Peter Schneider

Neurologische Klinik, Sektion Biomagnetismus
Universitätsklinikum Heidelberg,
Zentrum für Systematische Musikwissenschaft, Graz
Heidelberger Hörakademie

Neuronale Grundlagen der Klangwahrnehmung und musikalisches Lernen – zwischen außergewöhnlichen Hörfähigkeiten und Hördefiziten

Heidelberger Hörakademie: schneider@musicandbrain.de
Bach-Institut Dornach: Bettina Donzé,
info@bach-institut.ch

Individuelle Aspekte der Klangwahrnehmung

Sänger(in):

Fokussiert auf spektrale Merkmale

(Klangspektrum, Tonhöhe, Melodien)

Schlagzeuger(in):

Fokussiert auf zeitliche Aspekte

(Rhythmus, Metrum, zeitliche Präzision)

Überblick

(1) Wurzeln der Klangwahrnehmungsforschung

(2) Besonderheiten im Gehirn von Musikern:
Individualität und Lateralisation
Unterschiedliche Funktionen der rechten und linken Gehirnhälfte,
gespiegelt in unterschiedlichen Hörweisen des rechten und linken Ohrs

(3) Einfluss des aktiven Musizierens:
AMseL-Projekt (Audio- und Neuroplastizität des musikalischen Lernens)
12-jährige Langzeitstudie mit 220 Kindern/Jugendlichen (2009-2021)

(4) Einfluss des aktiven Hörens
AULOS-Hörtraining: Heidelberg (DE) – Dornach (CH)

(5) Neurokognitives Modell zur Entwicklung
des Hörens vom Kindes- zum Erwachsenenalter

(1) Wurzeln der Klangwahrnehmungsforschung

UniversitätsKlinikum Heidelberg

Hermann von Helmholtz (1821-1894)

1851

1891

1881

"Die Lehre von den Tonempfindungen
als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik" (1863)

UniversitätsKlinikum Heidelberg

Hermann von Helmholtz (1821-1894)

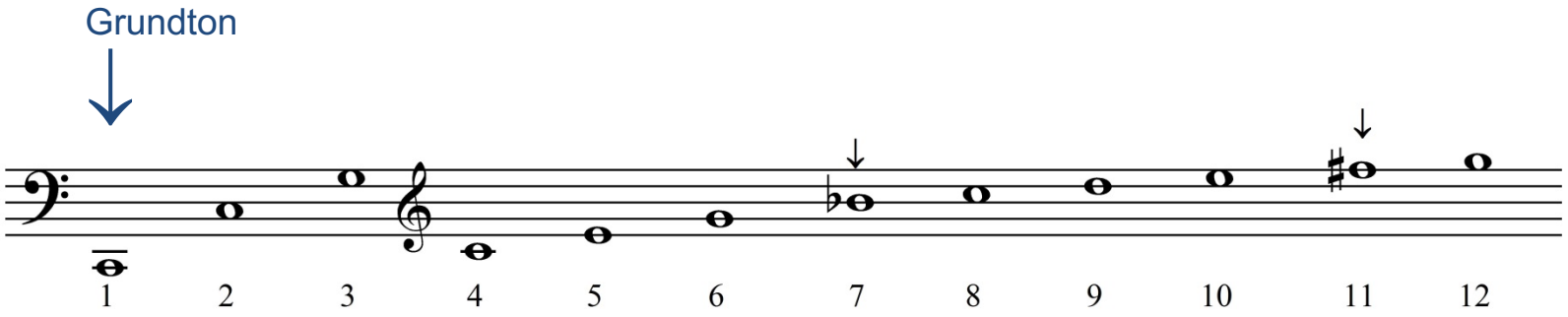
1851

1881

1891

synthetische Klangwahrnehmung : Verschmelzung zur ‘Klangmasse’
analytische Klangwahrnehmung: einzelne Obertöne werden zur bewussten Wahrnehmung gebracht

Jeder musikalische Klang besteht aus einem Grundton
und Obertönen (Harmonischen),
deren Frequenz ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz sind

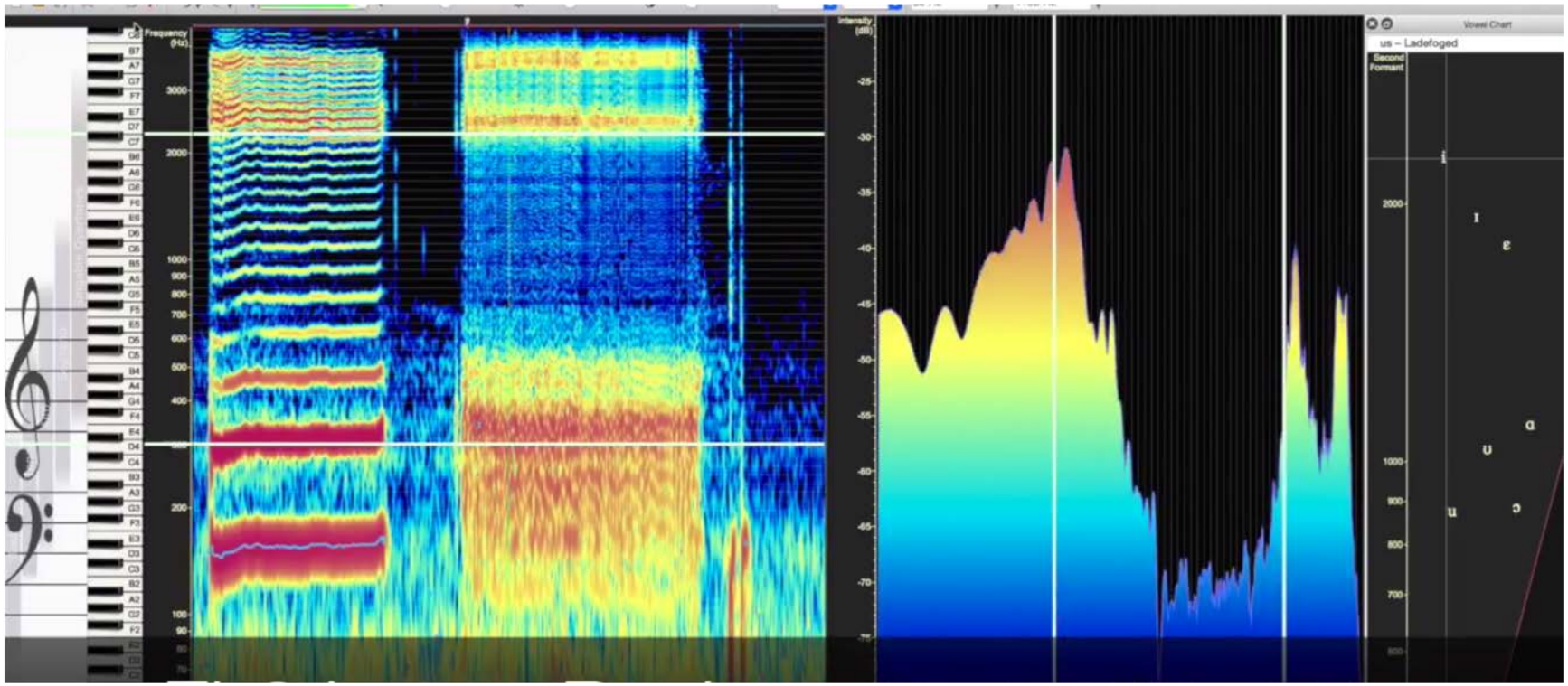


Selbst wenn Teile des Klangspektrum im Alltag oder beim Musizieren maskiert sind,
ist das Gehirn in der Lage, mehr oder weniger den fehlenden Rest zu ergänzen

Helmholtzkugeln / -resonatoren

Helmholtz : „Der richtige Ton des Resonators kann sogar manchmal im Pfeifen des Windes, im Klappern der Wagenräder und im Spritzen von Wasser zu hören sein.“

Jeder musikalische Klang besteht aus einem Grundton
und Obertönen (Harmonischen),



Voce Vista Pro (Overtone Anaylser, Sygyt)
Wolfgang Saus

Arnold Schönberg: “Klangfarbenmelodien”

Klangfarbe in der Wahrnehmung wichtiger als Tonhöhe

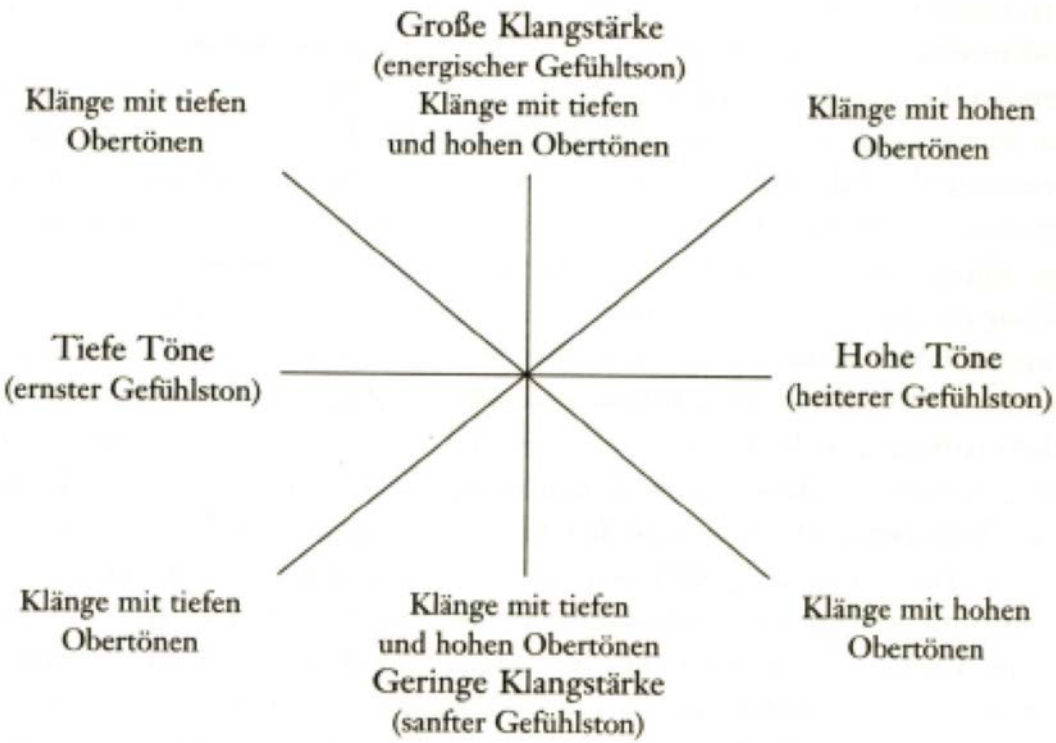
„der Ton macht sich bemerkbar durch die Klangfarbe,
deren eine Dimension die Klanghöhe ist (Harmonielehre, 1911)

Klang-Farbe / Farb-Ton / Duft-Note

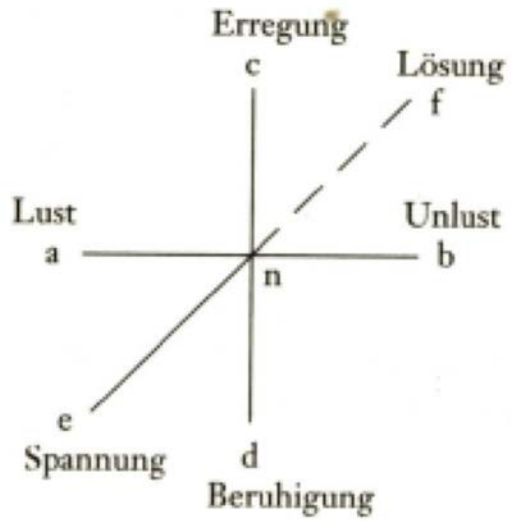
Aus der Perspektive der Gehirnforschung: multisensorische Vernetzung durch sensorische Integration

Wilhelm Wundt: System der “Klang-Gefühle”

“Grundzüge der physiologischen Psychologie” (1874)



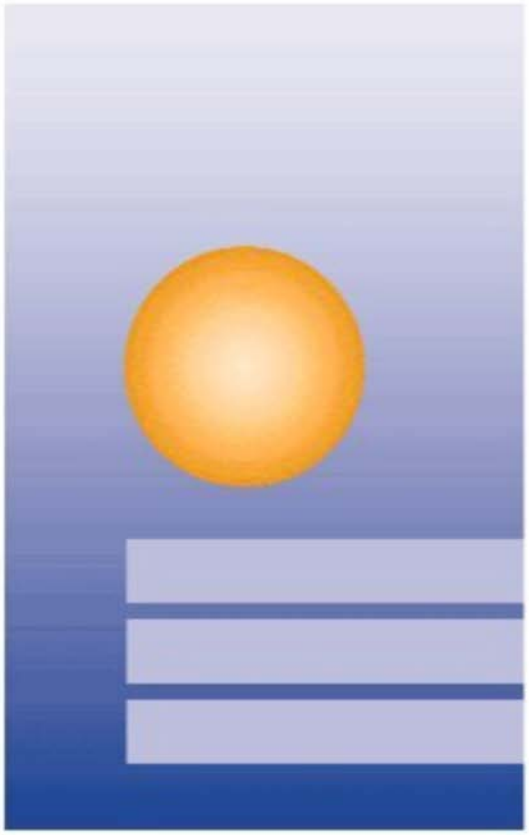
Wundts Schema vom »System der Klanggefühle«



Wundts symbolische Darstellung der »Mannigfaltigkeit der Gefühle« durch ein »geometrisches Gebilde«

Equipment Hörtraining (Heidelberg – Dornach)

Unabhängige Verwendung von Knochen- und Luftleitung



hören-bewegen-wahrnehmen

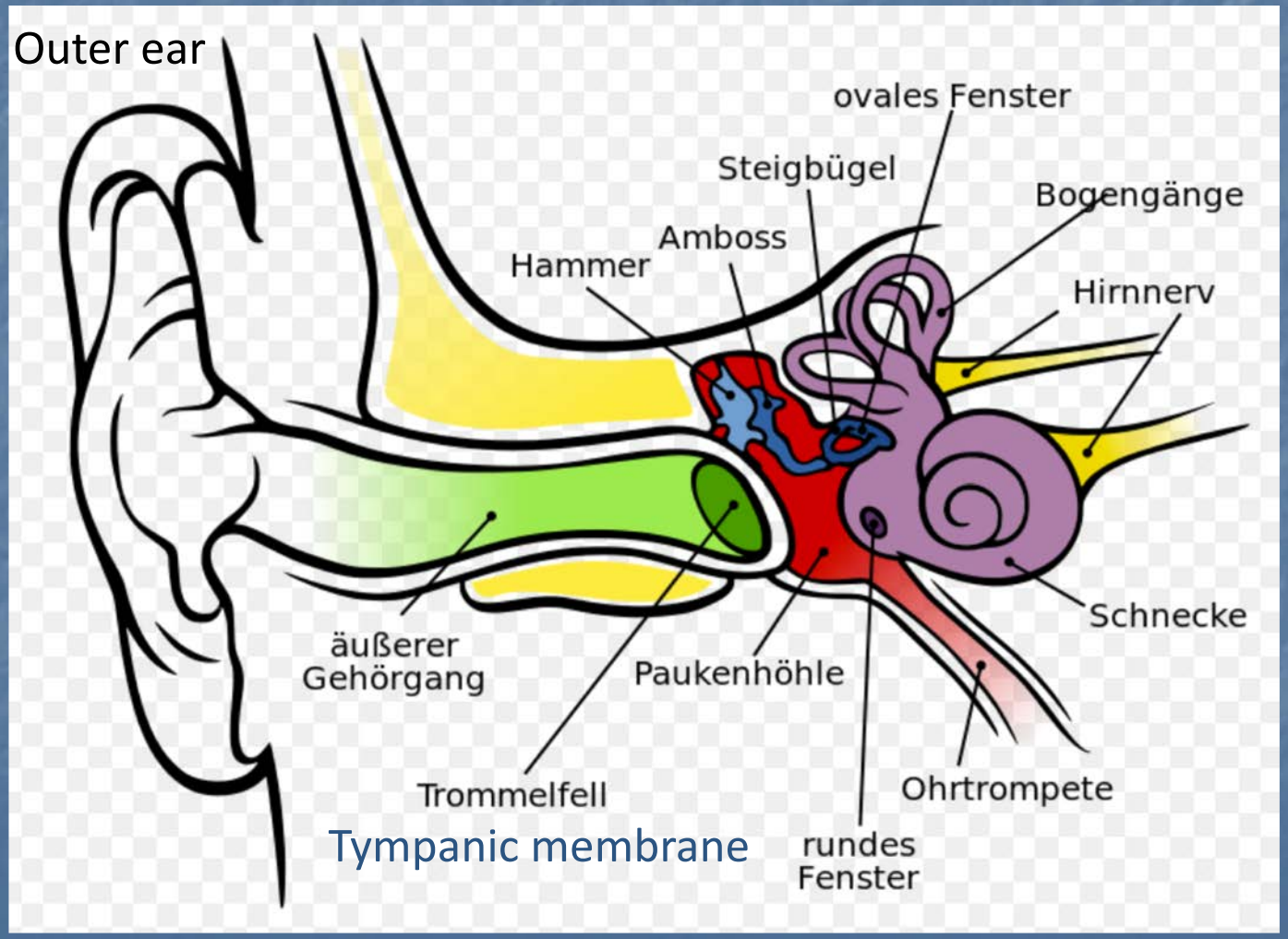
Die Lust zu hören

3. vollständig überarbeitete Auflage

Friedrich Huchting

Prinzipien des “externen“- und “internen“ Hörens

Luftleitung des Schalls zum Mittelohr und anschliessend zur aufsteigenden Hörbahn
Knochenleitung: direkte vibrotaktil-auditorische Stimulation der Haarzellen



Auditory nerve

Tympanic Cavity

Eustachian trumpet

Aufsteigende Hörbahn von der Cochlea zum auditorischen Kortex

Anzahl der Zellen/Neuronen

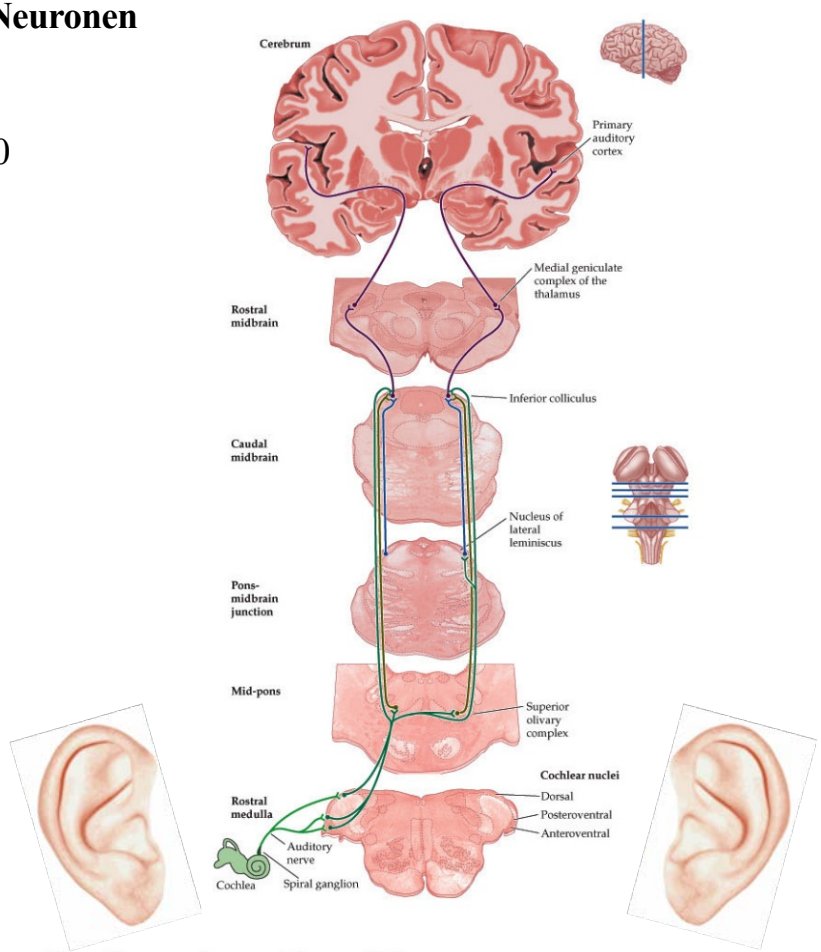
100.000.000 — Hörkortex

500.000 — Thalamus

400.000 — Mittelhirn

90.000 — Hirnstamm

30.000 — Hörnerv, Cochlea



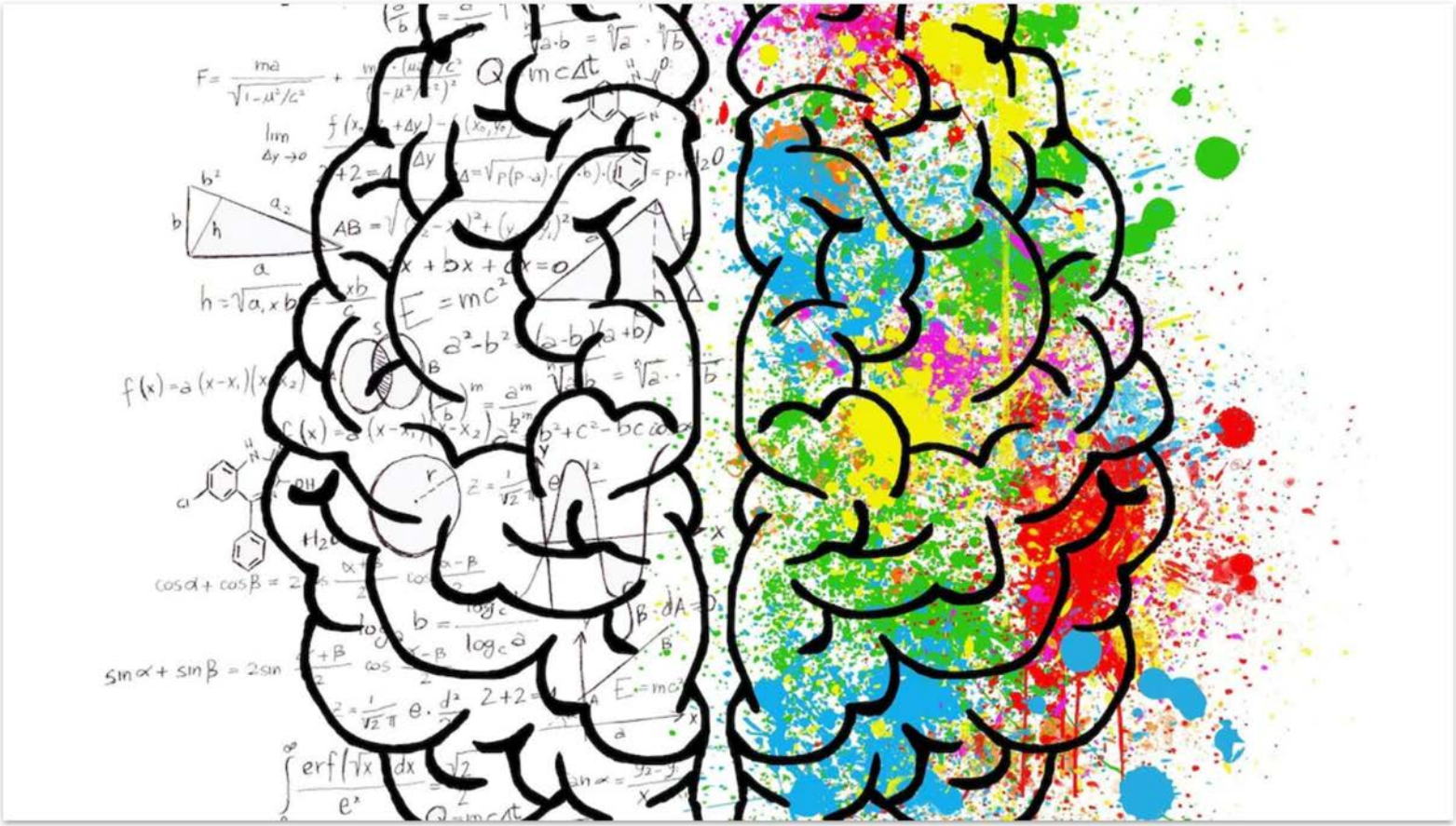
***Principles of Cognitive Neuroscience*, Figure 6.2**

© 2008 Sinauer Associates, Inc.

Neuroplastizität

Das Gehirn wird den Ohren als „Prozessor“ zugeschaltet und ergänzt Informationen die im eingehenden Schallsignal nicht erhalten sind

Neuroplastizität



Für was die rechte Gehirnhälfte genau zuständig ist, ist noch ungeklärt. (Bild: Pixabay/ElisaRiva)

Arbeitsaufteilung der rechten und linken Gehirnhälfte

Beim Hören: rechts Klangfarben, Melodien, links: Rhythmen, Akkorde, Intervalle

UniversitätsKlinikum Heidelberg

Arbeitsgruppe “Musik und Gehirn” (www.musicandbrain.de)

Lettland
Musik-Akademie Riga

Mannheim
Musikhochschule

Heidelberg
Neurologische Klinik, Hochschule für Kirchenmusik

Basel
(Universitätsspital, Musik-Akademie)

Zürich
Neuroradiologie

Wien
Kulturwissenschaftliche Fakultät

Genf
BioTech Campus

Graz
Psychologisches und Musikwissenschaftl. Institut

Erforschung der neuronale Grundlagen subjektiver und objektiver Aspekte des Hörens und der Klangwahrnehmung

Royal Liverpool Philharmonic Orchestra (RLPO)

Breites Spektrum von Orchestermusikern, Rockmusikern, Solisten, Dirigenten, Musikpädagogen, Musikstudenten, Hobbymusikern, musizierenden Kindern

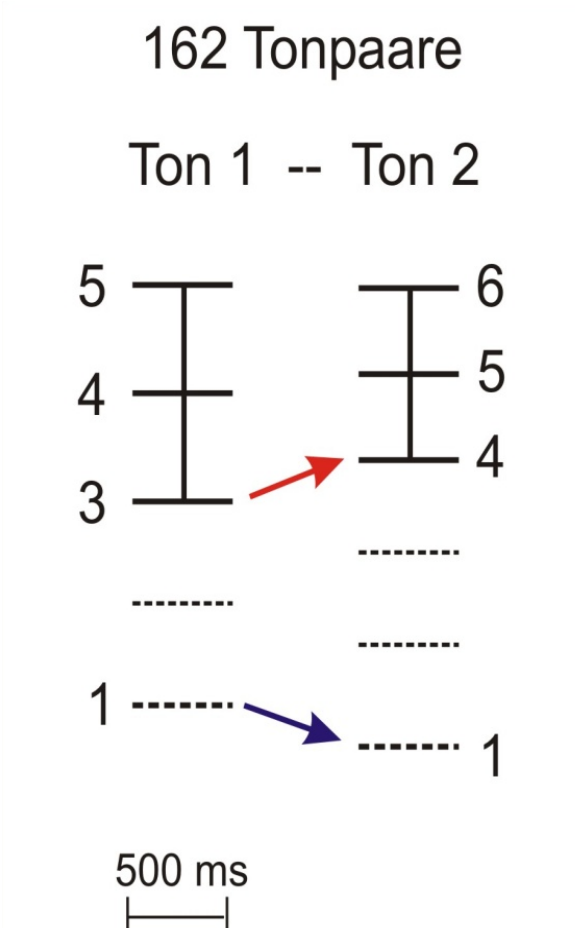
Orchester des Mannheimer Nationaltheaters

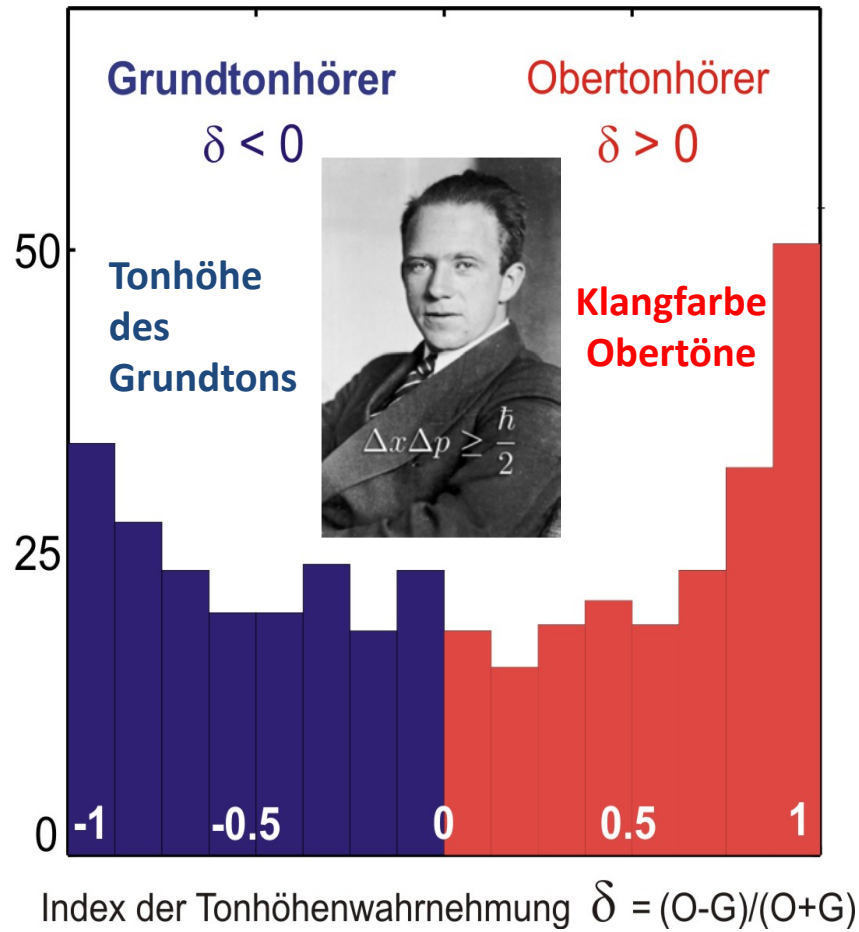
Beide Orchester wiesen homogene, aber unterschiedliche Hörweisen auf

MA: Dominanz LH; zeitlich rhythmischer Spielweise; RLPO: Dominanz RH; spektrale Klangelemente

Langzeitstudien: Erforschung veranlagter Musikalität und musikalischen Lernens

Test zur Oberton- und Grundtonerkennung





Tonrichtungswahrnehmung für jeweils zwei aufeinanderfolgende harmonische Klänge

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

Kurztest (12 Tonpaare)

Bewertung der Testtöne:

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

G: Grundton
(fundamental pitch)

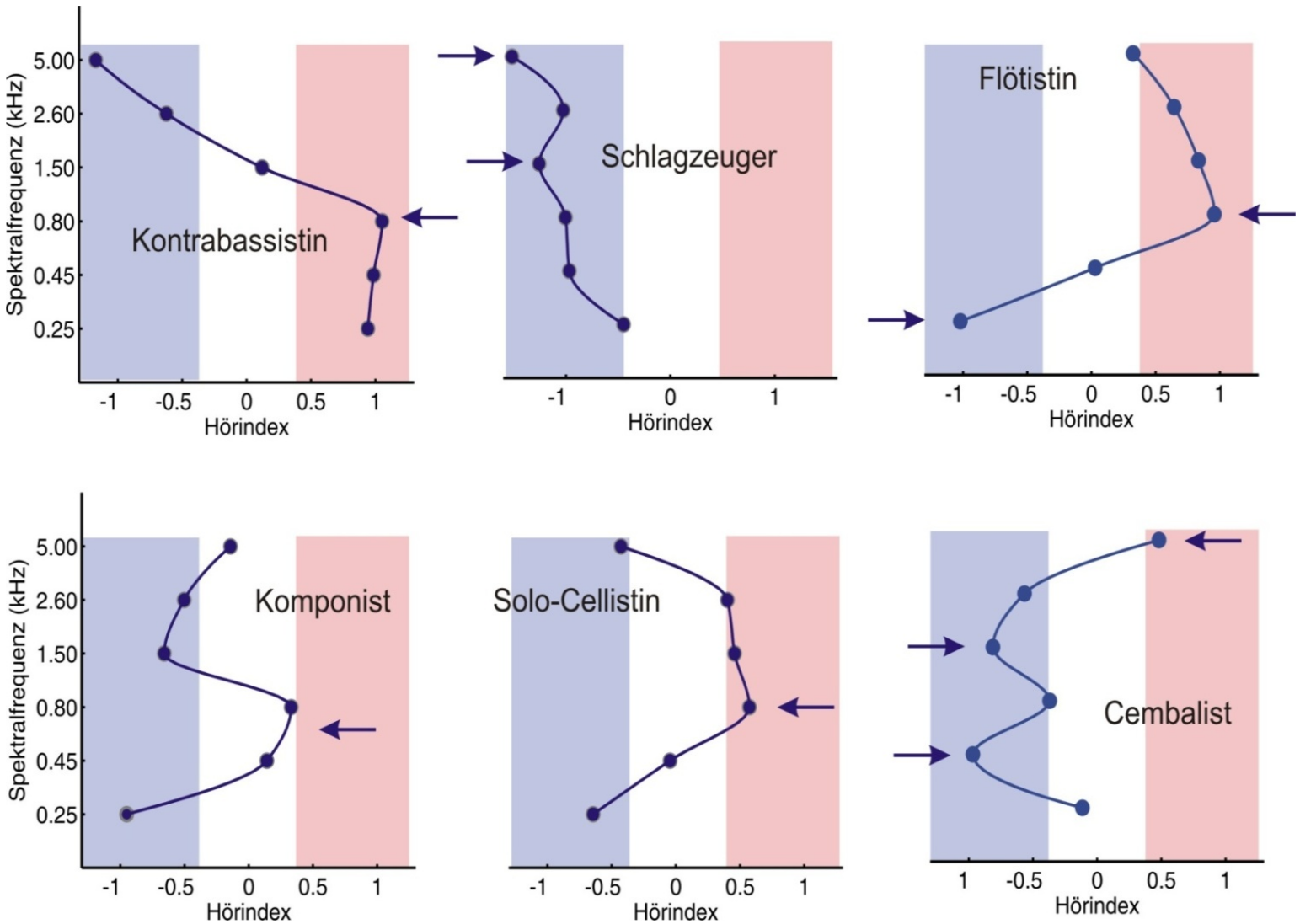
O: Oberton
(spectral pitch, harmonics)

9-12 Grundtöne:
Grundtonhörer
(fundamental pitch listner)

6-8 Grundtöne
Gemischter Hörer
(mixed listener)

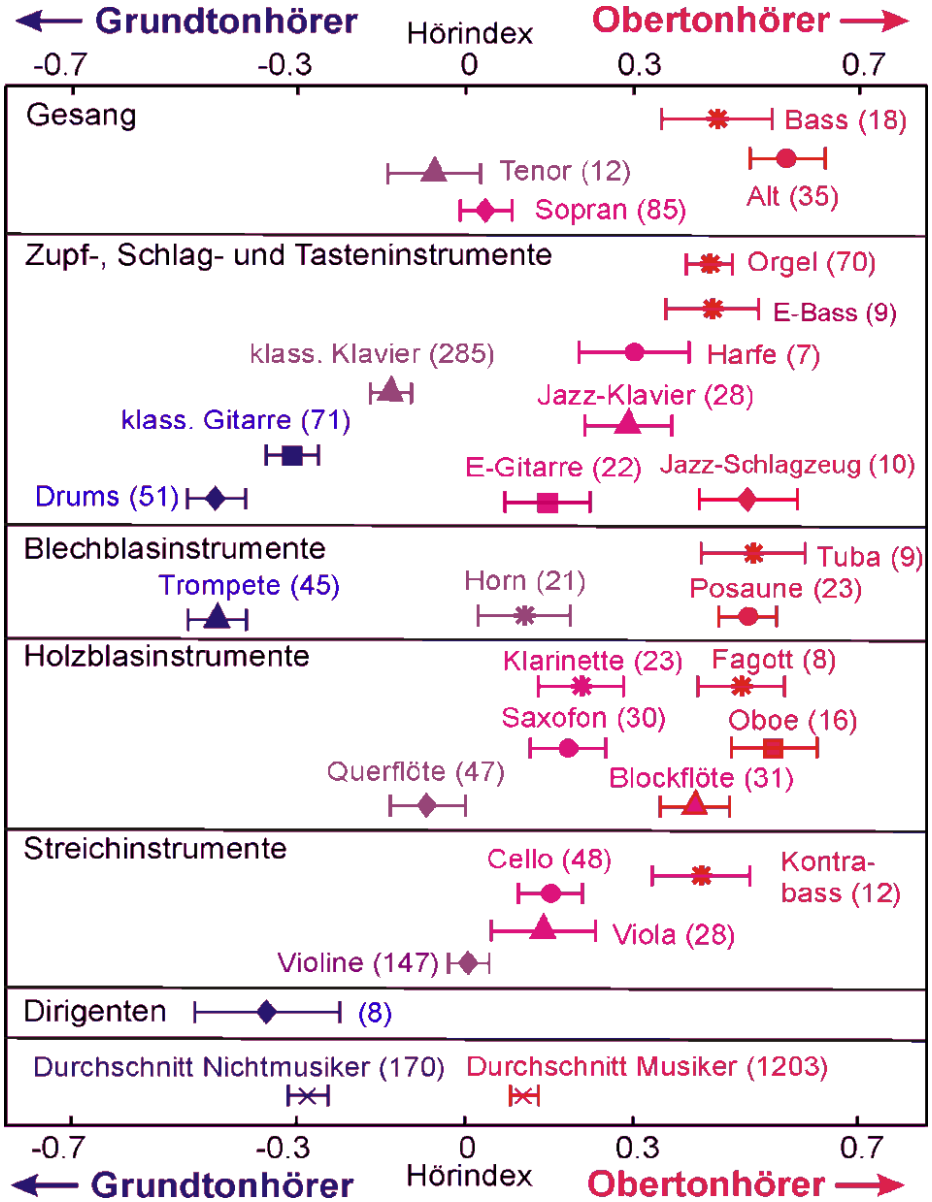
0-5 Grundtöne
Obertonhörer
(spectral pitch listener)

Individuelle Frequenzprofile verschiedener Musiker



Einfluss auf Musizierverhalten, Präferenz von Instrumenten, Musikstil

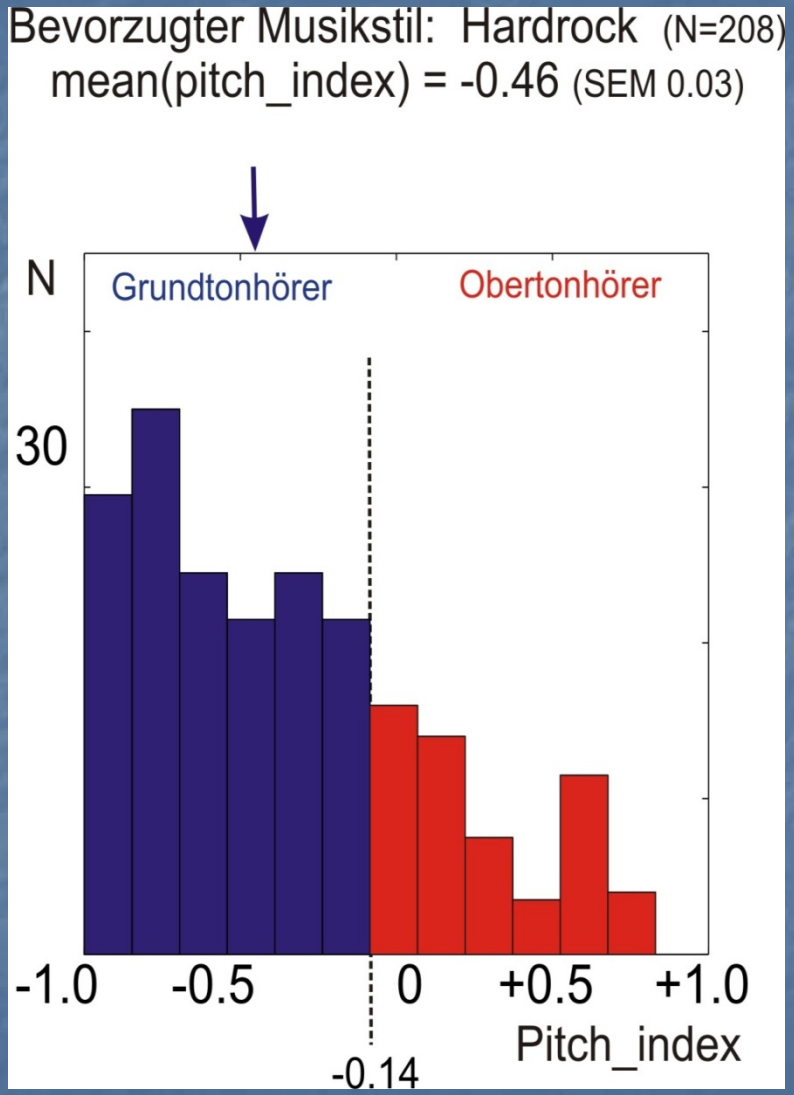
Klangwahrnehmung – Präferenz für Musikinstrumente

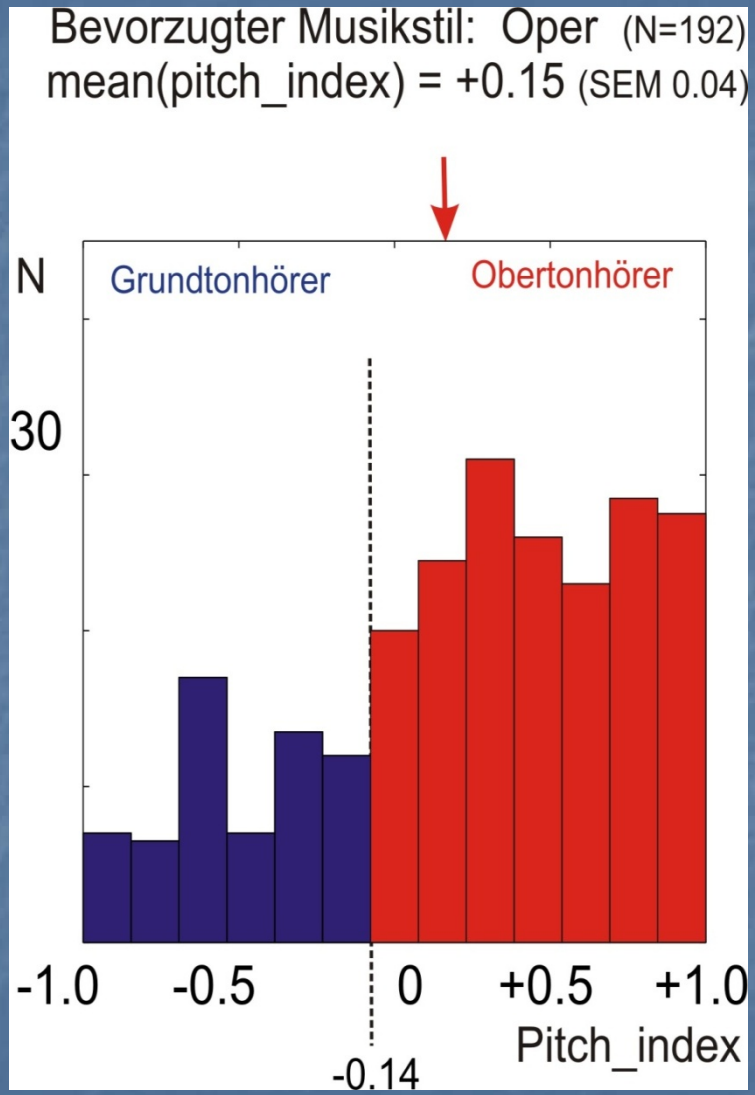


Schneider, P. et al., *NY Acad Sci*, Vol. 1060, p. 387-395 (2005),

Gruhn W., Hofmann E. & Schneider P., *Üben und Musizieren* (01 / 2012)

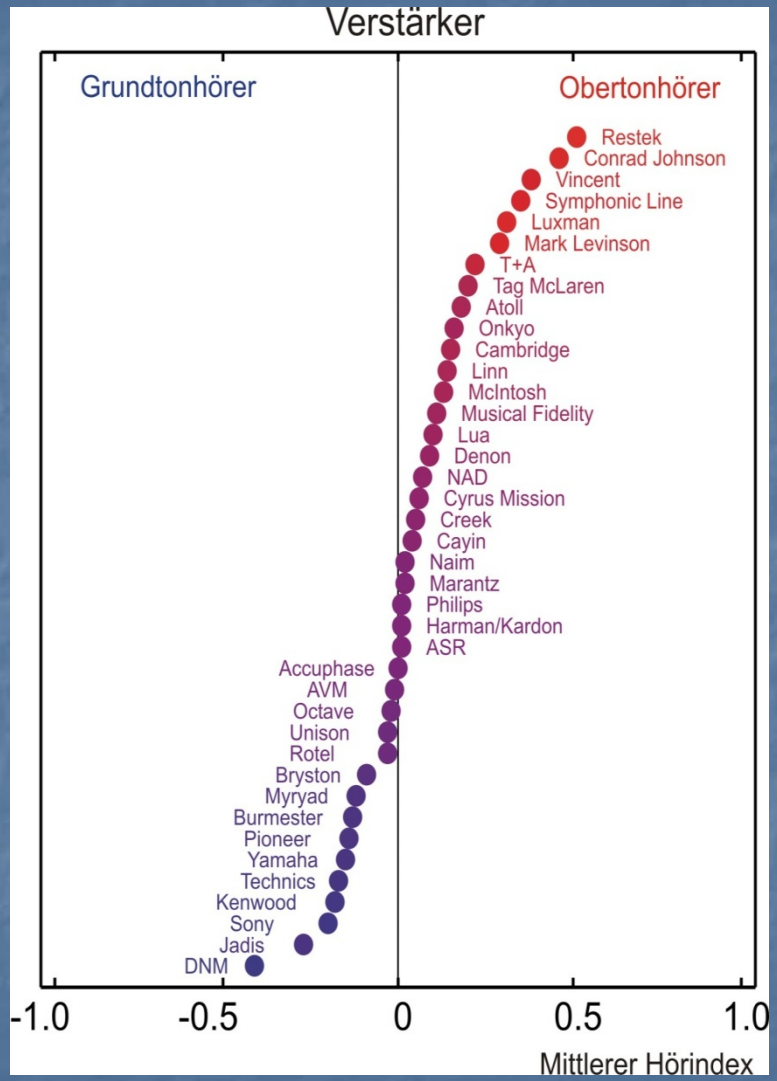
Klangwahrnehmung – Präferenz für Musikstile

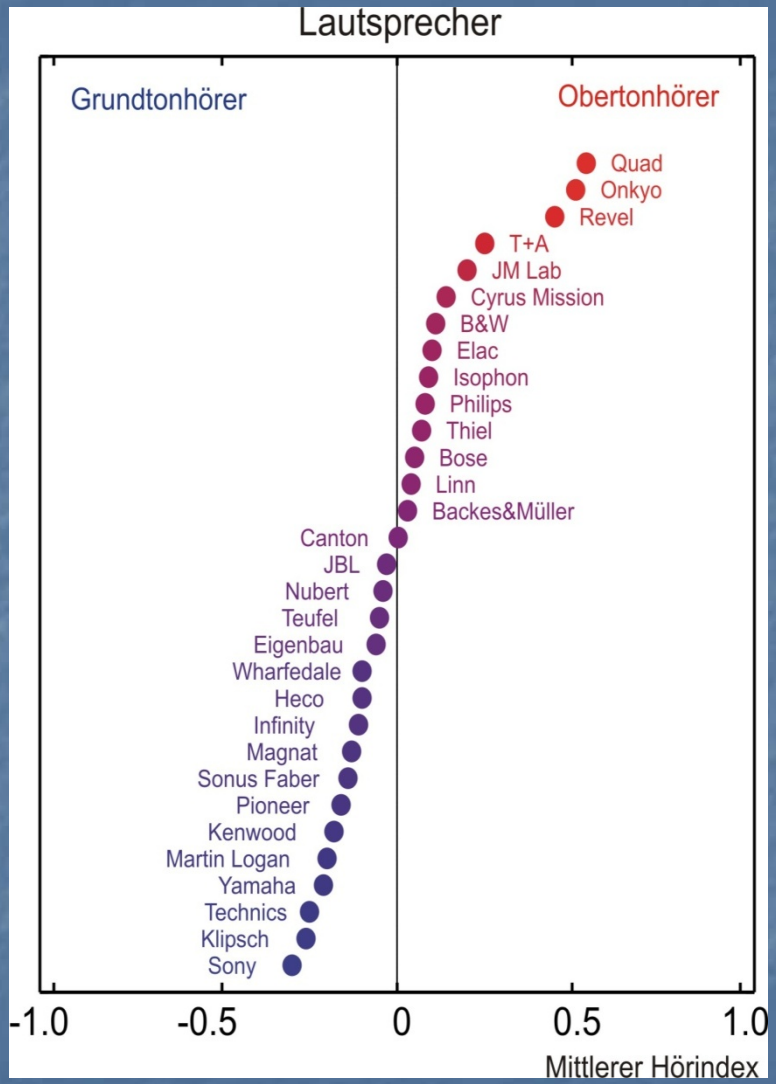




5700 Audio-Leser, C. Tantschinez, Audio 1/2006

Klangwahrnehmung – Präferenz für Hifi-Anlagen

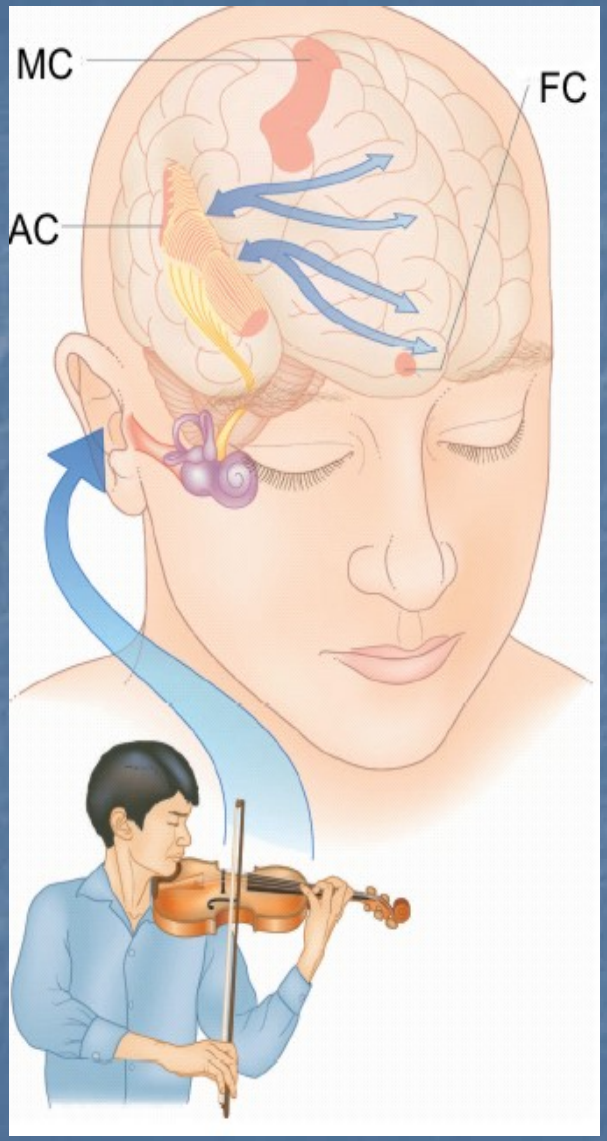




5700 Audio-Leser, C. Tantschinez, Audio 1/2006

(2) Besonderheiten im Gehirn von Musikern: Individualität und Lateralisation

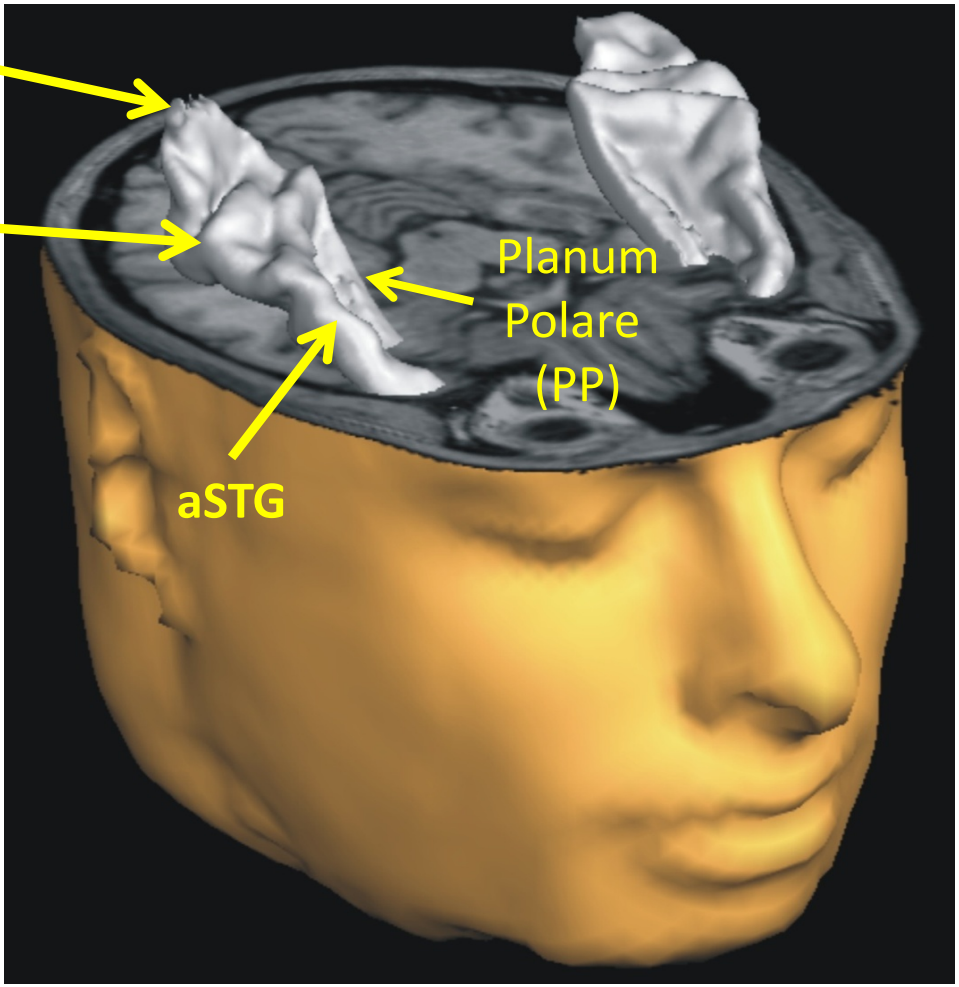
unterschiedliche Funktionen der rechten und linken Gehirnhälfte
gespiegelt in unterschiedlichen Hörweisen des rechten und linken Ohrs



Kernspintomographie (MRT)

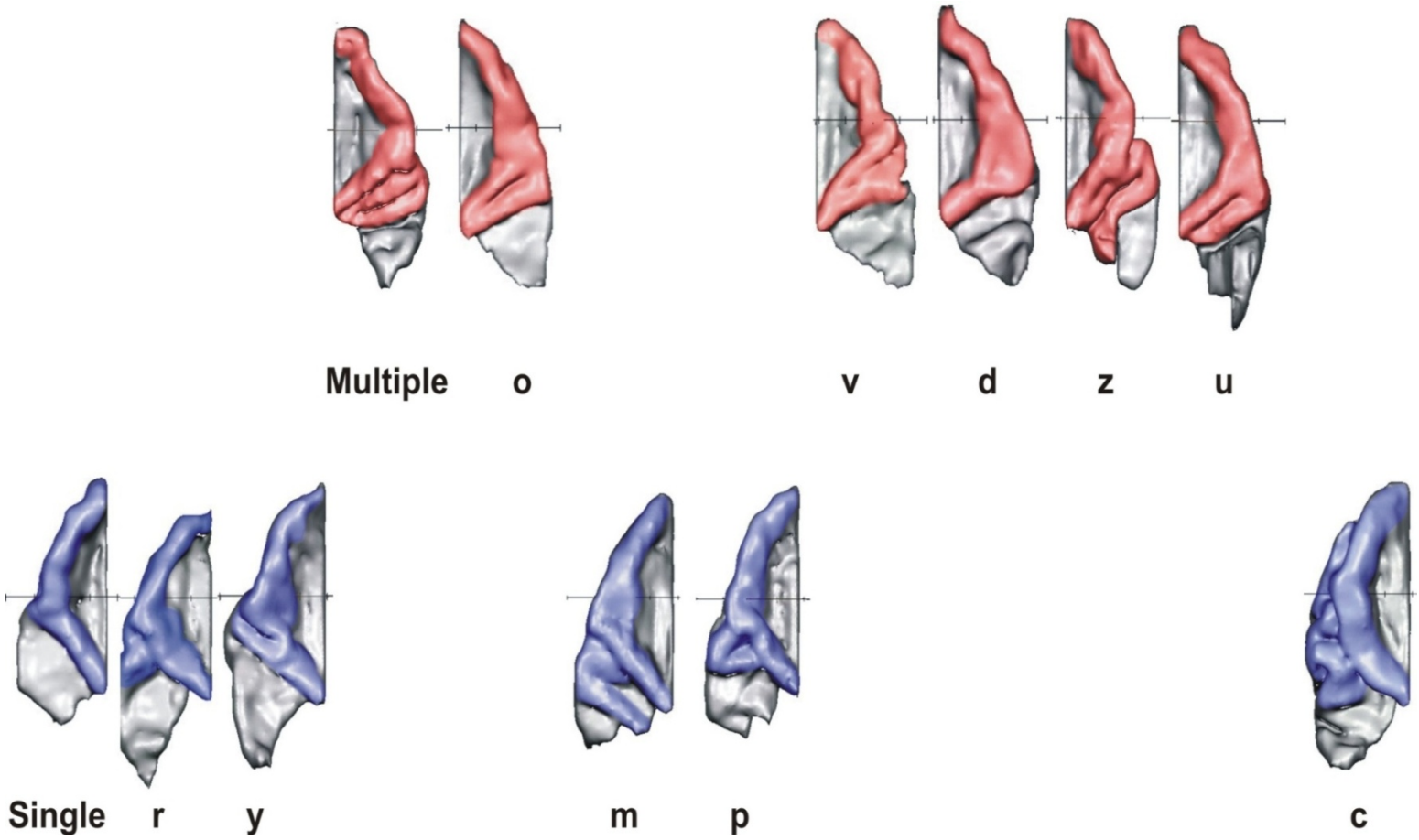
Siemens TrioTim 3 Tesla (Dietmar Hopp Stiftung)

3-dimensionale Rekonstruktion des linken und rechten Hörkortex



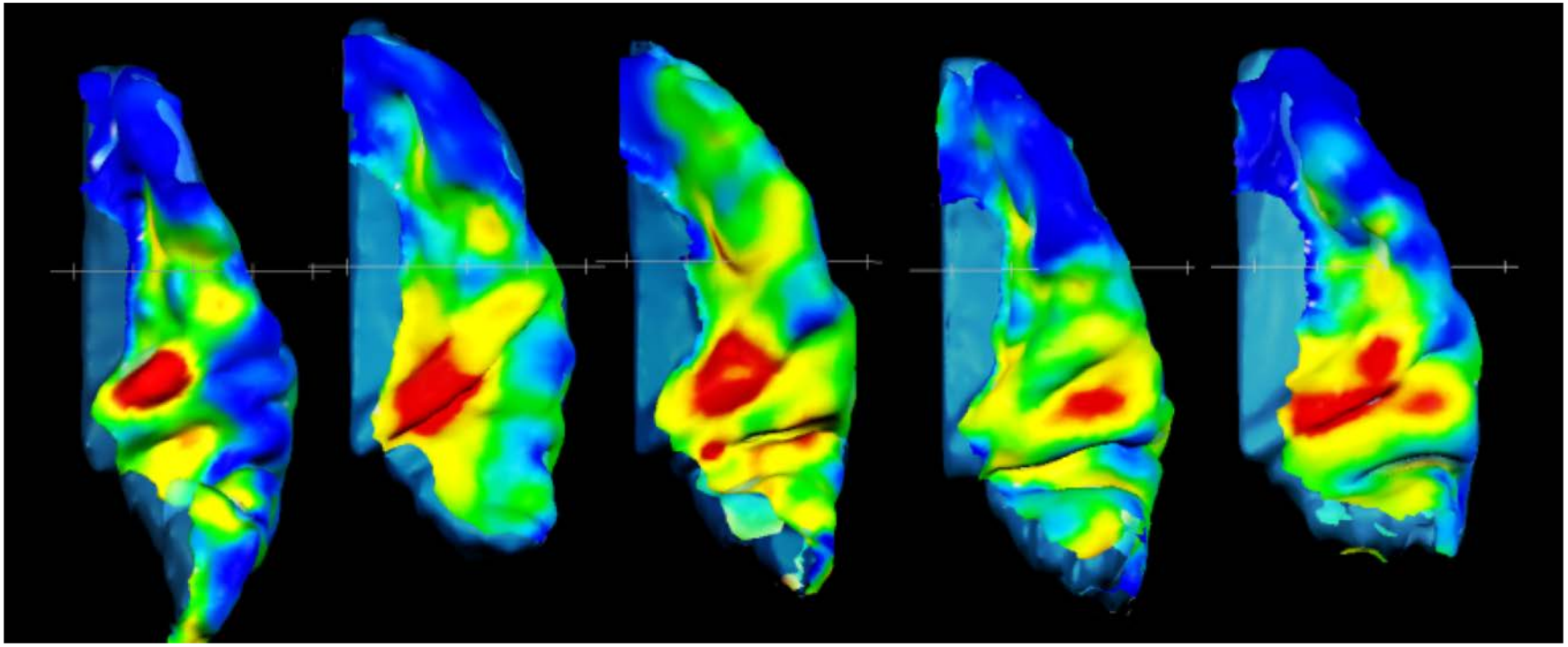
Sänger (Bariton) der Schola Cantorum Basiliensis (SCB)

“morphologische Prototypen” des auditorischen Kortex
mit unterschiedlicher Form und Anzahl der Heschlschen Querwindungen



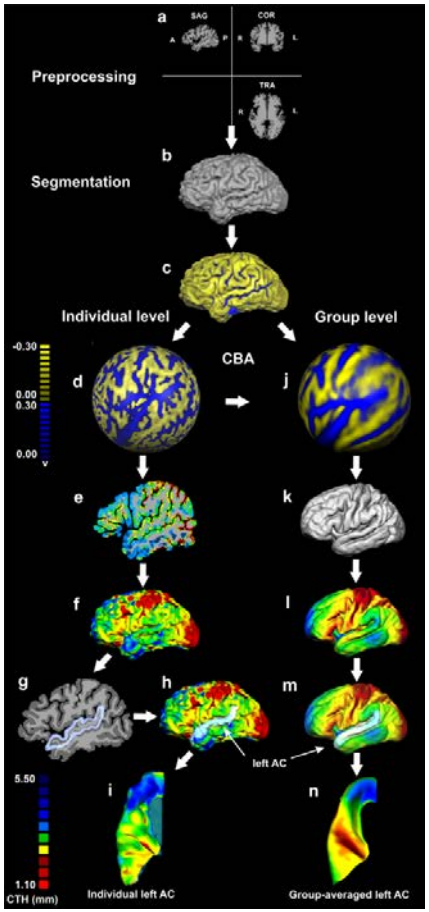
Variabilität spiegelt die Subjektivität der Klang- und Musikwahrnehmung

Kortikale Dicke der grauen Substanz

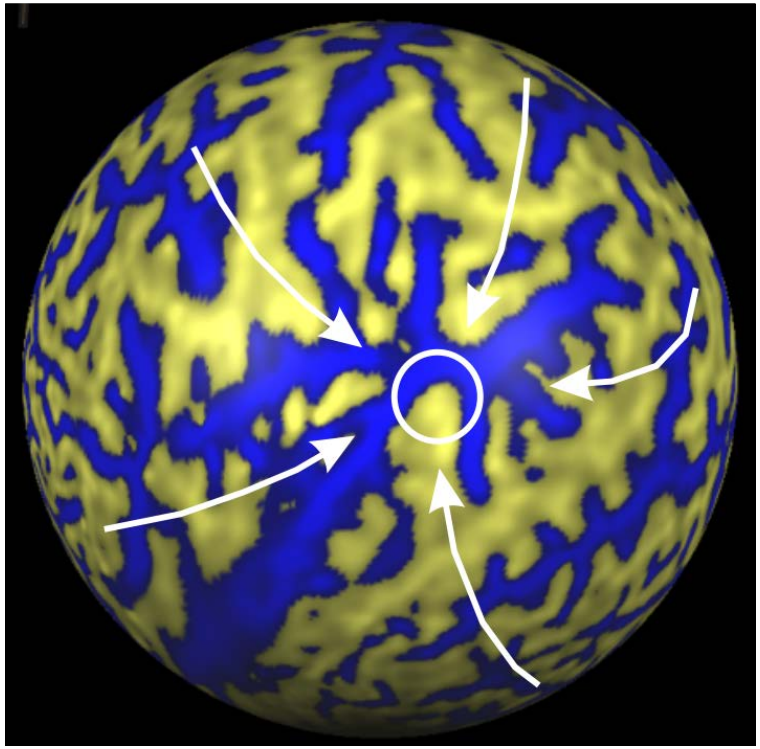


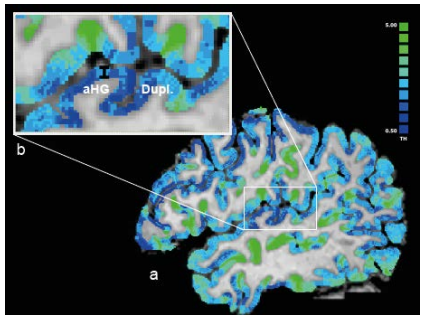
→ Lage der primären (rot) und sekundären (gelb/grün) auditorischen Felder unterscheidet sich deutlich zwischen den Probanden

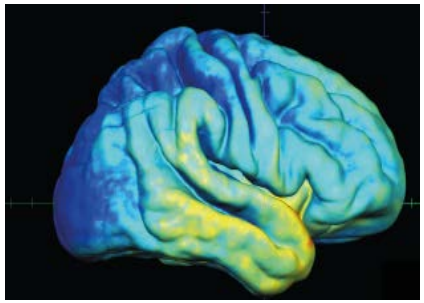
Zoellner et al., Human Brain Mapping, 40(4), 1139-1154 (2019)



Wird die rechte und linke Gehirnhälfte jeweils auf eine Kugeloberfläche projiziert, liegt der primäre Hörkortex genau im Zentrum



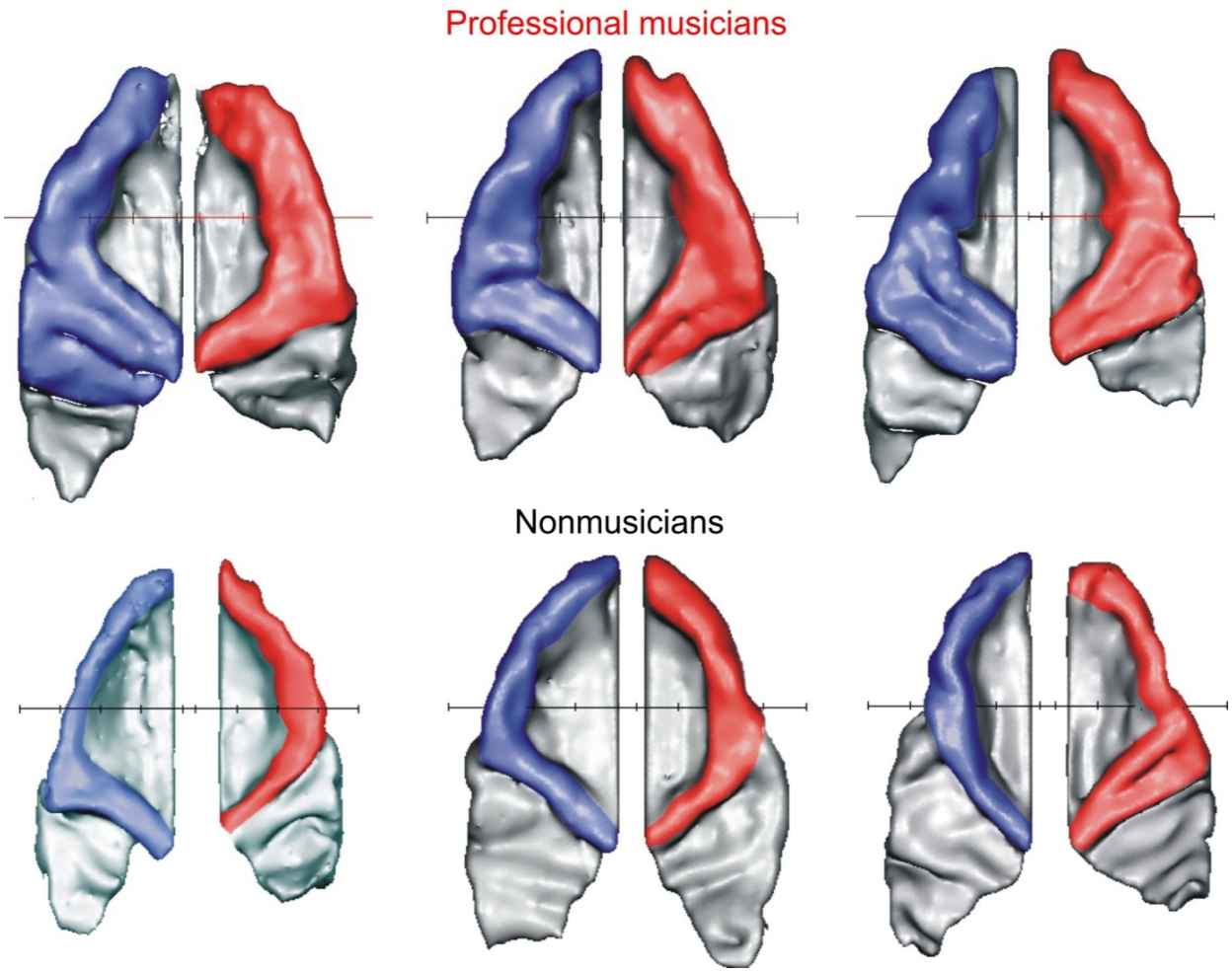




„Primäres Hören“ ist fundamental

Zoellner S. et al. Human Brain Mapping, 2019

Profimusiker 130% mehr graue Substanz im Heschl Gyrus



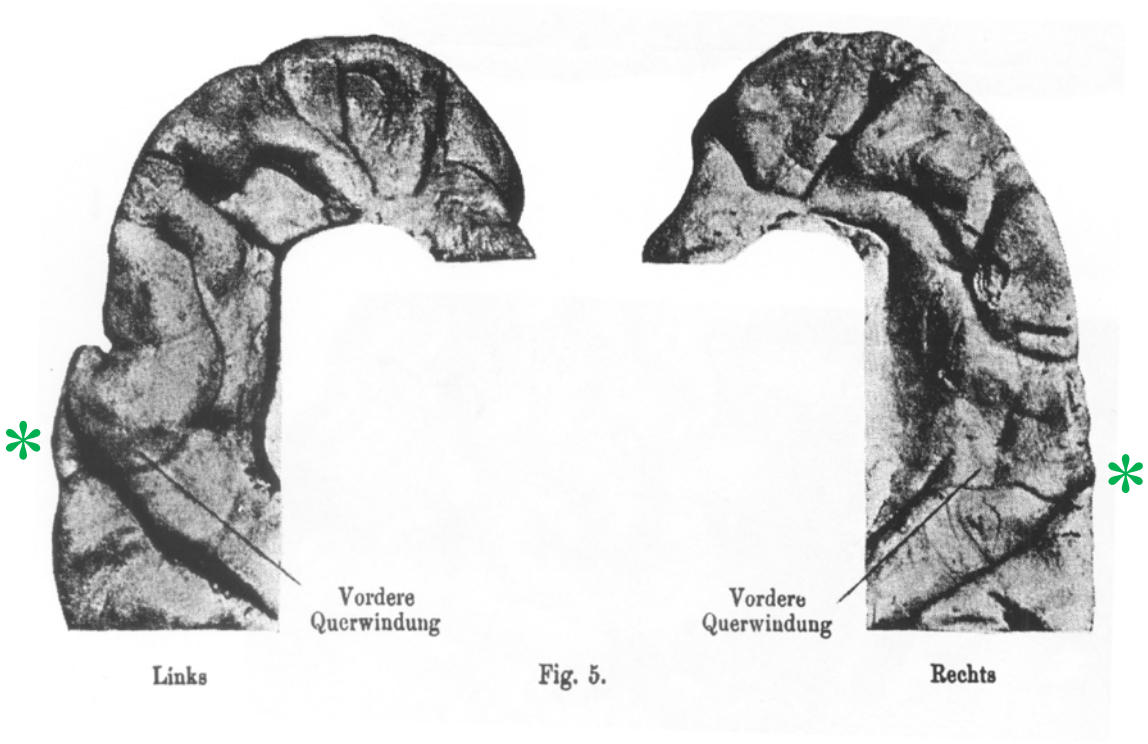
Unterschiede sind bereits im Alter von ~7 Jahren sichtbar
→ anatomische Grösse und Form des HG schon seit (früher) Kindheit angelegt

Schneider, P. et al., Nature Neuroscience 5, 688-694, 2002

S. Auerbach 1906-1911:

Morphometrische Studien zeigten eine ungewöhnlich breite vordere Heschlsche Querwindung bei berühmten Musikern

Felix Mottl, Conductor
(Vienna Philharmonic Orchestra)

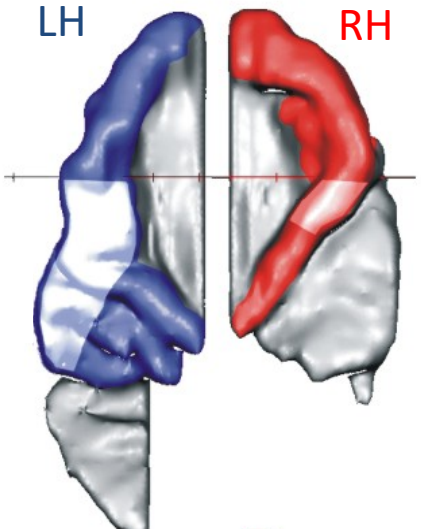


1. Grosse Heschlsche Querwindung = Indikator für musikalische Begabung

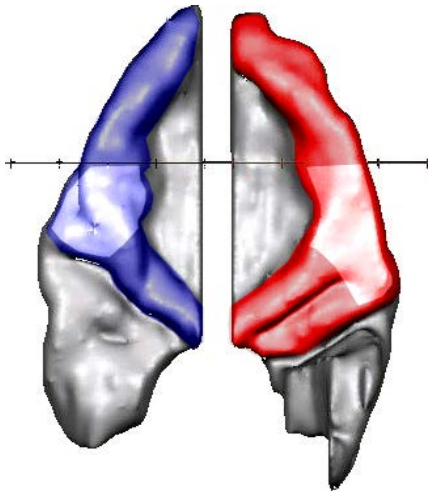
Vielzahl von direkten Zusammenhängen zwischen morphologischen Merkmalen und auditorischen besonderen Fähigkeiten bzw. Dysfunktionen

2) Rechts/Links-Asymmetrie der Heschl Windungen spiegelt die Oberton/ Grundtonhörfähigkeit

Grundtonhörer



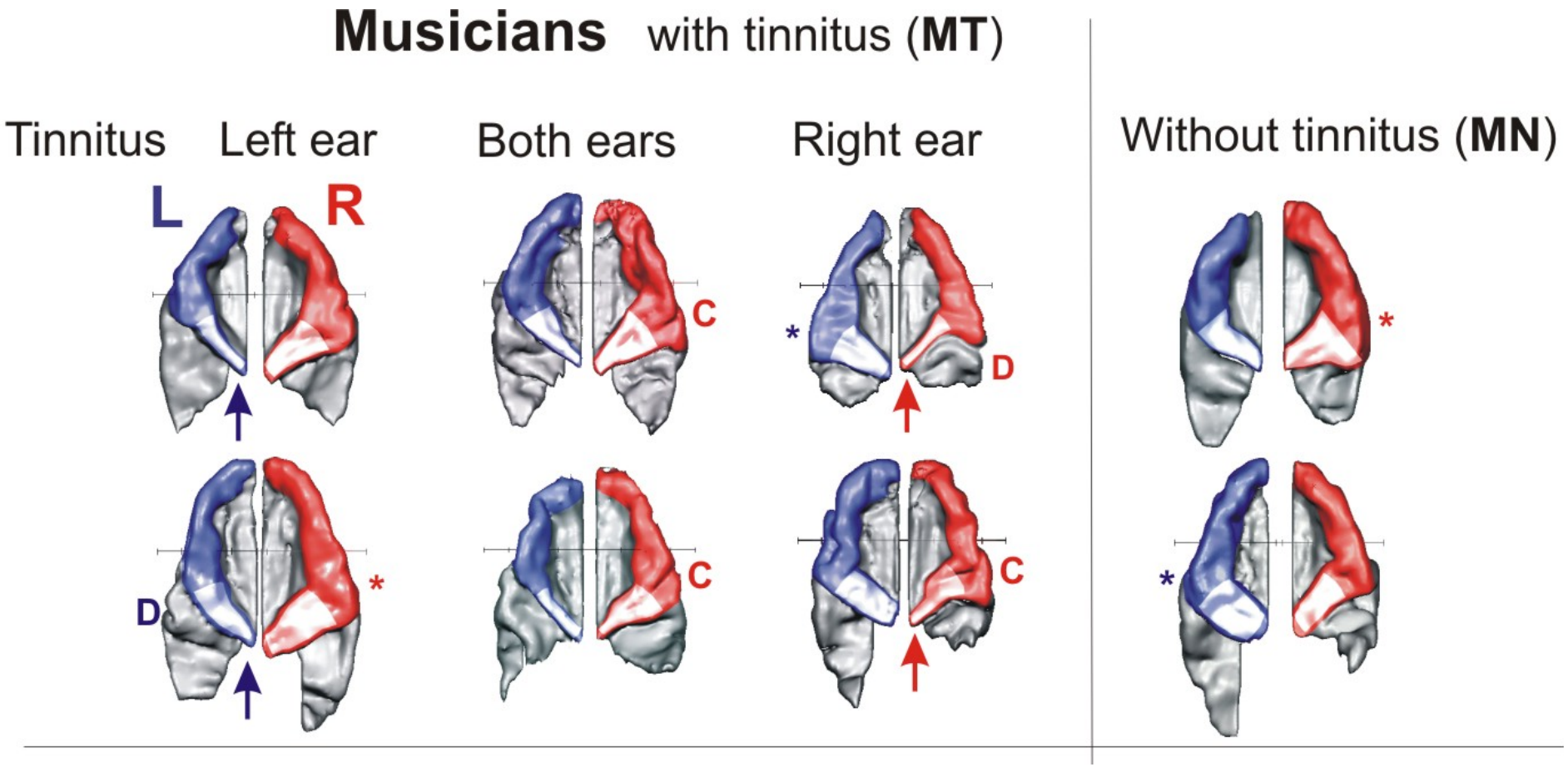
Obertonhörer



C. Tantschinez, Audio 1/2006

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

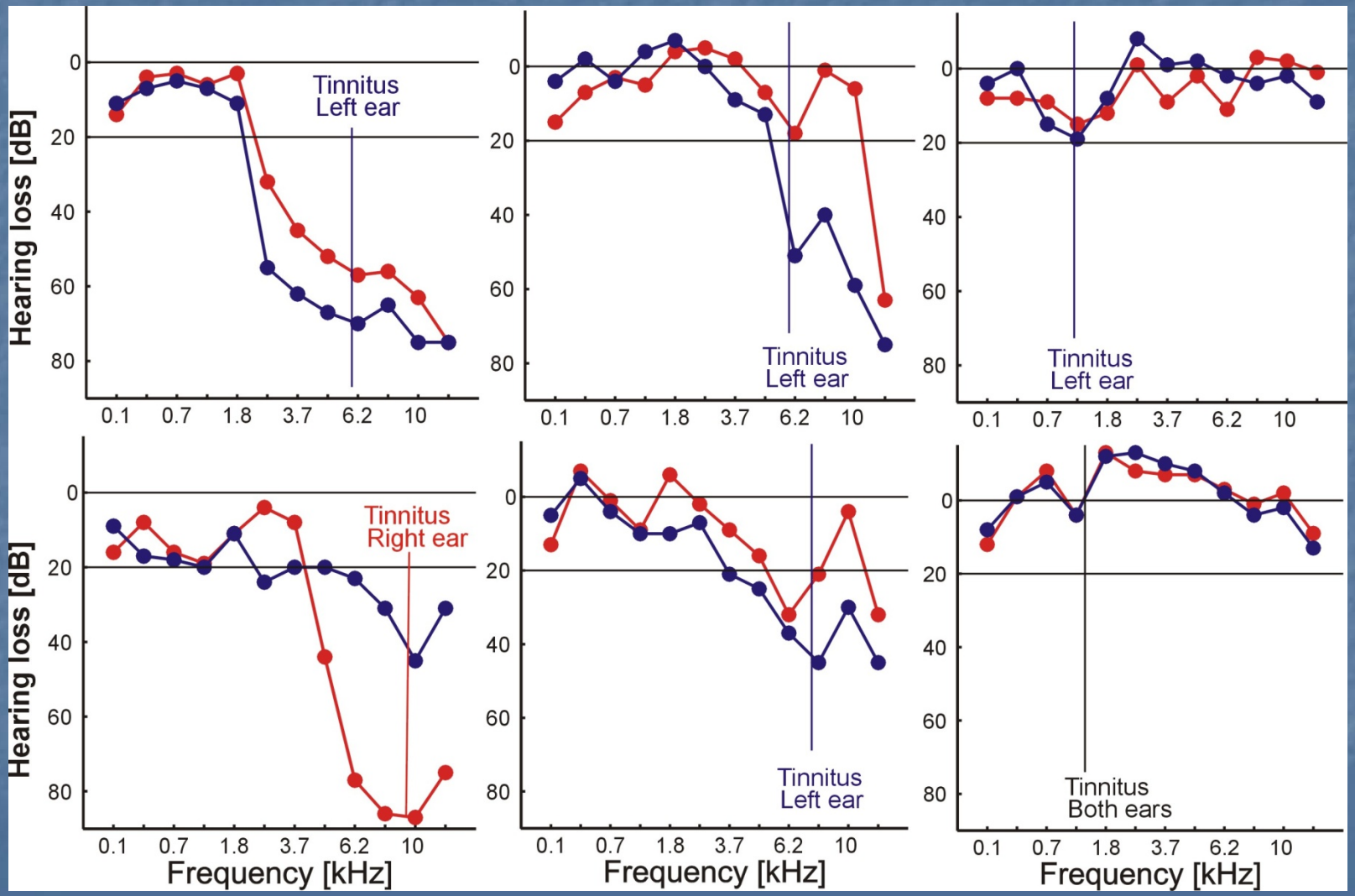
3. Kleinerer Heschl Gyrus ipsilateral zum Tinnitus-Ohr



Schneider P. et al., *NeuroImage* 45(3) 927-939 (2009)

Schneider P. & Hammel S. „Von Engeln gesungen“, *Musica Sacra* 4, 220-224 (2009)

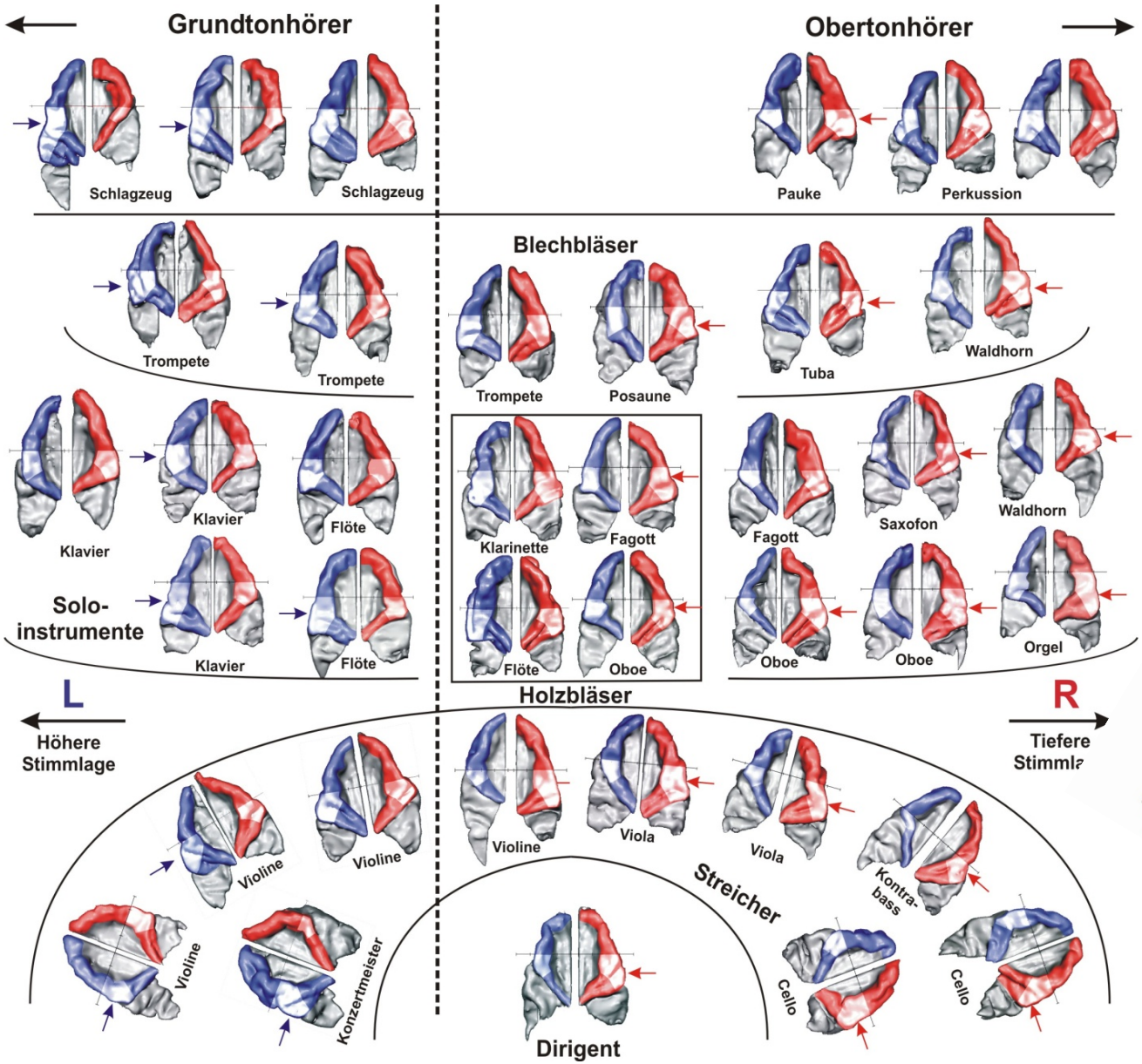
Frequenzabhängigkeit der Hörschwellen (Luftleitung) in 6 ausgewählten Probanden mit Tinnitus



Protektiver Effekt des Musizierens

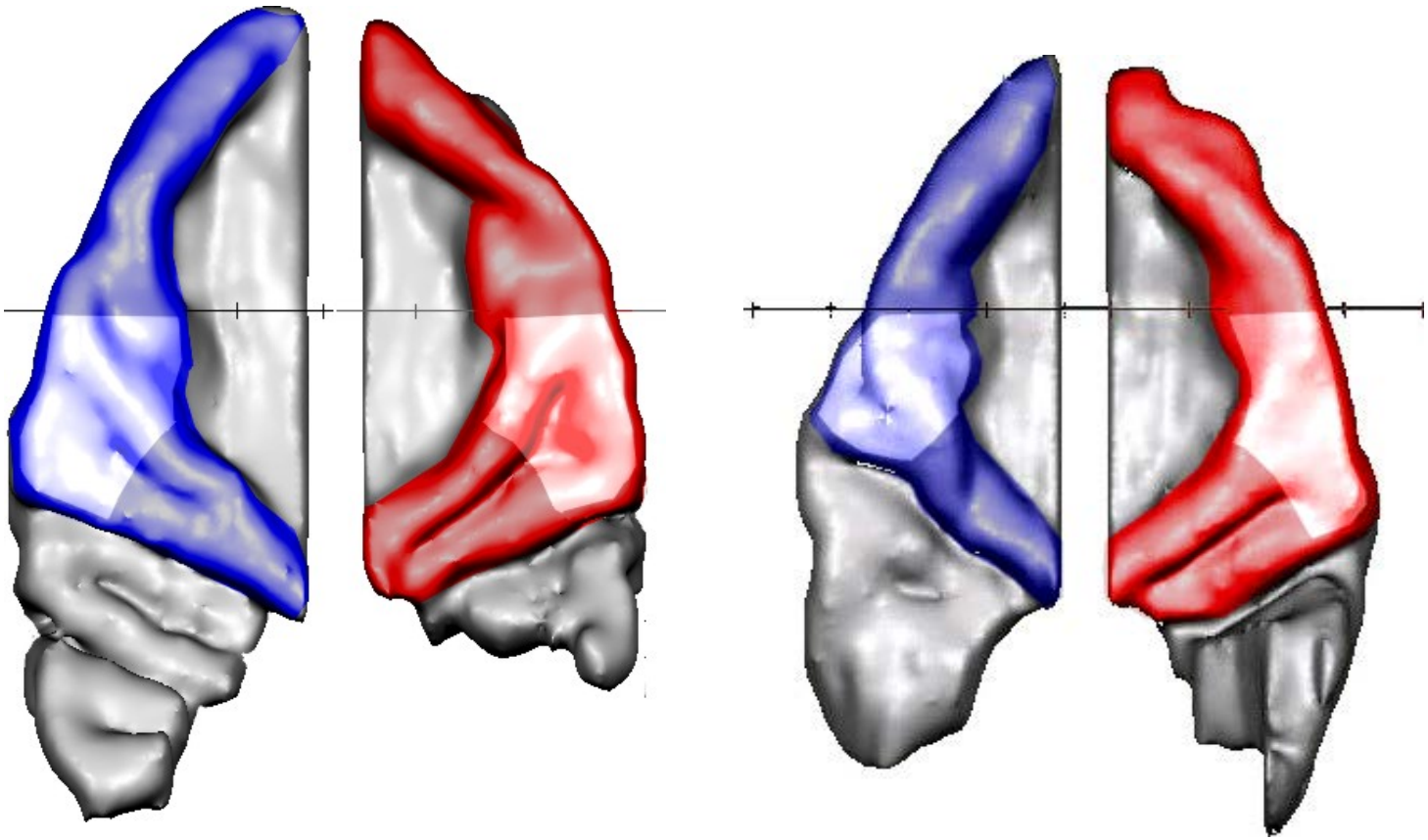
- Bei Musikern ist der Tinnitus weniger penetrant, flexibilisierbarer und regulierbarer, die emotionale Belastung geringer und die Ohrgeräusche selten chronisch
- Manche Musiker benutzen ihren Tinnitus als “internen Referenzton” zur Erkennung von Tonhöhen und Tonarten
- Protektive Effekte werden durch musikalisches Training und aktives Hören begünstigt

4. Das zerebrale Symphonieorchester



Spieler von tieferen und höheren Instrumenten räumlich getrennt

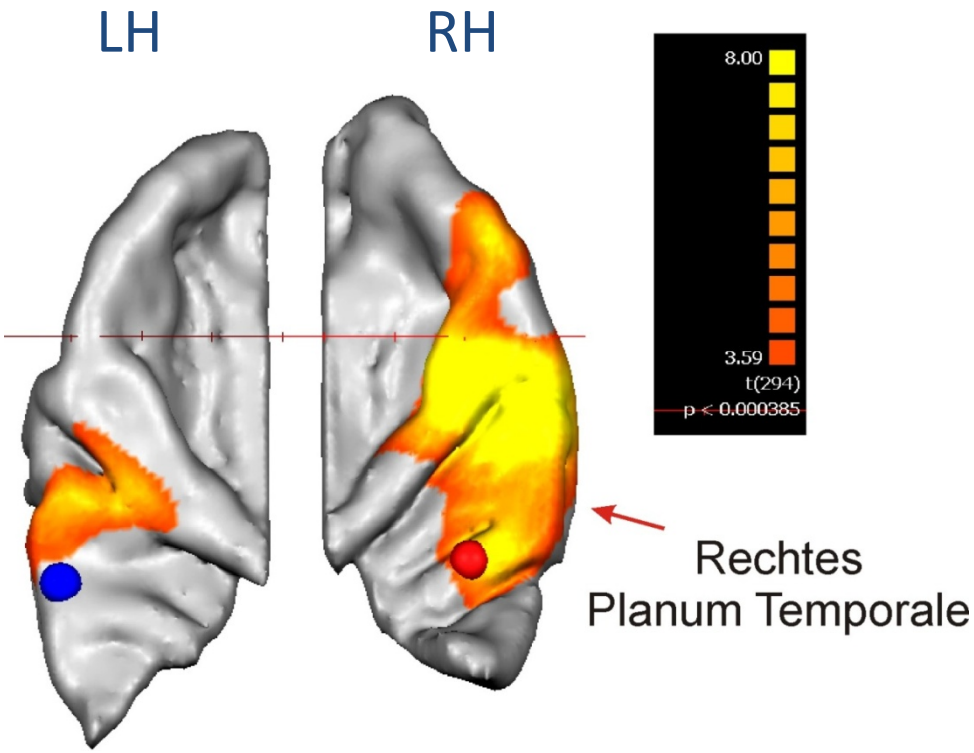
5. Absoluthörer: Spezielle Morphologie der Heschlschen Querwindungen in der rechten Hemisphäre

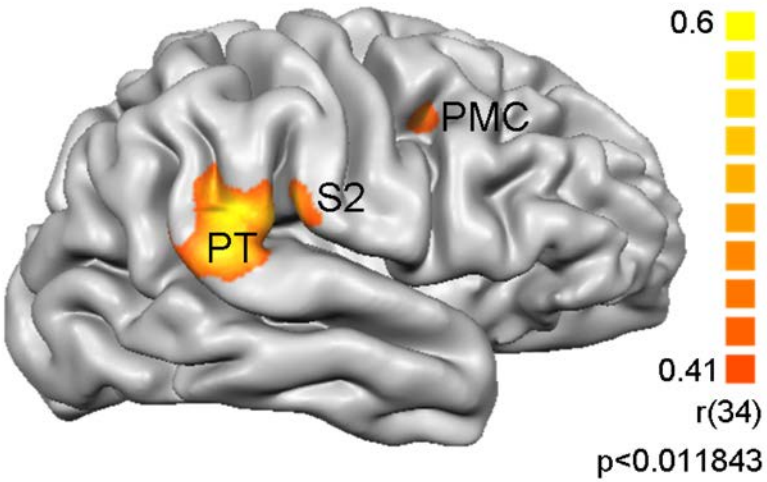


Wengenroth M., Blatow M., Heinecke A., Reinhardt J., Stippich C., Hofmann E. & Schneider P.
Cereb. Cortex (2014)

Absoluthörer: Vernetzung der rechten Hemisphäre

UniversitätsKlinikum Heidelberg



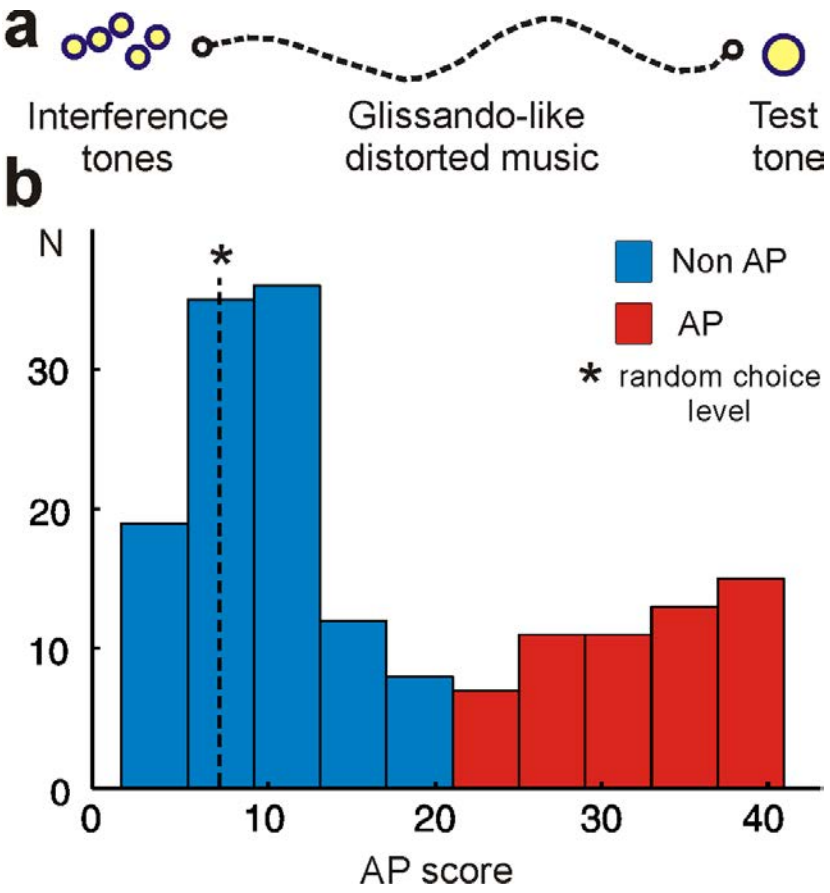


Right hemispheric multisensory network
Contrast map (RFX analysis, N=18)

Synchronisation der primären auditorischen, sensomotorischen und der für die Sprachproduktion zuständigen Areale

Wengenroth M., Blatow M., Heinecke A., Reinhardt J., Stippich C., Hofmann E. & Schneider P.
Cereb. Cortex (2014)

Test zur graduellen Erfassung des absoluten Gehörs (Schneider 2013)

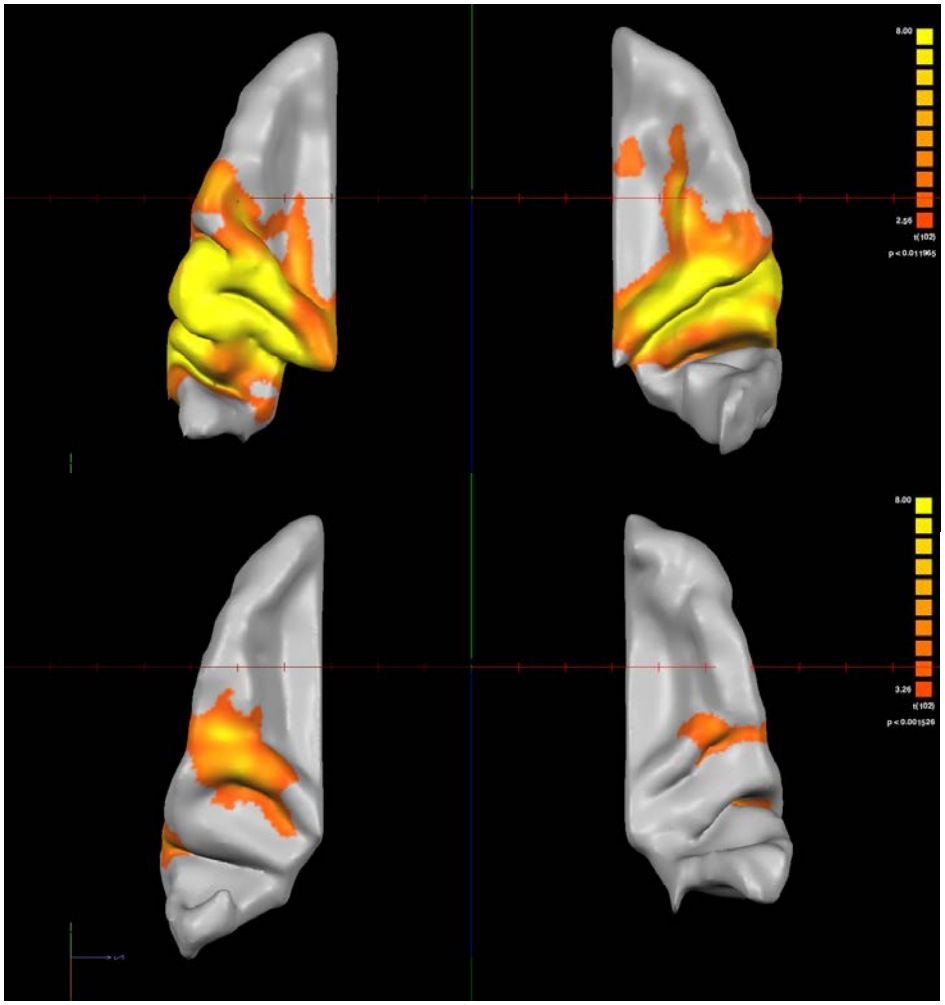


Wengenroth M., Blatow M., Heinecke A., Reinhardt J., Stippich C., Hofmann E. & Schneider P. *Cereb. Cortex* (2014)

6. Relatives Gehör

Verlaufsstudie mit Musikstudenten der Musikakademie Basel
(Alter 17-27 Jahre)

6. Relatives Gehör



Jazz
Schlagzeuger

Medizinstudent

Universitätsspital Basel

Benner J., Blatow M., Wengenroth M., ... & Schneider P.
Brain Structure & Function (2017)

(3) Einfluss des aktiven Musizierens:

AMseL-Projekt
(„Audio- und Neuroplastizität des musikalischen Lernens“)

12-jährige Langzeitstudie mit 255 Kindern/Jugendlichen (2009-2021)

AMseL-Projekt:
Audio- and Neuroplastizität musikalischen Lernens

- Einzigartige kombinierte Longitudinal/Querschnittsstudie über 12 Jahre (2009-2021) mit 255 Kindern/Jugendlichen um den Einfluss des Musizierens sowie die Rolle des Hörens von der Kindheit bis zum jungen Erwachsenenalter zu untersuchen (Universität Heidelberg & Graz)
- Unterstützung von den deutschen Forschungsgemeinschaften (BMBF, DFG)
- Kooperation mit dem Forschungsprogramm zur kulturellen Bildungsinitiative „Jedem Kind ein Instrument (JeKi)“

AMseL-Projekt:
Audio- and Neuroplastizität musikalischen Lernens

UniversitätsKlinikum Heidelberg

5 Erhebungswellen:

1. Messreihe: 2009-2010 (n=145)
2. Messreihe: 2011-2012 (n=167)
3. Messreihe: 2013-2015 (n=218)
4. Messreihe: 2016-2018 (n=175)
5. Messreihe: 2019-2021 (n=79)

Probanden: insgesamt 255 Grundschulkinder/Jugendliche mit unterschiedlicher musikalischen Vorerfahrung, aufgeteilt in 4 Gruppen

Studiendesign: Kombinierte Longitudinal- /Querschnittsstudie über 12 Jahre

5. Messreihe: 2-wöchiges Kompakt-Hörtrainingsprogramm (AULOS) zur Erforschung der Kurzzeitplastizität mit einer Subgruppe (n=53)

Gruppen:

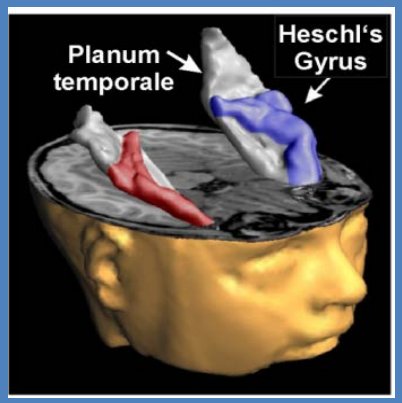
1) Nicht/wenig musizierende Kinder
2) Teilnehmer des JeKi-Programms
3) Viel musizierende Kinder
4) Kinder mit Lern- und Entwicklungsauffälligkeiten

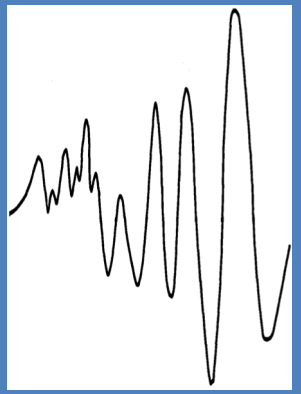
UniversitätsKlinikum Heidelberg

AMseL-Projekt
Wie wirkt sich regelmäßiges Musizieren aus auf

- Morphologie des Hörkortex
- Gehirnaktivierung durch musikalische Klänge
- Sensibilität des Gehörs (hörakustische Tests)
- Kognitive Fähigkeiten (Aufmerksamkeit, Intelligenz, Kreativität, Lese-Rechtschreibkompetenz, mathematische Fähigkeiten)
- AVWS / Entwicklungs- und Lernauffälligkeiten (ADHS, ADS, Legasthenie)

MEG





“Organisation von 111 Mess-Wochenenden”

Einladung von Kindern und Eltern in die Heidelberger Kopfklinik
Durchführung von Hörtests, MEG und MRT-Messungen

Sektion Biomagnetismus, Neurologische Klinik, Universität Heidelberg

UniversitätsKlinikum Heidelberg

Aktives Musizieren

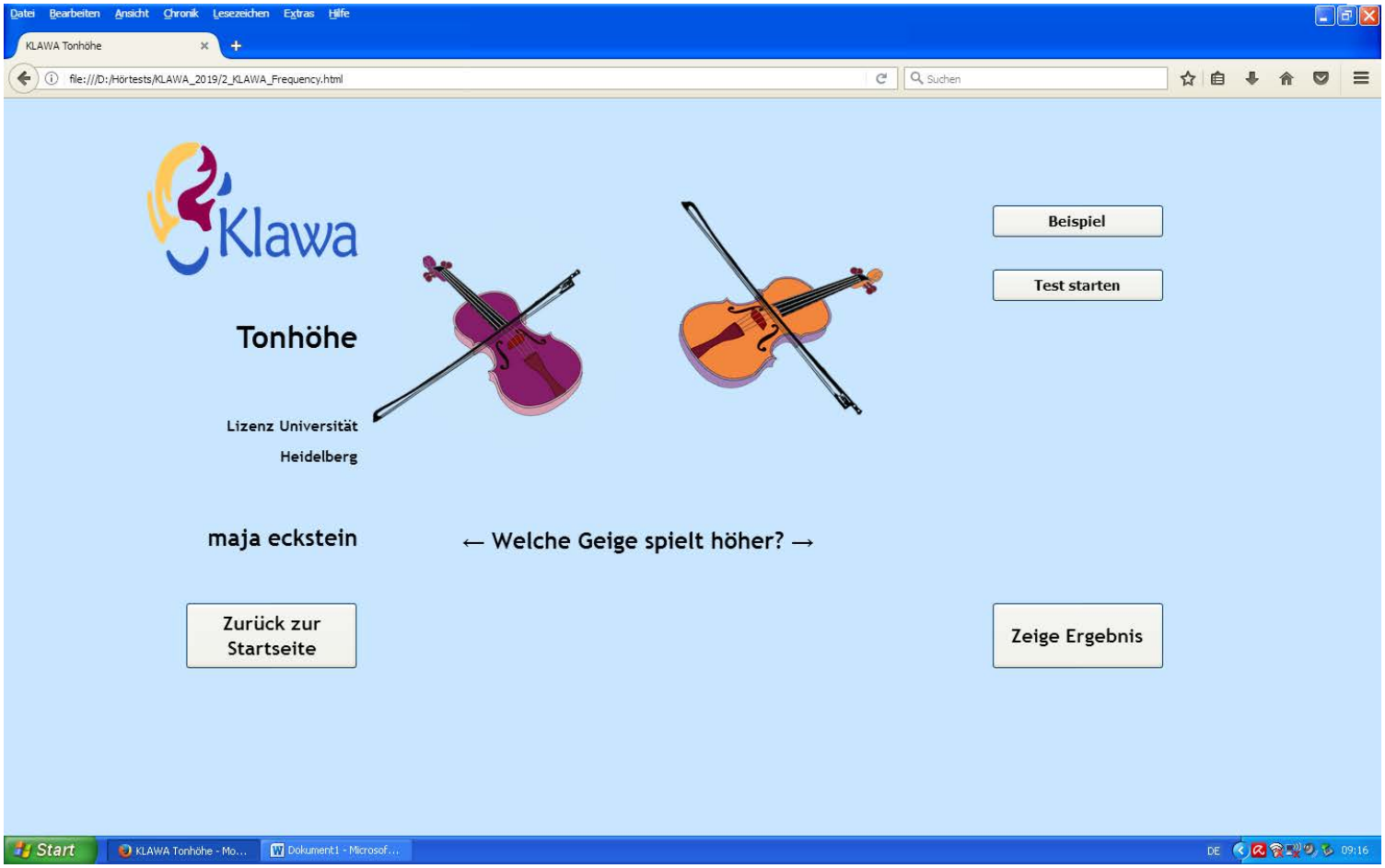
AMseL

“Musical Performance Assessment Scale” (MuPAS, Bernhofs, 2017)

Von Prof. Dr. Valdis Bernhofs, Direktor der Jazeps Vitols Musikakademie, Riga, Lettland

Melodie- und Rhythmusaufgaben, Improvisation and Vorspielen eines Stückes eigener Wahl

KLAWA-Test (R. + P. Schneider 2015)
www.klangwahrnehmung.de



Bestimmung auditorischer Unterschiedsschwellen
(Lautheit (dB), Tonhöhe (cent), Rampe bzw. Attacke (ms), Tonlänge (ms), individuelles Profil der Oberton- und Grundtonwahrnehmung, Rhythmus)

Magnetencephalographie (MEG)

Zur Messung der AEFs vor und nach dem Hörtraining

Justierung des MEG-Helms mit den 122 supraleitenden Sensoren

Magnetencephalographie (MEG)

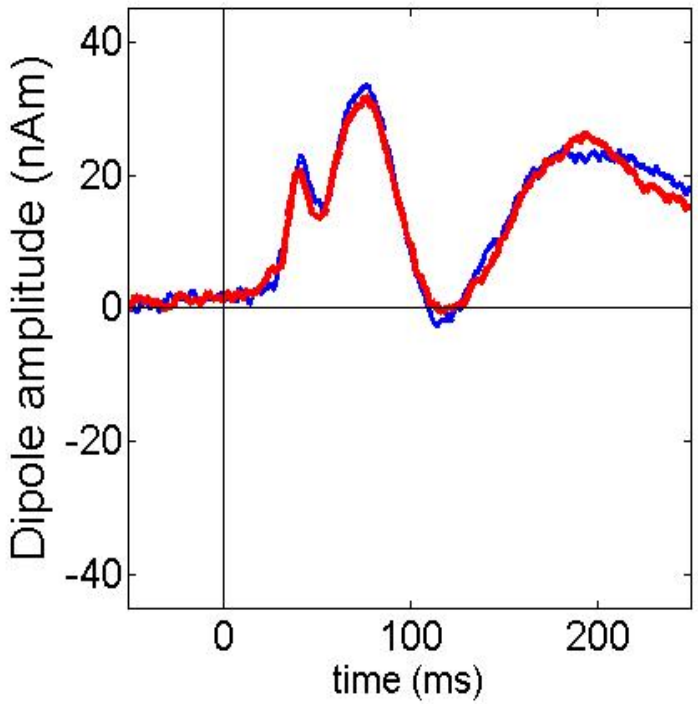
Vorbereitung

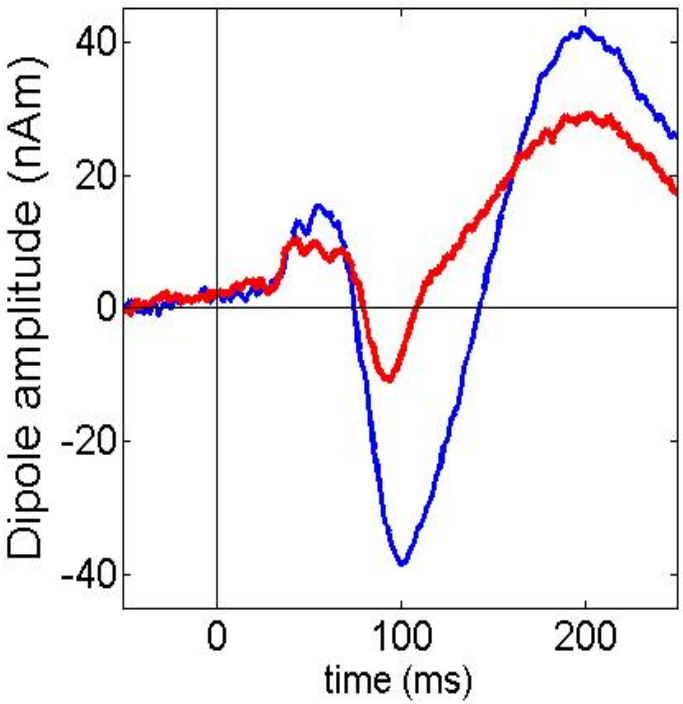
Magnetencephalographie (MEG)

Probandin während der MEG-Messung

Auditorisch Evozierte Felder (AEF)

Beim Hören von harmonischen komplexen Klängen und Instrumentaltönen





individuelle Klangverarbeitung bei gleicher akustischer Stimulation sehr verschieden
spiegelt als persönlicher **Fingerabdruck** die Subjektivität der Verarbeitung

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

3 kortikale Antwort-Komplexe

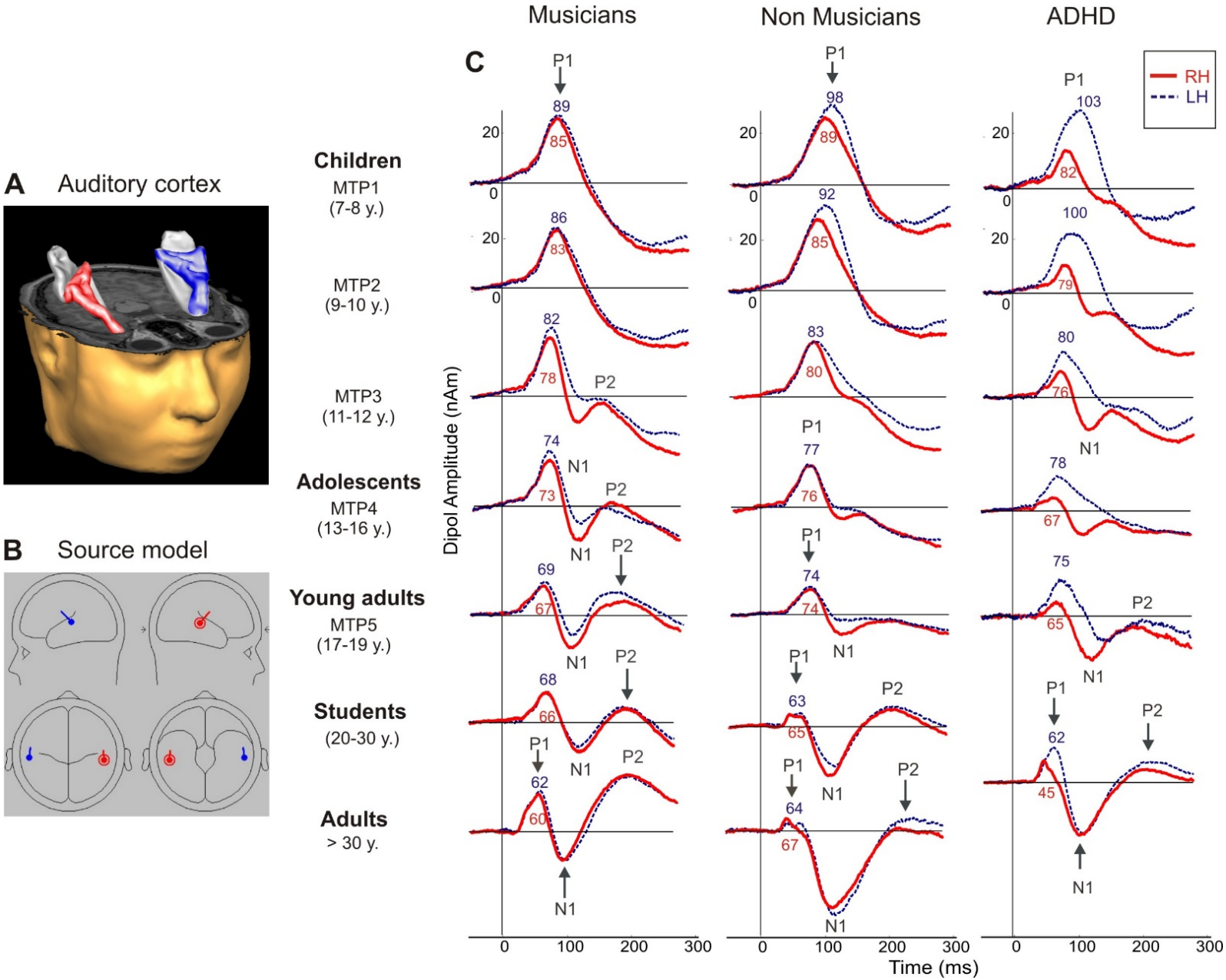
3.) P2-Antwort: „Zu-Hören“

(~200-300 nach Tonbeginn)

2.) sekundäre N1: spiegelt das „Hin-Hören“
(100-150 msec nach Tonbeginn)

1.) P1 Antwort: reflektiert „primäres Hören",
50 msec nach Tonbeginn in Erwachsenen,
~70-90 msec in 7-8 Jahre alten Grundschulkindern

Reifung der AEFs von der Kindheit bis zum Erwachsenenalter



Schneider, P. et al. (in review, Journal of Neuroscience, 2023)

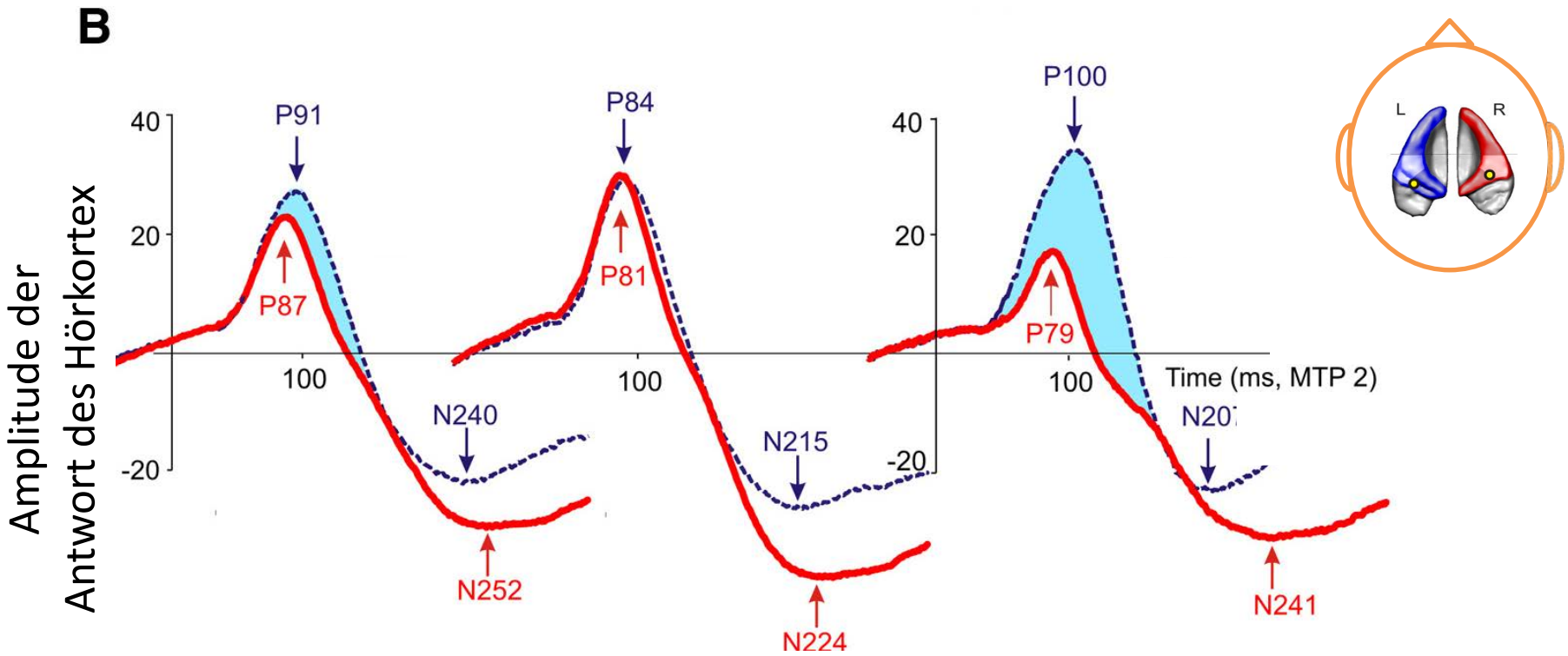
Synchronizität der primären auditorischen Antworten

UniversitätsKlinikum Heidelberg

NichtmusikerInnen

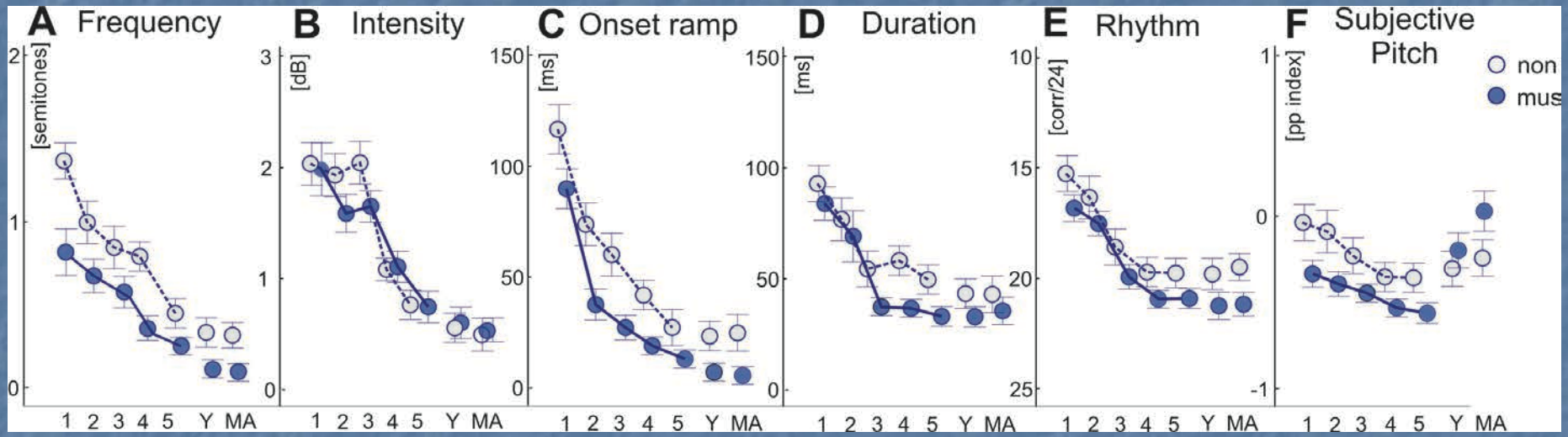
MusikerInnen

AD(H)S und LRS



Seither-Preisler A., Parncutt R. & Schneider, P.
J. Neurosci. 34(33), 10937-10949 (2014)

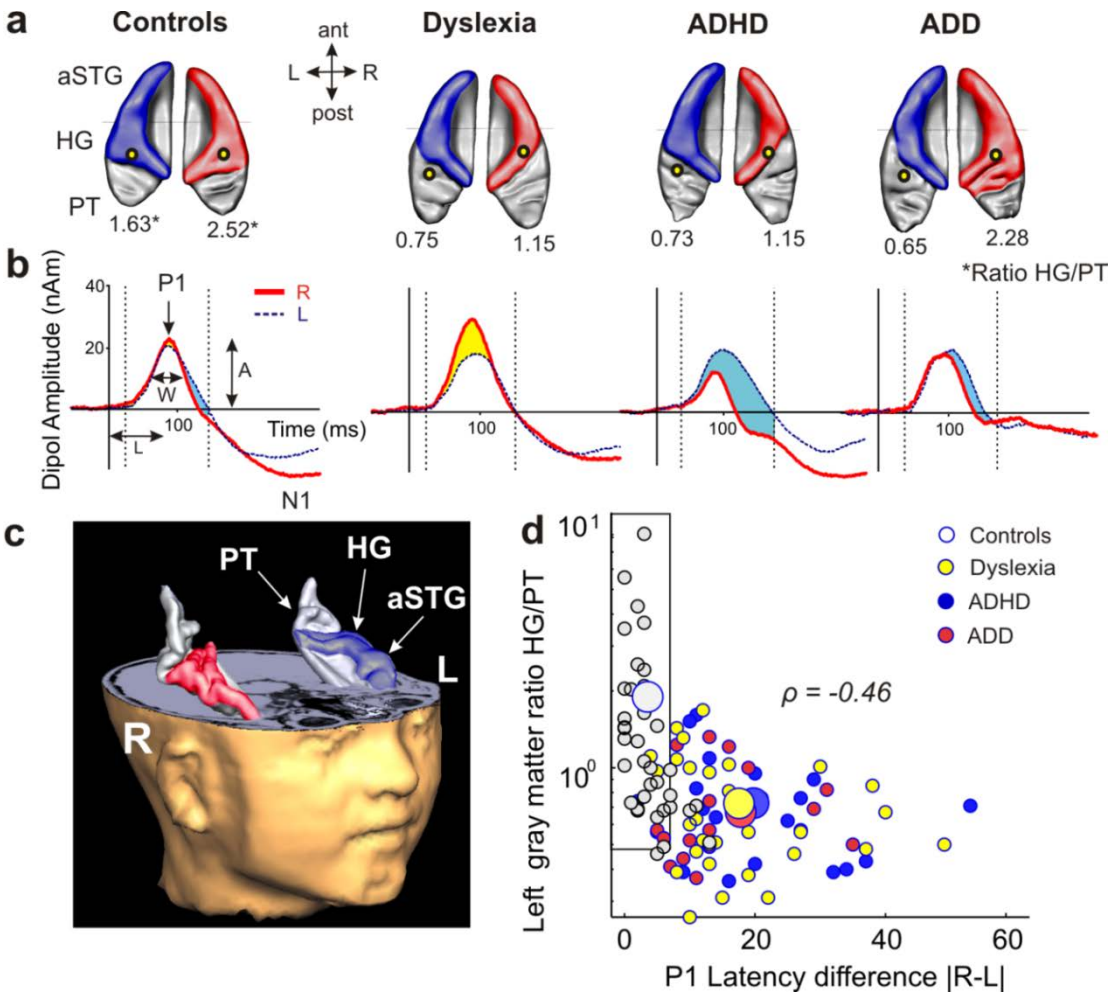
Ergebnisse der hörakustischen Tests (KLAWA)
Im Verlauf von der Kindheit zum Erwachsenenalter



Die Frequenz-, Onset-, und Tondauer-Unterschiedsschwellen sowie die Tonhöhen- und Rhythmus-Wahrnehmung zeigten signifikante Unterschiede zwischen Musikern und Nichtmusikern

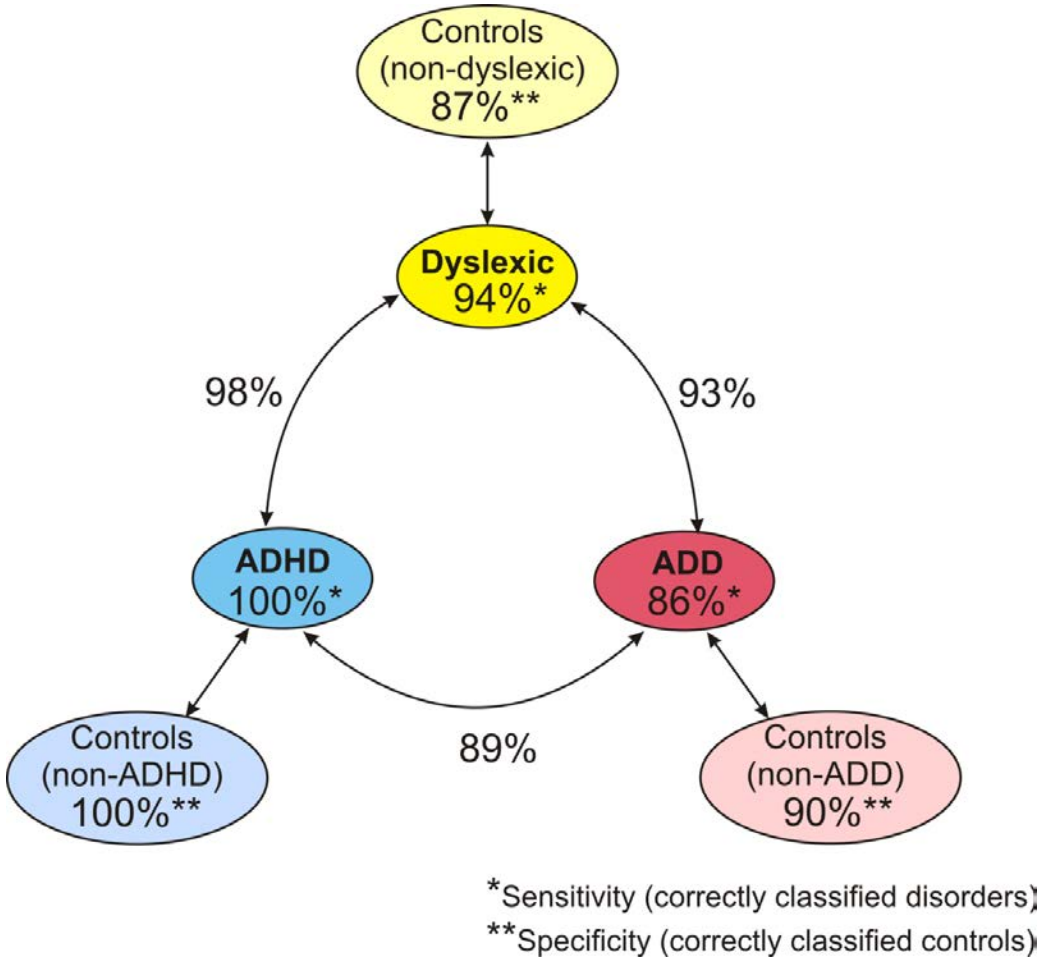
Schneider, P. et al. (J Neurosci, in review, 2023)

Objektive, gehirnbasierte Diagnostik von Legasthenie, ADHS und ADS



Serrallach, B., Gross T., Bernhofs V., … Blatow, M., Seither-Preisler, A. & Schneider, P.
Neural biomarkers for AD(H)D and dyslexia in the auditory cortex
(2016, Frontiers in Neuroscience)

Sensitivität und Spezifität



Serrallach, B., Gross T., Bernhofs V., … Blatow, M., Seither-Preisler, A. & Schneider, P.
Neural biomarkers for AD(H)D and dyslexia in the auditory cortex
(2016, Frontiers in Neuroscience)

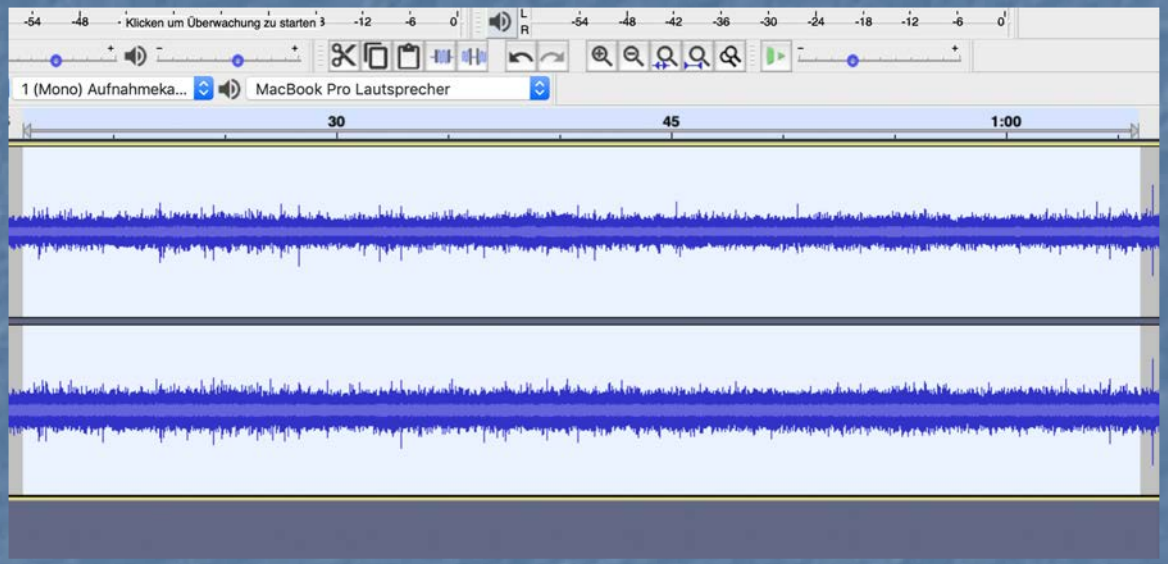
(4) Einfluss des aktiven Hörens
AULOS-Hörtraining

Heidelberg (DE) ---Dornach (CH)

Heidelberger Hörakademie: schneider@musicandbrain.de
Bach-Institut Dornach: Bettina Donzé,
info@bach-institut.ch

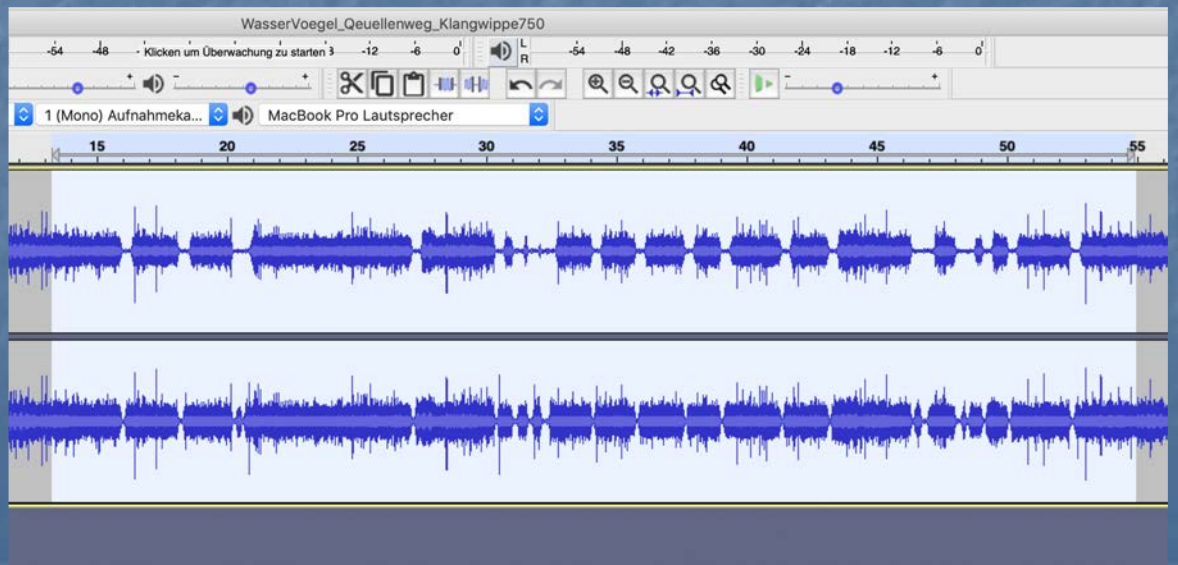
Sounds / Music used by AULOS

Natural sounds (e.g. water, birdsong), classical music, preferred music

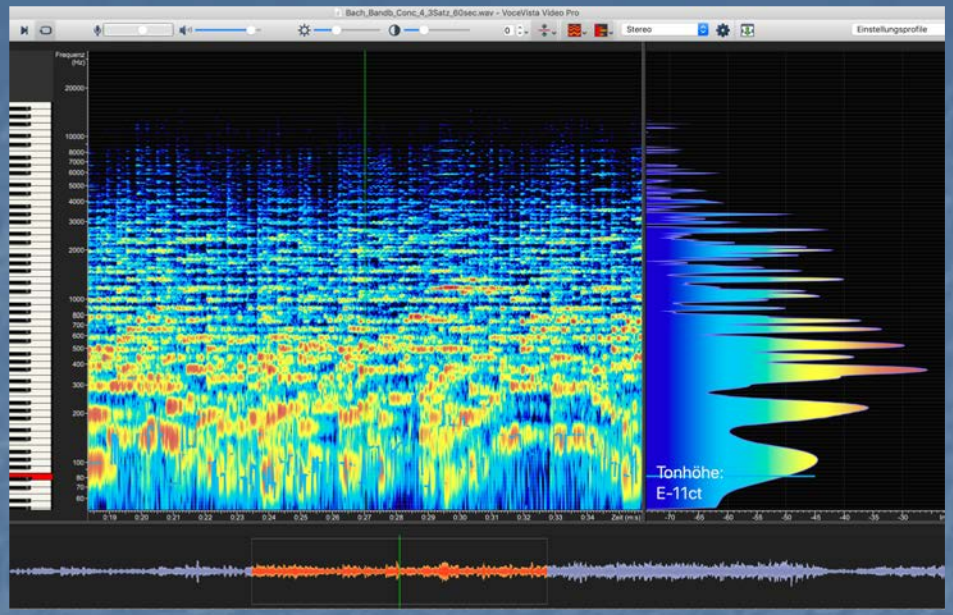


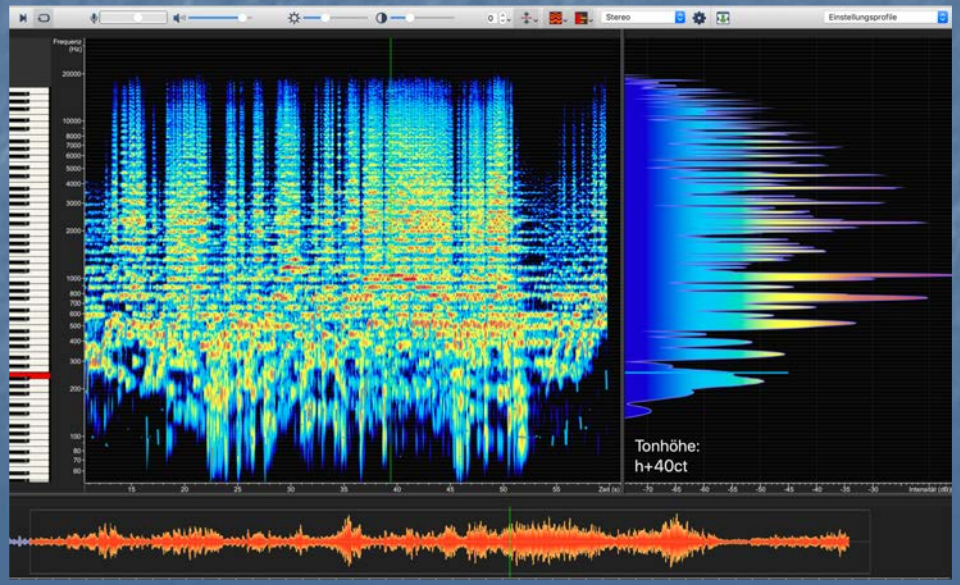
Bone

Air



Example: Brandenburg Concert Nr. 4, 3rd movement (Marriner)





DOI: 10.1111/nyas.14899

ORIGINAL ARTICLE

ANNALS OF THE NEW YORK ACADEMY OF SCIENCES

Short-term plasticity of neuro-auditory processing induced by musical active listening training

Peter Schneider[1,2,3,4] | Christine Groß[1,3] | Valdis Bernhofs[3] | Markus Christiner[3,4] | Jan Benner[1,2] | Sabrina Turker[5] | Bettina M. Zeidler[4] | Annemarie Seither-Preisler[4,6]

[1]Division of Neuroradiology, University of Heidelberg Medical School, Heidelberg, Germany

[2]Department of Neurology, Section of Biomagnetism, University of Heidelberg Medical School, Heidelberg, Germany

[3]Jazeps Vitols Latvian Academy of Music, Riga, Latvia

[4]Centre for Systematic Musicology, University of Graz, Graz, Austria

[5]Lise Meitner Research Group "Cognition and Plasticity", Max Planck Institute for Human Cognitive and Brain Sciences, Leipzig, Germany

[6]BioTechMed, Graz, Austria

Correspondence
Peter Schneider and Annmarie Seither-Preisler, Centre for Systematic Musicology, University of Graz, Glaciesstraße 27, A-8010 Graz, Austria.
Email: schneider@musicandbrain.de and annemarie.seither-preisler@uni-graz.at

Funding information
Deutsche Forschungsgemeinschaft,

Abstract

Although there is strong evidence for the positive effects of musical training on auditory perception, processing, and training-induced neuroplasticity, there is still little knowledge on the auditory and neurophysiological short-term plasticity through listening training. In a sample of 37 adolescents (20 musicians and 17 nonmusicians) that was compared to a control group matched for age, gender, and musical experience, we conducted a 2-week active listening training (AULOS: Active IndividUalized Listening OptimizationS). Using magnetoencephalography and psychoacoustic tests, the short-term plasticity of auditory evoked fields and auditory skills were examined in a pre-post design, adapted to the individual neuro-auditory profiles. We found bilateral, but more pronounced plastic changes in the right auditory cortex. Moreover, we observed synchronization of the auditory evoked P1, N1, and P2 responses and threefold larger amplitudes of the late P2 response, similar to the reported effects of musical long-term training. Auditory skills and thresholds benefited largely from the AULOS training. Remarkably, after training, the mean thresholds improved by 12 dB for bone conduction and by 3–4 dB for air conduction. Thus, our findings indicate a strong positive influence of active listening training on neural auditory processing and perception in adolescence, when the auditory system is still developing.

Kurzzeitplastizität nach 20 Stunden Hörtraining
„Active individUalized Listening OptimizationS“ (AULOS)
53 Jugendliche und junge Erwachsene, Alter 12-21 Jahre

Schneider, P. et al. (2022)
Short-term plasticity of neuro-auditory processing induced by musical active listening training,
Ann NY Acad Sci, Sept. 2022, 1-15.

Kurzzeitplastizität nach 20 Stunden Hörtraining
„Active individUalized Listening OptimizationS“ (AULOS)
53 Jugendliche und junge Erwachsene, Alter 12-21 Jahre

Schneider, P. et al. (2022)
Short-term plasticity of neuro-auditory processing induced by musical active listening training,
Ann NY Acad Sci, Sept. 2022, 1-15.

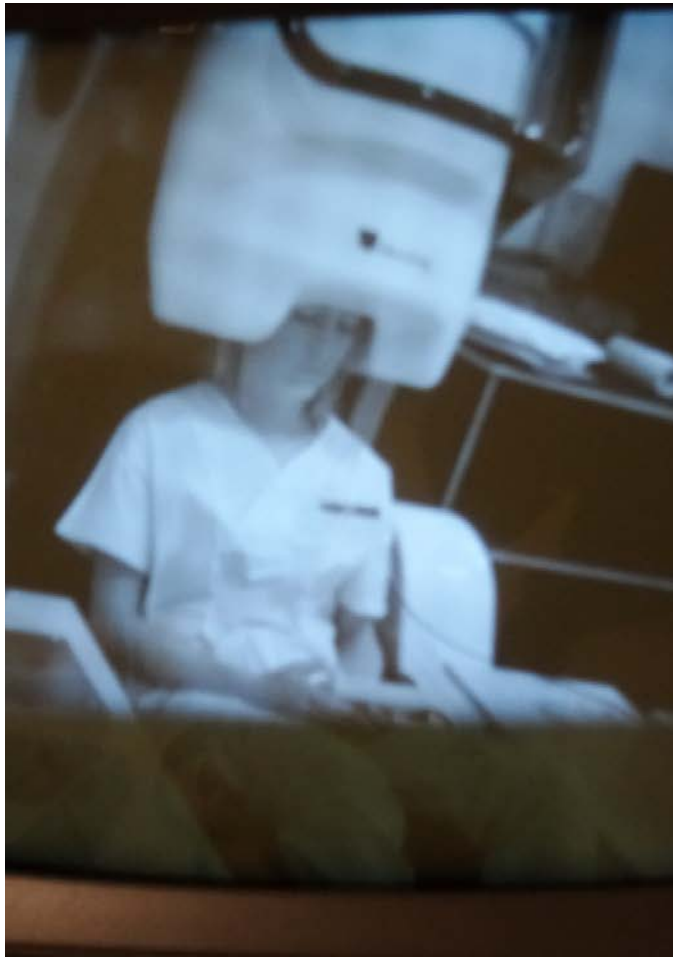
Musik ist ein

Wunder

Magnetencephalographie (MEG)

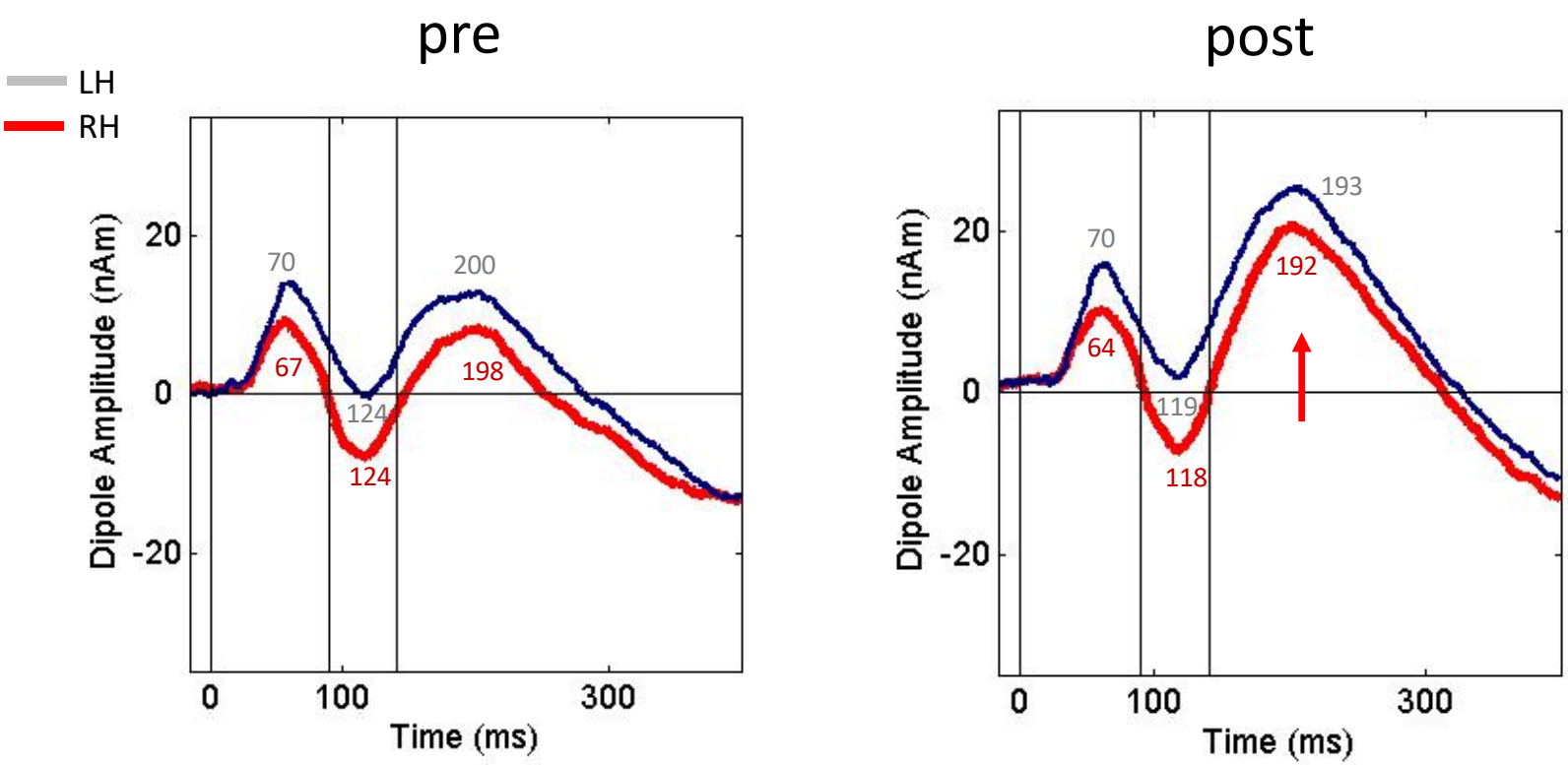
Schneider, P. et al. (2022)
Short-term plasticity of neuro-auditory processing induced by musical active listening training,
Ann NY Acad Sci, Sept. 2022, 1-15.

Magnetencephalographie (MEG)



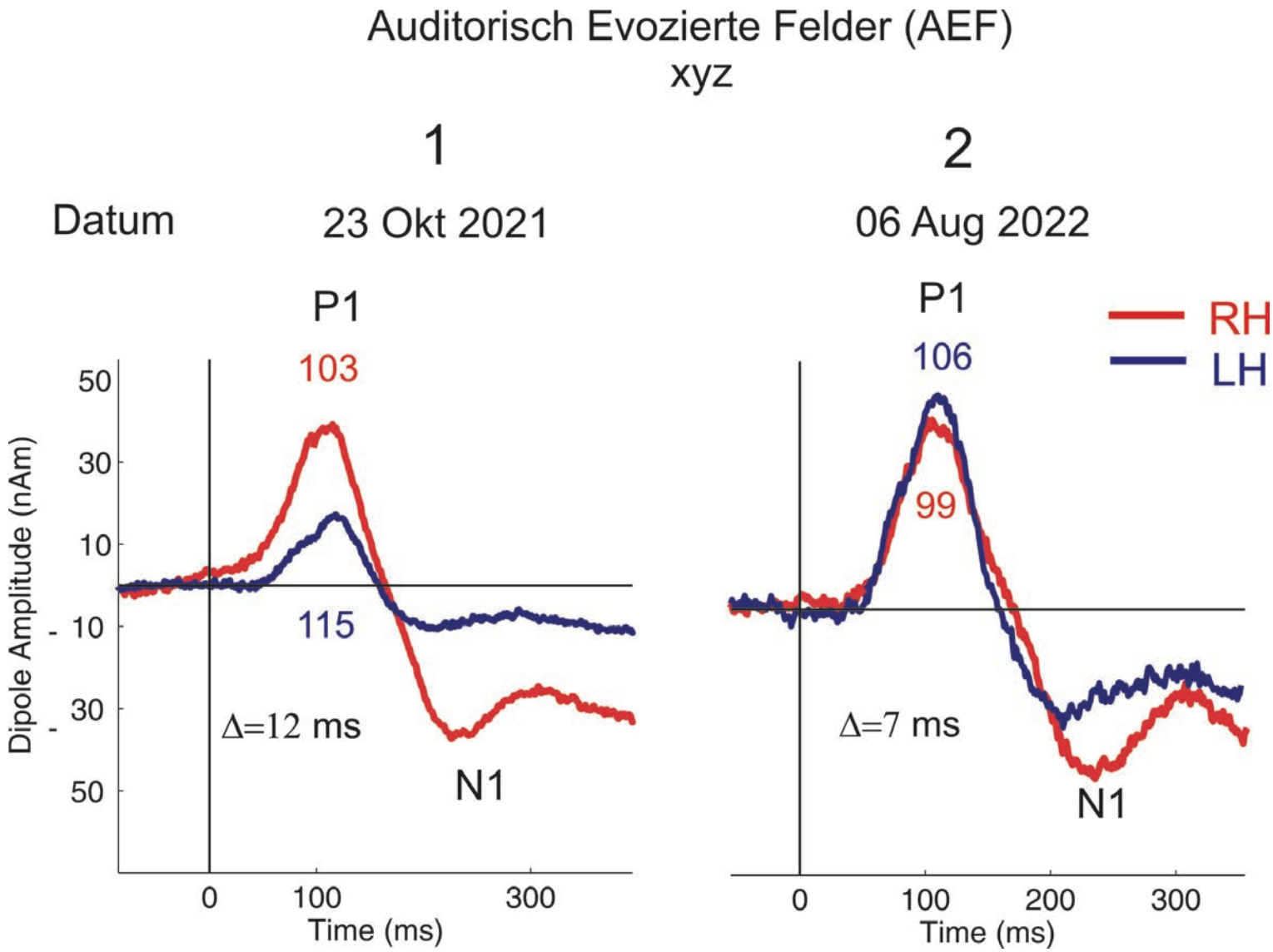
Schneider, P. et al. (2022)
Short-term plasticity of neuro-auditory processing induced by musical active listening training,
Ann NY Acad Sci, Sept. 2022, 1-15.

MEG
Vergleich der Vor- und Nachmessungen
Mittelwert von 37 Jugendlichen/jungen Erwachsenen

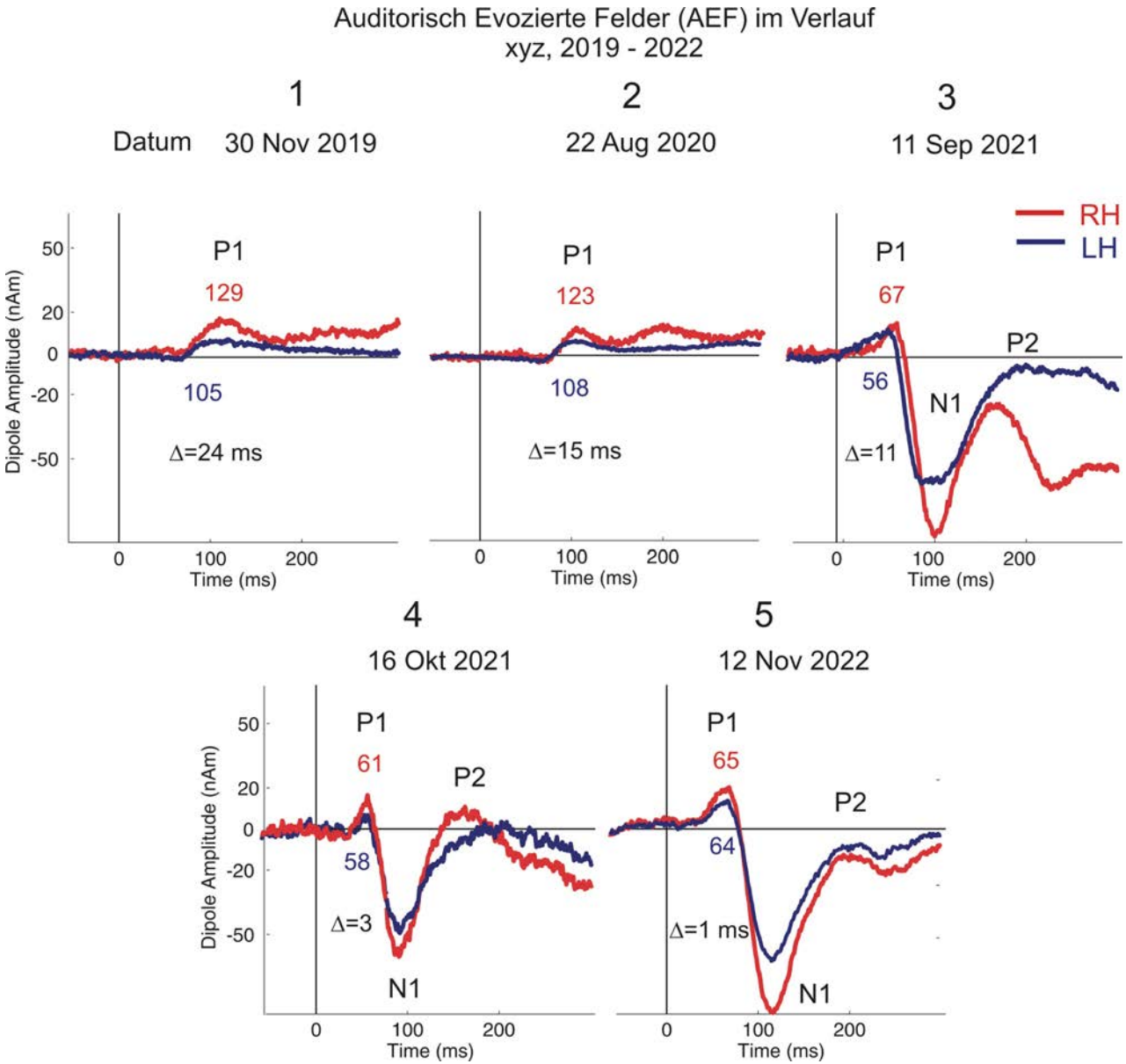


Schneider, P. et al. (2022)
Short-term plasticity of neuro-auditory processing induced by musical active listening training,
Ann NY Acad Sci, Sept. 2022, 1-15.

Fall 1: Junge mit ADHS, 9 J.
Vor der 1. Hörphase (20 h)– nach der 2. Hörphase (15 h)



Fall 2: Junge mit Entwicklungsauffälligkeiten, 7 J.
1. Hörphase – 5. Hörphase

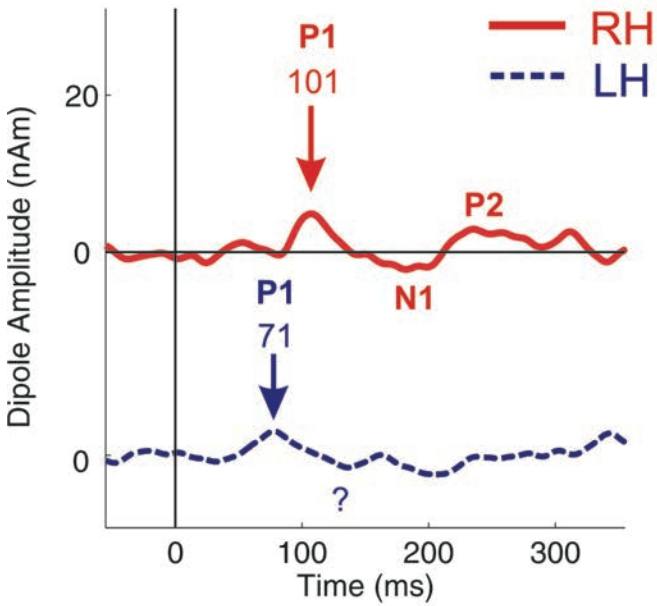


Fall 3: Mädchen mit autistischen Zügen, ausserdem ADS, LRS), 8 J.
1. Hörphase (12 h) – 2. Hörphase (15 h)

Auditorisch evozierte Felder (AEF)*
P1-N1-P2_Antwort
xyz

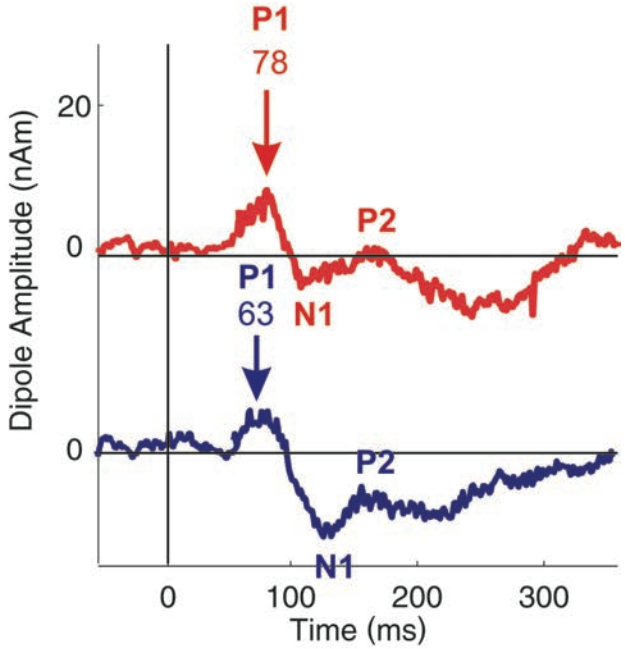
19nov2022

Δ=30 ms



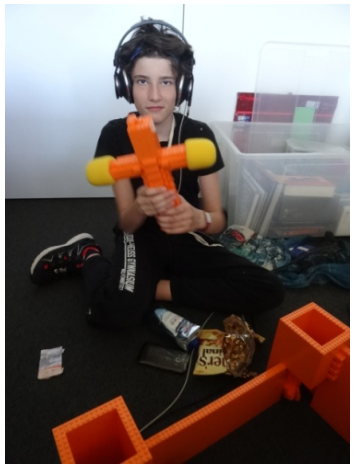
18feb2023

Δ=15 ms



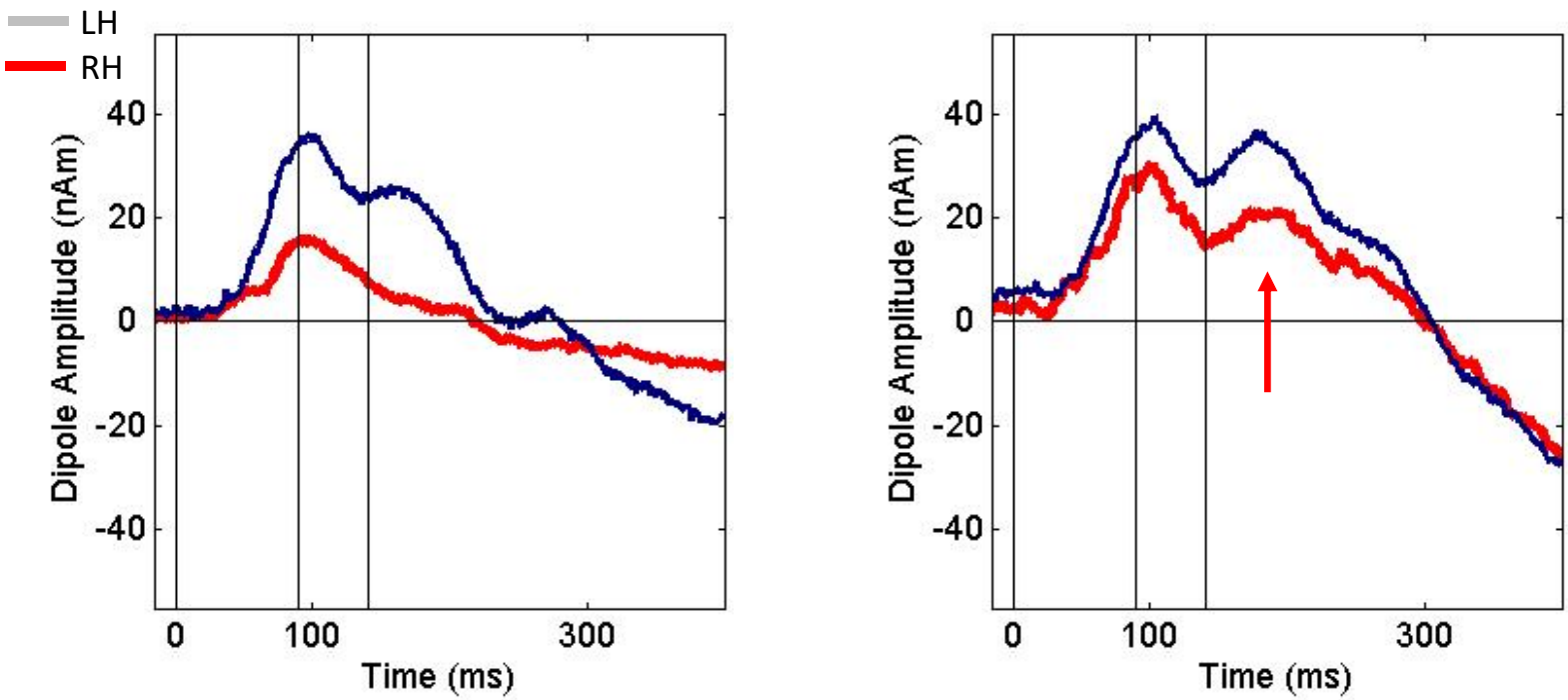
* mit MEG gemessene Gehirnströme
im auditorischen Kortex beim Hören von Klängen

Fall 4: Teenager mit ADS, m, 14 J.
Kurzzeit-Plastizität des AULOS Hörtrainings
vor der 1. Hörphase – nach der 1. Hörphase (20 h)



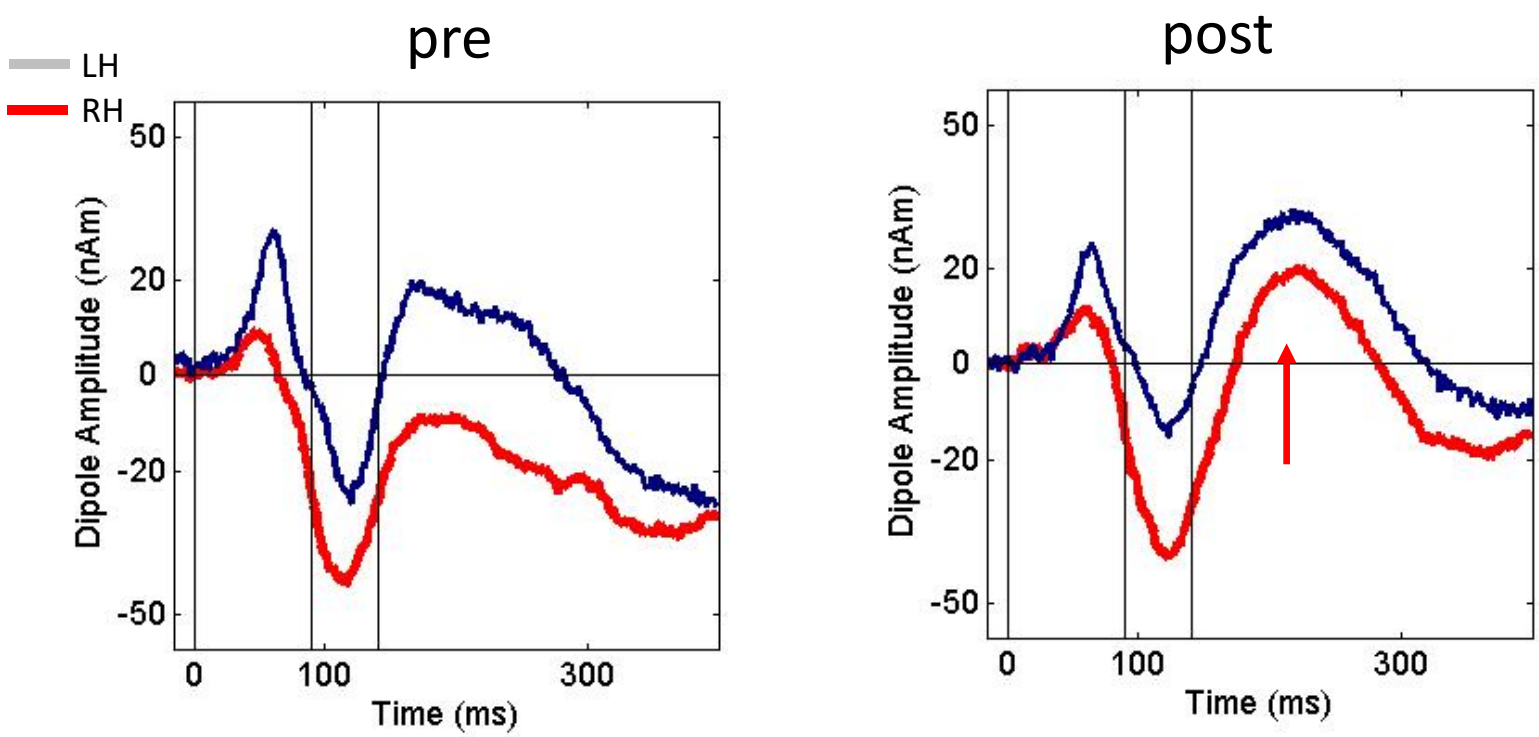
pre

post



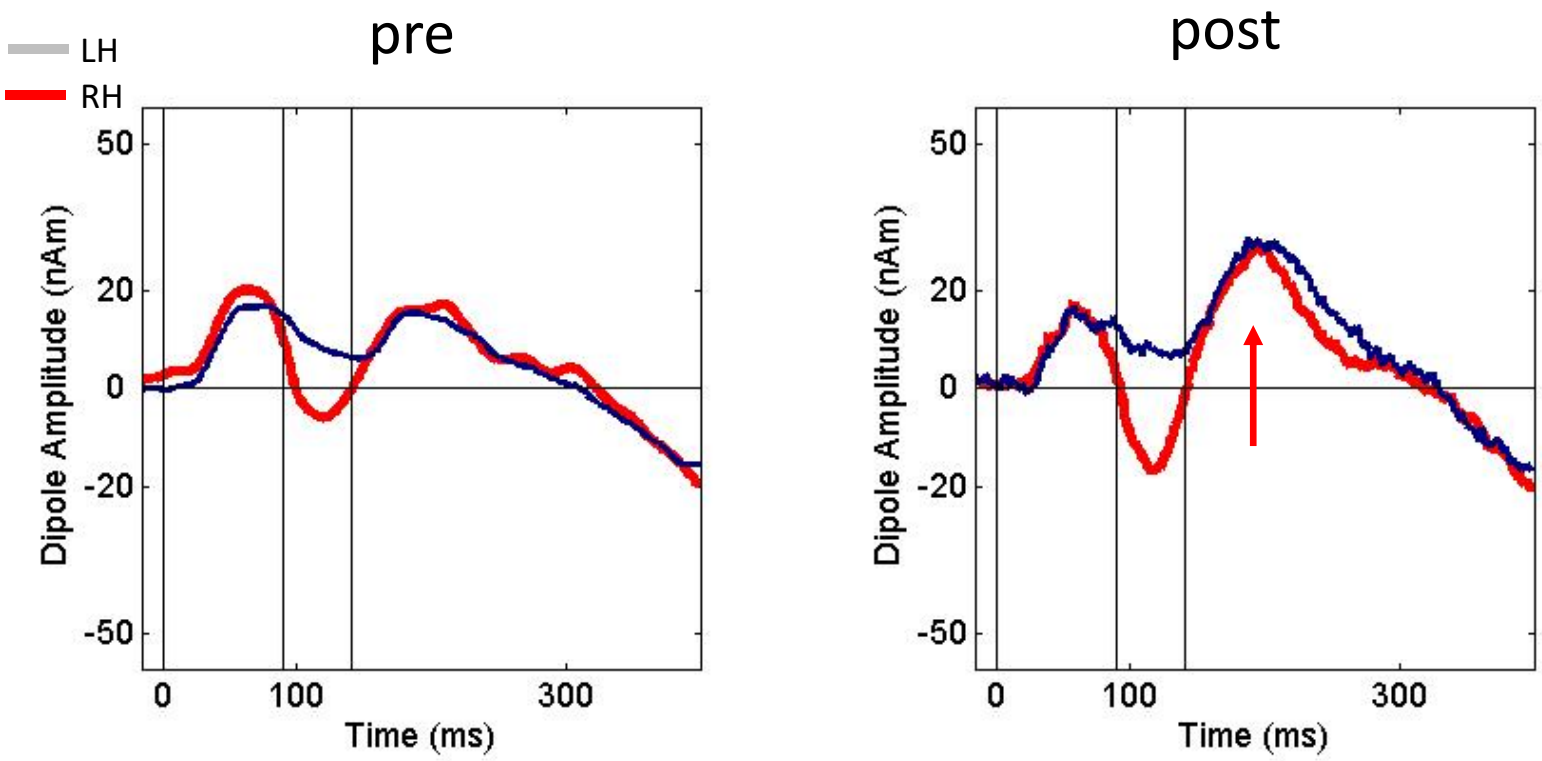
Schneider, P. et al. Ann. N. Y. Acad. Sci. (2022)

Fall 5: musikalisch begabter junger Erwachsener, 19 J., Gitarre
Kurzzeit-Plastizität des AULOS Hörtrainings
vor der 1. Hörphase – nach der 1. Hörphase (20 h)



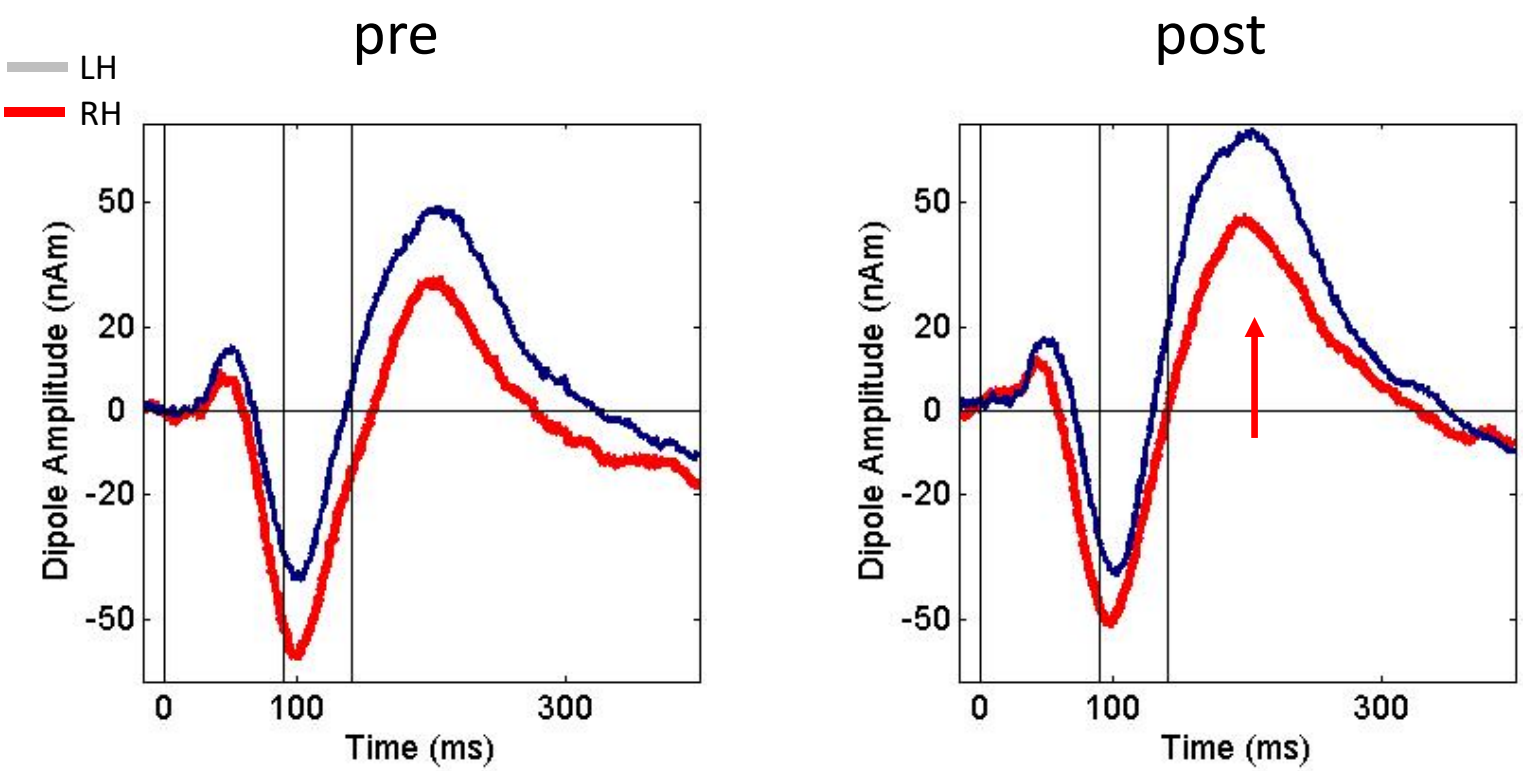
Schneider, P. et al. Ann. N. Y. Acad. Sci. (2022)

Fall 6: w. 17 J., Geräuschempfindlichkeit
Kurzzeit-Plastizität des AULOS Hörtrainings
vor der 1. Hörphase – nach der 1. Hörphase (20 h)

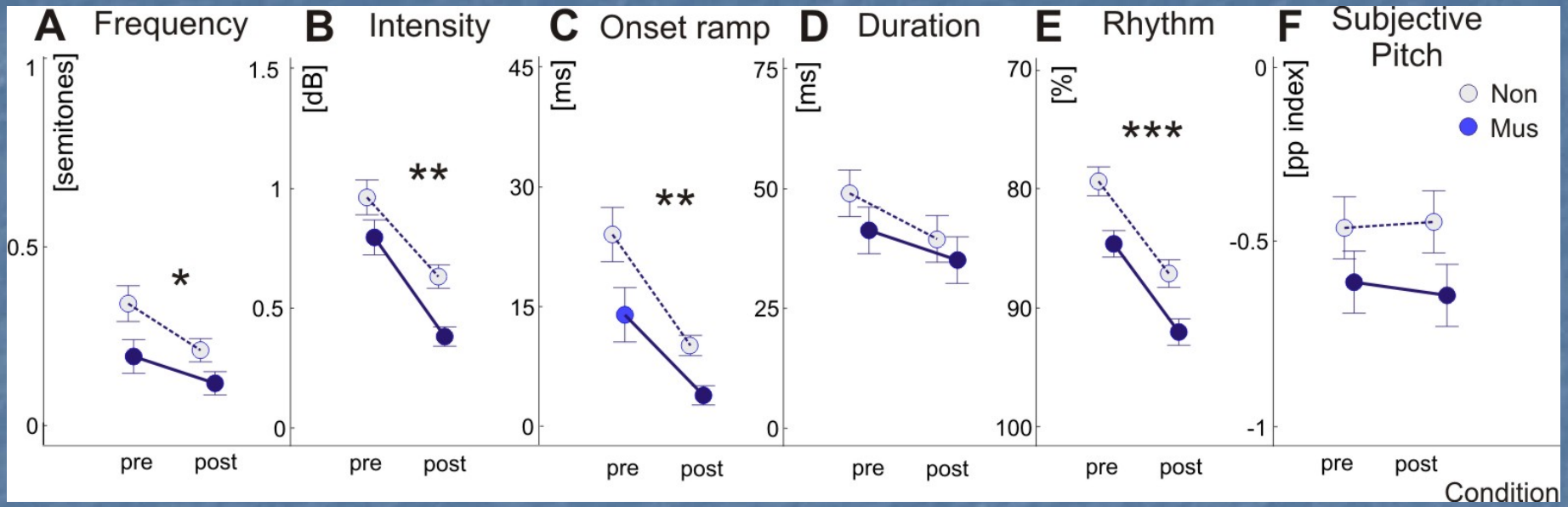


Schneider, P. et al. Ann. N. Y. Acad. Sci. (2022)

Fall 7 : Musiker mit Tinnitus, m. 38 J.
Kurzzeit-Plastizität des AULOS Hörtrainings
vor der 1. Hörphase – nach der 1. Hörphase (20 h)



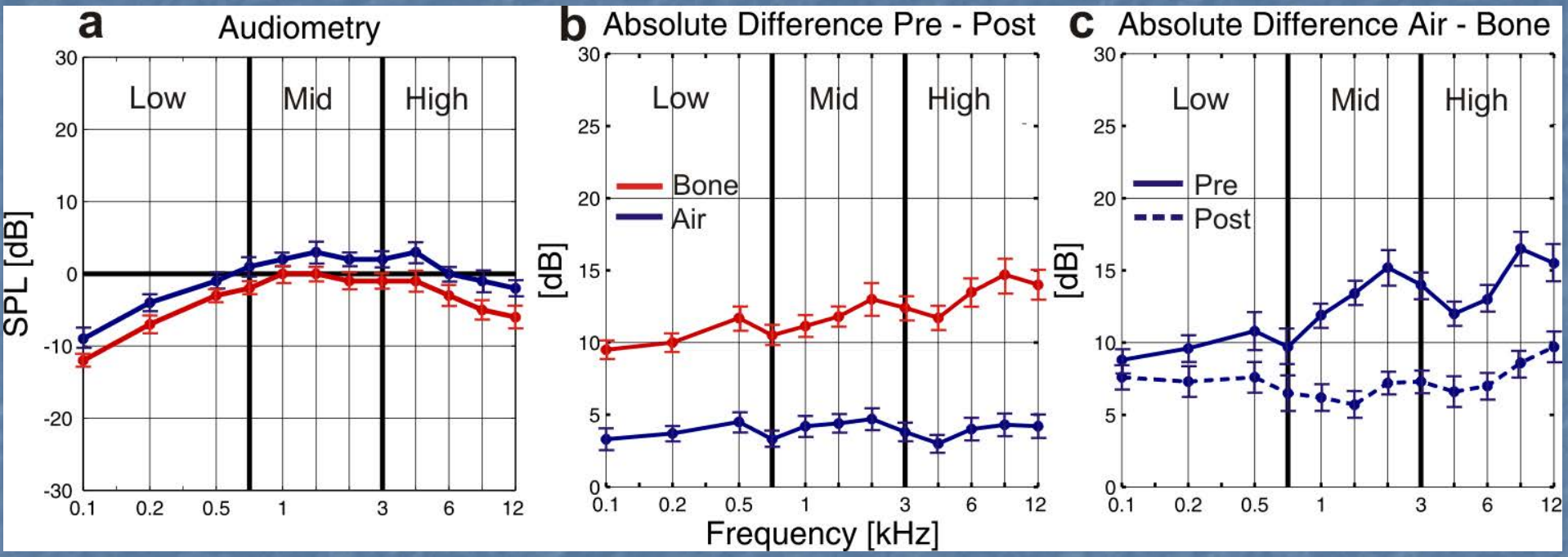
Ergebnisse der hörakustischen Tests (KLAWA) vor und nach dem AULOS Hörtraining



Die Frequenz-, Lautstärke-, und Tondauer-unterschiedsschwellen sowie die Rhythmus-Wahrnehmung zeigten signifikante Verbesserungen

Schneider, P. et al. (2022)
Short-term plasticity of neuro-auditory processing induced by musical active listening training,
Ann NY Acad Sci, Sept. 2022, 1-15.

Ergebnisse der Knochenleitungs- und Luftleitungs-Hörschwellentests vor und nach dem AULOS Hörtraining



3-4 fach grössere Plastizität durch die Knochenleitung

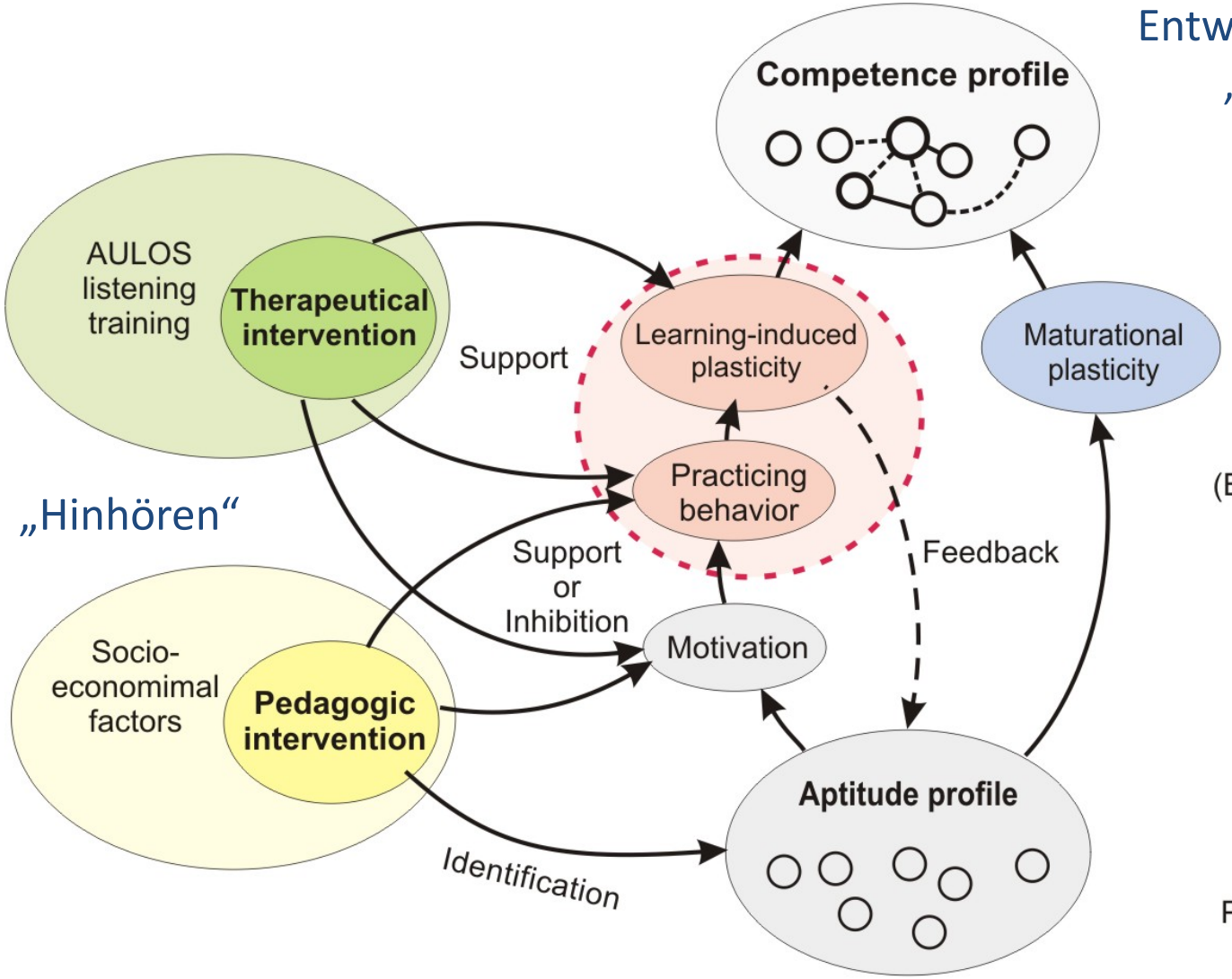
Schneider, P. et al. (2022)
Short-term plasticity of neuro-auditory processing induced by musical active listening training,
Ann NY Acad Sci, Sept. 2022, 1-15.

(5) Neurokognitives Modell zur Entwicklung des Gehörs vom Kindes- zum Erwachsenenalter

Neurokognitives Entwicklungsmodell des Hörens von der Kindheit bis zum Erwachsenenalter

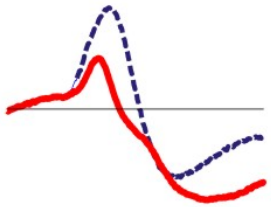
UniversitätsKlinikum Heidelberg

Entwickeltes Hören
„Zuhören“

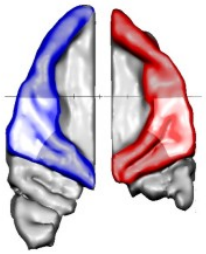


„Hinhören“

„primäres Höres“



Neural efficiency
(Bilateral synchronization)



Preexisting anatomical factors
(Morphology)

Music and Brain Team

Valdis Bernhofs

Bettina Serrallach

Tine Groß

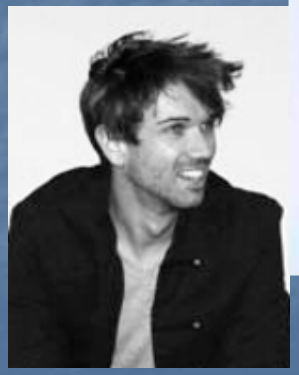
Renate Schneider

Dorte Engelmann

Betty Zeidler

Sabrina Turker

Annemarie Seither-Preisler



Jan Benner

Markus Christiner

Maria Blatow

Martina Wengenroth

Julia Reinhardt

Steffen Bücher

Elke Hofmann

www.musicandbrain.de