

# Forschungsberichte

Hellmuth Petsche

## Gehirnvorgänge beim Musikhören und deren Objektivierung durch das EEG

Als wir 1982 beim ersten Herbert von Karajan-Symposium über unsere ersten Untersuchungen mit dem EEG beim Hören von Musik berichteten, lag über dem ganzen Bericht als Cantus firmus das Staunen darüber, daß überhaupt Korrelationen zwischen dem, was von der elektrischen Gehirntätigkeit durch den Schädel dringt, und dem Hören von Musik zu finden sind. Vor zwei Jahren, als diese Methode schon etwas weiter ausgereift war, haben wir vorwiegend die Unterschiede zwischen sprachlicher und musikalischer Perzeption im EEG untersucht. Bereits damals hatten wir den Eindruck, daß die EEG-Änderungen beim Musikhören neben kognitiven Vorgängen auch andere Momente widerspiegeln und hatten vermutet, das EEG könnte einmal bei der Objektivierung des schwer faßbaren Begriffes »Musikalität« helfen, eines Begriffes, der ähnlich dem Begriff »Intelligenz« aus zahlreichen Parametern zusammengesetzt sein dürfte.

Heute, da viel präzisere Ergebnisse vorliegen und sich die Nützlichkeit unserer Vorgangsweise herausgestellt hat, sind wir noch mehr davon überzeugt, daß wir damit über ein Mittel verfügen, das sich besonders für die Musikpsychologie als nützlich erweisen dürfte.

Die vorliegende Arbeit besteht im wesentlichen aus zwei Teilen. Im ersten sollen möglichst kurz die Methode und nur einige wenige Ergebnisse erläutert werden. Im zweiten Abschnitt wollen wir uns Gedanken darüber machen, was es denn eigentlich sein könnte, was im EEG zu sehen ist, wobei wir unter anderem auch feststellen werden, daß das Schaffen von Kunst und ebenso das Reproduzieren von

Kunst durch aufmerksames Hören von Werken oder Betrachten von Bildern in letzter Konsequenz eine Befriedigung von Bedürfnissen ist, die durch die Struktur des menschlichen Gehirns bedingt sind und dessen Funktionen fördern.

Wie Peter Ross (1983) in seinem umfassenden Bericht über musikalische Rezeptionsforschung zu Recht sagt, ist eines der Kernprobleme musikalischer Rezeptionsforschung »das experimentelle Dilemma«. Denn musikalische Gebilde sind komplexe Strukturen, innerhalb derer die einzelnen Faktoren nicht unabhängig nebeneinander stehen, sondern sich gegenseitig bedingen. Bei experimentellen Untersuchungen mit Musik betrifft jeder größere Eingriff – etwa die Veränderung des Tongeschlechts von Dur zu Moll – das gesamte Gebilde und beeinträchtigt den Sinn des Ganzen, der auf dem Zusammenwirken aller Strukturfaktoren beruht. Dieses experimentelle Dilemma stellt auch bei den vorliegenden Untersuchungen ein Hauptproblem dar. Um dieses Dilemma wenigstens für die Zeitdimension möglichst klein zu halten, wurde als Analyseintervall eine Minute gewählt. Das ist länger als 20 Sekunden, ein Zeitraum, der von Gasser, Bächer und Steinberg (1985) als genügend bezeichnet wurde, die dem EEG inhärente Variabilität adäquat zu reduzieren.

Im Gegensatz zu Versuchen anderer Arbeitsgruppen, musikalische Hörvorgänge durch das EEG zu objektivieren (Literatur siehe bei Peretz 1983), verwendet unsere Gruppe Musik in ihrer Gesamtheit als Stimulus und arbeitet nicht mit evozierten Potentialen.

Die dafür verwendete Methode beruht auf der Spektralanalyse des gleichzeitig von 19 gleichmäßig am Schädel verteilten Elektroden abgeleiteten EEG, das auf Analogband gespeichert und off-line mit dem Computer verarbeitet wird. Die Methodik wurde bereits mehrfach eingehend dargestellt (Petsche et al. 1985 a, b; 1986) und soll hier nur in den wesentlichen Zügen summarisch dargestellt werden.

Im Prinzip handelt es sich darum, gleich lange EEG-Abschnitte im Ruhezustand und während des Musikhörens miteinander zu vergleichen und statistisch signifikante Unterschiede festzustellen. Die immense Zahl der anfallenden Daten zwingt zu einer Datenreduktion: Eine solche wird dadurch erreicht, daß das für die Ana-

lyse des EEG in Betracht kommende Frequenzband zwischen 4 und 32 Hz in fünf Bänder unterteilt (Theta: 4–7.5 Hz, Alpha: 8–12.5 Hz, Beta 1: 13–18 Hz, Beta 2: 18.5–24 Hz, Beta 3: 24.5–31.5 Hz) und die spektrale Leistung für jedes dieser fünf Bänder bestimmt wird (d.h. das Spektrum wird jeweils innerhalb dieser fünf Abschnitte integriert).

Um Aussagen über den Grad der Verkopplung zwischen zwei Elektroden zu erhalten, wird zusätzlich die Kohärenz zwischen benachbarten Elektroden und zwischen Elektroden an homologen Orten beider Hemisphären (interhemisphärische Kohärenz) bestimmt.

Die Kohärenz zweier Schwingungsmuster ist ein Maß für die Korrelation der beiden Signale als Funktion der Frequenz; einfacher ausgedrückt: ein Maß für die Ähnlichkeit zweier Schwingungsmuster. Beträgt die Kohärenz in einem bestimmten Bereich des Spektrums »1«, so sind die beiden Schwingungen in diesem Bereich identisch, beträgt sie »0«, haben sie keinerlei spektrale Verwandtschaft, d.h. es besteht keinerlei funktionelle Kopplung zwischen diesen beiden Schwingungsmustern. In Wirklichkeit kann die Kohärenz jeden Wert zwischen 0 und 1 annehmen.

Tatsächlich gemessen werden allerdings nur statistisch signifikante Änderungen von Leistungen oder Kohärenz, und keine absoluten Werte, da die Variabilität dieser Parameter bereits im Ruhezustand hoch und überdies persönlichkeitsabhängig ist.

Der letzte Schritt besteht in einer leicht überblickbaren Darstellung der Daten. Diese erfolgt über Symbole, die in ein Schema des Kopfes eingetragen werden (leere Quadrate: statistisch signifikante Zunahme des jeweiligen Parameters; für Angaben über Änderungen der Leistung befinden sich diese Symbole an den Orten der Elektroden, für Angaben der Kohärenz zwischen jenen beiden Elektroden, zwischen welchen die Kohärenz bestimmt wurde). Die Ausgabe kann auch in Form topographischer Farbkarten erfolgen, welche durch ihre kontinuierlichen Übergänge zwar bessere Einsichten in die lokale Verteilung der Änderungen ergeben, aber für den Druck nicht geeignet sind.

Alle Daten, auch solche, die persönliche Merkmale der Versuchspersonen betreffen, werden in einer Datenbank gespeichert.

Die Methode erlaubt prinzipiell zwei Möglichkeiten von Untersuchungen:

1. Analyse der EEG-Veränderungen *einer Person* oder *einer Gruppe von Personen* (Unterschiede EEG in Ruhe und EEG während des Musikhörens).
2. Analyse der *Unterschiede von zwei homogenen Gruppen* von Versuchspersonen (Vpn.), die dieselbe Aufgabe bekommen (z.B. männliche und weiblich Vpn., ausgebildete oder nicht ausgebildete Vpn., interessierte oder nicht interessierte Vpn. beim Hören ein und desselben Stückes).

Verglichen werden können die EEG-Veränderungen beim Hören von Musik mit anderen geistigen Leistungen wie Kopfrechnen, Lesen, Betrachten eines Bildes, visueller Imagination und anderen, wodurch sich ein umfassenderes Bild über die regionale Aktivierung an der Hirnrinde ergibt und sich häufig die beim Musikhören erhobenen Befunde besser deuten lassen.

Unter den bisher insgesamt 57 mit dieser Methode untersuchten Personen konnten kurz zusammengefaßt folgende Ergebnisse erhoben werden:

Bei einem Vergleich von musikalisch Vorgebildeten (mindestens drei Jahre Unterricht an einem Instrument) und nicht Vorgebildeten (Petsche et al. 1985 b) ergaben sich beim Musikhören signifikante Unterschiede, und zwar in der ersteren Gruppe beiderseits mit Rechtsüberwiegen, während die zweite Gruppe fast nur linksseitige Veränderungen von Leistung und Kohärenz zeigte. Außerdem erstreckte sich bei Vorgebildeten die Änderung über größere Hirnregionen als bei Nicht-Vorgebildeten. Aber auch der Frequenzbereich, in welchem die meisten Änderungen auftraten, war in beiden Gruppen verschieden. Ferner zeigte die Gruppe der Vorgebildeten bei Musikhören in mehreren Frequenzbändern Kohärenzänderungen zwischen den Temporalregionen beider Hemisphären, nicht dagegen die Gruppe der Nicht-Vorgebildeten, welche überhaupt wesentlich weniger interhemisphärische Kohärenzänderungen auf-

wies; d.h. die funktionelle Kopplung zwischen den Hemisphären wird während des Musikhörens in der Gruppe der Vorgebildeten stärker geändert als in der Gruppe der Nicht-Vorgebildeten.

Eine weitere Untersuchung, die beim dritten Symposium der Herbert von Karajan-Stiftung der Gesellschaft der Musikfreunde in Wien 1986 vorgetragen wurde, bezieht sich auf 19 Musikstudenten (Schulmusik), welchen ein Volkslied (Fuchs, du hast die Gans gestohlen) als einfache Melodie und mehrmals wiederholt angeboten wurde, ferner in üblicher, dann in unüblicher Harmonisierung, weiterhin im  $3/4$ -Takt (mit Begleitung) und durch weißes Rauschen gestört. Die Ergebnisse werden noch im Detail publiziert. Signifikant reversible Abnahmen der Leistung waren besonders im Alpha-Bereich links temporal zu finden. Mit Wiederholung der Melodie wurde der Bereich der Alphaabnahme kleiner, und bei der dritten Wiederholung des Liedes war überhaupt keine für alle 19 Personen signifikante Änderung mehr festzustellen, was wahrscheinlich auf Habituation an diese einfache Melodie zurückzuführen ist, die bei mehrmaliger Wiederholung langweilig wirkt; auch die Zahl der Kohärenzänderungen nahm mit zunehmender Wiederholung des Liedes ab.

Wurde nun das Lied mit einfacher oder komplexer Begleitung, im  $3/4$ -Takt oder von Rauschen überlagert angeboten, so traten wesentlich mehr und verschiedenartige Leistungs- und Kohärenzänderungen auf, die auf verschiedene zerebrale Verarbeitungsmuster hindeuten. Besonders kraß waren diese Unterschiede, wenn das EEG beim Anhören eines Mozart-Quartetts, beim Kopfrechnen, beim Lesen und beim Zuhören (von einem gesprochenen Text) verglichen wurde. Auch geschlechtsspezifische Unterschiede waren festzustellen, wenn die Änderungen, die die männlichen Versuchspersonen beim Hören von Mozart im EEG hatten, mit jenen verglichen wurden, die die weiblichen Versuchspersonen zeigten. Auf diese Befunde näher einzugehen, würde jedoch den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

Es ist nun an der Zeit, sich Gedanken darüber zu machen, welche Hirnphänomene eigentlich im EEG zum Ausdruck kommen und

welche Wirkungen der Musik auf die Persönlichkeit mit dem EEG erforscht werden können.

Zunächst ist es sehr unwahrscheinlich, daß diese mannigfachen Änderungen von EEG-Parametern, die über praktisch allen Hirnregionen zu finden sind, etwas mit der direkten Verarbeitung der Klangmuster in der Endstätte der Hörbahn, in der temporalen Hirnrinde, zu tun haben. Der akustische Kortex ist einerseits viel zu klein – seine Oberfläche erstreckt sich nur über wenige Quadratzentimeter – und andererseits zu weit von der Gehirnoberfläche entfernt, um eine solche örtliche Vielfalt von Veränderungen im EEG hervorzu-rufen, wie sie häufiger zu beobachten ist.

Viel eher dürften es sekundäre Reaktionen des Gehirns auf die Musik sein, z.B. physiologische Korrelate von Assoziationen, von Erinnerungen, die mehrere Sinnessysteme betreffen können und keineswegs verbalisierbar sein müssen. Dazu kommen noch mögliche elektrophysiologische Korrelate von Emotionen, deren Spektrum ebenfalls weit über den sprachlich erfaßbaren Bereich hinausreicht. Kein Musikstück würde zum aufmerksamen Zuhören anregen, löste es nicht Assoziationen und emotionelle Vorgänge aus.

Um das besser verstehen zu können, sollte man sich zuerst jene Vorgänge in Erinnerung bringen, die im Nervensystem bei jedem Akt von Wahrnehmung ablaufen: Dabei strömt aus den Sinnesorganen eine Unzahl von elektrischen Impulsen über die Sinnesnerven zu den Verarbeitungszentren der Hirnrinde, beim Hören in die Heschlsche Querwindung im Schläfenlappen. Die dort ankommenden, im Hirnstamm schon mehrfach transponierten Erregungen werden in den Nervenzellen der Hirnrinde zu raum-zeitlichen Erregungsmustern verarbeitet, die bestimmten Klangbildern entsprechen. Diese Muster werden unmittelbar mit bereits im akustischen Gedächtnis verankerten Erregungskonstellationen verglichen, d.h. Assoziationen werden gebildet. Doch nicht nur das: die bereits gespeicherten Erregungskonstellationen werden durch jeden neuen Eindruck auch etwas abgeändert. Die überwiegende Zahl dieser Assoziationen wird natürlich nicht bewußt wahrgenommen. Ist das Klangbild vertraut, so liegt ein ähnliches Bild – besser: dessen neuro-

nale Erregungskonstellation – bereits im Gedächtnis gespeichert vor und das neu aufgenommene Klangbild wird »verstanden« – ein besseres Wort für die Apperzeption von Musik gibt es noch nicht. Ist das Klangbild völlig unbekannt und findet es keine Entsprechung im Gedächtnis, so ist die erste Reaktion des Hörers Ratlosigkeit. Mit diesen beiden Schlagworten »verstanden« und »ratlos« sind aber nur die beiden äußersten Punkte jenes weiten Bereiches abgesteckt, innerhalb dessen sich die Musikperzeption im menschlichen Erleben abspielt.

Eine Komplikation – wodurch allerdings das Erleben bereichert wird – bildet die für die Musik als Kunst spezifische Tatsache, daß neben dem statischen Moment – dem Klangbild – das Moment »Zeit« eine ebenso wichtige Rolle spielt, also die Änderung von Klangbildern. Der Vorgang, den ich eben schilderte, nämlich die Umwandlung von Klängen in neuronale Erregungsmuster in der Hirnrinde, erfolgt also jeden Augenblick aufs Neue mit neuen Klanggebilden. Auch die Art und Weise der zeitlichen Verknüpfung von Klangbildern wird im Gedächtnis gespeichert: Für die Musikperzeption ist ja beides notwendig, das Wahrnehmen von Klangbildern und von Klangbildfolgen.

Dieser ständige Vergleich von Klängen und Klangfolgen mit bereits im Gedächtnis gespeicherten Erregungsmustern von solchen ist aber nicht das einzige Programm, das, durch Musik ausgelöst, im Gehirn abläuft. Die in der Rinde des Temporallappens entstehenden Erregungskonstellationen werden auch in tieferliegende Hirnstrukturen geleitet, vor allem ins limbische System und von dort auch weiter in den frontalen Kortex und den Hypothalamus. Im limbischen System dürfte besonders der Hippocampus für die Konsolidierung des Gedächtnisses von Bedeutung sein, während im *Nucleus amygdalae* das Wahrgenommene seine emotionelle Bedeutung (seinen affektiven Tonus) erhält, wie aus elektrischen Reizungen bei Gehirnoperationen geschlossen werden konnte. Nach Gloor (1986) dürfte dieser Kern des limbischen Systems auch maßgeblichen Anteil am Akt des Erinnerns haben.

Die Rolle des präfrontalen Kortex beim Musikhören läßt sich noch

nicht so klar festlegen. Das rührt nicht zuletzt daher, daß die Funktion dieses Hirngebietes noch sehr wenig bekannt ist. Auch seiner Größe wegen kann es als »spezifisch« menschlicher Teil des Gehirns aufgefaßt werden, der selbst beim höchst entwickelten Affen, dem Orang, noch fünfmal kleiner ist als beim Menschen. Auf dessen Funktion kann man daher aus Tierversuchen nur höchst unzuverlässige Schlüsse ziehen; am meisten weiß man noch indirekt aus Ausfällen dieser Region beim Menschen. Allerdings variieren auch diese je nach der betroffenen Persönlichkeit. Im Vordergrund stehen dabei Verhaltensstörungen, soziale, komplexe, kognitive und expressive Störungen, vermehrte Ablenkbarkeit, besonders Störungen bei Aufgaben, die eine weitreichende Übersicht erfordern. Nach Nauta (1971) stellt der frontale Kortex ein Bindeglied zwischen limbischen Funktionen und neokortikaler Verhaltenskontrolle dar. Für Creutzfeldt (1985) obliegt dem präfrontalen Kortex vor allem die Anpassung emotioneller und motivatorischer Antriebe an die emotionellen und sozialen Umstände.

Ein Beispiel möge die Wahrnehmungsvorgänge beim Hören von Musik illustrieren: Wenn ein Konzertbesucher eine ihm wohl bekannte klassische Symphonie hört, so vergleicht er, ohne es zu wollen, in jedem Augenblick den Höreindruck mit in seiner Erinnerung gespeicherten Eindrücken desselben Stückes. Dabei mag er etwa diese oder jene Passage im Vergleich zu früher als ziemlich kühl oder gehetzt oder als nur so beiläufig hinmusiziert empfinden. Derartige Vorgänge laufen beim Wahrnehmen ständig mehr oder weniger bewußt ab; sie adäquat sprachlich zu formulieren, ist zumeist schwierig, wenn nicht unmöglich. Für diese innere, seelische Haltung dem Gehörten gegenüber ist zunächst das limbische System verantwortlich; hiervon ist jedoch die Rolle des präfrontalen Kortex, der Signale aus dem limbischen System erhält, nicht streng zu trennen.

Was hier kurz für die Verarbeitung akustischer Eindrücke geschildert wurde, gilt für alle Sinnessysteme. Jeder kognitive Akt läßt sich als eine Folge von Ereignissen in einem Kreisprozeß darstellen, wie Ulric Neisser (1976) überzeugend dargestellt hat:

Wenn sich die Aufmerksamkeit beim Hören auf eine Passage, eine



bestimmte Harmonie oder Melodie, richtet und diese Passage bereits einmal gehört wurde, so verändern die neuronalen Signale, die dieses akustische Muster in jedem Augenblick im Gehirn hervorruft, das geistige Bild, die Idee, die Vorstellung, das geistige Schema, das von diesem Klangobjekt bereits im Gehirn gespeichert vorliegt; durch den neuerlichen Eindruck wird es etwas modifiziert und übt seinerseits wieder einen Einfluß auf die zukünftige Wahrnehmung desselben Klangmusters aus, also der Passage, bei einer weiteren Wiederholung, und so fort. Wahrnehmen – und besonders aufmerksames Wahrnehmen – ist somit ein höchst aktiver Vorgang, bei dem das Gehirn ständig die aus den Sinnesorganen eintreffenden Erregungskonstellationen mit bereits im Gehirn abgespeicherten vergleicht, diese bewertet, Entscheidungen trifft, wie weit sie abgeändert werden sollen und diese neuen Konstellationen je nach der Bedeutung für die Person abspeichert; Wahrnehmen bedeutet somit ein ständiges Lernen. In Anlehnung an Heraklit – man steigt nie zweimal in denselben Fluß – kann man auch sagen: man sieht oder hört nie zweimal das gleiche Bild oder Stück. Die strukturelle Basis für diesen Vorgang sind die zahlreichen Möglichkeiten der Verbindungen zwischen den sensorischen Endstätten und den Orten der Speicherung und der emotionalen Färbung im Gehirn.

Der Vorgang des Wahrnehmens und die Vielfältigkeit der damit involvierten Aktivitäten ist am klarsten sichtbar beim Kleinkind, welches lernt wahrzunehmen: Durch wiederholtes Ansehen, Betasten, In-den-Mund-Stecken erforscht es seine Spielsachen und seine Umgebung und lernt, sie zu gebrauchen (Piagets »circular reaction«). Diese zyklischen Interaktionen modifizieren das initiale zerebrale Schema (Bartletts *Schema*, Tolmanns *cognitive map*, Thatcher und Johns *representational system*); die offensichtliche Lust, mit der das Kind diese Aktivitäten wiederholt, ist wahrscheinlich verwandt dem Vergnügen, eine bestimmte Komposition immer wieder zu hören, wobei die Fähigkeit, akustisch antizipieren zu können, sehr zum Hörvergnügen beiträgt.

Letztlich liegen derartige Lernprozesse jedem Wahrnehmungsvorgang zugrunde, auch dem Hören von Musik. Denn Lernen

bedeutet Schaffen neuer geistiger Schemata, neuer neuronaler Erregungskonstellationen als isomorpher Abbildungen von Situationen der Außenwelt, die durch Wiederholungen umgeformt und präzisiert werden.

Eine weitere, wesentliche Arbeit, die das Gehirn dabei zu leisten hat, ist die Selektion aus der angebotenen Information. Die Fülle der mit jedem perzeptiven Akt zum Nervensystem gelangenden Information ist so groß, daß das Nervensystem daraus auswählen muß, um sie überhaupt bewältigen zu können. Wie diese Selektion erfolgt, gehört zu den großen, noch weitgehend ungelösten Rätseln der Hirnforschung. Und dabei ist es gerade diese Fähigkeit zur Selektion von für das Individuum wesentlicher Information, die das Gehirn zu dessen spektakulärster Leistung befähigt: zum Erkennen und Verarbeiten von Symbolen. Ohne diese Eigenschaft seines Gehirns hätte der Mensch keine Sprache erwerben können, denn Wörter sind Symbole für Gegenstände, für Beziehungen zwischen Gegenständen, für das Geschehen an Gegenständen, ja sogar für Gehirnvorgänge selbst. Und jeder Gegenstand der bildenden Kunst ist ein Symbol für ein beobachtetes oder imaginiertes Stück Welt. Die persönliche Bedeutung eines bestimmten Kunstwerks für den Betrachter hängt davon ab, welche Erinnerungsschichten dieses Symbol in ihm zum Mitschwingen anregt.

Im übrigen bestätigt hier die moderne Neurophysiologie nur, was in der Musikwissenschaft schon lange vermutet wurde: So schreibt Hugo Riemann (1916, S. 1) in seinen *Ideen zu einer Lehre von den Tonvorstellungen*: »Das Alpha und Omega der Tonkunst ist gar nicht die wirklich klingende Musik, sondern vielmehr die in der Tonphantasie des schaffenden Künstlers vor der Aufzeichnung in Noten lebende und wieder in der Tonphantasie des Hörers neu erstehende Vorstellung der Tonverhältnisse«. Und Zofia Lissa schreibt (1974/1983): »Der Empfangsakt von Musik ist zugleich ein Akt der Interpretation, der den Platz des Werkes im Bewußtsein des Hörers bestimmt«.

Auch das Hörenlernen von neuen musikalischen Strukturen erfolgt auf diese Weise und wir haben bereits 1982 vermutet, daß sich

solche Prozesse auch im EEG äußern: Das Verknüpfen von Nervenzellverbänden zu neuen Erregungskonstellationen in verschiedenen Hirnregionen im Zusammenhang mit Musik.

Dazu kommt noch etwas, worauf Mandler (1984) hingewiesen hat und das weitgehend im Einklang mit unseren Ergebnissen steht: Mandler sieht in der unbewußten Erwartungshaltung einen wesentlichen Bestandteil jedes kognitiven Aktes. Dazu ein Beispiel.

Wenn ich durch einen Wald gehe, ist meine Erwartungshaltung auf Bäume, Äste, Blätter, Sträucher, Farn, Moos, die vorherrschende Farbe grün und noch mehr eingestellt. Diese Erwartung wird durch das Erlebnis des Waldes auch in hohem Maße erfüllt. Doch treten unentwegt unerwartete kleine Ereignisse ein, die meine Aufmerksamkeit besonders erwecken und die dazu beitragen, aus dem allgemeinen Begriff »Wald« für mich ein spezielles Erlebnis eines bestimmten Waldstückes zu formen: etwa ein gestürzter Baum, ein unbekannter Vogelruf, ein scheuendes Wild. Alle diese kleinen besonderen Erlebnisse, die den Begriff »Wald« aus dessen Abstraktheit einer platonischen Idee auf die persönliche Erlebnisebene rücken, stellen dem Gehirn kleine Aufgaben, regen es zur Lösung kleiner Probleme an: etwa, einen günstigen Umweg um den gestürzten Baum zu finden, im Gedächtnis nach dem Namen des Vogels oder des Wildes zu suchen. Wesentlich ist dabei die Anregung des Gehirns durch die neue Situation, die die Gehirntätigkeit kurzzeitig auf ein etwas höheres Vigilanzniveau hebt, eine minimale Weckreaktion nach sich zieht, worauf ich noch zurückkommen werde.

Daß auch bei dem Erlebnis des Waldes emotionalen Faktoren eine weitreichende Bedeutung zukommt, muß wohl kaum betont werden. Persönlich wird jedes Erlebnis weitgehend nach solchen Faktoren gewertet.

Kehren wir wieder zur Musik zurück: Worte reichen nicht aus, ja können gar nicht imstande sein, die Vielfalt emotionaler Regungen zu beschreiben, die der Hörer beim bewußten Zuhören in einem Konzert empfindet: Neben dem intellektuellen Mitverfolgen der Klangarchitektur werden vor allem Emotionen erweckt – darunter sind nicht nur positive zu verstehen, also solche, die das Lebensge-

fühl erhöhen; auch negative emotionelle Regungen stellen sich ein, etwa das Empfinden von Langeweile.

Überlegen wir kurz, welche Momente im Klangangebot dafür maßgeblich sein könnten, ob positiv oder negativ gefärbte Emotionen im Hörer erregt werden. Um nicht zu weit auszufern, betrachten wir nur *eine* emotionelle Stimmung, die wohl kaum je ein Komponist bei seinen Zuhörern beabsichtigt, die aber dennoch nicht so selten eintritt: Die Langeweile. Reizarme Situationen, die dem Gehirn keine neuen Aufgaben stellen, werden vom Gehirn mit einer derartigen Emotion beantwortet. Ewiges C-Dur wirkt so auf den heutigen Hörer und wird, wenn es lange genug anhält, möglicherweise sogar aggressive Gefühle aufkommen lassen. Das Gehirn braucht Abwechslung, kleine Problemstellungen in der Sinneswelt, kleine akustische, nicht erwartete Änderungen im Laufe eines Stückes. Allerdings dürfen solche Abwechslungen auch nicht zu häufig vorkommen. Der unvorbereitete Hörer wird ebenso ratlos sein, wenn die Musik aus einer gedrängten Häufung von unerwarteten Abwechslungen besteht, wie wenn sie nur der Hörerwartung entspricht – also etwa Festhalten an einer Tonart oder endlose Sequenzen. Graphisch kann man diese Beziehung zwischen Hörpräferenz und Komplexität der Musik durch eine umgekehrte U-Funktion darstellen (Komplexität auf der X-Achse, Hörpräferenz auf der Y-Achse). Besonders vorgezogen wird Musik, die weder zu sehr noch zu wenig komplex ist (der Gipfel des umgekehrten »U«): Beim Experten verschiebt sich dieser Gipfel nach rechts, zu Musik komplexerer Struktur. Die Gültigkeit einer solchen Beziehung ist sowohl auf visuellem wie auch auf akustischem Gebiet mehrfach bestätigt worden (Literatur bei Dowling and Harwood, 1986).

Über die Kunst hinaus darf man diese Beziehung auf jede Situation ausdehnen, die für den Menschen intellektuell und/oder emotionell nicht ganz bedeutungslos ist. Ein Beispiel ist das Erlebnis der Natur durch Wandern, Bergsteigen, Segeln, Reiten – bei all diesen Tätigkeiten erweckt die Natur im Menschen eine Fülle von emotionellen Reaktionen. Der Wanderer ist schon viele Male durch einen Wald gegangen oder hat einen Berg bestiegen – das Erlebnis ist jedes Mal

ein anderes. Jeden Augenblick können unerwartete Sinneseindrücke neue Akzente setzen, die mehr oder weniger tiefe Spuren in der Erinnerung hinterlassen. Perioden von Redundanz wechseln mit solchen eines dichten Informationsangebotes ab.

Wie bereits erwähnt, haben Mandler (1984) und speziell für die Musik Berscheid (1983) im Zusammenhang mit dem Erleben auf die besondere Bedeutung der Erwartungen hingewiesen, die durch die im Gehirn gespeicherten »Schemata« (Erregungskonstellationen) produziert werden. Sobald diese Erwartungen nicht erfüllt werden, d.h. das Informationsangebot größer wird (»Neues« angeboten wird), kommt es zu einer mehr oder weniger starken »Weckreaktion«, einem biologischen Signal, das den Körper von dieser neuen Situation benachrichtigt (möglicherweise ist dieser Vorgang entwicklungsgeschichtlich zu erklären: für das Tier bedeutet jeder neue ungewohnte Reiz eine Alarmsituation, die mit zahlreichen vegetativen Umstellungen verknüpft ist, die dem Tier, wenn nötig, eine rasche Flucht ermöglichen). Die Aufmerksamkeit nimmt augenblicklich für kurze Zeit zu.

Und hier gibt es wieder eine Anknüpfung zum EEG; denn eine Zunahme der Aufmerksamkeit äußert sich drastisch im EEG. Bereits der Entdecker des EEG beim Menschen, Hans Berger, hat diese Reaktion beobachtet und als *Weckreaktion* bezeichnet (arousal reaction): So kommt es etwa beim Öffnen der Augen zu einer Abnahme des Alfarhythmus und einer Zunahme höher frequenter Rhythmen. Für das Gehirn bedeutet es nämlich eine gewaltige Umstellung, wenn die Augen geöffnet werden und plötzlich eine ungeheure Zahl visueller Eindrücke eintrifft, die nach ihrer Bedeutung für das Individuum gewichtet und in den Sehzentren verarbeitet werden müssen. Heute, mehr als 50 Jahre nach Bergers Entdeckung, verfügen wir über weitaus bessere apparative Möglichkeiten, solche Reaktionen mit dem EEG nachzuweisen und können auch Schwankungen der Aufmerksamkeit untersuchen, die durch wesentlich geringere Änderungen des sensorischen Informationsangebotes als beim Öffnen der Augen bedingt sind. Nach unseren bisherigen Ergebnissen halte ich es für sehr wahrscheinlich, daß an jenen Reaktionen, die auf

bestimmte geistige Leistungen im EEG zu sehen sind, lokale, mehr oder weniger intensive Arousal-Reaktionen in Zusammenhang mit Vigilanzänderungen beteiligt sind.

Der Begriff *Vigilanz* wurde zwar schon 1923 durch Head geprägt, eine klare Begriffsbestimmung gibt es aber noch immer nicht. Head verstand darunter eine neurodynamische Größe, die den Organisationsgrad des aktuellen Verhaltens und dessen adaptives Niveau bestimmt. Dimond und Lazarus (1974) verstehen unter Vigilanz ein Maß an Wahrscheinlichkeit, daß ein Tier zu einem gegebenen Zeitpunkt ein gegebenes Signal entdecken kann. In einer größeren Studie definierte Koella (1982) Vigilanz als die Bereitschaft des Organismus, auf einen inneren oder äußeren Reiz mit einem adäquaten, in Qualität und Quantität auf das Wohlbefinden und Überleben des Individuums ausgerichteten Verhaltensakt zu reagieren. Da jedes Verhalten – auch Perzeption ist ein Verhaltensakt – letztlich Manifestation eines spezifischen neuronalen Erregungsmusters ist, wie oben ausgeführt wurde, ist dessen Ausprägung auch von der lokalen Reaktivität des Gehirns abhängig. Der wesentliche Aspekt bei dieser von Koella gegebenen Definition ist die Fokussierung, die Selektion der an einem Verhaltensakt beteiligten Systeme (wobei die Fokussierung keineswegs nur örtlich aufgefaßt werden darf). Auf die vermutliche Bedeutung von Transmittersystemen und Polypeptiden für diese Steuerung der Vigilanz weist Koella besonders hin.

Änderungen der Vigilanz äußern sich im EEG. Dabei müssen aber einige alte »Dogmen« aufgegeben werden, so etwa die noch vielfach verbreitete Behauptung, daß zunehmende Vigilanz immer mit einer generellen Beta-Vermehrung einhergeht. Wir finden eine solche zwar beim Lesen (über der hinteren Schädelhälfte signifikant zwischen 24 und 32 Hz), doch beim Kopfrechnen, bei dem die Aufmerksamkeit vielleicht sogar noch mehr beansprucht wird, fehlt diese Aktivierung.

Auch haben wir gelernt, daß bisher noch kaum beachtete Parameter, wie die Kohärenz – als Maß für den Grad der Verkopplung von Aktivitäten zweier Hirnregionen – bei weitem mehr und aufschlußreichere Daten bringen können als die bloße Registrierung der

Leistung in einem bestimmten EEG-Frequenz-Bereich. Durch Kohärenz-*Mapping* konnte etwa festgestellt werden, daß beim Lesen im Alphabereich die beiden hinteren Hälften der Hemisphären signifikant stärker entkoppelt werden als ohne visuelle Tätigkeit, während beim Kopfrechnen viel mehr die vorderen Hälften der Hemisphären entkoppelt werden.

Dazu kommt noch ein weiteres EEG-Phänomen, das erstmals von Grey Walter 1964 bei Konditionierungsversuchen mit Doppelreizen beobachtet wurde: eine ausgedehnte Negativierung über dem Stirnhirn (CNV = contingent negative variation), die unter bestimmten Bedingungen zwischen diesen beiden Reizen auftritt und mit dem Informationsgehalt der Stimuli variiert. Ursprünglich wurde diese Potentialschwankung mit *Erwartungswelle* bezeichnet; doch dürften die Beziehungen zwischen dem Informationsangebot und der Reaktion des Gehirns darauf wesentlich komplexer sein als der Begriff »Erwartung« beinhaltet. Dieses Phänomen ist inzwischen zu einem vielfach benützten methodischen Instrument in der Psychophysiologie geworden.

Auch solche Vorgänge sind beim Hören von Musik zu erwarten.

Wenn ich somit kurz zusammenfasse, auf welche Faktoren die Änderungen der elektrischen Gehirntätigkeit während des Musikhörens zurückgeführt werden können, sind wahrscheinlich folgende zu nennen:

- a) Assoziations- und Erinnerungsvorgänge durch Aktivierung nicht primär sensorischer Hirnregionen: elektrophysiologischer Ausdruck des Aufbaus von Erregungskonstellationen im Zusammenhang mit Wahrnehmung (Bartletts *schemata*, Thatcher und Johns *representational systems*, Tolmans *cognitive maps*),
- b) regionale Schwankungen des Vigilanzniveaus,
- c) Vorgänge im Zusammenhang mit CNV (wahrscheinlich vorwiegend im niedrigsten Frequenzbereich des EEG),
- d) emotionelle Reaktionen durch Aktivierung limbischer Strukturen,
- e) mit Habituation in Verbindung stehende Hirnvorgänge,
- f) wahrscheinlich nur sehr gering, wenn überhaupt: direkte Verar-

beitung von Schallereignissen durch den akustischen Kortex.

Diese Auflistung soll allerdings nicht zur Annahme verleiten, daß es sich dabei um streng getrennte Kategorien von Hirnvorgängen handelt. Da eine Beschreibung nur mit Hilfe von Wörtern, somit Symbolen, möglich ist, und diese Symbole auf dem vorliegenden Gebiet besonders vieldeutig sind, kann eine solche Aufzählung nicht mehr sein als ein Hinweis auf die Vielfalt geistig-seelischer Vorgänge, die mehr oder weniger Ausdruck im EEG finden können.

Dazu noch als letztes Beispiel eine Gegenüberstellung der Ergebnisse jener drei Personen einer Gruppe von 19 Musikstudenten, die beim Hören von Mozart Langeweile empfanden und denen diese Art von Musik »nichts bedeutet«, wie sie sagten, und der Ergebnisse dreier Studenten, die das Quartett zwar nicht kannten, aber interessiert zuhörten und sich dazu positiv äußerten.

Ohne weitere statistische Verfahren bemühen zu müssen, kann man aus Abb. 1 entnehmen, daß die signifikanten Änderungen der Leistung in der Gruppe der Interessierten zahlreicher sind und sich über mehr Frequenzbänder erstrecken als in der Gruppe der nicht Interessierten.

Dasselbe gilt auch für die Kohärenzen zwischen benachbarten Elektroden, wobei auffällt, daß besonders die niedrigen Frequenzen, wie Alpha und Theta, bei den interessiert Zuhörenden viel stärker von signifikanten Änderungen betroffen werden als bei den Uninteressierten (Abb. 2).

Fast noch deutlicher sind die Unterschiede bei den interhemisphärischen Kohärenzen (Abb. 3). Dabei überwiegen insgesamt Abnahmen bei den interessierten Hörern. D.h. bei jenen, die Mozart interessiert zuhören, neigen die beiden Hirnhälften mehr dazu, voneinander unabhängig zu arbeiten.

Um mehr über die Bedeutung dieser Unterschiede sagen zu können, wird es notwendig sein, von psychologischer Seite ein genaueres und umfangreicheres Frageninventar auszuarbeiten und dann weitere Untersuchungen durchzuführen. Beide Wege werden gegangen.

Als letztes möchte ich noch von der Warte der Neurophysiologie aus kurz eine Frage beleuchten, die in diesem Zusammenhang



SIGNIFIKANTE ÄNDERUNGEN ( $2P < 0.05$ )

RUHE VOR : MOZART

ABSOLUTE LEISTUNG

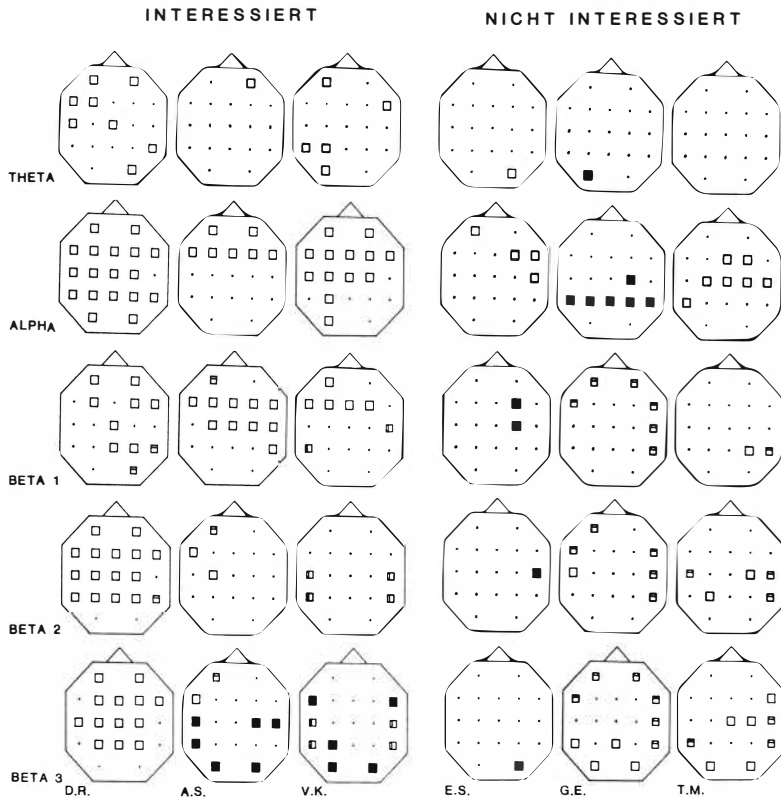


Abb. 1: Gegenüberstellung der statistisch signifikanten Änderungen der EEG-Leistung beim Hören des 1. Satzes des Jagdquartetts von Mozart (KV 458) bei drei interessiert zuhörenden (links) und drei nicht an Mozart interessierten Musikstudenten, aufgeschlüsselt nach 5 Frequenzbändern, Theta bis Beta 3.

Schematische Aufsicht auf den Kopf mit 19 gleichmäßig verteilten Elektroden (Ableitung gegen verbundene Ohren). Vergleich 1 min Ruhe-EEG mit 1 min Musik (beidohrig über Kopfhörer, Augen geschlossen).

Signifikante Zunahmen der EEG-Leistung sind durch schwarze, Abnahmen durch weiße Quadrate gekennzeichnet. (Weiße Quadrate mit einem senkrechten bzw. waagerechten Strich zeigen ebenfalls Zu- bzw. Abnahme der Leistung an, jedoch sind die Elektroden durch Artefakte von Muskeln oder Augenbewegungen gestört, die Werte daher nicht zuverlässig).

Bei den interessiert zuhörenden Musikstudenten kommt es über weiteren Regionen und in mehr Frequenzbändern zu einer Reduktion der EEG-Leistung als bei den nicht interessiert Zuhörenden.

SIGNIFIKANTE ÄNDERUNGEN ( $2P < 0.05$ )

RUHE VOR : MOZART

KOHÄRENZ

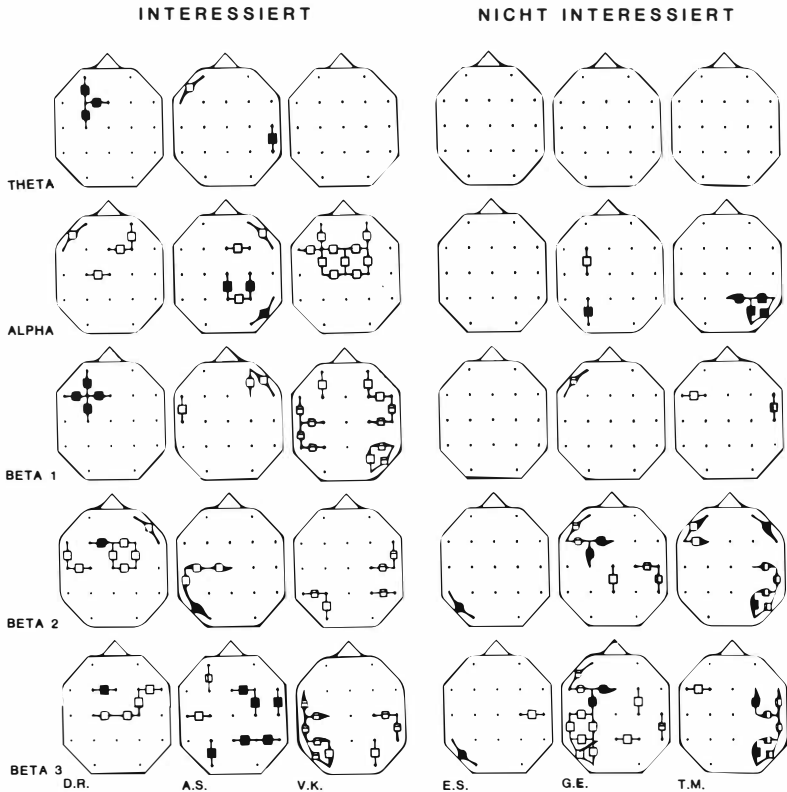


Abb. 2: Dieselben Vpn. wie in Abb. 1, jedoch statistisch signifikante Änderungen der Kohärenz zwischen benachbarten Elektroden (die Kohärenz ist ein Maß für den Grad der funktionellen Kopplung der Aktivitäten zwischen zwei Ableitpunkten). Im übrigen Legende wie zu Abb. 1.

Bei den Interessierten kommt es beim Hören von Mozart zu mehr und zu ausgedehnteren Kohärenzänderungen als bei Nicht-Interessierten. Insbesondere betreffen bei den interessiert Zuhörenden die Veränderungen auch mehr das Alpha- und Beta-1-Band.

zunächst vielleicht unpassend erscheinen mag, weil sie bisher nur Gegenstand der Musikästhetik war, nämlich die Frage: Was macht das musikalische Erleben zu einem Bedürfnis für viele Menschen?

Ich habe zuvor ein Moment erwähnt, das offenbar für jeden Menschen mit Lustgewinn verknüpft ist: die mit jeder neuen Wahrneh-

SIGNIFIKANTE ÄNDERUNGEN ( $2P < 0.05$ )

RUHE VOR : MOZART

INTERHEMISPÄRISCHE KOHÄRENZ

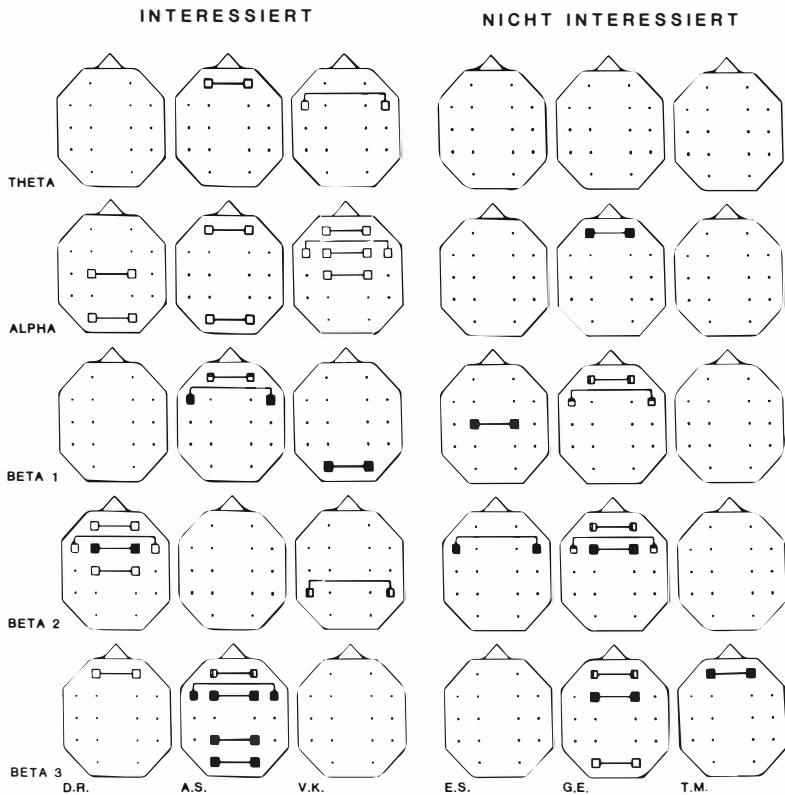


Abb. 3: Signifikante Änderungen der interhemisphärischen Kohärenz (zwischen homologen Ableitpunkten über beiden Hemisphären). Im übrigen Legende wie zu Abb. 1.

Ebenso wie in Abb. 2 ändert sich die funktionelle Kopplung auch zwischen homologen Punkten an beiden Hemisphären häufiger bei interessiert als bei nicht interessiert Zuhörenden. Insbesondere überwiegt in der ersten Gruppe die Entkopplung beider Hemisphären in den unteren Frequenzbändern; d.h. die Hemisphären arbeiten beim interessierten Hörer selbständiger als in Ruhe, ohne akustischen Reiz.

mung dem Gehirn gestellte Aufgabe, ein kleines Problem zu lösen und die mit dessen Lösung verknüpfte Steigerung des Lebensgefühls. Auch dieser Akt liegt in der Programmierung des menschlichen Gehirns begründet und dient letztlich dem eigentlichen Ziel, zu dem sich das Gehirn entwickelt hat: Seinem Träger, dem Menschen, opti-

male Voraussetzungen für das Leben in einer ihm, wenn schon nicht nur feindlich, so doch weitgehend gleichgültig gegenüberstehenden Umwelt zu bieten, d.h. ihm das Leben nicht nur zu erleichtern, sondern auch zu verschönern, lebenswerter zu machen. Diesem Ziel dienen jedem Lebewesen angeborene Tendenzen, die man beim Tier als Triebe, beim Menschen als Bedürfnisse bezeichnet. Der Unterschied zwischen diesen beiden Begriffen liegt nicht nur in der größeren Reichhaltigkeit der letzteren, sondern auch darin, daß beim Menschen Erziehung und Lernen in hohem Maße dazu imstande sind, die Bedürfnisse zu verfeinern und das zu schaffen, was wir unter Kultur verstehen. Beim experimentellen Studium der Triebe im Tierexperiment zeigte sich, daß bestimmte Strukturen in der Tiefe des Gehirns, die sogenannten *reward systems* (Belohnungssysteme) für die Steigerung des Lebensgefühls eine wesentliche Rolle spielen. Aber auch beim Menschen konnten in jüngster Zeit bei Gehirnoperationen in der Tiefe des Gehirns Regionen entdeckt werden, bei deren elektrischer Reizung emotionale Vorgänge ausgelöst werden, die durch freudige Stimmung gekennzeichnet sind. Wahrscheinlich werden derartige Regionen physiologisch aktiviert, wenn bestimmte, rein menschliche, kulturell bedingte seelische Reaktionen auftreten, etwa die Genugtuung über ein gelöstes Problem, Freude an einem Kunstwerk, Liebe zu einer Person oder einer Aktivität, oder auch die Lust am Reisen und an den damit verbundenen neuen Eindrücken. Ich glaube nicht, daß Sigmund Freud mit seiner Aussage, der Mensch strebe das Nichtstun an, recht hat; er strebt jedes, wie auch immer geartetes Tun an, aus dem ihm Befriedigung erwächst. Und dieses Tun kann sehr verschiedener Art sein – Nichtstun ist nur eine, wenn auch weitverbreitete Möglichkeit.

## Summary

This review consists of two parts: in the first a method is outlined that has been designed for the detection of EEG changes due to mental performances, particularly to listening to music. This method is

based on statistical evaluations of EEG power and coherence changes during mental performances. According to the results obtained up to now, this method is thought probably to attain some significance for an objectivation of musical ability.

The second and larger part of this paper is dedicated to the possible informational content of the EEG with respect to music perception. Most likely, the information hidden in the EEG waves is multifarious and the author assumes that the present available psychological strategies to disentangle this webwork of different information are not yet sophisticated enough to unveil some of its strands. Moreover, some general ideas on what may happen in the brain during the evaluation of works of art are developed. Finally it is stressed that, in general, a penchant for art may be considered as a particular case of problem solving needed by the human brain to be kept in good functional condition. Thus, aesthetics would devote itself to the service of the brain in those fortunates drawn to the arts.

## Literatur

- F.C. Bartlett, *Remembering*, Cambridge England 1932: Cambridge University Press.
- E. Berscheid, Emotion, in: H.H. Kelly (Hrsg.), *Close relationships*, San Francisco 1983: W.H. Freeman and Co.
- O.D. Creutzfeldt, *Cortex cerebri*, Berlin-Heidelberg-New York-Tokio 1983: Springer-Verlag.
- S. Dimond, J. Lazarus, The problem of vigilance in animal life. *Brain Behav. Evol.* 9, 1974, 60-79.
- J.W. Dowling, D.L. Harwood, *Music cognition*, Orlando-San Diego-New York 1986: Academic Press.
- Th. Gasser, P. Bächer, H. Steinberg, Test-retest reliability of spectral parameters of the EEG. *Electroenceph. clin. Neurophysiol.* 60, 1985, 312-319.
- P. Gloor, Role of the human limbic system in perception, memory and affect: Lessons from temporal lobe epilepsy, in: B.K. Doane and K.E. Livingston (Hrsg.) *The limbic system*, New York 1986: Raven Press, 159-169.
- H. Head, The conception of nervous and mental energy, II. Vigilance, a physiological state of the nervous system, *British Journal of Psychology* 14, 1923, 125-147.
- W.P. Koella, A modern neurobiological concept of vigilance, *Experientia* 38, 1982, 1426-1437.
- Z. Lissa, Zur Theorie der musikalischen Rezeption, in: H. Rösing (Hrsg.), *Rezeptionsforschung in der Musikwissenschaft*, 361-376, Darmstadt 1983: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- G. Mandler, *Mind and body*, New York 1984: Norton.
- W.J.H. Nauta, The problem of the frontal lobe. A reinterpretation. *J. Psychiat. Res.* 8, 1971, 167-187.
- U. Neisser, *Cognition and reality. Principles and implications of cognitive psychology*, San Francisco 1976: W.H. Freeman and Co.

- I. Peretz, Différences hémisphériques dans les habiletés musicales, Dissertation, Université libre de Bruxelles, 1983.
- H. Petsche, H. Pockberger, P. Rappelsberger, EEG studies in musical perception and performance, in: R. Spintge und R. Droh (Hrsg.), *Musik in der Medizin*, 1985 a: Edition Roche, 31–60.
- H. Petsche, H. Pockberger, P. Rappelsberger, Musikrezeption, EEG und musikalische Vorbildung, *EEG-EMG* 16, 1985 b, 183–190.
- H. Petsche, H. Pockberger, P. Rappelsberger, EEG topography and mental performance, in: F.H. Duffy (Hrsg.), *Topographic mapping of the brain*, Stoneham 1986: Butterworth, 63–98.
- J. Piaget, The construction of reality in the child, New York 1954: Basic Books.
- H. Riemann, Ideen zu einer »Lehre von den Tonvorstellungen«, *Jahrbuch der Musikbibliothek Peters* 21/22, 1914–15, Leipzig 1916.
- P. Ross, Grundlagen einer musikalischen Rezeptionsforschung, in: H. Rösing (Hrsg.), *Rezeptionsforschung in der Musikwissenschaft*, Darmstadt 1983: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 377–418.
- R.W. Thatcher, E.R. John, Foundations of cognitive processes, New Jersey 1977: Lawrence Erlbaum Associates.
- E.C. Tolman, Cognitive maps in rats and men, *Psychological Review* 55, 1948, 189–208.
- W.G. Walter, The contingent variation. An electrocortical sign of significant association on the human brain. *Science* 146, 1964, 434.

## Anmerkung

Diese Arbeit wurde durchgeführt mit Unterstützung der Herbert von Karajan-Stiftung der Gesellschaft der Musikfreunde in Wien.