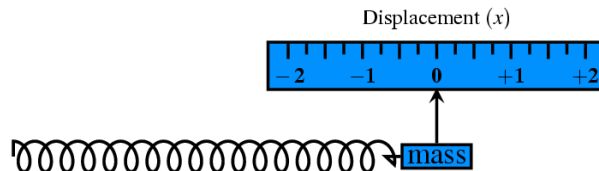


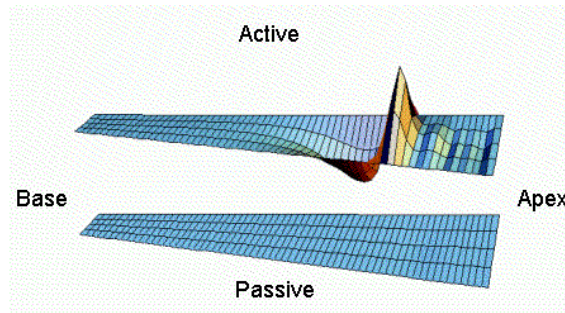
# Grundlagen der medizinischen Biophysik

5. Vorlesung 20. 09. 2021

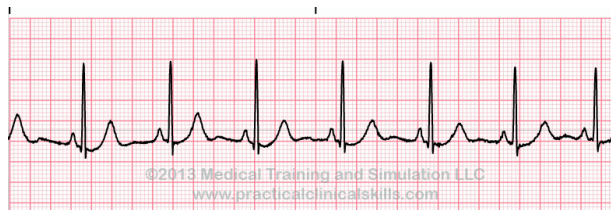
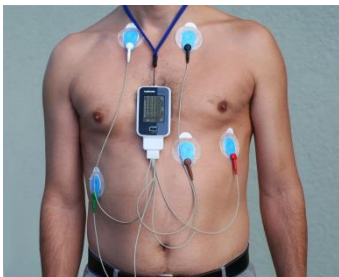
## Mechanik – Schwingungen und Wellen



Wellen auf der Basilar-  
membran im Innenohr:



Elektrische Schwingungen des Herzens (EKG):

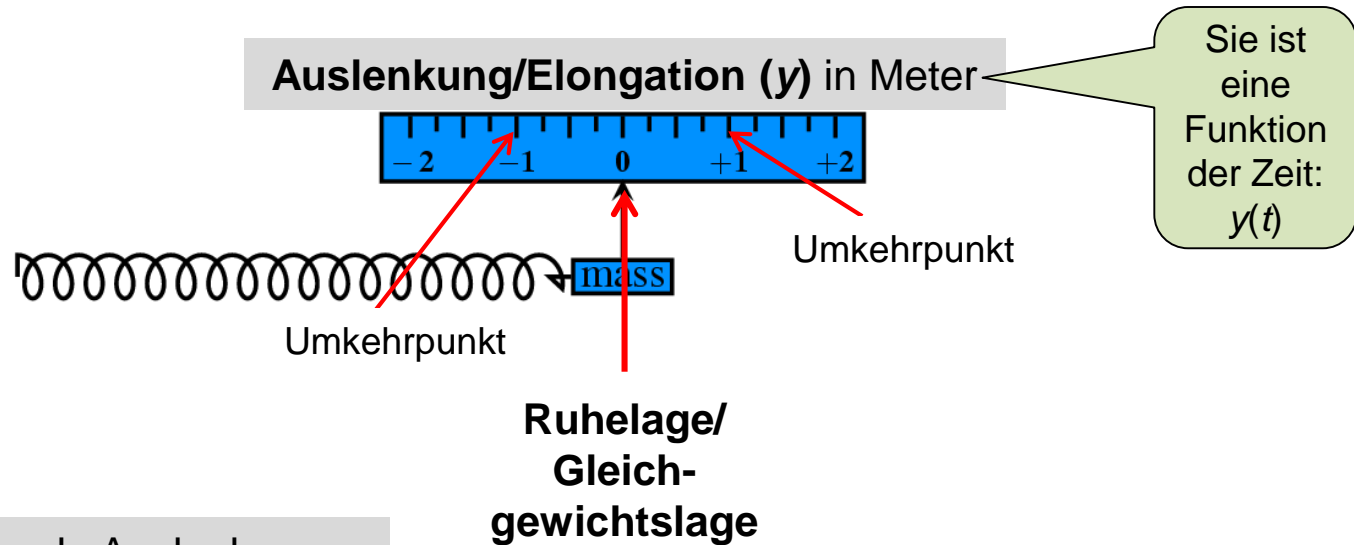


1. Grundbegriffe der Schwingungslehre
2. Schwingungstypen
3. Harmonische Schwingung
4. Rücktreibende Kraft
5. Eigenschwingung und Eigenfrequenz
6. Federpendel
7. Erzwungene Schwingung
8. Resonanz
9. Grundbegriffe der Wellenlehre
10. Wellenlänge,  $c = \lambda \cdot f$
11. Transversal- und Longitudinalwellen
12. Mechanische Wellen - Schall
13. Elektromagnetische Wellen - Licht
14. (Lineare) Polarisation
15. Reflexion und Brechung
16. Interferenz
17. Stehende Wellen
18. Beugung (Diffraktion)
19. Huygenssches Prinzip

# Grundbegriffe der Schwingungslehre

**Oszillator:** Physikalisches System, das Schwingungen ausführen kann (z.B. Federpendel)

**Schwingung** (mechanisch): Periodische Hin-und Herbewegung eines Körpers um eine Ruhelage



**Amplitude (A):** Maximale Auslenkung

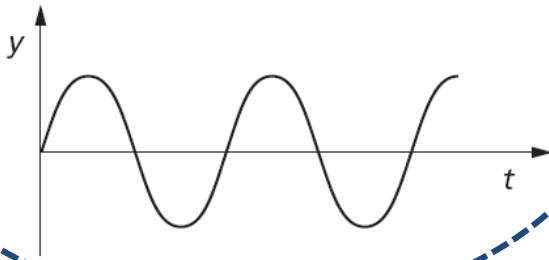
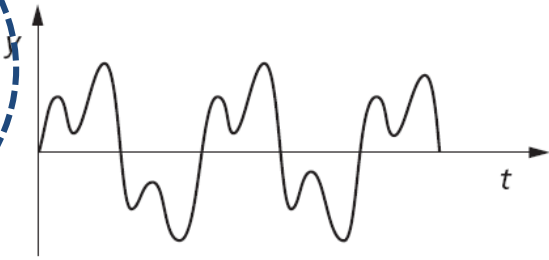
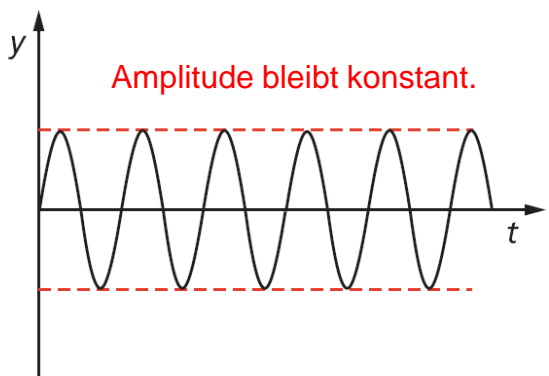
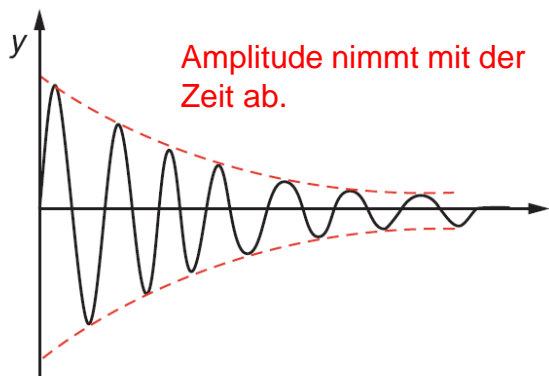
Zur Erinnerung:

- **Periodenzeit/Periodendauer/Schwingungsdauer** ( $T$ ): Zeitdauer einer Schwingung/Periode
- **Frequenz/Schwingungszahl** ( $f$ ): Anzahl der Schwingungen pro Zeiteinheit. Es gilt:

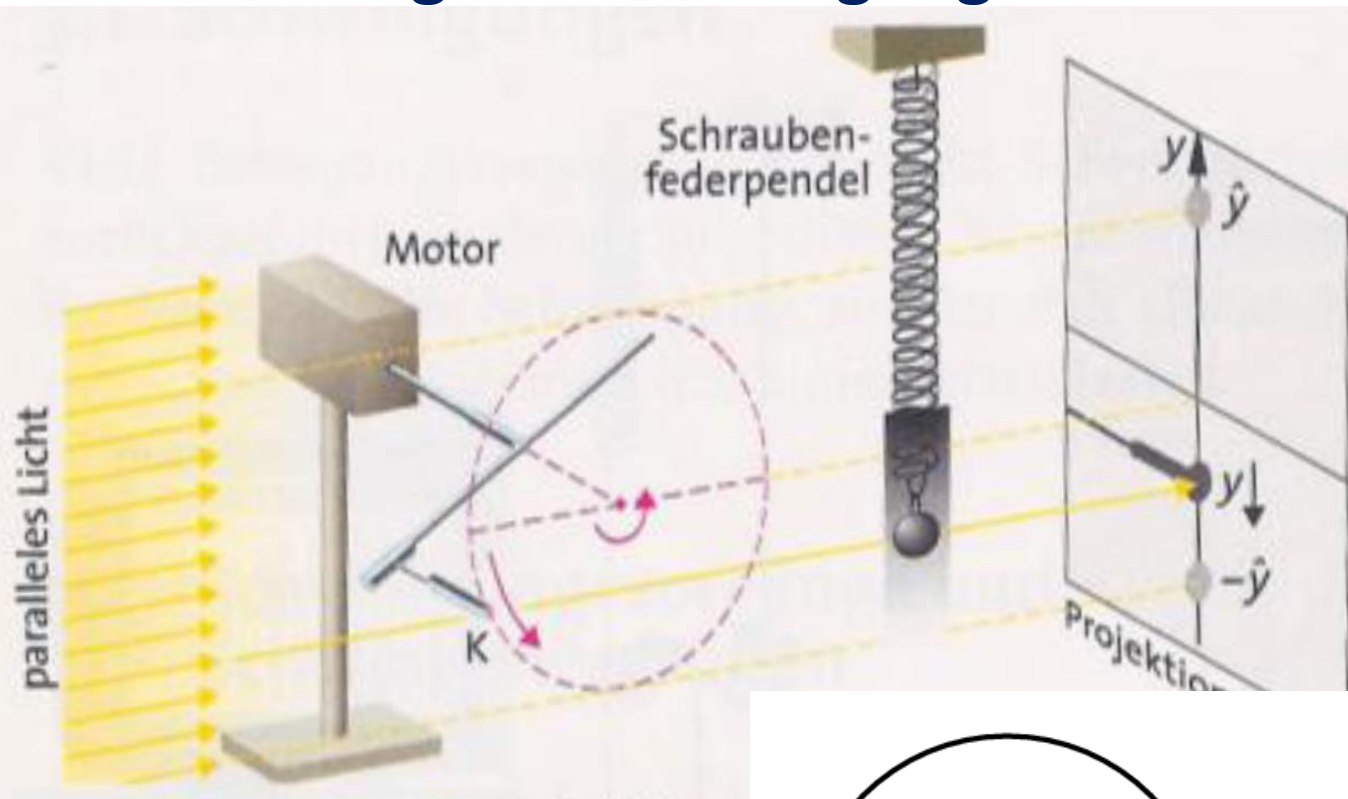
$$f = \frac{1}{T} \quad \left( \frac{1}{s} = \text{Hz} \right)$$

- **Kreisfrequenz** ( $\omega$ ): Anzahl der Schwingungen pro  $2\pi$ . Es gilt:  $\omega = 2\pi f$

# Schwingungstypen

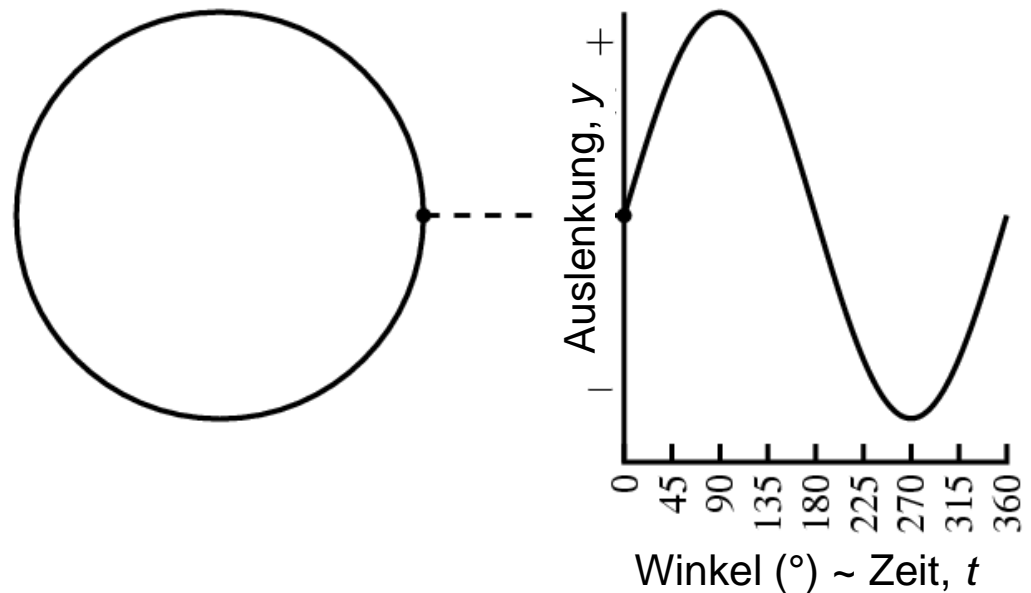
<b>Harmonische Schwingung (sinusförmige Schwingung)</b> 	<b>Nicht harmonische Schwingung (nicht sinusförmige Schwingung)</b> 
Uhrpendel, Fadenpendel, schwingende Wassersäule, Federschwinger	Stimmbänder beim Menschen, Schwingungsdämpfer beim Auto
<b>Ungedämpfte Schwingung</b>  <p>Amplitude bleibt konstant.</p>	<b>Gedämpfte Schwingung</b>  <p>Amplitude nimmt mit der Zeit ab.</p>
Membran eines Lautsprechers bei einem Ton bestimmter Lautstärke	Sich selbst überlassenes Fadenpendel, Schwingungsdämpfer

# Gleichförmige Kreisbewegung – harmonische Schwingung



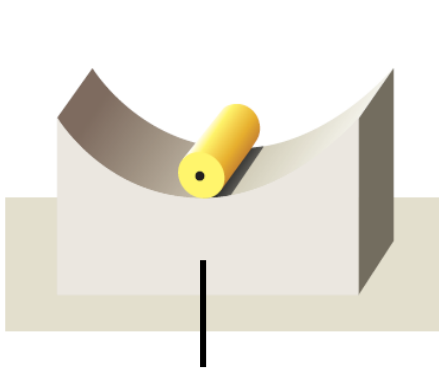
Allgemeine Formel für die Auslenkung-Zeit-Funktion:

$$y = A \cdot \sin(\omega t + \varphi_0)$$

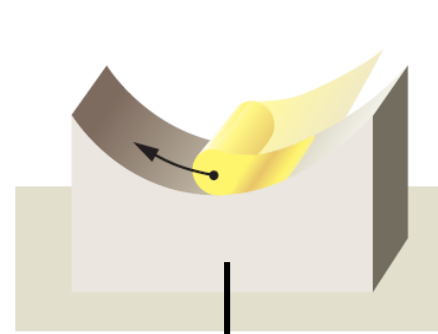
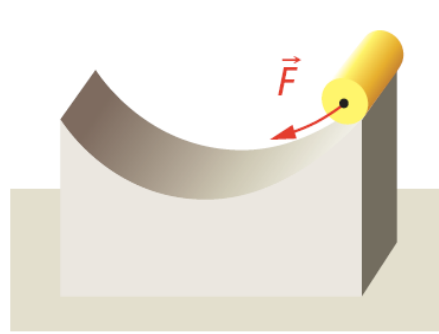


# Rücktreibende Kraft

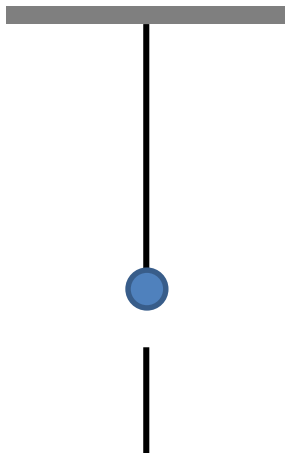
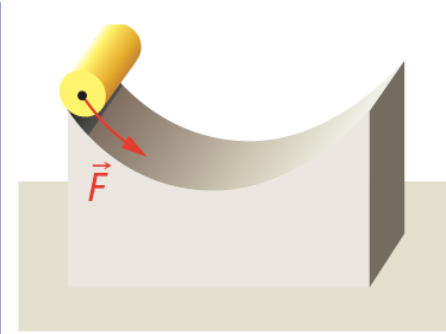
Was für Kraft ist nötig zur harmonischen Schwingung?



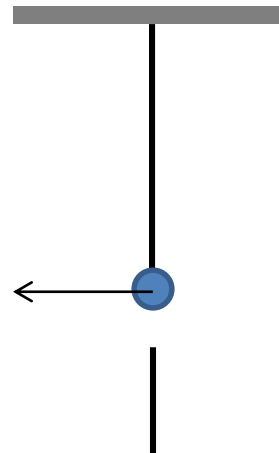
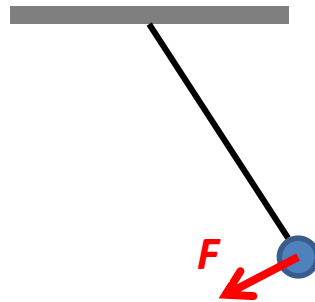
Ruhelage/  
Gleichgewichtslage



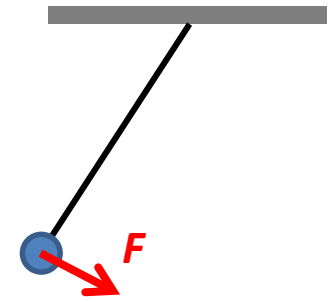
Ruhelage/  
Gleichgewichtslage



Ruhelage/  
Gleichgewichtslage



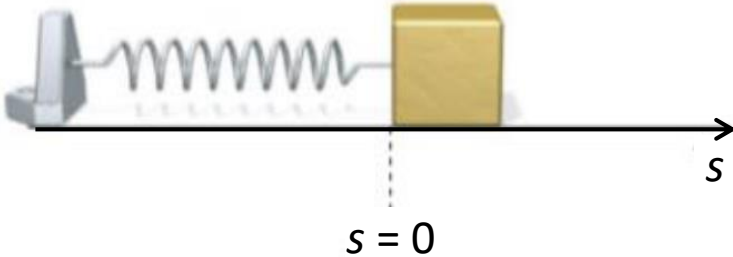
Ruhelage/  
Gleichgewichtslage



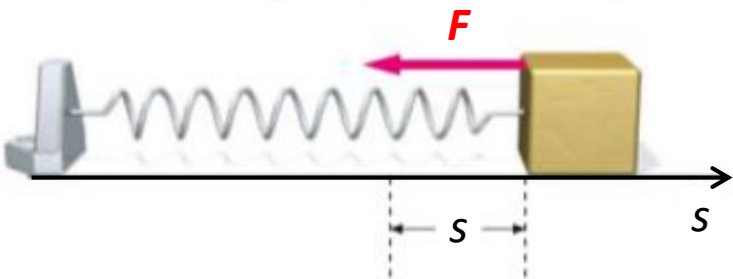
# Rücktreibende Kraft

$$F = -D \cdot s$$

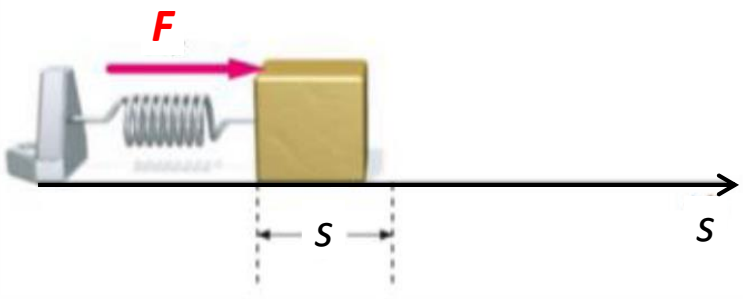
Ruhelage



$F$  ist negativ (da  $s$  positiv ist)



$F$  ist positiv (da  $s$  negativ ist)



Für die rücktreibende Kraft gilt:

- Ständig zur Ruhelage gerichtet
- Proportional zur Auslenkung, aber in entgegengesetzter Richtung (negatives Vorzeichen)

# Eigenschwingung (freie Schwingung)

Voraussetzung:

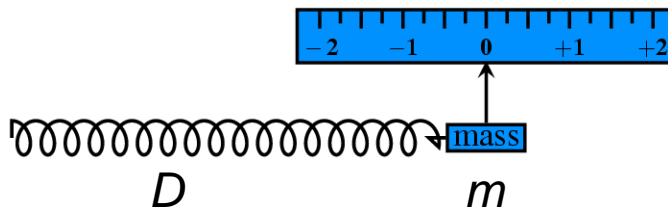
Durch eine einmalige Einwirkung wird ein Oszillator in Schwingung gebracht.

**Eigenschwingung:** ohne weitere Einwirkungen ablaufende Schwingung.

**Eigenfrequenz:** die Frequenz einer Eigenschwingung.

Sie wird durch die Eigenschaften des Oszillators (Masse, geometrische Größen, Materialeigenschaften usw.) bestimmt.

## Federpendel



$$f_{\text{Eigen}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{D}{m}}$$

Bemerkung:

Die Formel gilt nur im Idealfall, wenn die Schwingung harmonisch (also nicht gedämpft) ist. In der Wirklichkeit gibt es immer Energieverluste (Reibung, Luftwiderstand, ...), und die Schwingung wird gedämpft.



# Übung

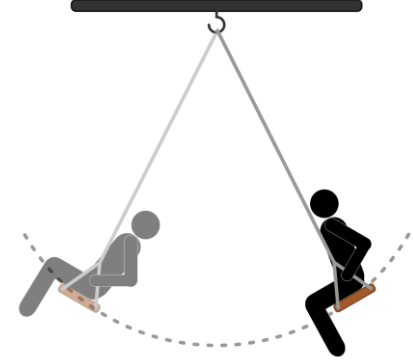


Die Aufgabe bezieht sich auf das Video „Bestimmung der Körpermasse im Weltraum“:  
Die Periodenzeit des für die Messung verwendeten Federpendels mit einer Masse von 6,5 kg betrug 0,75 s. Mit dem Astronauten erhöhte sich diese Periodenzeit auf 2,7 s.  
Errechnen Sie die Körpermasse des Astronauten.



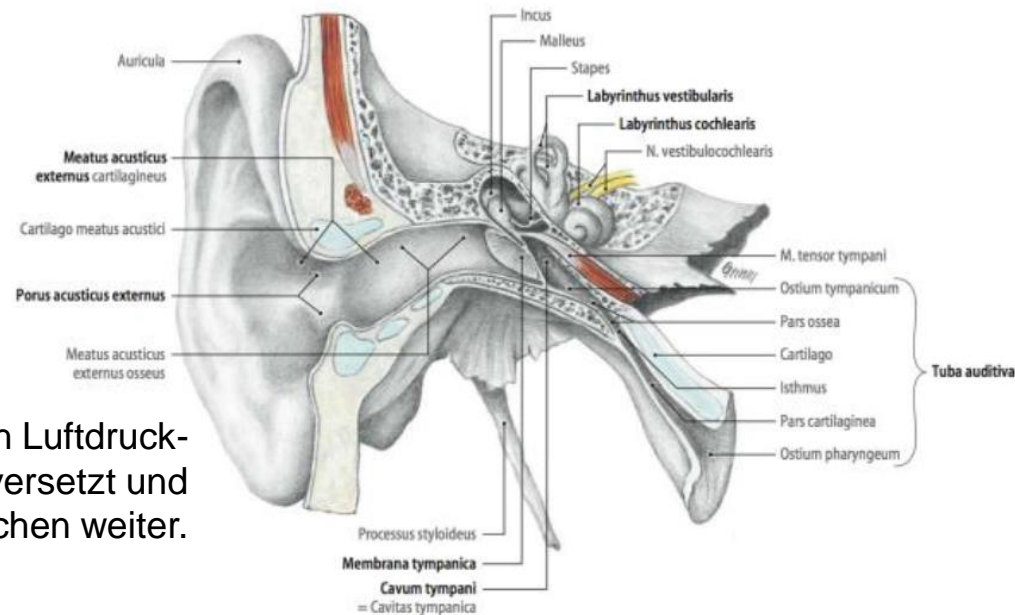
# Erzwungene Schwingung

Schwingung unter dem Einfluss einer äußeren periodischen Erregungskraft.



Die eine Stimmgabel wird angeschlagen, die erzeugte Luftdruckschwankungen versetzen auch die andere Stimmgabel in Schwingung (falls beide auf die gleiche Tonhöhe abgestimmt sind).

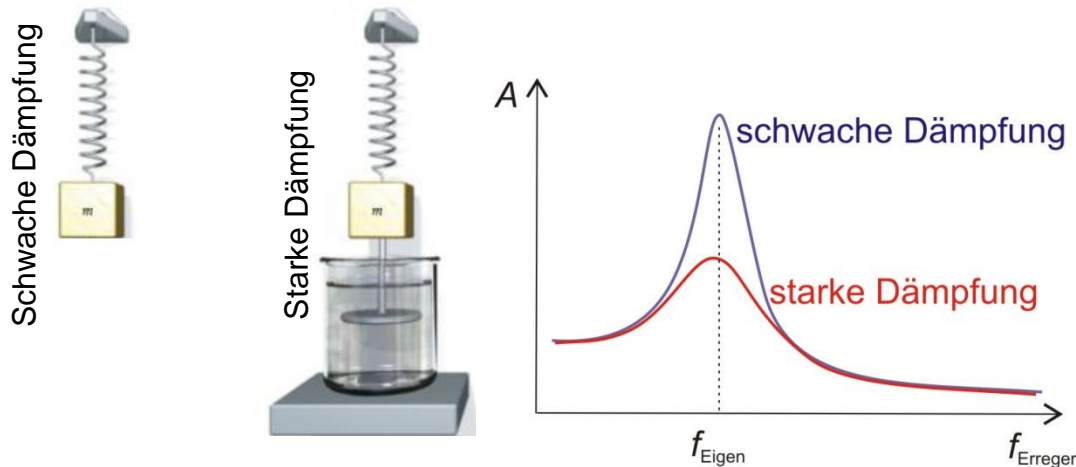
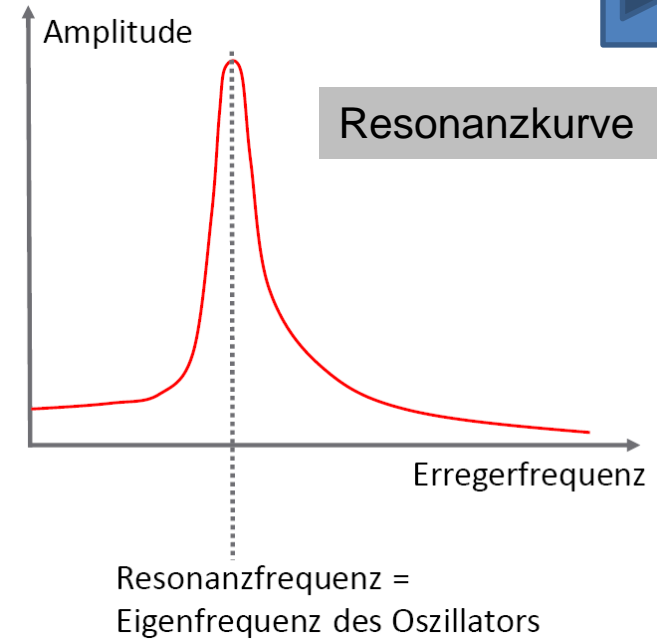
Das Trommelfell wird durch Luftdruckschwankungen in Schwingung versetzt und leitet diese über die Gehörknöchelchen weiter.



- Durch die erzwungene Schwingung kann die harmonische Schwingung mit einer konstanten Amplitude trotz der Energieverluste aufrechterhalten werden.
- Dabei nimmt das schwingende System die Frequenz des Erregers an.

# Resonanz

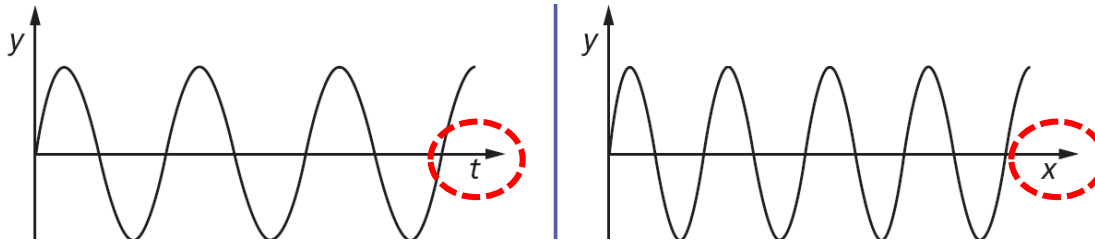
- Wird einem schwingungsfähigen System von einem äußeren Erreger periodisch Energie zugeführt, so vollführt es, nach einer gewissen Einschwingzeit, eine erzwungene Schwingung
- Abhängig von der Erregerfrequenz treten unterschiedlich große Schwingungsamplituden auf
- Stimmt die Erregerfrequenz mit der Eigenfrequenz des schwingenden Systems überein, so tritt eine besonders starke erzwungene Schwingung mit sehr großen Amplituden auf
- Das Auftreten von besonders großen Amplituden bei einer bestimmten Frequenz wird als **Resonanz** bezeichnet, die Frequenz, bei der Resonanz auftritt, heißt **Resonanzfrequenz**



Bemerkung:  
Das Phänomen der Resonanz wird in vielen technischen Geräten ausgenutzt (z. B. MRT, Laser, ...)

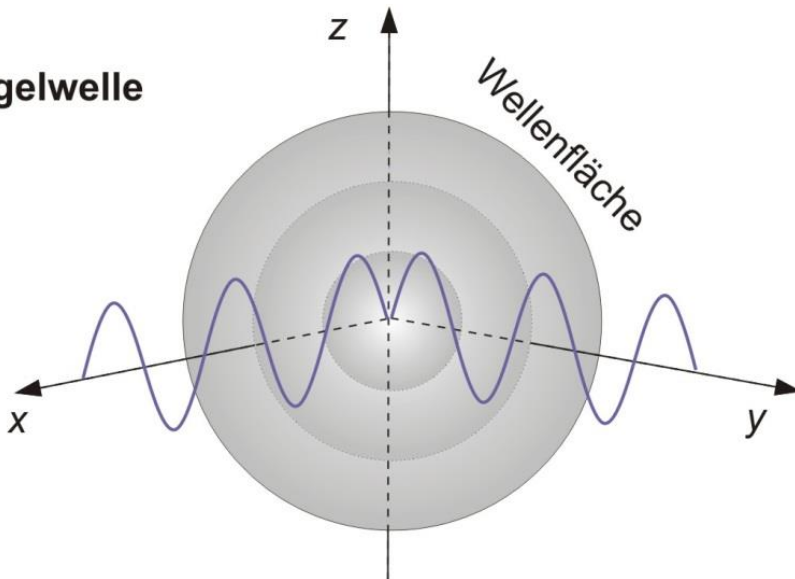
# Grundbegriffe der Wellenlehre

- Ausbreitung eines Schwingungszustandes in einem schwingungsfähigen Medium
- Eine zeitlich und räumlich periodische Änderung einer physikalischen Größe

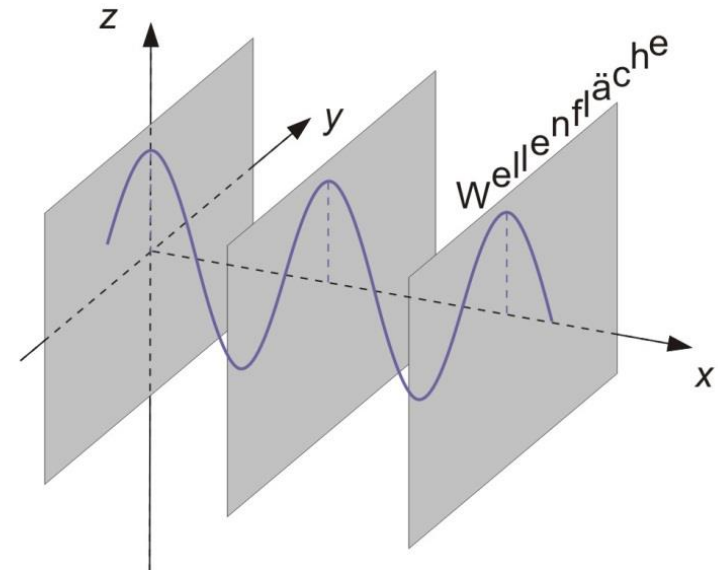


Wellenfläche oder Wellenfront: Eine Fläche, auf der sich alle Punkte in gleicher Phase, d. h. im selben Schwingungszustand, befinden.

**Kugelwelle**

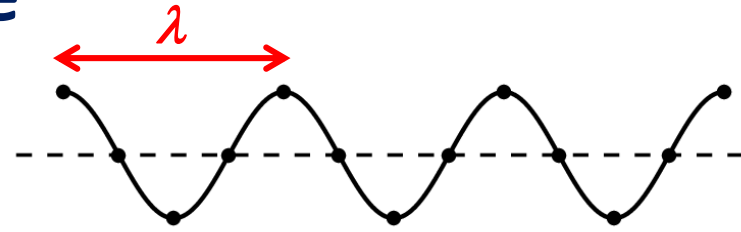


**ebene Welle**

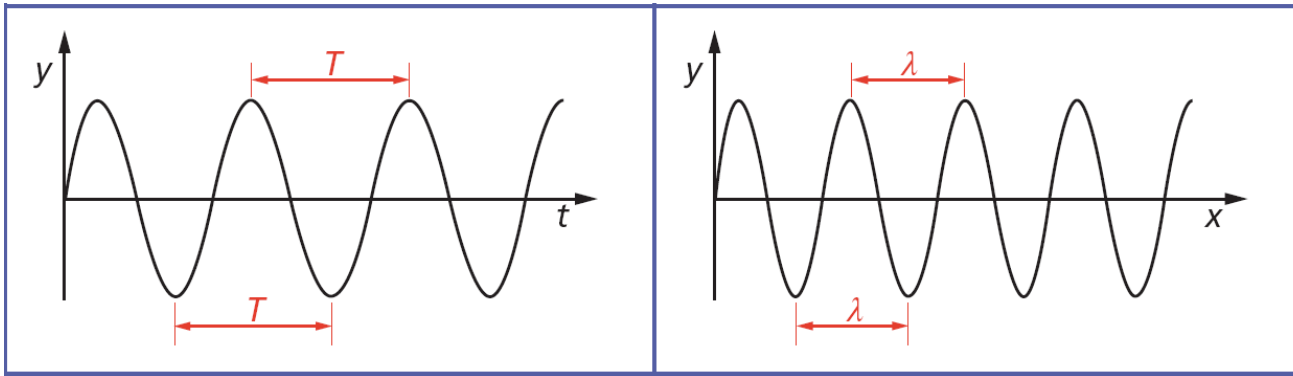


# Wellenlänge

Wellenlänge ( $\lambda$ ): Die Länge einer Welle, der Abstand zwischen gleichphasigen Punkten



- Die Wellenlänge ist analog zur Periodenzeit, sie beschreibt die räumliche Periodizität, während die Periodenzeit die zeitliche Periodizität charakterisiert.



Zusammenhang zwischen Wellenlänge und Periodenzeit (bzw. Frequenz):

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

Ausbreitungsgeschwindigkeit  
der Welle

Bemerkung:

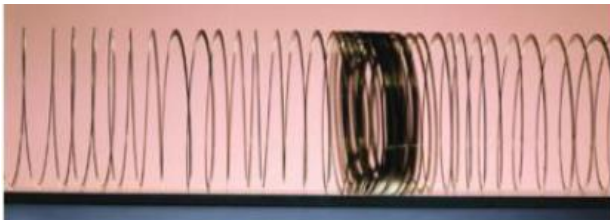
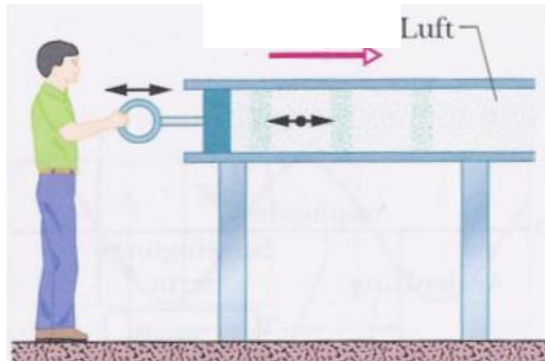
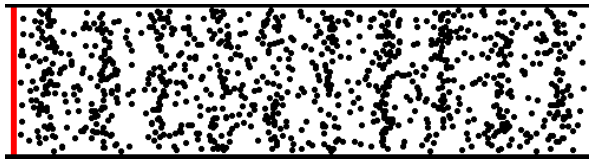
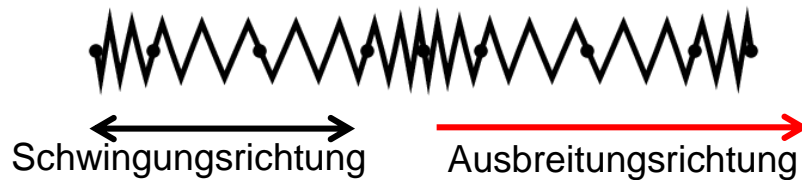
Der Zusammenhang hat allgemeine Gültigkeit, er gilt für jegliche Wellen (für mechanische, elektromagnetische Wellen, auch für Materiewellen)

# Longitudinal- und Transversalwellen

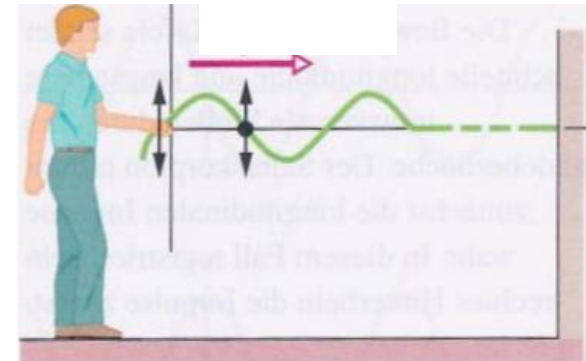
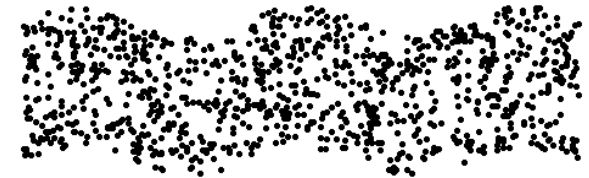
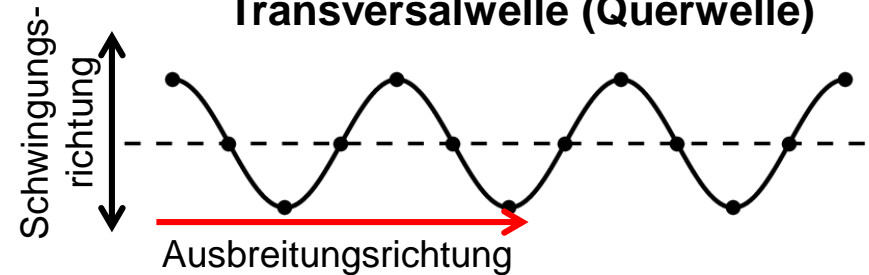
Abhängig davon, wie die Auslenkungsrichtung (Schwingungsrichtung) und die Wellenausbreitungsrichtung zueinander stehen, unterscheidet man Longitudinal- und Transversalwellen:

- **Longitudinalwellen:** Schwingungsrichtung parallel zur Ausbreitungsrichtung
- **Transversalwellen:** Schwingungsrichtung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung

## Longitudinalwelle (Längswelle)

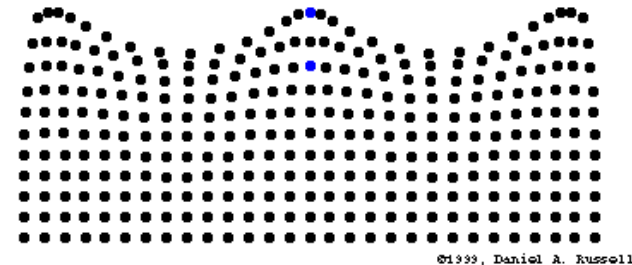


## Transversalwelle (Querwelle)



# Mechanische Wellen

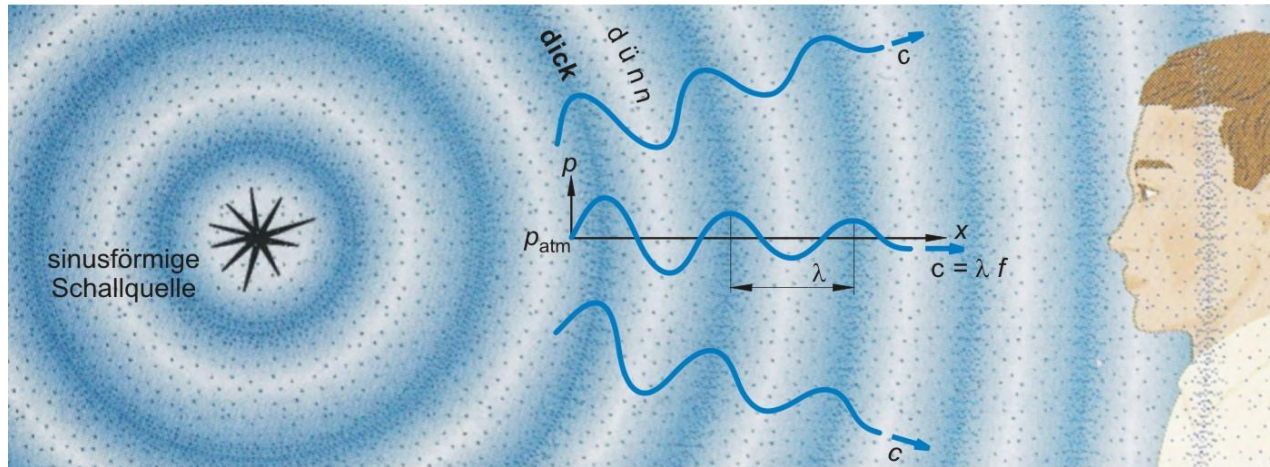
- Sind unbedingt an die Bewegung von Materie gebunden (benötigen einen Träger)
- Bewegung von Materiestücken z.B.:
  - Wasserwellen (Wasser)
  - Schallwellen (Luft)
- Können sowohl Longitudinal- als auch Transversalwellen darstellen
- Mechanische Longitudinalwellen können sich in jedem Medium ausbreiten, mechanische Transversalwellen nur in Festkörpern
- Mit der Ausbreitung der Wellen ist ein Energietransport, aber kein Materietransport verbunden



©1999, Daniel A. Russell



# Schall



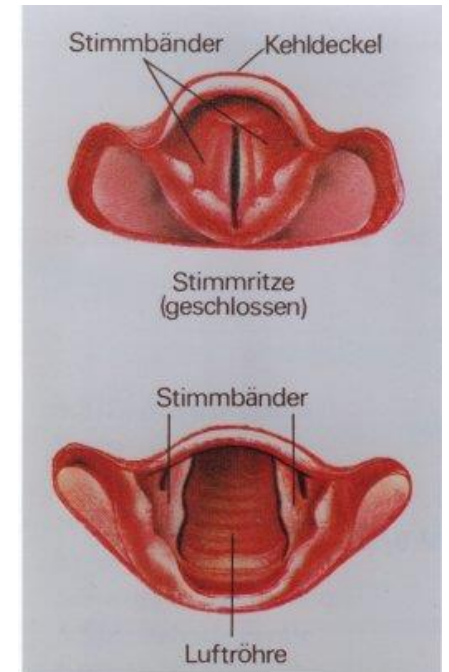
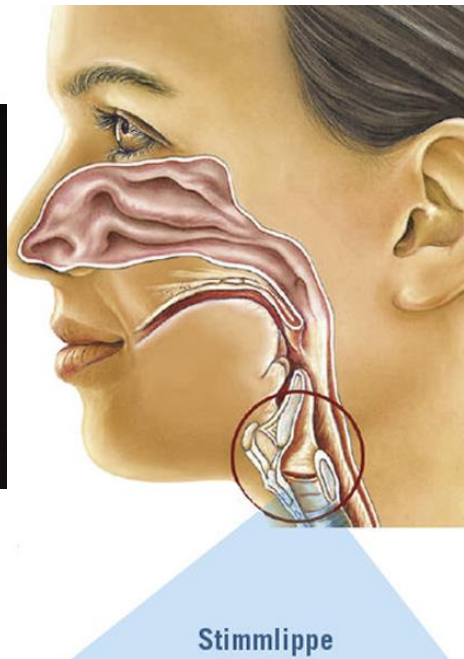
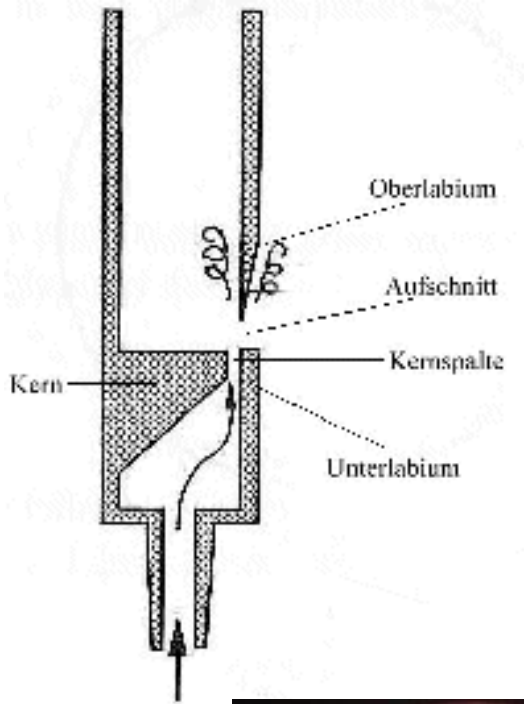
- Schallwellen sind mechanische Wellen und können auf Grundlage des menschlichen Hörens in vier Bereiche eingeteilt werden:

Schallbereiche	Infraschall	Hörschall	Ultraschall	Hyperschall
Frequenzwerte (Hz)	$< 20$	20–20 000	20 000– $10^9$	$10^9 <$

- Die Schallgeschwindigkeit ist im Allgemeinen in Gasen kleiner als in Flüssigkeiten und in Flüssigkeiten kleiner als in Festkörpern

Stoff	$c_{\text{Schall}}$ (m/s)
Luft (0°C, 101 kPa)	330
Helium (0°C, 101 kPa)	965
Wasser (20°C)	1483
Fettgewebe	1470
Muskelgewebe	1568
Knochen (kompakt)	3600
Eisen	5950

# Exkurs: Erzeugung von Schallwellen





# Übung

Der Delfin sendet Schallwellen mit einer Wellenlänge von 7 mm aus.

a) Berechnen Sie die Frequenz im Wasser.



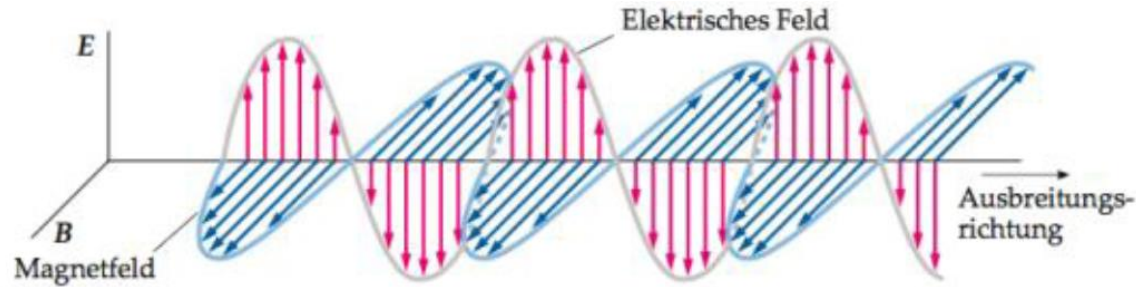
b) Zu welchem Frequenzbereich gehört dieser Schall?

c) Die Schallwellen treten aus dem Wasser in die Luft heraus. Berechnen Sie die Frequenz in der Luft.

d) Berechnen Sie die Wellenlänge in der Luft.

# Exkurs: Elektromagnetische Wellen

- Wellen aus gekoppelten elektrischen und magnetischen Feldern

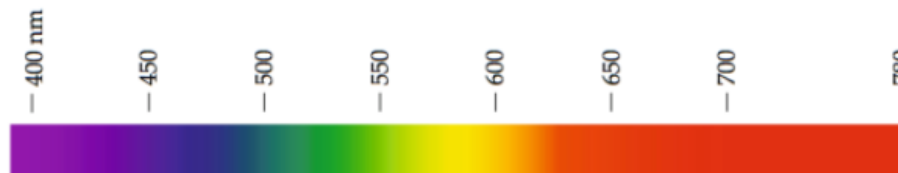


- Das elektromagnetische Feld ist das schwingungsfähige Medium, sodass sich diese Wellen auch im Vakuum ausbreiten können
- Beschreiben Transversalwellen (die somit polarisiert werden können)
- Alle elektromagnetischen Wellen breiten sich im Vakuum mit derselben Geschwindigkeit, der Lichtgeschwindigkeit aus:

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

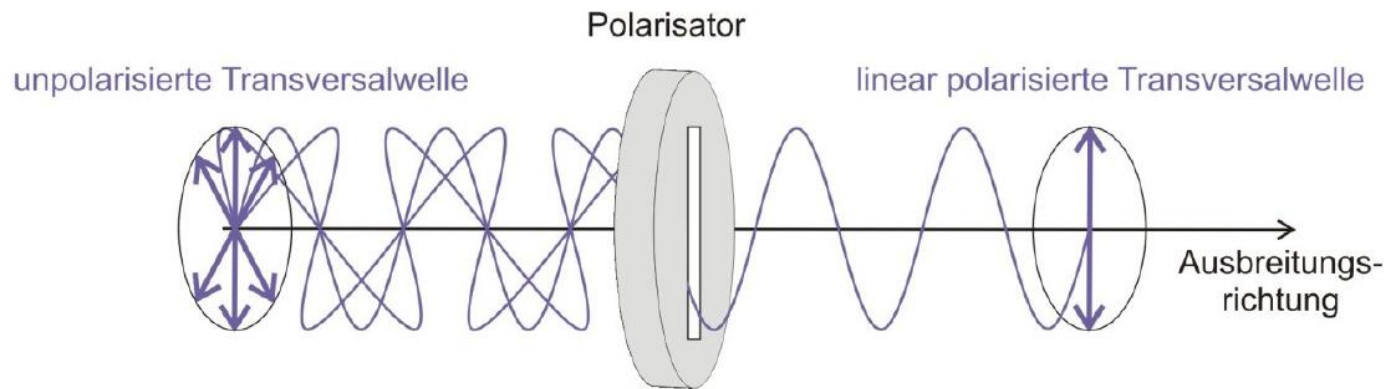
## Licht – die bekannteste elektromagnetische Welle

- Das **sichtbare Spektrum des Lichts** umfasst den Wellenlängenbereich von ca. 380 nm–780 nm (VIS-Bereich) → **400 nm–800 nm**



# (Lineare) Polarisation

- Bei Transversalwellen stehen Schwingungs- und Ausbreitungsrichtung senkrecht zueinander
- Die Schwingungsrichtung ist dabei aber noch nicht genau definiert, obwohl sie die ganze Zeit senkrecht zur Ausbreitungsrichtung steht (= unpolarisierte Welle)
- Die „Auswahl“ **einer** Schwingungsrichtung (Schwingungsebene) mit Hilfe eines Polarisators wird lineare Polarisation genannt

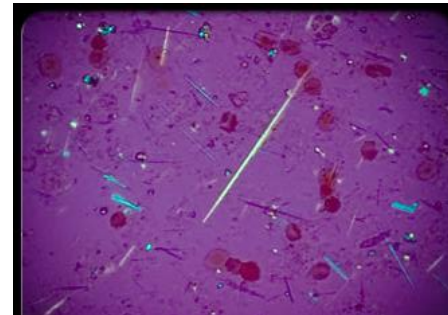


## Polarisation von Licht

Ein Beispiel: Polarisationsmikroskop

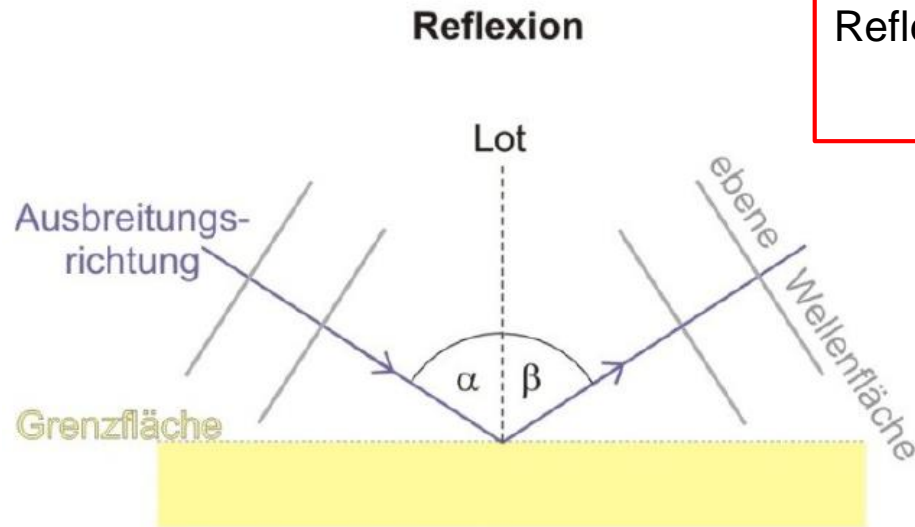


Gicht



Ablagerung von Harnsäure-Kristalle

# Grenzflächenphänomene: Reflexion



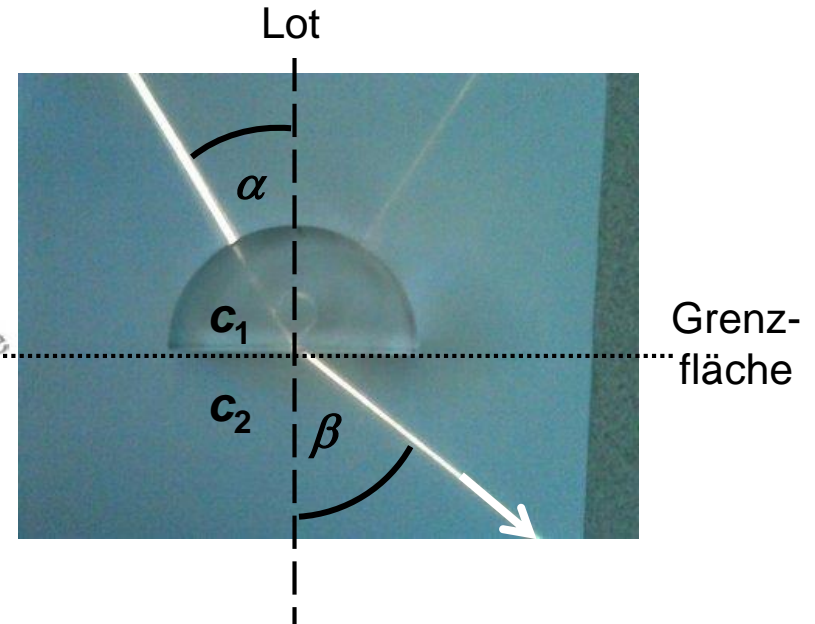
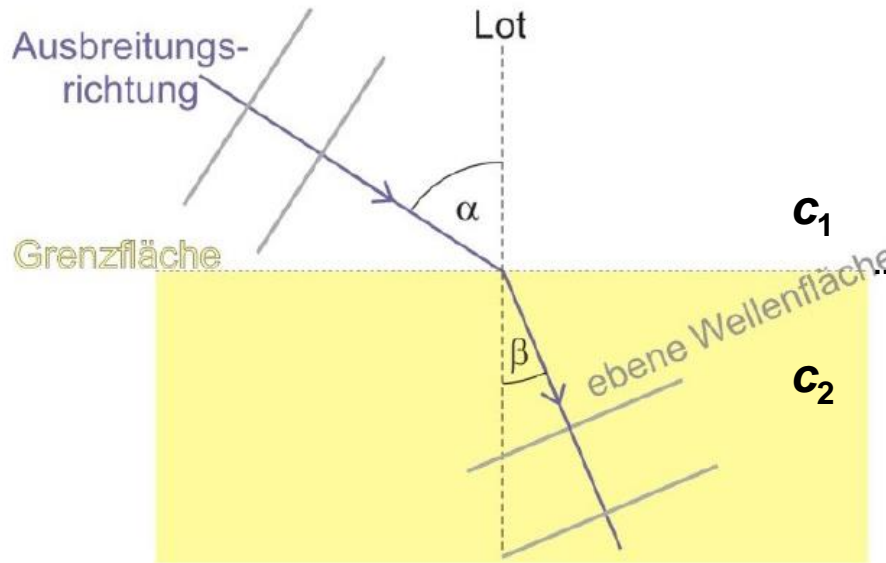
Reflexionsgesetz:

$$\alpha = \beta$$



# Grenzflächenphänomene: Brechung

## Brechung



Brechungsgesetz:

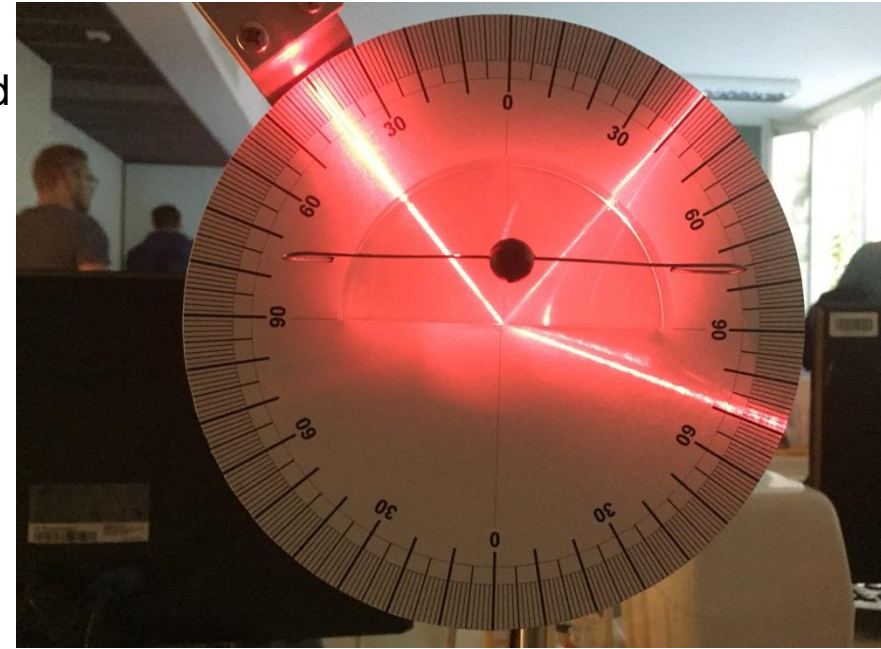
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2}$$



# Übung



Ein Lichtstrahl fällt aus Plexiglas auf die Grenzfläche Plexiglas/Luft. Die Einfallswinkel sind in dem Bild zu sehen. Errechnen Sie die Lichtgeschwindigkeit im Plexiglas.

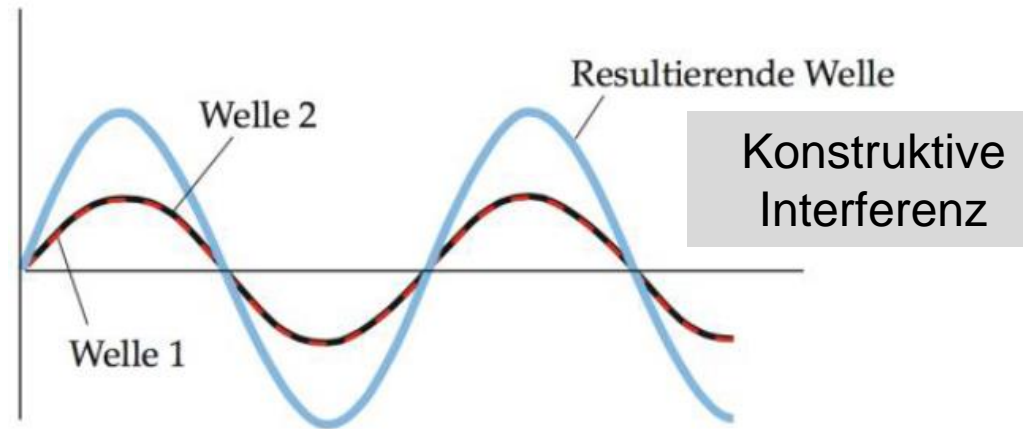




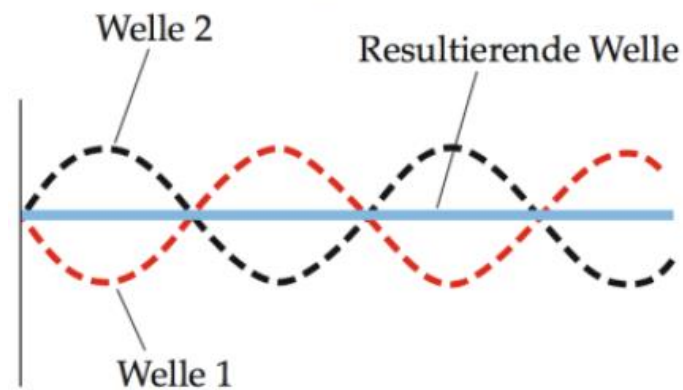
# Interferenz

Überlagerung zweier oder mehrerer Wellenzüge

- bei gleichen Wellenlängen
- bei festen Phasenbeziehungen



Konstruktive  
Interferenz

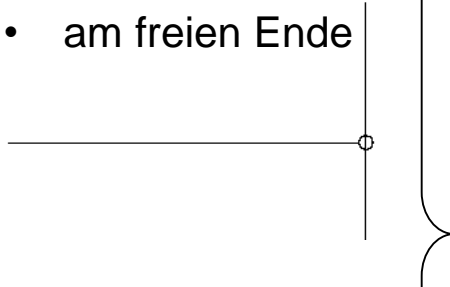


Destruktive  
Interferenz

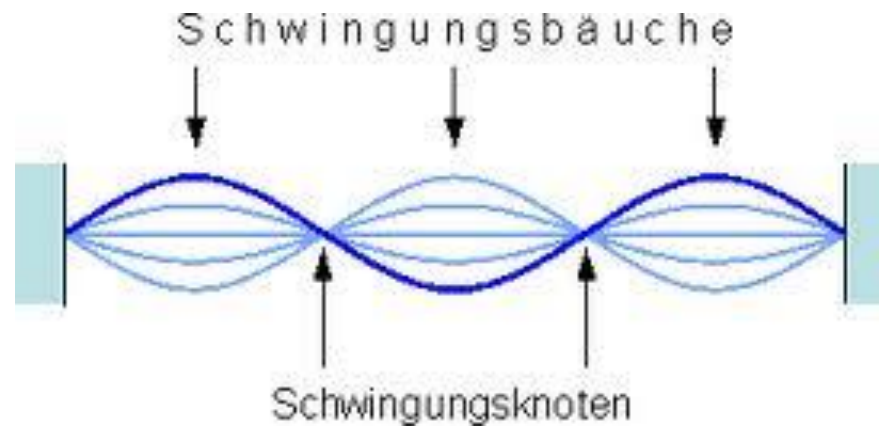
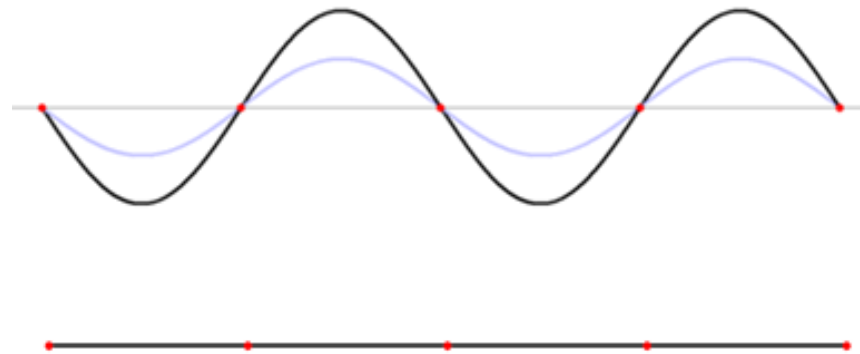
# Stehende Wellen

## Reflexion einer Welle

- am freien Ende



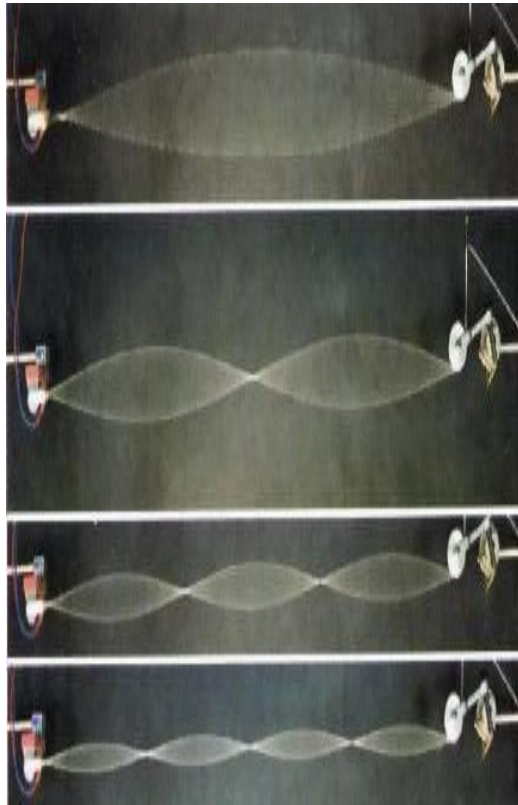
- am festen Ende



- Entstehen durch Überlagerung zweier gegenläufiger ebener Wellen gleicher Frequenz und gleicher Amplitude (z.B. Überlagerung von reflektierter und einfallender Welle)
- Alle Punkte schwingen mit gleicher Phase, aber unterschiedlicher Amplitude
- An einem festen Ende befindet sich ein Knotenpunkt
- An einem freien Ende befindet sich ein Schwingungsbauch



Z. B.: Ein System mit zwei festen Enden (beide sind Knotenpunkte)



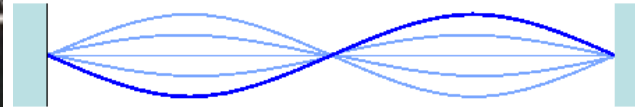
Grundschiwingung



$$\lambda_0 = 2 \cdot l \quad \Rightarrow \quad f_0 = \frac{c}{2l}$$

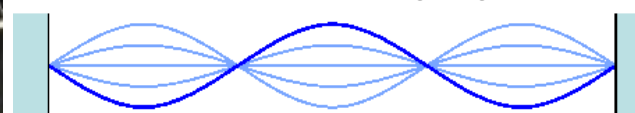
$f_0$  - Grundfrequenz

1. Oberschiwingung

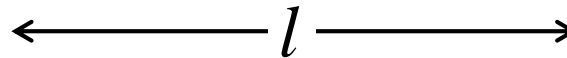


$$\lambda_1 = l \quad \Rightarrow \quad f_1 = \frac{c}{l} = 2 \cdot f_0$$

2. Oberschiwingung



$$\lambda_2 = \frac{2}{3} \cdot l \quad \Rightarrow \quad f_2 = \frac{3c}{2l} = 3 \cdot f_0$$

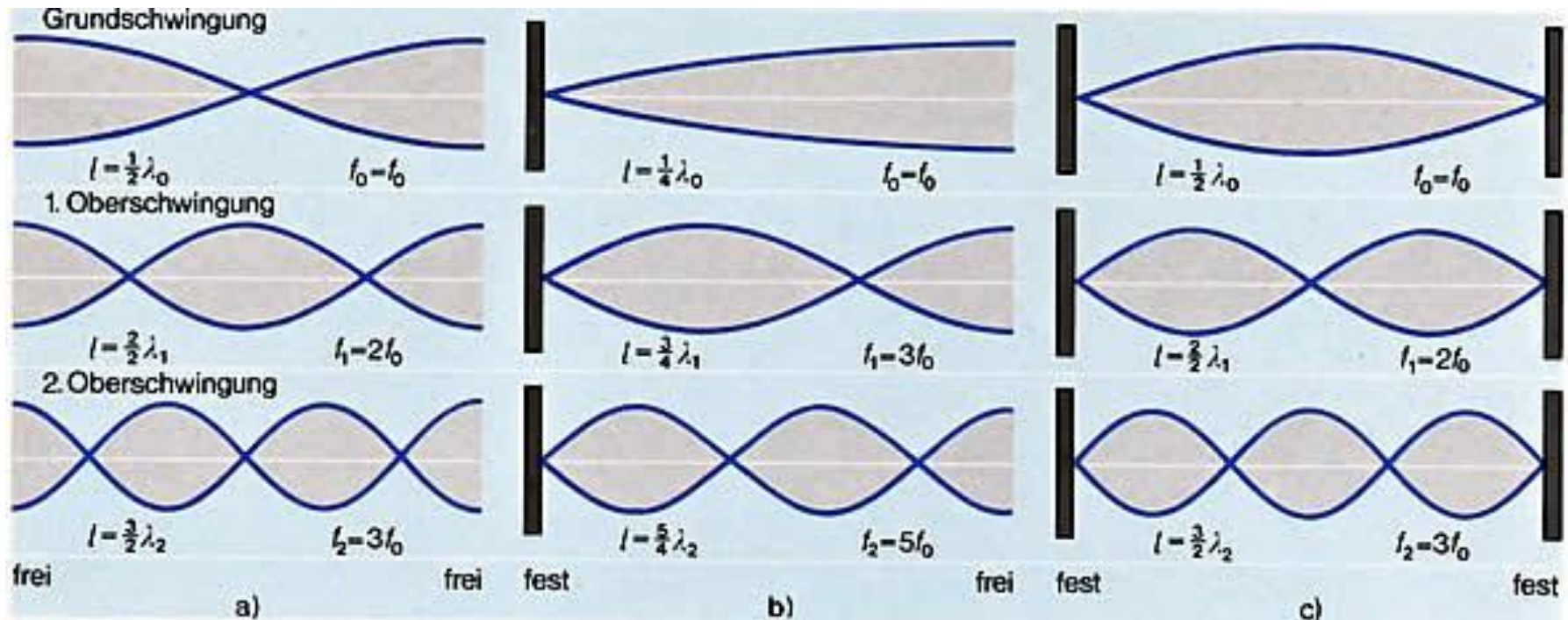


**Bemerkung:**

Die Grundfrequenz einer Geigesaite z. B. kann eingestellt werden durch

- die Variierung der Länge der Saite
- die Variierung des Spannungszustandes der Saite ( $\rightarrow$  Ausbreitungsgeschwindigkeit)

Weitere Möglichkeiten:



Bemerkung:

Viele technische Geräte und auch physiologische Vorgänge beruhen auf dem Prinzip von stehenden Wellen, z. B.

- Laser
- Außenohr

# Übung



Eine Geigesaiten ist 20 cm lang. Die Wellen laufen entlang der Saite mit einer Geschwindigkeit von 176 m/s. Berechnen Sie

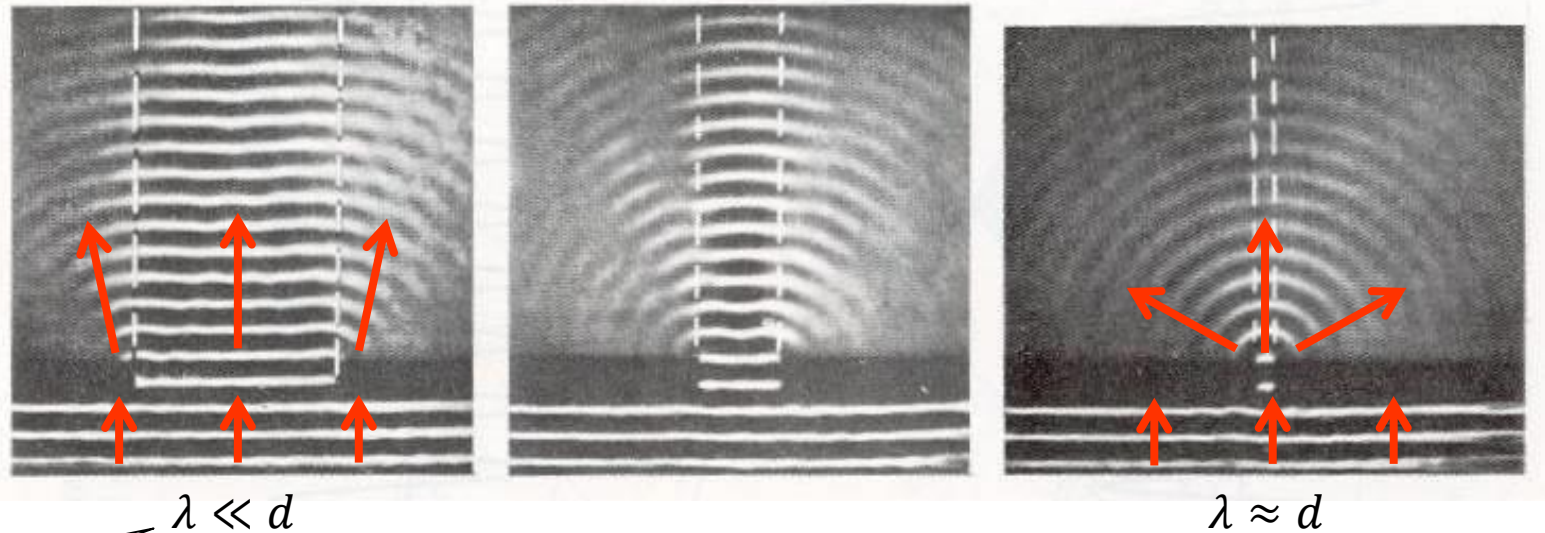
a) die Wellenlänge und die Frequenz der Grundschiwingung

b) die Wellenlänge und die Frequenz der 2. Oberschiwingung

# Beugung (Diffraktion)

Abweichung von der ursprünglichen Ausbreitungsrichtung einer Welle am Rand einer Öffnung oder eines Hindernisses

Z. B. Beugung an einer Öffnung:

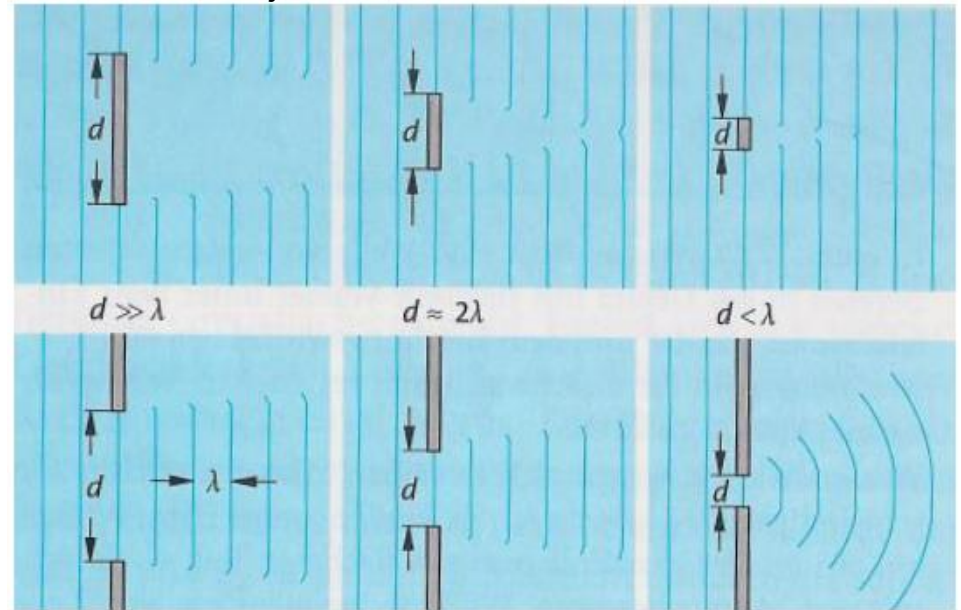


Wellenlänge

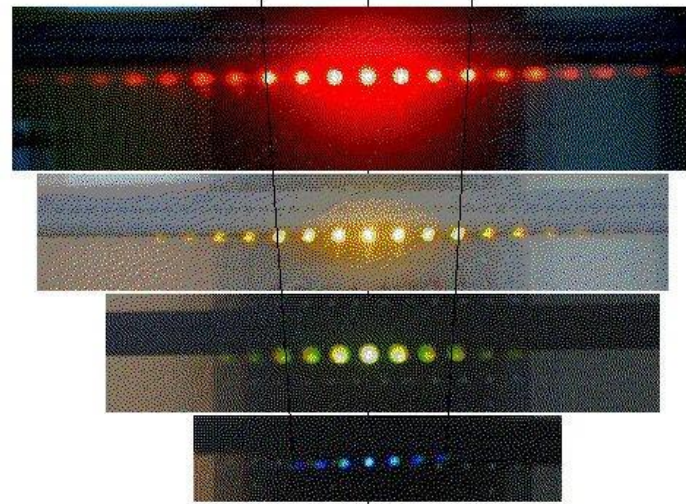
Breite der  
Öffnung

Eindringen von Wellen in den geometrischen Schattenraum hinter Hindernissen oder Öffnungen

- Abhängig von dem Verhältnis der Größe des Hindernisses bzw. der Öffnung und der Wellenlänge ist die Beugung mehr oder weniger stark ausgeprägt
- Das Phänomen der Beugung tritt umso deutlicher auf, je:
  - kleiner das Hindernis oder die Öffnung sind (bei konstanter Wellenlänge)



- größer die Wellenlänge ist (bei konstanter Öffnung)



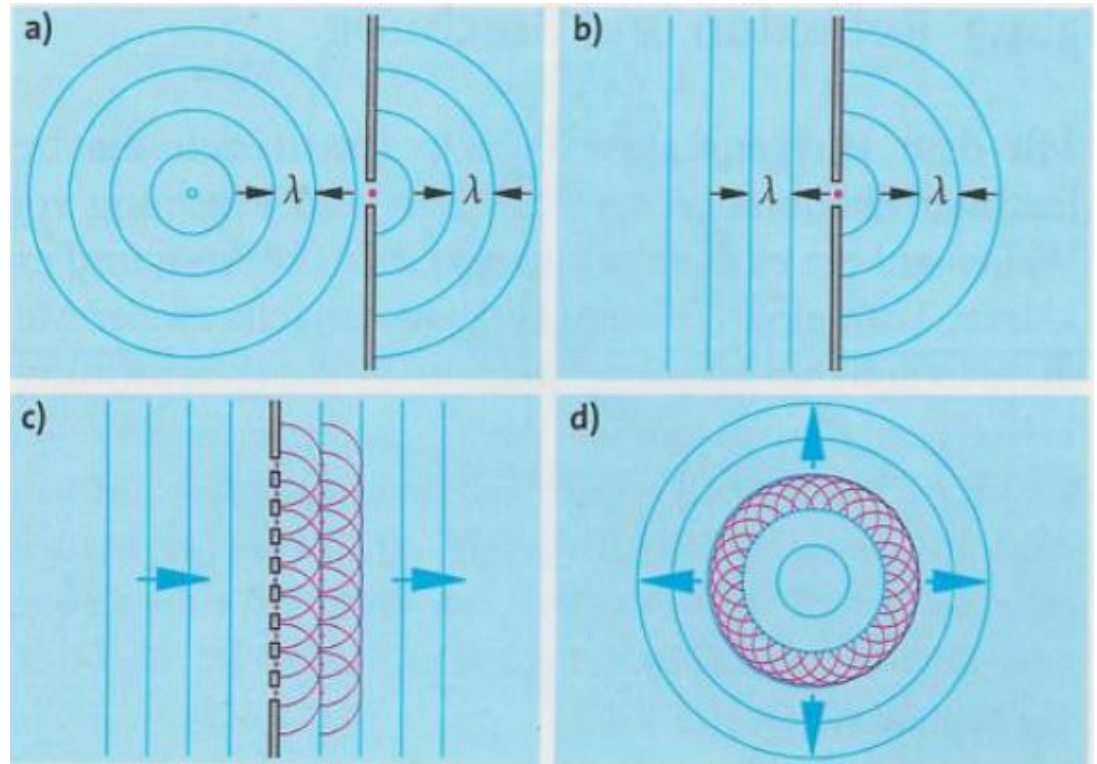
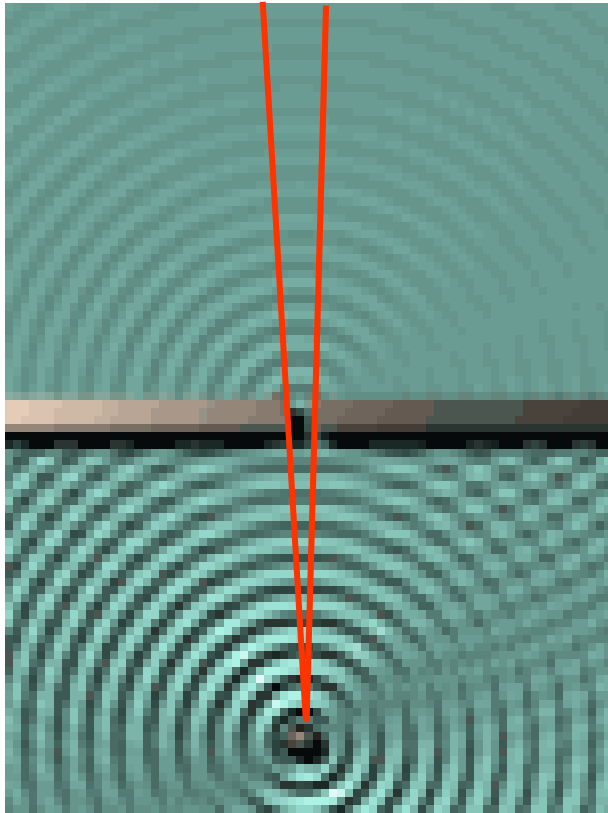
Bemerkung:

Die Beugung des Lichts limitiert die Auflösung von optischen Geräten, wie Mikroskop, Auge usw.



# Huygenssches Prinzip

- Jeder Punkt einer Wellenfront kann als Ausgangspunkt einer neuen kugelförmigen Welle, der sogenannten Elementarwelle, betrachtet werden
- Die Elementarwelle breitet sich mit gleicher Geschwindigkeit und Frequenz wie die ursprüngliche Welle aus
- Die Einhüllende einer Wellenfront ergibt die neue Wellenfront



## Hausaufgaben: Grundschrift Kapitel 9

