

# **Transkranielle Dopplersonographie und musikalische Wahrnehmung**

Jörn Dannert (Universität Dortmund),  
Stefan Evers (Westfälische Wilhelms-Universität Münster),  
Günther Rötter (Universität Dortmund)

## **Zusammenfassung**

Es wurde eine Studie an der arteria cerebri media mit Hilfe der Transkraniellen Dopplersonographie (TCD) durchgeführt, um Veränderungen in der mittleren Blutflußgeschwindigkeit während des Hörens unterschiedlicher Musikbeispiele zu untersuchen. Die Blutflußgeschwindigkeit gilt als Indikator für die erhöhte Aktivität einer Hemisphäre (Lateralisation). Vierundzwanzig rechtshändige Probanden wurden in einer Ruhephase und während des Hörens der Beispiele mit Sprache, rhythmisch betonter und „harmonisch betonter“ Musik getestet. Das Geschlecht, die musikalische Erfahrung und die Hörweise der Probanden wurden als unabhängige Variablen gewählt, die Hörbeispiele und die Messungen an linker und rechter Hemisphäre stellten die meßwiederholten Faktoren dar. Unsere Ergebnisse zeigen, daß musikalische Laien und Fachleute unterschiedliche Strategien der Lateralisation besitzen. Laien zeigten bei der Wahrnehmung von Harmonien ein Anwachsen der Blutflußgeschwindigkeit in der rechten Hemisphäre, aber nicht während eines rhythmisch betonten Musikbeispiels. In allen Gruppen war die Wahrnehmung von Sprache links lateralisiert. Die Musiker zeigten vorwiegend linkshemisphärische Aktivierung, die unabhängig von der Art des Hörbeispiels war. Probanden, die Musik eher im Hintergrund hörten, zeigten höhere rechtshemisphärische Werte während der Wahrnehmung von harmonisch-melodisch betonter Musik, unabhängig von ihrer musikalischen Erfahrung. Die Zeitdauer bis der Höhepunkt der Lateralisation erreicht war, dauerte signifikant länger bei Laien, dies galt für das rhythmisch und das „harmonisch betonte“ Hörbeispiel.

## **Summary**

We performed a study with Transcranial Dopplersonography (TCD) of the middle cerebral artery to evaluate changes in blood flow velocity (CBFV) during different periods of music perception. Twenty-four healthy right-handed subjects enrolled and examined during rest and during listening to periods of music with predominant language, rhythm and harmony content. The gender, musical experience and mode of listening of the sub-

jects were chosen as independent factors; the type of music was included as the variable in repeated measurements. We observed a significant increase of CBFV in the right hemisphere in non-musicians during harmony perception but not during rhythm perception. Language perception was lateralized to the left hemisphere in all subject groups. Musicians showed increased CBFV values in the left hemisphere which were independent of the type of stimulus, and background listeners showed increased CBFV values during harmony perception in the right hemisphere which were independent of their musical experience. The time taken to reach the peak of CBFV was significantly longer in non-musicians when compared with musicians during rhythm and harmony perception. Our data suggest that musicians and non-musicians have different strategies to lateralize musical stimuli, with a delayed but marked right hemisphere lateralization during harmony perception in non-musicians and an attentive mode of listening contributing to a left hemisphere lateralization in musicians.

## 1. Bisherige Studien zur Lateralisation

Eine große Anzahl von Studien zur Physiologie der musikalischen Wahrnehmung beschäftigt sich mit der Frage, ob Musik in den beiden Hirnhälften unterschiedlich verarbeitet wird. Unterschiedlichste Methoden fanden dabei Verwendung: z.B. die Positronen-Emissionstomographie (PET), Elektroenzephalographie (EEG) und Ultraschalluntersuchungen. Dabei lassen sich drei hauptsächliche Probleme feststellen: Zunächst sind in einigen Untersuchungen intersubjektive Differenzen unberücksichtigt geblieben, wie z.B. das Geschlecht, die Rechts- und Linkshändigkeit und die musikalische Erfahrung. Zum zweiten ist die Art der Musik, ihre Sprachähnlichkeit und die Haltung der Probanden gegenüber der Musik oft nicht berücksichtigt worden. Vor allem wurde die Wirkung einfacher musikalischer Stimuli untersucht, wie z.B. das Unterscheiden von Intervallen, Akkorden oder Klangfarben. Komplexere musikalische Strukturen wurden oft nicht getestet. Drittens wurden kurzzeitige Veränderungen der Lateralisation im Sekundenbereich nicht berücksichtigt. Dennoch gibt es einige bemerkenswerte Ergebnisse früherer Studien.

Bereits zu Beginn dieses Jahrhunderts wurden Untersuchungen an Hirnverletzten gemacht, die sich auf die musikalische Wahrnehmung bezogen (vgl. Henschen 1926). Es folgten neuropsychologische Untersuchungen zum dichotischen Hören, die zeigten, daß bei der Sprachwahrnehmung eine linkshemisphärische Dominanz eintritt und das bei der Wahrnehmung von Melodien die rechte Hemisphäre dominiert (Kimura 1961/1964), was sich auch für Aufgaben bei der Akkordunterscheidung und bei tonalen Zusammenhängen (Gordon 1970, Zatorre 1979, Mazzucchi et al. 1981) fand.

Bei all diesen Studien stellte man keine Geschlechtsunterschiede, keinen Einfluß der musikalischen Erfahrung oder Unterschiede bei Rechts- oder Linkshändern fest. Nach einer Untersuchung von Bever und Chiallo (1974) wurden diese Ergebnisse in der Weise differenziert, daß die Dominanz der rechten Hirnhälfte bei der Wahrnehmung von Melodien nur bei Laien zutrifft. Bei Experten aber, die Musik analysieren, findet eine linkshemisphärische Lateralisation statt, im Gegensatz zu Laien, die möglicherweise Musik eher ganzheitlich wahrnehmen. Dieses Ergebnis ist von einer ganzen Reihe weiterer Untersuchungen gestützt worden (Johnson 1977, Gordon 1978a, Peretz und Morais 1980, Hassler 1990). Sie zeigten, daß Probanden die musikalische Erfahrung besaßen, oder eine analytische und aufmerksame Haltung der Musik gegenüber hatten, eine Tendenz zur linkshemisphärischen Dominanz aufwiesen. Gaede et al. (1978) fanden einen Zusammenhang zur musikalischen Begabung, Messerli et al. (1995) stellten darüber hinaus fest, daß nicht nur die Höhe der musikalischen Kompetenz, sondern auch die Eigenschaften der Musik eine Rolle spielen. Zum Beispiel hat es einen Einfluß auf die Lateralisation, wie komplex das Stück ist, oder ob es sich um Musik mit Text handelt oder nicht. Die Hypothese der linkshemisphärischen Dominanz bei Musikern ist kürzlich auch durch morphologische Studien mit der funktionellen Magnetresonanztomographie (magnetic resonance imaging, MRI) unterstützt worden, die bei Musikern mit absoluter Tonhöhenwahrnehmung eine stärkere Aktivität des linken planum temporale feststellten (Schlaug et al. 1995). Diese Studie deckt sich auch mit den Ergebnissen einer weiteren Untersuchung in jüngster Zeit, welche zur Messung der kortikalen Repräsentation von Tönen ein anderes tomographisches Verfahren nutzte (Pantev et al. 1998). Hassler (1990) fand mit Hilfe von dichotischen Hörtests Geschlechtsunterschiede bei der Lateralisation während der musikalischen Wahrnehmung, die vermuten lassen, daß bei weiblichen Testpersonen im allgemeinen eine niedrigere Dominanz der linken Hemisphäre als bei männlichen Testpersonen vorherrscht. Ethnische Unterschiede sind von Cohen et al. (1989) in einer Studie mit Franko-Kanadiern und Chinesen ausgeschlossen worden.

Die Gehirnasymmetrie, die sich bei der Wahrnehmung von Sprache und Melodien zeigt, wurde bei der Verarbeitung von Rhythmus nicht gefunden. Studien zum dichotischen Hören wiesen eine Tendenz der linkshemisphärischen Dominanz bei der Verarbeitung von Rhythmen (Gordon 1978b) auf. Studien mit Hilfe des EEG ergaben bei Musikern keine signifikanten Unterschiede zwischen der linken und rechten Hemisphärenaktivierung, wenn Rhythmen gehört wurden (Beisteiner et al. 1994). Die eben erwähnte Studie und andere EEG-Studien (Davidson und Schwartz 1977, Hirshkowitz et al. 1978, Breitling et al. 1987, Altenmüller 1989) bestätigten eine Dominanz der rechten Hemisphäre bei musikalischen Laien, dies gilt auch für die Produktion von Melodien. Studien, bei denen eine Gehirnhälfte betäubt wurde, machen außerdem deutlich, daß die rechten Temporallappen Strukturen besitzen, die für das musikalische Gedächtnis eine

Rolle spielen (Loring et al. 1992, Plenger et al. 1996). Wird die rechte Gehirnhälfte betäubt, ist das Singen auf verschiedenen Tonhöhen nicht mehr möglich (Bogen und Gordon 1971, Gordon und Bogen 1974). Studien mit Hilfe des PET dokumentieren, daß bei der Unterscheidung von Klangfarben, Akkorden und Tonhöhen der Metabolismus der rechten Gehirnhälfte erhöht ist (Mazziotta et al. 1982, Zatorre et al. 1992). Sollen komplexere Aufgaben gelöst werden, z. B. die Erkennung von Tonhöhenveränderungen in musikalischen Sequenzen, ergibt sich ebenfalls ein erhöhter Stoffwechsel in der rechten Hemisphäre (Zatorre et al. 1994). Die jüngste Studie mit Hilfe des PET (Platel et al. 1997) zeigte, daß die linke Hemisphäre aktiviert wird, wenn es um die Vertrautheit von musikalischen Strukturen geht. Die rechte Hemisphäre weist auch hier bei Aufgaben zur Klangfarbenerkennung eine höhere Aktivität auf. Obwohl einige Untersuchungen dafür sprechen, daß es für getrennte musikalische Parameter auch getrennte Gehirnbereiche gibt, belegen andere Studien, daß es komplexe kognitive Strategien gibt (Sergent et al. 1992). Studien mit Hilfe des PET konnten jedenfalls nicht klären, welche Aktivierungsmuster innerhalb der ersten Sekunden einer Wahrnehmung auftreten, komplexere musikalische Strukturen wurden außerdem nicht untersucht. Viele der frühen Studien zum PET konnten durch andere Verfahren auch nicht repliziert werden, z. B. mit Hilfe des SPETC (single photon emission tomography) (Ryding et al. 1987, Formby et al. 1989).

In unserer Studie verwendeten wir die transkranielle Dopplersonographie der arteria cerebri media. Diese Arterie ist durch ihre anatomische Lage besonders für Ultraschallmessungen geeignet. Das verwendete Meßinstrument macht sich den Dopplereffekt zunutze, der Frequenzänderungen beschreibt, die entstehen, wenn sich Empfänger und Schallquelle relativ zueinander bewegen. Die Ursache dieses Phänomens liegt darin, daß den Empfänger unterschiedlich viele Schwingungen pro Zeiteinheit erreichen, je nachdem, ob sich der Abstand zwischen ihm und der Schallquelle verringert, vergrößert oder gleich bleibt. Dieser Effekt wird bei der Dopplersonographie auf folgende Weise ausgenutzt: Das Dopplergerät sendet über zwei links und rechts im Schläfenbereich angebrachte Sonden Ultraschallwellen mit einer Frequenz von etwa 2 MHz aus. Diese werden von den Blutkörperchen reflektiert und treffen auf einen ebenfalls in der Sonde befindlichen Empfänger. Da sich die Blutkörperchen entweder von der Sonde weg oder auf sie zu bewegen, verändert sich die reflektierte Frequenz, die dann vom Dopplergerät kontinuierlich aufgezeichnet wird. Mit diesem Meßinstrument sollte nun die hemisphärische Lateralisation während der Darbietung von Musik und Sprache untersucht werden, denn das Verfahren ist ein indirekter Indikator für eine Funktionsänderung im Gehirn. Eine erhöhte Funktionalität einer Hemisphäre hat einen höheren Energieumsatz zur Folge und bewirkt eine Veränderung des Gefäßsystems dergestalt, daß sich die Blutflußgeschwindigkeit dort erhöht.

Die Art der Musik, die musikalische Erfahrung, das Geschlecht und die Art der Aufmerksamkeit des Hörens, stellten die wichtigsten Faktoren

unserer Studie dar. Die transkranielle Dopplersonographie hat den Vorteil ein nicht-invasives Verfahren zu sein und sie spricht auf kleinste Veränderungen der Hirnfunktionen innerhalb kleiner Zeitabschnitte an. Der Nachteil der Methode ist, daß sie Hirnfunktionen räumlich nicht genauer zuordnen kann, sondern sich auf Funktionsunterschiede beider Hemisphären beschränkt. Die Validität und Reliabilität der transkraniellen Dopplersonographie ist in mehreren Studien gezeigt worden. Diese Untersuchungen richteten sich auf akustische Wahrnehmung, Sprachverarbeitung und Gedächtnis (Droste et al. 1989, Hartje et al. 1994, Silvestrini et al. 1994, Rihs et al. 1995, Knecht et al. 1996). Auf mathematische Aufgaben bezogen sich Drochte et al. und Kelly et al. (1992). Studien zur visuellen Verarbeitung finden sich bei Aaslid (1987), Konrad et al. (1989), Droste et al. (1989), Kelly et al. (1992), Silvestrini et al. (1994), Rihs et al. (1995). Lediglich eine Studie zur transkraniellen Dopplersonographie hat sich bisher mit der musikalischen Wahrnehmung befaßt (Mattheis et al. 1997). Die Autoren untersuchten musikalische Laien und fanden heraus, daß die Wahrnehmung von Melodien eine nicht signifikante Erhöhung der mittleren Blutflußgeschwindigkeit in der rechten Hemisphäre erzeugte. Die Wiedererkennung von Melodien ergab eine signifikante Erhöhung dieser Werte. In unserer Studie sollen die musikalische Erfahrung, das Geschlecht und unterschiedliche musikalische und sprachliche Reize zu einer differenzierteren Analyse führen. Besonderen Wert soll außerdem auf die kurzzeitigen Veränderungen der Blutflußgeschwindigkeit gelegt werden.

## 2. Beschreibung des Experiments

### 2.1 Probanden

24 rechtshändige Probanden, davon 12 männlich und 12 weiblich, nahmen an der Untersuchung teil. Das Alter der Probanden lag zwischen 22–33 Jahren. 14 Probanden waren Musikstudenten mit mindestens 10 Jahren Instrumentalunterricht und einer täglichen Übezeit von mindestens zwei Stunden. Die übrigen 10 Probanden hatten keine musikalische Erfahrung, spielten kein Instrument und hörten nicht regelmäßig Musik. Die Probanden wurden auf einem Fragebogen nach ihrer „normalen“ Art Musik zu hören gefragt. Sie sollten sich dazu äußern, ob sie Musik eher im Hintergrund hören ohne die musikalische Struktur zu analysieren oder ob sie Musik aufmerksam hören und die musikalische Struktur analysieren. 15 Probanden beschrieben sich als „Hintergrundhörer“ und neun als „aufmerksame Hörer“ (im folgenden als „Nebenbei-Hörer“ und „Zu-Hörer“ bezeichnet); beide Hörertypen fanden sich gleichermaßen unter musikalischen Laien und Experten ( $\chi^2 = 0.41$ ,  $p = 0.521$ ).

## 2.2 Meßinstrumente

Es wurde ein Meßgerät (Firma EME, Überlingen), welches mit Hilfe von Ultraschall und dem Dopplereffekt die Blutflußgeschwindigkeit erfaßt, verwendet. Zwei Ultraschallsonden konnten mit Hilfe eines Stirnbandes im Schläfenbereich an einer Stelle des Schädels plziert werden, die für den Schall besonders durchlässig ist (Ringelstein et al. 1990). Die Meßdaten wurden von einem speziell dafür eingerichteten PC registriert. Die erhobenen Daten zeigten die Blutflußgeschwindigkeit in der Einheit cm/sec.

## 2.3 Musikbeispiele

Den Probanden wurden nacheinander drei unterschiedliche akustische Reize dargeboten: Zum einen Rundfunknachrichten in deutscher Sprache (vier Auszüge à 30 Sekunden) und ein rhythmisches Musikbeispiel, nämlich eine Komposition der Rockband „Einstürzende Neubauten“ mit dem Titel „ZNS“ von dem Album „Halber Mensch“ (1989). Das Stück besteht aus elektronischen Rhythmen ohne Melodik oder Harmonik, wobei Geräusche und elektronische Effekte hinzugefügt werden. Als „harmonisch-melodisches“ Beispiel diente das vierstimmige Madrigal „Praesidium Sara“ von Orlando di Lasso aus dem Jahre 1568. Die Dauer der einzelnen Darbietungen betrug ca. zwei Minuten. Keines der Beispiele war den Probanden bekannt. Die drei Stücke wurden über Kopfhörer von einem CD-Player wiedergegeben, die mit Hilfe der shuffle-Funktion des CD-Players in zufälliger Reihenfolge dargeboten wurden.

## 2.4 Durchführung des Experiments

Alle Probanden wurden jeweils nachmittags in einem Raum der neurologischen Klinik der Westfälischen Wilhelms-Universität in Münster untersucht. Die Probanden nahmen zunächst auf einer Liege Platz. Nach der Anbringung des Stirnbandes mit den beiden Ultraschallsonden und den Kopfhörern wurden die Probanden gebeten, sich für ungefähr 10 Minuten auszuruhen und während der gesamten Untersuchung nicht zu sprechen, zu husten und zu kauen. Eine Aufzeichnung der baseline (= Blutflußgeschwindigkeit ohne akustische Signale) wurde innerhalb dieser Zeit für zwei Minuten vorgenommen. Daraufhin fand die Darbietung der drei Hörbeispiele in zufälliger Reihenfolge statt, wobei zwischen den Beispielen jeweils 20 Sekunden Pause bestanden. Während dieser Prozedur wurde die mittlere Blutflußgeschwindigkeit kontinuierlich und beidseitig getrennt aufgezeichnet. Die gemessenen Daten wurden mit einer speziellen Software analysiert und mit dem Software-Programm SPSS weiterverarbeitet.

## 2.5 Auswertung und Ergebnisse

### 2.5.1

Die Auswertung der Daten geschah zunächst mit Hilfe eines vierfaktoriellen varianzanalytischen Designs. Es sollte der Einfluß der musikalischen Erfahrung, des Geschlechts und der Art der akustischen Darbietung auf die Blutflußgeschwindigkeit untersucht werden.

Zwei der Faktoren stellten Meßwiederholungen dar. Folgende Faktoren wurden gebildet:

Faktor 1: „Laie/ Experte“ (zweifach gestuft)

Faktor 2: „Geschlecht“ (zweifach gestuft)

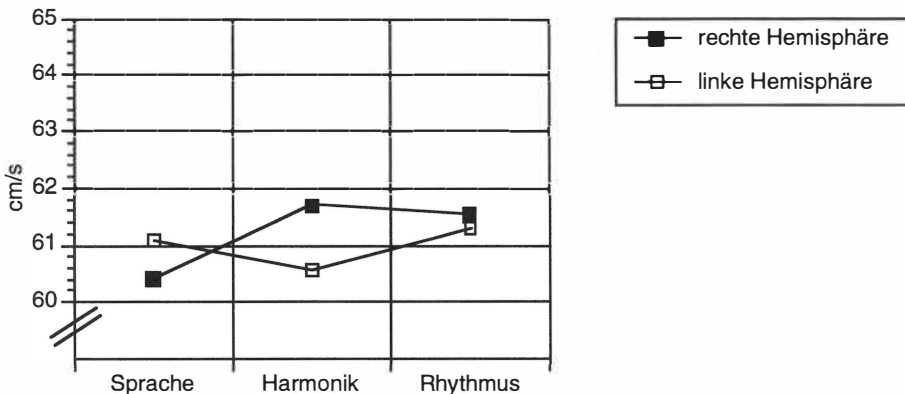
Faktor 3: „linke Hemisphäre vs. rechte Hemisphäre“ (zweifach gestuft mit Meßwiederholung)

Faktor 4: „Art der Darbietung“: Sprache, Rhythmus, Harmonik (dreifach gestuft mit Meßwiederholung).

Als abhängige Variablen dienten die linke und rechte Blutflußgeschwindigkeit, gemittelt über den gesamten Meßzeitraum einer Darbietung.

Von den vier Faktoren war der Faktor „Laie/ Experte“ tendenziell signifikant ( $F = 3,77$ ,  $df = 20;1$ ,  $p = 0,066$ , Mittelwert Laien = 55,74 ( $sd = 13,1$ ), Mittelwert Experten = 64,91 ( $sd = 10,18$ )). Der Faktor „Geschlecht“ wies keinen signifikanten Unterschied auf ( $F = 2,26$ ,  $df = 20;1$ ,  $p = 0,148$ , Mittelwert Frauen = 57,65 ( $sd = 14,12$ ), Mittelwert Männer = 64,53 ( $sd = 9,06$ )).

Als signifikant stellte sich die Interaktion zwischen der Art der Darbietung und der Blutflußgeschwindigkeit rechts/ links heraus ( $f = 4,93$ ,  $df = 40;2$ ,  $p = 0,019$ ).



**Abb. 1:**

Die Interaktion zwischen den Faktoren „linke versus rechte Hemisphäre“ und „Hörbeispiel- Sprache, rhythmisch betonte und harmonisch betonte Musik“. Als abhängige Variable dient die mittlere cerebrale Blutflußgeschwindigkeit, gemessen in cm pro Sekunde.

Das bedeutet, daß bei rhythmisch betonter Musik keine Lateralisation stattfindet, harmonische Verarbeitung eher auf der rechten Hemisphäre zu lokalisieren ist und sich bei der Sprachverarbeitung linkshemisphärische Dominanz zeigt, denn dort ist die Blutflußgeschwindigkeit höher.

## 2.5.2

Eine weitere Analyse arbeitete mit zwei Faktoren und sollte prüfen, ob musikalische Erfahrung und die Art der Darbietung einen Einfluß auf die Lateralisation hat.

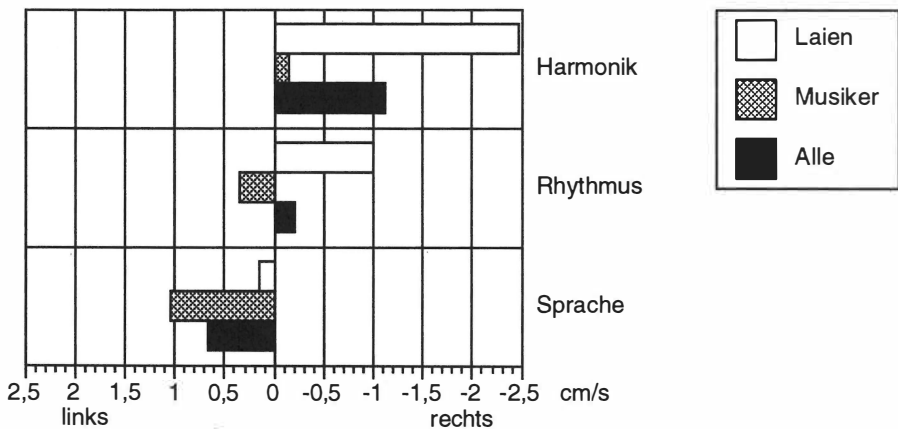
Faktor 1: „Laie/ Experte“

Faktor 2: „Art der Darbietung“: Sprache, Rhythmus, Harmonik (dreifach gestuft mit Meßwiederholung).

Um ein noch deutlicheres Bild von der Lateralisation zu bekommen, arbeitete die zweite Analyse mit den Differenzbeträgen der Blutflußgeschwindigkeit von linker und rechter Hemisphäre als abhängige Variable.

Hier zeigten sich zum einen signifikante Differenzen der Gesamtgruppe (Faktor 2), die das bereits beschriebene Ergebnis verdeutlichen, Sprache und Harmonik werden entgegengesetzt verarbeitet, beim Rhythmus scheinen beide Hemisphären beteiligt zu sein ( $F = 4,44$ ,  $df = 44,2$   $p = 0,018$ ).

Aber es fand sich noch ein interessanter Unterschied zwischen Laien und Experten, der sich zwar nicht als signifikante Interaktion in der Varianzanalyse, wohl aber in parameterfreien Einzelanalysen fand. Die Musi-



**Abb. 2:**

Differenzen von linker minus rechter cerebraler Blutflußgeschwindigkeit während der drei Hörbeispiele – Sprache, rhythmisch betonte und „harmonisch betonte“ Musik – unterschieden nach den Probandengruppen und als Gesamtgruppe. Ein positiver Wert deutet auf eine höhere Aktivität der linken Hemisphäre hin, ein negativer Wert auf eine stärkere Aktivität der rechten Hemisphäre.



ker zeigten nie eine rechtshemisphärische Dominanz. Nur in der gesamten Gruppe und bei den Laien wird Harmonik rechtshemisphärisch verarbeitet. (Wahrscheinlich ergibt sich keine signifikante Interaktion, da die Streuung sehr hoch ist. Nachträgliche Untersuchungen ergaben eine signifikante Differenz bei Laien und Experten bezüglich der Harmoniewahrnehmung: Wald-Wolfowitz-Test  $p = 0,0122$  und bei der Rhythmuswahrnehmung  $p = 0,0672$ . Zwischen den drei Darbietungen errechnet Friedmans Rangvarianzanalyse für die Musiker ein  $p$  von  $0,19$  ( $df = 2$ ) und bei den Laien  $p = 0,0122$  ( $df = 2$ ).)

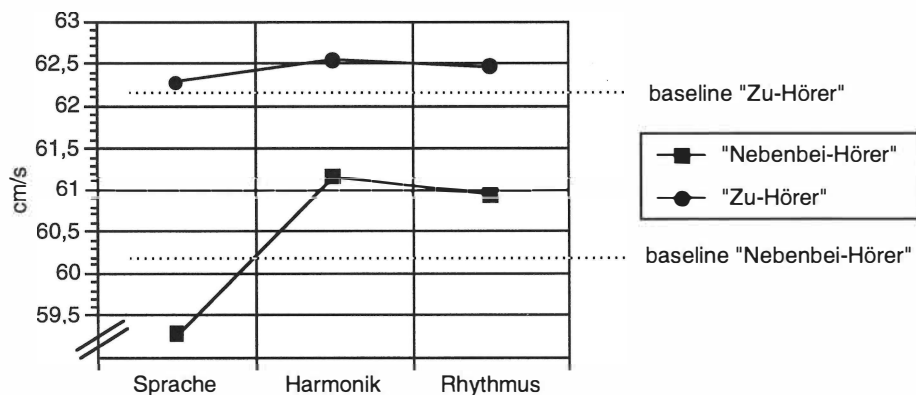
### 2.5.3

Der Einfluß der Hörgewohnheit wurde mit zwei univariaten Varianzanalysen untersucht.

Faktor 1: „Hörgewohnheit“: Hintergrundhörer vs. aufmerksamer Hörer (zweifach gestuft).

Faktor 2: „Art der Darbietung“: Sprache, Rhythmus, Harmonik (dreifach gestuft mit Meßwiederholung). Es wurden die gleichen abhängigen Variablen wie in der vorigen Analyse verwendet.

Die Unterteilung der Probanden in „Zu-Hörer“, die bewußt und analytisch Musik wahrnehmen und „Nebenbei-Hörer“, die Musik eher im Hintergrund wahrnehmen, legten keine Unterschiede im Bereich der linken Hemisphäre dar. Eine varianzanalytische Untersuchung der Blutflußge-



**Abb. 3:**

Mittlere cerebrale Blutflußgeschwindigkeit während der drei Hörbeispiele – Sprache, rhythmisch betonte und „harmonisch betonte“ Musik – bei aufmerksamen, eher analytisch hörenden Probanden („Zu-Hörer“) und bei Probanden, die Musik nicht analytisch, eher im Hintergrund hören („Nebenbei-Hörer“). Die baseline, also die Blutflußgeschwindigkeit in einer Ruhephase ohne Hörbeispiele, ist jeweils gestrichelt eingezeichnet.

schwindigkeiten der rechten Hemisphäre ergab zunächst, wie bereits oben beschrieben, einen Haupteffekt, der auf die unterschiedlichen Musikstücke zurückzuführen ist ( $f = 5,54$ ;  $df = 44$ ;  $2$ ;  $p = 0,007$ ). Der Faktor „Hörgewohnheit“ ist nicht signifikant. Interessant ist hier die signifikante Interaktion zwischen den beiden Faktoren „Hörgewohnheit“ und „Art der Darbietung“ ( $f = 3,32$ ;  $df = 44$ ;  $2$ ;  $p = 0,049$ ). Wie man an dem Interaktionsdiagramm erkennen kann, zeigen die „Zu-Hörer“ zunächst bei allen Hörbeispielen tendenziell eine höhere Blutflußgeschwindigkeit in der rechten Hemisphäre, betrachtet man aber die baseline, also die Ruhewerte dieser Probandengruppe ohne ein Hörbeispiel, so ergibt sich hierzu keine nennenswerte Veränderung. In der Probandengruppe der „Nebenbei-Hörer“ ist die baseline deutlich niedriger als bei den „Zu-Hörern“. Die Werte für „Sprache“ unterschreiten und die Werte für „Harmonik“ und „Rhythmus“ überschreiten die baseline deutlich.

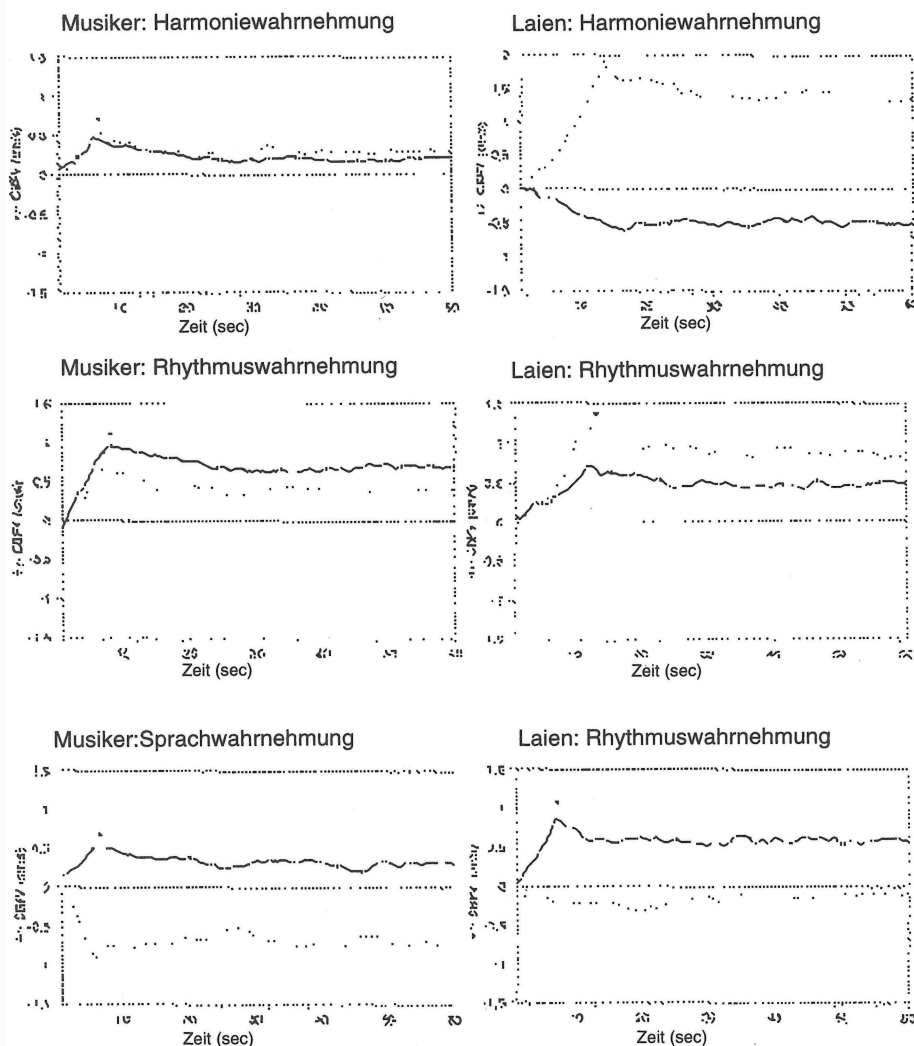
#### 2.5.4

Es wurde innerhalb jeder Darbietung für Musiker und Laien getrennt der Zeitverlauf der Lateralisation untersucht. Hierbei interessierte besonders, wann die jeweilige Blutflußgeschwindigkeit ihr Maximum erreicht hatte. Unterschiede zwischen Musikern und Laien wurden mit Hilfe von Mann-Whitneys U-test ermittelt.

Die Abbildung zeigt sechs unterschiedliche Graphen, die noch einmal veranschaulichen, daß in beiden Probandengruppen die Wahrnehmung von Sprache eher linkshemisphärisch verläuft und besonders die Nicht-Musiker bei der Wahrnehmung von Harmonien eine rechtshemisphärische Lateralisation aufweisen. Die Musiker erreichten das Maximum der Differenz der beiden Blutflußgeschwindigkeiten nach 5,3 +/- 2 sec. (Sprache), nach 6,9 sec. +/- 2,7 sec. (Harmonik) und 7,0 sec. +/- 2,4 sec. (Rhythmus). Die Nicht-Musiker zeigten beim Sprachbeispiel das Maximum erst nach 7,2 sec. +/- 3,1 sec., beim Beispiel „Harmonik“ nach 14,4 sec. +/- 3,7 sec. und beim Rhythmus-Beispiel nach 13,1 sec. +/- 4,2 sec. Der U-Test von Mann-Whitney macht sichtbar, daß sich der Zeitpunkt, an dem das Maximum der Blutflußgeschwindigkeit erreicht wird (Beispiel Harmonik und Rhythmus) bei Laien und Experten signifikant unterscheidet ( $p = 0,021$ ).

### 3. Diskussion

Zum einen bestätigt unsere Studie einige bereits früher gefundene Ergebnisse zur hemisphärischen Dominanz bei der musikalischen Wahrnehmung, zum anderen fanden sich aber auch einige neue Ergebnisse, die weiteres Licht in die kognitive Verarbeitungsstrategie beim Musikhören bringen könnten. Die gefundenen Unterschiede zwischen Laien und Experten, die belegen, daß Musiker musikalische Reize eher linkshemisphä-

**Abb. 4:**

Der zeitliche Verlauf der cerebralen Blutflußgeschwindigkeit beider Hemisphären (Cerebral Bloodflow Velocity, CBFV), gemessen während der ersten 60 Sekunden der Hörbeispiele. Die Werte sind als Differenzwerte von einer Ruhebedingung (baseline) errechnet. Der Stern markiert den Zeitpunkt, an dem die maximale Differenz zwischen den beiden Geschwindigkeiten erreicht wird. Die sechs Graphen sind unterteilt nach Laien und Musikern und den drei Hörbeispielen – Sprache, rhythmisch betonte und harmonisch betonte Musik. Punktierte Linie: rechte Hemisphäre; durchgezogene Linie: linke Hemisphäre.

risch verarbeiten, stehen im Einklang mit der Hypothese von Bever und Chiarello (1974), die besagt, daß der tägliche Umgang mit musikalischen Strukturen zu einem Training dieser analytisch arbeitenden Hemisphäre führt. In unserer Untersuchung fanden wir bei Laien eine rechtshemisphärische Lateralisation bei der Wahrnehmung „harmonisch betonter“ Musik. Dies ist bei Laien schon in früheren Untersuchungen festgestellt worden und könnte auf eine eher ganzheitliche Wahrnehmung von Musik schließen lassen (Bever und Chiarello 1974, Johnson 1977, Gordon 1978a, Peretz und Morais 1980, Hassler 1990). Bei der Wahrnehmung von Sprache ergab sich eine linkshemisphärische Lateralisation. Die Wahrnehmung von Rhythmen führte in keiner Gruppe zu einer signifikanten Lateralisation. Die einzige bisherige Studie zur musikalischen Wahrnehmung mit Hilfe der Dopplersonographie (Mattheis et al. 1997) stellt fest, daß sich die Wahrnehmung von Melodien in einer Erhöhung der Blutflußgeschwindigkeit beider Hemisphären äußerte. Allerdings wurde in dieser Studie nicht nach Laien und Fachleuten unterschieden. Tendenzielle Geschlechtsunterschiede einer erhöhten rechtshemisphärischen Verarbeitung von Musik bei weiblichen Probanden sind schon in anderen Studien belegt worden (Annett 1981, Droste 1989). Hier trat die rechtshemisphärische Dominanz bei Aufgaben zur Distanzschätzung auf. Untersuchungen zum dichotischen Hören zeigten höhere interhemisphärische Differenzen während kognitiver Aufgaben unabhängig von der dargebotenen Stimulation bei weiblichen Probanden. Es gibt aber auch Studien, die keine signifikanten Differenzen zwischen weiblichen und männlichen Probanden aufweisen (Hirshkowitz et al. 1978, Messerli et al. 1995). Auch in unserer Studie ergab sich kein signifikanter Haupteffekt bei den absoluten Werten, dies liegt an der großen Varianz unter den weiblichen Probanden, während sie bei den Männern ziemlich gering ist. Hier wären weitere Studien nötig.

Rechtshemisphärisch fand sich bei den „Nebenbei-Hörern“ eine erhöhte Aktivierung während der Wahrnehmung des „harmonischen“ Musikbeispiels. Die „Zu-Hörer“ weisen scheinbar generell rechts einen höheren Blutflußwert auf, er liegt zwischen 62,3 und 62,5 cm/ sec. Allerdings ist die baseline, also die Blutflußgeschwindigkeit in Ruhe, mit 62,1 cm/ sec. ebenfalls sehr hoch. Man kann bei dieser Gruppe also nicht von einer erhöhten Aktivierung sprechen. Das bewußte Zuhören schließt die Aktivierung von Strukturen ein, die sich auf klangliche Gedächtnisprozesse und auf das Kurzzeitgedächtnis beziehen, diese Strukturen sind vorwiegend in der linken Hemisphäre lokalisierbar (Seargent et al. 1992, Zatorre et al. 1994, Platel et al. 1997). Bei den „Nebenbei-Hörern“ beträgt die baseline 60,2 cm/ sec., so daß die Aktivierung bei der Wahrnehmung des harmonischen Beispiels diesen Wert mit 61,2 cm/ sec. deutlich überschreitet. Die Aktivierung dieser Hemisphäre bei den „Nebenbei-Hörern“ könnte, ähnlich wie bei den musikalischen Laien, auf eine eher sequentiell-holistische Wahrnehmung zurückzuführen sein (Bever und Chiarello 1974). (Eine andere Erklärung, die weniger für „Nebenbei-Hörer“, aber vielleicht für musikalische Laien zuträfe, nimmt an, daß bestimmte Formen

der Aufmerksamkeit, die sich besonders auf ungewohnte Reize beziehen, rechtshemisphärisch bestimmt sind (Pardo et al. 1991)).

Der Zusammenhang zwischen der Art des Hörens und der Lateralisation der Reizverarbeitung bedeutet – und dies wäre durch weitere Untersuchungen zu klären –, daß eine Beteiligung der linken, analytisch arbeitenden Hemisphäre keine formale musikalische Ausbildung erfordert (beide Hörertypen finden sich unter Laien und Experten). Die bisher allgemein anerkannte Regel, daß die Trennung der Lateralisationstypen entlang einer „Musiker-Nichtmusiker“-Ebene verläuft, wäre somit nicht uneingeschränkt aufrecht zu erhalten, sondern müßte auf die beiden verschiedenen Hörertypen erweitert werden.

Die Daten des Experiments demonstrieren, daß die Lateralisation bei Musikern nach 5–7 Sekunden ihren Höhepunkt erreicht hat und bei Nicht-Musikern nach 7–14 Sekunden. Bei der Verarbeitung von Musik scheinen Laien für die Lateralisation länger zu brauchen, weil zunächst eine gewisse Zeit benötigt wird, um komplexe akustische Phänomene zu klassifizieren und die Aufmerksamkeit zu fokussieren. Dies erfordert zunächst die Aktivierung beider Gehirnhälften. Ist die Lateralisation aber erstmal erreicht, ist sie in dieser Gruppe umso ausgeprägter. Bei Experten sind diese Vorgänge gelernt, weshalb ein schnellerer Zugang zu den notwendigen Hirnstrukturen stattfindet.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß Musiker und aufmerksame Zuhörer, die nicht unbedingt identisch sein müssen, eine linkshemisphärische Aktivierung während der Wahrnehmung von Harmonik zeigen, wohingegen „Hintergrund“-Hörer eine rechtshemisphärische Aktivierung im Vergleich zur baseline aufweisen. Die Wahrnehmung von Rhythmen scheint keine besondere Lateralisation hervorzurufen. Die kognitive Verarbeitung, die zu einer Lateralisation führt, ist bei Laien aufgrund einer generellen Aufmerksamkeitsreaktion gegenüber Fachleuten verzögert, da zunächst eine beidseitige Aktivierung des Gehirns zur Klassifikation nötig ist. Die dann auftretende rechtshemisphärische Dominanz ist auf eine sequentiell-holistische Wahrnehmung zurückzuführen (oder auf bestimmte Aufmerksamkeitsreaktionen gegenüber ungewohnten Reizen).

Die Methode der transkraniellen Dopplersonographie ist nicht nur eine einfache Möglichkeit, die Lateralisation der Gehirnfunktion bei musikalischen Wahrnehmungsprozessen zu untersuchen, sondern kann auch kurzzeitige Veränderungen der Tätigkeit der beiden Hirnhälften aufspüren. Da es sich bei unserer Studie um ein erstes Projekt handelt, sind weitere Experimente nötig, die unter anderem eine größere Zahl von Musikstücken berücksichtigen, denn es ist problematisch, eine einzelne Komposition stellvertretend für den Parameter „Rhythmus“ oder „Harmonik“ zu verwenden. Außerdem müßten genauere Verfahren zur Bestimmung von Hörweisen entwickelt werden, denn die Hörweise stellt, wie sich zeigte, eine besonders wichtige Variable dar.

Als ein weiteres Forschungsprojekt bietet sich eine Studie zur auditiven Hemisphärensynchronisation an. In diesem Bereich werden von der Indu-

strie sogenannte Hemi-Sync-CDs angeboten, Einspielungen von meditativer Musik, die mit tiefen Frequenzen in beiden Stereokanälen unterlegt sind, die sich um wenige Hertz unterscheiden, Sie sollen in der Lage sein, beide Hirnhälften zu synchronisieren und angeblich so zu einer „ausgewogenen“ und entspannenden Tätigkeit der beiden Hemisphären führen (vgl. la Motte-Haber 1998, S. 129–130).

## Literatur

- Aaslid, R. (1987). Visually evoked dynamic blood flow response of the human cerebral circulation. *Stroke*, 18, 771–775.
- Altenmüller, E. (1989). Cortical DC-potentials as electrophysiological correlates of hemispheric dominance of higher cognitive functions. *Int J Neurosci*, 47, 1–14.
- Annett, M. (1980). Sex differences in laterality-meaningfulness versus reliability. *Behav Brain Sci*, 3, 227–228.
- Beisteiner, R., Altenmüller, E., Lang, W., Lindinger, G., Deecke, L. (1994). Musicians processing music. Measurement of brain potentials with EEG. *Eur J Cogn Psychol*, 6, 311–327.
- Bever, T. G., Chiarello, R. J. (1974). Cerebral dominance in musicians and nonmusicians. *Science*, 185, 537–539.
- Bogen, J. E., Gordon, H. W. (1971). Musical tests for functional lateralization with intracarotid amobarbital. *Nature*, 230, 524–525.
- Breitling, D., Guenther, W., Rondot, P. (1987). Auditory perception of music measured by brain electrical activity mapping. *Neuropsychologia*, 25, 765–774.
- Cohen, H., Levy, J. J., Mc Shane, D. (1989). Hemispheric specialization for speech and non-verbal stimuli in Chinese and French Canadian subjects. *Neuropsychologia*, 27, 241–245.
- Davidson, R. J., Schwartz, G. E. (1977). The influence of musical training on patterns of EEG asymmetry during musical and non-musical self-generation tasks. *Psychophysiology*, 14, 58–63.
- Droste, D. W., Harders, A. G., Rastogi, E. (1989). A transcranial Doppler study of blood flow velocity in the middle cerebral arteries performed at rest and during mental activities [see comments]. *Stroke*, 20, 1005–1011. Comment in: *Stroke* 1990; 21: 1236–1237.
- Formby, C., Thomas, R. G., Halsey, J. H. Jr. (1989). Regional cerebral blood flow for singers and nonsingers while speaking, singing and humming a rote passage. *Brain Lang*, 36, 690–698.
- Gaede, S. E., Parsons, O. A., Bertera, J. H. (1978). Hemispheric differences in music perception: aptitude vs experience. *Neuropsychologia*, 16, 369–373.
- Gordon, H. W. (1970). Hemispheric asymmetries in the perception of musical chords. *Cortex*, 6, 387–398.
- Gordon, H. W. (1978a). Hemispheric asymmetry for dichotically-presented chords in musicians and non-musicians, males and females. *Acta Psychol (Amst)*, 42, 383–395.
- Gordon, H. W. (1978b). Left hemisphere dominance for rhythmic elements in dichotically-presented melodies. *Cortex*, 14, 58–70.
- Gordon, H. W., Bogen, J. E. (1974). Hemispheric lateralization of singing after intracarotid sodium amylbarbitone. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 37, 727–738.

- Hartje, W., Ringelstein, E. B., Kinstinger, B., Fabianek, D., Willmes, K. (1994). Transcranial Doppler ultrasonic assessment of middle cerebral artery blood flow velocity changes during verbal and visuospatial cognitive tasks. *Neuropsychologia*, 32, 1443–1452.
- Hassler, M. (1990). Functional cerebral asymmetries and cognitive abilities in musicians, painters, and controls. *Brain Cogn*, 13, 1–17.
- Henschen, S. E. (1926). On the function of the right hemisphere of the brain in relation to the left in speech, music and calculation. *Brain*, 49, 110–123.
- Hirshkowitz, M., Earle, J., Paley, B. (1978). EEG alpha asymmetry in musicians and non-musicians: a study of hemispheric specialization. *Neuropsychologia*, 16, 125–128.
- Johnson, P. R. (1977). Dichotically-stimulated ear differences in musicians and nonmusicians. *Cortex*, 13, 385–389.
- Kimura, D. (1961). Cerebral dominance and the perception of verbal stimuli. *Can J Psychol*, 15, 166–171.
- Kimura, D. (1964). Left-right differences in the perception of melodies. *QJ Exp Psychol*, 16, 355–358.
- Knecht, S., Henningsen, H., Deppe, M., Huber, T., Ebner, A., Ringelstein, E. B. (1996). Successive activation of both cerebral hemispheres during cued word generation. *Neuroreport*, 7, 820–824.
- la Motte-Haber, Helga de (1998). Auditive Hemisphärensynchronisation. In: K.-E. Behne, G. Kleinen & H. de la Motte-Haber (Hrsg.), *Musikpsychologie, Band 13*. Göttingen: Hogrefe, S. 129–130.
- Loring, D. W., Meador, K. J., Lee, G. P., King, D. W. (1992). *Amobarbital effects and lateralized brain function: the Wada test*. New York: Springer.
- Matteis, M., Silvestrini, M., Troisi, E., Cupini, L. M., Caltagirone, C. (1997). Transcranial Doppler assessment of cerebral flow velocity during perception and recognition of melodies. *J Neurol Sci*, 149, 57–61.
- Mazziotta, J. C., Phelps, M. E., Carson, R. E., Kuhl, D. E. (1982). Tomographic mapping of human cerebral metabolism: auditory stimulation. *Neurology*, 32, 921–937.
- Mazzuchi, A., Parma, M., Cattelani, R. (1981). Hemispheric dominance in the perception of tonal sequences in relation to sex, musical competence and handedness. *Cortex*, 17, 291–302.
- Messerli, P., Pegna, A., Sordet, N. (1995). Hemispheric dominance for melody recognition in musicians and non-musicians. *Neuropsychologia*, 33, 395–405.
- Pantev, C., Oostenveld, R., Engelien, A., Ross, B., Roberts, L. E., Hoke, M. (1998). Increased auditory cortical representation in musicians [letter]. *Nature*, 392, 811–814.
- Pardo, J. V., Fox, P. T., Raichle, M. E. (1991). Localization of a human system for sustained attention by positron emission tomography. *Nature*, 349, 61–64.
- Peretz, I., Morais, J. (1980). Modes of processing melodies and ear asymmetry in non-musicians. *Neuropsychologia*, 18, 477–489.
- Platel, H., Price, C., Baron, J. C., Wise, R., Lambert, J., Frackowiak, R. S. et al. (1997). The structural components of music perception. A functional anatomical study. *Brain*, 120, 229–2243.
- Plenger, P. M., Breier, J. I., Wheless, J. W., Ridley, T. D., Papanicolaou, A. C., Brookshire, B. et al. (1996). Lateralization of memory for music: evidence from the intracarotid sodium amobarbital procedure. *Neuropsychologia*, 34, 1015–1018.

- Rihs, F., Gutbrod, K., Gutbrod, B., Steiger, H. J., Sturzenegger, M., Mattle, H. P. (1995). Determination of cognitive hemispheric dominance by 'stereo' transcranial Doppler sonography. *Stroke*, 26, 70–73.
- Ringelstein, E. B., Kahlscheuer, B., Niggemeyer, E., Otis, S. M. (1990). Transcranial Doppler sonography: anatomical landmarks and normal velocity values. *Ultrasound Med Biol*, 16, 745–761.
- Ryding, E., Bradvik, B., Ingvar, D. H. (1987). Changes of regional cerebral blood flow measured simultaneously in the right and left hemisphere during automatic speech and humming. *Brain*, 110, 1345–1358.
- Schlaug, G., Jäncke, L., Huang, Y., Steinmetz, H. (1995) In vivo evidence of structural brain asymmetry in musicians [see comments]. *Science*, 267, 699–701. Comment in: *Science*, 267, 616; Comment in: *Science*, 268, 621–622.
- Sergent, J., Zuck, E., Terriah, S., Mac Donald, B. (1992). Distributed neural network underlying musical sight-reading and keyboard performance. *Science*, 257, 106–109.
- Silvestrini, M., Cupini, L. M., Matteis, M., Troisi, E., Caltagirone, C. (1994). Bilateral simultaneous assessment of cerebral flow velocity during mental activity [see comments]. *J Cereb Blood Flow Metab*, 14, 643–648. Comment in: *J Cereb Blood Flow Metab* 1995, 15, 718.
- Zatorre, R. J. (1979). Recognition of dichotic melodies by musicians and nonmusicians. *Neuropsychologia*, 17, 607–617.
- Zatorre, R. J., Evans, A. C., Meyer, E., Gjedde, A. (1992). Lateralization of phonetic and pitch discrimination in speech processing. *Science*, 256, 846–849.
- Zatorre, R. J., Evans, A. C., Meyer, E. (1994). Neural mechanisms underlying melodic perception and memory for pitch. *J Neurosci*, 14, 1908–1919.