
Harmonische Reihen :

Grundlage der musikalischen Wahrnehmung



Hans J. Specht

Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg

Frankfurt, 3. Dezember 2011

Inhalt

- Musikalische Töne

 - Periodizität: Zeit und Frequenz; harmonische Reihen

 - Verschmelzung (1 Ton): Empfindung von Tonhöhe und Klangfarbe

 - Trennung (>1 Ton); Empfindung von Konsonanz und Harmonie

- Analytische und synthetische Wahrnehmung

 - Tonhöhenenerkennung: Residuum

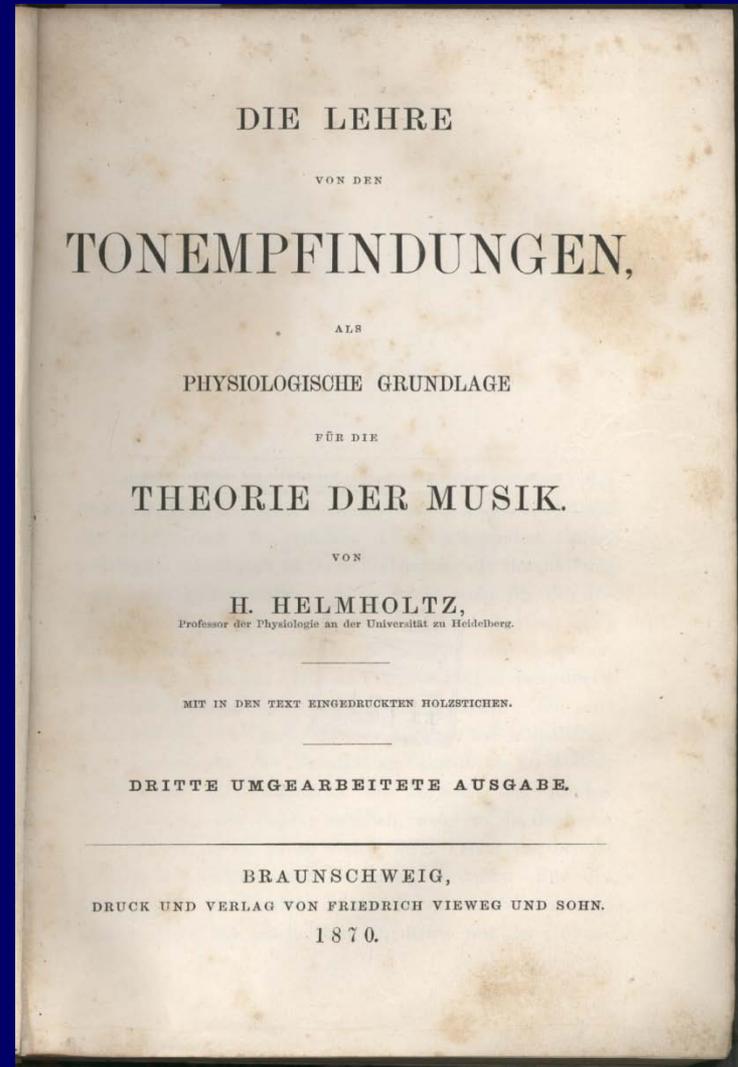
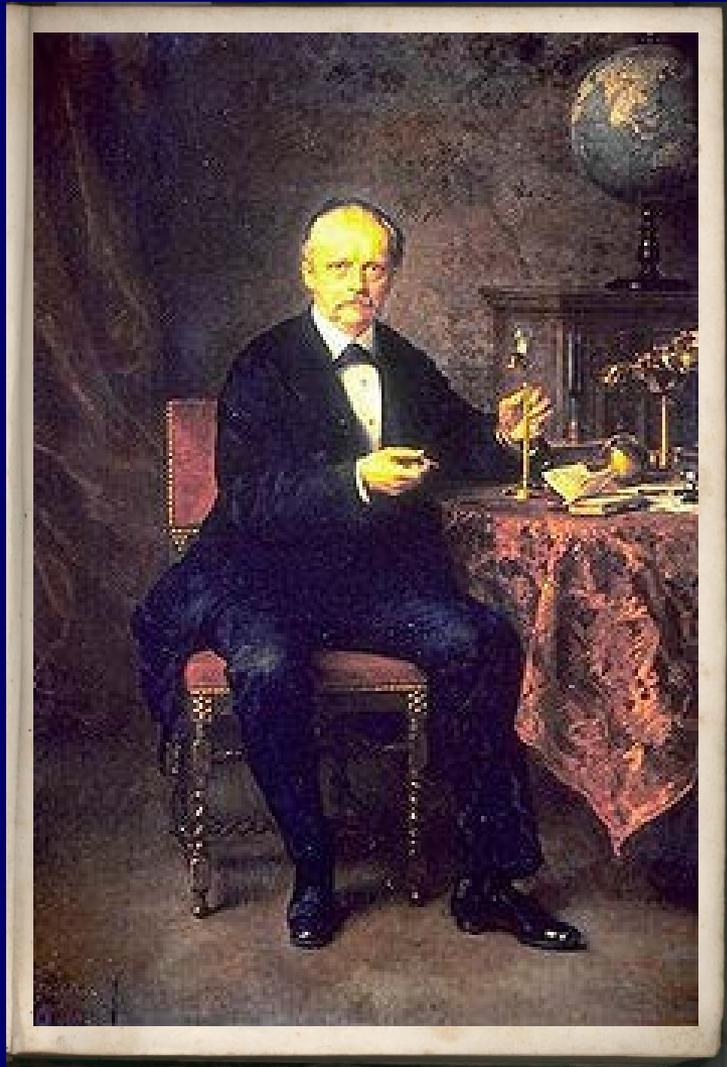
 - Grenzen der Verschmelzung: Grundton- und Obertonhörer

- Harmonie: Accord parfait und Basse fondamentale

- Ströme im Gehirn: Neurophysiologische Grundlagen

- **Test** zum Hörtypus

Hermann von Helmholtz (1821 – 1894)



Mediziner, Physiker,



Mathematiker, 'Pianist' ...

Hermann Helmholtz

Die Lehre von den Tonempfindungen

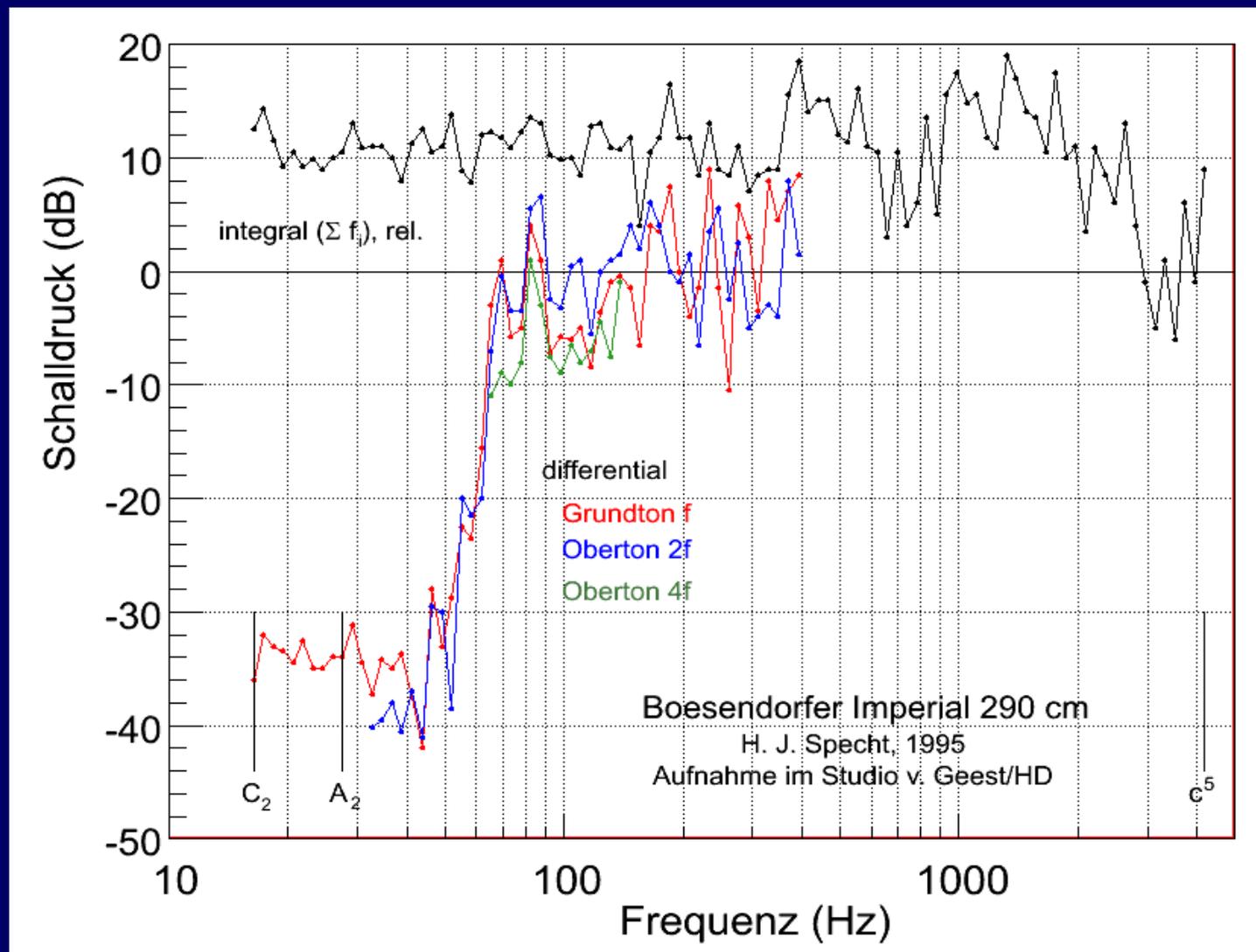
1. Auflage 1863; 4. Auflage 1877

Helmholtz unterscheidet (nach Leibniz) zwischen

Perception	Empfindung, synthetisch
Apperception	Wahrnehmung, analytisch

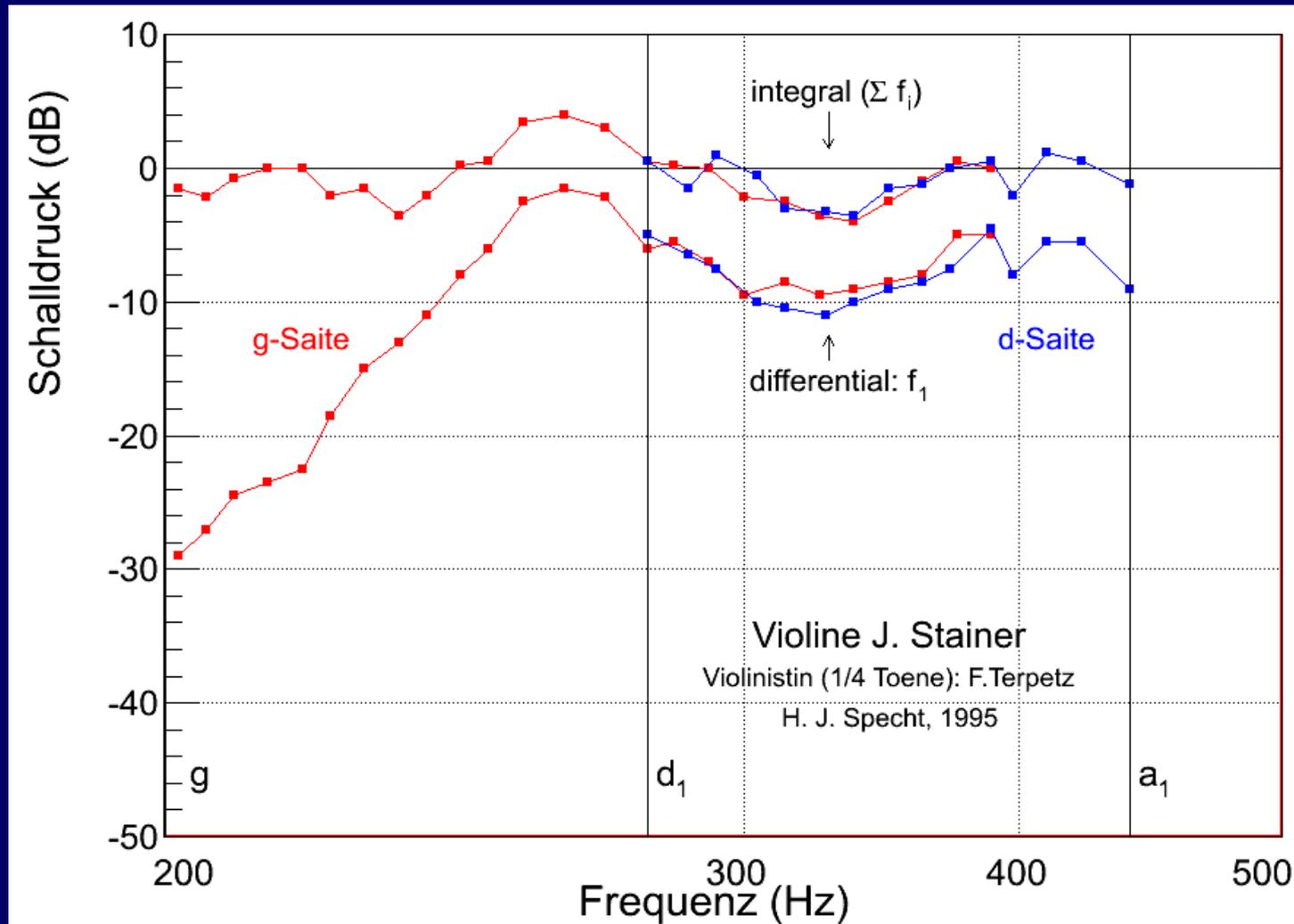
1. “Dass die Obertöne... empfunden (**percipirt**) werden, wenn sie auch nicht immer zur bewussten Wahrnehmung kommen (nicht **appercipirt** werden).”
2. “Dass sie ohne andere Hilfe, als eine zweckmässige Leitung der Aufmerksamkeit, auch zur bewussten Wahrnehmung gebracht oder **appercipirt** werden können.”
3. “Dass sie aber auch in dem Falle, wo sie nicht isolirt wahrgenommen werden, sondern in die ganze Klangmasse verschmelzen, doch ihre Existenz in der Empfindung erweisen durch die Veränderung der Klangfarbe...”

Die überragende Rolle des Residuums bei Klaviertönen



Steiler Abfall unterhalb Grundschiwingung des Resonanzbodens

Die Rolle des Residuums bei Streichinstrumenten



Steiler Abfall des Grundtons unterhalb Helmholtz Resonanz (f_1 -Löcher)
(ähnlich für alle Streichinstrumente)

Test auf synthetisches und analytisches Hören (entwickelt nach Smoorenburg, 1970)

Beispiel

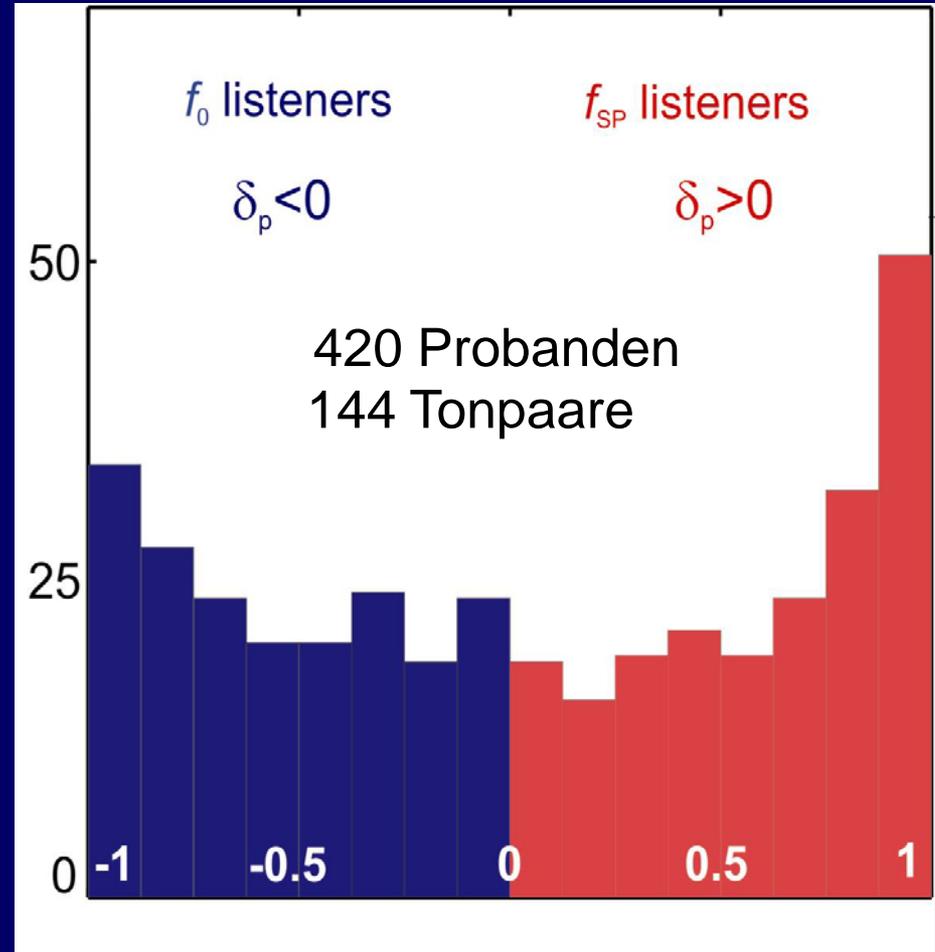
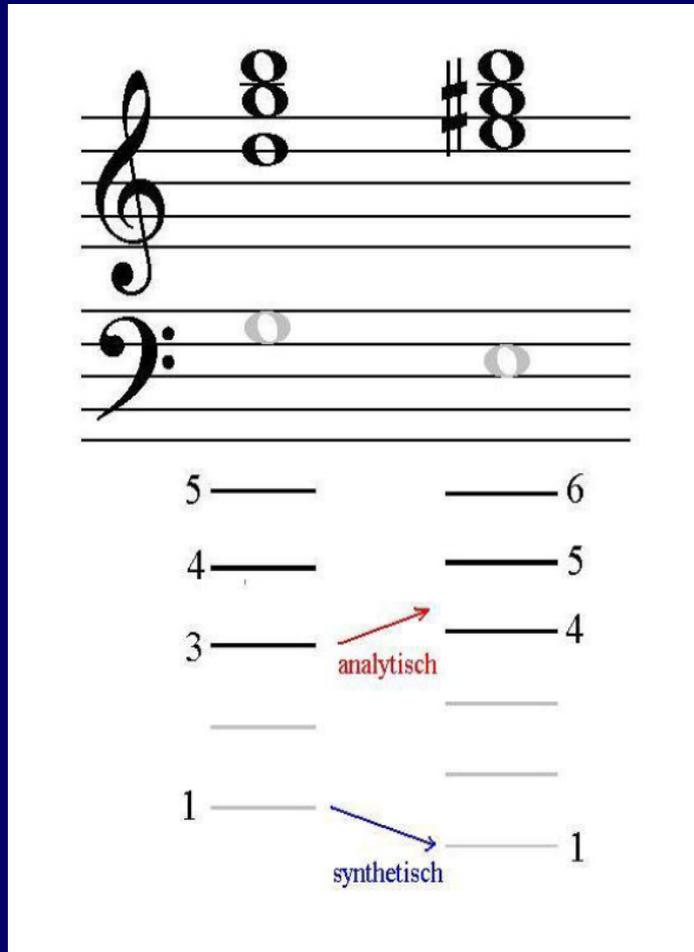
The image shows a musical staff with two staves. The top staff is in treble clef and shows two chords: a C major chord (C4, E4, G4) and a C# major chord (C#4, E4, G4). The bottom staff is in bass clef and shows two notes: C3 and C2. Below the staff is a diagram with two vertical lines of five horizontal bars each, representing a scale. The left line is labeled with numbers 5, 4, 3, 2, 1 from top to bottom. The right line is labeled with numbers 6, 5, 4, 3, 2, 1 from top to bottom. A red arrow labeled 'analytisch' points from the 3rd bar of the left line to the 4th bar of the right line. A blue arrow labeled 'synthetisch' points from the 1st bar of the left line to the 1st bar of the right line.

Analytische Hörer
apperzipieren die einzelnen
Komponenten des Tons:
der zweite Ton ist höher.

Synthetische Hörer
perzipieren die Einzeltöne,
aber apperzipieren sie nicht.
Sie hören den Grundton,
der zweite Ton ist tiefer.

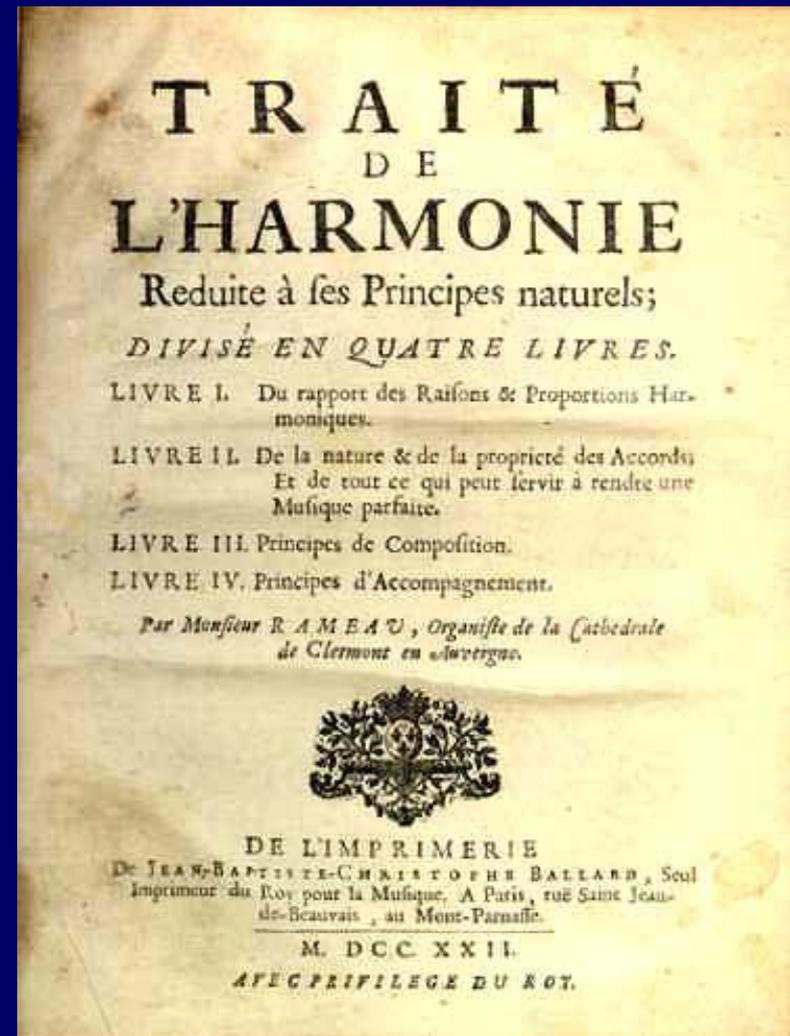
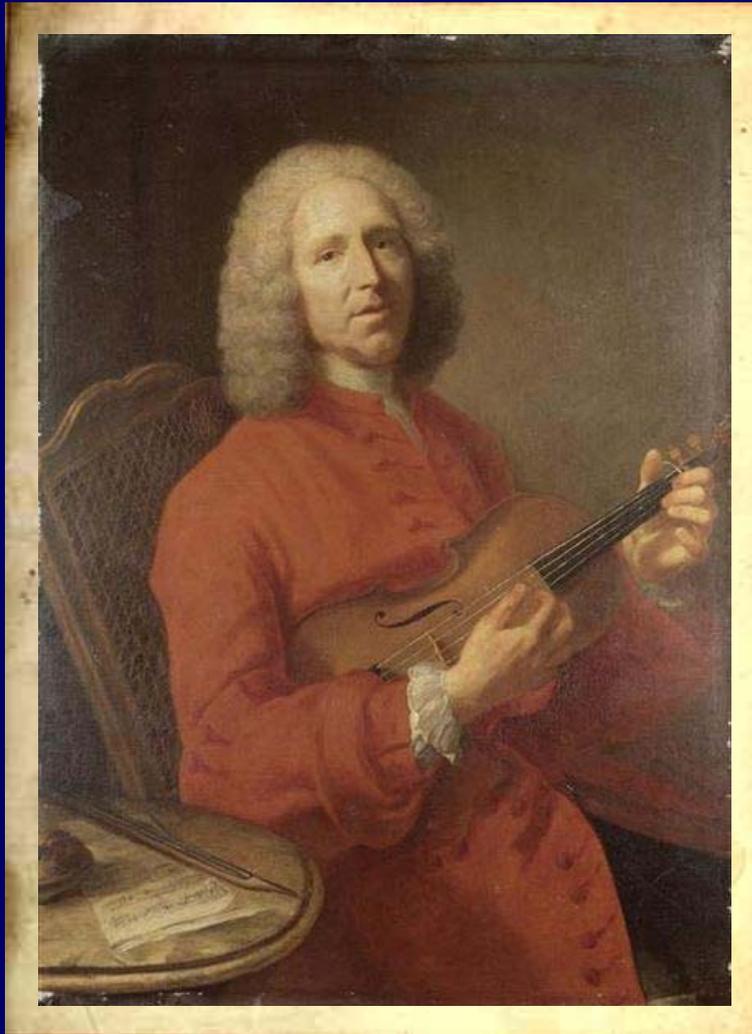
Grundton- vs. Obertonhörer

P. Schneider et al., Nature Neuroscience 8, (2005) 1241-1247



Beispiel Tonpaar 68: f_0 185/156 Hz, kleine Terz abwärts: 43%
 (11 in "Audio") f_{sp} Dreiklänge aufwärts: 57%

Jean-Philippe Rameau (1683 – 1764)



Die erste Harmonielehre der Musikgeschichte

Harmonie: Accord parfait und Basse fondamentale

W.A. Mozart, KV 545

The image displays a musical score for W.A. Mozart's KV 545. It consists of three staves. The top staff shows the melody in treble clef. The middle staff, labeled 'Accord parfait:', shows a sequence of chords in treble clef: a purple triad (C major), a black triad (F major), a green triad (C minor), and another purple triad (C major). The bottom staff, labeled 'Basse fondamentale:', shows the fundamental bass notes in bass clef: C (Tonic), G (Dominant), C (Tonic), F (Subdominant), C (Tonic), and G (Dominant). The labels 'Tonic', 'Dominant', and 'Subdominant' are color-coded to match the chords above them.

Accord parfait:

Basse fondamentale:

Tonic Dominant Tonic Subdominant Tonic Dominant

Mit einfachsten Mitteln die grösstmögliche Wirkung...

Hirnforschung zum musikalischen Hören

Interdisziplinäre Zusammenarbeit

Sektion Biomagnetismus, Neurologische Universitätsklinik, Heidelberg
P. Schneider, A. Rupp, M. Scherg,

Physikalisches Institut & Institut für Theoretische Physik, Heidelberg
H.J. Specht, H.G. Dosch

mit Beiträgen von

R. Goebel, MRI Zentrum, Maastricht, NL

V. Sluming, N. Roberts, MARIARC, University of Liverpool, UK

S. Bleeck, CNBH, Cambridge, UK

E. E. Gordon, University of Columbia, South Carolina

E. Hofmann, Musik Akademie, Basel

D. Geller, Staatliche Hochschule für Musik und darstellende Kunst, Mannheim

C. Klein, Musikpädagogisches Institut, Halle

Arbeitsmethoden

- Psychoakustische Hörtests
- Musikalische Hörtests (AMMA)
- Anatomische Struktur des Hörkortex (MRT)
- Auditorisch evozierte Magnetfelder im Hörkortex (MEG)

Verknüpfung der Ergebnisse !

> 400 Probanden, mehrheitlich Berufsmusiker

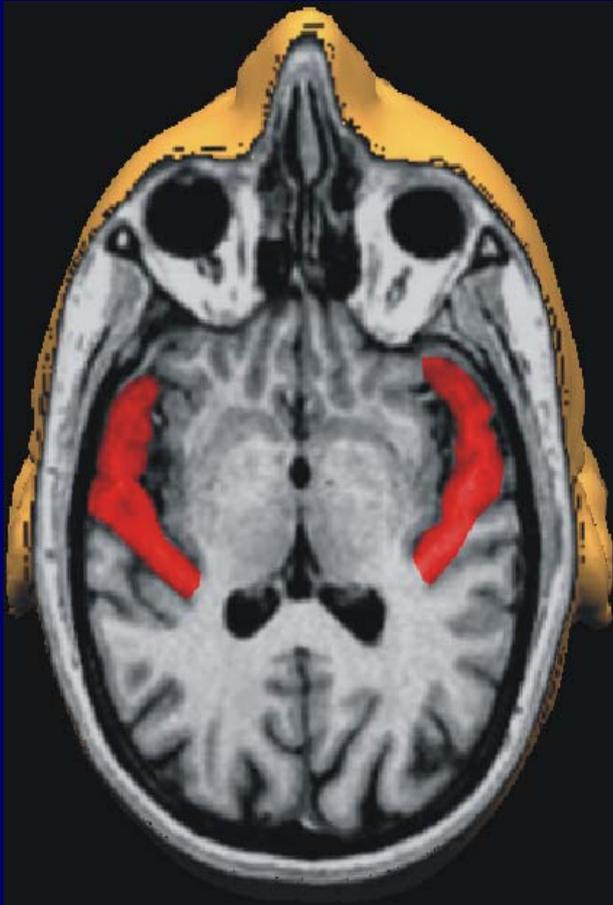
Magnet Resonanz Tomographie (MRT)

“Symphony” 1.5 T

“Trio” 3 T



Hörkortex: „Heschl Gyrus“



Richard Ladislaus Heschl
(1824–1881)
Anatom

„Über die vordere quere
Schläfenwindung des menschlichen
Grosshirns“, Wien, 1878

Zwei Gyri, links und rechts, mit
unterschiedlichen Funktionen

Heschl Gyrus (HG) und supratemporaler Gyrus (STG):
Musik- und Klangverarbeitung

Lage und Form des Hörkortex 3D-Rekonstruktion

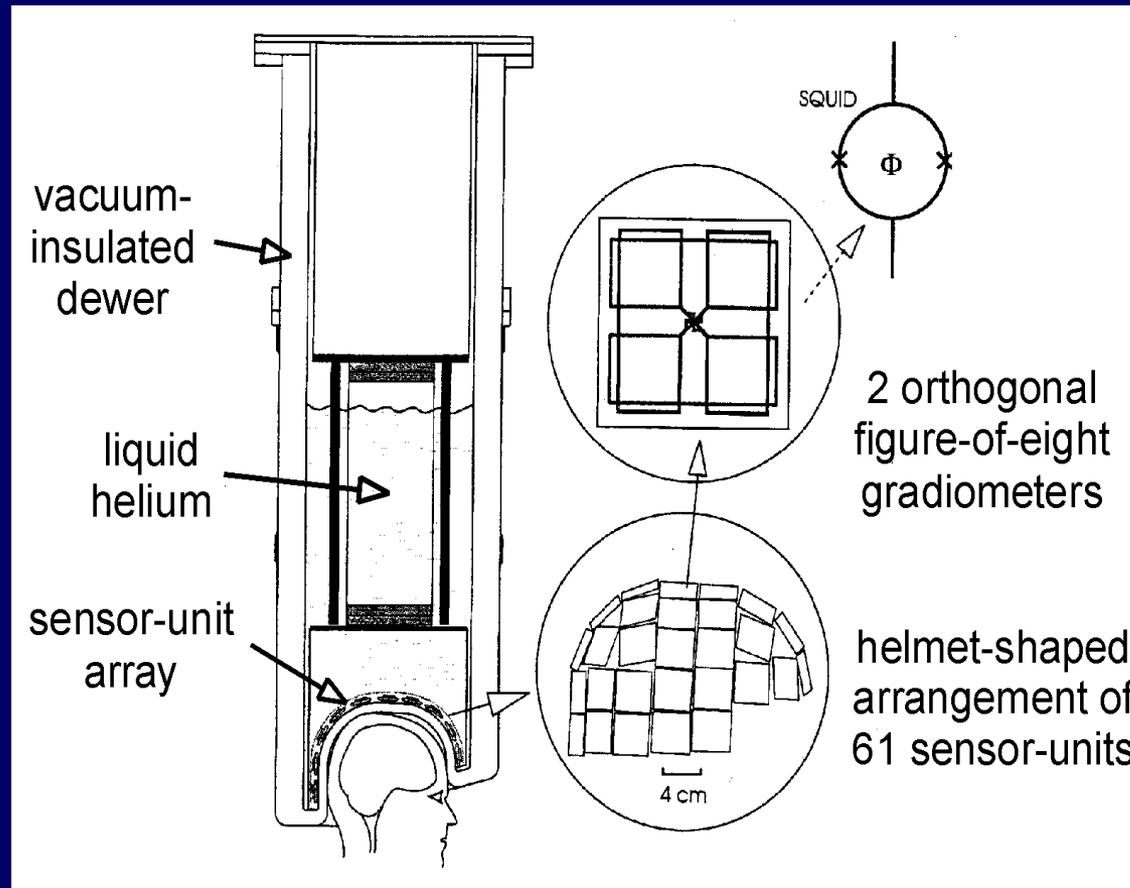


MRT

ermöglicht objektive
präzise Messung von
Grösse und Form der
beiden Hörkortices für die
individuellen Probanden

MagnetoEncephaloGraphie (MEG)

122 superleitende SQUIDS (Gradiometer)



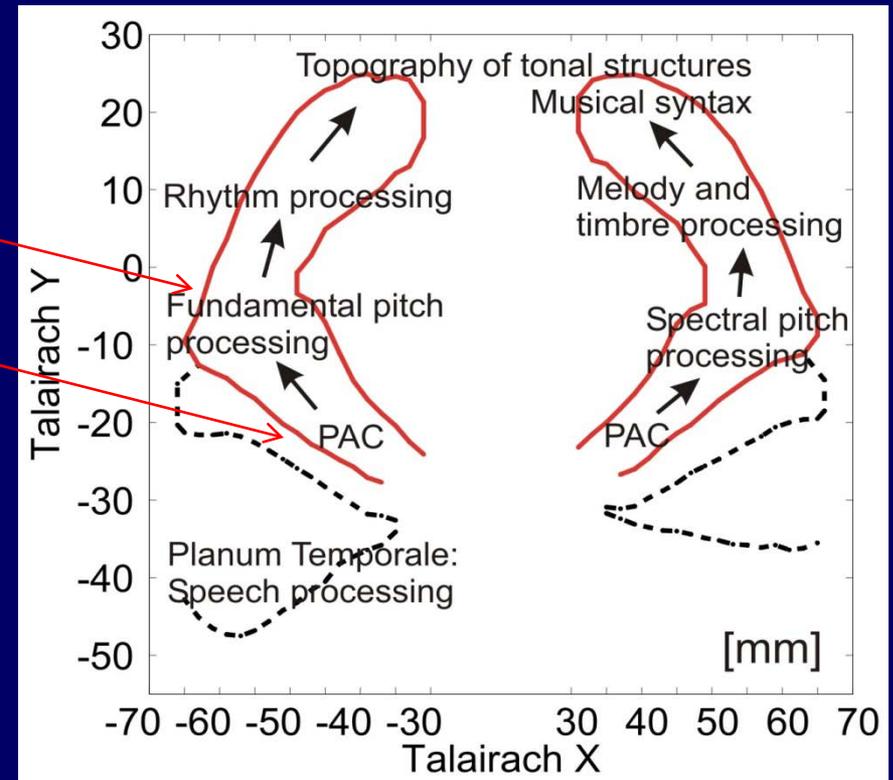
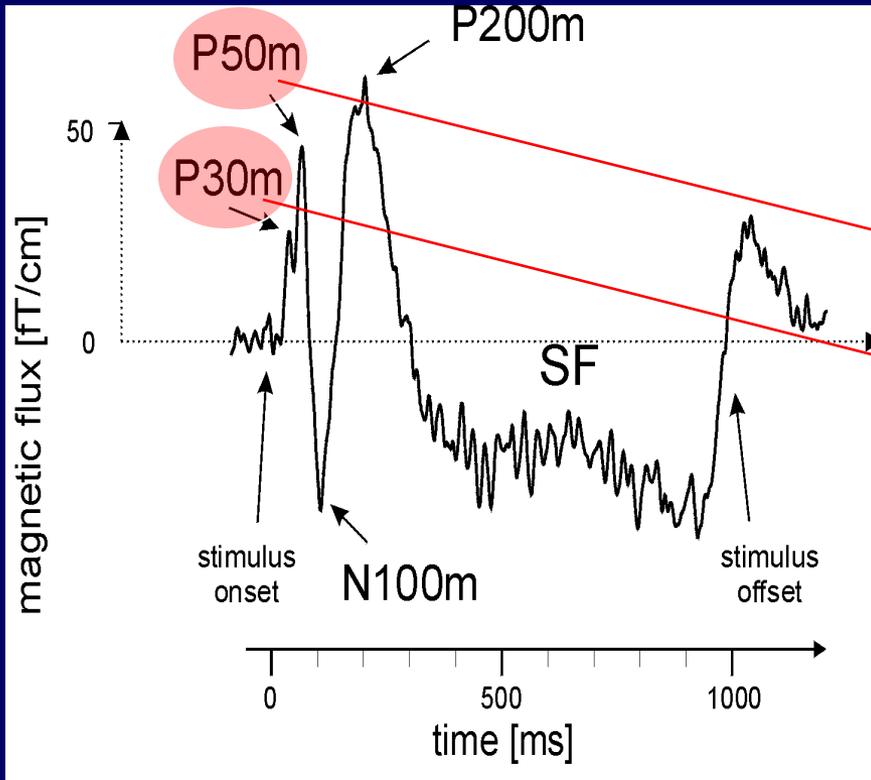
MagnetoEncephaloGraphie (MEG)

Ganzkopf-MEG System, 122 SQUIDs



Messung der Magnetfeld-Gradienten außerhalb des Kopfes

MagnetoEncephaloGraphie (MEG)



Typisches auditorisch evoziertes Signal aus dem Hörkortex
(Zeitauflösung im ms-Bereich)

Zeit des Signals bestimmt
Position entlang des Hörkortex

Hierarchischer Aufbau des Hörkortex
Funktionelle Spezialisierung:
Klang- und Musikverarbeitung

Grösse des Signals bestimmt
lokales Volumen

Ergebnisse I: Grösse des Hörkortex (P30 Region)

37 Nichtmusiker

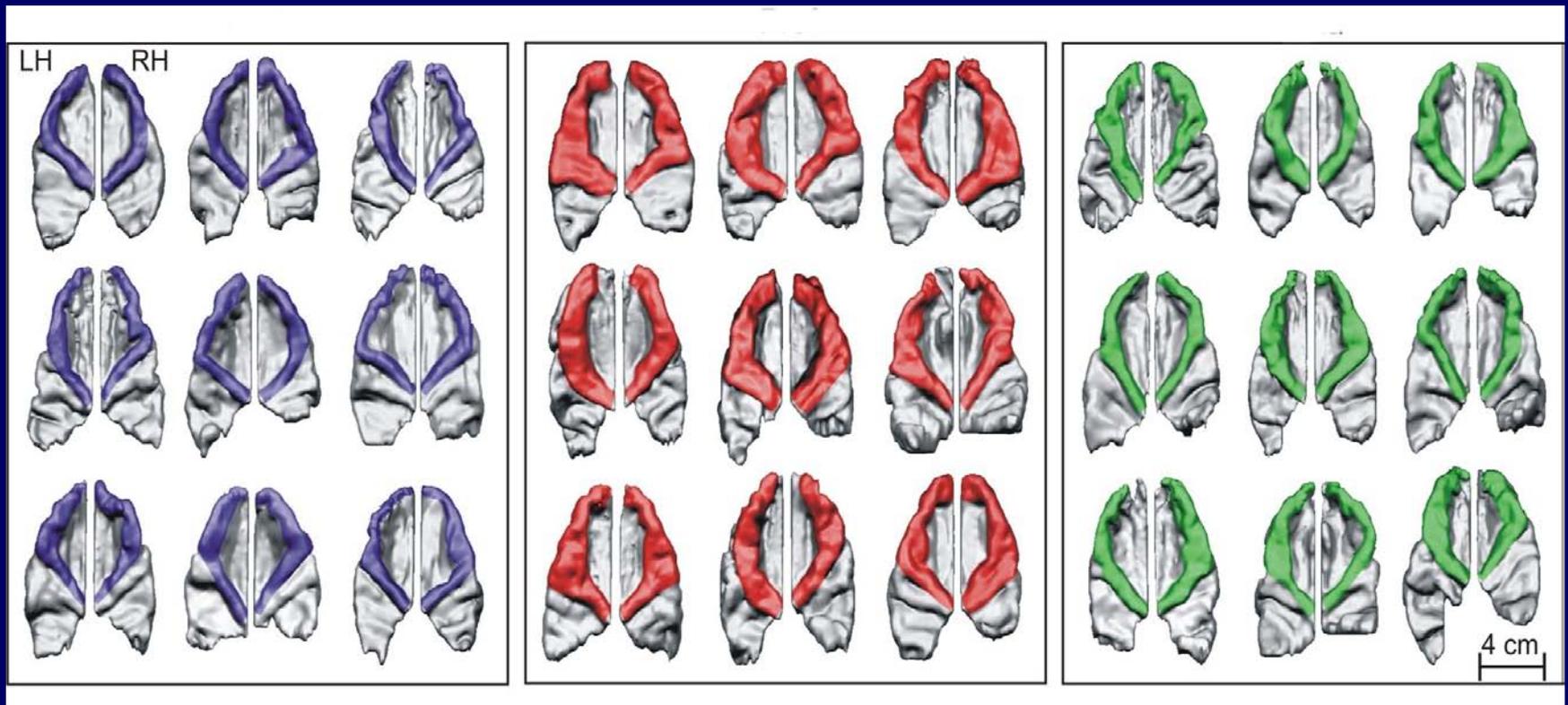
62 Professionelle Musiker

25 Amateurmusiker

Nichtmusiker

Profess. Musiker

Amateurmusiker



Objektiver Test der Musikalität

AMMA Test: weltweit verbreitet an Musikhochschulen

E.E. Gordon (1989)

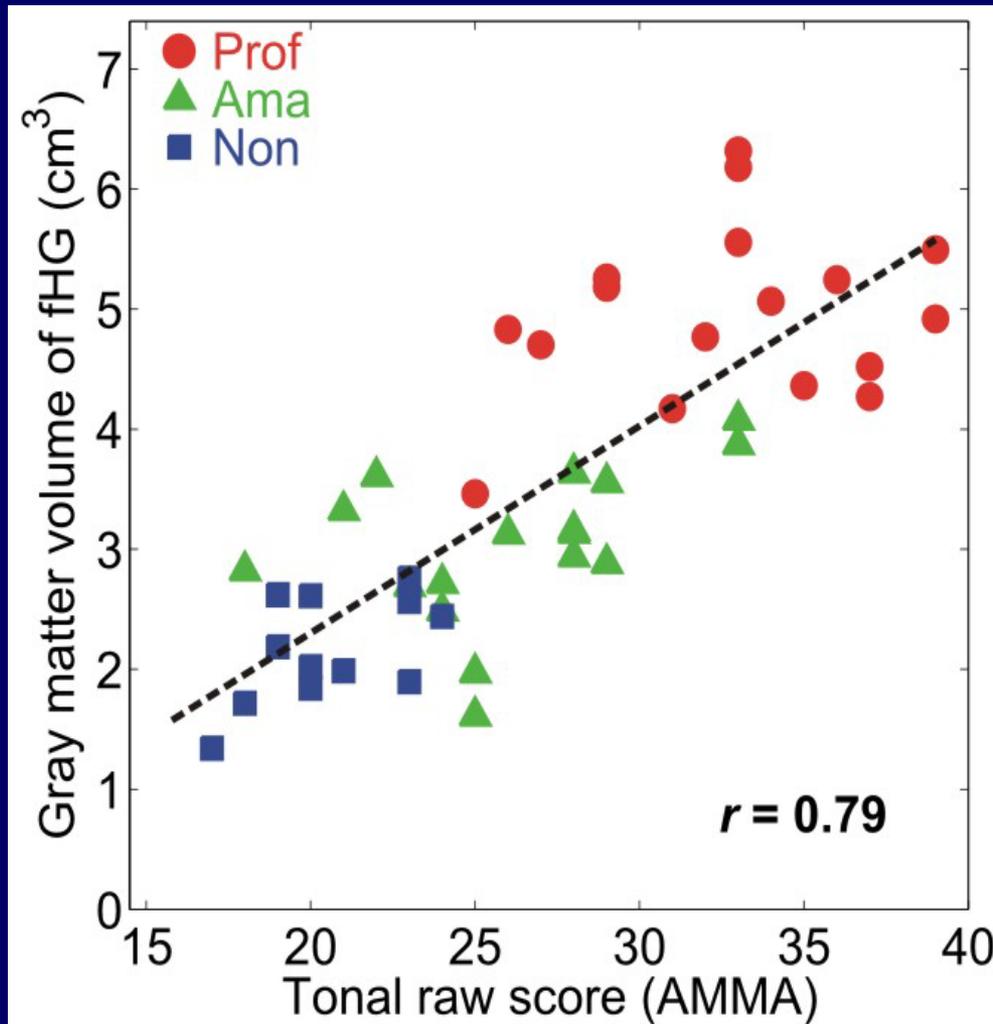
first: Beispiel

second:

30 kurze Melodiepaare;
die wiederholte Melodie enthält entweder Tonhöhen-
oder Tondauern-Änderungen oder ist unverändert
(3 Optionen)

Grösse des Hörkortex und musikalische Begabung

Schneider et al., Nature Neuroscience 5, 688-694, 2002 (226 citations)

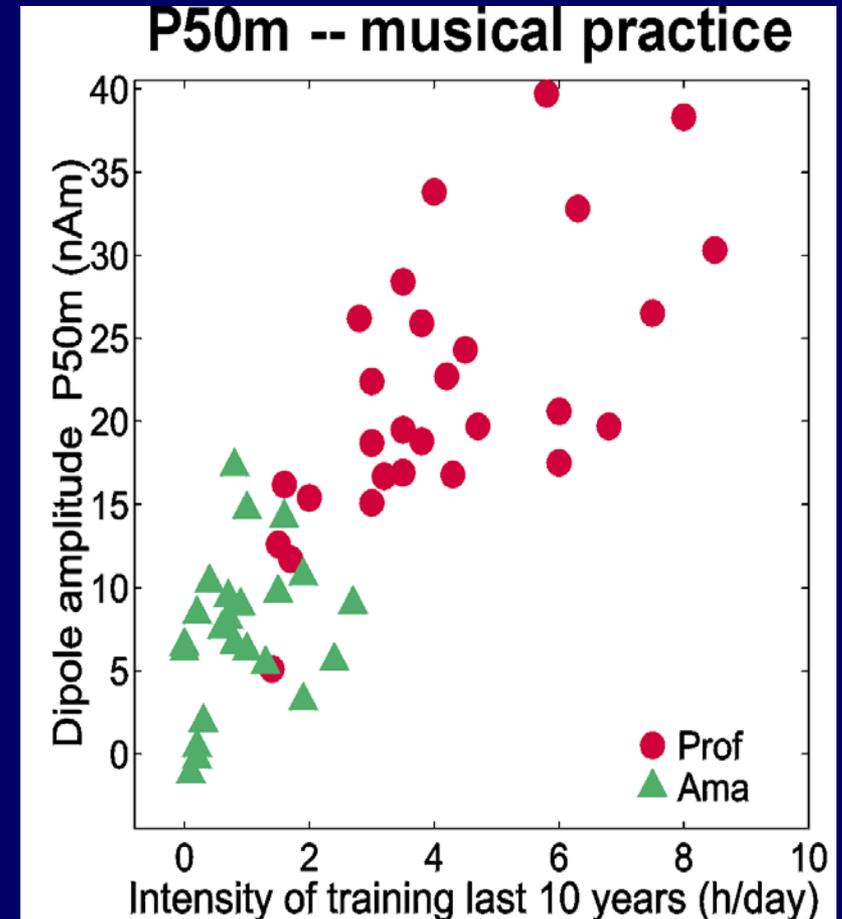
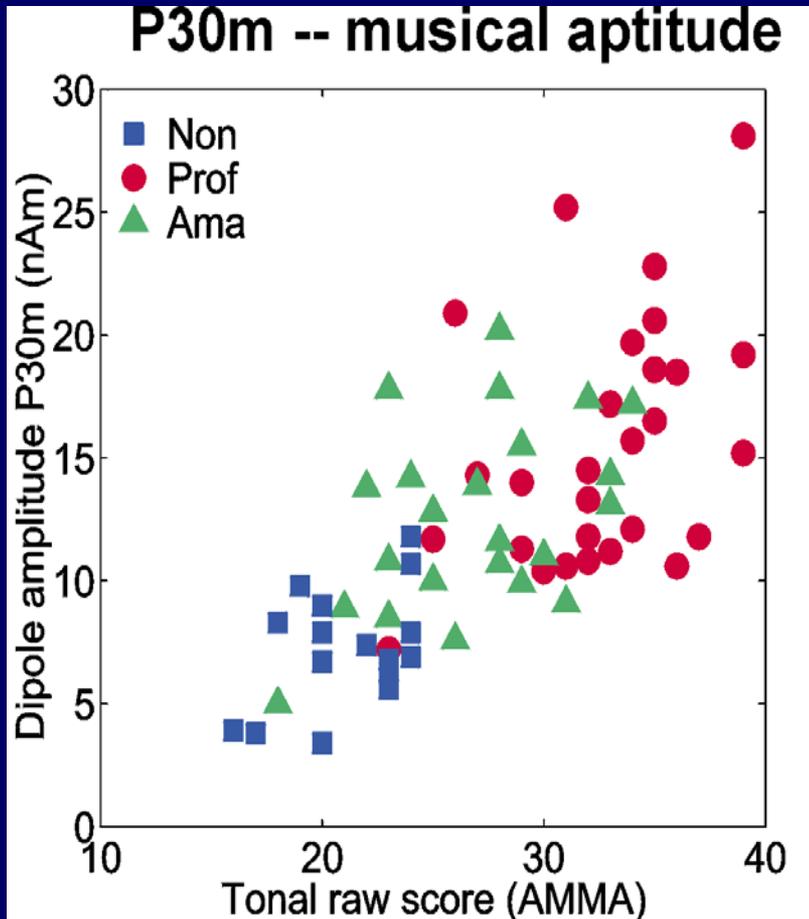


Starke Korrelation

Selbst Amateure
korrelieren

Ergebnisse II (MEG): Begabung vs. Training

(Dipol-Amplituden proportional zum Volumen)



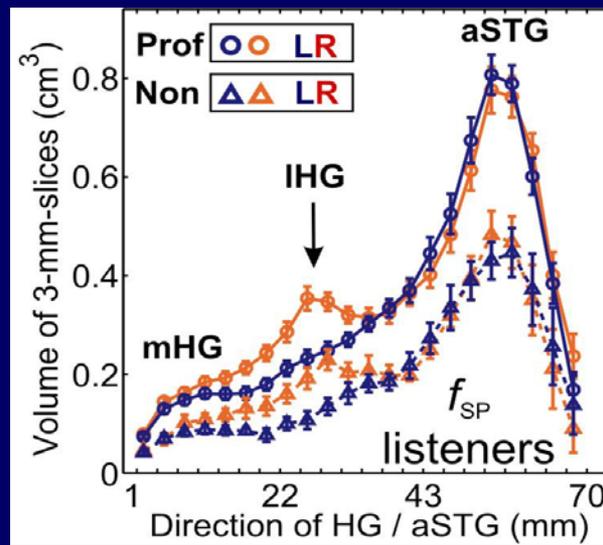
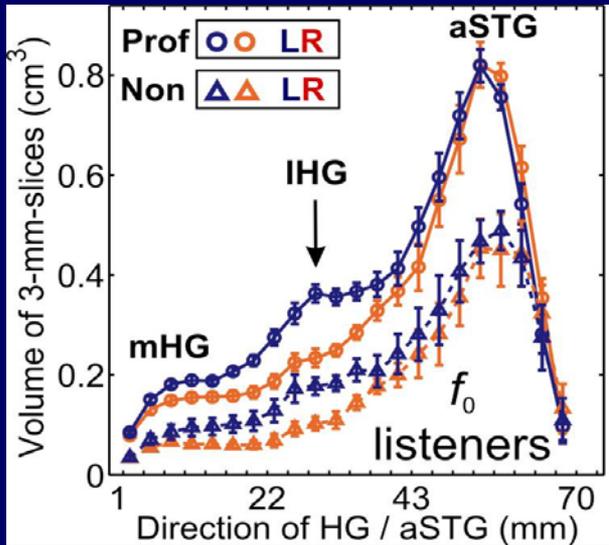
P30m Signal und zugeh. Volumen reflektieren die **musikalische Begabung**
P50m Signal und zugeh. Volumen reflektieren das **Langzeit-Training**

Ergebnisse III: Links/Rechts Spezialisierung der Kortex

P. Schneider et al., Nature Neuroscience 8, 1241-1247, 2005 (85 citations)

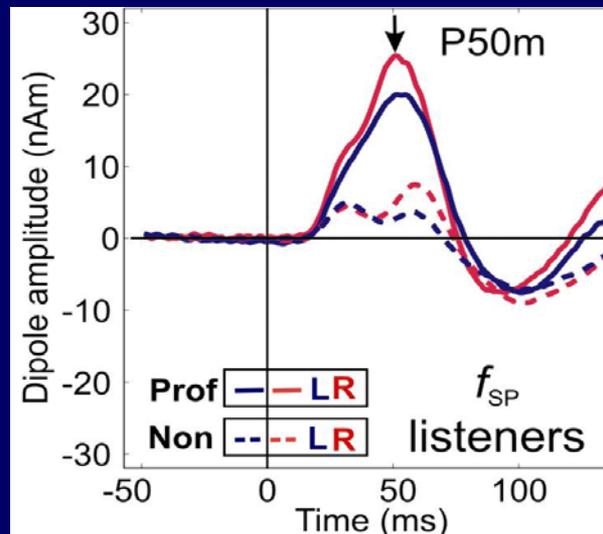
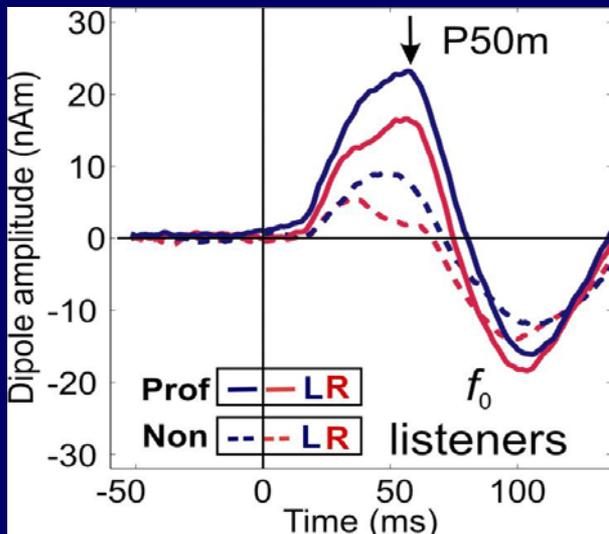
Grundtonhörer

Obertonhörer



Asymmetrie
Links / Rechts

Volumen-Asymmetrie
nur in P50 Region
(IHG)



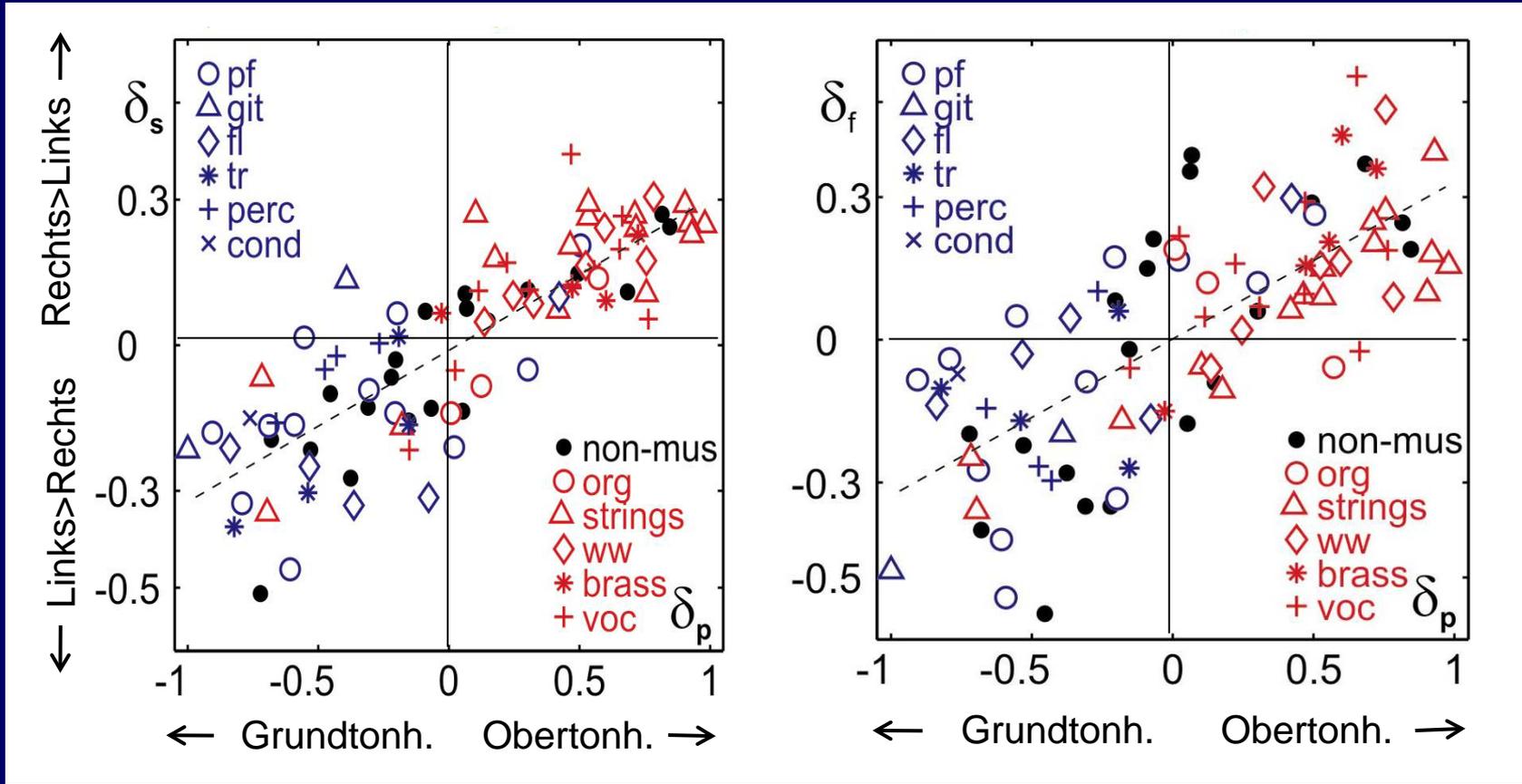
Dipol-Asymmetrie
nur in P50 Region,
konsistent damit

Profimusiker und
Nichtmusiker ähnlich

Ergebnisse IV: Links/Rechts Spezialisierung der Kortices (und Verknüpfung mit der Wahl des Musikinstruments)

Lokales Volumen

P50m Signal (Dipol-Ampl.)



Zusammenfassung

Das Volumen der grauen Substanz im Hörkortex sowie die frühe auditorisch evozierte P30m-Aktivierung reflektieren die musikalische **Begabung** bzw. Veranlagung.

Die nachfolgende auditorisch evozierte P50m Aktivierung in seitlichen Feldern des Hörkortex bildet das musikalische **Langzeit-Training** ab.

Die **Grundton-Hörer** haben einen grösseren **linken** Hörkortex und bevorzugen perkussive Instrumente sowie hohe Solo-Instrumente (impulsive, virtuose Spielweise).

Die **Oberton-Hörer** haben einen grösseren **rechten** Hörkortex und bevorzugen Melodie-Instrumente in tieferen Lagen (melodiöse, klangfarbenbetonte Spielweise).

Funktionell ist vermutlich der **linke** Hörkortex auf **zeitliche** Verarbeitung spezialisiert, der **rechte** auf **spektrale**.

Hörtest: Grundton vs. Obertonhörer

Vermarktung des Heidelberger Tests in "Audio", Januar 2006

Auswahl von 12 Tonpaaren aus ursprünglich 144

Tonpaar Nr.	Aufsteigend ↑	Absteigend ↓
1		Grundton
2		Grundton
3	Grundton	
4	Grundton	
5	Grundton	
6	Grundton	
7		Grundton
8		Grundton
9	Grundton	
10		Grundton
11		Grundton
12	Grundton	