

# Vorlesung 3

Karim Kouz

WS 2016/2017: Grundlagen der medizinischen Biophysik

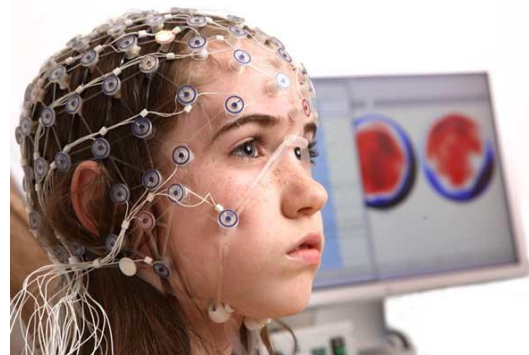
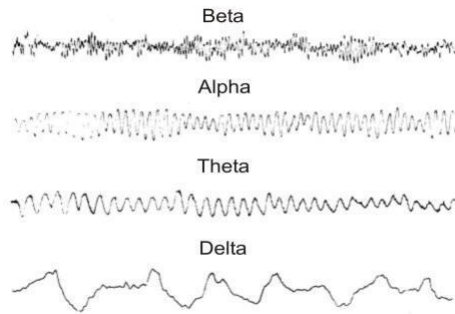
# (VI) Mechanik 5 – Schwingungslehre

Karim Kouz

WS 2016/2017: Grundlagen der medizinischen Biophysik

# Exkurs: Elektroenzephalographie

- Mit Hilfe von extrazellulär positionierten Elektroden auf der Kopfoberfläche können viele neurologische Erkrankungen anhand der gemessenen Hirnströme diagnostiziert werden



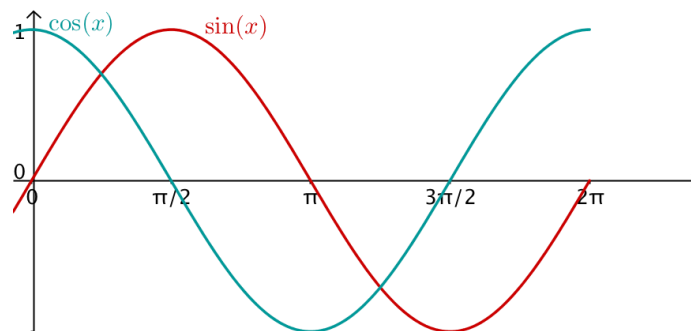
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://www.hereditat.conclusion.com/en/training.html>; <http://imgsupport.com/ica-dear/facing-the-use-of-lagacaa-montages-for-calculation-of-coherence/>

3

# Sinus- und Kosinusfunktion

- Sinusfunktion:
  - $f(x) = \sin x$
  - „Beginnt“ bei 0/0
- Kosinusfunktion:
  - $f(x) = \cos x$
  - „Beginnt“ bei 0/1



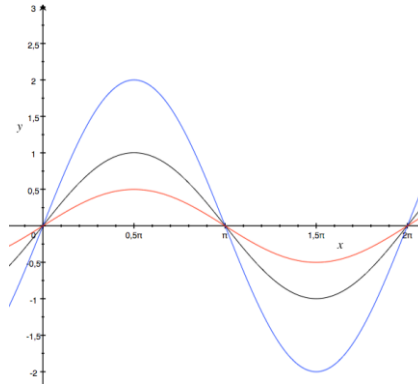
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://www.gitarfrage.net/frage/sinus-und-cosinusfunktionen-mit-allein-werten>

4

## Streckung und Stauchung (y-Achse)

- Der Graph einer Funktion der Form  $f(x) = a \cdot \sin x$  ist eine gestreckte oder gestauchte Sinusfunktion um den Faktor  $a$  in Richtung der y-Achse
- Es gilt:
  - $a > 1$ : *Streckung*
  - $0 < a < 1$ : *Stauchung*

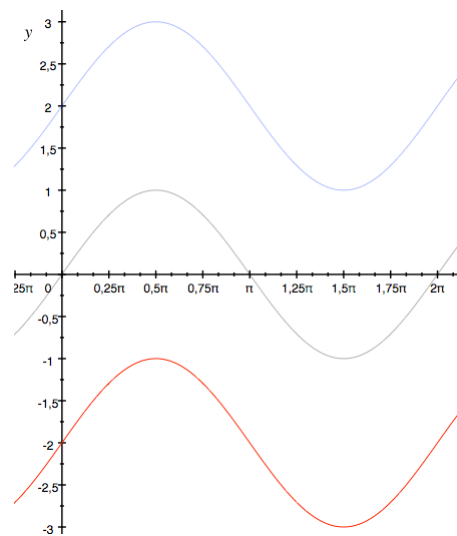


Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

5

## Verschiebung (y-Achse)

- Der Graph einer Funktion der Form  $f(x) = \sin(x) + d$  ist eine nach oben oder unten verschobene Sinusfunktion um  $d$
- Es gilt:
  - $d > 0$ : *Verschiebung nach oben*
  - $d < 0$ : *Verschiebung nach unten*

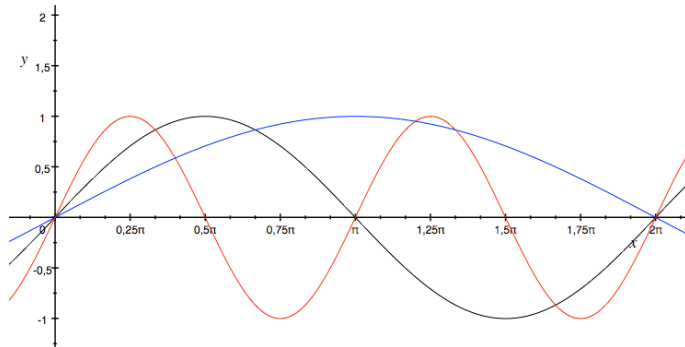


Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

6

## Streckung und Stauchung (x-Achse)

- Der Graph einer Funktion der Form  $f(x) = \sin(b \cdot x)$  ist eine gestreckte oder gestauchte Sinusfunktion um den Faktor  $\frac{1}{b}$  in Richtung der x-Achse
- Es gilt:
  - $0 < b < 1$ : *Streckung*
  - $b > 1$ : *Stauchung*

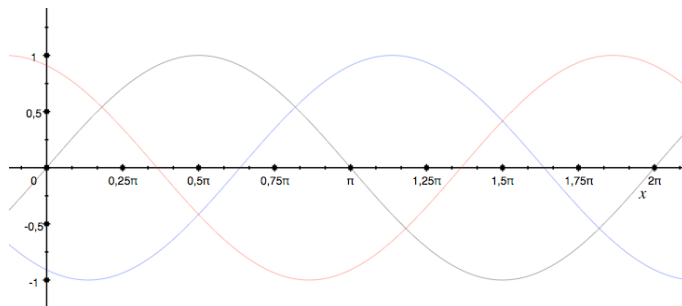


Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

7

## Verschiebung (x-Achse)

- Der Graph einer Funktion der Form  $f(x) = \sin(x - e)$  ist eine nach links oder rechts verschobene Sinusfunktion um  $e$
- Es gilt:
  - $e > 0$ : *Verschiebung nach rechts*
  - $e < 0$ : *Verschiebung nach links*

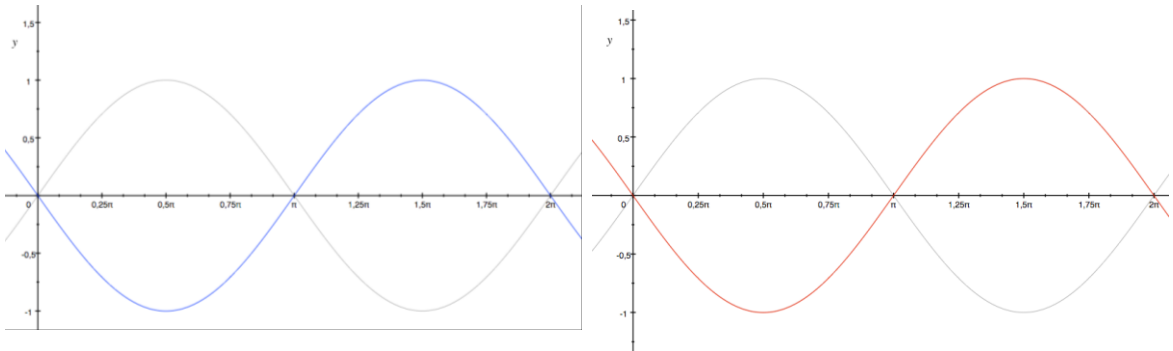


Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

8

# Spiegelung an den Achsen

- Spiegelung an der x-Achse:  $f(x) = -\sin x$
- Spiegelung an der y-Achse:  $f(x) = \sin(-x)$

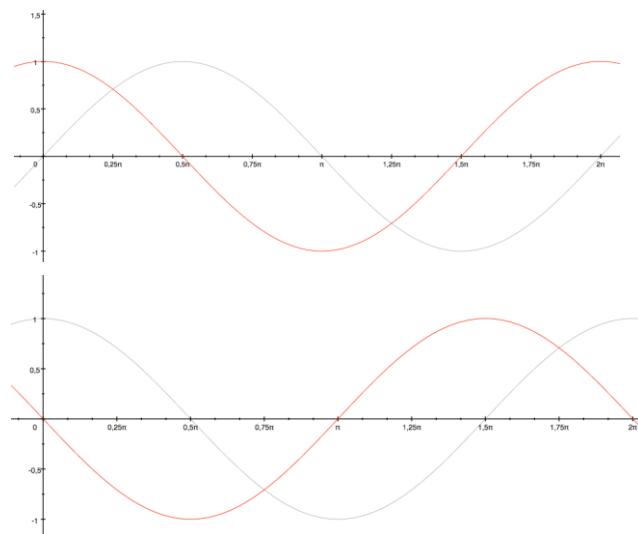


Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

9

# Ableitungen von Sinus und Kosinus

- Die Ableitung der Sinusfunktion:
  - $f(x) = \sin x$
  - $f'(x) = \cos x$
- Die Ableitung der Kosinusfunktion:
  - $f(x) = \cos x$
  - $f'(x) = -\sin x$



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

10

# Übung

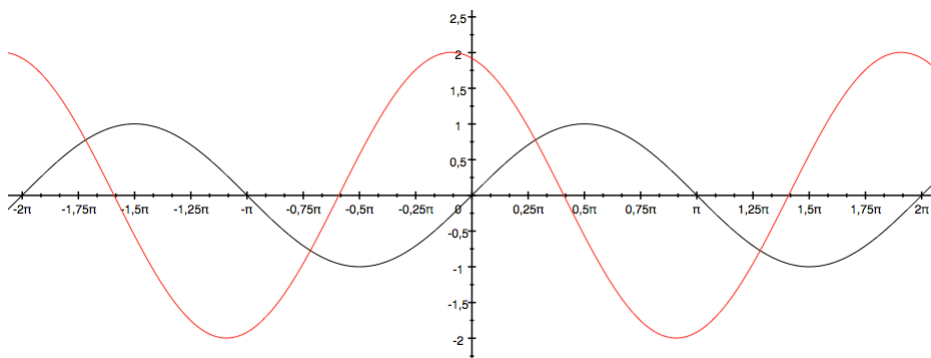
- Die Funktion  $f(x) = \sin x$  soll um 5 Einheiten nach links verschoben, an der x-Achse gespiegelt und in Richtung der y-Achse um Faktor 2 gestreckt werden. Welche der folgenden Funktionen erfüllt die oben genannten Bedingungen?

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

11

# Übung

- Die Funktion  $f(x) = \sin x$  soll um 5 Einheiten nach links verschoben, an der x-Achse gespiegelt und in Richtung der y-Achse um Faktor 2 gestreckt werden. Welche der folgenden Funktionen erfüllt die oben genannten Bedingungen?
- Lösung:  $f(x) = -2 \cdot \sin(x + 5)$



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

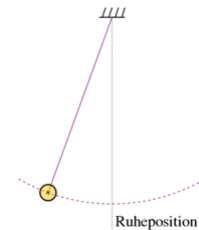
12

# Grundbegriffe

- Periodische Bewegung: Eine Bewegung, die sich in regelmäßigen Zeitabständen wiederholt
- Schwingung (mechanisch): Periodische Hin- und Herbewegung eines Körpers um eine Ruhelage
- Periode: Grundeinheit der Schwingung, die sich mit der Zeit wiederholt
- Periodenzeit/Periodendauer/Schwingungsdauer ( $T$ ): Zeitdauer einer Periode (SI-Einheit: Sekunde)
- Frequenz/Schwingungszahl ( $f$ ): Anzahl der Perioden pro Zeiteinheit

$$f = \frac{1}{T} \left[ \frac{1}{s} = \text{Hz} \right]$$

$$1 \text{ Hertz} = 1 \text{ Hz} = 1 \text{ Schwingung pro Sekunde} = 1 \text{ s}^{-1}$$



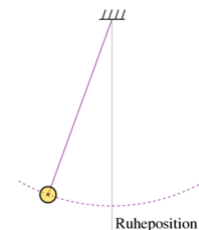
Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Mathematisches\\_Pendel](http://de.wikipedia.org/wiki/Mathematisches_Pendel)

13

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

# Grundbegriffe

- Ruhelage/Gleichgewichtslage: Die Stelle, um die die Schwingung läuft und bei der keine Kraft auf den Körper wirkt, sodass seine Beschleunigung Null ist
- Umkehrpunkte: Die beiden Punkte, zwischen denen die Bewegung der Schwingung verläuft
- Auslenkung/Elongation ( $y$ ): Der jeweilige Abstand des schwingenden Körpers von der Ruhelage
- Amplitude ( $A$ ): Maximale Auslenkung
- Oszillator: Physikalisches System, das Schwingungen ausführen kann (z.B. Federpendel)



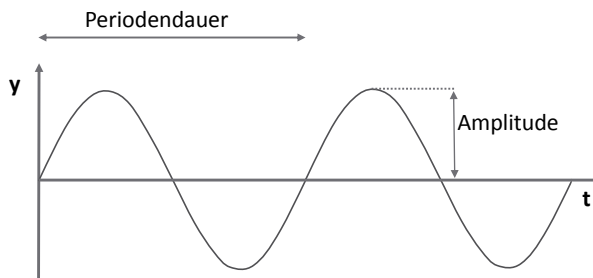
Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Mathematisches\\_Pendel](http://de.wikipedia.org/wiki/Mathematisches_Pendel)

14

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

# Harmonische Schwingung

- Eine Schwingung eines Körpers, bei der die Auslenkung des Körpers mit einer Sinusfunktion dargestellt werden kann, heißt harmonische Schwingung



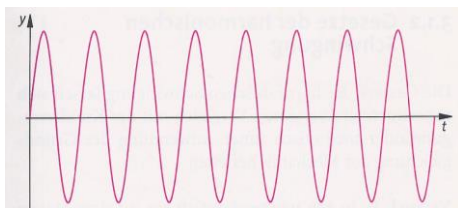
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Karim Kouz (September 2014)

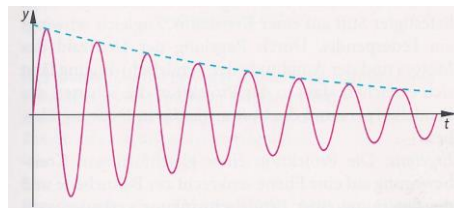
15

# Gedämpfte und ungedämpfte Schwingung

- Eine Schwingung mit konstanter Amplitude heißt ungedämpft
- Nimmt die Amplitude mit der Zeit ab, so nennt man die Schwingung gedämpft
- Die Abnahme der Amplitude erfolgt aufgrund von unvermeidbaren Energieverlusten – die Amplitude nimmt dabei nach bestimmten Gesetzmäßigkeiten ab



Ungedämpfte Schwingung



Gedämpfte Schwingung

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

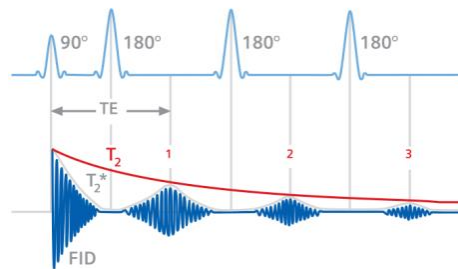
Quelle: Metzler Physik: J. Greh, J. Krause Schroedel-Verlag, 4. Auflage

16



# Gedämpfte Schwingung beim MRT

- Auch beim MRT können gedämpfte Schwingungen beobachtet werden
- Die Energie der Spins nimmt aufgrund verschiedener Tatsachen (Spin-Spin und Spin-Gitter-Relaxation) kontinuierlich ab
- Diese Abnahme liefert die entscheidenden Informationen für die Rekonstruktion des Bildes



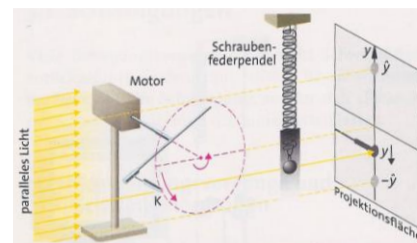
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Quelle: Jarmen – Magnete, Spins und Resonanzen

17

# Mathematische Beschreibung

- Versuch:
  - Ein Federpendel wird ausgelenkt und führt eine Schwingung durch (es wird angenommen, dass diese im betrachteten Zeitraum ungedämpft ist)
  - Zeitgleich wird ein an einem Motor über eine Stange befestigter Stift auf einer Kreisbahn bewegt
  - Beide Ereignisse werden mit parallelem Licht beleuchtet und auf einer Projektionsfläche beobachtet
  - Der Motor wird nun so eingestellt, dass die Bewegung des Stiftes mit der des Gewichtes an der Feder übereinstimmt
- Ergebnis:
  - Die Projektion der gleichförmigen Kreisbewegung auf eine Ebene senkrecht zur Bahnebene und die Bewegung eines Pendels verlaufen synchron
  - Die mathematische Beschreibung beider Prozesse kann also in derselben Weise erfolgen



Quelle: Metzler Physik, J. Greh, J. Krause Schroedel-Verlag, 4. Auflage

18

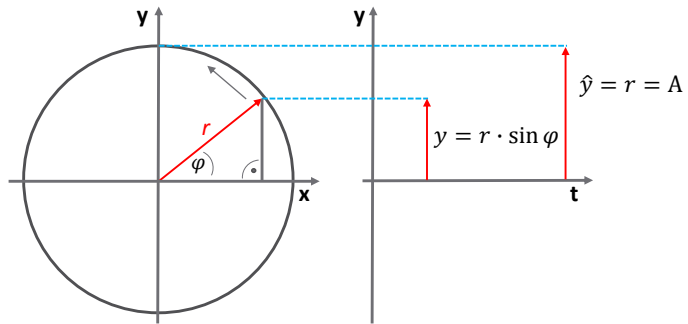
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

# Mathematische Beschreibung

- Der sich bewegend Zeiger ( $r$ ) wird erneut auf eine Fläche projiziert
- Obwohl der Zeiger die ganze Zeit gleich groß bleibt, verändert er in der Projektion periodisch seine Größe
- Die Veränderung der Größe kann wie folgt beschrieben werden:

$$y = r \cdot \sin \varphi = A \cdot \sin \varphi$$

- $\varphi$  ist der Winkel, den der Radius zu einem bestimmten Zeitpunkt mit der x-Achse einschließt – er wird auch Phasenwinkel genannt und kennzeichnet den momentanen Schwingungszustand



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Karim Kouz (September 2014)

19

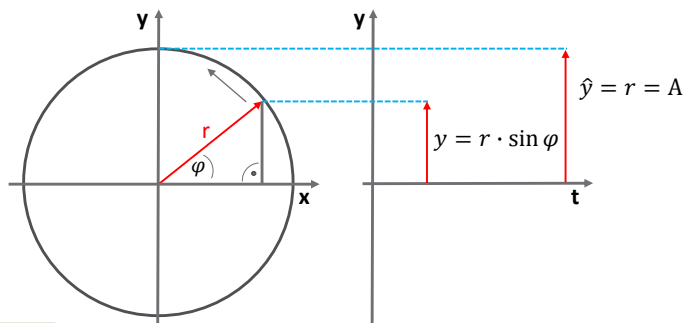
# Mathematische Beschreibung

- Der Phasenwinkel wächst mit der Zeit linear abhängig von der Winkelgeschwindigkeit:

$$\varphi = \omega \cdot t = \frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot t = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t$$

- Wird dieser Ausdruck in den Sinusausdruck eingesetzt, erhält man das Zeit-Elongation-Gesetz:

$$y = A \cdot \sin \omega \cdot t = A \cdot \sin \frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot t = A \cdot \sin 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t$$



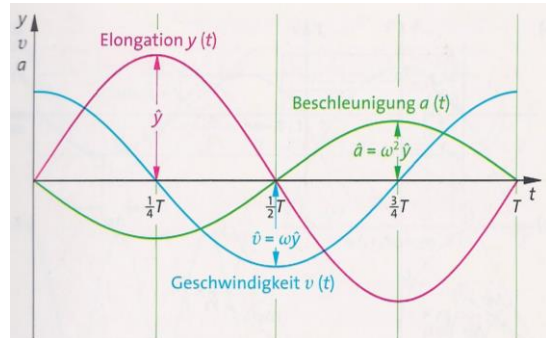
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Karim Kouz (September 2014)

20

# Geschwindigkeit und Beschleunigung

- Um auch ein Zeit-Geschwindigkeit- bzw. Zeit-Beschleunigung-Gesetz zu erhalten, muss die 1. bzw. 2. Ableitung des Zeit-Elongation-Gesetzes gebildet werden
- Zeit-Elongation:  $y = A \cdot \sin \omega \cdot t$
- Zeit-Geschwindigkeit:  $v = \omega \cdot A \cdot \cos \omega \cdot t$
- Zeit-Beschleunigung:  $a = -\omega^2 \cdot A \cdot \sin \omega \cdot t$



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Metzler Physik, J. Grehn, J. Krause, Schroedel-Verlag, 4. Auflage

21

# Rücktreibende Kraft

- Die rücktreibende Kraft wirkt auf den schwingenden Körper und ist ständig zur Ruhelage hingerrichtet
- Sie kann wie folgt angegeben werden:

$$F = m \cdot a = m \cdot (-\omega^2 \cdot A \cdot \sin(\omega \cdot t)) = -m \cdot \omega^2 \cdot y$$

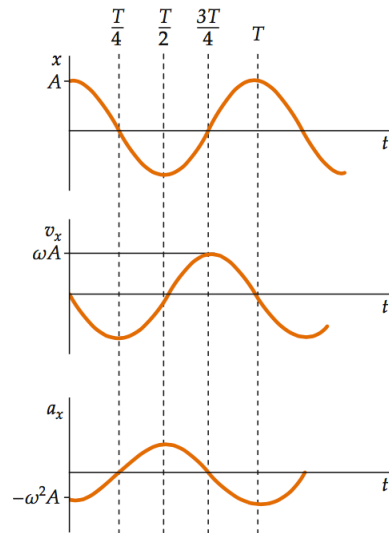
- Für die rücktreibende Kraft gilt:
  - Ständig zur Ruhelage gerichtet
  - Proportional zur Auslenkung, aber in entgegengesetzter Richtung (negatives Vorzeichen)

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

22

# Auslenkung, Geschwindigkeit und Beschleunigung

- Umkehrpunkte:
  - Auslenkung maximal
  - Geschwindigkeit „Null“
  - Rücktreibende Kraft/Beschleunigung maximal
- Ruhelage:
  - Auslenkung „Null“
  - Geschwindigkeit maximal
  - Rücktreibende Kraft/Beschleunigung „Null“
- Die rücktreibende Kraft/Beschleunigung ist proportional zur Auslenkung, zeigt aber in die entgegengesetzte Richtung



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

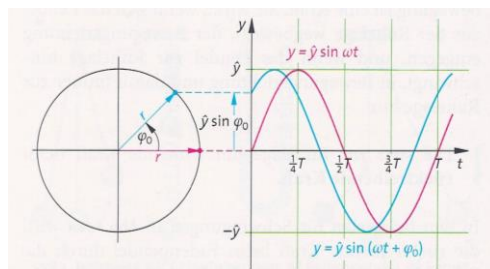
Quelle: Tipler, Paul A.; Mosca, Gene: Komme, Christoph (2013): Physik für Wissenschaftler und Ingenieure, 7. Aufl., v. Jenny Wagner, Springer-Spectrum

23

# Schwingung mit Phasendifferenz

- Schwingungen können phasengleich sein oder außer Phase schwingen
- Um mathematisch diesen Phasenunterschied darzustellen, wird der Winkel im trigonometrischen Ausdruck ergänzt, um den die eine Schwingung der anderen vorausleitet – der **Nullphasenwinkel**:
  - Zeit-Elongation:  $y = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0)$
  - Zeit-Geschwindigkeit:  $v = \omega \cdot A \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0)$
  - Zeit-Beschleunigung:  $a = -\omega^2 \cdot A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0)$

Der Ausdruck in Klammern der trigonometrischen Funktion ( $\omega \cdot t + \varphi_0$ ) wird als Phasenwinkel oder auch Phase bezeichnet.



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

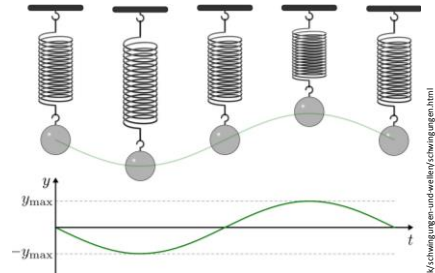
Quelle: Metzler Physik, J. Grehn, J. Krause, Schroedel-Verlag, 4. Auflage

24

# Federpendel

- Ein Körper der Masse  $m$  wird an das eine Ende einer Schraubenfeder gekoppelt
- Wird der Körper aus der Ruhelage ausgelenkt, so führt dieser unter Vernachlässigung von Energieverlusten eine harmonische Schwingung durch
- Diese ohne weitere äußere Einwirkungen ablaufende Schwingung wird **freie Schwingung** oder **Eigenschwingung** genannt
- Für die Periodenzeit gilt:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m}{D}}$$



Quelle: [http://www.grundwissen.de/physik/mechanik/schwingungen\\_und\\_wellen/schwingungen.html](http://www.grundwissen.de/physik/mechanik/schwingungen_und_wellen/schwingungen.html)

25

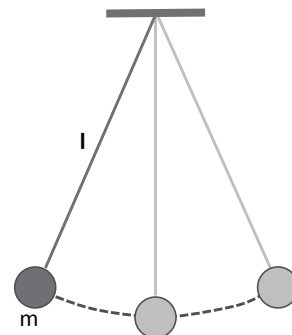
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

# Fadenpendel/Schwerependel

- Besteht aus einem an einem dünnen Faden der Länge  $l$  befestigten Körper mit der Masse  $m$
- Nach Auslenkung des Körpers aus der Ruhelage wird das System im Schwerfeld der Erde bei **kleinen Auslenkungen** und unter Vernachlässigung von Energieverlusten spontan harmonische Schwingungen durchführen
- Für die Periodenzeit gilt:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}}$$

- Aus dem obigen Zusammenhang lässt sich dann die Frequenz der freien Schwingung des Fadenpendels – die **Eigenfrequenz** – berechnen



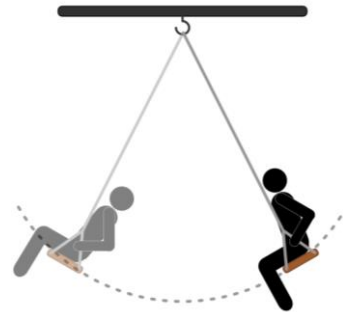
Quelle: Karim Kouz (September 2014)

26

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

# Erzwungene Schwingungen

- Alle im täglichen Leben ablaufenden freien Schwingungen sind gedämpfte Schwingungen
- Damit die Amplitude mit der Zeit nicht abnimmt, werden die Schwingungen periodisch durch eine äußere Kraft erregt
- Dabei nimmt das schwingende System die Frequenz des Erregers an
- Beispiel:
  - Ein Vater gibt seinem Kind auf der Schaukel kontinuierlich Schwung, da dieses alleine noch nicht Schaukeln kann
  - Der Vater hält also die Schwingung aufrecht, die ansonsten aufgrund von Energieverlusten allmählich stoppen würde



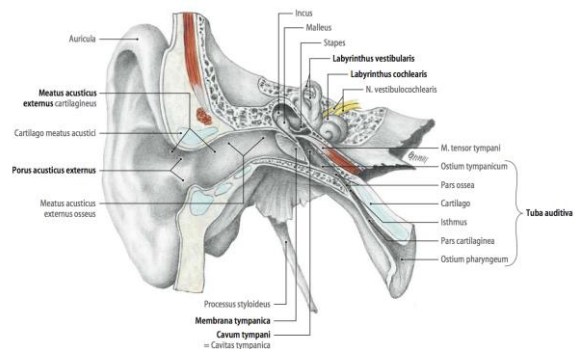
Quelle: <http://www.grundwissen.de/physik/mechanik/schwingungen-und-wellen/schwingungen.html>

27

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

# Schwingungen beim Hörvorgang

- Auch die Bewegung des Trommelfells ist eine erzwungene Schwingung
- Das Trommelfell wird durch Luftdruckschwankungen in Schwingung versetzt und leitet diese über die Gehörknöchelchen weiter



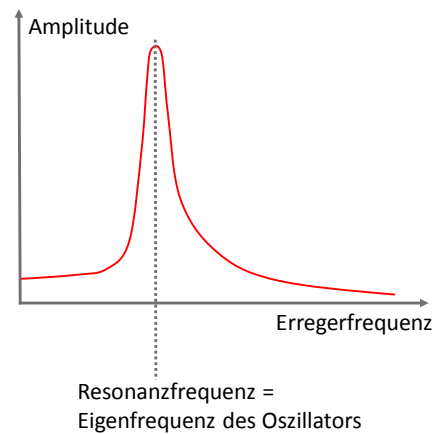
Quelle: Atlas der Anatomie; Thieme; Springer-Verlag

28

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

# 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**



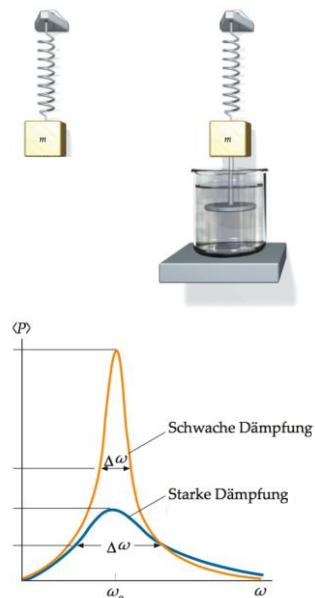
Quelle: Karim Kouz (September 2014)

29

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

# Resonanzfall

- Der Resonanzfall trifft aufgrund einer optimalen Energieübertragung auf
- Die Schwingung lässt sich dabei mit einem Minimum an Energie aufrechterhalten
- Abhängig davon, wie stark die Energieübertragung zwischen erregendem und erregtem System ist, ist die Amplitude unterschiedlich stark ausgeprägt
- Ist die Energieübertragung am effektivsten – also liegt eine schwache Dämpfung des Systems vor – kann dies zur Zerstörung des Systems führen, der Resonanzkatastrophe
- Das Phänomen der Resonanz wird in vielen technischen Geräten ausgenutzt (z.B. MRT, Laser,...)



Quelle: Verändert nach Tipler, Paul A., Mosca, Gene, Kommer, Christoph (2015) Physik. Für Wissenschaftler und Ingenieure, 7. Aufl. Hg. v. Anna Wagner. Springer Spektrum

30

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

# (VII) Mechanik 6 – Wellenlehre

## Wellen

- Eine sich räumlich ausbreitende Veränderung oder Schwingung einer orts- und zeitabhängigen Größe wird als Welle bezeichnet
- Es gibt drei verschiedene Arten von Wellen:
  - Mechanische Wellen
  - Elektromagnetische Wellen
  - Materiewellen
- Zudem unterscheidet man zwischen Longitudinal- und Transversalwellen



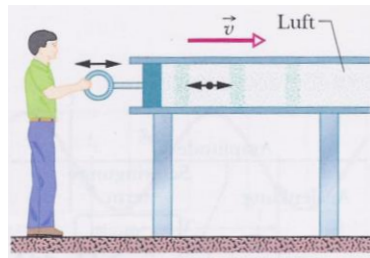
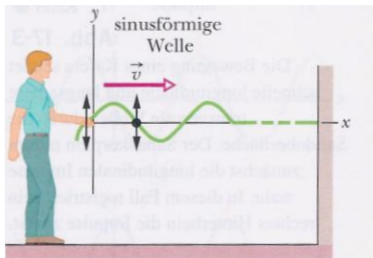
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://www.leifiphysik.de>



# Longitudinal- und Transversalwellen

- Abhängig davon, wie die Auslenkungsrichtung (Schwingungsrichtung) und die Wellenausbreitungsrichtung zueinander stehen, unterscheidet man Longitudinal- und Transversalwellen
- **L**ongitudinalwellen: Schwingungsrichtung parallel zur Ausbreitungsrichtung
- **T**ransversalwellen: Schwingungsrichtung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung



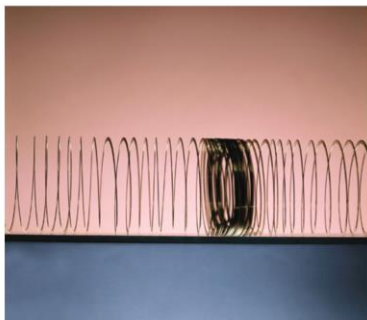
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Physik, Halliday, Resnick, Walker, Wiley-VCH

33

# Longitudinal- und Transversalwellen

- **L**ongitudinalwellen: Schwingungsrichtung parallel zur Ausbreitungsrichtung
- **T**ransversalwellen: Schwingungsrichtung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung



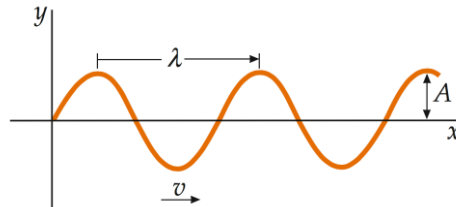
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Tipler, Paul A., Mosca, Gene, Kommer, Christoph (2013) Physik für Wissenschaftler und Ingenieure. 7. Aufl. Hg. v. Jerry Walker. Springer Spektrum

34

# Wellenlänge und Ausbreitungsgeschwindigkeit

- Der Abstand parallel zur Richtung der Wellenausbreitung zwischen zwei Wiederholungen der Wellenform wird als Wellenlänge ( $\lambda$ ) bezeichnet



- Wellen breiten sich mit der sogenannten Ausbreitungsgeschwindigkeit ( $c$ ) aus, für die gilt:

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

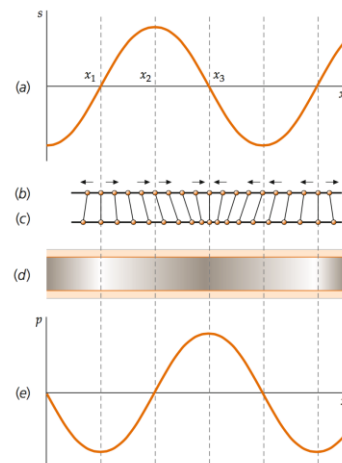
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Tipler, Paul A., Mosca, Gene Kommer, Christoph (2013) Physik für Wissenschaftler und Ingenieure, 7. Aufl. Hg. v. Jerry Wagner, Springer Spektrum

35

# 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



(a) Auslenkung der Luftmoleküle, (b) Moleküle in der Gleichgewichtslage, (c) Positionen der Moleküle nach Eintreffen der Schallwelle, (d) Dichte der Luft in der harmonischen Schallwelle, (e) Druckänderung

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Tipler, Paul A., Mosca, Gene Kommer, Christoph (2013) Physik für Wissenschaftler und Ingenieure, 7. Aufl. Hg. v. Jerry Wagner, Springer Spektrum

36

# Schall

- Schallwellen sind mechanische Wellen und können auf Grundlage des menschlichen Hörens in vier Bereiche eingeteilt werden:
  - Infraschall:  $< 20 \text{ Hz}$
  - Hörschall:  $20 - 20000 \text{ Hz}$
  - Ultraschall:  $20000 - 10^9 \text{ Hz}$
  - Hyperschall:  $> 10^9 \text{ Hz}$
- Die Schallgeschwindigkeit ist im Allgemeinen in Gasen kleiner als in Flüssigkeiten und in Flüssigkeiten kleiner als in Festkörpern ( $\rightarrow$  Anordnungen der Atome/Moleküle)
- Schallgeschwindigkeit in Luft:  $c_{\text{Schall}} = 330 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

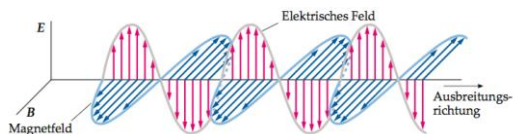
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

37

# 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  $c$ , aus:

$$c = 299792458 \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$



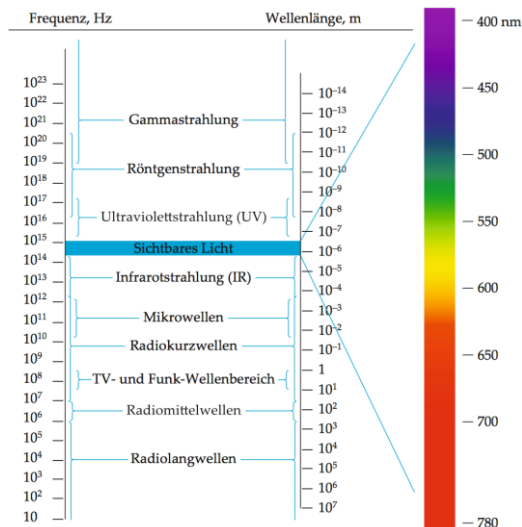
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Tipler, Paul A., Mosca, Gene, Kommer, Christoph (2013) Physik für Wissenschaftler und Ingenieure. 7. Aufl. Hg. v. Jerry Walker. Springer Spektrum

38

# Licht – die bekannteste elektromagnetische Welle

- Das sichtbare Spektrum des Lichts umfasst den Wellenlängenbereich von ca. 380 nm – 780 nm (VIS-Bereich)
- Der Bereich unterhalb des sichtbaren Bereichs ist der UV-Bereich:
  - UV-C: 100 nm – 280 nm
  - UV-B: 280 nm – 315 nm
  - UV-A: 315 nm – 400 nm
- Der Bereich oberhalb des sichtbaren Bereichs ist der IR-Bereich



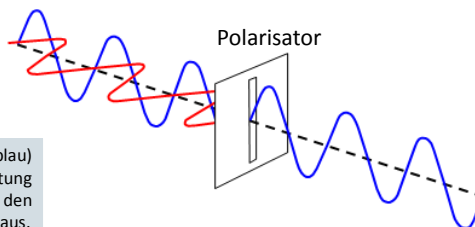
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Tipler, Paul A.; Mosca, Gene: Kommer, Christoph (2013): Physik für Wissenschaftler und Ingenieure, 7. Aufl., v. Jenny Wagner, Springer Spektrum

39

## (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



Exemplarisch sind zwei Schwingungsrichtungen (rot und blau) eingezeichnet, die beide senkrecht zur Ausbreitungsrichtung (gestrichelte Linie) stehen. Der Polarisator „wählt“ von den vielen Schwingungsrichtungen eine, in diesem Fall die blaue, aus.

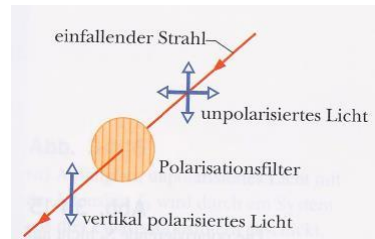
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: verändert nach <http://www.khodphysics.co.uk/quest13/Waves20p/series/polarisation/ed/polarisation/index.html>

40

# Polarisation von Licht

- Das meiste Licht in der Natur ist unpolarisiert (keine feste Schwingungsrichtung)
- Unpolarisiertes Licht kann mit einem Polarisator (z.B. Folie mit parallel angeordneten Schlitzten) polarisiert werden
- Stehen zwei Polarisatoren in Bezug auf ihre Schlitzte senkrecht zueinander, so lassen sie kein Licht (Welle) mehr durch



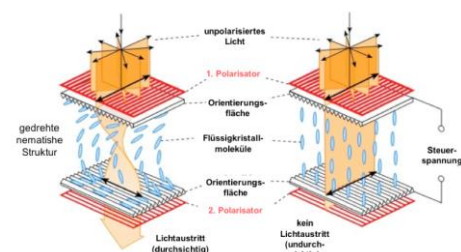
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Physik: Halliday, Resnick, Walker, WILEY-VCH

41

## Exkurs: LCD

- Funktionsweise:
  - 2 Polarisatoren stehen senkrecht zueinander – kein Lichtdurchtritt
  - Flüssigkristalle zwischen den beiden Polarisatoren sind optisch aktiv und speziell ausgerichtet (Orientierungsfläche)
  - Kristalle drehen das Licht um  $90^\circ$ , sodass Licht durchtreten kann
  - Beim Anlegen einer Spannung ändern die Kristalle, abhängig von der angelegten Spannung, ihre Ausrichtung, sodass weniger/kein Licht mehr durchtreten kann



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

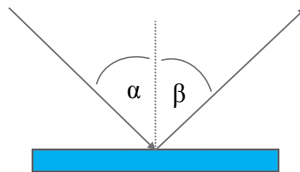
Quelle: Vorlesungsskript Biophysik Sommersemester Universität Bayreuth WS 2012/2013

42

# Reflexion

- Trifft eine Welle auf eine Grenzfläche zwischen zwei verschiedenen Ausbreitungsmedien (z.B. Licht auf Luft-Glas-Grenzfläche), so wird die Welle reflektiert
- Das Reflexionsgesetz stellt diesen Zusammenhang für ebene Wellen dar:

$$\alpha = \beta \text{ (Einfallswinkel = Ausfallswinkel)}$$



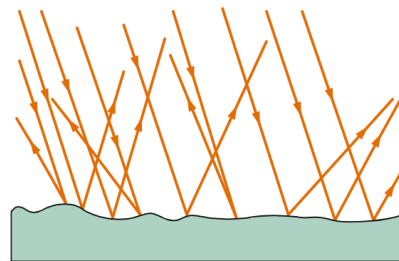
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Karim Kouz (September 2014)

43

# Reflexion

- Das Reflexionsgesetz stellt einen Idealfall dar, der in Wirklichkeit nicht vorkommt, da es keine perfekt reflektierenden Oberflächen gibt
- Ein Teil der Lichtstrahlen folgt also nicht dem Gesetz
- Arten der Reflexion:
  - Gerichtete Reflexion (ideale Reflexion)
  - Diffuse Reflexion (matte Oberflächen reflektieren Lichtstrahlen in jede Richtung und nicht zwangsmäßig gleichmäßig)
  - Gemischte Reflexion (sowohl gerichtet als auch diffus)



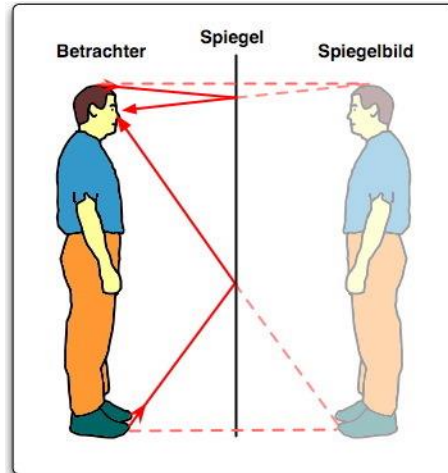
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Tipler, Paul A.; Mosca, Gene; Kommer, Christoph (2015) Physik für Wissenschaftler und Ingenieure: 7. Aufl. Hb. v. Jerry Wagner; Springer Spektrum

44

# Abbildung durch Reflexion

Um das Spiegelbild zu konstruieren, müssen die reflektierten Strahlen in die Ebene des Spiegels hinein verlängert werden.



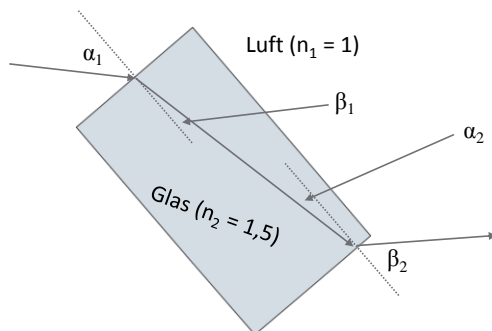
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://physik.ph.gmuend.de/denewerka/arr-physik/arr/physik/identifizierung1.jpg>

45

# Brechung

- Beim Durchgang von Licht durch eine Grenzfläche zweier Ausbreitungsmedien ändert sich die Ausbreitungsrichtung der Welle – es findet Brechung statt



$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)} = n_{21} = \frac{c_1}{c_2}$$

- $n_1 < n_2$ : Strahl wird zum Lot hingebrochen
- $n_1 > n_2$ : Strahl wird vom Lot weggebrochen
- Die Frequenz einer Welle verändert sich bei dem Übergang von einem Medium in ein anderes nicht, die Wellenlänge verändert sich
- Beim senkrechten Einfall des Strahls findet keine Brechung statt!

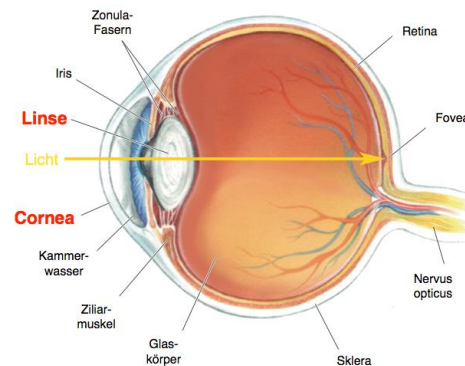
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Karim Kouz (September 2014)

46

# Lichtbrechung im Auge

- Die Brechung von Licht ist maßgeblich an der Bildentstehung im Auge beteiligt
- Beim Übergang des Lichts durch die verschiedenen anatomischen Strukturen des Auges findet an jeder Grenzfläche Brechung statt:
  - Luft – Tränenfilm
  - Tränenfilm – Hornhaut
  - Hornhaut – Kammerwasser
  - Kammerwasser – Linse
  - Linse - Glaskörper



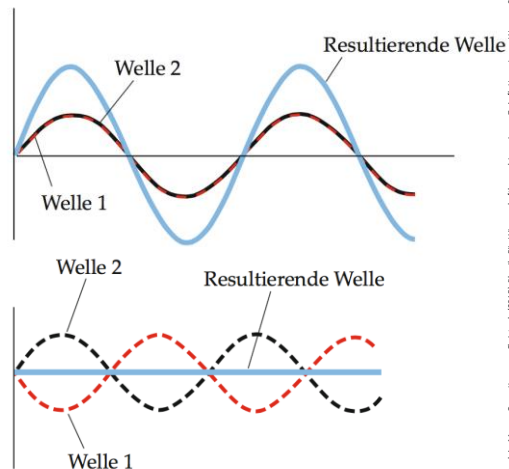
Quelle: Neurowissenschaften, Bear, Connors, 3. Auflage: Springer Verlag

47

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

# Interferenz

- Treffen zwei oder mehrere Wellen an einem Raumpunkt zusammen, so überlagern sich diese
- Abhängig davon, wie groß die jeweiligen Amplituden, Wellenlängen und die Phasenbeziehung zueinander sind, können sich die Wellen gegenseitig auslöschen (destruktive Interferenz) oder verstärken (konstruktive Interferenz)
- Die ausgeprägtesten Erscheinungen erhält man bei Wellen mit gleicher Amplitude, Wellenlänge und fester Phasenbeziehung:
  - Gleiche Phase: maximale Verstärkung
  - Entgegengesetzte Phase: Auslöschung
  - Keine „spezielle“ Phasenbeziehung: teilweise Addition oder Subtraktion



Quelle: Tipler, Paul A., Mosca, Gene, 6. Auflage: Springer Spektrum

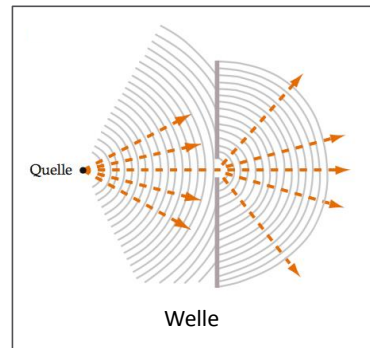
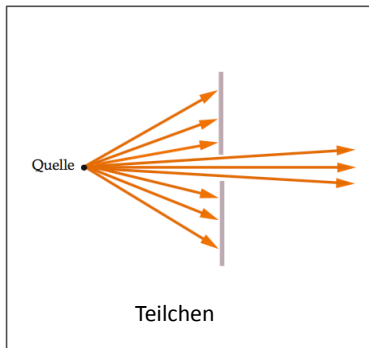
48

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017



# Beugung – Welle vs. Teilchen

- Eindringen von Wellen in den geometrischen Schattenraum hinter Hindernissen oder Öffnungen



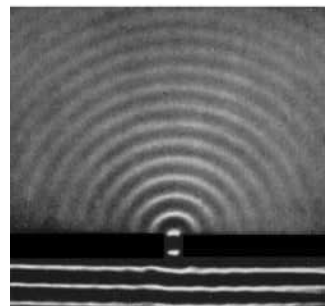
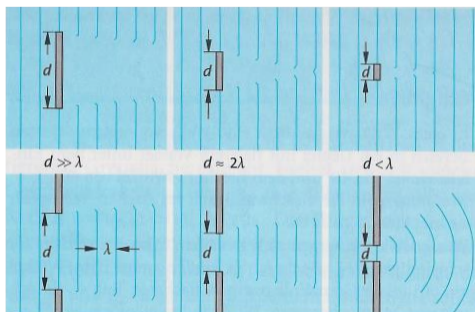
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Tipler, Paul A., Mosca, Gene Kommer, Christoph (2013): Physik für Wissenschaftler und Ingenieure, 7. Aufl., Fig. 1. Jenny Wagner, Springer Spektrum

49

# Beugung

- Eindringen von Wellen in den geometrischen Schattenraum hinter Hindernissen oder Öffnungen



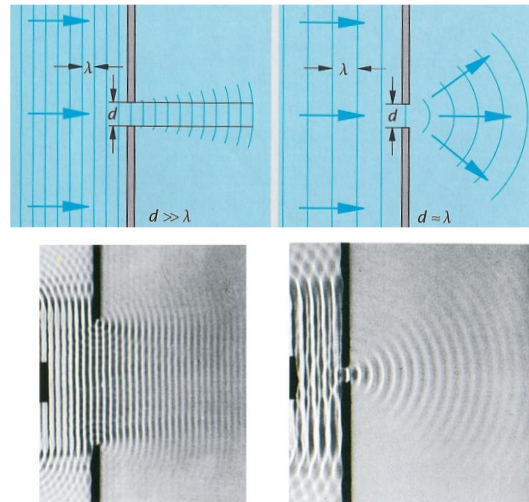
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Metzler Physik 4, Auflage: J. Grehn, J. Kraus, Schroedel Verlag, <http://www.elliphs.de/themenbereiche/mechanische-wellen/versuche>

50

# Beugung

- 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:
  - Größer die Wellenlänge ist
  - Kleiner das Hindernis oder die Öffnung sind



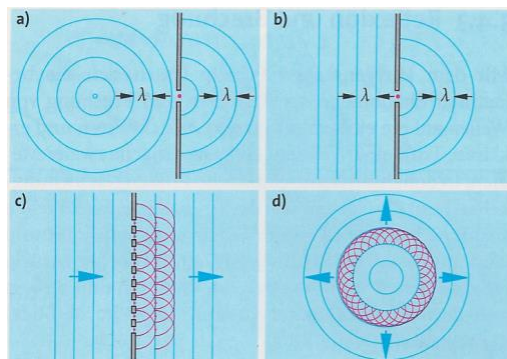
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Metzler Physik 4, Auflage: J. Gerth, J. Kraus, Schroedel Verlag, Tipler, Paul A., Mosca, Gene, Kommer, Christoph [2013] Physik für Wissenschaftler und Ingenieure, 7. Aufl., Hg. v. Jerry Walker, Springer Spektrum

51

# Huygens'sche 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
- Mit Hilfe des Prinzips kann z.B. die Erscheinung der Beugung erklärt werden



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

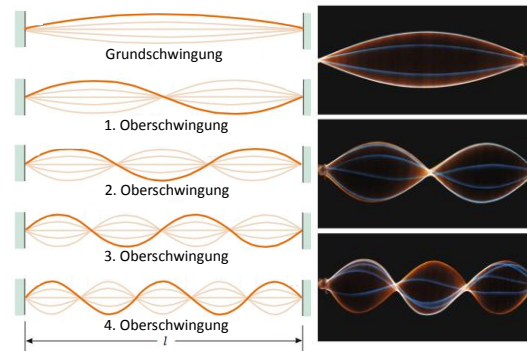
Quelle: Metzler Physik 4, Auflage: J. Gerth, J. Kraus, Schroedel Verlag

52



# Stehende Wellen

- 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



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

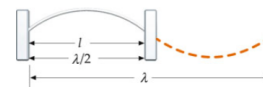
Quelle: Verändert nach Tipler, Paul A., Mosca, Gene Sommer, Christoph (2015): Physik für Wissenschaftler und Ingenieure, 7. Aufl. Hg. v. Jerry Walker, Springer Spektrum

55

# Stehende Wellen

- Bei zwei festen Enden können stehende Wellen nur dann entstehen, wenn sie die folgende Bedingung erfüllen:

$$2 \cdot l = k \cdot \lambda \quad (k = 1, 2, 3, \dots)$$



$l$ : Abstand zwischen den beiden festen Enden

- Stehende Wellen können nur bei bestimmten Wellenlängen entstehen
- Die zu diesen Wellenlängen gehörenden Frequenzen werden Eigenfrequenzen genannt
- Die stehende Welle mit der kleinsten Eigenfrequenz wird Grundschiwingung, alle anderen werden Oberschiwingung genannt

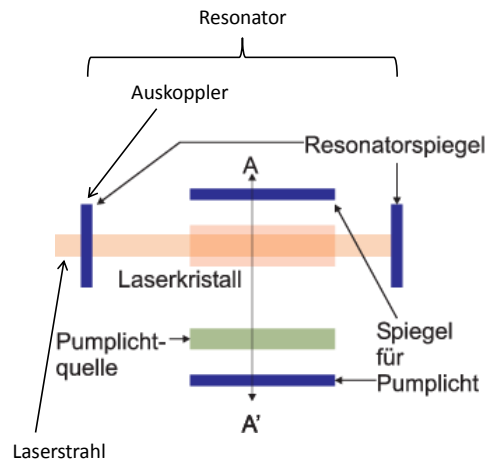
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Verändert nach Tipler, Paul A., Mosca, Gene Sommer, Christoph (2015): Physik für Wissenschaftler und Ingenieure, 7. Aufl. Hg. v. Jerry Walker, Springer Spektrum

56

# Stehende Wellen im Laser

- Viele technische Geräte und auch physiologische Vorgänge beruhen auf dem Prinzip von stehenden Wellen
- So wird z.B. im Inneren eines Lasers ein derartiger Aufbau gewählt, dass stehende Wellen entstehen und am Ende lediglich die Wellenlänge ausstrahlt wird, die eine stehende Welle beschreibt



Quelle: Verändert nach <http://www.physik.uni-erlangen.de/lehre/jip-2012/2484.html>