

Übersicht gkg ... pharm. Prüf.

Einführung

1 Allgemeines

2 Mechanik

3 Wärmelehre

4 Elektrizität und Magnetismus

5 Optik

6 Schwingungen und Wellen

7 Atomistische Struktur der Materie

(8 Grundlagen der Arzneiformenlehre)

6.1 aus gkg ... pharm. Prüf.

6 Schwingungen und Wellen

6.1 Allgemeines über Schwingungen

6.1.1 Darstellung: Darstellung harmonischer Schwingungsvorgänge (quantitativ, s.a. 2.1.4)

6.1.2 Schwingungsenergie: Periodischer Wechsel zwischen verschiedenen Energieformen am Beispiel Federpendel und elektrischer Schwingkreis (s.a. 2.3.2 und 4.7.4)

6.1.3 Schwingungsfähige Systeme: Eigenfrequenz von elektrischem Schwingkreis (s.a. 4.7.4) und Federpendel (s.a. 2.3.2), Resonanz schwingungsfähiger Systeme

6.1.4 Gedämpfte Schwingungen: Schematische Darstellung einfacher Einschwing- und Abklingvorgänge

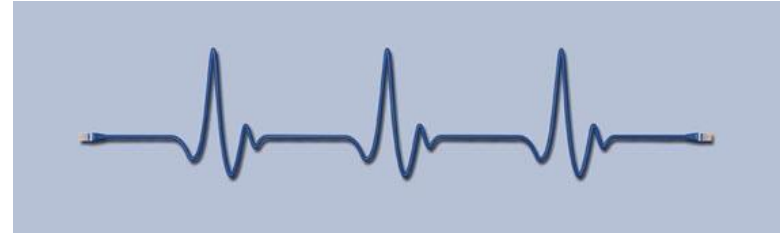
Periodische Vorgänge

Nicht-periodische Vorgänge:

Einmalig (z.B. Aufprall) oder wiederholt aber unregelmäßig (statistische Verteilung, z.B. Prasseln von Hagelkörnern, radioaktiver Zerfall)

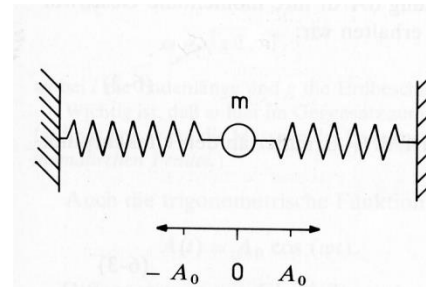
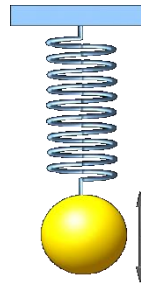
Periodische Vorgänge

wiederholen sich nach einem Zeitintervall T immer wieder
(z.B. Herzschlag, tropfender Wasserhahn)

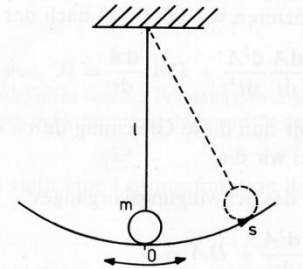


Harmonische Vorgänge:

Spezialfall der periodischen Vorgänge. Darstellung durch Sinus- bzw. Cosinus-Funktion
(z.B. Saitenschwingung, Pendel)



Federpendel



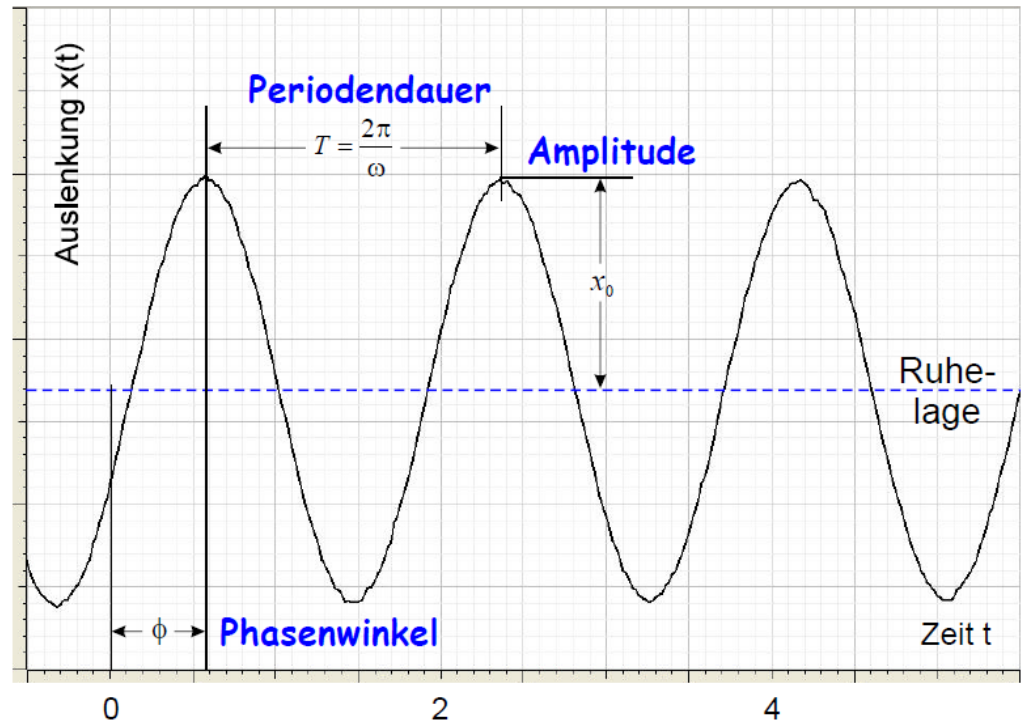
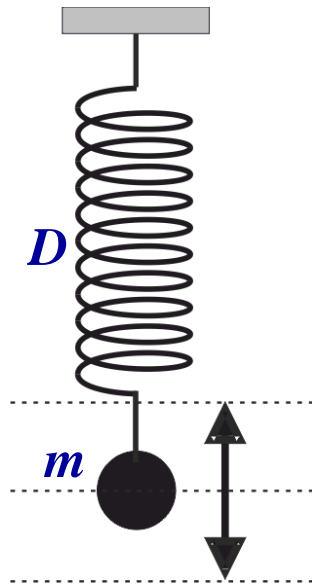
Fadenpendel

Schwingungen: Periodische Vorgänge in einer Variablen, der Zeit

Wellen: Ausbreitung von Schwingungsvorgängen im Raum;

dabei im Allg. Energietransport, aber kein Materietransport!

Harmonische Schwingung



$$m \frac{d^2 s}{dt^2} = -\gamma \frac{ds}{dt} - k s$$

Impulsänderung = Reibungskraft + rücktreibende Kraft

Harmonische Schwingung analog zur Kreisbewegung

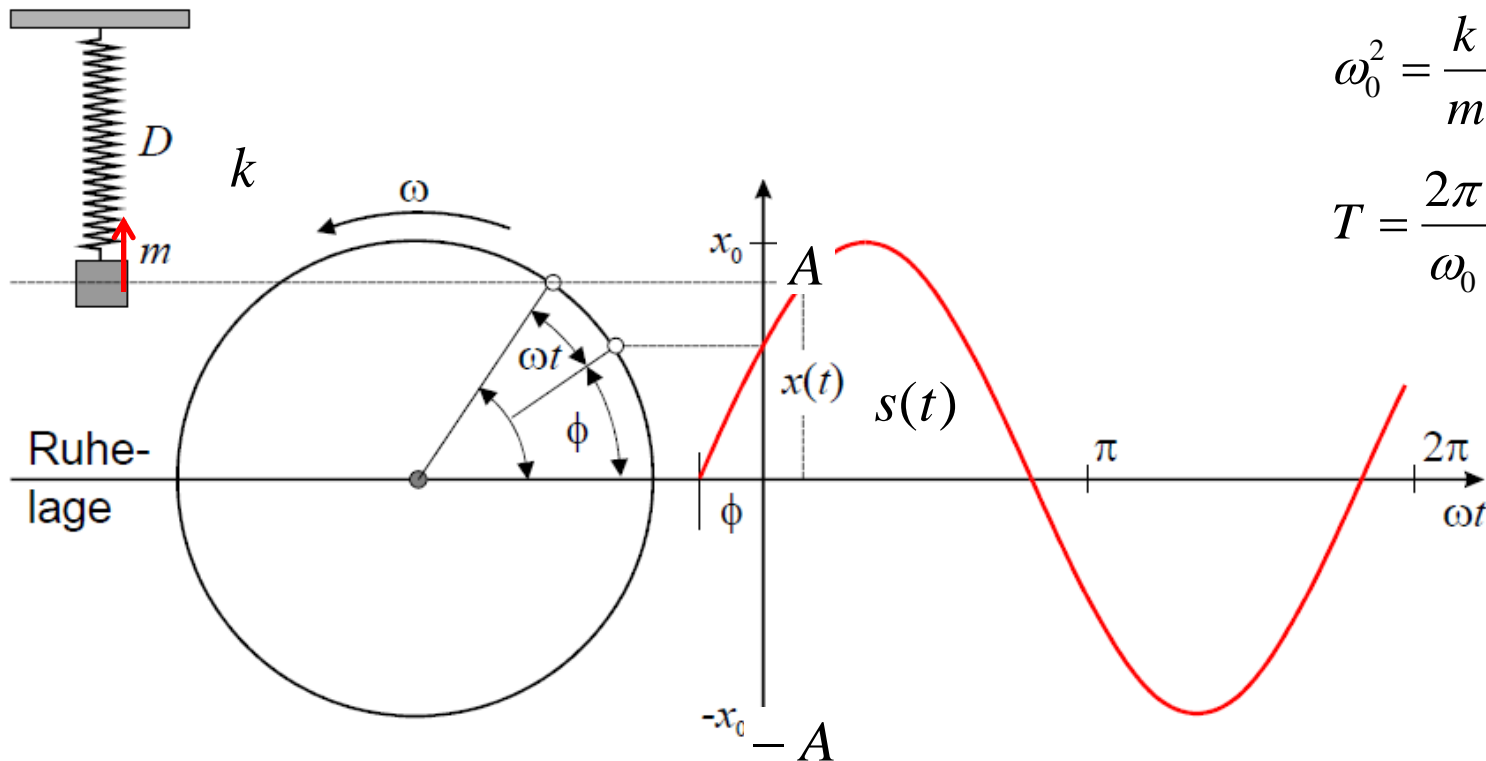
$$m \frac{d^2 s}{dt^2} + \gamma \frac{ds}{dt} + m \omega_0^2 s = 0$$

Lösung ohne Reibung ($\gamma = 0$): $s(t) = A \sin(\omega_0 t + \varphi)$ mit $\omega_0 = \sqrt{k/m}$

Wichtige Beziehungen:

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m}, \quad f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$



Alternative Lösungsschreibweisen

Es war: $s(t) = A \sin(\omega_0 t + \varphi) = A \sin\left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi\right)$

anders geschrieben: $= A \cos(\omega_0 t + \varphi - \pi/2) = A \cos(\omega_0 t + \varphi')$

oder auch: $= A_s \sin(\omega_0 t) + A_c \cos(\omega_0 t)$

wobei $A = \sqrt{A_s^2 + A_c^2}$

Zur Bedeutung der Amplitude A :

Betrachte Federpendel:

Dann ist A die Maximalauslenkung von der „Ruhelage“ des Pendels,
d.h. die Position der Umkehrpunkte.

$A\omega_0$ die Maximalgeschwindigkeit (bei Nullpunktdurchgang).

Für die jeweils beteiligten Energien gilt:

$$\frac{k}{2} A^2 = \frac{m}{2} (A\omega_0)^2$$

in Übereinstimmung

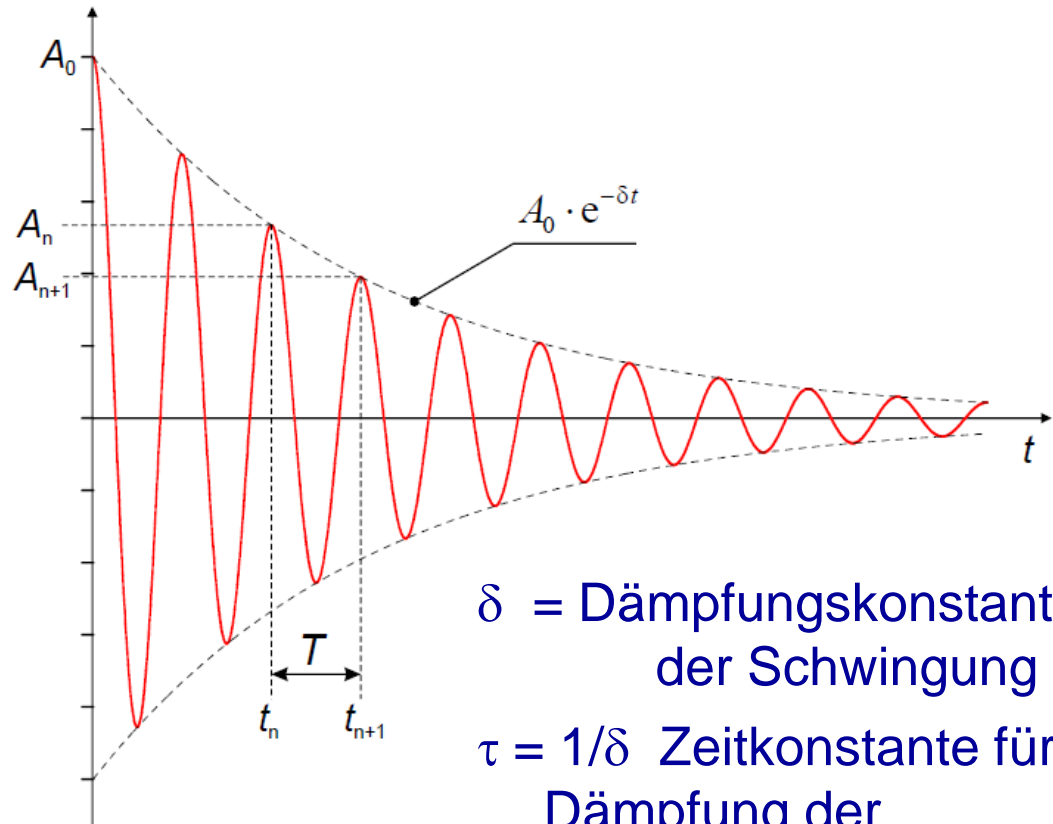
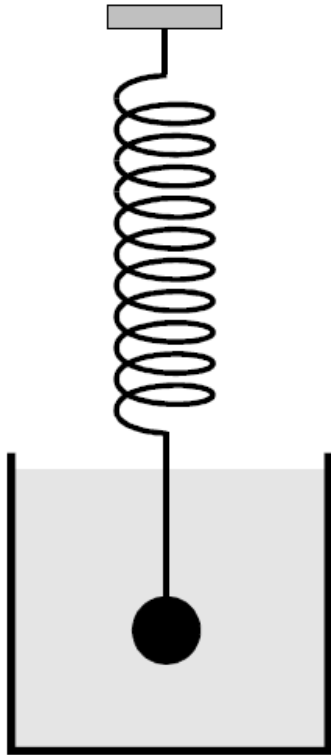
mit $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$

pot. Energie = kin. Energie

Beachte aber: zu jeweils
unterschiedlichen Zeiten!

Gedämpfte Schwingungen

Energieverluste durch Reibung führen zur kontinuierlichen Abnahme der Schwingungsamplitude mit der Zeit (= **Dämpfung**)



δ = Dämpfungskonstante
der Schwingung

$\tau = 1/\delta$ Zeitkonstante für
Dämpfung der
Schwingung

Gedämpfte Schwingungen

Immer noch $m \frac{d^2 s}{dt^2} + \gamma \frac{ds}{dt} + m\omega_0^2 s = 0$

Jetzt aber mit Reibung ($\gamma \neq 0$):

Lösung im Allg.: $s(t) = A_0 e^{-\frac{\gamma}{2m}t} \sin(\omega t + \varphi) = A(t) \sin(\omega t + \varphi)$

Auch die Amplitude ist jetzt eine Funktion der Zeit!

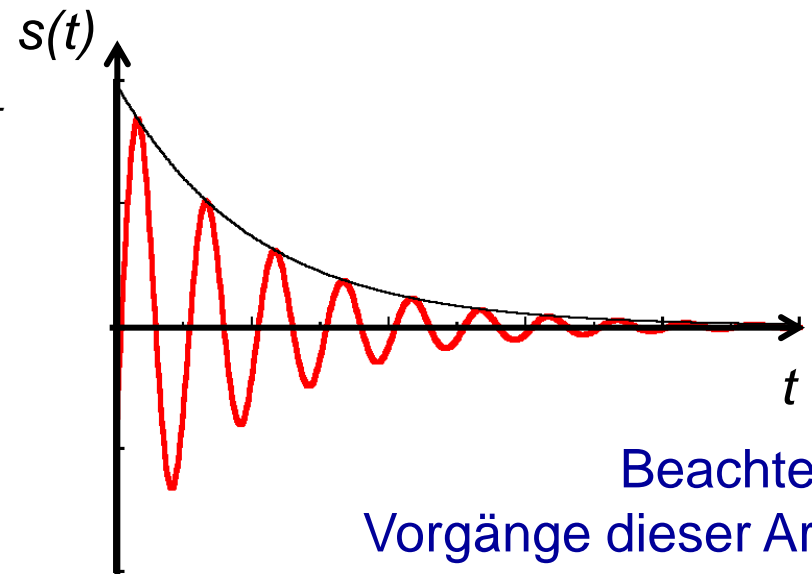
$$A(t) = A_0 e^{-\frac{\gamma}{2m}t} = A_0 e^{-\delta t} = A_0 e^{-t/\tau}$$

Abklingzeit $\tau = 1/\delta$

Logarithmisches Dekrement δT

Die Frequenz verschiebt sich:

$$\begin{aligned} \omega &= \sqrt{k/m - \gamma^2/4m^2} \\ &= \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \neq \omega_0 \end{aligned}$$



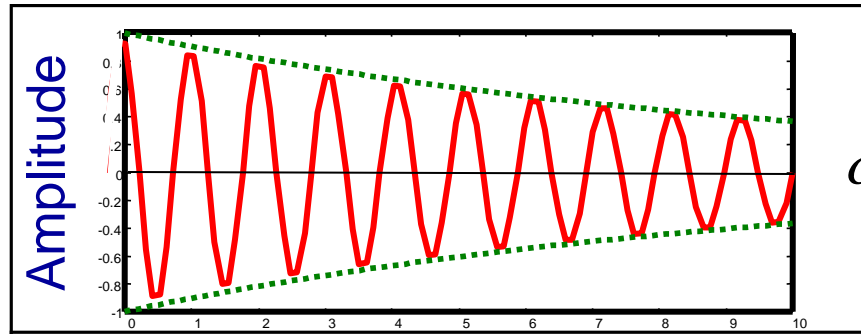
Beachte:
Vorgänge dieser Art
sind **keine** harmonische
Schwingungen im engeren Sinne!

Gedämpfte Schwingungen

Klassifizierung nach Dämpfungsstärke

1. Schwache Dämpfung:

Zeitkonstante groß im Vergleich zur Schwingungsdauer: $\tau > T_0$

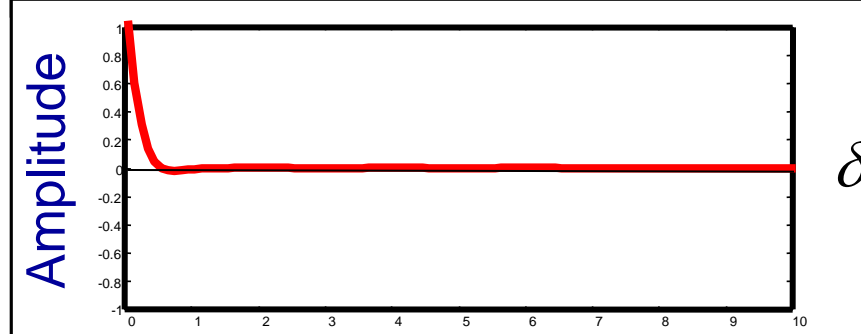


$$\delta^2 \leq \omega_0^2$$

2. kritische Dämpfung: aperiodischer Grenzfall:

$$\tau = T_0$$

(Anwendung: mech. Messanzeigen)

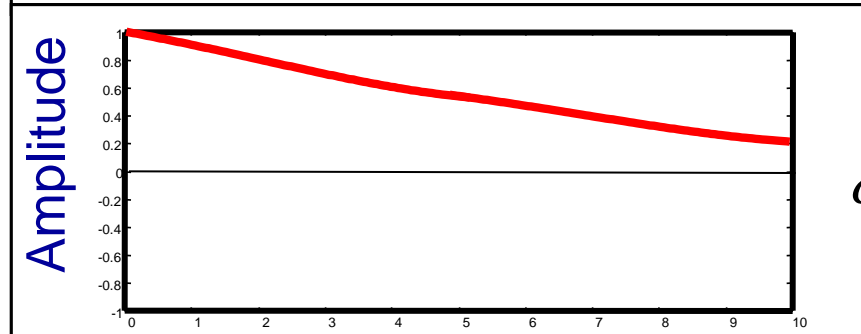


$$\delta^2 = \omega_0^2$$

3. starke (überkritische) Dämpfung:

überdämpfter Kriechfall:

$$\tau < T_0$$



$$\delta^2 \geq \omega_0^2$$

Zeit

Erzwungene Schwingung

$$m \frac{d^2 s}{dt^2} + \gamma \frac{ds}{dt} + m \omega_0^2 s = 0$$

freie Schwingung,
homog. Differentialgleichung

Reibung

Rückstellkraft

$$m \frac{d^2 s}{dt^2} + \gamma \frac{ds}{dt} + m \omega_0^2 s = F(t)$$

im Allg. inhomog. Dgl. mit
(äußerer) Kraft

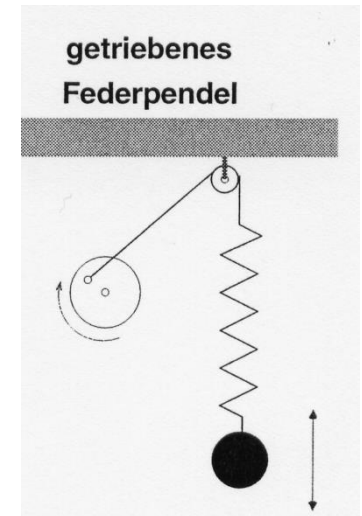
$$m \frac{d^2 s}{dt^2} + \gamma \frac{ds}{dt} + m \omega_0^2 s = F_0 \sin(\omega t)$$

Einfachster Fall:
periodisch treibende Kraft
 ω i.a. verschieden von ω_0

„Spezielle Lösung“
der inhomog. Dgl.

$$s(t) = A(\omega) \sin(\omega t - \varphi)$$

Beispiel:



Resonanz

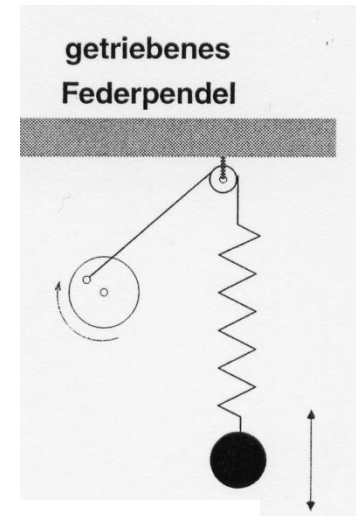
$$m \frac{d^2 s}{dt^2} + \gamma \frac{ds}{dt} + m \omega_0^2 s = F_0 \sin(\omega t)$$

Reibung

Rückstell-
kraft

periodisch
treibende Kraft

erzwungene
Schwingung

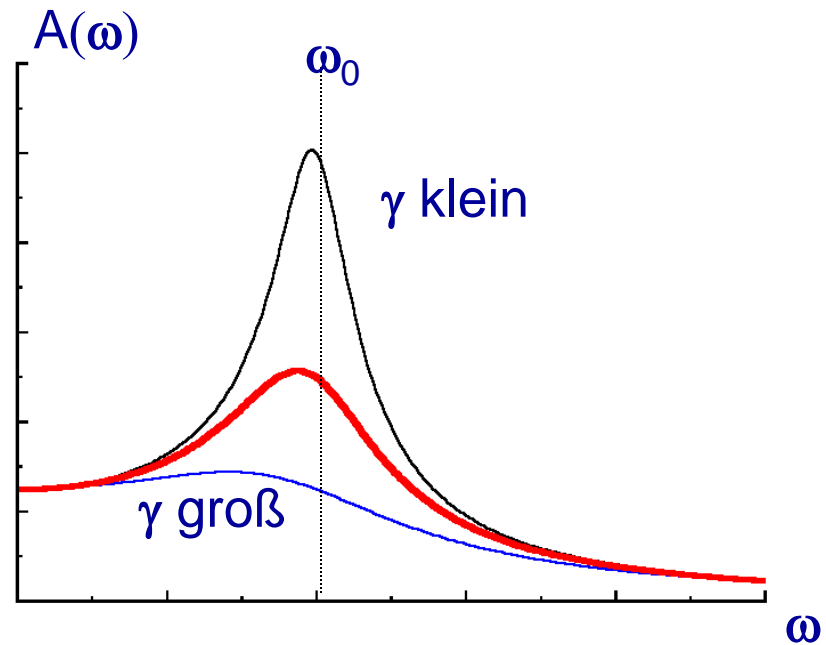


$$s(t) = A(\omega) \sin(\omega t - \varphi)$$

$$A(\omega) = \frac{F_0 / m}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + (2\delta\omega)^2}}$$

ω ist Frequenz der treibenden Kraft, daher erzwungene Schwingung.

Resonanz („Mit-Tönen“) heißt, dass bei der Anregung die „Eigenfrequenz“ getroffen wurde.



Amplitude und Phase

Lösung für erzwungene Schwingung

$$s(t) = A(\omega) \sin(\omega t - \varphi)$$

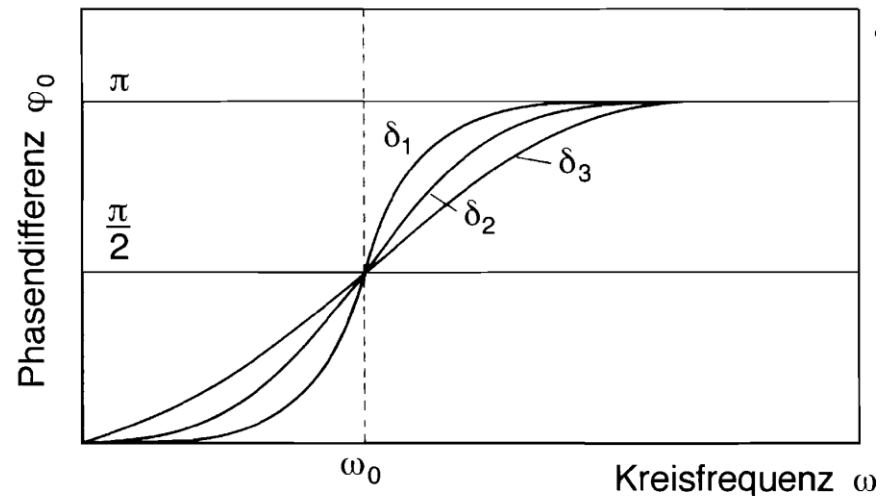
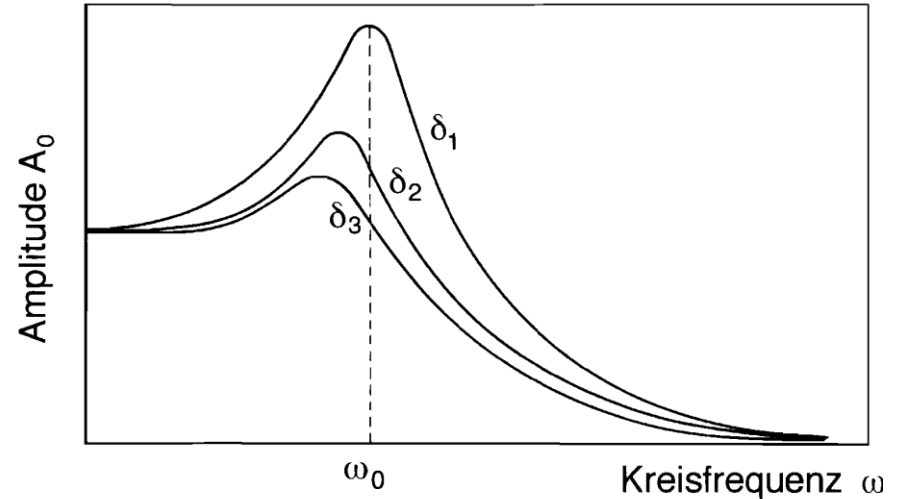
Amplitude

$$A(\omega) = \frac{F_0 / m}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + (2\delta\omega)^2}}$$

mit Resonanzfrequenz
(d.h. Maximum der Amplitude bei)

$$\omega_r = \sqrt{\omega_0^2 - 4\delta^2}$$

Phase $\varphi(\omega) = \arctan \frac{2\delta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}$



Resonanzkatastrophe

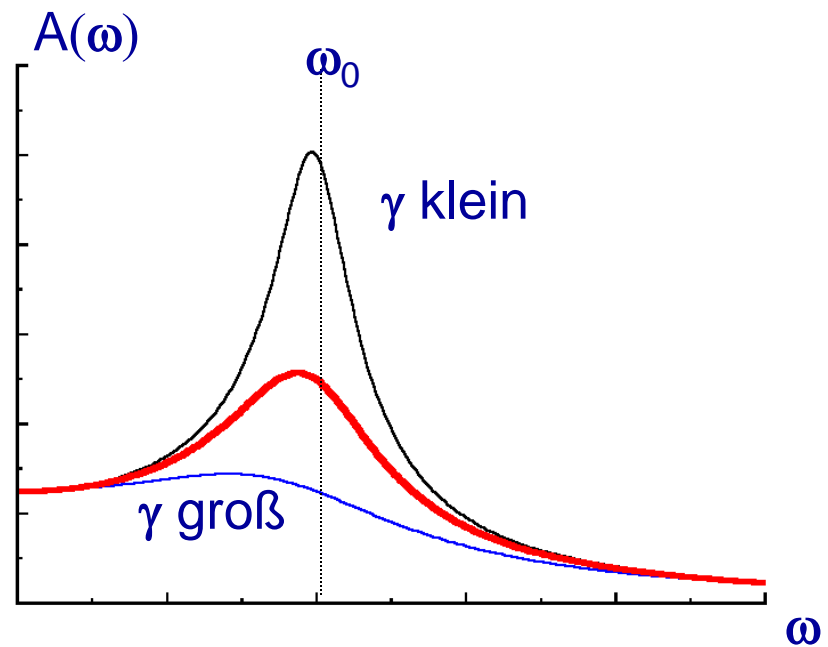


<http://www.youtube.com/watch?v=3mclp9QmCGs>

Tacoma-Brücke

(aber evtl. nicht wirklich eine „Resonanz“-Katastrophe sondern eher eine sog. „selbsterregte Schwingung“)

falls γ zu klein
⇒ Resonanzkatastrophe



Einschwing- und Abklingvorgänge

Lösungen der homog. Dgl. $\rightarrow m \frac{d^2 s}{dt^2} + \gamma \frac{ds}{dt} + m\omega_0^2 s = 0$

können zu den „speziellen
Lösungen“ der inhomog. Dgl.
addiert werden $\rightarrow m \frac{d^2 s}{dt^2} + \gamma \frac{ds}{dt} + m\omega_0^2 s = F(t)$

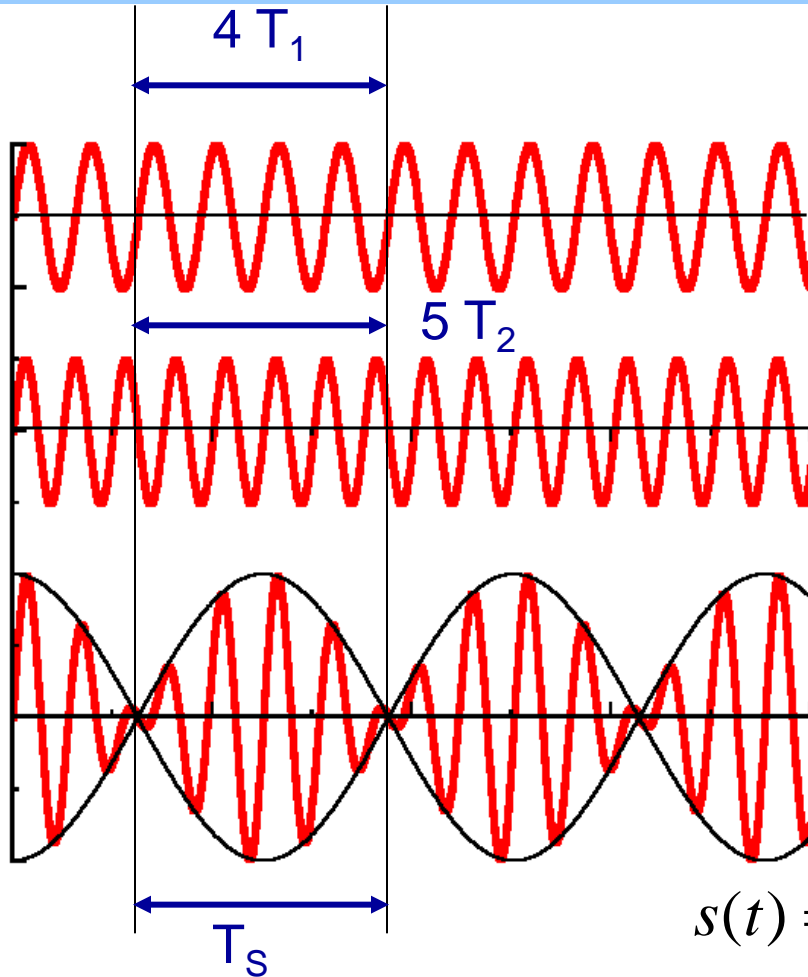
also auch der Dgl. mit
harmonischen Kräften. $\rightarrow m \frac{d^2 s}{dt^2} + \gamma \frac{ds}{dt} + m\omega_0^2 s = F_0 \sin(\omega t)$

Die Summe ist wiederum
eine Lösung der inhomog. Dgl !

Die Lösungen der homogenen Differentialgleichung klingen allerdings aufgrund des Dämpfungsterms mit der Zeit ab, während die speziellen Lösungen der inhomog. Dgl. eine konstante Amplitude beitragen.

Damit „gewinnt“ auf die Dauer die spezielle (stationäre) Lösung. Im Zusammenhang mit dem An- bzw. Ausschalten von treibenden Kräften spricht man von „Einschwing- und Abklingvorgängen“.

Schwebung



Überlagerung
zweier Schwingungen

Einfachster Fall:

- gleiche Amplitude
- verschiedene Frequenzen

$$s_1(t) = s_0 \cos(\omega_1 t)$$

$$s_2(t) = s_0 \cos(\omega_2 t)$$

Oft (vor allem bei
kleinen Amplituden)
gilt das Superpositionsprinzip

$$s(t) = s_0 \cos(\omega_1 t) + s_0 \cos(\omega_2 t)$$

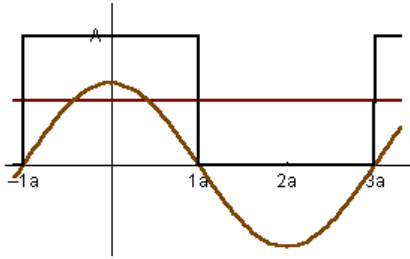
$$= 2s_0 \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t\right) \cos\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t\right)$$

trigonometrische Additionstheoreme

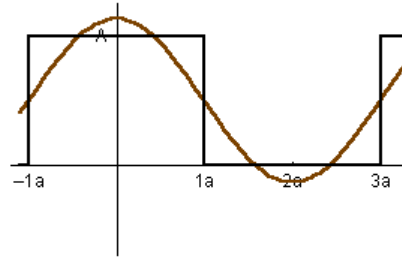
„Differenzfrequenz“

„Summenfrequenz“

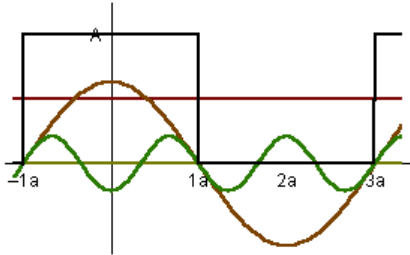
Einzelne Summanden bis zur Ordnung 1



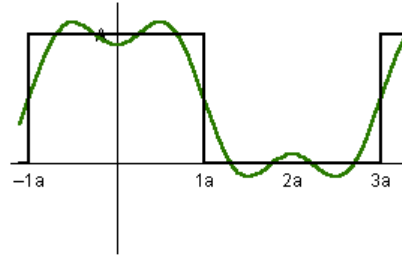
Überlagerung



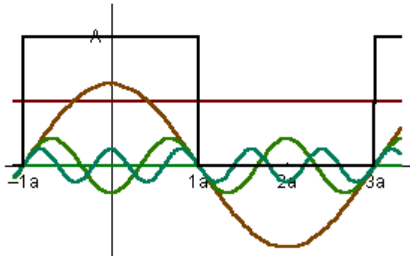
Einzelne Summanden bis zur Ordnung 3



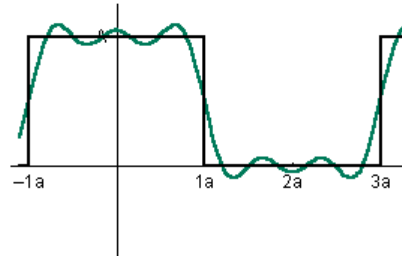
Überlagerung



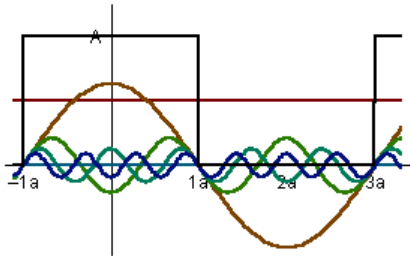
Einzelne Summanden bis zur Ordnung 5



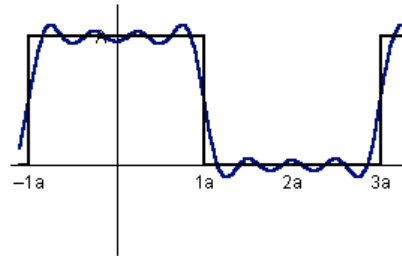
Überlagerung



Einzelne Summanden bis zur Ordnung 7



Überlagerung



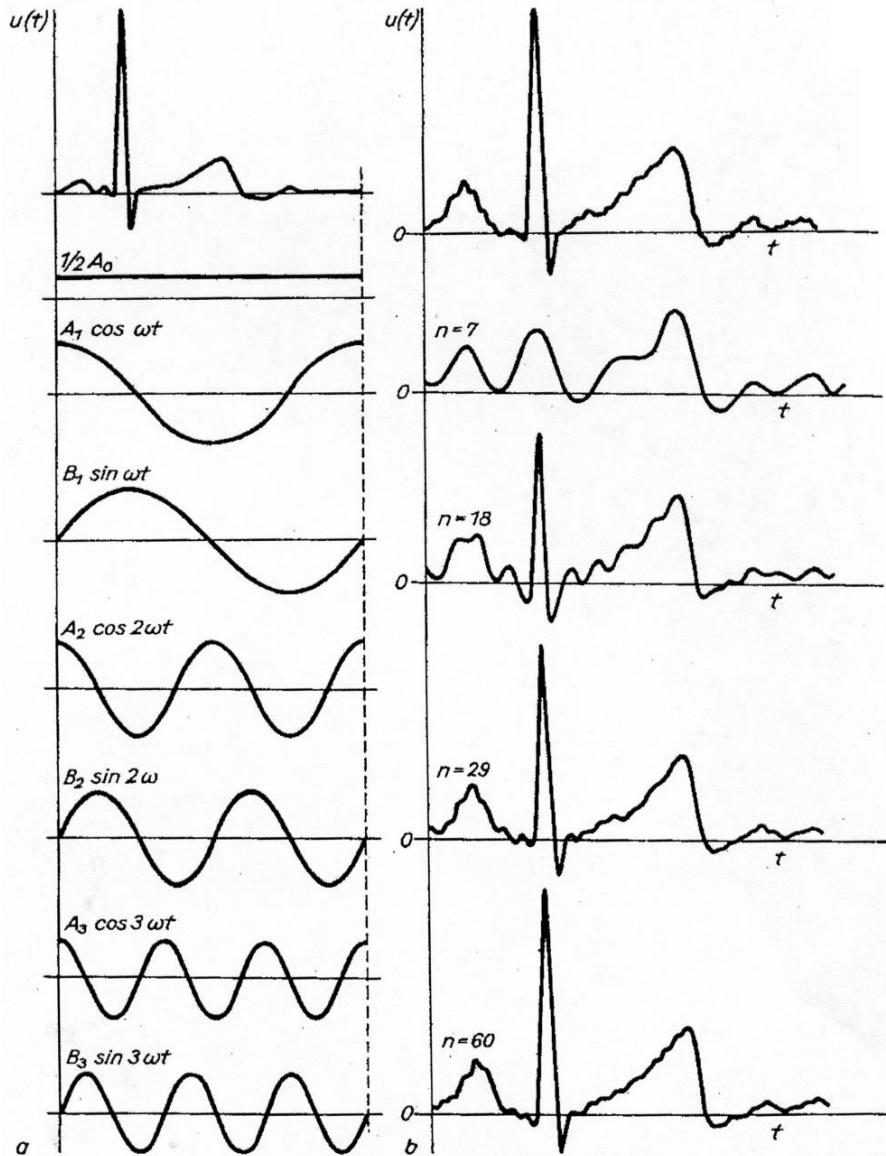
Fouriersches Theorem:
 Jede beliebige periodische Funktion $s(t)$ lässt sich in eine Summe von Sinus- und Cosinus-Funktionen zerlegen:

$$s(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)$$



1768-1830

Fourier-Zerlegung EKG



a Original-EKG und die ersten FOURIER-Komponenten; b Annäherung eines EKG durch die Summenkurven der ersten 7, 18, 29 und 60 FOURIER-Komponenten. Etwa 30 FOURIER-Komponenten genügen, um das EKG im wesentlichen darzustellen. Bei 100 Komponenten gehen die Abweichungen in der Strichstärke unter (nach KNEPPO)

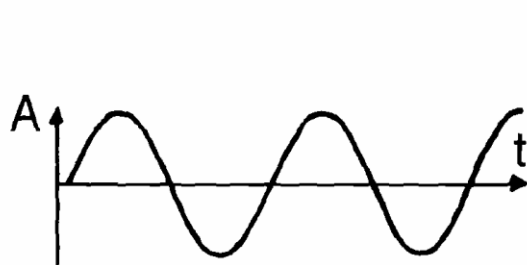
Fouriersches Theorem:
 Jede beliebige periodische Funktion $s(t)$ lässt sich in eine Summe von Sinus- und Cosinus-Funktionen zerlegen:

$$s(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)$$

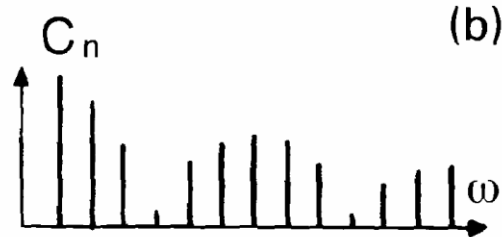
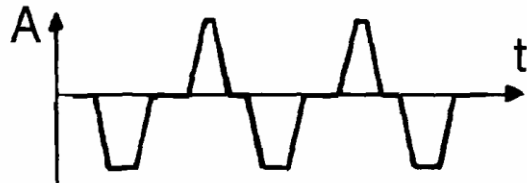


1768-1830

Ton, Klang, Geräusch, Knall



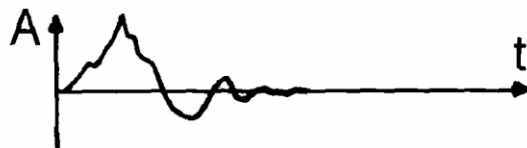
Ton:
harmonische Schwingung
Linienspektrum



Klang:
anharmonische Schwingung
Grundton+Harmonische
Linienspektrum



Geräusch:
Überlagerung von vielen
Wellen aus großem Frequenz-
bereich
kontinuierliches Spektrum



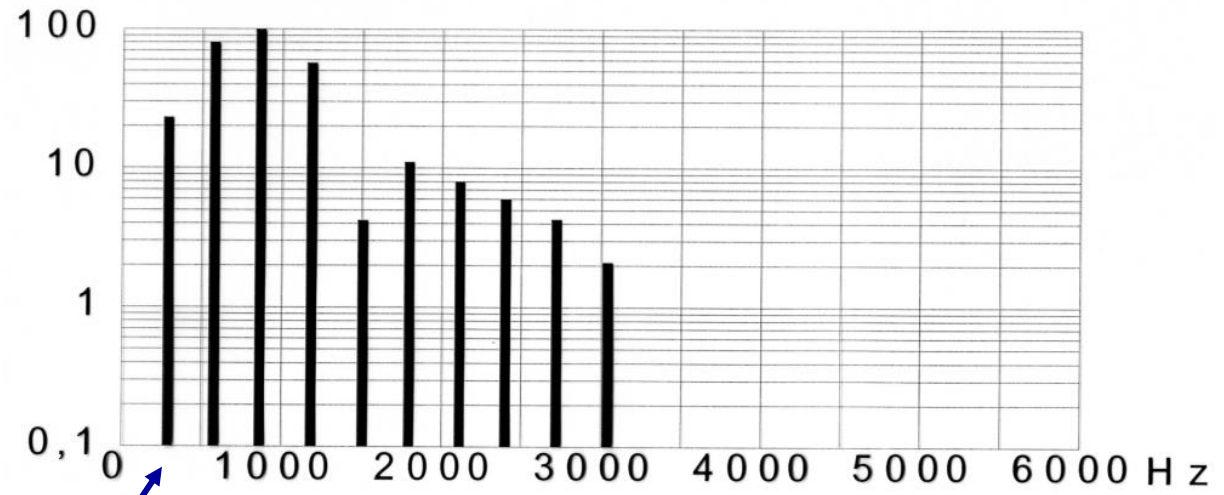
Knall:
zeitlich gedämpftes Geräusch
kontinuierliches Spektrum

Signal in Zeitdomäne
(Amplitudenfunktion)

Signal in Frequenzdomäne
(Spektrum)

Schallwahrnehmung

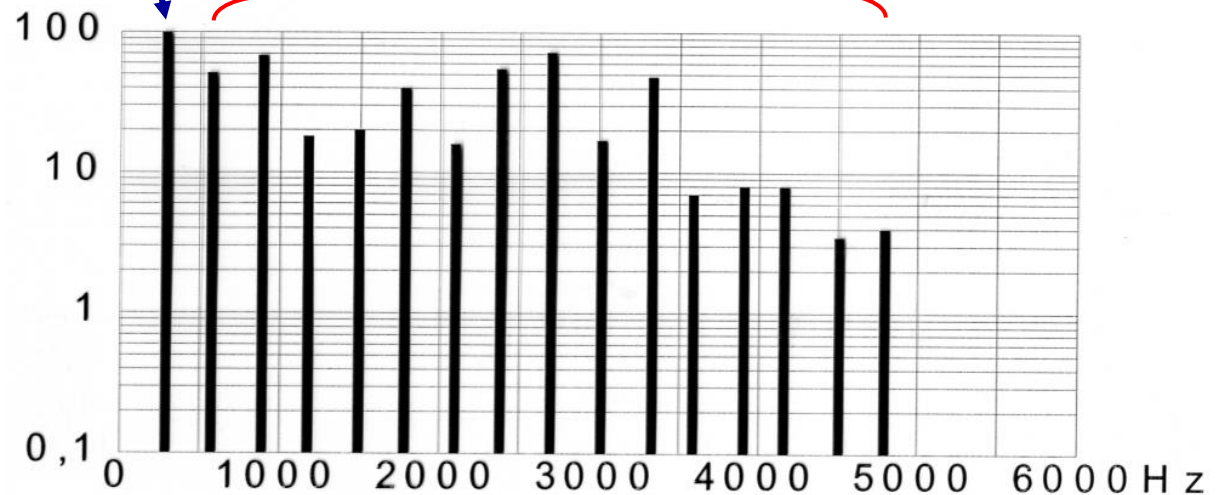
Geige



gespielter Grundton

Obertöne

Metall. Flöte



Kurzer Ausflug in die Musik

Frequenzverhältnis von Oktave $\frac{f_2}{f_1} = \frac{2}{1} = 2,000000$

(reine) Quinte $f_2 / f_1 = 3/2 = 1,500000$

(reine) Quarte $f_2 / f_1 = 4/3 = 1,333333$

Die Oktave besteht aus

aus 5 Ganz- und 2 Halbtonschritten, also aus 12 Halbtonschritten

Bei Gleichbehandlung (gleichstufige temperierte, „gleichtemperierte“, Stimmung) ergibt sich für jeden Halbtonschritt

ein Intervall von $f_2 / f_1 = \sqrt[12]{2} = 2^{1/12} \approx 1,059463$

also für die Oktave $f_2 / f_1 = 2^{12/12} = 2^1 = 2,000000$

Quinte $f_2 / f_1 = 2^{7/12} \approx 1,498307$

Quarte $f_2 / f_1 = 2^{5/12} \approx 1,334840$

6.2 aus gkg ... pharm. Prüf.

6.2 Wellen

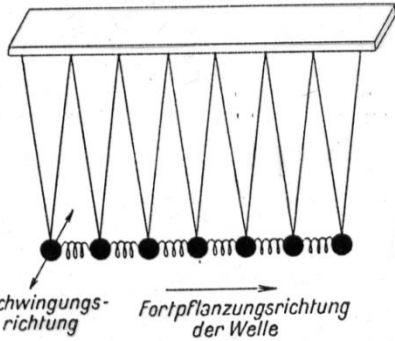
6.2.1 Ausbreitung: Zusammenhang von Ausbreitungsgeschwindigkeit, Frequenz und Wellenlänge; Abhängigkeit dieser Größen vom Medium; Definition der Wellenzahl; Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen im Vakuum (s.a. 5.1.2)

6.2.2 Darstellung: Raum- und Zeitdarstellung von sinusförmigen Wellen

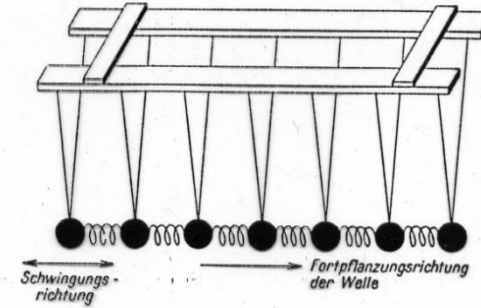
6.2.3 Schwingungsformen: Transversale und longitudinale Wellen (schematisch); Beispiele (elektromagnetische Wellen, Schallwellen); Lichtpolarisation (s.a. 5.4.1)

6.2.4 Interferenz: Huygens'sches Prinzip; Überlagerung zweier Wellenzüge, Voraussetzung für vollständige Auslöschung; Grundzüge der Interferenz am optischen Strichgitter (s.a. 5.3.5)

Wellentypen



Transversalwelle



Longitudinalwelle

Gekoppelte Pendel zur Erzeugung einer transversalen Welle

Gekoppelte Pendel zur Erzeugung einer longitudinalen Welle

Periodendauer

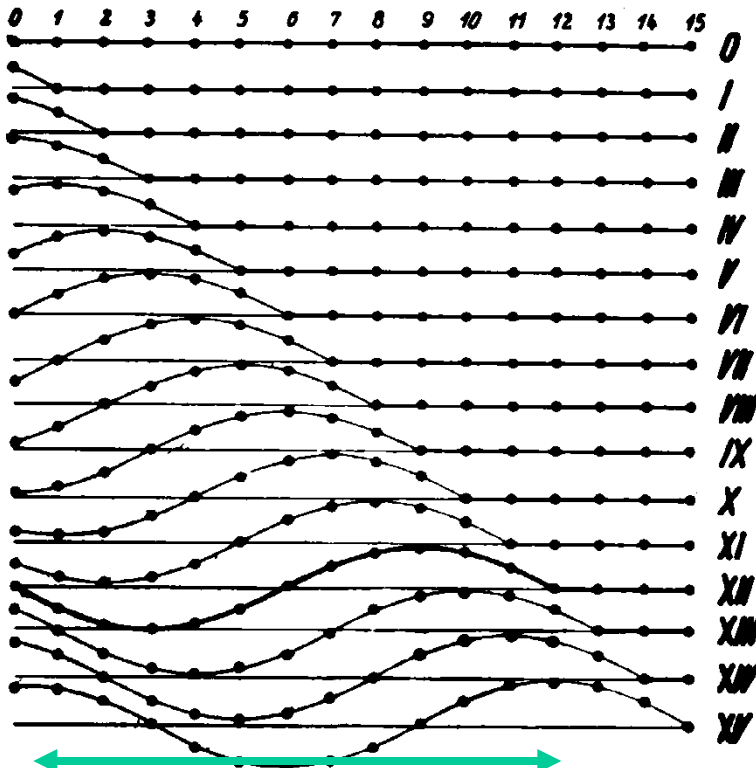


Abb. 420. Bildung einer fortschreitenden T

Wellenlänge

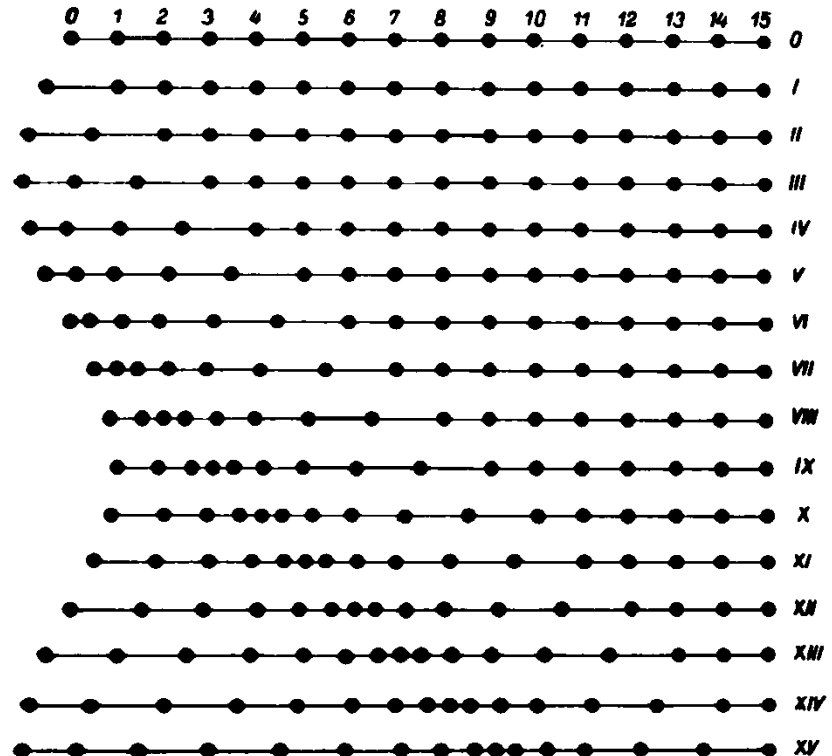


Abb. 423. Bildung einer fortschreitenden Longitudinalwelle

Wellengeschwindigkeit

$$u(x, t) = u_0 \sin(kx - \omega t)$$

math. Beschreibung einer
(nach rechts laufenden) Welle

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{f} \quad \text{Periodendauer}$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} \quad \text{Wellenlänge}$$

Periodendauer

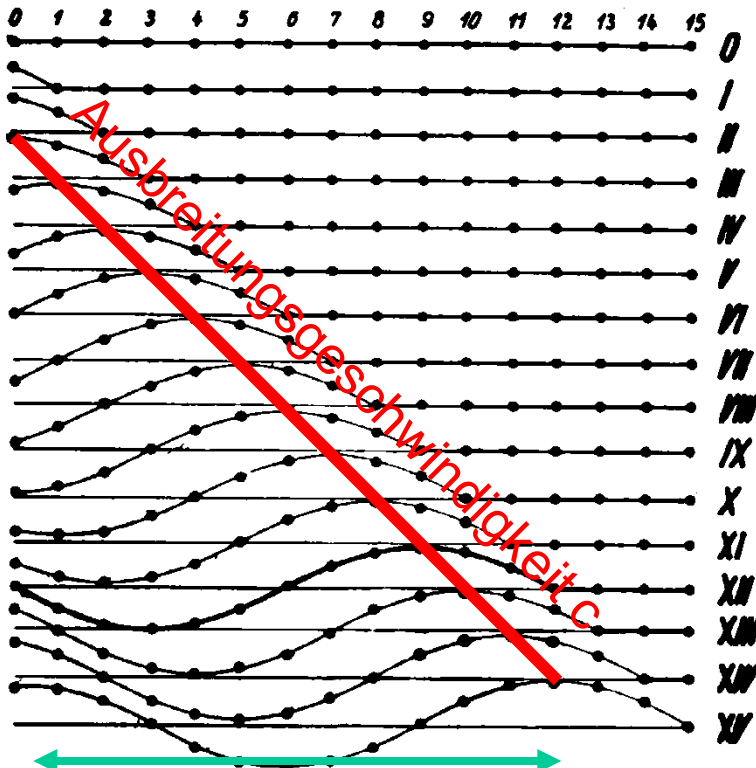


Abb. 420. Bildung einer fortschreitenden W

Wellenlänge

$$c = \frac{\lambda}{T} = f \lambda = \frac{\omega}{k}$$

Ausbreitungs-
geschwindigkeit
der Welle

Allgemein:

$$c_{\text{Phase}} = \frac{\omega}{k}$$

$$c_{\text{Gruppe}} = \frac{d\omega}{dk}$$

Dispersion

Wellengeschwindigkeit

$$u(x, t) = u_0 \sin(kx - \omega t)$$

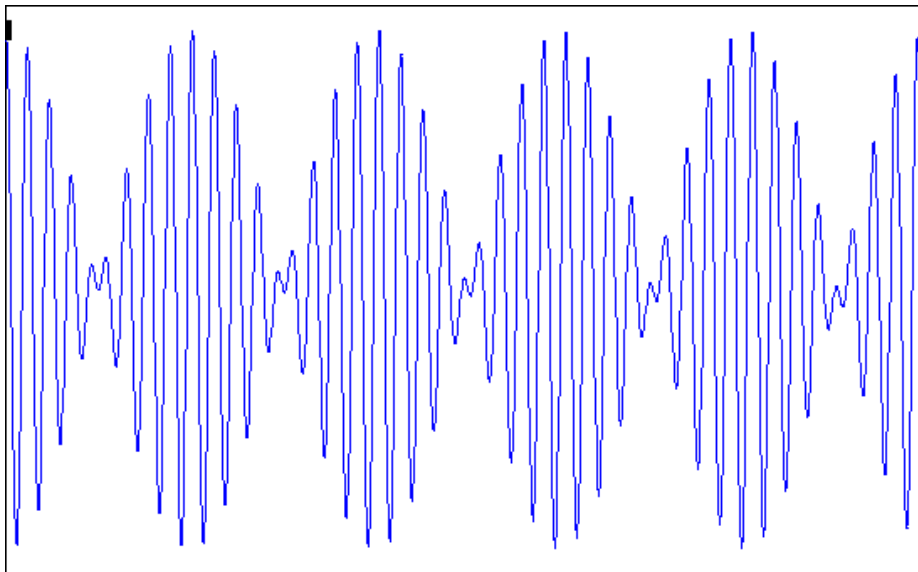
math. Beschreibung einer
(nach rechts laufenden) Welle

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{f} \quad \text{Periodendauer}$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} \quad \text{Wellenlänge}$$

$$c = \frac{\lambda}{T} = f \lambda = \frac{\omega}{k}$$

Ausbreitungs-
geschwindigkeit
der Welle

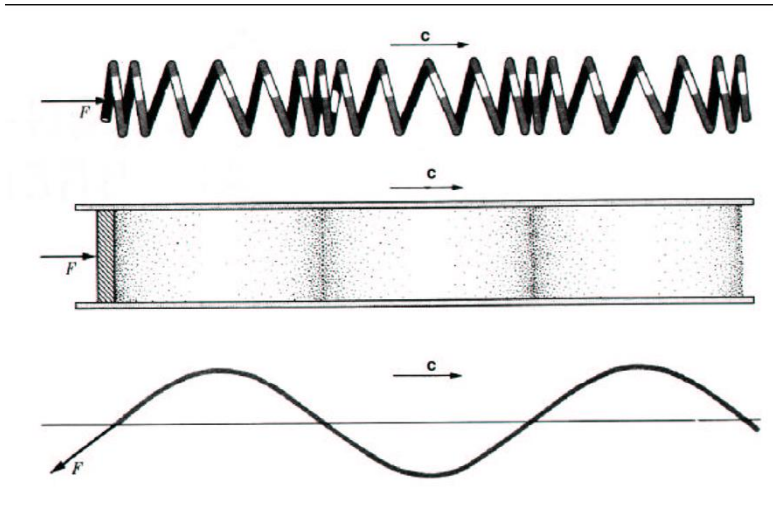


Allgemein:

$$c_{Phase} = \frac{\omega}{k}$$

$$c_{Gruppe} = \frac{d\omega}{dk}$$

Wellen-Beispiele



Feder

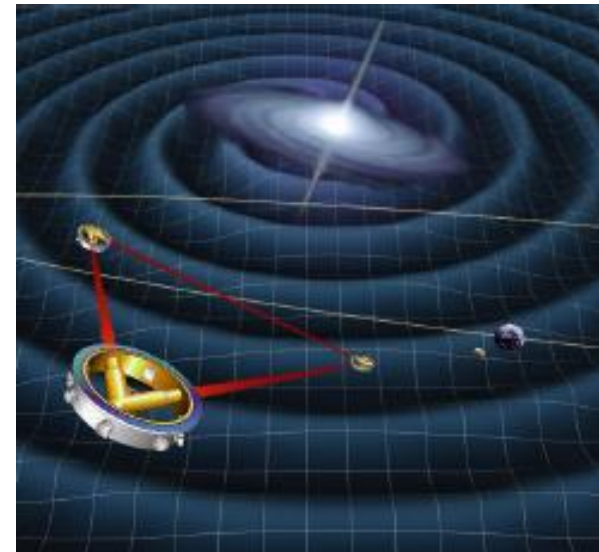
Gas im
Rohr

Seil

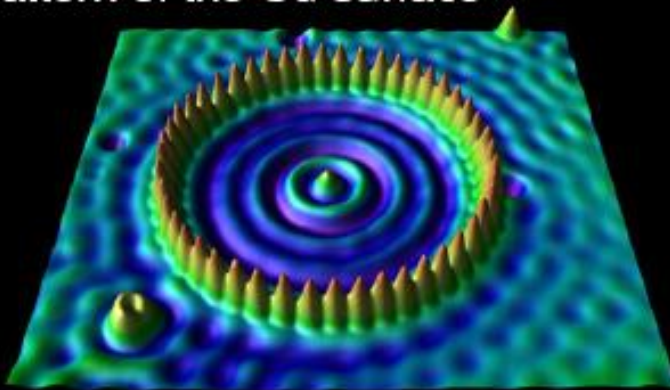
Ozeanwellen



Gravitationswellen



48 Fe atoms with standing-wave
pattern of the Cu surface

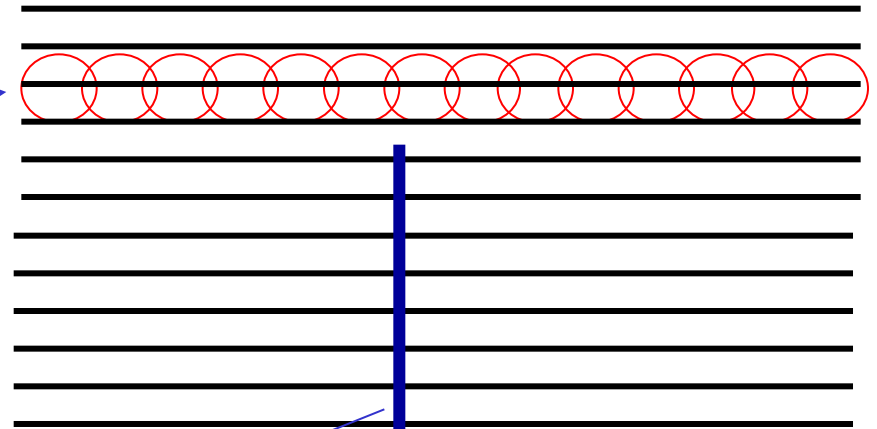


STM-Image [IBM]

Wellenfronten, Huygens, Reflexion, Brechung

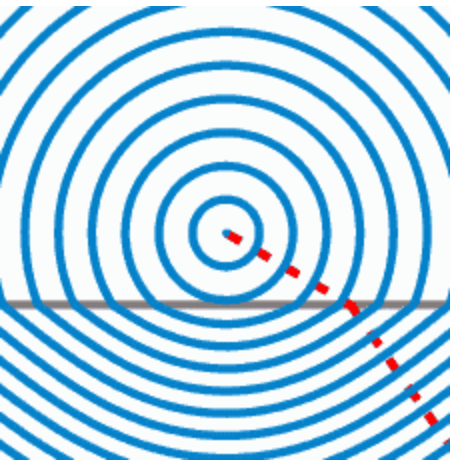
Beispiel: Ebene Welle

Huygens-Fresnelsches Prinzip:
Der Schwingungszustand eines Punktes im Wellenfeld ist gegeben durch die Überlagerung sämtlicher Elementarwellen in diesem Punkt

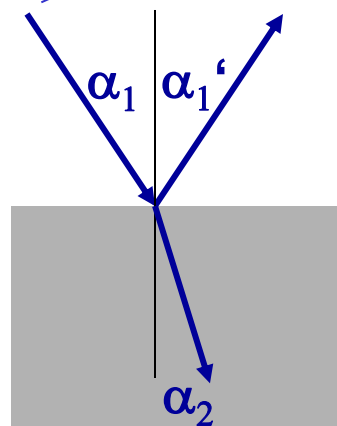


Reflexion: $\alpha_1 = \alpha_1'$

Brechung: $\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{c_1}{c_2}$



**Kugel-
(bzw.
Kreis-)
Wellen-
fronten**



Medium 1
mit c_1

Medium 2
mit $c_2 < c_1$

Ausbreitungsrichtung
(senkrecht auf Wellenfronten)

Erklärung (Brechung):
Frequenz konstant
aber c kleiner
daher λ kleiner
daher Winkel
zw. den Wellenfronten
vor- und nachher

Interferenz

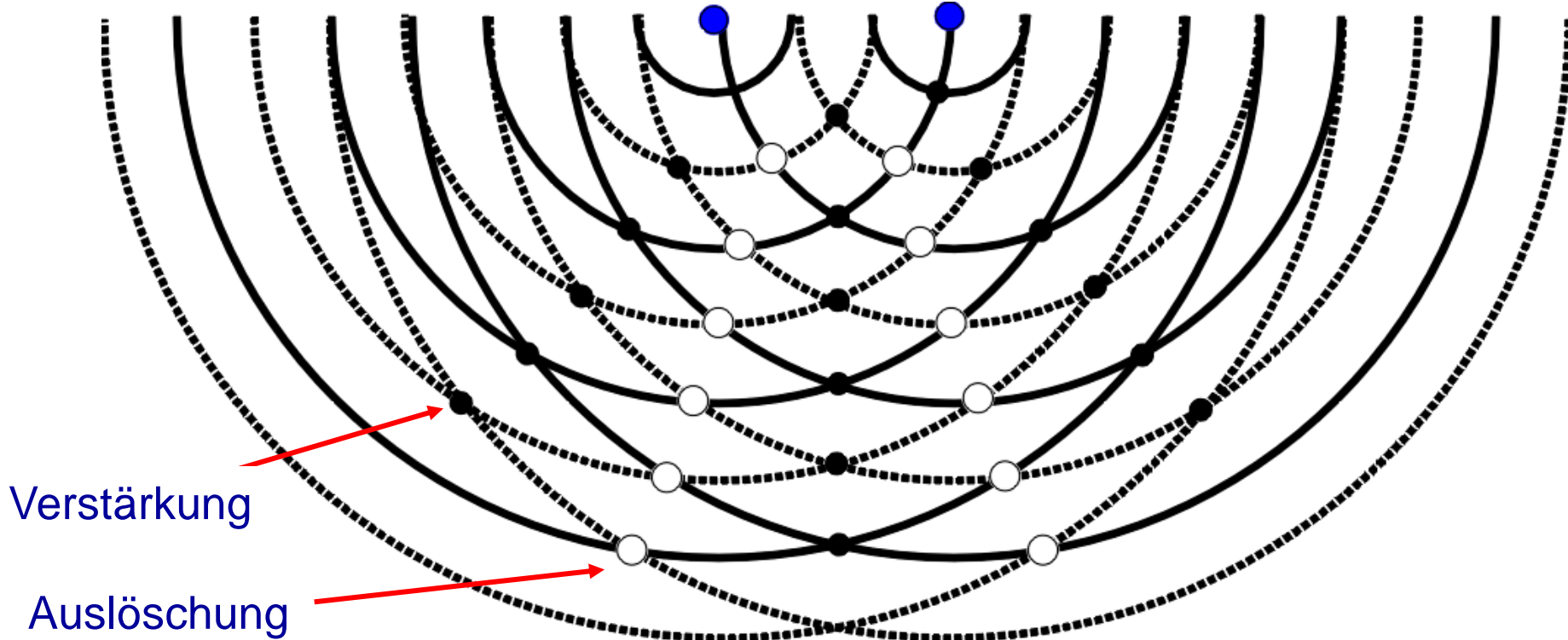
Räumliche Überlagerung von Wellen (wie z.B. auch bei Reflexion in der Wellenwanne (letzte Folie))

Beispiel: Interferenz von zwei Kugelwellen:

Wellenberge volle Linien

Wellentäler gepunktete Linien

Phasenversatz von 180°

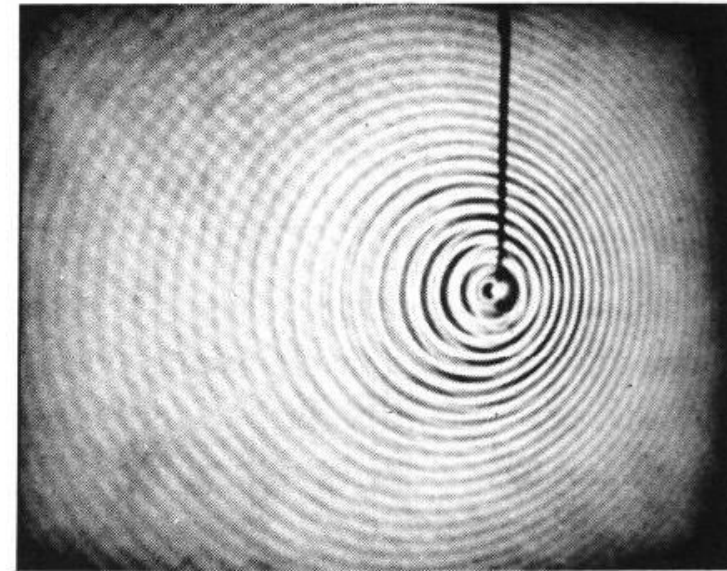
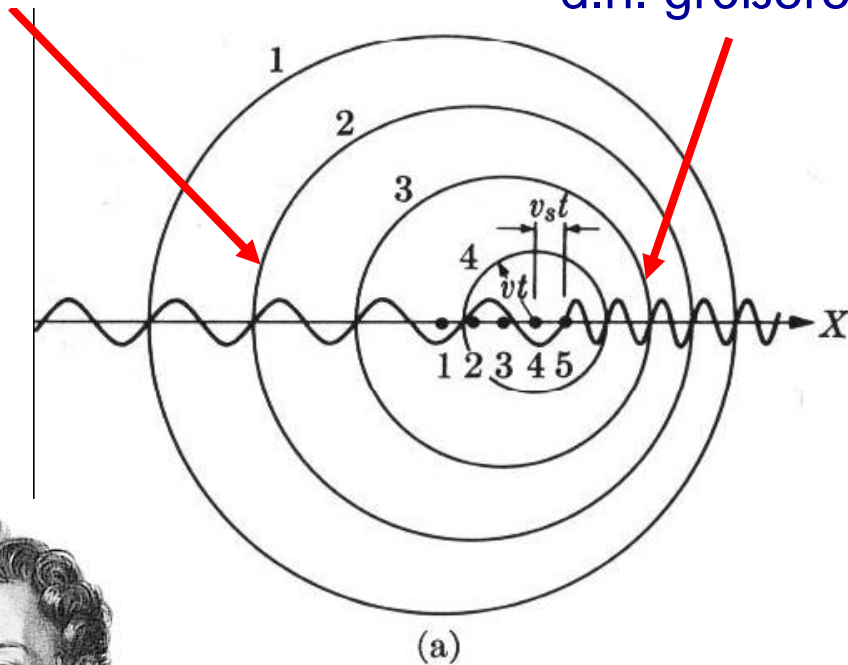


Doppler-Effekt

Betrachte eine im schwingungsfähigen Medium bewegte Quelle:

Hinter der Quelle:
größere Wellenlänge
d.h. kleinere Frequenz

Vor der Quelle:
kleinere Wellenlänge
d.h. größere Frequenz



Demonstration mit Wasserwellen

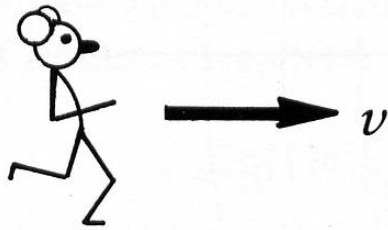


Christian Doppler
1803-1853

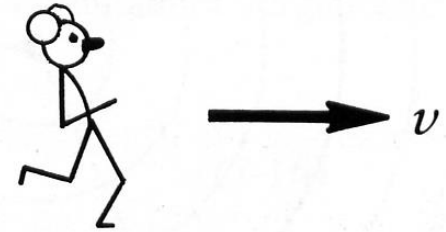
Weitere Stichworte: Überschallgeschwindigkeit
Machscher Kegel

Doppler-Effekt: Bewegte Quelle bzw. Empfänger

Bewegter Empfänger



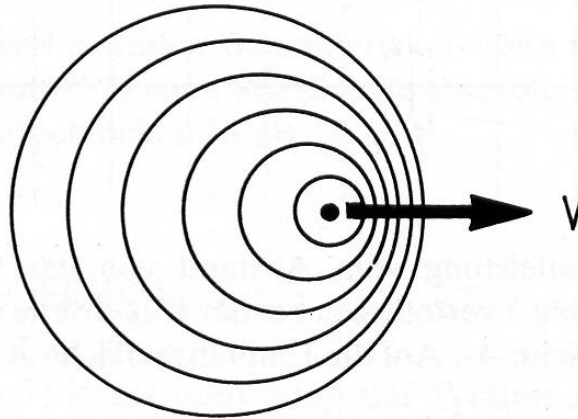
Im Medium ruhende Quelle
Bewegte Beobachter



$$v'' = v_0 \left(1 + \frac{v}{c}\right)$$

$$v' = v_0 \left(1 - \frac{v}{c}\right)$$

Bewegte Quelle



Im Medium bewegte Quelle
Ruhende Beobachter



$$v' = v_0 \left(1 + \frac{v}{c}\right)^{-1}$$

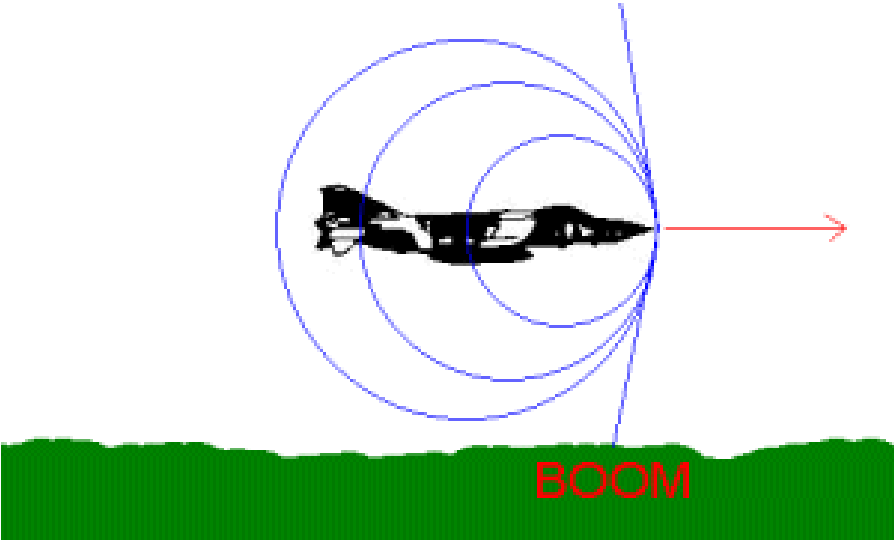
$$v'' = v_0 \left(1 - \frac{v}{c}\right)^{-1}$$

$$\approx v_0 \left(1 - \frac{v}{c}\right)$$

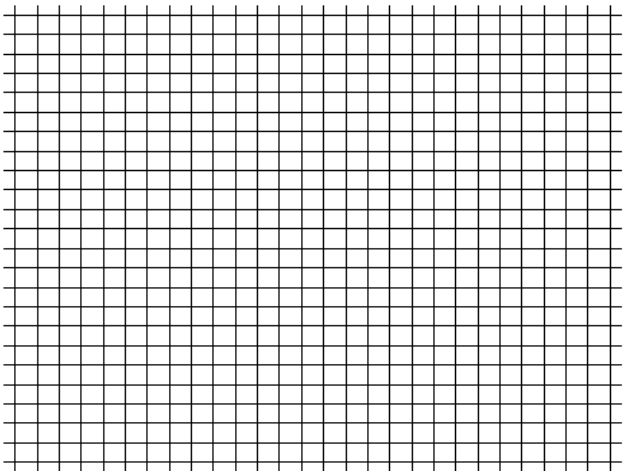
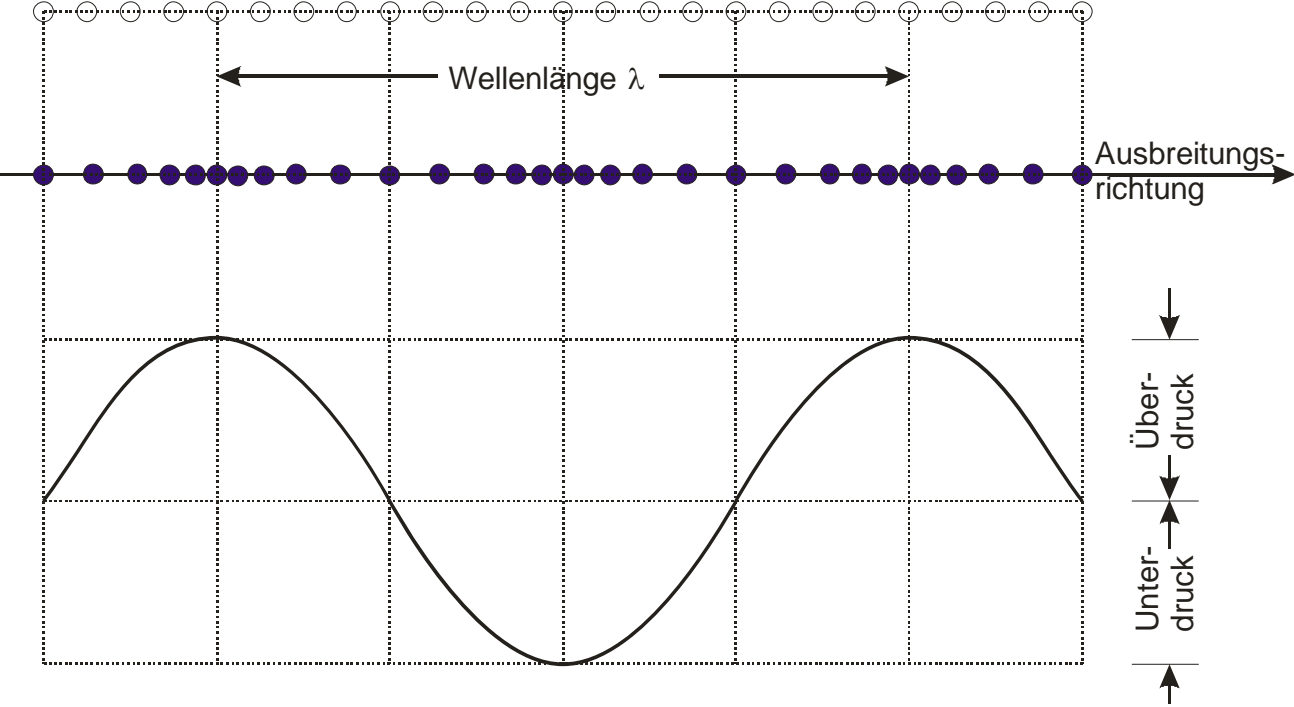
$$\approx v_0 \left(1 + \frac{v}{c}\right)$$

Näherungen

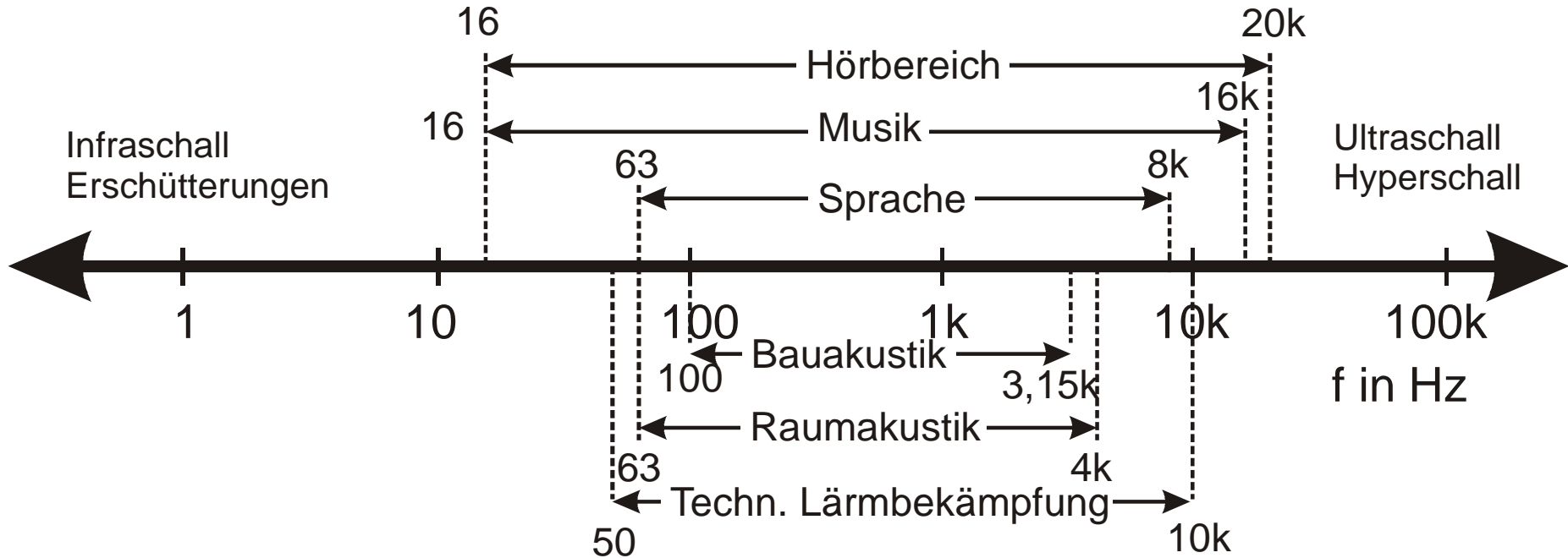
Mach-Kegel



Akustik - Schallwelle



Akustik - Frequenzbereiche



$$I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

Intensität des gerade noch hörbaren 1kHz Tones

$$p_0 = 20 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}$$

Schalldruck dazu

Akustik

Schallwellen: in Gasen Longitudinalwellen (Kompression und Verdünnung)

$$c = \sqrt{\kappa \frac{RT}{M_{mol}}}$$

κ : Adiabatenkoeffizient = 7/5 für O₂ und N₂

R : Gaskonstante = 8.31 J/(mol K)

T : Gastemperatur (typ. 300 K)

M_{mol} : molare Masse = 29 g/mol für Luft

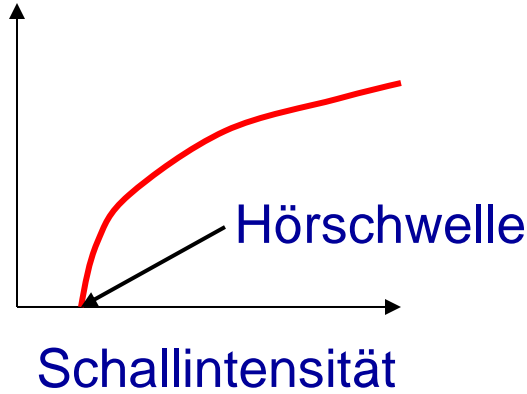
$c = 347$ m/s für Luft

Festkörper (20 °C)	c in m/s	Flüssigkeiten (20 °C)	c in m/s	Gase (0 °C)	c in m/s
Aluminium	6260	Wasser	1483	Helium	965
Eisen	5860	Aceton	1192	CO ₂	259
Gummi	1040	Glycerin	1923	Luft	331

**Akustische Wellen zeigen keine Dispersion,
d.h. keine Frequenzabhängigkeit der Phasengeschwindigkeit.**

Audiogramm

Hörwahrnehmung



Weber-Fechnersches Gesetz:

Die Empfindungsstärke ist proportional dem Logarithmus der Reizstärke

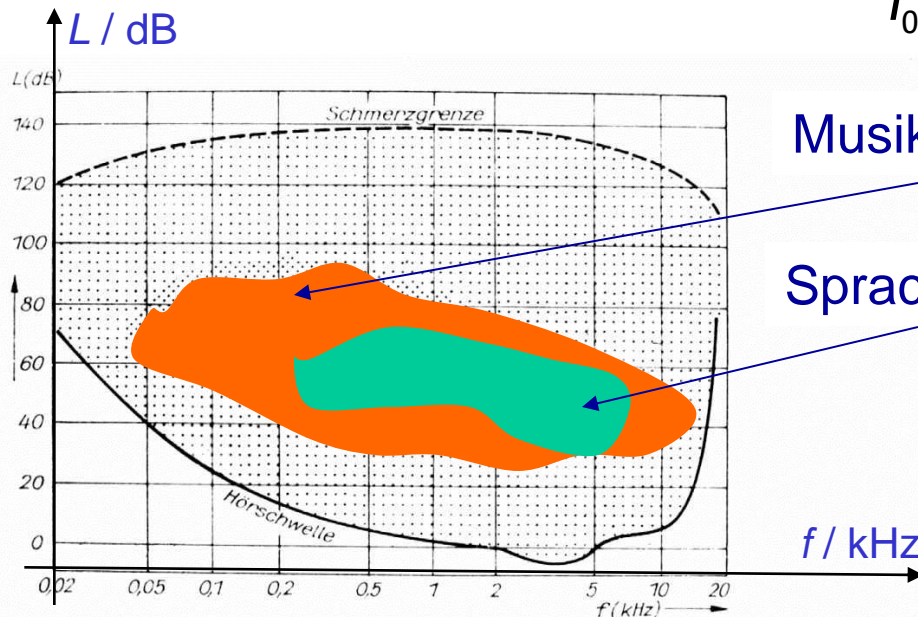
Der **Schallpegel** L steigt logarithmisch mit der Schallintensität I (bzw. dem Schalldruck p)

$$L = 10 \lg \frac{I}{I_0} = 20 \lg \frac{p}{p_0}$$

Einheit dB (Dezibel)

$$I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

$$p_0 = 20 \text{ } \mu\text{Pa}$$



Musikbereich

Sprachbereich

Lautstärkepegel L_N s ist gleich Schallpegel eines 1-kHz-Tones, der als ebenso laut empfunden wird.

Einheit: phon oder dB(A)

Hörfläche des Menschen. Das innere, dicht punktierte Gebiet ist der Bereich der Sprache, das größere, weniger dicht punktierte Gebiet, der Bereich der Musik (nach ZWICKER und FELDKELLER)

Hörbereich: 16 Hz – 20.000 Hz

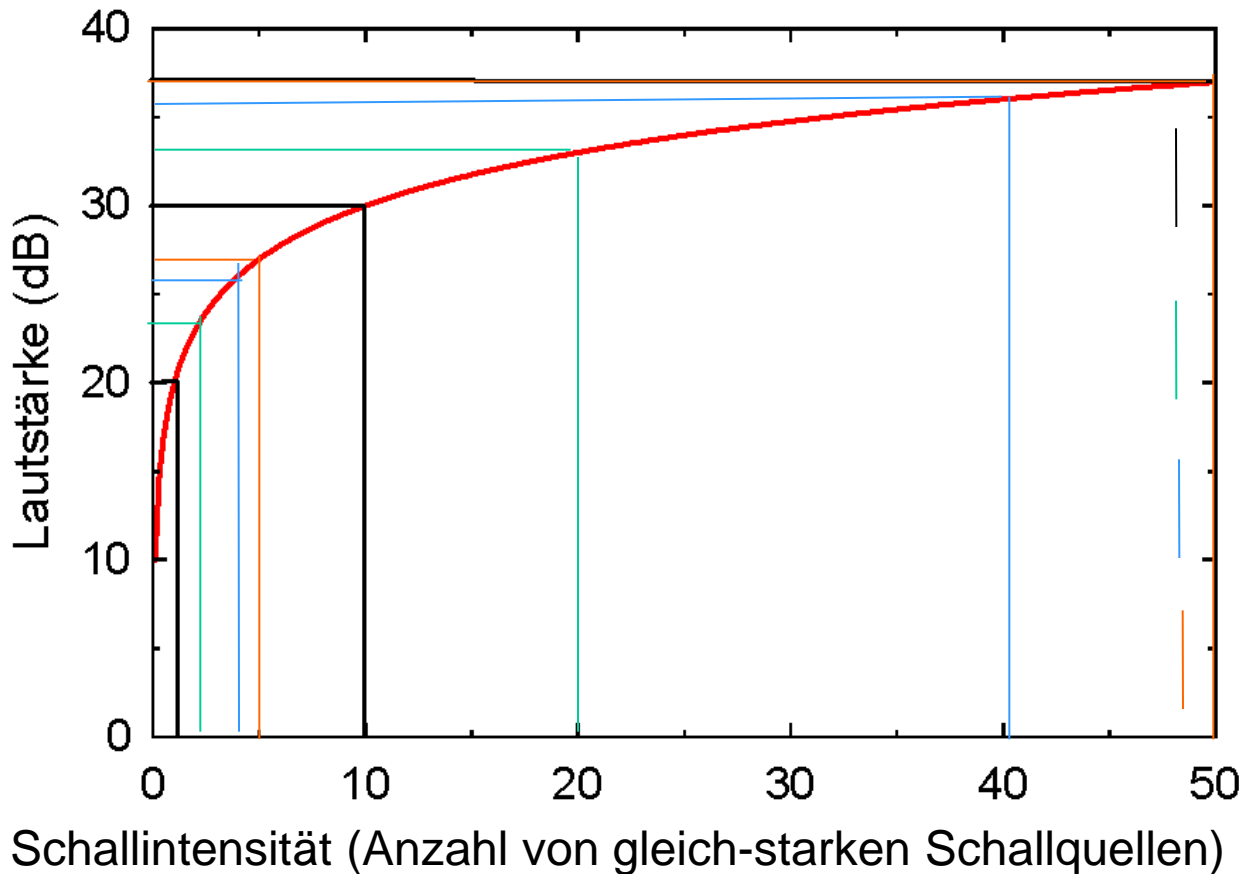
Weber-Fechner

Weber-Fechnersches Gesetz:

Die Empfindungsstärke ist proportional dem Logarithmus der Reizstärke

$$L = 10 \lg \frac{I}{I_0} = 20 \lg \frac{p}{p_0}$$

Intensität $I \propto p^2$ Amplitude



$$\frac{I}{I_0} = 10 \rightarrow \Delta L = 10$$

$$\frac{I}{I_0} = \frac{2}{1} = \frac{20}{10} \rightarrow \Delta L \approx 3$$

$$\frac{I}{I_0} = \frac{4}{1} = \frac{40}{10} \rightarrow \Delta L \approx 6$$

$$\frac{I}{I_0} = \frac{5}{1} = \frac{50}{10} \rightarrow \Delta L \approx 7$$

$$\frac{I}{I_0} = \frac{100}{1} \rightarrow \Delta L = 20$$

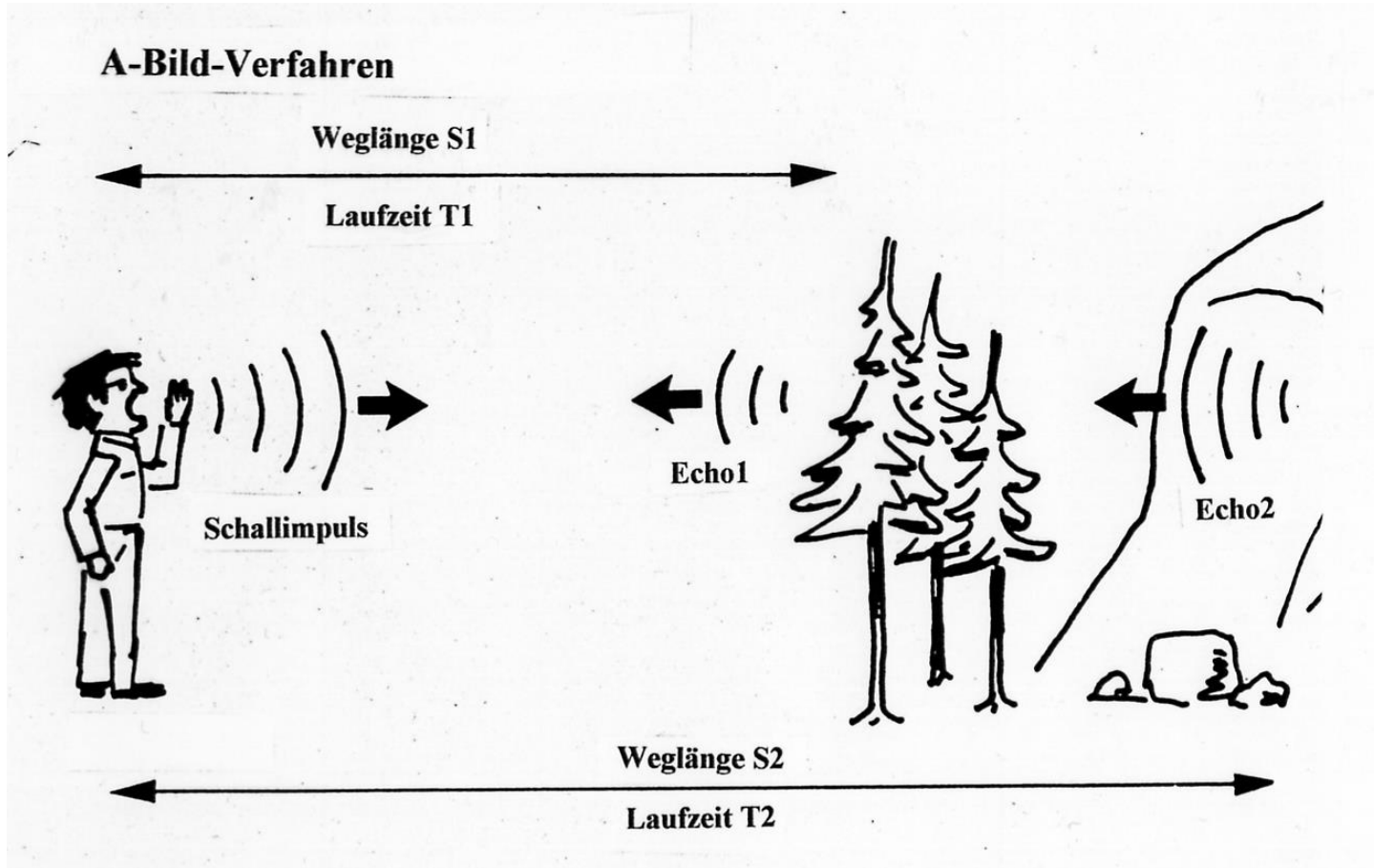
Ultraschall

Frequenz über dem hörbaren Bereich, $f = 20 \text{ kHz}$ bis 1 GHz

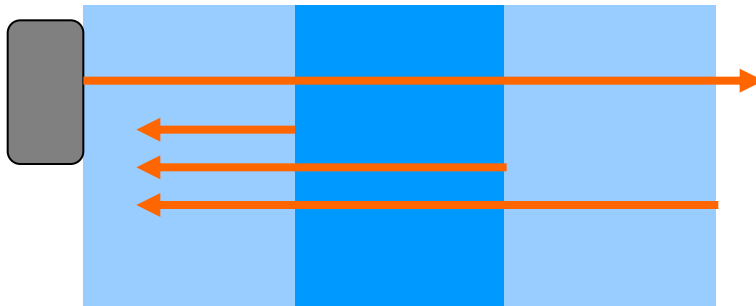
Folgende Welleneigenschaften werden ausgenutzt:

- stoffspezifisches Absorptionsvermögen
 - Intensitätsänderung
- stoffspezifische Ausbreitungsgeschwindigkeit
 - stoffspezifische Laufzeit der Impulse
- Änderung des Wellenwiderstands
 - Reflexion
 - Laufzeit des reflektierten Signals entspricht der Tiefe der Grenzschicht
- Dopplereffekt
 - Bestimmung von Strömungsgeschwindigkeiten

Echolot



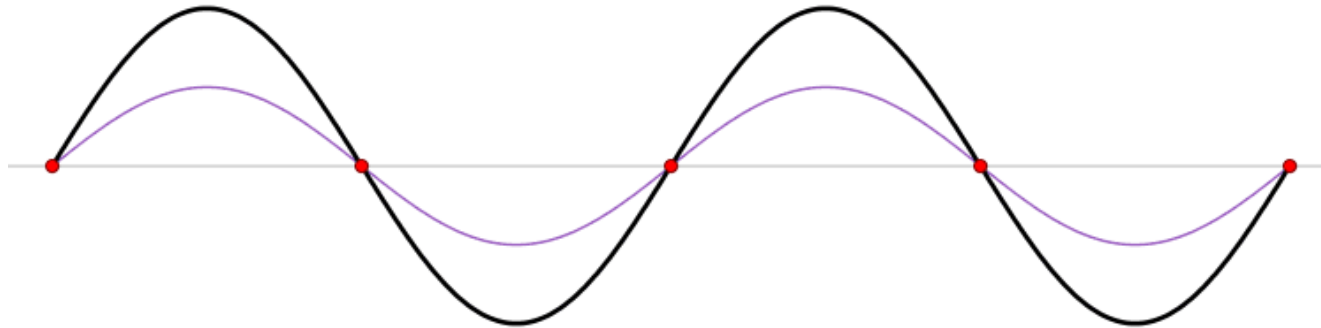
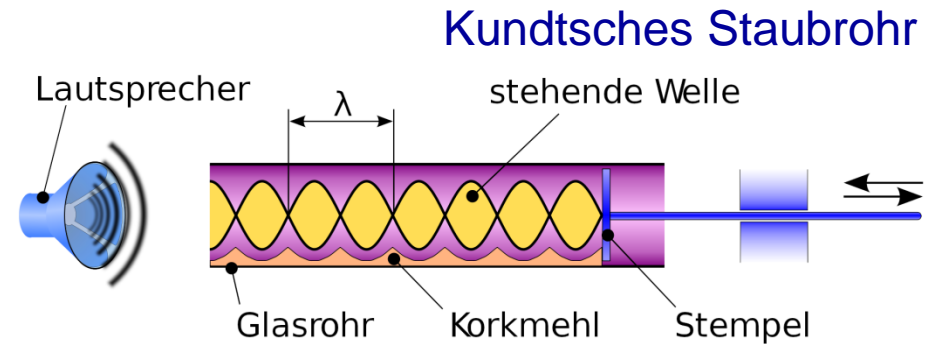
Schallkopf



Weitere Stichpunkte

Stehende Wellen:

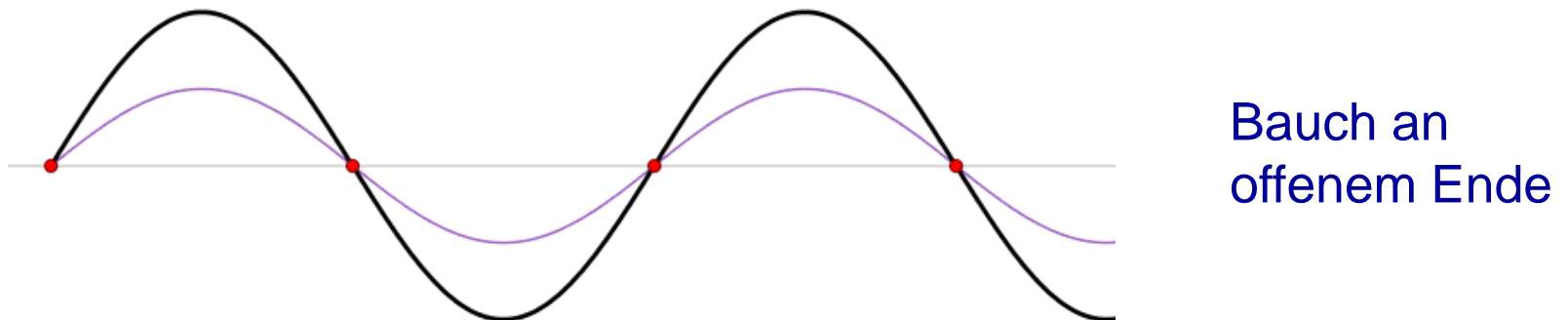
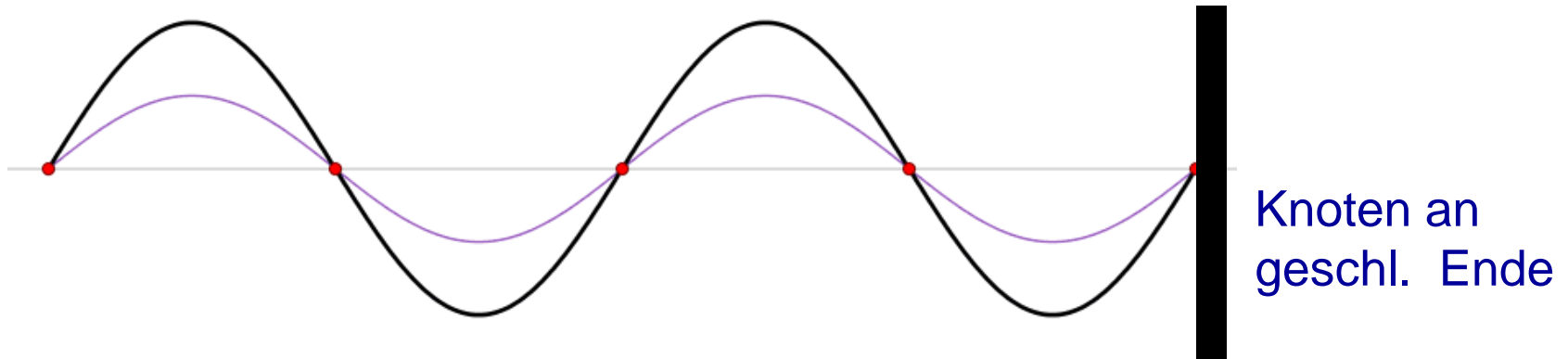
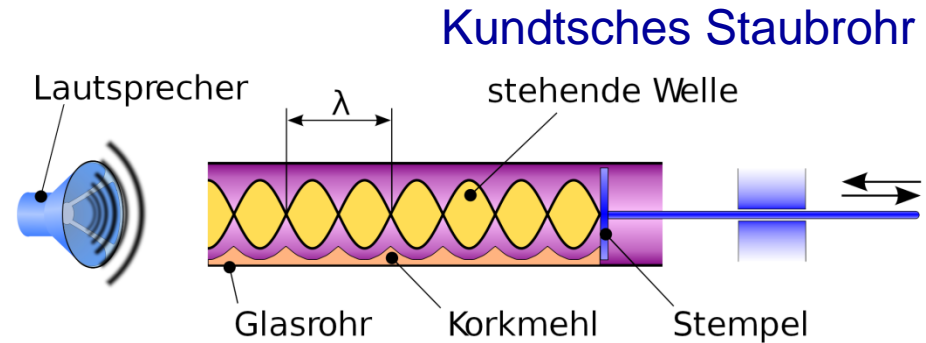
- insb. bei Reflexion an senkrechter Begrenzung
- Interferenz zwischen einlaufender und reflektierter Welle
- Knoten an geschlossenem Ende, Bauch an offenem Ende



Weitere Stichpunkte

Stehende Wellen:

- insb. bei Reflexion an senkrechter Begrenzung
- Interferenz zwischen einlaufender und reflektierter Welle
- Knoten an geschlossenem Ende, Bauch an offenem Ende



Weitere Stichpunkte

Fermatsches Prinzip:

Licht nimmt den schnellsten Weg (nicht den kürzesten!)

(Analogie mit Rettungsschwimmer)

⇒ Erklärung der Brechung

(wenn Geschwindigkeit zusätzlich frequenzabhängig folgt Dispersion)

Polarisation:

- Nur bei Transversalwellen!

- Lineare Polarisation, zirkulare (elliptische) Polarisation
(kommt in Optik)