

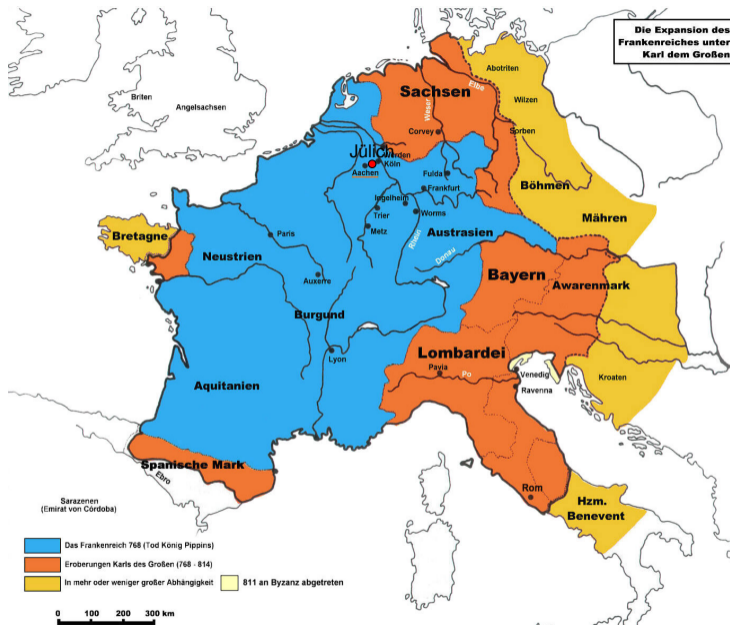
Physik und Musik

Musik: Die Physik spielt mit!

Jörg Pretz



Berlin, WE-Heraeus-Seminar, Schwingungen und Wellen, 18. September 2025

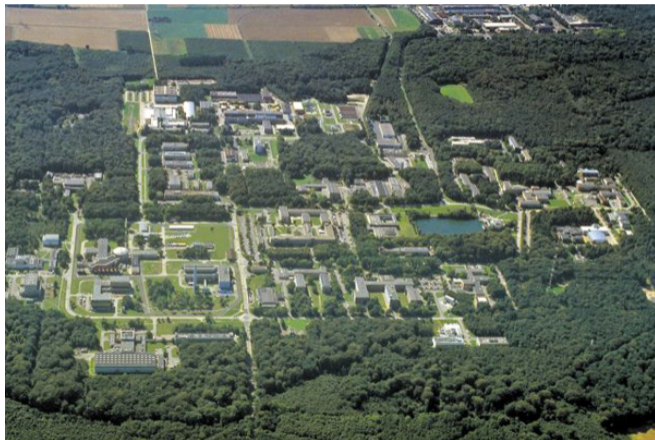


Quelle: Wikipedia: https://de.wikipedia.org/wiki/Karl_der_Große

RWTHAACHEN UNIVERSITY



- RWTH
(Rheinisch-
Westfälische
Technische
Hochschule)
- 1870 gegründet
- 45 000
Studierende
(Einwohner
Aachen: 250 000)
- Größte technische
Universität in
Deutschland



- eines der größten interdisziplinären Forschungszentren in Europa
- 7571 Mitarbeiter (2962 Wissenschaftler)
(Stand 24.08.2025)

Forschungsschwerpunkte

UNSERE 3 STRATEGISCHEN FORSCHUNGSSCHWERPUNKTE



Energie

Die Jülicher Energieforschung setzt auf ein durch erneuerbare Energien bestimmtes Energiesystem. Dabei erforschen die Wissenschaftler:innen Technologien in allen Größenordnungen, von der atomaren Ebene bis zur industriellen Innovation, und decken so die gesamte Wertschöpfungskette zwischen Grundlagen- und Anwendungsforschung ab.



Information

Mit dem Schwerpunkt Information verbindet die Jülicher Forschung drei Bereiche: die Simulations- und Datenwissenschaften des High-Performance Computing (HPC), die Hirnforschung und die Forschung zu bio- und nano-elektronikbasierten Informationstechnologien der Zukunft. Ein weiterer Schwerpunkt in Jülich ist die Quantentechnologie.



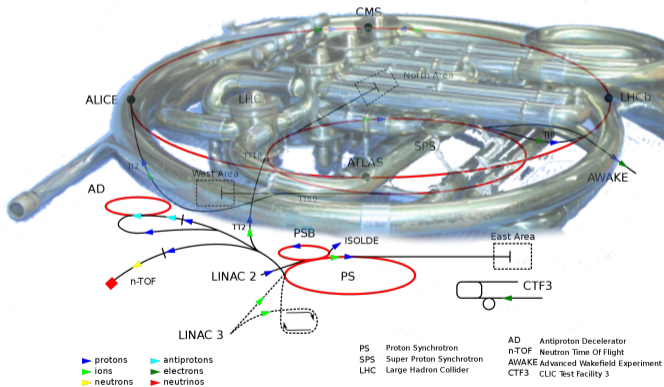
Bioökonomie

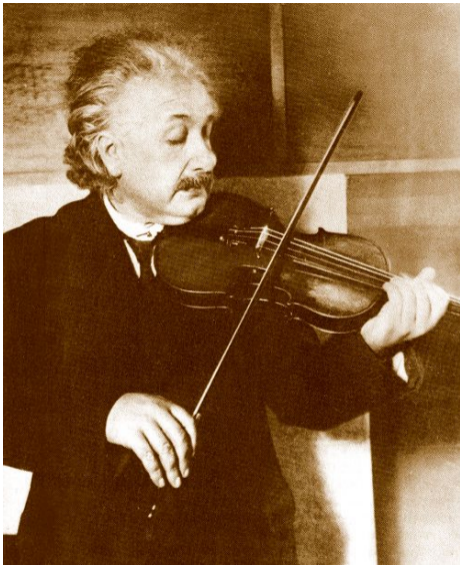
Die nachhaltige Bioökonomie ist eine biobasierte Kreislaufwirtschaft, die ohne fossile Rohstoffe auskommt und stattdessen auf nachwachsende Rohstoffe setzt. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Forschungszentrums entwickeln zum Beispiel neue Wertschöpfungsprozesse.



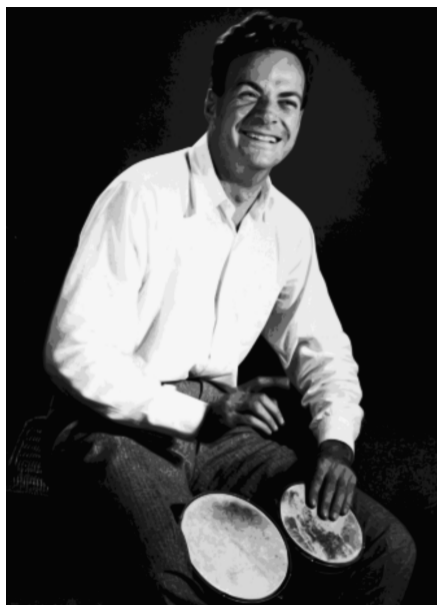
Frequenz, Wellenlänge

Harmonische, Resonanz





<http://www.einsteingalerie.de/portreat/violine.html>



Quelle: Richard Hart/Caltech archives

**A SURVEY OF RADIAL VELOCITIES
in the
ZODIACAL DUST CLOUD**

Brian Harold May
Astrophysics Group

Department of Physics
Imperial College
London



Quelle: <https://shop.brianmayguitars.co.uk/news/bmg-super.html>

Thesis submitted for the Degree of Doctor of Philosophy to
Imperial College of Science, Technology and Medicine

London

· 2007 ·

- Was sind (Schall)wellen?
Frequenz, Wellenlänge
- Spektralanalyse
Was unterscheidet den Klang verschiedene Instrumente?
- Saiteninstrumente
1:2:3:4: Auf die Verhältnisse kommt es an!
- Blechblasinstrumente
Vom Gartenschlauch zur Posaune

Was sind (Schall)wellen?

(Schall)wellen

λ (lambda)	Wellenlänge
T	Periodendauer
$f = \frac{1}{T}$	Frequenz

(Schall)wellen I

$$c = \lambda \cdot f$$

- Schallgeschwindigkeit
- Wellenlänge
- Frequenz

	c	$=$	λ	\cdot	f
①	\leftrightarrow	$=$	\nearrow	\cdot	\searrow
②	\nearrow	$=$	\leftrightarrow	\cdot	\nearrow

Beispiele für Wellen

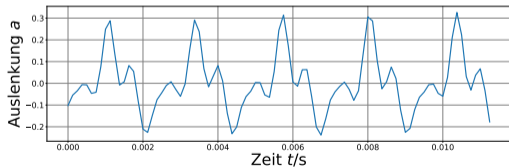
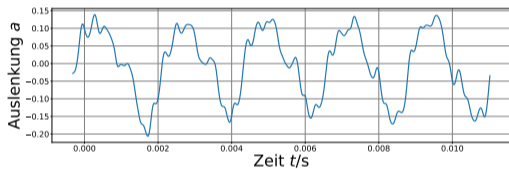
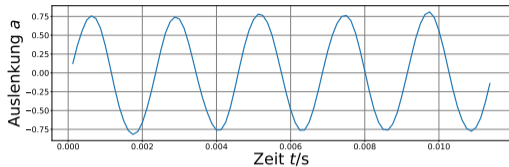
Ausbreitungsgeschwindigkeit = Wellenlänge · Frequenz

$$c = \lambda \cdot f$$

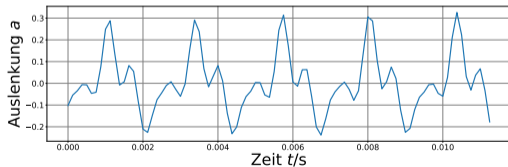
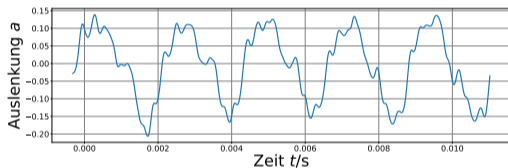
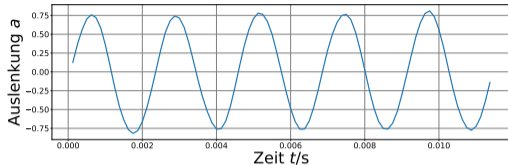
	Frequenz f [Hz=1/s]	Wellenlänge λ [m]	Ausbreitungsgeschw. $c = \lambda \cdot f$ [m/s]
Schall	440	0,78	343 (Luft)
Radiowellen (WDR2)	$100,8 \cdot 10^6$	3	299 792 458
Licht (blau)	$6,4 \cdot 10^{14}$	$470 \cdot 10^{-9}$	299 792 458
Wasserwellen	6	3	18

Was unterscheidet den Klang
verschiedener Instrumente?

Schwingungen verschiedener Instrumente



Schwingungen verschiedener Instrumente



Alle drei Signale haben die gleiche Frequenz (Periodizität), aber eine unterschiedliche Form. Wie kann man diese Unterschiede charakterisieren?

Fourier-Zerlegung

benannt nach Joseph Fourier (1768 -1830):

Ein beliebiges periodisches Signal kann als Summe von Sinuskurven dargestellt werden.

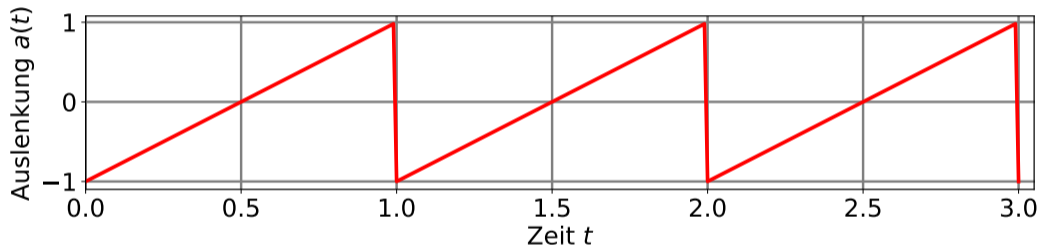


<http://web.mit.edu/2.51/www/fourier.jpg>

Vielfältige Anwendungen: Wärmeleitung, JPEG-Algorithmus, Magnetresonanztomographie (MRT), Quantenmechanik, ...

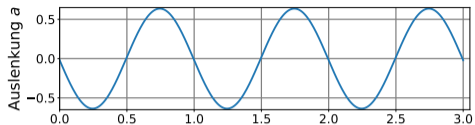
Beispiel: Sägezahn-förmiges Signal

... hat zunächst wenig mit Sinuskurve zu tun:

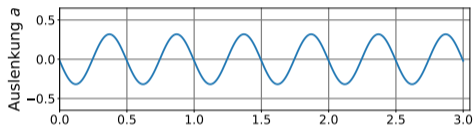


aber ...

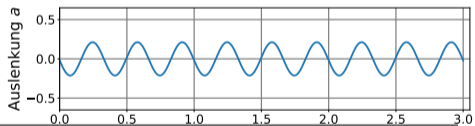
Fourier-Zerlegung



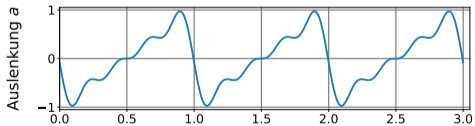
+



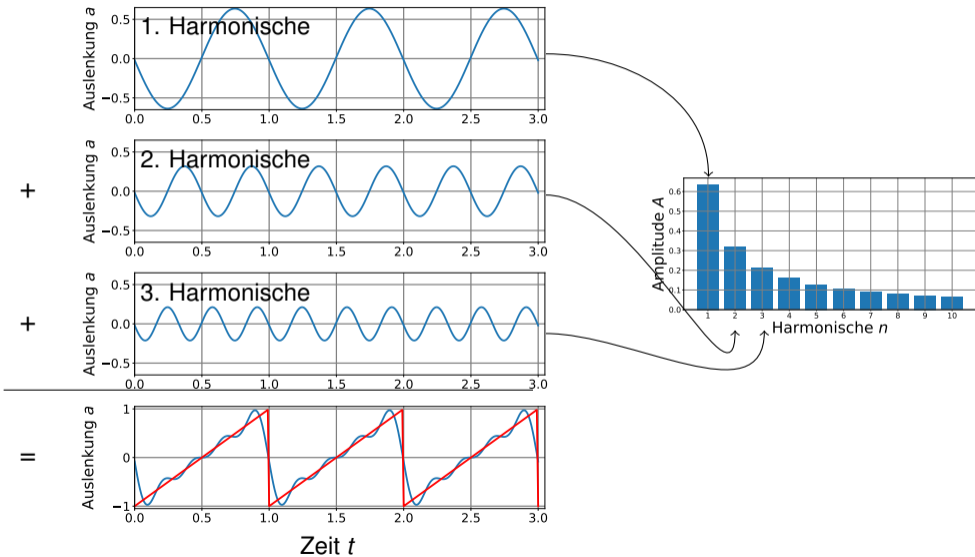
+



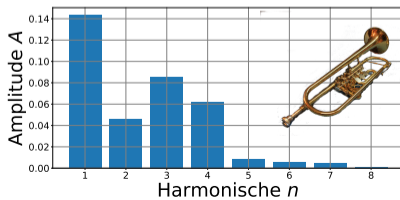
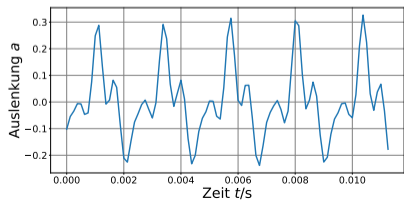
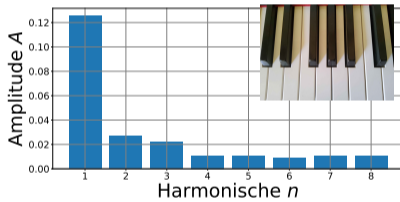
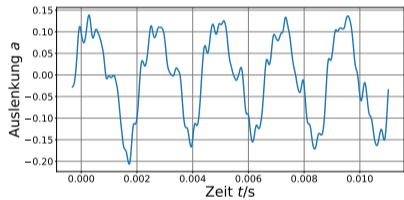
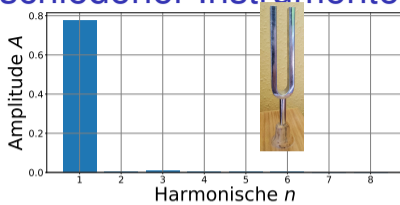
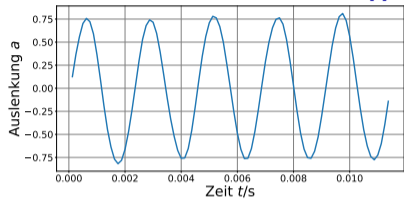
=



Fourier-Zerlegung



Fourier-Zerlegung verschiedener Instrumente



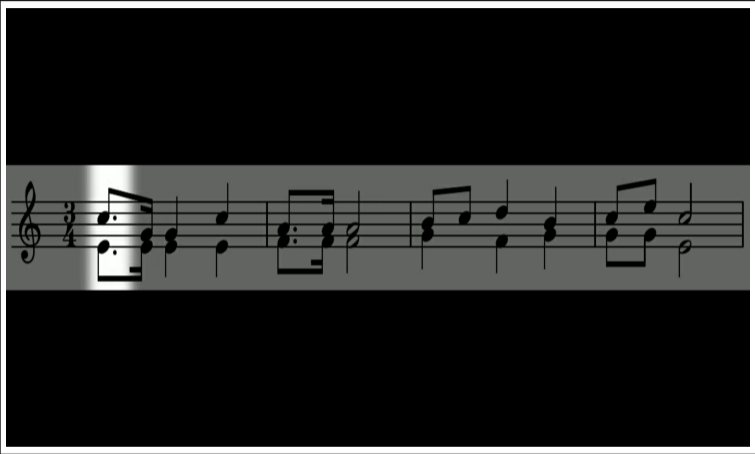
Fourier-Zerlegung

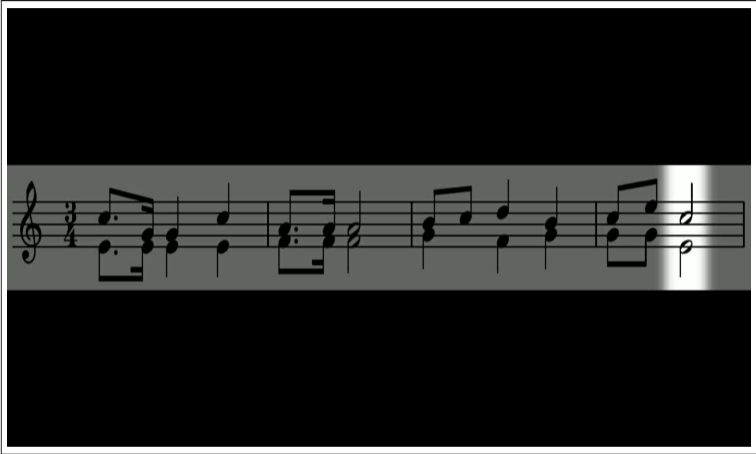
Alle drei Töne haben die gleiche Frequenz (440 Hertz, Kammerton a, $T=1/(440 \text{ Hz}) = 2.27 \text{ ms}$), d.h.

- Stimmgabelenden ...
- Klaviersaiten ...
- Lippen des Trompeters ...

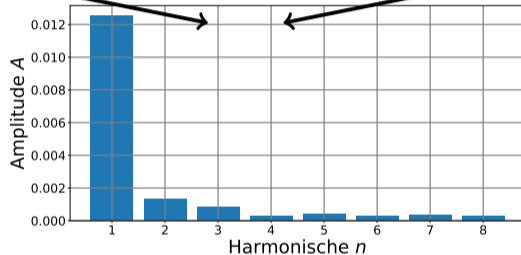
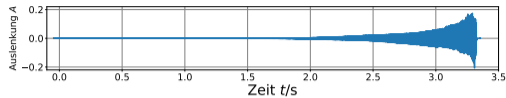
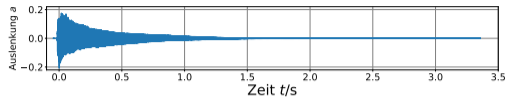
schwingen 440 mal pro Sekunde hin und her. Die unterschiedlichen Formen können durch das Fourierspektrum beschrieben werden.

Charakterisiert das Fourierspektrum den Klang des Instruments vollständig?



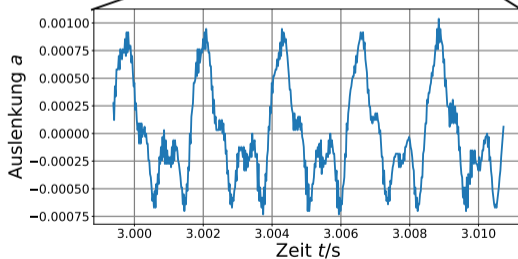
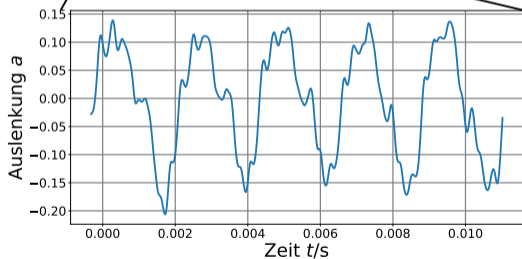
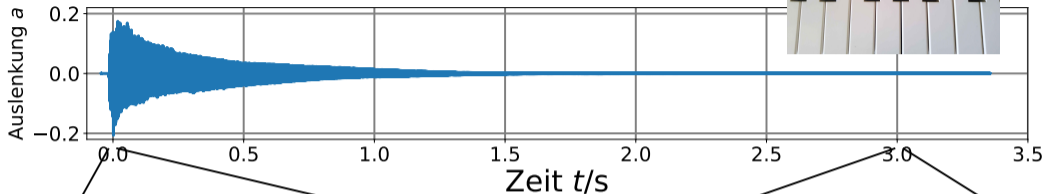


Ton \Leftrightarrow noT

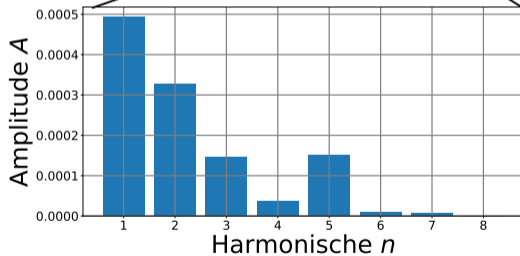
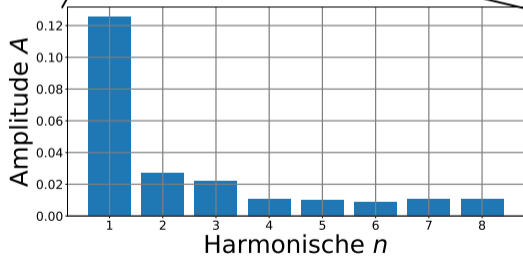
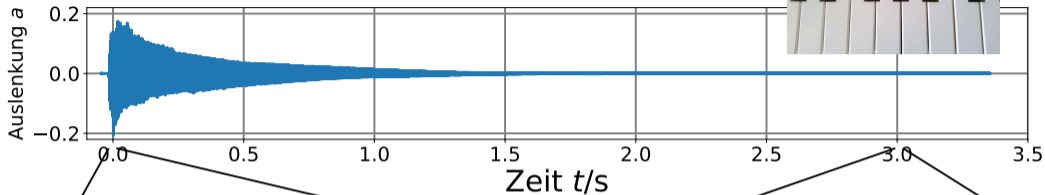


Das Fourierspektrum eines Tons und des zeitlich invertierten Tons sind identisch. Dennoch klingen sie unterschiedlich.

Fourier-Zerlegung Klavier



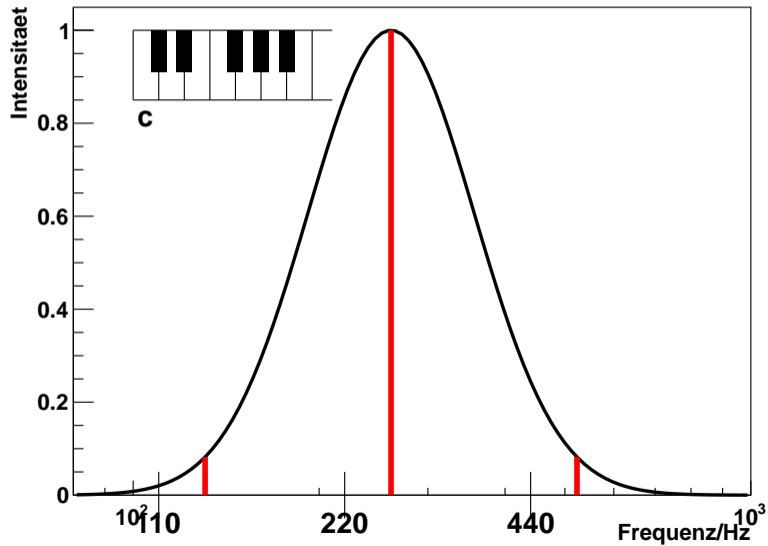
Fourier-Zerlegung Klavier



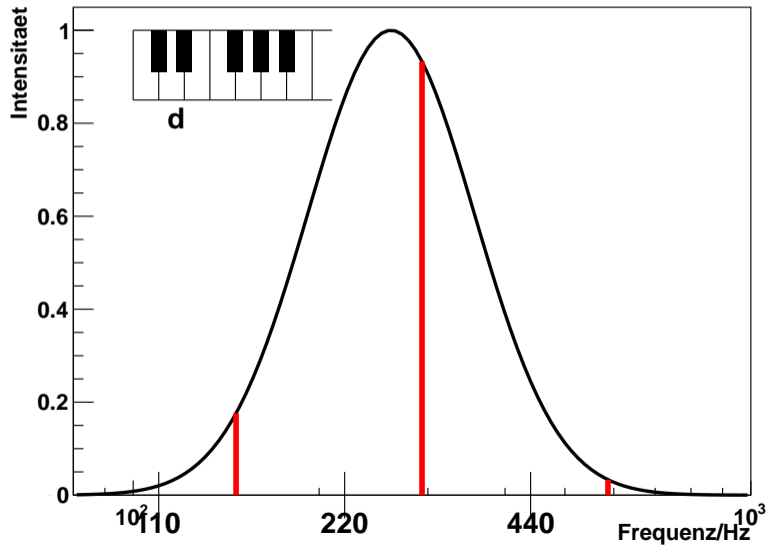
Akustische Täuschung: Die Shepard-Tonleiter

Play

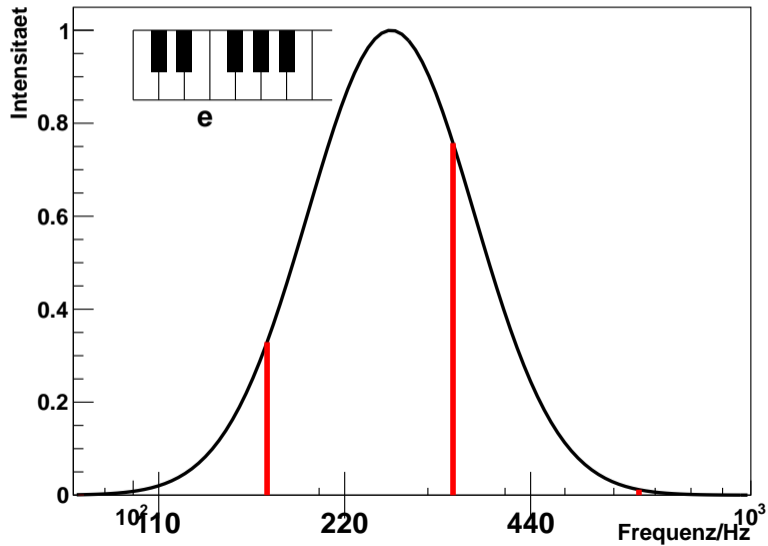
Shepard-Tonleiter



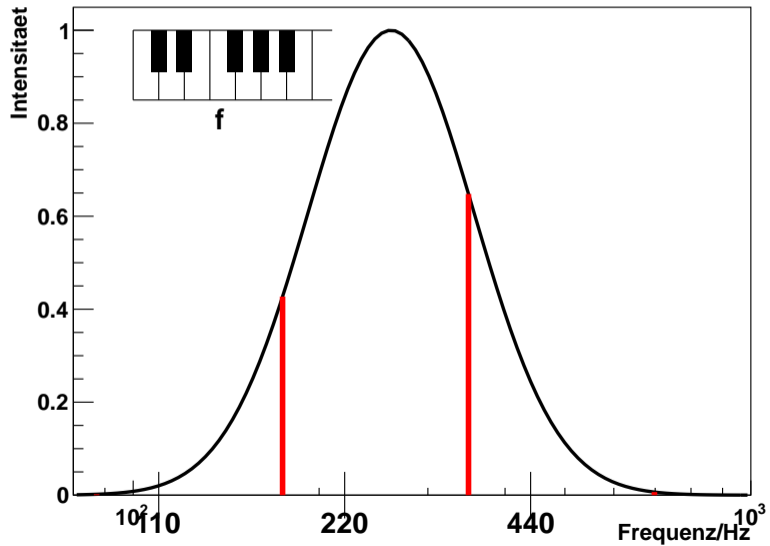
Shepard-Tonleiter



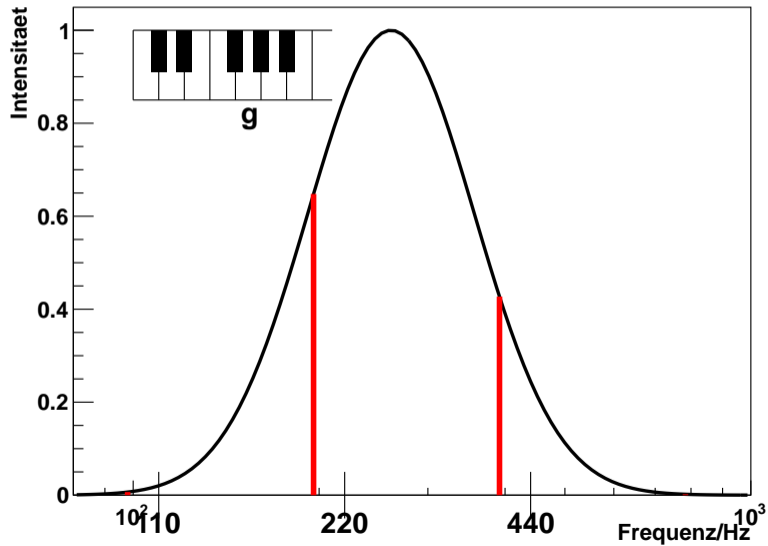
Shepard-Tonleiter



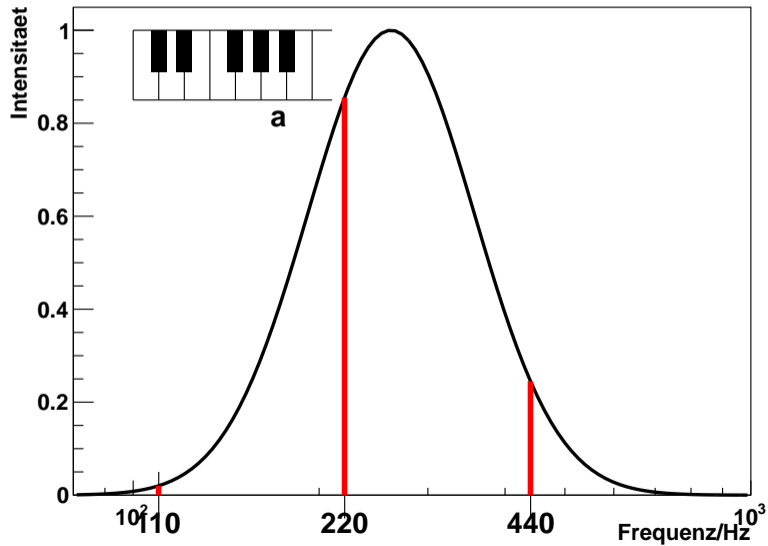
Shepard-Tonleiter



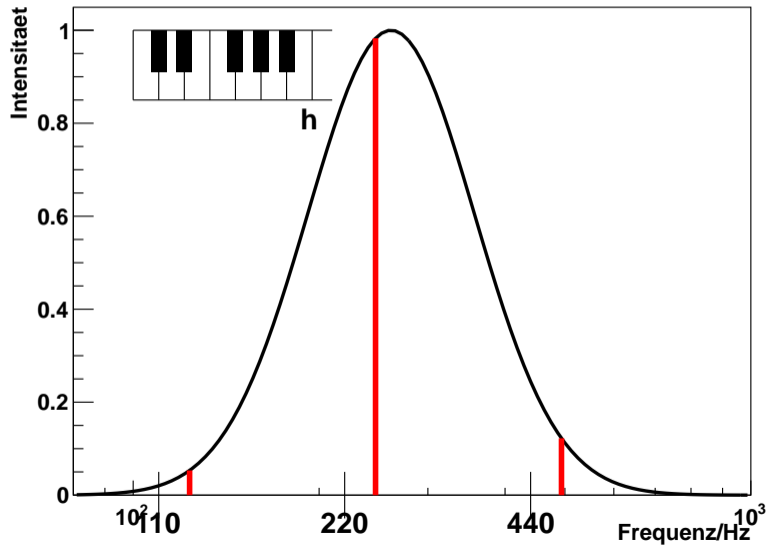
Shepard-Tonleiter



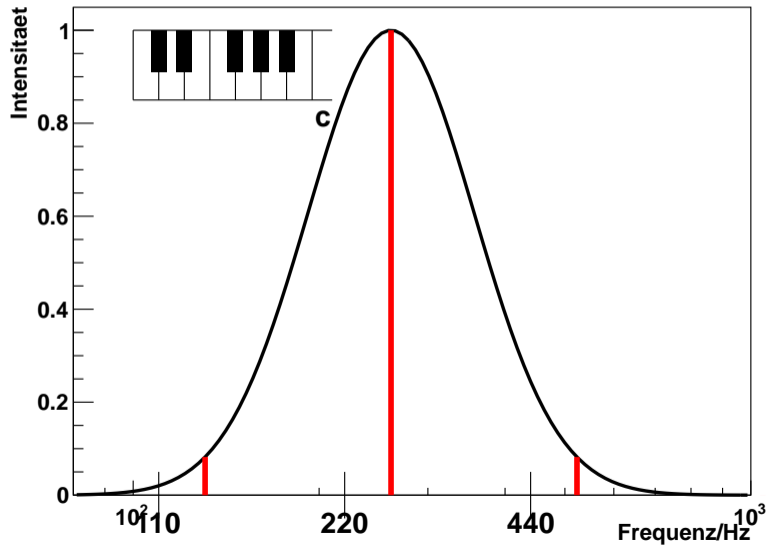
Shepard-Tonleiter



Shepard-Tonleiter



Shepard-Tonleiter



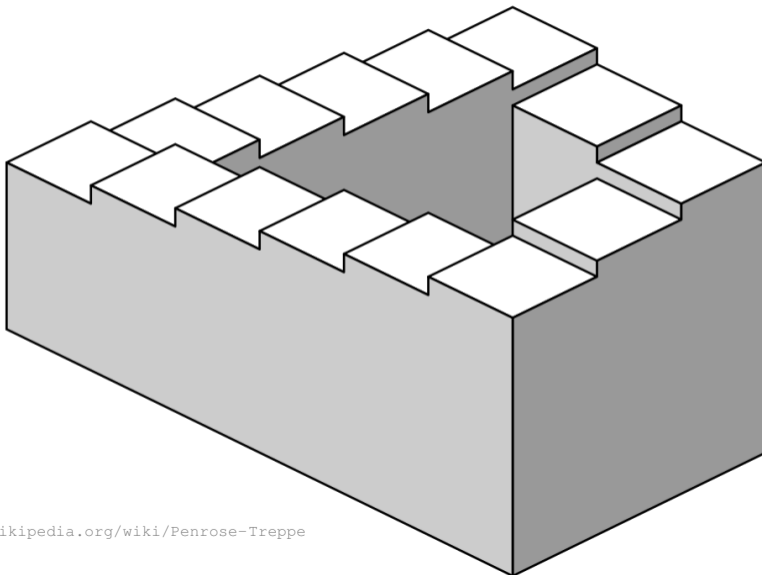
<https://www.youtube.com/watch?v=u9VMfdG873E>



007 / 1000:36



Penrose - Treppe



Quelle <https://de.wikipedia.org/wiki/Penrose-Treppe>

Saiteninstrumente

Wellengleichung

$$\frac{\partial^2 s(x, t)}{\partial t^2} = v_p^2 \frac{\partial^2 s(x, t)}{\partial x^2}$$

	v_p^2	s
Seilwelle:	$\frac{F}{\rho A}$	(transversale) Auslenkung des Seils
Schallwellen:	$\frac{1}{\kappa \rho}$	(longitudinale) Auslenkung von Luftmolekülen
Wasserwellen:	$\left(\frac{g\lambda}{2\pi} + \frac{\gamma 2\pi}{\rho\lambda} \right) \tanh \left(\frac{2\pi z}{\lambda} \right)$	(transversale) Auslenkung von Wassermolekülen
Elektromagnetische Wellen:	$\frac{1}{\epsilon_0 \mu_0} = c_0^2$	elektrisches und magnetisches Feld

Lösung der Wellengleichung

$$s(x, t) = s_0 \cos(\omega t - kx), \quad \omega = 2\pi f, k = 2\pi/\lambda$$



Stehende Wellen

Stehende Welle auf Saiten entstehen durch Reflexionen an den Enden

Schwingende Saite

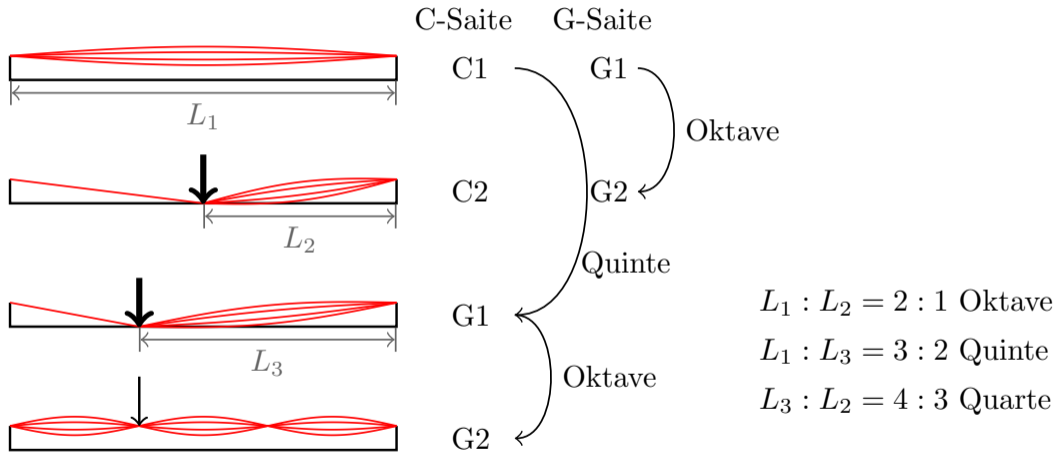
Geschwindigkeit $v_p = \lambda f = \sqrt{\frac{F}{\rho A}}$

Wellenlänge ist durch Länge der Saite L bestimmt: Grundschiwingung: $\lambda = 2L$

Ergibt das Sinn?

- mit größerer Kraft erhöht sich Frequenz
mit größerer Dichte oder Fläche erniedrigt sich Frequenz
- Verkleinerung von λ (d.h. Saitenlänge L) führt zu höherer Frequenz, da v_p gleich bleibt

Intervalle



Vom Gartenschlauch zur Posaune

Wie kommt man den Grundgesetzen der Natur auf die Spur?

Geschickte Vereinfachungen:



Einfache Grundgesetze/Theorie:

$$c = \lambda \cdot f$$

Vergleich Theorie \leftrightarrow Experiment:



Stehende Wellen

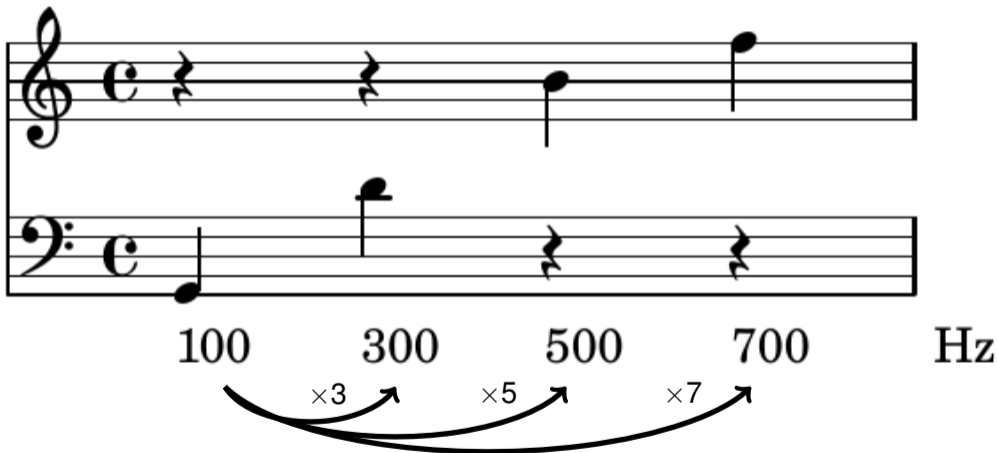
Stehende Wellen



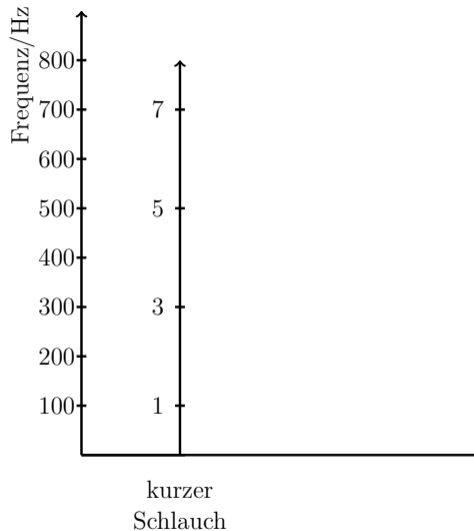
Resonator: Nur bestimmte Wellenlängen/Frequenzen (**Naturtöne**) erlaubt.
Bedingung für Frequenzen beim Schlauch: **Knoten** an einem Ende, **Bauch** am anderen Ende.

Wellenlänge	Frequenz	$L=86 \text{ cm}, c = 343 \text{ m/s}$
$\lambda = 4L$	$f = \frac{c}{4L}$	= 100 Hz
$\lambda = \frac{4}{3}L$	$f = 3\frac{c}{4L}$	= 300 Hz
$\lambda = \frac{4}{5}L$	$f = 5\frac{c}{4L}$	= 500 Hz

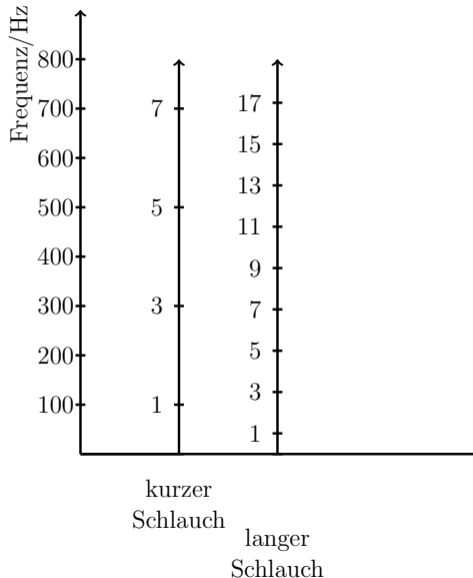
Naturtöne Gartenschlauch (Zylinder)



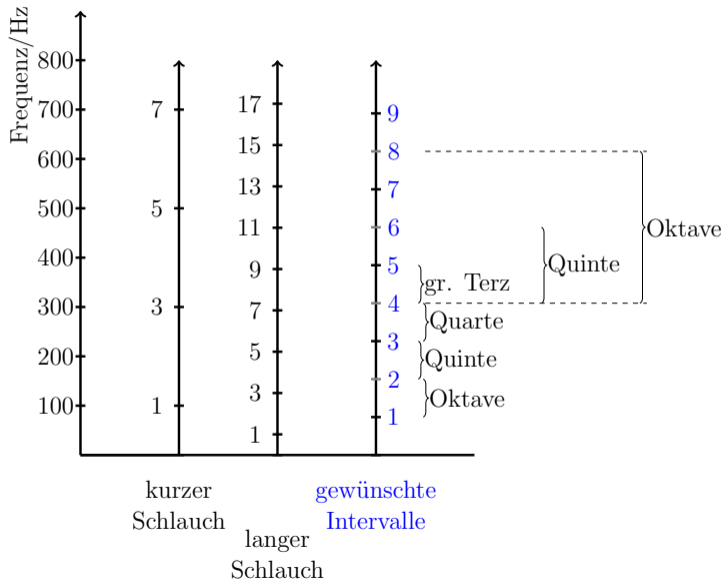
Intervalle (= Verhältnis von Tonfrequenzen)



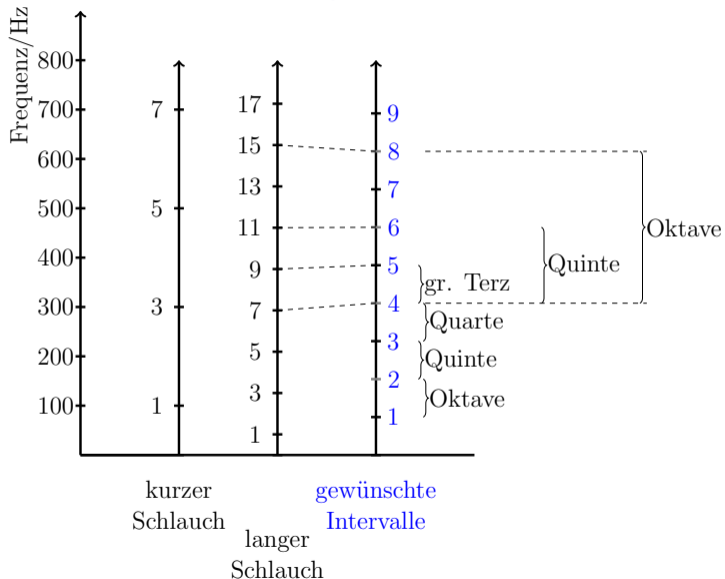
Intervalle (= Verhältnis von Tonfrequenzen)



Intervalle (= Verhältnis von Tonfrequenzen)



Intervalle (= Verhältnis von Tonfrequenzen)



Links Videos



[Link Video ArdAlpha](#)



[Link Video Youtube](#)

[Link Mintmagie Instagram](#)

Philip Bechtle · Florian Bernlochner
Herbi Dreiner
Christoph Hanhart
Josef Jochum
Jörg Pretz · Kristin Riebe

Faszinierende Teilchenphysik

Von Quarks, Neutrinos
und Higgs
zu den Rätselfn
des Universums

SACHBUCH

 Springer

Philip Bechtle · Florian Bernlochner
Herbi Dreiner
Christoph Hanhart
Josef Jochum
Jörg Pretz · Kristin Riebe

Fascinating Particle Physics

Quarks, Neutrinos,
the Higgs Boson and
the Riddles
of the Universe

 Springer

Strahlung beschleunigter Ladung, Röntgen, PET, ...