

## Mechanik der Festkörper, Flüssigkeiten und Gase

### Mechanik der Festkörper

Als Festkörper werden alle Körper bezeichnet, die im festen Aggregatzustand, also in einer kristallinen Struktur vorliegen.

Die Festigkeit eines Kristalls hängt sowohl von den Bindungskräften zwischen den Atomen beziehungsweise Molekülen als auch von der räumlichen Anordnung ab:

- Diamant besteht beispielsweise ebenso wie Graphit aus reinem Kohlenstoff; die Kohlenstoffatome sind allerdings im Diamantkristall anders angeordnet.
- Salze bestehen aus positiv und negativ geladenen Ionen. Die starken Bindungskräfte des Ionengitters haben eine große Härte und Festigkeit der Salzkristalle zur Folge.
- In Metallen sind die einzelnen Kristalle mikroskopisch klein und unregelmäßig angeordnet; sie sind jedoch bei mikroskopischer Betrachtung der Bruchflächen eines Metallstücks deutlich erkennbar.
- Im Vergleich dazu bestehen monokristalline Stoffe aus einer einzelnen Kristallstruktur, so dass sich die mechanischen, thermischen und elektrischen Eigenschaften in den verschiedenen Raumrichtungen unterscheiden.
- Diese Materialien – beispielsweise Glas, Wachs, Teer und viele Kunststoffe – haben keinen kristallinen Aufbau und werden daher als „amorphe“ Stoffe bezeichnet
- 

Im elastischen Bereich ist die relative Längenänderung  $\Delta l$  häufig proportional zur ein-

wirkende Kraft  $F$ . In diesem Fall kann das Hookesche Gesetz in einer allgemeinen Form dargestellt werden

2

Strenggenommen handelt es sich bei amorphen Stoffen um Flüssigkeiten mit einer sehr hohen inneren Reibung („Viskosität“).

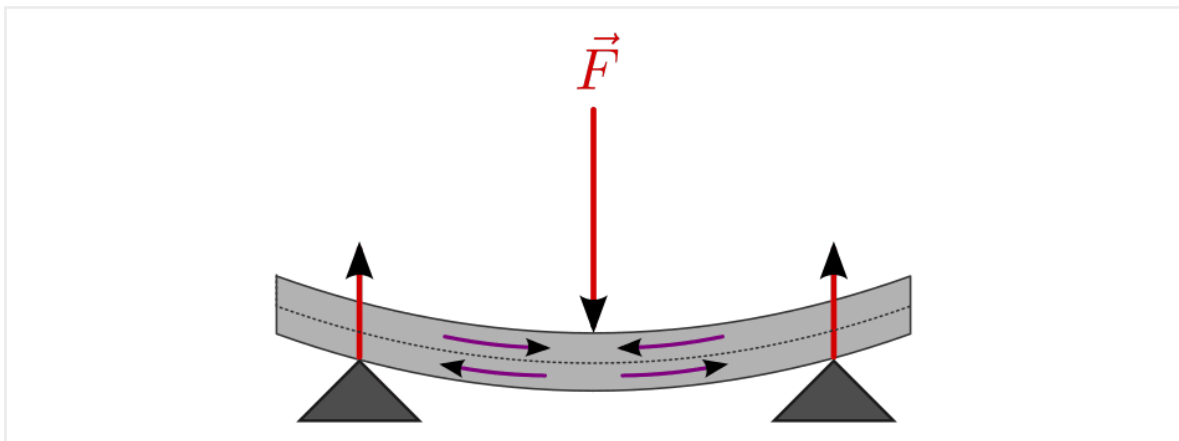
Neben den elastischen und plastischen Verformungen sind auch so genannte viskoelastische Verformungen möglich, bei denen die elastische Verformung mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung eintritt. In diesem Fall bildet sich die Verformung beim Nachlassen der Kraft erst nach einer gewissen Zeit zurück. Beispiele für solche viskoelastischen Stoffe sind hochpolymere Kunststoffe und die menschliche Haut.

### Stauchung von Festkörpern

Bei einer Stauchung wirken Kräfte senkrecht auf die Oberflächen eines Körpers ein

### Biegung

Eine Biegung, beispielsweise eines Balkens, entsteht durch eine Krafteinwirkung auf das eine Ende des Gegenstands, während das andere Ende fest eingespannt ist. Das Produkt aus der Länge  $l$  des Gegenstands und der Kraft  $F$  entspricht dem wirkenden Drehmoment  $M$ .



Als Torsion wird eine Verdrillung eines Körpers, beispielsweise eines zylindrischen Stabes, bezeichnet.

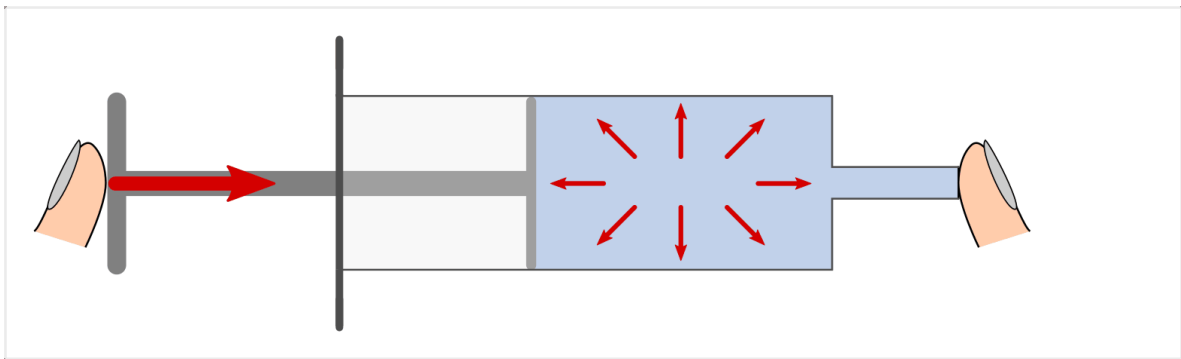
Ist der Kompressionsmodul eines Materials hoch, so bedeutet dies, dass das Material einer Kompression einen hohen Widerstand entgegensetzt, sich also nur schwer komprimieren lässt. Beispielsweise bei Gasen wird

hingegen häufig der Kehrwert des Kompressionsmoduls, die so genannte Kompressibilität  $\kappa = 1/K$  verwendet. Ein Material mit einer hohen Kompressibilität  $\kappa$  ist also leicht zu komprimieren.

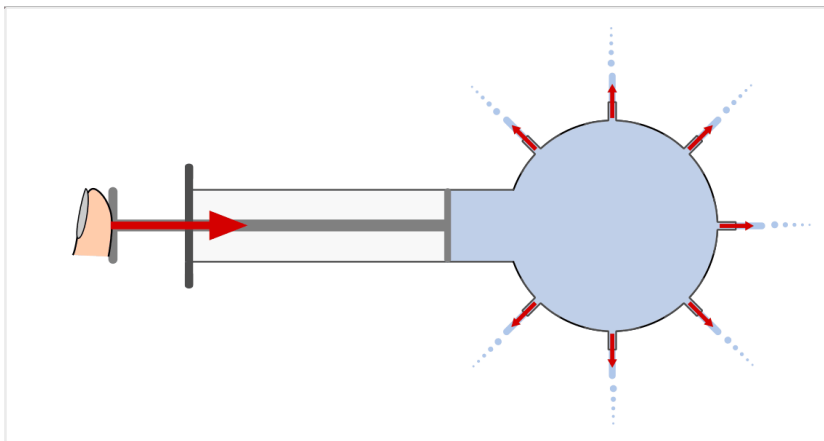
—————>

### Kolbendruck

Übt man mit einem Kolben eine Kraft auf eine Flüssigkeit aus, die sich in einem geschlossenen Behälter befindet, so bleibt das Volumen der Flüssigkeit unverändert; allerdings baut sich im Inneren der Flüssigkeit ein „Gegendruck“ auf, der die von außen einwirkende Kraft ausgleicht.



### Druckausbreitung am Beispiel eines Druckfortpflanzungs-Apparates



### Druckmessung

Die Zunahme des Schweredruckes mit der Höhe der Wassersäule wird bei so genannten „U-Rohr-Manometern“ zur Druckmessung genutzt. Als „Manometer“ bezeichnet man allgemein Druckmessgeräte, die einen externen, relativ zum Luftdruck vorherrschenden Druck  $p_{\text{ext}}$  messen.

## Archimedisches Prinzip und Dichtemessung

Jeder Festkörper verdrängt beim Eintauchen ebenso viel Volumen an Flüssigkeit wie er selbst an Volumen besitzt; dieser empirisch gefundene Sachverhalt wird nach seinem Entdecker Archimedes auch als „Archimedisches Prinzip“ bezeichnet.

- Viskosität (innere Reibung)

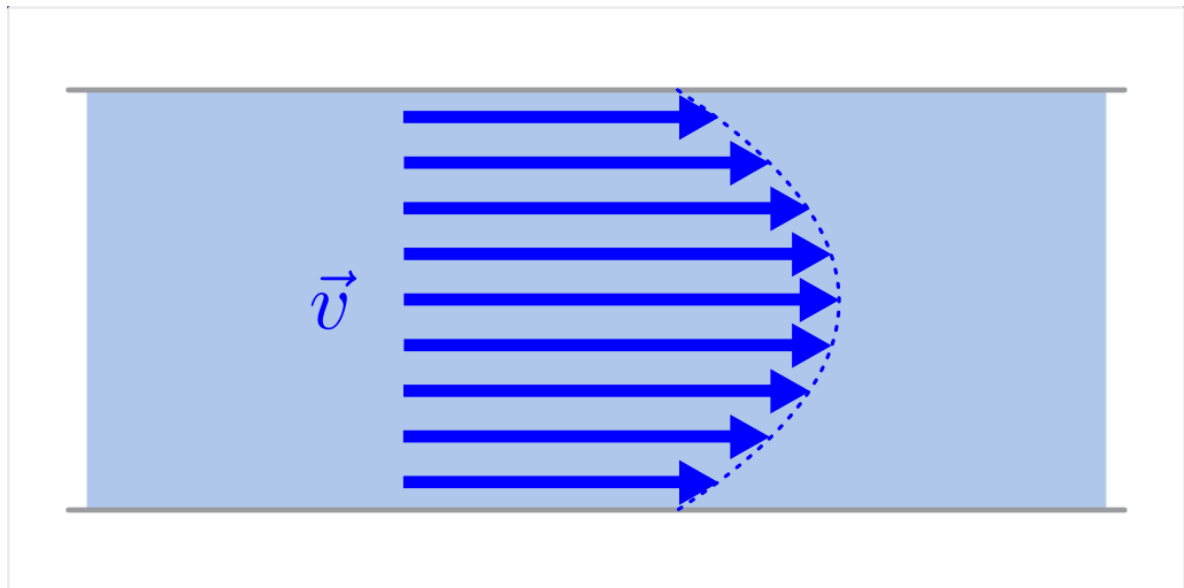
Ist die Reibung innerhalb einer Flüssigkeit nicht vernachlässigbar, so ist eine Kraft beziehungsweise ein Druck nötig, um eine Flüssigkeit gegenüber einem Rohrsystem gleichmäßig zu bewegen. Wie groß die nötige Schubkraft ist, hängt von der Viskosität („Zähigkeit“) der Flüssigkeit ab.

Die Einheit der Viskosität kann nach der obigen Formel als „Pascalsekunde“ ausgedrückt

Viskositäten von Flüssigkeiten werden üblicherweise bei einer Temperatur von 20 °C angegeben, da sie stark temperaturabhängig sind. Bei den meisten Flüssigkeiten nimmt die Viskosität mit zunehmender Temperatur stark ab, bei Gasen ist es umgekehrt

- Laminare und turbulente Strömungen

Bei geringen Geschwindigkeiten treten häufig so genannte laminare Strömungen auf. Dabei bewegen sich die Flüssigkeitsteilchen, als würden sie sich in übereinander geschichteten Lamellen befinden. Das Geschwindigkeitsprofil in einem zylindrischen Rohr ist dabei parabelförmig und nimmt zur Mitte des Rohres hin zu.



Kohäsionskräfte sind im Wesentlichen in Festkörpern und Flüssigkeiten von Bedeutung. In Gasen lassen sich Kohäsionskräfte nur bei sehr hohem Druck oder sehr tiefen Temperaturen beobachten, da die Abstände der Moleküle ansonsten zu groß und ihre Geschwindigkeiten zu hoch sind.

#### Adhäsionskräfte und Benetzbarkeit

Kräfte, die zwischen den Molekülen einer flüssigen und einer festen oder zweier flüssiger beziehungsweise fester Substanzen wirken, bezeichnet man als Adhäsionskräfte.

Flüssigkeiten sind Adhäsionskräfte insbesondere an den Rändern des jeweiligen Gefäßes wirksam.

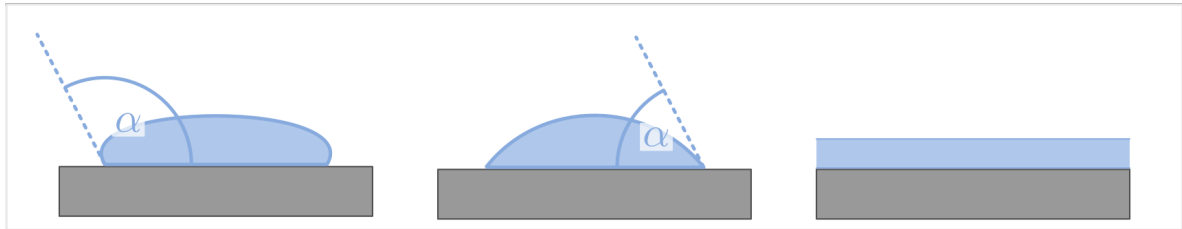
Tropfenform“ bei einer schlecht benetzenden, einer gut benetzenden und einer ideal benetzenden Flüssigkeit.

Je nachdem, ob die Kohäsions- oder die Adhäsionskräfte überwiegen, stellt sich zwischen der Gefäßwand und der Oberfläche der Flüssigkeit ein so genannter „Randwinkel“ ein:

- Ist der Randwinkel  $\alpha$  größer als  $90^\circ$ , so überwiegen die Kohäsionskräfte; die Flüssigkeit ist schlecht benetzend.
- Ist der Randwinkel  $\alpha$  kleiner als  $90^\circ$ , so überwiegen die

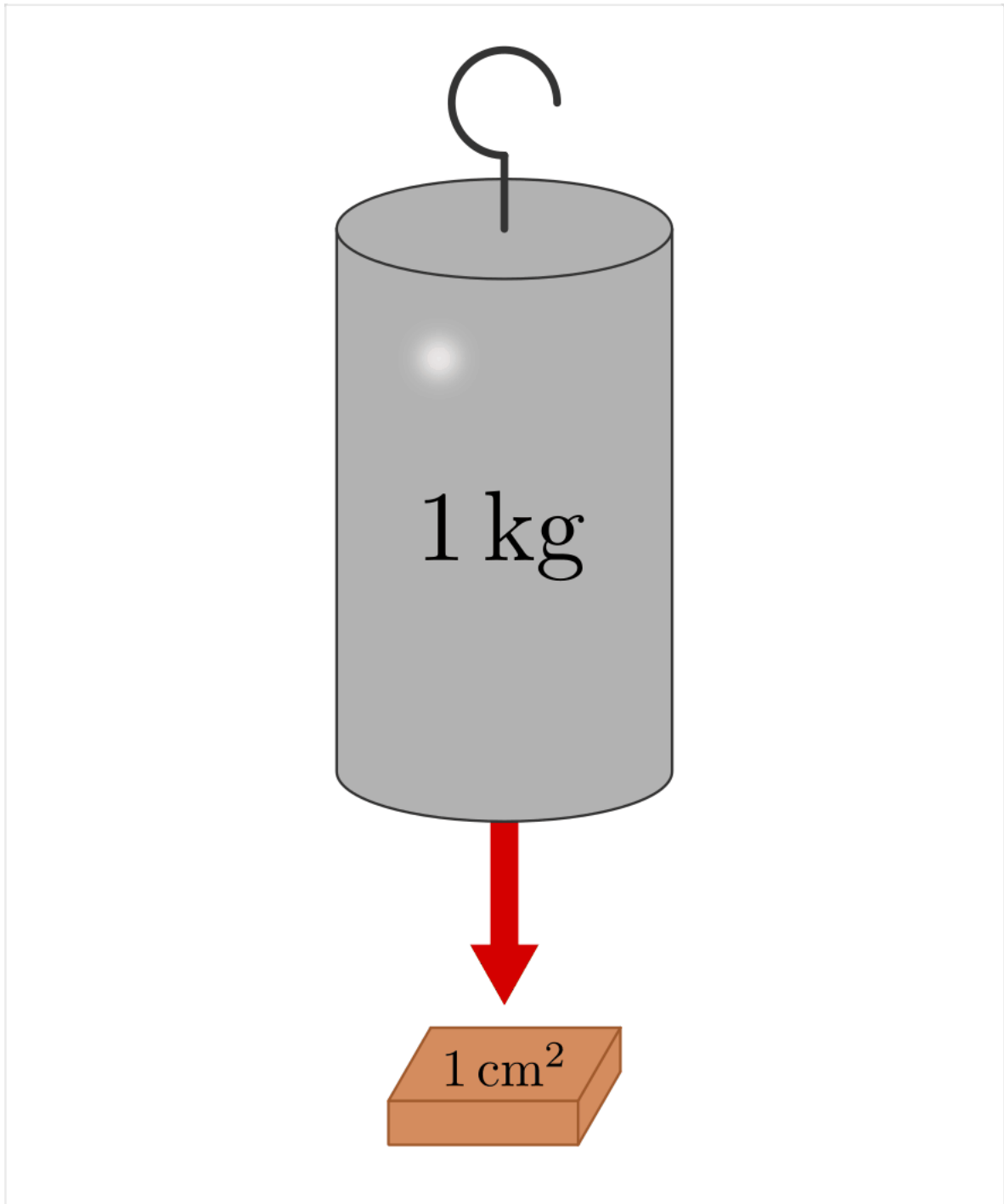
Adhäsionskräfte, und man bezeichnet die Flüssigkeit als benetzend.

- Bei einer ideal benetzenden Flüssigkeit ist  $\alpha = 0^\circ$ .



Bei dieser so genannten „Kapillarität“ herrscht nach der Benetzung der Randfläche durch die aufsteigende Flüssigkeit

Der „normale“ Luftdruck  $p_0 \approx 1,0\text{bar}$  in Bodennähe resultiert aus dem Gewicht der darüber liegenden Luftschichten. Da für  $1\text{ bar} = 10^5\text{ Pa} = 10^5\text{ N/m}^2$  gilt, entspricht der durch die Luft ausgeübte Druck in Bodennähe rund einem Gewicht von 10t je Quadratmeter beziehungsweise 1 kg je Quadrat-Zentimeter.<sup>2</sup>



Nach der Zustandsgleichung für ideale Gase gilt  $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$ , wobei  $n$  die (konstante) Stoffmenge in Mol und  $R = 8,31 \text{ J}$  die allgemeine Gaskonstante ist.

Höhenunterschied  $\Delta h$  gilt:  $\Delta p = -\rho \cdot g \cdot \Delta h$

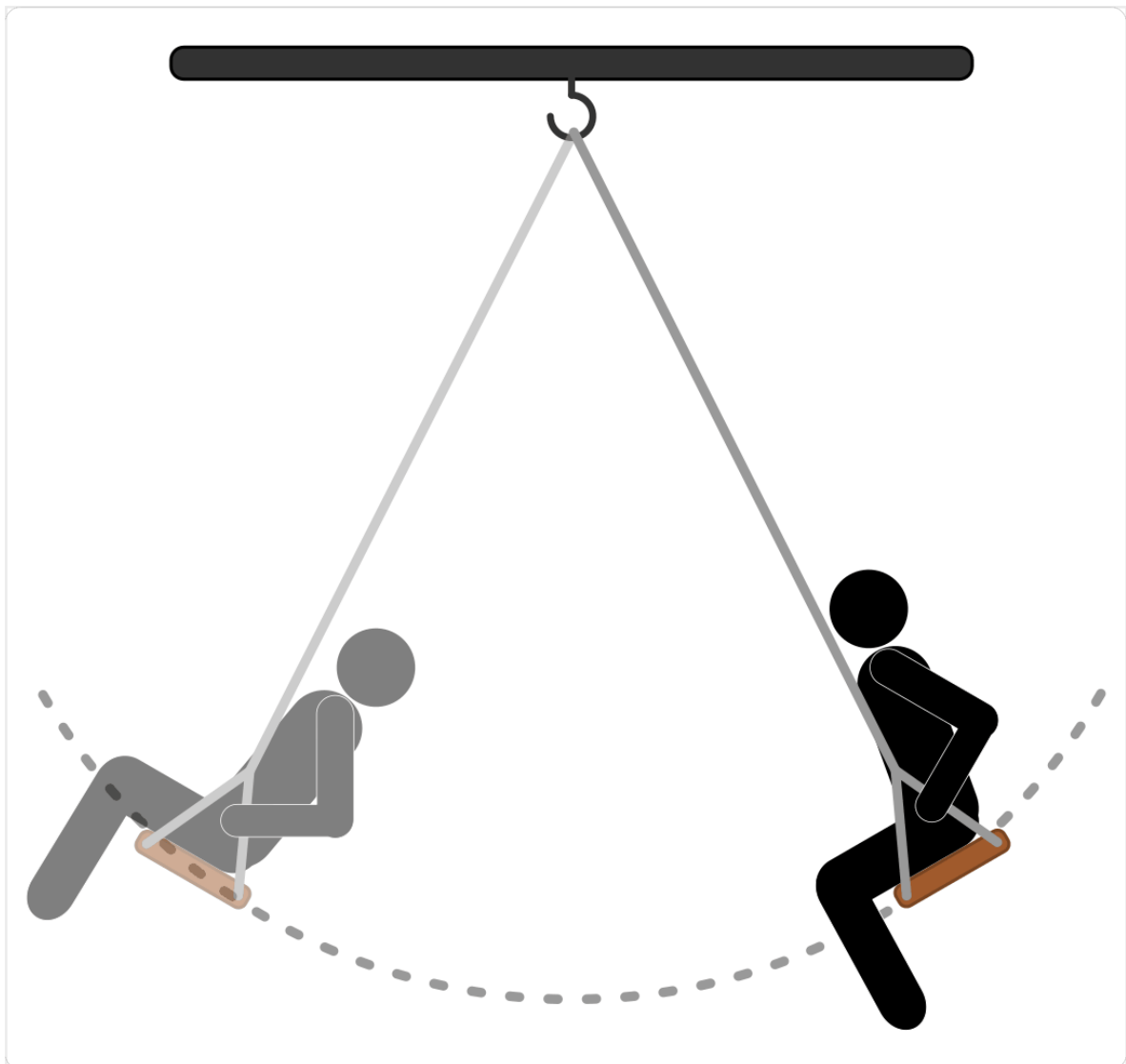


## Schwingungen und Wellen

### Mechanische Schwingungen

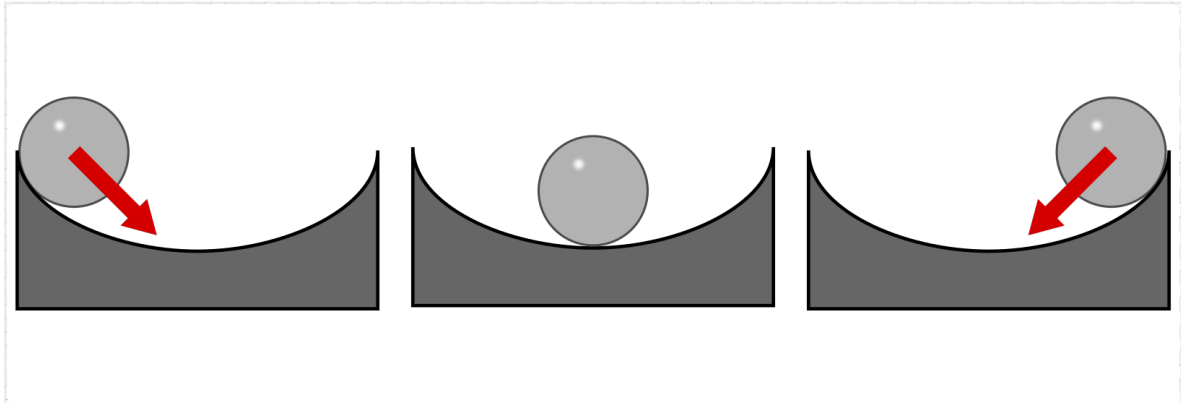
Eine Schwingung entspricht allgemein einer zeitlich periodischen Änderung einer physikalischen Größe. Mechanische Schwingungen im Speziellen beschreiben Vorgänge, bei denen sich ein Körper regelmäßig um eine Gleichgewichtslage („Ruhelage“) bewegt.

Das Schaukeln als mechanische Schwingung.





Schwingungen treten auf, wenn ein schwingungsfähiger Körper (auch „Schwinger“ oder „Oszillator“ genannt) durch Energiezufuhr aus der Gleichgewichtslage („Ruhelage“) aus- gelenkt wird. Zusätzlich ist stets eine zur Ruhelage rücktreibende Kraft vorhanden, die den schwingenden Körper daran hindert die Bahn zu verlassen.



Jede Schwingung kann durch folgende Größen beschrieben werden:

- Die Auslenkung  $y$  (auch „Elongation“ genannt) gibt den momentanen Abstand des schwingenden Körpers von der Gleichgewichtslage an. Die maximale Auslenkung  $y_{\max}$  wird als Amplitude bezeichnet.
- Die Schwingungsdauer  $T$  gibt an, wie viel Zeit der schwingende Körper für eine vollständige Hin- und Herbewegung („Periode“) benötigt.
- Frequenzen werden in der nach Heinrich Hertz benannten Einheit „Hertz“ (Hz) angegeben. Eine Frequenz von  $1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}$  bedeutet, dass in einer Sekunde genau ein Schwingungsvor- gang stattfindet.
- 
- Seilwellen entstehen, wenn ein Seil periodisch in Querrichtung hin- und herbewegt wird.
- Schallwellen entstehen durch schnelle Schwingungen eines elastischen Körpers, bei- spielsweise einer Lautsprechermembran oder einer Stimmgabel.

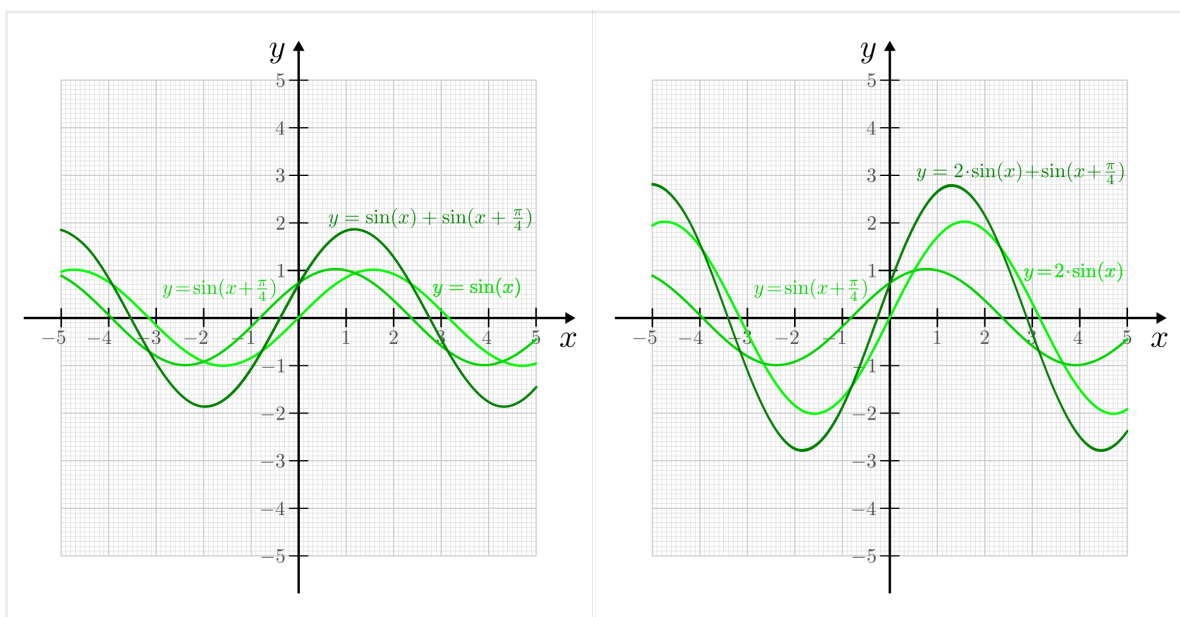
- Wasserwellen entstehen meist dadurch, dass Wind über die ansonsten glatte Wasseroberfläche streift. Die Wasseroberfläche hebt und senkt sich dadurch in periodischen Abständen.

- 

### Superpositionsprinzip

Wellen können sich, ohne sich gegenseitig zu stören, zu einer resultierenden Welle überlagern. Sind die Frequenzen und Amplituden der einzelnen (Teil-)Wellen bekannt, so kann man daraus die resultierende Welle bestimmen.

Überlagern sich zwei sinusförmige Wellen mit gleicher Ausbreitungsrichtung und gleicher Frequenz, so entsteht wiederum eine sinusförmige Welle mit der gleichen Frequenz. Die Amplitude und Phase der resultierenden Schwingung ist von denen der einzelnen Wellen abhängig



### Interferenz-Effekte

Treffen an einer Stelle zwei oder mehrere Wellen aus unterschiedlichen Richtungen aufeinander, so findet dort wiederum eine Überlagerung der einzelnen Wellenamplituden statt

- Kohärenz und Gangunterschied

Dauerhaft bilden sich Interferenz-Effekte nur dann aus, wenn die sich überlagernden Wellen eine gleiche Frequenz und eine feste Phasenbeziehung zueinander haben. Die Wellen müssen also von gleich schnell schwingenden Erregern ausgehen, die sich relativ zueinander in Ruhe befinden, sich also nicht voneinander entfernen oder aufeinander zubewegen. Erfüllen zwei oder mehrere Wellenzüge diese beiden Bedingungen, so bezeichnet man sie als kohärent.

- 

Haben beide Wellen zu Beginn den gleichen Auslenkungszustand (die gleiche Phase), so ergibt sich genau dann ein Interferenz-Maximum, wenn sich die beiden Weglänge um ein Vielfaches einer ganzen Wellenlänge unterscheiden. Es muss in diesem Fall also für den so genannten „Gangunterschied“  $\Delta s = s_2 - s_1$  folgendes gelten:

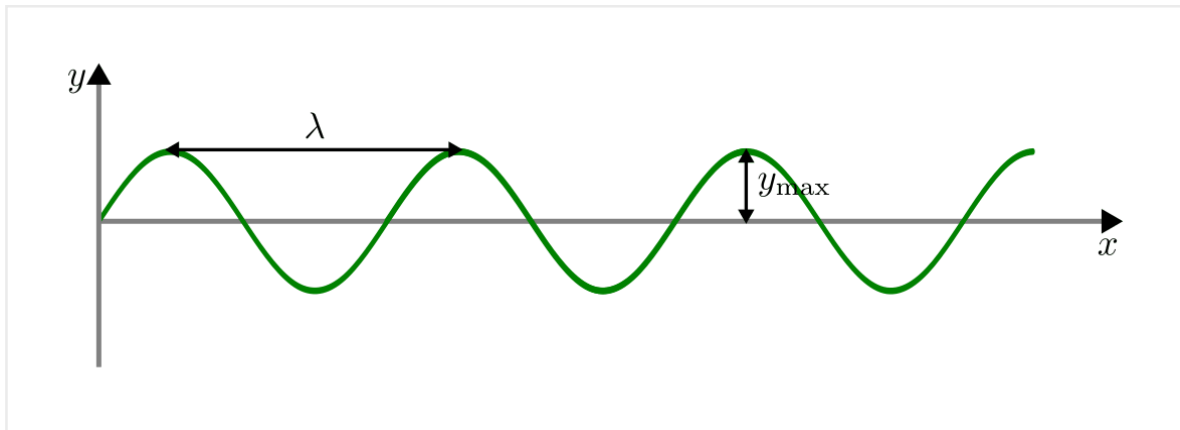
$$\Delta s = n \cdot \lambda ; n=0, 1, 2, ..$$

Die Grundschiwingung hat stets die größte Amplitude und ist ausschlaggebend für die Frequenz der sich ausbreitenden Welle. Die zusätzlich auftretenden Oberschwingungen hingegen modifizieren die Wellenkurve, so dass sich beispielsweise bei verschiedenen Musikinstrumenten auch dann unterschiedliche Klänge ergeben, wenn die Instrumente perfekt gestimmt sind und der gleiche „Ton“ gespielt wird.

- Mathematische Beschreibung von Wellen

Die Welle kann somit durch folgende Formel charakterisiert werden:

$$y(x) = y_{\max} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \lambda x)$$



Wellenmuster bleiben – abgesehen von stehenden Wellen – allerdings nicht an Ort und Stelle, sondern bewegen sich im Laufe der Zeit weiter. Bewegt sich die Welle beispielsweise in positiver  $x$ -Richtung, so wandert das Wellenmuster in der Zeit  $\Delta t$  um die Länge  $\Delta x$  weiter.

$$y(x,t) = y_{\max} \cdot \sin(k \cdot x - \omega \cdot t)$$

Die Kreiswellenzahl  $k$  gibt an, wie viele Wellen in eine bestimmte Längeneinheit (beispielsweise cm oder m) hinein passen. Je kürzer also die Wellenlänge  $\lambda$  einer Welle ist, desto größer ist also ihr  $k$ -Wert.

—————>

## Akustik

Akustik ist die Wissenschaft der Schallentstehung, der Schallausbreitung und der damit verbundenen Erscheinungen.

## Eigenschaften von Schall

Als „Schall“ bezeichnen wir alle Klänge, Geräusche usw. die Menschen und/oder Tiere mit ihrem Gehör wahrnehmen können. Damit Schall entstehen kann, muss ein mechanischer Körper in einen entsprechenden Schwingungszustand gebracht werden.

Je höher die Frequenz ist, mit der eine Schallquelle schwingt, desto höher klingt der Ton, den sie erzeugt. Für Menschen hörbare Frequenzen liegen dabei in einem Frequenzbereich von etwa 15 Hz bis 20 kHz. Die obere Grenze („Hörschwelle“) nimmt allerdings mit zunehmendem Alter deutlich ab, d.h. ältere Menschen können hohe Töne deutlich schlechter hören, teilweise sogar überhaupt nicht mehr.

Der Frequenzbereich bis 15 Hz wird als Infraschall, der Bereich von etwa 20 kHz bis 10 GHz als Ultraschall bezeichnet. Viele Tierarten verständigen sich im Ultraschallbereich, beispielsweise Nachtfalter, Fledermäuse und Delfine (bei Frequenzen von 100 bis 200 kHz).

Die Lautstärke von Schall kann anhand des so genannten Schall-Leistungs- Pegels gemessen, der folgendermaßen definiert ist: Der Schall-Leistungs-Pegel hat keine Einheit; dennoch wird der sich ergebende Zahlenwert zur besseren Übersichtlichkeit mit Dezibel (dB) bezeichnet.

	200	
	180	
Gewehrschuss (in Mündungsnähe)	160	Unmittelbare Schädigung möglich
Düsenflugzeug (in 30 m Entfernung)	140	
Presslufthammer (in 1 m Entfernung)	120	Schmerzgrenze
Diskotheek, Rockkonzert (in Bühnennähe)	100	Hörschäden bei jahrelanger Belastung
Hauptverkehrsstraße	80	
Gespräch, leises Radio	60	Beginn von Konzentrationsstörungen
Flüstern	40	
Leises Blätterrauschen	20	Erholung, Ruhe, Schlaf
Stille	0	Hörschwelle

## Doppler-Effekt

Bewegen sich eine Schallquelle und/oder ein Schallempfänger aufeinander zu, so tritt der nach Christian Doppler benannte Doppler-Effekt auf. Aus dem Alltag kennt man zum Beispiel die Erfahrung, dass ein sich näherndes Fahrzeug Töne mit zunehmender Frequenz von sich gibt, während die Töne eines sich entfernenden Fahrzeugs zunehmend tiefer werden

Boote, die sich schnell über das Wasser bewegen, ziehen ebenfalls einen „flachen Kegel“ an Wellen hinter sich her. Einen Mach-Kegel kann man sich ähnlich vorstellen, nur eben dreidimensional. Je höher die

Geschwindigkeit des Bootes beziehungsweise Überschallflugzeugs ist, desto „schmäler“ und „länger“ wird der Kegel.

Für Beobachter auf dem Boden ist die Situation eine andere: Sie hören einen heftigen Knall, wenn sie vom nach Ernst Mach benannten „Mach-Kegel“ gestreift werden.