der Musikdarbietung zwischen 72 und 80 dBA. Alle Probanden hörten diese Musikausschnitte gern. In Periode II zeichneten die Versuchspersonen nach Ende des Orchestermusikhörens nur 2 Kreuze mit der rechten Hand.

Triggersignale

Die Auslösereize für Blickfixation, Aufgabenbeginn und Aufgabende waren 4 kurze Pieptöne, die über den Lautsprecher I (Abb. 1) gegeben wurden.

Ton 1. Warnton für Beginn der Fixation und Lidschlagunterdrückung.

Ton 2. Auslösereiz für Beginn der Musikaufgabe von Periode I. Die Summation beginnt schon 3 s vor der Aufgabe, um ein „Mittelniveau“ zu erhalten.

Ton 3. Auslösereiz für das Aufschreiben des Ergebnisses in Periode II.

Ton 4. Schlußsignal zur Erlaubnis erneuter Augenbewegungen am Ende der Summierungszeit (Abb. 2).

Das Zeitintervall zwischen dem 1. Warnsignal und Beginn der Aufsummierung wurde vom Versuchsleiter je nach Stabilität der EEG-Registrierung gewählt und variiert meist zwischen 3 und 11 s. Das Zeitintervall zwischen dem 2., 3. und 4. Ton war konstant. Die gesamte Summationszeit dauerte bei den analytischen Musikaufgaben 12–14 s, beim einfachen Musikhören bis zu 25 s.

Zusatzuntersuchungen

(1) *Sprachdominanz und Rechnen.* Vor den Musikaufgaben wurden bei allen Probanden in der gleichen Versuchssitzung Rechenaufgaben gegeben (Addition 2 zweistelliger Zahlen im

Kopf). 47 Probanden machten zusätzlich noch einen Sprachtest (Wortfinden nach Hören eines Anfangsbuchstaben oder Suchen eines Synonyms).

(2) *Gemischte Aufgaben.* 10 Probanden wurden die Musikaufgaben nicht nur seriell und nacheinander angeboten, sondern abwechselnd mit randomisierten Rechen- und Sprachaufgaben. Die Summierung erfolgte später für die drei Aufgabentypen getrennt. Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse einer solchen Mischserie mit klaren Unterschieden der Lateralisierung von Musik- und Sprachaufgaben.

Versuchsablauf

Vor der Registrierung wurde eine musikalische Kurzanamnese erhoben und ein orientierender Gehörtest gemacht, um den Schwierigkeitsgrad der Musikaufgaben festzulegen. Danach wurden zur Gewöhnung Triggersignale bei Blickfixation und Versuchsaufgaben mehrfach ohne Registrierung angeboten. Die erste Versuchsserie bestand immer aus Rechenaufgaben. Danach wurde bei den meisten Probanden noch ein Sprachtest durchgeführt. Erst wenn der Versuchsablauf gut vertraut war, wurden die Musikaufgaben gestellt.

Die Anwendung statistischer Methoden (Signifikanztests, z. B. χ^2 -Test) wäre erst nach Untersuchung größerer Probandengruppen möglich.

Ergebnisse

Musikverarbeitung in Periode I

Analytische Musikaufgaben (Tonhöhen- und Akkordunterscheidung). Von den 60 Probanden wurden 53 für Tonhöhenunterscheidung und 47 für Akkordunterscheidung untersucht. Für beide Aufgabenserien wurden die seitendifferenzen Potentialdifferenzen von $> 2 \mu\text{V}$ gemessen und durch die untersuchte Probandenanzahl geteilt; danach ergaben sich über mindestens drei Hirnregionen folgende Lateralisierungen: 53% Rechtslateralisation, 39% Linkslateralisation und 8% bilateral gleiche Negativierungen. Nur 6 Probanden zeigten verschiedene Lateralisierungen bei Tonhöhen- und Akkordunterscheidung.

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der Tonhöhen- und Akkordunterscheidungen als Musikanalysen zusammengefaßt. Die Tonhöhenunterscheidung von 53 Probanden ergab 30

Tabelle 2. Ergebnisse der Großhirnlateralisierung bei Musik-, Rechen- und Sprachaufgaben (vgl. Abb. 8)

Versuchsergebnisse (Übersicht)

	Musikanalysen			Einfaches Musikhören			Rechnen			Sprache		
<i>Gesamt</i>	<i>n</i> = 60			<i>n</i> = 20			<i>n</i> = 60			<i>n</i> = 47		
	rechts	links	bilat.	rechts	links	bilat.	rechts	links	bilat.	rechts	links	bilat.
	53%	39%	8%	40%	30%	30%	8%	80%	12%	4%	81%	15%
<i>Rechtshänder</i>	<i>n</i> = 42			<i>n</i> = 20			<i>n</i> = 42			<i>n</i> = 35		
	rechts	links	bilat.	rechts	links	bilat.	rechts	links	bilat.	rechts	links	bilat.
	51%	46%	3%	40%	30%	30%	7%	81%	12%	3%	83%	11%
<i>Linkshänder</i>	<i>n</i> = 18						<i>n</i> = 18			<i>n</i> = 12		
	rechts	links	bilat.				rechts	links	bilat.	rechts	links	bilat.
	56%	25%	19%				11%	78%	11%	8%	75%	17%

Rechts- (57%) und 20 Linkslateralisierungen (38%) und 3 hatten bilateral gleiche Aktivierungen (5%). Bei der Akkordunterscheidung zeigten von 47 Probanden 23 Rechts- (49%), 19 Linkslateralisierung (40%) und 5 bilateral gleiche Aktivierung (11%).

Die Resultate beim passiven Musikhören von Orchester- musik zeigen Tabelle 2 und Abb. 8.

In Tabelle 3 sind die Ergebnisse der verschiedenen Gruppen (Musiklaien, Musikamateure und ausgebildete Musiker) zusammengefaßt (Abb. 8B) und Rechts- und Linkshänder verglichen. Von den 60 Probanden waren 42 Rechtshänder, 18 Linkshänder. 35 Rechtshänder und 18 Linkshänder wurden

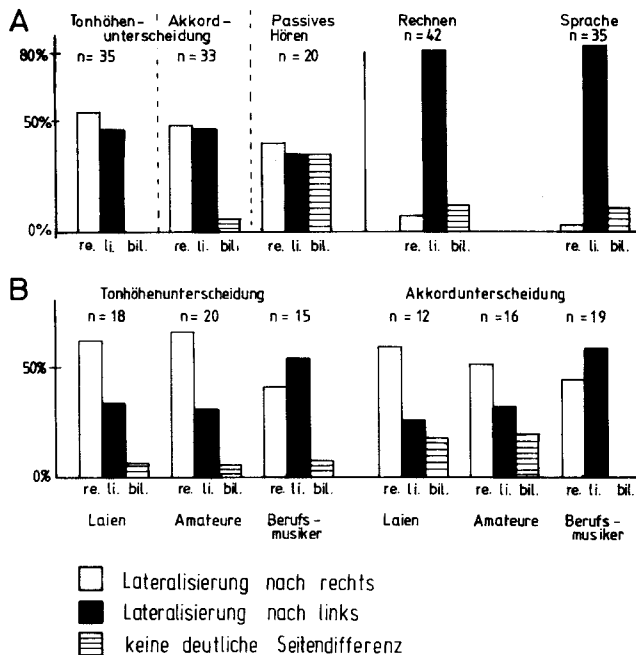


Abb. 8A, B. Lateralisierung langsamer Hirnpotentiale bei Musik-, Rechen- und Sprachaufgaben. Prozentwerte links, rechts und bilateral von verschiedenen großen Probandengruppen. (A) Rechtshänder: Bei analytischen Musiktests haben nur etwa die Hälfte der Probanden eine Rechtslateralisation, im Gegensatz zu über 80% Linkslateralisation bei Rechen- und Sprachaufgaben. Passives Hören von Orchester- musik macht noch seltener Lateralisation und bei einem Drittel der Probanden (35%) bilateral gleiche Negativierung ohne Seitendifferenz. (B) Musiktests mit Tonhöhen- und Akkordunterscheidung machen bei rechts- und linkshändigen Musiklaien und Amateuren häufiger Rechtslateralisation, bei ausgebildeten Musikern häufiger Linkslateralisation. Die Tabellen 1–3 zeigen die Probandenzahlen für die Gruppenverteilung und Musikaufgaben

für Tonhöhenunterscheidung, 33 Rechtshänder und 14 Linkshänder für Akkordunterscheidung untersucht.

Potentialverlauf „unipolarer“ Referenzableitungen gegen Ohr

Alle Referenzableitungen von der Schädeloberfläche zeigen während Musikreizen (Tonfolgen, Akkorde und Orchester- musik) deutliche große elektronegative Potentialverschiebungen gegen beide Ohren, die bis zum Ende der Aufgabenlösung dauern. Diese negativen Potentiale in Periode I erreichen gegenüber der Vorperiode meistens Amplituden von 10–25 μ V frontal, zentral, parietal und temporal mit Maxima über Cz (Abb. 4–6) und C3 oder C4. Eine Potentialumkehr nach positiv, die bei manchen Schreibpotentialen [23] vorkam und durch stärkere Negativierung basaler Cortexregionen erklärt wurde, fehlte bei den Musikversuchen.

Die akustisch evozierten Potentiale wurden in unseren Aufsummierungen durch Frequenzfilter und Latenzvariationen der Musikreize verwischt, doch sieht man vor allem beim Hören der beiden Akkorde in Periode I eine zweipflige Oberflächennegativierung in Cz (Abb. 3–7) nach jedem Musikreiz. Die Oberflächennegativierung in der Schreibperiode II war bei Musikaufgaben ähnlich (Abb. 3) oder außerhalb der Zentralregion (C3/4) geringer (Abb. 5) als bei Sprach- und Rechenaufgaben, bei denen ein Vierbuchstabenwort oder eine zweistellige Zahl aufgeschrieben wurde.

Ergebnisse der Zusatzuntersuchungen für Sprache, Rechnen und Schreiben

Rechenaufgaben. Bei allen 60 Probanden wurde vor den Musikaufgaben eine Serie mit Rechenaufgaben durchgeführt. In Periode I wurden zwei zweistellige Zahlen gehört und im Kopf addiert, in Periode II wurde das Ergebnis mit der jeweiligen Schreibhand aufgeschrieben. Die Resultate sind ebenso wie die der Sprachaufgaben in Tabelle 2 zusammengefaßt. Bei den 47 Probanden mit Sprachaufgaben sollte in Periode I nach Hören eines Anfangsbuchstaben ein Wort ergänzt werden (Vornamen oder Städte). In Periode II wurden die ersten vier Buchstaben des ergänzten Wortes mit der Schreibhand aufgeschrieben.

Diese Befunde der Linksdominanz bei Sprach- und Rechenaufgaben bestätigen frühere Ergebnisse an größeren Kollektiven mit derselben Methode [3, 23].

Lateralisierung in Periode II (Aufschreiben der Aufgabenlösung). Von allen Probanden wurden nach dem dritten Signal

Tabelle 3. Analytische Musikaufgaben bei den drei Gruppen Musiklaien, Amateuren und Berufsmusikern und Rechts- und Linkshändern

	Tonhöhenunterscheidung				Akkordunterscheidung			
	n	rechts	links	bilat.	n	rechts	links	bilat.
Gesamt	53	57%	38%	5%	47	49%	40%	11%
Musiklaien	18	61%	33%	6%	12	58%	25%	17%
Musikamateure	20	65%	30%	5%	16	50%	31%	19%
Berufsmusiker	15	40%	53%	7%	19	43%	57%	0%
Rechtshänder	35	54%	46%	0%	33	48%	46%	6%
Linkshänder	18	61%	22%	17%	14	50%	29%	21%

in der Schreibperiode II die erhaltenen Resultate der Musik-, Sprach- oder Rechenaufgaben aufgeschrieben. Schreibhand war immer die geübte Hand, bei Rechtshändern und rechts-schreibenden Linkshändern die rechte, bei Linksschreibern die linke Hand. Während des mit Schreibdruck registrierten Schreibaktes entstand die größte Lateralisation negativer Potentiale beim Schreiben mit der rechten Hand jeweils links präzentral (Abb. 3A), nur selten frontal (Abb. 3B, 5A, C). Beim Schreiben mit der linken Hand lag das Maximum umgekehrt rechts präzentral. Wenn Querableitungen der oberen (C1/C2) und mittleren (C3/4) Präzentralregion verglichen wurden, hatte, entsprechend der darunter liegenden Hand-area, meistens C1/2 (Abb. 6), seltener C3/4 (Abb. 3A) eine höhere Amplitude. Diese kontralaterale Lateralisation war über anderen Hirnregionen weniger ausgeprägt als in C1/2 und C3/4, aber meistens auch in F3/4, P3/4 und PT3/4 gegen-seitig zur schreibenden Hand erkennbar (Abb. 4–7).

Größere Lateralisierungen bei gemischten Aufgaben. Bei 10 Probanden wurden die Musik-, Rechen- und Sprachaufgaben randomisiert gemischt und nicht als Serie gleichartiger Reize gegeben. Die Versuchspersonen wußten bei diesen Mischserien nach dem Warnreiz noch nicht, welcher der drei Aufgabentypen folgen würden. Die Lateralisierung war bei allen 10 Probanden bei den gemischten Aufgaben unabhängig vom Aufgabentyp bis zu 4 μ V größer als bei den entsprechenden Versuchsserien, die vorher in derselben Sitzung in einer Abfolge gleichartiger Aufgaben gegeben wurden. Abb. 3 zeigt das Ergebnis einer solchen Aufgabenmischung für Sprache und Musik. Die corticale Lokalisation der Lateralisationsmaxima bei gemischten Reizserien entsprach bei denselben Probanden denen bei gleichartigen Reizfolgen. Ob die größere Lateralisierung bei vorher unbekannten Reizen durch fehlende „Voraktivierung“ der einer Aufgabe zugeordneten Cortexareale entsteht, bleibt offen.

Kontrollexperimente

(1) *Polaritätskontrolle durch Augenbewegungen.* Die Seitenbestimmung überwiegend elektronegativer Potentialverschiebungen der Kopfoberfläche wird durch horizontale Augenbewegungen nach rechts und links geprüft. Der Dipol des Auges mit dem Bestandpotential der elektronegativen Retina gegen die positive Cornea zeigt bei Blickbewegungen eine Negativierung auf der Retina zugewandten Seite, also in Blickrichtung Positivierung und in der Gegenrichtung Negativierung. In allen Querableitungen wird daher bei Blick nach links die rechte Kopfseite über dem rechten Großhirn gegenüber der linken elektronegativer, beim Rechtsblick umgekehrt die linke Seite. Beim Blick nach unten werden beide Kopfseiten negativ mit von frontal nach occipital abnehmender Amplitude der „unipolaren“ Ableitungen gegen Ohr.

(2) *Spontanpotentiale.* Leerversuche ohne Musik- und Schreibaufgaben zeigten die spontanen Variationen langsamer Hirnpotentiale. Sie wurden mit ihrer Aufsummierung in einer früheren Arbeit [23] beschrieben. Die Querableitungen ergaben bei guter Fixation ohne Aufgaben kleine wellenförmige Abweichungen unter $\pm 2,5$ Mikrovolt und keine länger-dauernden Links- oder Rechtslateralisationen. Wurde während der Fixation Lidschlag erlaubt, so zeigten die Referenzableitungen positive gerichtete Potentiale von 4–10 μ V, die Querableitungen Potentiale bis etwa 3 μ V. Zungenbewegungen hatten ähnliche Amplituden.

(3) *Geräuscheffekte.* Bei 6 Probanden wurden die Hirnpotentiale bei unharmonischen Geräuschen verschiedener Lautstärke im Vergleich mit den Musiktests gemessen. In Periode I wurde dann 8–12 s lang weißes Rauschen angeboten mit (a) 64 dBA, (b) 74 dBA, (c) 78 dBA Schalldruckpegel. Unabhängig von der Lautstärke entstanden in den Referenzableitungen negative Potentialverschiebungen bis 7 μ V nach Reizbeginn, die von einem längerdauernden positivem Abfall gefolgt wurden. Kurz vor Beginn der Schreibperiode II erschien eine zweite negative Welle, die wahrscheinlich einer Erwartungswelle oder CNV [41] entsprach. Die Querableitungen zeigten kürzere und kleinere Schwankungen als bei Musik- und Sprachaufgaben. Die Lateralisierungsamplitude war jedoch mit ± 3 Mikrovolt stärker von der Mittellinie abweichend als bei akustischer Stille.

(4) *Passives Hören von Tönen und Akkorden.* Als Kontrolle und Vorbedingung der analytischen Höraufgaben wurden 7 Probanden die Aufgaben zuerst vorgespielt mit der Anweisung, die Tonfolgen und Akkorde nur passiv anzuhören. Erst in einem zweiten Versuchsdurchgang wurden dann die zu lösenden, oben beschriebenen Musikaufgaben gestellt. Beim passiven Hören der Tonfolgen und Akkorde zeigten die unipolaren Referenzableitungen große negative Potentiale bis etwa 20 μ V (Abb. 5B). In den Querableitungen entstanden kleinere Amplituden der Lateralisationen von 3–10 μ V, die meistens ein Rechtsüberwiegen zeigten und frontal stärker, parieto-temporal geringer waren. Bei aktiver analytischer Hörarbeit war die Lateralisation in allen Ableitungen jeweils stärker ausgeprägt als bei passivem Musikhören.

(5) *Intraindividuelle Konstanz der Lateralisierung.* Zur Kontrolle der Befundkonstanz wurden 12 Probanden während eines Jahres bis zu viermal mit den gleichen Musikaufgaben getestet. Bei 11 Probanden blieb die Seite der Lateralisierung bei gleichen Versuchsaufgaben immer gleich, während Amplitude und das Lateralisierungsmaximum etwas variierten. Nur eine weibliche Versuchsperson hatte bei der Akkorduntersuchung einmal Linkslateralisation mit Maximum über der linken Zentralregion und einmal Rechtslateralisation mit frontalem Maximum. Diese unterschiedliche Lateralisierung konnte nach Befragen der Versuchsperson nicht durch verschiedene Lösungsstrategien beim Verarbeiten der Aufgabe erklärt werden. Ob ein Übungseffekt vorlag, blieb unklar.

(6) *Statistische Kontrollen.* Die Linkslateralisierung für Sprache und Rechnen bei den 60 Probanden war statistisch signifikant. Doch lagen die prozentualen Unterschiede der Rechts- und Linkslateralisierung bei Musikaufgaben in den 3 Ausbildungsgruppen, Laien, Amateure und Professionelle, nach statistischen Kriterien unterhalb der Signifikanzgrenze.

Diskussion

Großhirnlateralisierung bei Musik und Sprache. Von 60 untersuchten Probanden hatten nur 53% bei Musikaufgaben eine Rechtslateralisation, 39% eine Linkslateralisation und 8 zeigten etwa gleiche hirnelektrische Aktivierung (Tabelle 1, Abb. 8). Damit hatten nur wenig über die Hälfte unserer gesunden Versuchspersonen elektrophysiologische Korrelate einer Rechtsdominanz für Musik. Beim passiven Musikhören war die Rechtslateralisation noch geringer als bei analytischer Tonhöhen- und Akkordunterscheidung. Bei diesen Musik-

analysen sollten nicht Rhythmus und Metrik sondern nur die melodischen und klanglichen Elemente beachtet werden. Von anderen Autoren [6, 10] wurde angenommen, daß rhythmische Vorgänge, die sowohl in der Musik wie beim Sprechen beteiligt sind, in der sprachdominanten linken Hemisphäre koordiniert werden.

Unsere Befunde und andere Arbeiten [9, 28, 33–35] sprechen zwar für eine Mitbeteiligung des rechten Cortex bei der Musikverarbeitung, aber gegen die Auffassung, daß die rechte Großhirnhemisphäre für Musik „dominant“ ist. Eine Hemisphärendominanz ist stets relativ und nicht absolut zu verstehen und sicher nicht eine unilaterale Cortexfunktion. Sowohl bei Musik- wie bei Sprachverarbeitung werden jeweils beide Großhirnseiten aktiviert, wie die bilaterale hirnelektrische Negativierung bei allen Aufgaben zeigt. Die hirnelektrische Lateralisierung über der linken oder rechten Großhirnhemisphäre entspricht nur einem relativen einseitigen Überwiegen bilateraler Rindentätigkeit. Solche Lateralisierungen bei höheren Hirnfunktionen sind weitgehend unabhängig von der Händigkeit. Bei Rechtshändern und Linkshändern entsteht eine Linkslateralisation bei Sprach- und Rechenaufgaben [3, 20, 23] häufiger als eine Rechtslateralisation bei Musikaufgaben.

Musiklateralisation und Händigkeit. Rechts- und Linkshänder hatten bei Musikanalysen ähnliche hirnelektrische Befunde mit etwa gleichhäufiger Rechtslateralisation, doch waren bei Linkshändern Linkslateralisationen seltener und bilaterale gleiche Potentiale häufiger. Tabelle 2 zeigt eine vergleichende Übersicht. Sprach- und Rechentests ergaben bei denselben Probanden viel häufigere Linkslateralisationen (Rechtshänder < 80%, Linkshänder < 75%) gegenüber den Musikanalysen (Rechtshänder 46%, Linkshänder 25%). Der Einfluß der Händigkeit auf die Lateralisation erscheint bei Musiktests etwas größer als bei Sprach- und Rechentests, da die Linkshänder weniger Linkslateralisation und stärkere Bilateralität beider Großhirnseiten zeigen. Ferner kann die Lateralisierung der Großhirnrinde wahrscheinlich auch durch die musikalische Vorbildung beeinflusst werden (Tabelle 3, Abb. 8).

Musikausbildung und Großhirnlateralisation. Die Seitenverteilung von 53% Rechtslateralisation und 39% Linkslateralisation bei allen Probanden ist zwar statistisch nicht signifikant. Aber entsprechende Seitenunterschiede bei analytischen Aufgaben und einfachem Musikhören und bei Musik Laien und Berufsmusikern lassen doch vermuten, daß die Musikausbildung nicht ohne Bedeutung ist. Musikalische Laien haben bei unseren Musikaufgaben 61% und 58% Rechtslateralisierung, Berufsmusiker aber nur 40% und 43% (Tabelle 3). Diese statistisch ebenfalls noch unsicheren Unterschiede und die hirnelektrisch gesicherte bilaterale Aktivierung können auf eine stärkere Mitbeteiligung des linken Großhirns bei der Musikverarbeitung der Berufsmusiker hinweisen. Dies könnte mehrere Ursachen haben. Erstens, im Musikstudium lernen die Musikstudenten Klangereignisse sprachlich zu formulieren. Es werden komplizierte Techniken geübt, Zusammenklänge zu zerlegen, zu benennen und zu analysieren. Solche sprachlichen oder quasi-mathematischen Musikanalysen würden die häufigeren Linkslateralisationen erklären, die auch ein Charakteristikum der Sprach- und Rechenaufgaben sind. Zweitens, Berufsmusiker können bei den angebotenen Musikreizen durch ihren Erfahrungsschatz nicht nur leichter sprachlich assoziieren, sie können auch während des Lösen der Versuchsaufgabe noch an Anderes denken. Schließlich

wäre noch die traditionelle Lehre, das linke Großhirn arbeite mehr analytisch-sequentiell, das rechte mehr „ganzheitlich“ als Deutung zu diskutieren. Dagegen sprechen aber unsere Befunde beim emotionalen „ganzheitlichen“ Musikhören, die häufigere Linkslateralisationen ergaben als bei Musikanalysen (Tabelle 3, Abb. 8).

Die Gruppenunterschiede weisen darauf hin, daß eine langjährige musikalische Ausbildung neben persönlichen Charakteristika die hirnelektrischen Befunde und ihre Lateralisierung beeinflussen kann. Statistisch ist dies noch nicht nachgewiesen, da noch keine Verlaufsuntersuchungen vorliegen und unsere Probandenzahlen zu klein sind. Wenn die häufigere Linkslateralisation bei Berufsmusikern mit einer größeren Probandenzahl gesichert werden kann, so müßte sie als spät erworbene Lateralisation von Cortexfunktionen erklärt werden. Denn jede Musikausbildung erfolgt in der Regel später als das Erlernen der Sprache.

Lateralisation und Lernen. In einer früheren Arbeit [23] haben wir angenommen, daß die hirnelektrische Linkslateralisation für Sprache und Rechnen erst nach jahrelanger Übung entsteht und daß bei Linkshändern eine primäre Dominanz des rechten Großhirns durch Lernprozesse verändert wird. Analoge Lernvorgänge könnten auch die Lateralisation und Lokalisation corticaler Funktionen bei der Musikausbildung beeinflussen. Ob Berufsmusiker ein primäres Überwiegen des rechten Großhirns bei Musikverarbeitung mit zunehmender Ausbildung nach links transponieren, wäre erst durch Entwicklungsuntersuchungen der langjährigen musikalischen Lernvorgänge nachzuweisen. Bisher gibt es nur wenige Befunde an Kindern über die Entwicklung der Bereitschafts- und Erwartungspotentiale vor einfachen Bewegungen [8], aber noch keine Untersuchung der Großhirnlateralisation beim Lernen von Sprache und Musik. Man kann nur vermuten, daß die Spezialisierung der Großhirnhemisphären auch bei angeborener Disposition zur Linksdominanz für die Sprache und zu relativer Rechtsdominanz für Raumwahrnehmung und Musikverarbeitung noch durch Lernen modifizierbar ist.

Bilaterale Großhirntätigkeit und Lateralisierung. Beide Großhirnhemisphären werden durch mächtige Balkenverbindungen vorwiegend zwischen symmetrischen Cortexfeldern und durch subcortikale Einflüsse koordiniert. Diese bilaterale Zusammenarbeit ist auch hirnelektrisch durch ähnliche EEG-Wellen und langsame Potentiale über symmetrischen Cortexregionen erkennbar. Alle langsamen oberflächennegativen Potentiale über oberen Cortexregionen sind auch bei einseitigen Bewegungen bilateral mit geringer Lateralisierung kontralateral zur bewegten Seite: Sie entstehen bei Bewegungsprogrammierung als Bereitschaftspotentiale [25] und Erwartungspotentiale [41], bei Bewegungskontrolle als Zielbewegungspotentiale [11–13] und Schreibpotentiale [23]. Bei Sprachaufgaben ohne Vokalisation zeigen die bilateralen Negativierungen über beiden Großhirnseiten eine klare Linkslateralisierung [20, 21, 23], bei unseren Musikaufgaben aber seitenverschiedene Lateralisierungen. In früheren Arbeiten [20, 23] wurden die Potentialabläufe symmetrischer Ableitungen abgebildet, deren Seitendifferenz bei Sprache und Rechenaufgaben zur Linkslateralisierung führt. In dieser Arbeit sind nur Querableitungen bei Musiktests mit Lateralisierungen rechts (Abb. 3, 4 und 6) und links (Abb. 5) abgebildet.

Bei Menschen mit Balkendurchschneidungen (split brain) wurden die Dominanzfunktionen des Großhirns mit Wahrnehmungs- und Sprachleistungen psychophysisch untersucht

[29, 36–37], aber hirnelektrische Korrelationen mit langsamen Potentialen fehlen bisher. Wie bei den Aphasien stammen die Untersuchungen von kranken, nicht von gesunden Menschen: Die split-brain Patienten waren Epileptiker und bei pathologisch verändertem EEG ist es zweifelhaft, ob hirnelektrische Analogie unserer Befunde von Gesunden auch bei solchen Probanden nach Balkendurchschneidung zu finden sind.

Unsere elektrophysiologischen Befunde bilateraler Cortexaktivierung mit Linkslateralisierung bei Sprachaufgaben und weniger Rechtslateralisierung bei Musikaufgaben passen auch zu anderen Untersuchungen. Ingvar [19], Roland [33] und ihre Mitarbeiter fanden bei Musikleistungen vorwiegend bilaterale Durchblutungssteigerungen frontaler und temporaler Cortexfelder, die beim Singen eine relative Rechtsaktivierung, beim Sprechen dagegen mehr Linksaktivierung zeigten.

Diese lokalen Durchblutungsänderungen erscheinen allerdings wesentlich später als die oberflächennegativen Hirnpotentiale, da die Gefäßerweiterung sekundäre Folge einer Cortexaktivierung ist. Sie sind daher nur bedingt mit unseren frühen, simultan mit der Sprach- oder Musikverarbeitung auftretenden hirnelektrischen Aktivierungen zu vergleichen. Besser mit unseren Befunden vergleichbar sind die Desoxyglykosebestimmungen. Mazziotto's rein rezeptive Musiktests [31] zeigten für solche metabolischen Cortexaktivierungen nur bei Musikern eine temporale Rechtslateralisation. Bei Berufsmusikern kam es wie bei unseren Befunden auch zur Linkslateralisation. Diese Gruppenunterschiede entsprechen etwa den Tonhöhen- und Akkordanalysen bei Musikern und ausgebildeten Musikern. Abbildung 7 zeigt diese Unterschiede vorwiegender Rechtslateralisierung bei Musikern und Linkslateralisierung bei Berufsmusikern anschaulich in den Durchschnittsauswertungen (grand average) der Gruppen I und III.

Cortexlokalisation. Die Lateralisation langsamer Potentiale von symmetrischen Hirnregionen mit dem Seitenüberwiegen von mindestens 3 Querableitungen erlaubt noch keine Aussage über die Lokalisation in verschiedenen Rindenfeldern. Lokale Verschiedenheiten der Lateralisierung sind zunächst nur durch größere oder kleinere Amplituden erkennbar. Diese erscheinen zwar intraindividuell für gleiche Aufgaben relativ konstant, haben aber große interindividuelle Variationen wie Abb. 3–6 zeigen. Die Maxima der Lateralisierung sind in Abb. 3 und 4 oben frontal und zentral in Abb. 5 und 6 jedoch unten frontal und temporal lokalisiert. Die Durchschnittskurven von Musikern und Berufsmusikern der Abb. 7 zeigen dagegen größere Lateralisationen in der Zentralregion. Bessere Aussagen über die Hirnrindenlokalisation bei Sprach- und Musikverarbeitung werden erst möglich sein, wenn die lokalen Maxima genauer mit lokalisierten Messungen der Potentialverteilung nach Hjorth [18] und MacKay [30] im Vergleich zu Referenzableitungen gegen die Ohren untersucht sein werden.

Musikhören und Musikanalyse. Einfaches Musikhören führt viel seltener zur Rechtslateralisation als analytische Musikaufgaben. Auswertbar waren nur die 20 Rechtshänder, wie Tabelle 2 zeigt. Die geringere Rechtslateralisation bei passiver Musikperzeption kann mit einer verminderten Aufmerksamkeit für spezifische Musikleistungen zusammenhängen. Ferner ist es möglich, daß bei dem länger andauernden passiven Zuhören (bis 18 s gegenüber 5–8 s bei Musiktests) auch unkontrollierbare sprachliche Assoziationen und Denkleistun-

gen auftreten, die den Dominanzfunktionen des linken Großhirns entsprechen. Damit wäre auch hirnelektrisch eine stärkere Aktivierung links zu erwarten, die eine Rechtslateralisation überdeckt und vermindert.

Welche Schlußfolgerungen sind aus den Musik- und Sprachexperimenten zu ziehen? In Abb. 8 sind unsere Ergebnisse übersichtlich zusammengefaßt. Das Bild zeigt in A anschaulich die hirnelektrischen Unterschiede zwischen der linksseitigen Großhirndominanz bei Sprache und Rechnen und der verschiedenen Rechts- oder Linkslateralisierung bei Musiktests. In B sieht man auch den Einfluß unterschiedlicher Musikausbildung auf die Lateralisierung. Damit wird klar, daß Musikverarbeitung *nicht* eine der Sprachverarbeitung analoge dominante Funktion einer Großhirnseite ist. Unsere Ergebnisse und klinische Erfahrungen bei Amusien [4, 7, 14–16, 24, 42] sprechen dafür, daß die Musikverarbeitung im Gehirn vorwiegend bilateral erfolgt und daß je nach der individuellen Musikausbildung die rechte oder linke Großhirnrinde mehr beteiligt ist. Sichere Aussagen über die Entwicklung solcher Seitenunterschiede werden allerdings erst nach weiteren Untersuchungen großer Probandenkollektive und während des Musiklernens möglich sein.

Danksagung. Für experimentelle Hilfe danke ich Ing. B. Natsch und cand. med. B. Landwehrmeyer, für technische Unterstützung G. Brenneisen und Ing. H. Kapp, für methodische Anregung und zweijährige Beratung vor allem Prof. R. Jung, in dessen Laboratorium die Experimente gemacht wurden. Die Untersuchungen wurden durch die *Deutsche Forschungsgemeinschaft* im Sonderforschungsbereich „Hirnforschung und Sinnesphysiologie“ (SFB 70) unterstützt.

Literatur

1. Altenmüller E, Jung R (1984) Electrophysiological evidence of hemispheric dominance for language, calculation and music. *Pflügers Arch* 400 (Suppl): R 49, R 194
2. Altenmüller E, Landwehrmeyer B, Jung R (1985) Electrophysiological evidence of right parietal dominance of visuo-spatial processing tasks. *J Neurol* 231 (Suppl): 140
3. Altenmüller E, Winker T, Jung R (1985) Hemispheric dominance for language and calculation in right-handers and left-handers. *Pflügers Arch* 405 (Suppl. 2) R 40, R 140
4. Benton AL (1977) The amusias. In: Critchley M, Henson RA (eds) *Music and the brain*. William Heinemann Medical Books Ltd, London, pp 378–397
5. Bever TG, Chiarello RJ (1974) Cerebral dominance in musicians and nonmusicians. *Science* 185:537–539
6. Borchgrevink H (1982) Prosody and musical rhythm are controlled by the speech hemisphere. In: Clynes M (ed) *Music, Mind and Brain. The Neuropsychology of Music*. Plenum, New York, pp 151–157
7. Brust JCM (1980) Music and language. *Brain* 103:367–392
8. Chiarenza GA, Papakostopoulos C, Giordano F, Guareschi-Cazzullo A (1983) Movement-related brain macro-potentials during skilled performance. A developmental study. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 56:373–383
9. Damasio AR, Damasio H (1977) Musical faculty and cerebral dominance. In: *Music and the brain*. Critchley M, Henson RA (eds) Heinemann Medical Books. London, Charles C. Thomas Springfield, Illinois, pp 141–155
10. Gordon HW (1978) Left hemispheric dominance for rhythmic elements in dichotically-based melodies. *Cortex* 14:58–70
11. Grünwald-Zuberbier E, Grünwald G (1978) Goal-directed movement potentials of human cerebral cortex. *Exp Brain Res* 33:135–138
12. Grünwald-Zuberbier E, Grünwald G, Jung R (1978) Slow potentials of the human precentral and parietal cortex during goal-

- directed movements (Zielbewegungspotentiale). *J Physiol* 284: 181–182 P
13. Grünwald G, Grünwald-Zuberbier E, Hömberg V, Netz J (1979) Cerebral potentials during smooth goal-directed hand movements in right-handed and left-handed subjects. *Pflügers Arch* 381:39–46
 14. Henson RA (1977a) Neurological aspects of musical experience. In: Critchley M, Henson RA (eds) *Music and the brain*. William Heinemann Medical Books Ltd, London, pp 3–21
 15. Henson RA (1977b) The language of music. In: Critchley M, Henson RA (eds) *Music and the brain*. William Heinemann Medical Books Ltd, London, pp 233–254
 16. Henson RA (1985) Amusia. In: Frederiks JAM (ed). *Handbook of clinical neurology*. Vol 1, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, pp 483–490
 17. Hirshkowitz M, Earle J, Paley B (1978) EEG alpha asymmetry in musicians and nonmusicians: a study of hemispheric specialization. *Neuropsychologia* 16:125–128
 18. Hjorth B (1975) An on-line transformation of EEG scalp potentials into orthogonal source derivations. *Electroencephalogr. Clin Neurophysiol* 39:526–530
 19. Ingvar D (1983) Serial aspects of language and speech related to prefrontal cortical activity. A selective review. *Human Neurobiol* 2:177–189
 20. Jung R (1984) Electrophysiological cues of the language-dominant hemisphere in man: slow brain potentials during language processing and writing. *Exp Brain Res* 9 (Suppl): 430–450
 21. Jung R, Altenmüller E (1985) Hirnelektrische Korrelate der Großhirndominanz für Sprache, Rechnen und Musik. *EEG-EMG* 16:32
 22. Jung R, Hufschmidt A, Moschalski W (1982) Langsame Hirnpotentiale beim Schreiben: Die Wechselwirkung von Schreibhand und Sprachdominanz bei Rechtshändern. *Arch Psychiatr Nervenkr* 232:305–324
 23. Jung R, Altenmüller E, Natsch B (1984) Zur Hemisphären-dominanz für Sprache und Rechnen: Elektrophysiologische Korrelate einer Linksdominanz bei Linkshändern. *Neuropsychologia* 22:755–775
 24. Kleist K (1959) Sensorische Aphasien und Amusien auf myeloarchitektonischer Grundlage. Thieme, Stuttgart
 25. Kornhuber HH, Deecke L (1965) Hirnpotentialänderungen bei Willkürbewegungen und passiven Bewegungen des Menschen: Bereitschaftspotential und reafferente Potentiale. *Pflügers Arch ges Physiol* 284:1–17
 26. Landwehrmeyer B, Altenmüller E, Winker T (1985) Slow brain potentials as correlates of right hemispheric dominance during visual-spatial processing in man. *Pflügers Arch* 405 (Suppl. 2) R 40, R 139
 27. Larsen B, Skinhoj E, Soh K (1977) The pattern of cortical activity provoked by listening and speech revealed by rCBF measurements. *Acta Neurol Scand (Suppl)* 64:268–269
 28. Lashley KS (1951) The problem of serial order in behaviour. In: Jeffries LA (ed) *Cerebral mechanisms in behaviour*. Wiley, New York, pp 112–131
 29. Levy J, Trevarthen C, Sperry RW (1972) Perception of bilateral chimeric figures following hemispheric deconnexion. *Brain* 95: 61–78
 30. MacKay DM (1983) On-line source-density computation with a minimum of electrodes. *Electroencephalogr. Clin Neurophysiol* 56:696–698
 31. Mazziotta J, Phelps M, Carson R, Kuhl D (1982) Tomographic mapping of human cerebral metabolism: Auditory stimulation. *Neurology (NY)* 32:921–937
 32. Roland PE, Larsen B, Skinhoj E, Lassen NA (1977) Regional cerebral blood flow increases due to treatment of somatosensory and auditive information in man. *Acta Neurol Scand (Suppl)* 64: 540–541
 33. Roland PE, Skinhoj E, Lassen NA (1981) Focal activations of the human cerebral cortex during auditory discrimination. *J Neurophysiol* 45:374–386
 34. Sidtis J (1980) On the nature of cortical function underlying right hemisphere auditory perception. *Neuropsychologia* 18:321–330
 35. Sidtis J (1984) Music, pitch perception and the mechanisms of cortical hearing. In: Gazzaniga M (ed) *Handbook of cognitive neuroscience*. Plenum, New York, pp 91–114
 36. Sperry RW (1974) Lateral specialization in the surgically separated hemispheres. In: *The neurosciences, third study program*. Schmitt FO, Wordon FG (eds) MIT-Press, Cambridge A. pp 5–19
 37. Sperry RW, Gazzaniga MS, Bogen JE (1969) Interhemispheric relationship: the neocortical commissures: syndromes of hemisphere disconnection. In: Vinken PJ, Bruyn GW (eds) *Handbook of clinical neurology*. Elsevier, Amsterdam, pp 273–290
 38. Sutton S, Braren M, Zubin J (1965) Evoked potential correlates of stimulus uncertainty. *Science* 150:1187–1188
 39. Sutton S, Braren M, Zubin J, John ER (1967) Information delivery and the sensory evoked potential. *Science* 155:1436–1439
 40. Tönnies JF (1934) Die unipolare Ableitung elektrischer Spannungen vom menschlichen Gehirn. *Naturwissenschaften* 22:411–414
 41. Walter WG (1964) Slow potential waves in the human brain associated with expectancy, attention and decision. *Arch Psychiatr Nervenkr* 206:309–322
 42. Wertheim N (1969) The Amusias. In: Vinken PJ, Bruyn GW (eds) *Handbook of clinical neurology*, vol 4, North-Holland Publishing Co Amsterdam, pp 195–206

Eingegangen am 14. November 1985