

Akustik und Schallforschung

Wolfgang Kreuzer

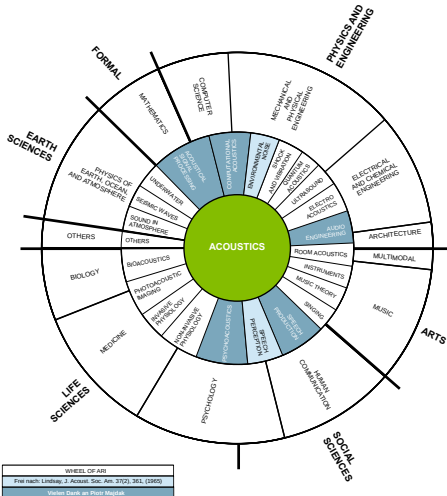
- Was ist Akustik/Schall/Lärm ?
- Grundbegriffe
- Beispiele und Modelle aus:
 - Signalverarbeitung (Fourier, Kurzzeitfourier, Spektrogramm)
 - 1D-Schwingung, 1D-Wellengleichung/Helmholtz (Saite, Vokaltraktmodell)
 - Erweiterung auf 2D, 2.5D, 3D, FEM-BEM

Duden: Lehre vom Schall

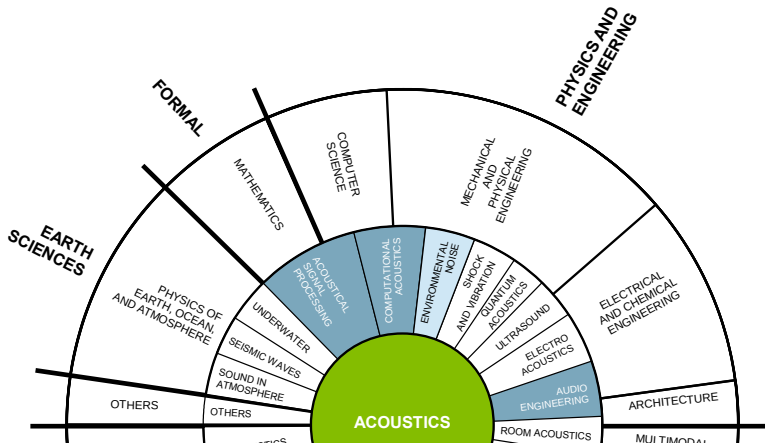
ANSI/ASA S1.1-2013 Standard: (a) Science of sound, including its production, transmission, and effects, including biological and psychological effects, (b) Those qualities of a room that, together, determine its character with respect to auditory effects

Was umfasst der Begriff 'Akustik'?

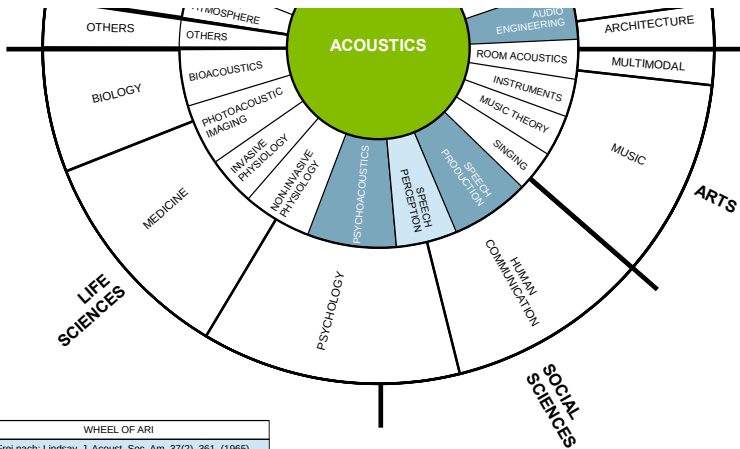
Die interdisziplinäre Akustik



Die interdisziplinäre Akustik



Die interdisziplinäre Akustik



WHEEL OF ARI
Frei nach: Lindsay, J. Acoust. Soc. Am. 37(2), 361, (1965)
Vielen Dank an Piotr Majdak



Mathematics
and
Signal Processing



Physical and
Computational
Acoustics



Musicality
and
Bioacoustics



Acoustic
Phonetics

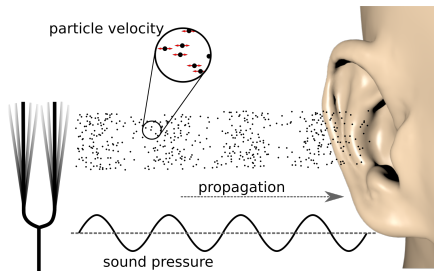


Psychoacoustics
and Experimental
Audiology

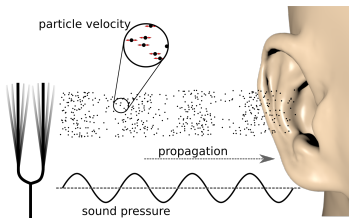
- Pythagoras (um 550 BC): Schwingende Saite
- Aristoteles (um 350 BC): Schall als Verdichtung and Verdünnung (von Luft)
- Vitruvius (um 20 BC): Raumakustik und Architektur
- Huygens: Schall als Wellenphänomen
- Bernouli, D'Alembert, Euler, Lagrange (um 1750-1800), Euler publiziert Wellengleichung, Chladni visualisiert Plattenmoden
- Helmholtz (um 1850, Über die Tonempfindung), Rayleigh (um 1900, Theory of Sound)

Was ist Schall?

- Schall stellt die Ausbreitung bzw. die hörbaren Schwingungen (Schallwellen) von Druck- und Dichteschwankungen in einem elastischen Medium (Gase, Flüssigkeiten, Festkörper) dar.¹
- Luftschallwellen setzen sich aus abwechselnden Regionen mit hohem und geringen Luftdruck zusammen, die sich mit einer bestimmten Geschwindigkeit ausbreiten



¹ <https://de.wikipedia.org/wiki/Schall>



$$p(t, x) = A \sin(kx - \omega t + \phi)$$

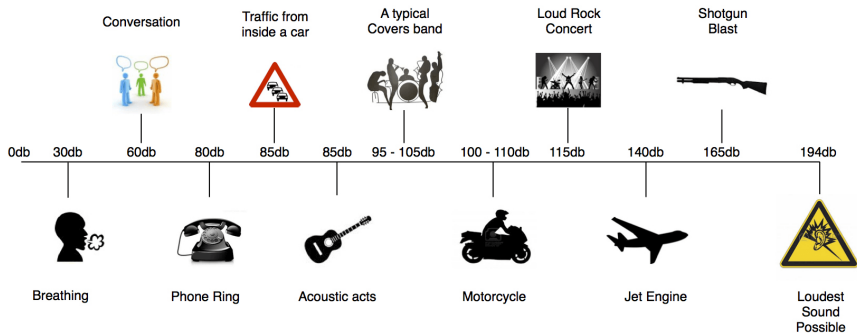
- A : Amplitude/Schalldruck $p(\mathbf{x})$
Einheit: Pascal [Pa]
- $f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{ck}{2\pi}$: Frequenz
Einheit: Hertz [Hz], Schwingungen pro Sekunde
- $\lambda = \frac{c}{f}$: Wellenlänge
Einheit [m]
- ϕ : Phase [rad]
- c : Schallgeschwindigkeit
Einheit [m/s]

- Geschwindigkeitspotential (Velocity potential): $u(\mathbf{x}, t)$
- Schalldruck: $p(\mathbf{x}, t) = \frac{\partial u(\mathbf{x}, t)}{\partial t}$
- Schallschnelle: $v(\mathbf{x}, t) = \nabla u(\mathbf{x}, t) \cdot \mathbf{n}(\mathbf{x})$

⚠ Schallgeschwindigkeit \neq Schallschnelle ⚠

- Schallgeschwindigkeit c : globale Geschwindigkeit der Druckwelle
- ▶ Schallschnelle $v(\mathbf{x})$: lokale Geschwindigkeit eines Teilchen(pakets)
- ▶ Impedanz: $Z(\omega) = \frac{\hat{p}(\omega)}{\hat{v}(\omega)}$, wobei $\hat{f}(\omega)$ die Fouriertransformierte von $f(t)$ bezeichnet

Amplitude



from <http://www.chartvalley.com/decibel-scale-chart>

Ein kleines Ratespiel

- Normale Luftdruck auf Seehöhe: $p_a = 10^5$ Pa.
- Kleinste Luftdruckschwankung, die das Ohr registriert?
- Ab wann wird es wirklich laut:

Ein kleines Ratespiel

- Normale Luftdruck auf Seehöhe: $p_a = 10^5$ Pa.
- Kleinste Luftdruckschwankung, die das Ohr registriert?

$p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa corresponds to 0 dB SPL

- Ab wann wird es wirklich laut:

Ein kleines Ratespiel

- Normale Luftdruck auf Seehöhe: $p_a = 10^5$ Pa.
- Kleinste Luftdruckschwankung, die das Ohr registriert?

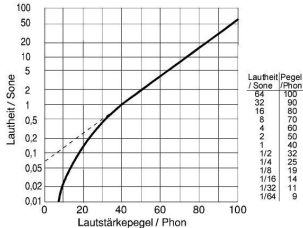
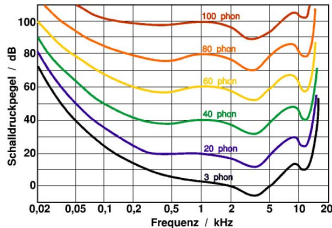
$$p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa corresponds to } 0 \text{ dB SPL}$$

- Ab wann wird es wirklich laut:

$$p_1 = 10 \text{ Pa corresponds to } \approx 113 \text{ dB SPL}$$

$$1\text{dB} = 20\log_{10}\left(\frac{p}{p_0}\right)$$

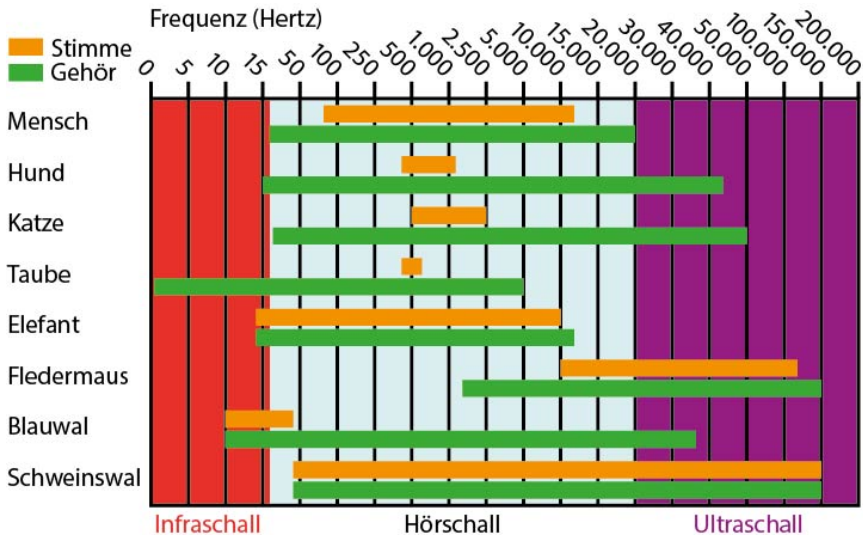
- Doppelter Schalldruck: $\approx 6\text{dB}$, **aber**
doppelt empfundene Lautheit: $\approx 10\text{dB}$
1 Sone entspricht doppelter Lautheit
- Außerdem werden verschiedene Frequenzen verschieden laut wahrgenommen (Phon)



https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Akustik_db2phon.jpg,

https://de.wikipedia.org/wiki/Lautst%C3%A4rke#/media/Datei:Akustik_phon2sone3.jpg

Frequenz, Tonhöhe



- Mel/Bark Skala: Abbildung der “akustischen” Frequenz auf die wahrgenommene Frequenz

$$f_{\text{Mel}} = 2595 \log_{10}(10(1 + f/700)), 1 \text{ Bark} = 100 \text{ Mel}$$

Verdoppelung des Bark Werts, verdoppelte Tonhöhenwahrnehmung.

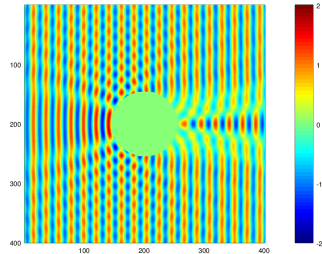
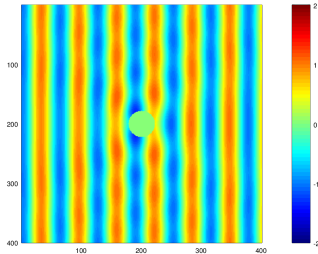
- Kritische Bandbreite: 2 simultan präsentierte Tönen können nicht als zwei verschiedene Töne wahrgenommen werden

$$BW_{\text{critical}} = 25 + 75 \left(1 + 1.4(f/1000)^2 \right)^{0.69}$$

- Frequenzunterscheidung
 - 3.5Hz für $\Delta f \leq 500\text{Hz}$
 - $\Delta f \approx 0.0007f$ für $f > 500\text{Hz}$

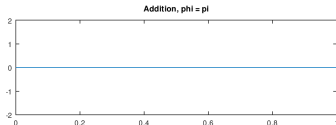
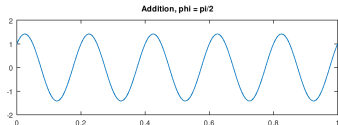
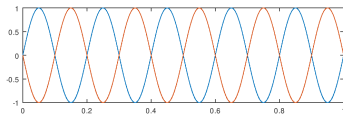
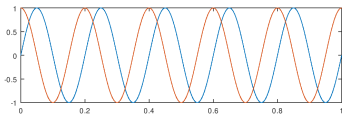
$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Wichtig z.B für Schwingung einer Seite oder Schallreflexion an Objekten



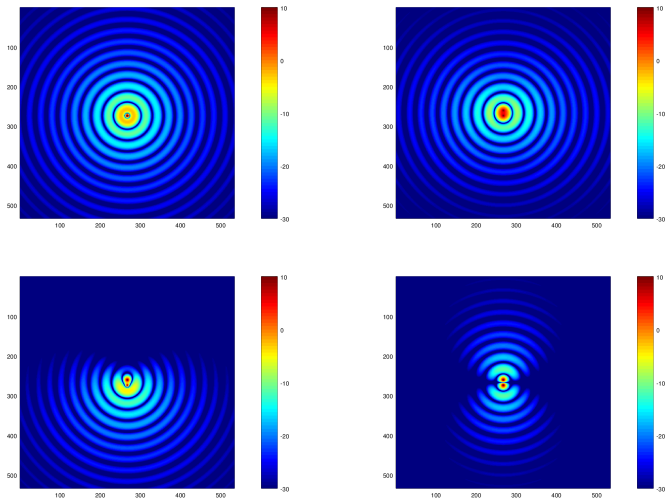
Phase

Addition von Sinustönen mit gleicher Frequenz

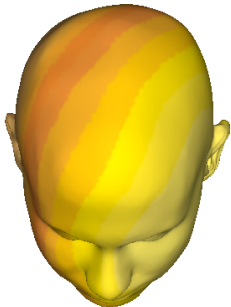


Kann auch die Klangfarbe von Tönen beeinflussen.

Kombination von Schallquellen

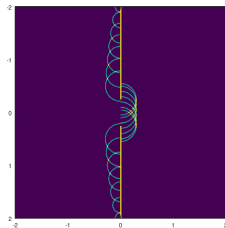
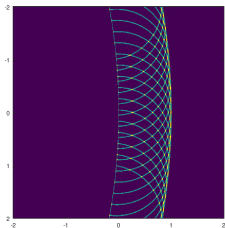


Lokalisation von Schallquellen (I): Zeitunterschied zwischen Empfängern



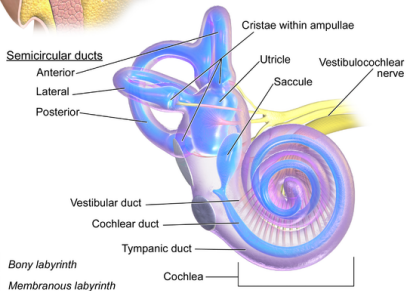
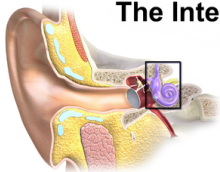
- Schall entsteht durch Druckschwankungen im Medium und breitet sich mittels einer longitudinalen Welle (mit Schallgeschwindigkeit c) aus
- Wichtige Kenngrößen
 - Schalldruck
 - Frequenz
 - Phase
 - Schnellepotential (velocity potential)
 - Schallschnelle
 - Wellenzahl und Wellenlänge
 - Impedanz/Admittanz

Huygens-Fresnel Prinzip: Jeder Punkt einer Wellenfront ist Ausgangspunkt einer neuen Welle



Wahrnehmung

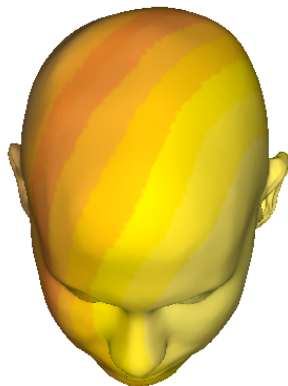
The Internal Ear



- Pinna
- Mittelohr
- Cochlea

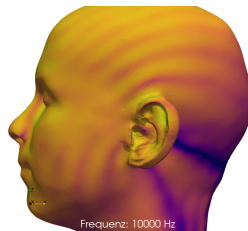
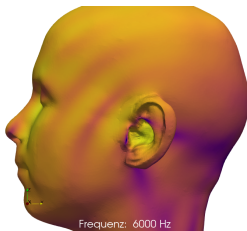
Blausen.com staff (2014). "Medical gallery of Blausen Medical 2014". WikiJournal of Medicine 1 (2).

- Horizontal
 - Zeitdifferenz zwischen rechtem und linkem Ohr (ITD)
 - Unterschied in der Amplitude/Level (ILD)
- Vertikal
 - Spektrale Cues also HRTFs

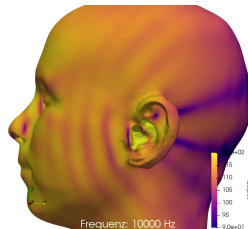
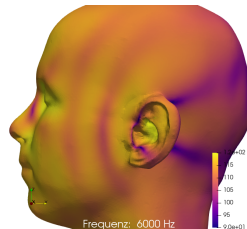


Lokalisation von Schallquellen

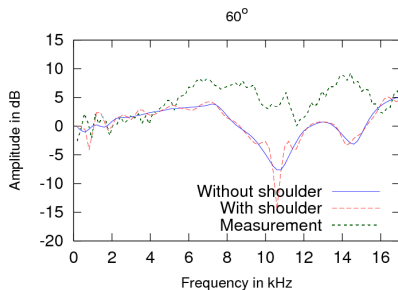
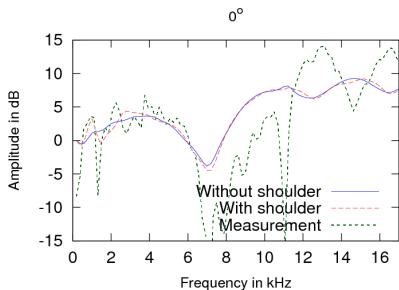
Quelle oben



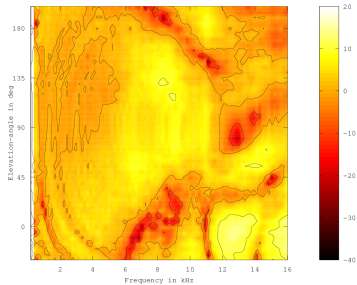
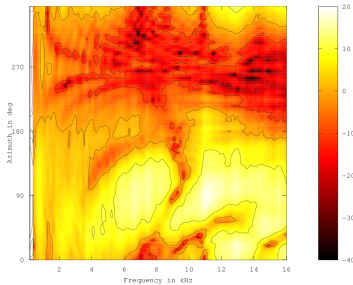
Quelle vorne



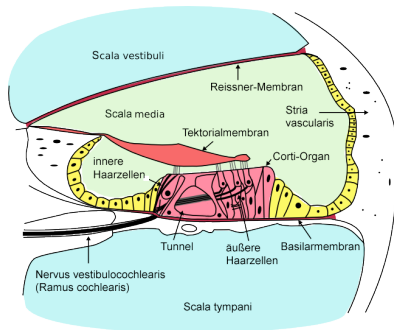
- Reflexionen von Schall an der Pinna wirkt wie ein richtungsabhängiger Filter
- Kopfbezogene Übertragungsfunktionen (HRTFs)







- Basilmembran:
Frequenzanalyse, nicht linear
- Innere Haarzellen:
Bewegung wird in neuronale Antwort umgewandelt
- Äußere Haarzellen: aktives Element, nichtlineare Verstärkung von leisem Schall

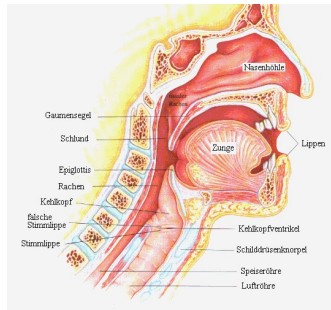


<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cochlea-crossection-de.png>

- Hören wir alle Komponenten im Schall?
 - Zeit/Frequenzmaskierung
 - Irrelevance Filters
 - Datenkomprimierung (ogg, mp3, ...)
- Hören wir etwas, das nicht da ist?
 - Residualton/Missing Fundamental
 - Auditorische Illusionen

- ÖNorm S 5004: unerwünschter, störender und belästigender Schall“)
- Es gibt kein objektives Maß, um Lärm zu messen. Das Lärmempfinden ist oft abhängig
 - Tätigkeit (Konzentration) un Zeit (Tag/Nacht)
 - persönliche Vorlieben
 - persönliche Verfassung
 -
- Mögliche Messindikatoren sind SPL(z.b. A-bewertung) und Lautheitsmodelle. Beide Indikatoren sind nicht das Gleiche

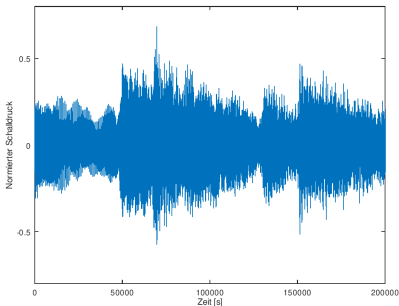
- Lungen
 - produzieren einen konstanten Luftstrom
 - Lautstärke und Tonqualität
- Glottis
 - vibrierende Stimmlippen
 - bestimmt die Grundfrequenz und die Qualität der Stimme
- Vokaltrakt
 - Mund und Nasenhöhlen
 - bewirkt Resonanzeffekte (= Formanten) und somit Sprache



<http://www.seam-uni-essen.de/wie-und-warum/skriptum/physiologie/vokaltrakt.jpg>

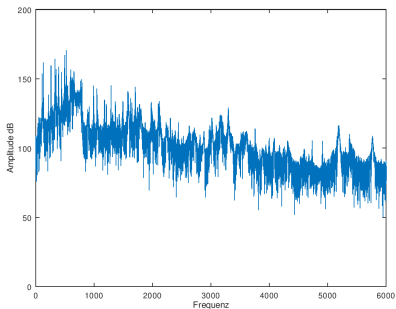
Wie können wir Schall darstellen?

1) Wellenform (Zeitbereich)



Wie können wir Schall darstellen?


2) Spektrum (Frequenzbereich)



Wie können wir Schall darstellen?

3) Das gute alte Notenblatt (Zeit-Frequenzebene)

SUMMERTIME CHORDS & MELODY
WWW.FREEJAZZLESSONS.COM

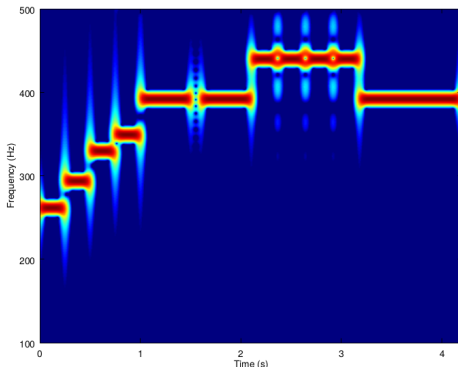


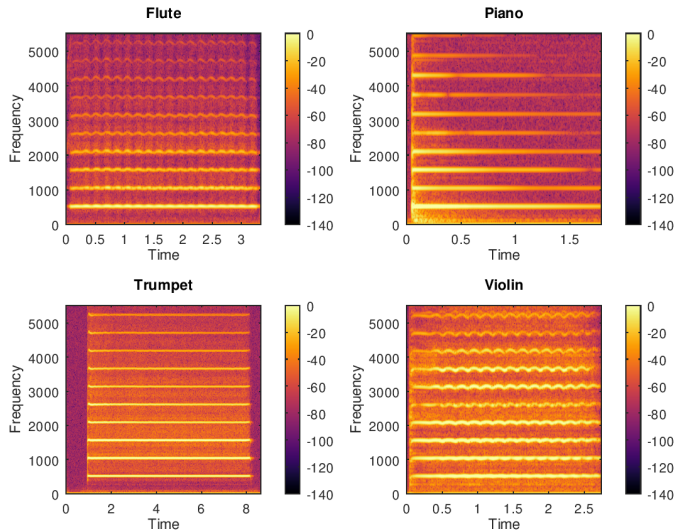
The image shows a musical score for 'Summertime Chords & Melody'. It consists of four staves of music. The first staff is the melody, and the subsequent three staves are chord charts. The chord symbols are: DMIN7, EMIN7(b9), A7, DMIN7, D7, GMIN7, GMIN7, EMIN7(b9), A7, DMIN7, GMIN7, C7, F#MIN7, EMIN7(b9), A7, DMIN7, EMIN7(b9), A7.

<https://www.freejazzlessons.com/wp-content/uploads/2013/04/summertime-chord-chart-lead-sheet.jpg>

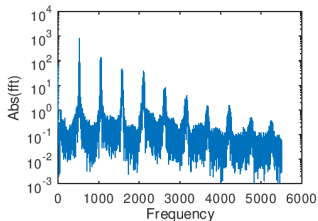
Wie können wir Schall darstellen?

4) Spectrogram (Zeit-Frequenzebene)

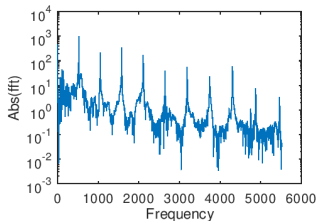




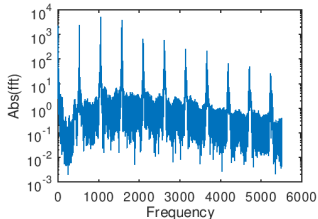
Flute



Piano



Trumpet



Violin

