

<http://maren.desy.de/hex/holm>

Experimentalphysik I/II für Studierende der Biochemie/Molekularbiologie, Biologie und Zahnmedizin

Transparente zur Vorlesung

WS 2005/06, U. Holm

Einleitung	Elektrizität und Magnetismus
Physikalische Größen und Einheiten	Optik
Mechanik	Atom- und Kernphysik
Wärmelehre	Steuerung und Regelung
Schwingungen und Wellen	

Wärmelehre

Wärmesinn macht Angabe, ob Körper heiß oder kalt. Diesen **thermischen Zustand** eines Körpers nennt man **Temperatur** (neue Basisgröße).

Temperatur **wird** zunächst **über Materialeigenschaften definiert** (z.B. Längenausdehnung eines Stabes mit wachsender Temperatur). Dazu ist folgender Satz wichtig:

Bringt man **zwei Körper verschiedener Temperatur in** (guten) **Kontakt**, so nehmen sie nach gewisser Zeit **dieselbe Temperatur** an. Der wärmere Körper kühlt sich dabei ab, der kühlere erwärmt sich.

Definition der **Celsius-Skala** (“centigrade”):

Zwei Fixpunkte 0°C , 100°C (Schmelzpunkt bzw. Siedepunkt von Wasser bei Normaldruck), **dazwischen willkürliche Unterteilung in 100 gleiche 1°C -Schritte**.

Einteilung hängt von Thermometermaterialien ab (z.B. Hg/Glas), da sich Materialien **nicht gleichmäßig ausdehnen**.

Temperatursinn der Haut

Der Temperatursinn der Haut hat 2 Qualitäten, den **Kaltsinn** und den **Warmsinn**: Es gibt auf der Haut spezifische Kalt- und Wärmepunkte, bei denen sich jeweils nur Kalt- oder Warmempfindungen auslösen lassen.

Handflächen: 1–5 Kaltpunkte/cm²; 0,4 Wärmepunkte/cm²

Gesicht: 16–19 Kaltpunkte/cm²; Wärmepunkte lassen sich nicht mehr auflösen

Adaption der Temperaturempfindung:

In einem mittleren Temperaturbereich (**Zone der Indifferenztemperatur, 31–36°C**) führen Erwärmung oder Abkühlung nur vorübergehend zu einer Warm- bzw. Kaltempfindung. Oberhalb und unterhalb hat man dauernde Warm- bzw. Kaltempfindung.

Weber-Dreischalenversuch:

Je eine Schale mit kaltem, lauwarmer und warmen Wasser.

Je eine Hand ins kalte bzw. warme Wasser. Dann beide Hände ins lauwarmer Wasser: für die eine Hand fühlt es sich warm, für die andere kalt an.

Offenbar kann es zu einer Warm- oder Kaltempfindung kommen, je nachdem von welcher Ausgangstemperatur ausgegangen wurde.

Thermometer

Temperaturmessung ist wegen nicht-linearer Ausdehnung abhängig vom Thermometer!

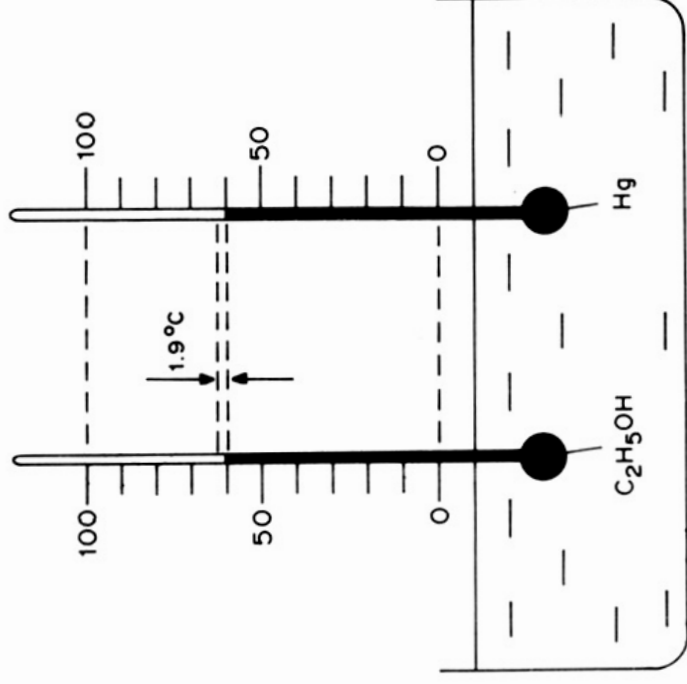


Abb. 6.1. Vergleich eines alkoholgefüllten mit einem quecksilbergefüllten Thermometer bei linearer Unterteilung. Die nichtlineare Volumenausdehnung führt dazu, daß die von diesen Thermometern gemessenen Temperaturen nur in den Fixpunkten übereinstimmen. Zwischen 0°C und 100°C ergeben sich maximale Unterschiede bis zu etwa 2°C

Fieberthermometer

Bei Abkühlung reißt Quecksilberfaden ab, maximale Temperaturanzeige bleibt erhalten.

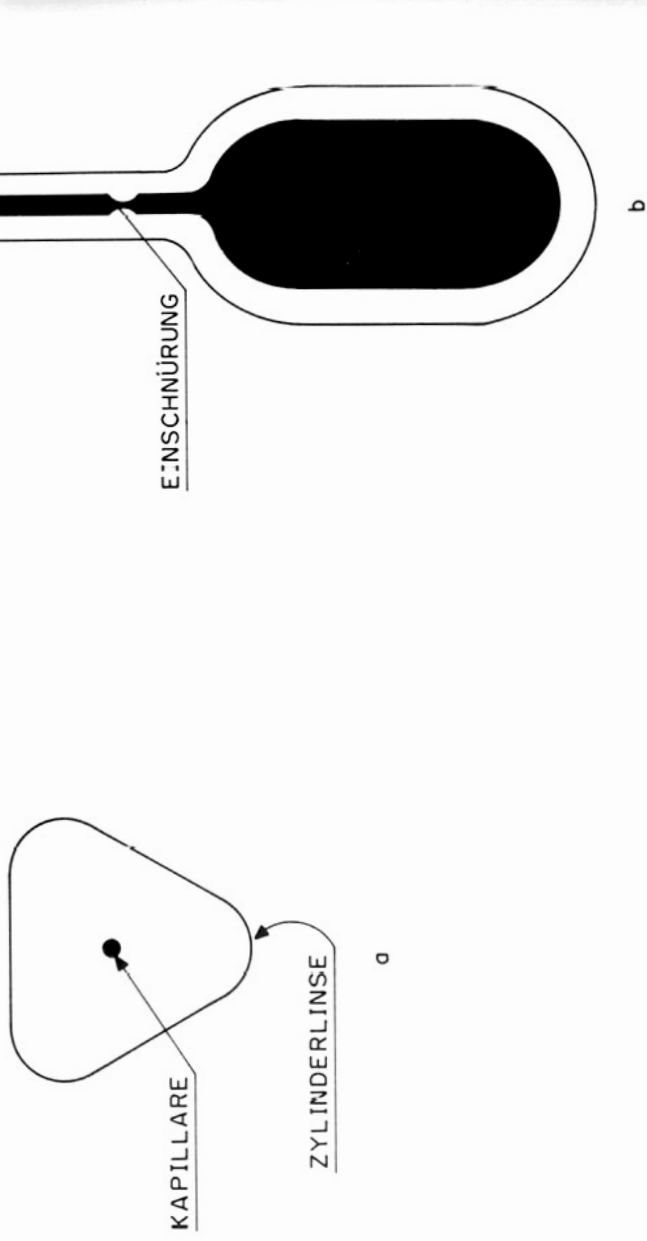


Abb. 6.3. Quecksilberthermometer. **a** Querschnitt der Kapillare, **b** Vorratsgefäß und Einschnürung der Kapillare

Die neue SI-Einheit **Kelvin** (K) wird über thermodynamischen Kreisprozess (Carnot) definiert:

Tripelpunkt des Wassers soll sein **273,16 K**. 1 K ist dann 1/273,16 der absoluten Temperatur des Tripelpunktes von Wasser.

Thermische Eigenschaften von Materie, die zum Bau eines Thermometers genutzt werden können:

a) **Lineare Ausdehnung** $\Delta \ell$ eines Stabes der Länge ℓ_0 bei Temperaturerhöhung Δt :

$$\ell = \ell_0 + \Delta \ell = \ell_0(1 + \alpha \Delta t)$$

α : linearer Ausdehnungskoeffizient

Fe (20°C): $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C} = 1,2 \cdot 10^{-5} / \text{K}$

b) **Volumenausdehnung**:

$$V = V_0(1 + \gamma t), \quad \gamma \approx 3\alpha$$

- c) Der elektrische Widerstand nimmt bei Metallen mit der Temperatur zu.
- d) Thermoelemente: Elektrische Thermospannung, wenn zwei Lötstellen zwischen verschiedenen Metallen unterschiedliche Temperaturen haben.

Gasgesetze

Ideale Gase erfüllen folgende vereinfachenden Annahmen:

- 1) Gase bestehen aus punktförmigen Molekülen.
- 2) Zwischen den Molekülen wirken keine Kräfte.
- 3) Alle Stöße sind voll elastisch.

Bei Normalbedingungen ($t = 0^\circ \text{C}$ bzw. $T = 273,15 \text{ K}$; $p = 1 \text{ atm} = 1013 \text{ hPa}$) verhalten sich Luft, H_2 , He wie ideale Gase.

Reale Gase verhalten sich bei starken "Verdünnungen" ideal.

Zustand eines Gases lässt sich durch drei Größen beschreiben:
Druck p , Volumen V , (absolute) Temperatur T .

Beziehungen zwischen p, V, T :

- **Boyle-Mariotte-Gesetz:** $p \cdot V = \text{const}$, ($T = \text{const}$, **Isotherme**)
- **Gay-Lussac-Gesetz A:** $V_t = V_0(1 + \gamma t)$, ($p = \text{const}$, **Isobare**)

Volumenausdehnungskoeffizient $\gamma = 1/273,15^\circ\text{C}$ für alle idealen Gase!

V_t : Volumen bei $t^\circ\text{C}$,
 t : Temperatur in $^\circ\text{C}$,
 V_0 : Volumen bei 0°C .

Andere Formulierung:
$$\frac{V_T}{T} = \frac{V_0}{T_0}$$

V_T : Volumen bei $T\text{K}$,
 T : absolute Temperatur in K ,
 V_0 : Volumen bei 0°C ,
 T_0 : $273,15\text{ K}$

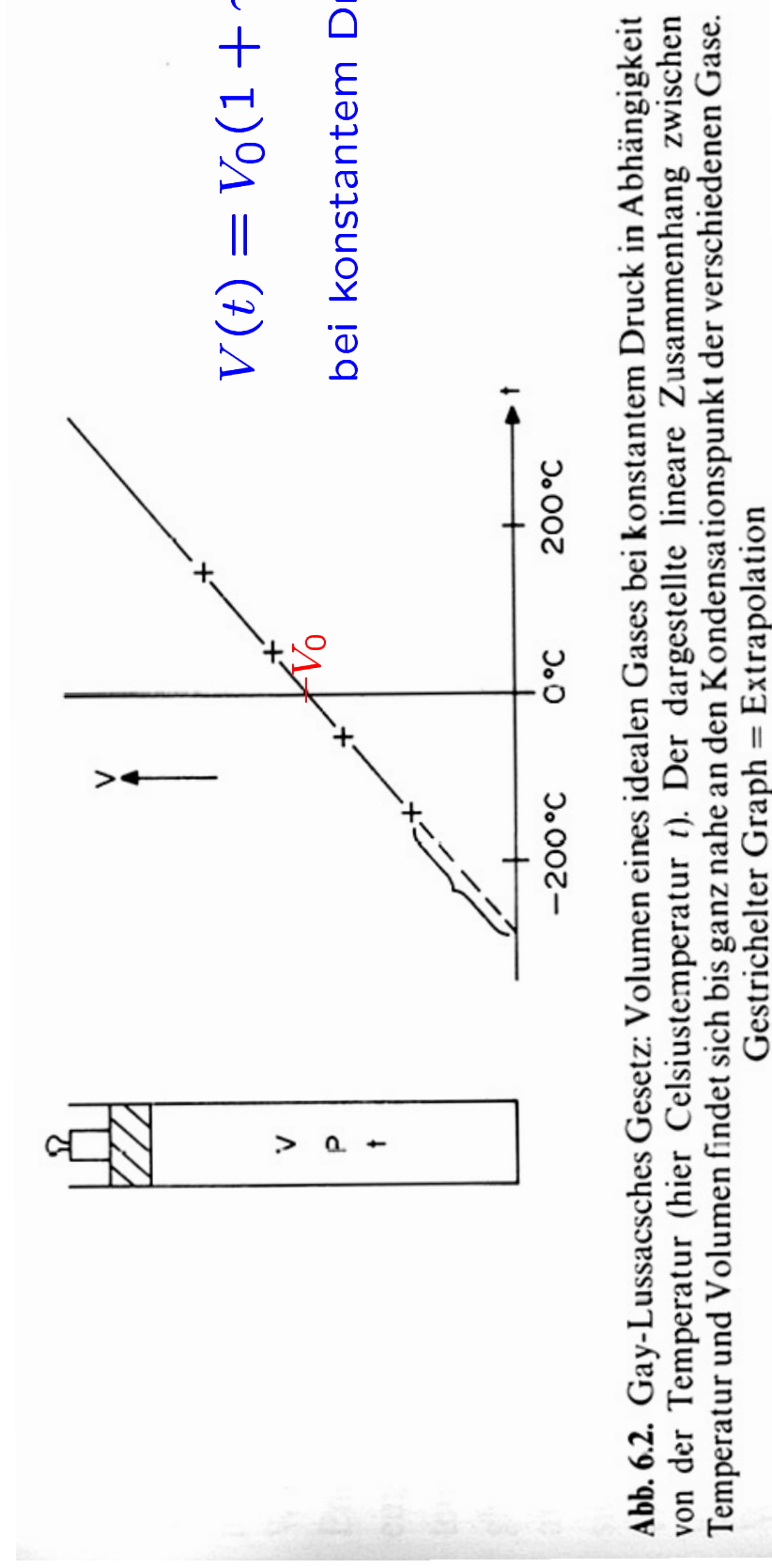
- **Gay-Lussac-Gesetz B:** $p_t = p_0(1 + \gamma t)$, ($V = \text{const}$, **Isochore**)

Auch hier $\gamma = 1/273,15^\circ\text{C}$!

Andere Formulierung:
$$\frac{p_T}{T} = \frac{p_0}{T_0}$$

p_T : Druck bei $T\text{K}$,
 p_0 : Druck bei 0°C ,

Gay-Lussac



Gasthermometer

$$T/T_E = p/p_E$$

bei konstantem Volumen.

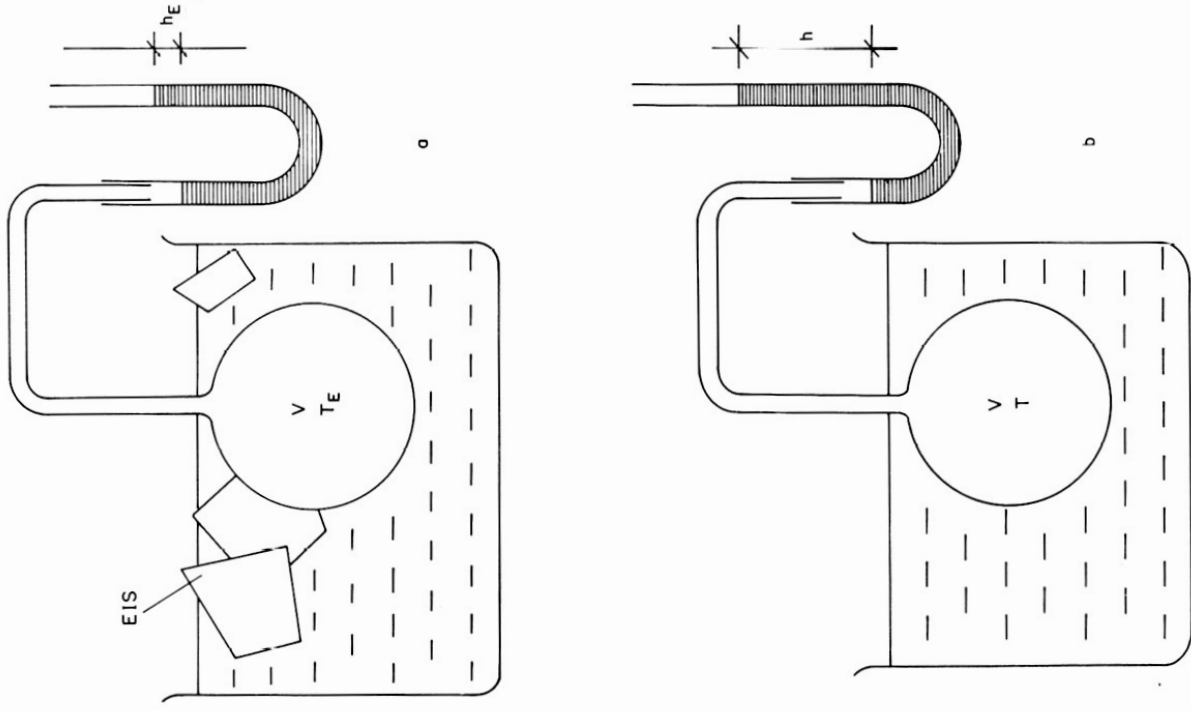


Abb. 6.10. Temperaturmessung mit dem Gasthermometer. Der Druck im Gasbehälter wird einmal für T_E (a) und dann für T (b) mittels eines U-Rohr-Manometers gemessen. Der dem Meßvolumen zugewandte Flüssigkeitsspiegel im U-Rohr wird immer an derselben Stelle gehalten, so daß das Volumen im Gasthermometer konstant bleibt

Zustandsgleichung idealer Gase aus der Verknüpfung obiger Gesetze:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

n : Anzahl der Mole,

T : absolute Temperatur;

$R = 8,31 \text{ J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ ist **allgemeine Gaskonstante**.

Ein Mol ($n = 1$) eines Gases nimmt unter Normalbedingungen ($p_0 = 1 \text{ atm} = 1013 \text{ hPa}$; $T_0 = 273,15 \text{ K}$) das sog. Molvolumen $V_0 = 22,4 \text{ l} = 22,4 \text{ dm}^3$ ein.

Zustandsgleichung realer Gase:

Gegenüber der idealen Gasgleichung muss das “Eigenvolumen” der Moleküle und sog. “Binnendruck” berücksichtigt werden.

Für $n = 1$ gilt

$$\left(p + \frac{a}{V_m^2} \right) (V_m - b) = R \cdot T$$

Kinetische Gasttheorie

In jedem Stoff sind Atome bzw. Moleküle in (Temperatur-) Bewegung.

Feste Körper: Teilchen **schwingen um Gleichgewichtslage**.

Flüssigkeiten: Teilchen bewegen sich auf **regellosen Zickzackbahnen** (Brownsche Molekularbewegung).

Gase: **geradlinige Bewegung bis zum nächsten (elastischen) Stoß**. Bei Gasen stellt sich eine Maxwell'sche Geschwindigkeitsverteilung ein.

Senkrechter elastischer Stoß eines Teilchens mit Impuls $\vec{p}$ auf Wand:

Impuls 2 $\vec{p}$ wird auf Wand übertragen (denn Teilchen hat hinterher Impuls $-\vec{p}$ und es gilt Impulserhaltung).

Impuls 2 p auf Wand bewirkt für eine **kurze Zeit Δt** eine **Kraft F** , denn es gilt Newton II:

$$F = m \cdot a = \frac{\Delta p}{\Delta t} \Rightarrow \Delta p = 2p = F \cdot \Delta t$$

Während dieser Zeit wirkt Druck auf Wand:

$$\text{Druck } p = \frac{\text{Kraft } F}{\text{Fläche } A}$$

Geschwindigkeitsverteilung von Gasmolekülen

Mittlere Geschwindigkeit $v_m \propto \sqrt{T}$
 Außerdem: $v_m \propto 1/\sqrt{M}$, M : Molmasse

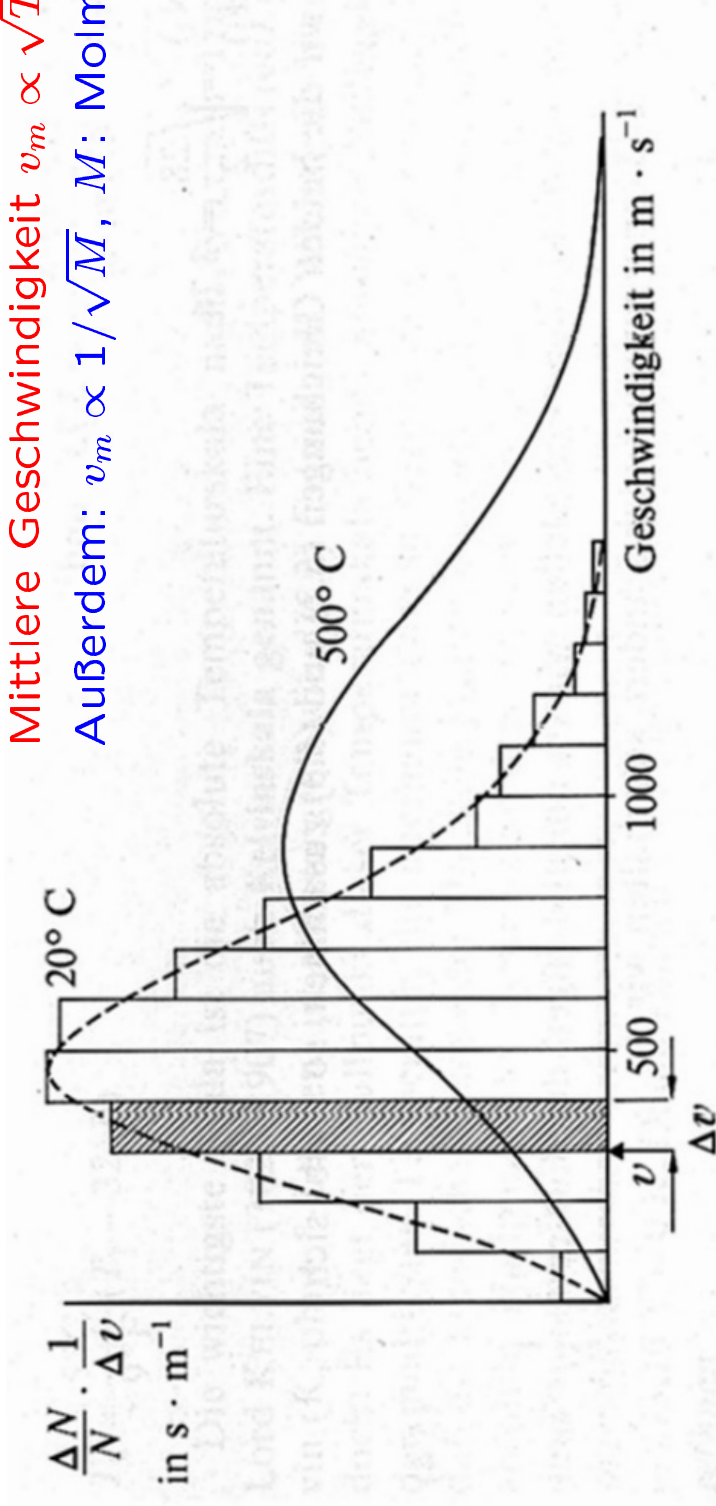


Abb. 5.2. Geschwindigkeitsverteilung für verschiedene Temperaturen.

Mittlere Geschwindigkeiten v_m bei 293 K:
 Stickstoff: 471 m/s , Wasserstoff: 1755 m/s

Mit diesem Modell kann man ausrechnen, dass für 1 mol ideales Gas gilt:

$$p \cdot V_{\text{mol}} = \frac{2}{3} N_A \cdot \overline{E}_{\text{molekül,kin}}$$

N_A = Avogadro-Zahl ($= 6 \cdot 10^{23} / \text{mol}$),

$\overline{E}_{\text{molekül,kin}}$ = mittl. kinet. Energie eines Moleküls.

Mit “idealer Gasgleichung” ($n=1$)

$$p \cdot V_{\text{mol}} = R \cdot T$$

$\Rightarrow$

$$E_{\text{mol,kin}} = N_A \cdot \overline{E}_{\text{molekül,kin}} = \frac{3}{2} R \cdot T$$

$E_{\text{mol,kin}}$ ist die kinetische Energie, die in 1 mol des Gases enthalten ist. Die **mittlere kinetische Energie eines Moleküls** ist also

$$\overline{E}_{\text{molekül,kin}} = \frac{3}{2} \frac{R}{N_A} T = \frac{3}{2} k \cdot T$$

Boltzmann-Konstante: $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

In diesem Modell ist **bisher nur Translation** der Moleküle berücksichtigt.

Translation: 3 **Freiheitsgrade** (FG) der Bewegung (3 Richtungen). Die kinetische Energie verteilt sich auf diese FG:

$$\frac{E_{\text{kin,mol}}}{FG} = \frac{1}{2} RT$$

Äquipartitionsgesetz: Im statistischen Gleichgewicht ist Energie pro Freiheitsgrad im Mittel $\frac{1}{2}R \cdot T$ pro Mol (bzw. $\frac{1}{2}kT$ pro Molekül).

2-atomige Moleküle: zusätzlich 2 FG der Rotation, insgesamt also 5 FG. Dann ist

$$E_{\text{kin,mol}} = 5 \cdot \frac{1}{2} RT = \frac{5}{2} RT$$

3-atomige Moleküle (6 FG):

$$E_{\text{kin,mol}} = 6 \cdot \frac{1}{2} RT = \frac{6}{2} RT$$

Die Temperatur T eines (idealen) Gases ist also direkt verknüpft mit der kinetischen Energie seiner Moleküle.

Wärmemenge

Körper **erwärmen** (auf höhere Temperatur T bringen) $\Rightarrow$ **Energie muss zugeführt werden (Wärmemenge)**.

Zwei Körper mit **verschiedenen Temperaturen** in Kontakt $\Rightarrow$ **Temperatenausgleich**.
Es fließt **Wärmemenge Q** vom wärmeren zum kälteren Körper:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta t$$

c : spezifische Wärme (materialabhängig),

m : Masse,

Δt : Temperaturunterschied.

Einheit von Q : **1 J(oule) = 1 Nm**. Alte (nicht-SI) Einheit Kalorie:

$$1\text{cal} = 4,1868\text{ J}$$

1 cal ist die Wärmemenge, die notwendig ist, um 1 g Wasser von 14,5°C auf 15,5°C zu erwärmen.

Spezifische Wärmen

Man unterscheidet (insbesondere bei Gasen):

c_p : spez. Wärme bei **konstantem Druck**

c_v : spez. Wärme bei **konstantem Volumen**

Es ist immer $c_p > c_v$. Die zugeführte Energie pro °C Temperaturerhöhung bei **konstantem Druck** und sich vergrößerndem Volumen muss **größer** sein (als bei konstantem Volumen), weil **gleichzeitig noch Arbeit** gegen den äußeren Druck geleistet werden muss.

Wärmekapazität C eines Körpers ist die Wärmemenge, die notwendig ist, ihn um 1°C zu erwärmen: $C = c \cdot m$.

Molare Wärmekapazität C_{mol} ist die Wärmemenge, die notwendig ist, 1 mol um 1°C zu erwärmen: $C_{\text{mol}} = c \cdot M$.

Mischungskalorimeter:

Heißer Bleiklotz ($m_{\text{Pb}}, t_{\text{Pb}}, c_{\text{Pb}}$) in Wasser ($m_{\text{H}_2\text{O}}, t_{\text{H}_2\text{O}}, c_{\text{H}_2\text{O}}$) von Raumtemperatur $t_{\text{H}_2\text{O}}$: das Wasser wird erwärmt, der Bleiklotz abgekühlt. Das Kalorimeter sei ideal wärmedämmend. Nach gewisser Zeit Mischungstemperatur t . Vom Blei abgegebene Wärmemenge:

$$Q_{\text{Pb}} = c_{\text{Pb}} \cdot m_{\text{Pb}} (t_{\text{Pb}} - t)$$

Vom Wasser aufgenommene Wärmemenge:

$$Q_{\text{H}_2\text{O}} = c_{\text{H}_2\text{O}} \cdot m_{\text{H}_2\text{O}} (t - t_{\text{H}_2\text{O}})$$

Nach Energieerhaltungssatz müssen beide Wärmemengen gleich sein:

$$c_{\text{Pb}} \cdot m_{\text{Pb}} (t_{\text{Pb}} - t) = c_{\text{H}_2\text{O}} \cdot m_{\text{H}_2\text{O}} (t - t_{\text{H}_2\text{O}})$$

⇒ **Spezifische Wärme** c_{Pb} von Blei.

Noch zu berücksichtigen ist, dass das Kalorimeter (der Behälter) selbst auch eine gewisse Wärmemenge aufnimmt.

Hauptsätze der Wärmelehre

Der **1. Hauptsatz** ist eine Erweiterung des **Erhaltungssatzes** der mechanischen Energie: **Wärme und Arbeit sind äquivalent**.

Allgemeinere Formulierung des 1. Hauptsatz:

Verschwindet Energiemenge irgendeiner Art bei einem Vorgang, **so entsteht** eine an Größe gleiche Energiemenge einer **anderen Energieart**.

Oder: Ein **Perpetuum mobile (1. Art)** ist nicht möglich.

Spielen **nur** Energieformen **Arbeit und Wärmemenge** eine Rolle $\Rightarrow$

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W$$

ΔU : Zunahme der **inneren Energie**, z.B. der kinetischen Energie der Gasmoleküle

ΔQ : zugeführte Wärmemenge,

ΔW : zugeführte Arbeit.

Zugeführte Arbeit bei einer Kompression ist z.B. $\Delta W = -p \cdot \Delta V$

1. Hauptsatz der Wärmelehre

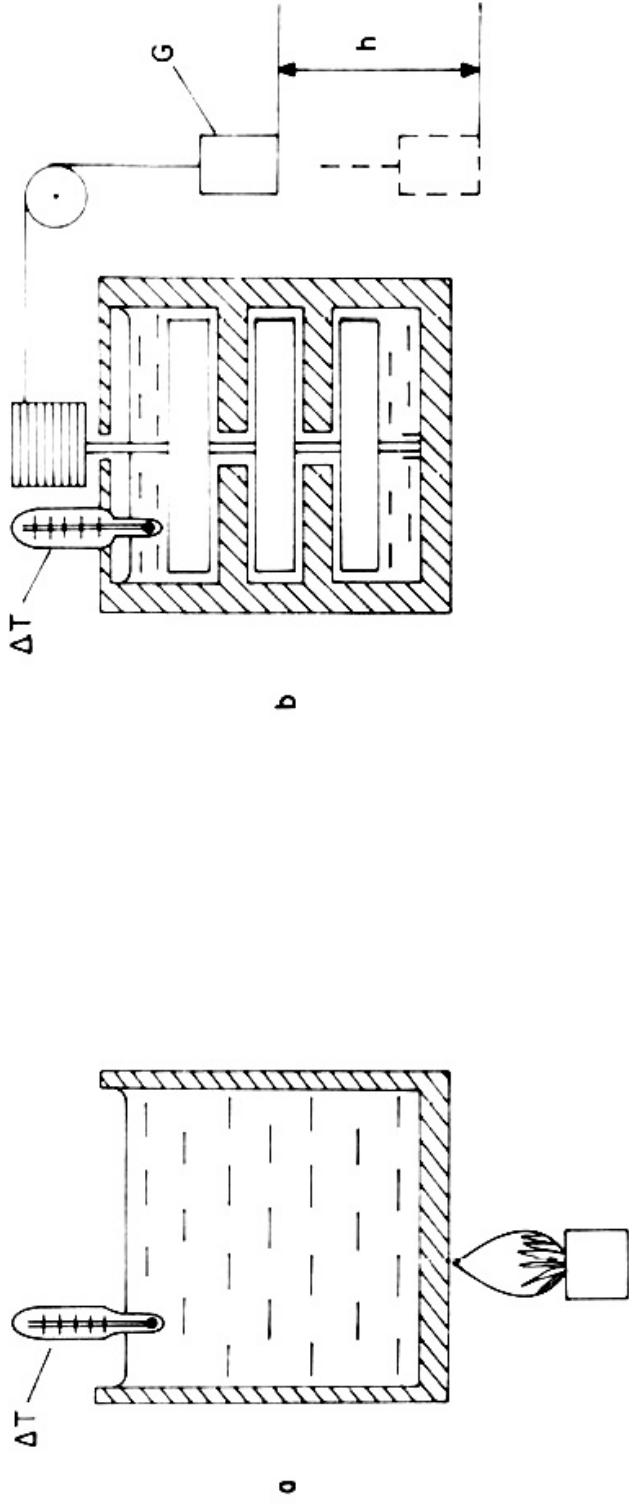


Abb. 7.1. Zwei Möglichkeiten zur Erwärmung von Wasser: **a** durch Wärmezufuhr und **b** durch Zufuhr von mechanischer Energie. **b** ist das Prinzip des Jouleschen Apparats zur Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalents. Die vom Gewicht G mit der Masse m verrichtete mechanische Arbeit $m \cdot g \cdot h$ führt zu einer Temperaturerhöhung im Wasser um ΔT

Aggregatzustände: “fest”, “flüssig”, “gasförmig” .

Zur Umwandlung zwischen den verschiedenen Aggregatzuständen muss Wärme (**Umwandlungswärme**) zugeführt (bzw. abgeführt) werden.

Verdampfungswärme von Wasser

Bei 100°C und Normaldruck: 2255 J/g, d.h. um Wasser von 100°C in Wasserdampf von 100°C überzuführen, sind 2255 J/g nötig.

Dampfdruck:

Flüssigkeit in abgeschlossenen Gefäß:

Einige Moleküle haben so **hohe Geschwindigkeit**, dass sie **aus Oberfläche austreten** können; einige treten auch wieder ein $\Rightarrow$

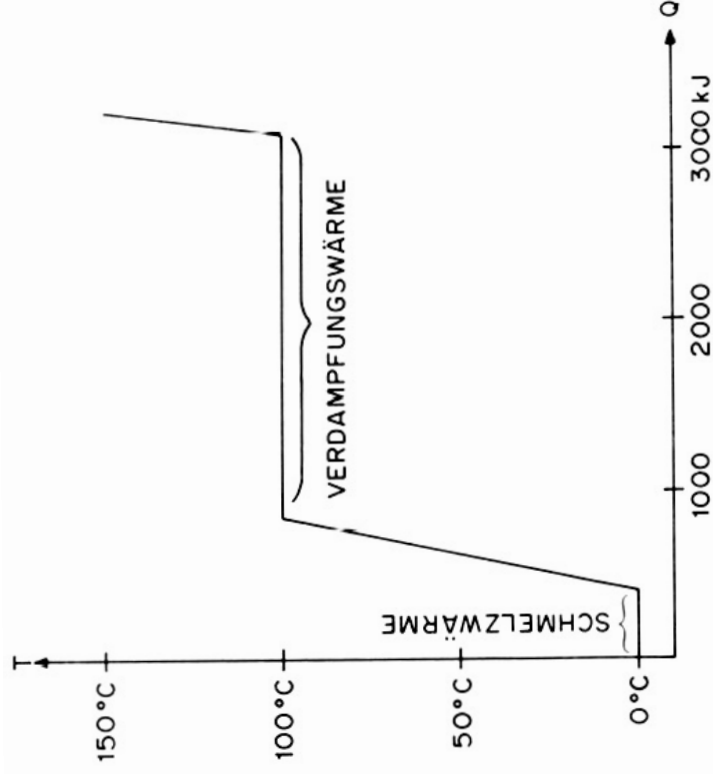
Im Gleichgewicht **Sättigungsdampfdruck** , der nur von der Temperatur, nicht aber vom Volumen abhängig ist.

In Atmosphäre stellt sich nicht Sättigungsdampfdruck, sondern nur prozentualer Anteil (**relative Feuchtigkeit**) ein: Atmosphäre ist **kein “geschlossenes Gefäß”** . Austretende Moleküle verdunsten, Flüssigkeit kühlt sich ab.

Flüssigkeit **siedet**, wenn **Dampfdruck gleich äußerem Druck** ist. Die Siedetemperatur (z.B. von Wasser) ist in großen Höhen wegen des kleineren atmosphärischen Druckes niedriger als an Erdoberfläche.

Dampfkochtopf: **Sieden unter erhöhtem Druck**; Siedetemperatur liegt dann über 100°C, Speisen werden schneller gar.

Umwandlung von Aggregatzuständen



Konstante Zufuhr von Wärme:
Temperatur bleibt konstant solange Eis/Wasser-Gemisch bzw. Wasser/Dampf-Gemisch vorhanden sind.

Abb. 8.5. Temperaturverlauf bei der Erwärmung von 1 kg Eis. Q ist die zugeführte Wärmemenge. Bei konstant zugeführtem Wärmestrom dQ/dt kann man die Abszisse auch als Zeitachse ansehen. In den Haltepunkten bei 0°C und 100°C kommt es zu einem vorübergehenden Halt beim Temperaturanstieg

(p, T) -Diagramm:

Sublimationskurve, **Schmelzkurve**, **Verdampfungskurve**
trennen festen, flüssigen, dampfförmigen
Aggregatzustand voneinander.

Im **Tripelpunkt** sind alle Phasen im Gleichgewicht.

Oberhalb des **kritischen Punkts** gibt es keine Unterscheidung mehr zwischen flüssigem und dampfförmigen Zustand.

Transportphänomene

- **Wärmeübertragung**

Temperaturdifferenz von Körpern wird ausgeglichen durch einen **Wärmestrom**

$$\frac{\Delta Q}{t} = \lambda \cdot \frac{A}{\ell} \Delta T$$

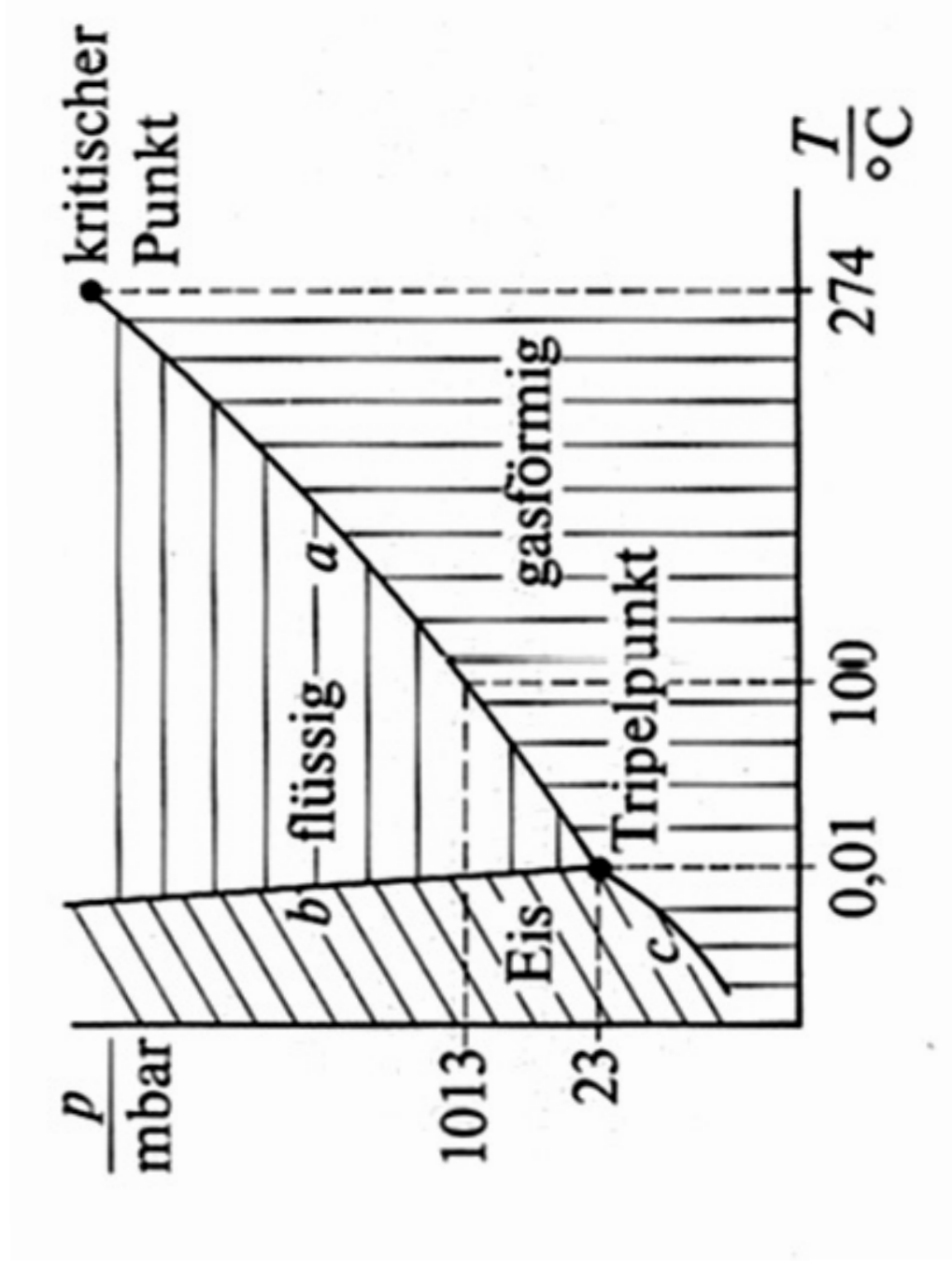
$\Delta Q/t$: Wärmemenge ΔQ , die pro Zeit t durch die Fläche A strömt,

ΔT : Temperaturdifferenz zwischen den Enden mit Abstand ℓ ,

λ : Wärmeleitzahl (materialabhängig).

Die **Wärmeübertragung** kann geschehen über **Wärmeleitung**, **Konvektion**, **Wärmestrahlung**.

p-T-Zustandsdiagramm von Wasser



a) Dampfdruckkurve, b) Schmelzkurve, c) Sublimationskurve.

Wärmeleitung

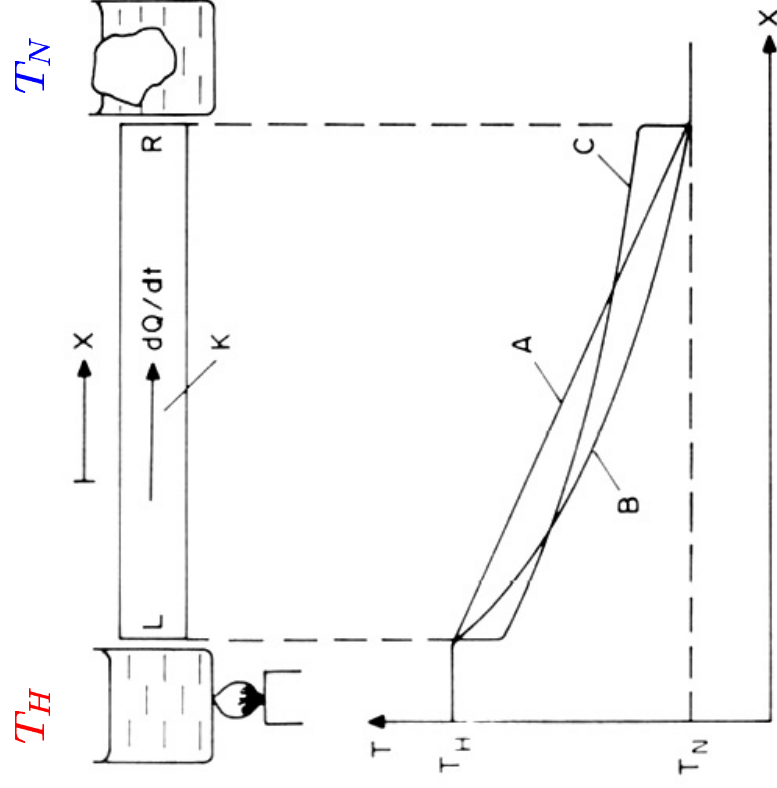


Abb. 7.10. Von einem Körper mit konstant höherer Temperatur T_H (siedendes Wasser), erfolgt Wärmeleitung durch den Körper K zu einem Körper niedrigerer Temperatur T_N (Eiswasser). Graph **A** beschreibt Temperaturverlauf bei idealer Wärmeisolation von K , Graph **B** den Temperaturverlauf bei schlechterer Wärmeisolation von K und Graph **C** bei Berücksichtigung von Wärmeübergangswiderständen an den Kontaktstellen bei L und R

- **Diffusion**

Diffusion beschreibt **Massentransport**. Sie sorgt für **Ausgleich von Konzentrationsgefällen**. Das passiert über thermische Bewegung der Teilchen.

Es gilt **1. Ficksche Gesetz**:

$$\frac{\Delta n}{\Delta t} = D \cdot A \cdot \frac{\Delta c}{\Delta x}$$

(Δn ist Zahl der Teilchen, die in der Zeit Δt bei einem Konzentrationsunterschied von Δc über eine Strecke Δx durch eine Fläche A hindurchtreten.
 D ist die Diffusionskonstante.)

Bei Gasen:

$$D \text{ prop. } \frac{1}{\sqrt{M}},$$

M : relative Molekülmasse (Molekulargewicht).

- **Osmose**

Reines Wasser und wässrige Zuckerlösung seien durch semipermeable Wand getrennt (nur für Wassermoleküle, nicht für Zuckermoleküle durchlässig). Solange Diffusion von Wasser auf die "Zucker"-Seite, bis Druckunterschied p_{osm} weitere Diffusion verhindert.

Es gilt Van-t'Hoff'sche Gleichung

$$p_{\text{osm}} \cdot V_{\text{fl}} = n \cdot R \cdot T$$

Osmotischer Druck p_{osm} ist ebenso groß wie Druck, den gelöste (Zucker-) Teilchen als ideales Gas ausüben würden.

Zellwände in lebenden Organismen sind auch selektiv-permeable Membranen. Organismen sorgen dafür, dass innerhalb und außerhalb der Zellen derselbe osmotische Druck.

Blutplasma-Ersatz

Blutplasma-Ersatz muss **isotonisch** zum Blut sein (die gleiche Stoffmengen-dichte osmotisch wirksamer Teilchen haben), **sonst** würde bei z.B. reinem Wasser dieses in die Zelle diffundieren und die Zelle zum **Platzen** bringen. Wenn umgekehrt osmotischer Druck außen zu groß wäre, würde Zelle **austrocknen**.

Physiologische Kochsalzlösung:

9 g NaCl in **1 ℓ Lösungsmenge (NaCl + H₂O)**
kann Blutplasma ersetzen.

Osmotischer Druck ist 0,79 MPa (ca. $7,9 \times$ Atmosphärendruck).

2. Hauptsatz der Wärmelehre

schränkt 1. HS ein, denn **viele thermodynamische Prozesse** finden “von selbst” **nur in einer Richtung** statt, z.B.:

- a) **Wärmemenge** geht **spontan** vom **wärmeren Körper** auf den **kälteren** über, nicht aber umgekehrt.
- b) Herabfallender Ziegel wandelt seine potentielle Energie schließlich in Wärme um, **umgekehrt springt kein Ziegel unter Abkühlung aufs Dach!**
- c) Es gibt **keine periodische Maschine, die Meerwasser abkühlt** und die entsprechende **Wärmemenge vollständig in mechanische Arbeit** umwandelt. Dagegen kann mechanische Energie vollständig in Wärme umgewandelt werden.

1. Formulierung des 2. Hauptsatzes:

Alle Vorgänge in der Natur verlaufen so, dass der “Ordnungszustand” abnimmt. Die **Entropie S** – sie ist ein Maß für die “Unordnung” – **nimmt** bei “von selbst” ablaufenden Prozessen (irreversiblen Prozessen) immer **zu**.

2. Formulierung des 2. Hauptsatzes:

Es gibt keine periodisch arbeitende Maschine, die nichts anderes bewirkt als Erzeugung mechanischer Energie unter Abkühlung eines Wärmereservoirs.

⇒

Wärmemengen können nicht vollständig in mechanische Arbeit umgewandelt werden.

Wärmekraftmaschinen entnehmen einem Wärmereservoir auf hoher Temperatur T_1 die Wärmemenge ΔQ_1 .

Sie gewinnen mechanische Arbeit ΔW und geben gleichzeitig eine Wärmemenge ΔQ_2 an ein Reservoir mit niedriger Temperatur T_2 (Kühlwasser!) ab.

Ihr Wirkungsgrad ist

$$\eta = \frac{\Delta W}{\Delta Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} < 1$$

(bei einem Carnot-Kreisprozess).

Also **möglichst hohes** T_1 und **möglichst niedriges** T_2 ! (Kolbendampfmaschinen erreichen $\eta \approx 0,2$; Dampfturbinen $\eta \approx 0,5$).

Kältemaschinen und Wärmepumpen arbeiten umgekehrt:

Unter Aufwand mechanischer Arbeit ΔW “pumpen” sie eine **Wärmemenge $\Delta Q (> \Delta W)$ von einem kälteren Reservoir in ein wärmeres.**

Bei der Herstellung von Warmwasser „erspart“ dabei die Wärmepumpe mechanische (bzw. elektrische Energie)!

Entspannung von idealen/realen Gasen

Ideale Gase:

$\Delta T = 0$, da weder Wärme zugeführt wird noch abgeführt wird und auch keine Arbeit verrichtet wird.

Reale Gase:

Es wird Arbeit gegen Kohäsionskräfte verrichtet. Ein Teil der ungeordneten kinetischen Energie der Moleküle wird in potentielle Energie verwandelt, die Folge ist Abkühlung (Joule-Thomson-Effekt).

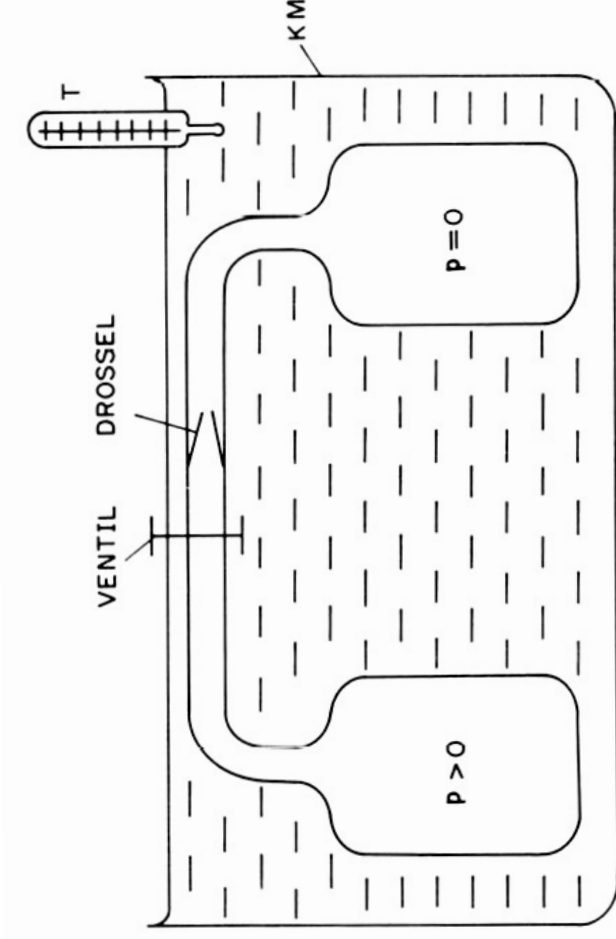
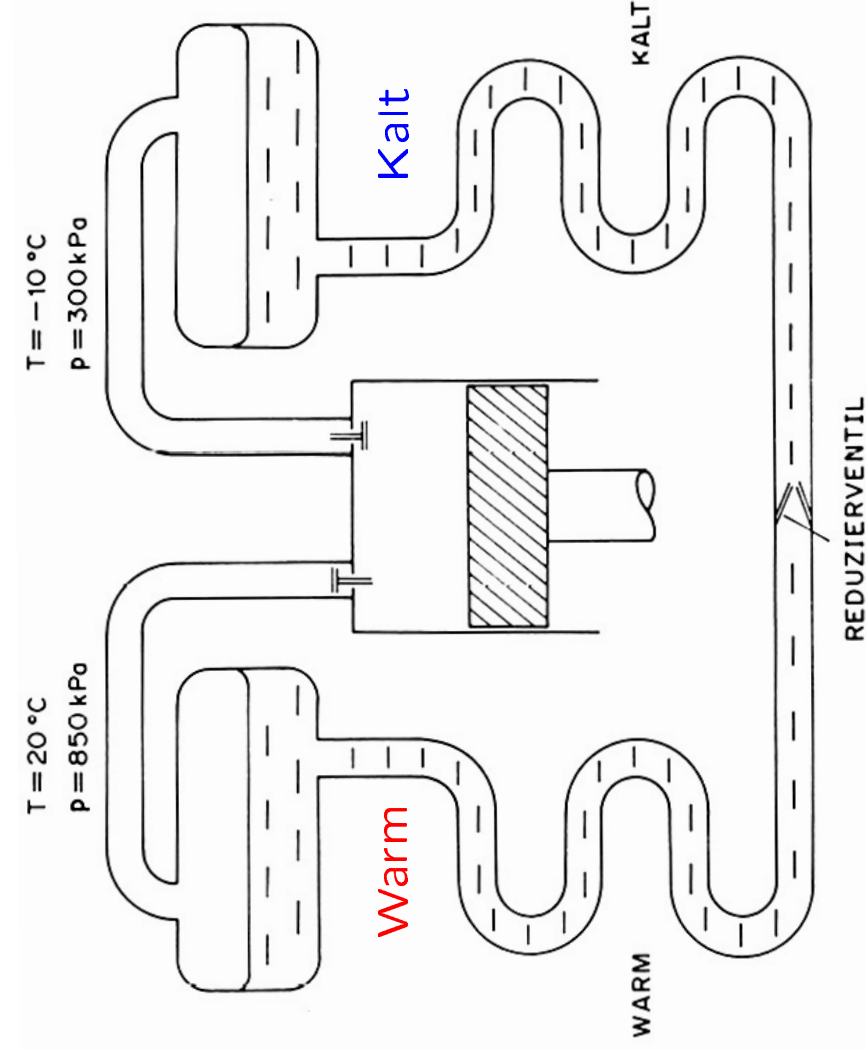


Abb. 8.6. Versuch von Gay-Lussac 1807. In einem Kalorimeter KM befinden sich zwei Gasbehälter. Einer ist mit Luft unter dem Druck p und der Temperatur T gefüllt, der andere evakuiert. Durch Öffnen des Ventils erfolgt Druckausgleich

Kühlschrank / Wärmepumpe



Kompressor verdichtet Dampf auf Sättigungsdampfdruck der warmen Seite $\Rightarrow$ Kondensation, Kondensationswärme wird an Umgebung abgegeben.

Bei Entspannung Abkühlung. Wärme aus Umgebung wird aufgenommen (rechts).

Abb. 8.7. Wärmepumpe. Als Arbeitsstoff wird beispielsweise Freon (CH_2Cl_2) benutzt. Der Sättigungsdampfdruck von Freon beträgt bei $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ etwa 850 kPa und bei $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ etwa 300 kPa

Schwingungen

Schwingungen sind periodisch sich wiederholende Vorgänge.

Mechanische Schwingung:

Kinetische (oder Rotations-) **Energie gehen in potentielle Energie über und umkehrt** (Fadenpendel, Federpendel, Wassersäule im U-Rohr).

Harmonische Schwingung (Sinusschwingung):

$$x = x_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

x_0 : Amplitude,

ω : Kreisfrequenz,

φ : Phasenwinkel.

Harmonische Schwingung ist Projektion einer gleichförmigen Drehbewegung.

Notwendig für harmonische Schwingung:

Kraft F , die die Masse bei einer Auslenkung “zurückholt”, ist proportional zur Auslenkung x und ihr entgegengerichtet:

$$F = -Dx$$

(gilt bei kleinen Auslenkungen des Faden- und Federpendels).

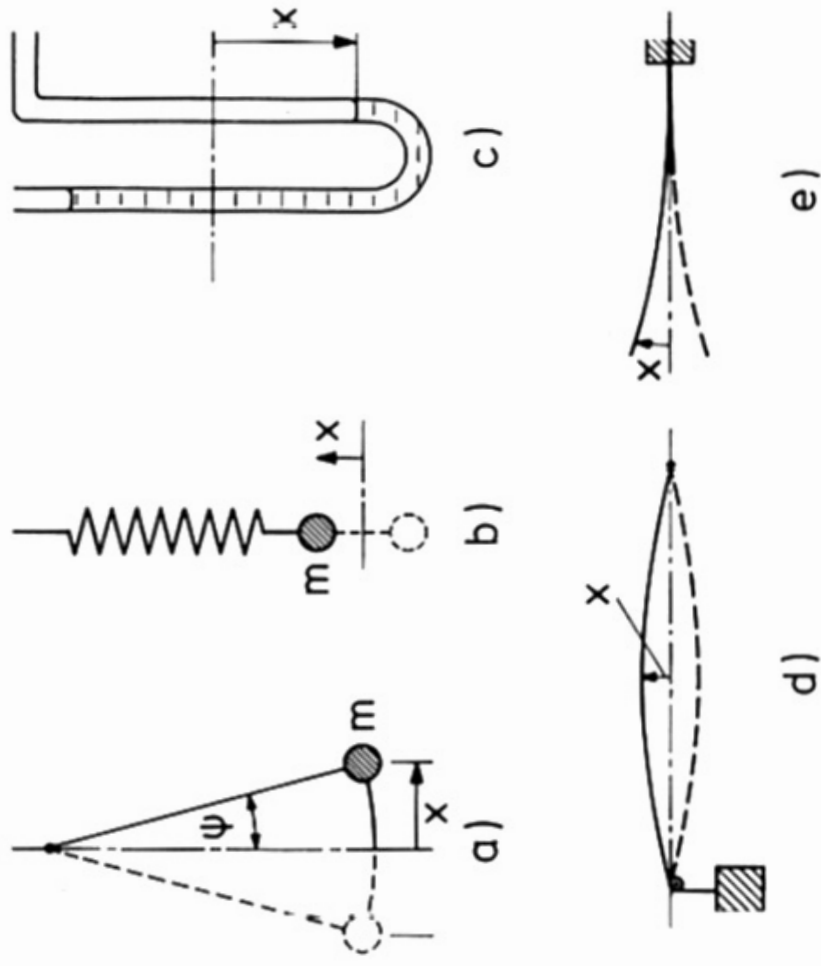
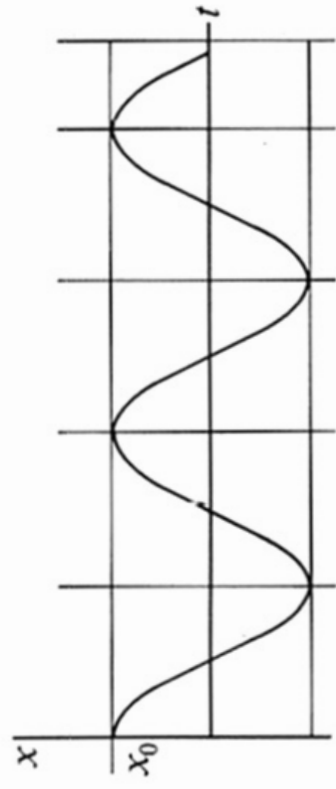
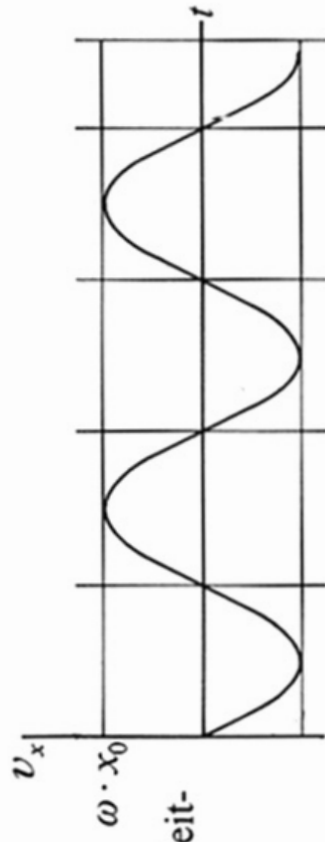


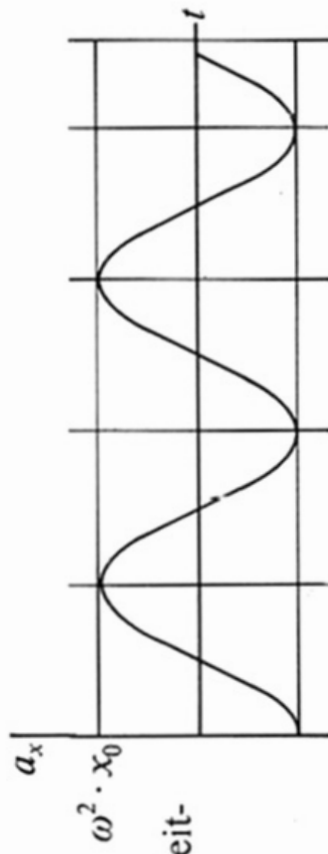
Fig. 13.1
 Verschiedene schwingungsfähige Systeme
 (Schwinger, Oszillatoren)
 a) Fadenpendel,
 b) Federpendel,
 c) Flüssigkeitssäule als Schwinger,
 d) gespannte Saite als Schwinger,
 e) einseitig eingespannte Blattfeder als
 Schwinger



Weg-Zeit-
(x - t -) Diagramm



Geschwindigkeit-Zeit-
(v - t -) Diagramm



Beschleunigung-Zeit-
(a - t -) Diagramm

Abb. 7.3. Auslenkung, Geschwindigkeit und Beschleunigung einer harmonischen Bewegung als Funktion der Zeit t .

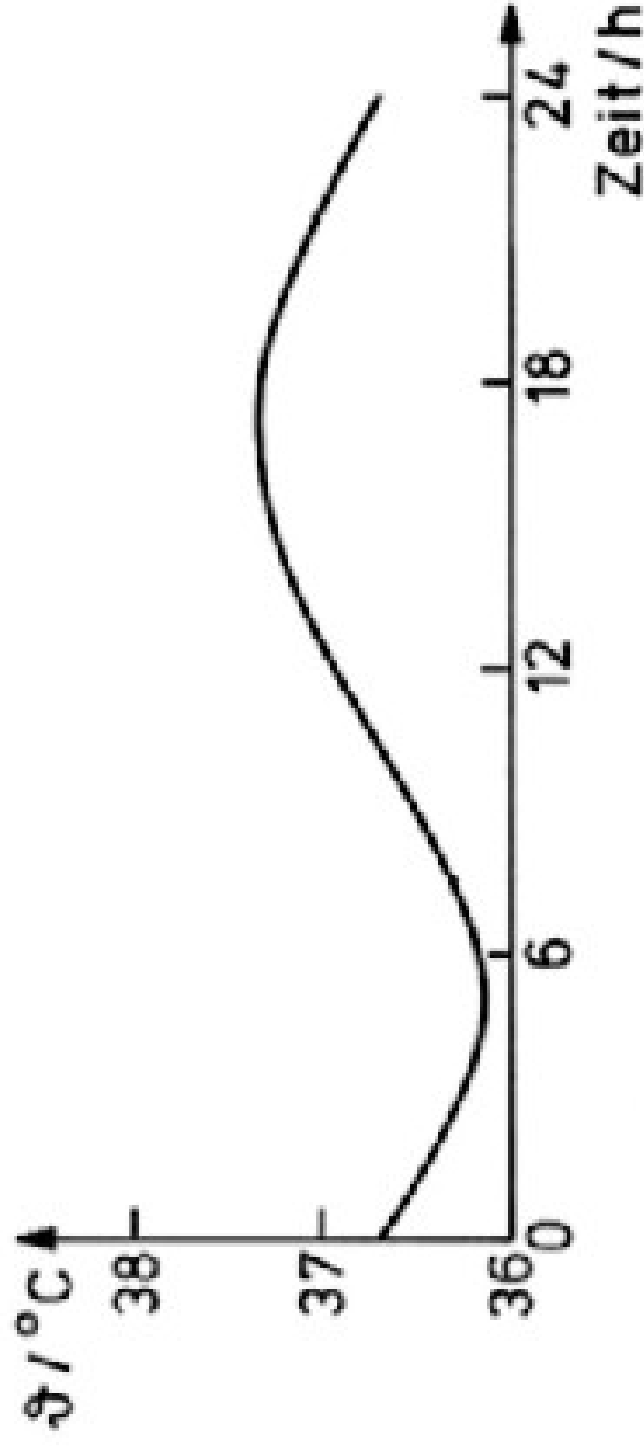


Fig. 13.4
 Die Temperatur des menschlichen Körpers hat einen sinusähnlichen Tagesverlauf

Dann gilt:

$$\omega = 2\pi/T = \sqrt{D/m}$$

T : Schwingungsdauer

$$\text{Schwerependel} \Rightarrow T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}$$

Gedämpfte Schwingung:

Jedes schwingende makroskopische physikalische System verliert i.a. ständig mechanische Energie durch **Reibung** (Amplituden werden kleiner).

$$x = x_0 \cdot e^{-\delta t} \sin(\omega t + \varphi)$$

δ : Dämpfungskonstante,

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2},$$

ω_0 : “ungedämpfte” Kreisfrequenz.

$\delta = \omega_0$ führt zum *aperiodischen Grenzfall*.

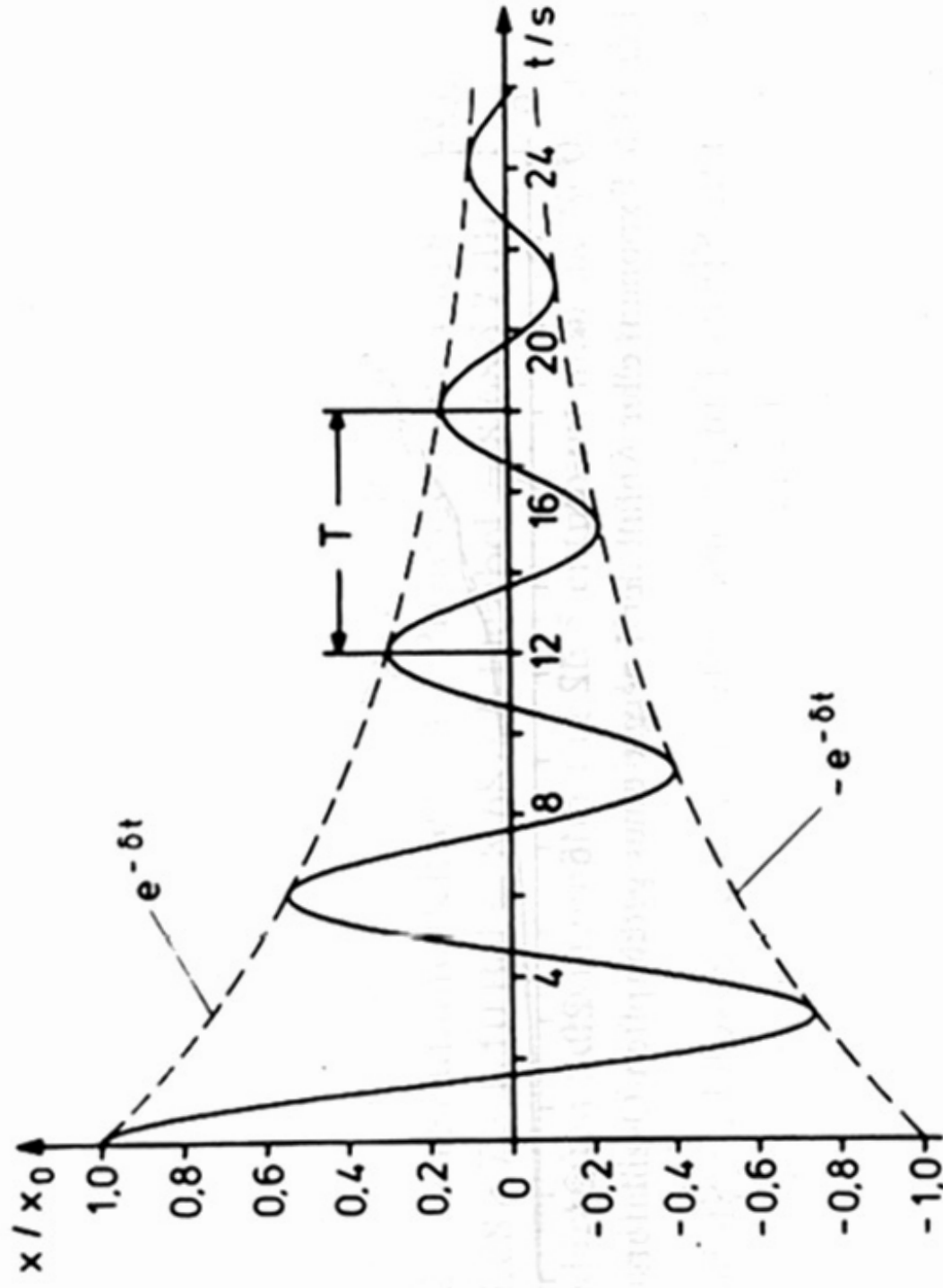


Fig. 13.5 Zeitlicher Verlauf einer Schwingungsgröße bei Vorhandensein von Dämpfung

Erzwungene Schwingung:

Schwingung mit der Frequenz des Erregers, wenn eine **äußere periodische Kraft** (Drehmoment) wirkt **auf schwingungsfähiges System**.

Resonanzkurve:

Amplitude der Schwingung in Abhängigkeit von der Frequenz des Erregers.

Maximum (**Resonanzkatastrophe**), wenn **Erregerfrequenz gleich der Oszillatorfrequenz** (Dämpfung $\delta = 0$).

Phasendifferenz zwischen Erreger und Oszillator ist **im Resonanzfall $\varphi = \pi/2$** , d.h. wenn Erreger maximale Auslenkung hat, bewegt sich Oszillator mit größter Geschwindigkeit durch Nullpunkt.

Beispiele für Resonanzen:

Zungen-Frequenzmesser, Brücke, Tidenhub. Mit zunehmender Dämpfung wird Resonanzfrequenz kleiner.

Fourier-Theorem:

Bisher haben wir nur harmonische Schwingungen betrachtet. **Andere Schwingungen** (Rechteck, Kipp, EKG) lassen sich nach **Fourier-Theorem** als **Summe von harmonischen Schwingungen** darstellen.

Diese Schwingungen haben Frequenzen, die Vielfachem der Grundfrequenz entsprechen mit unterschiedlichen Amplituden (**Oberschwingungen**).

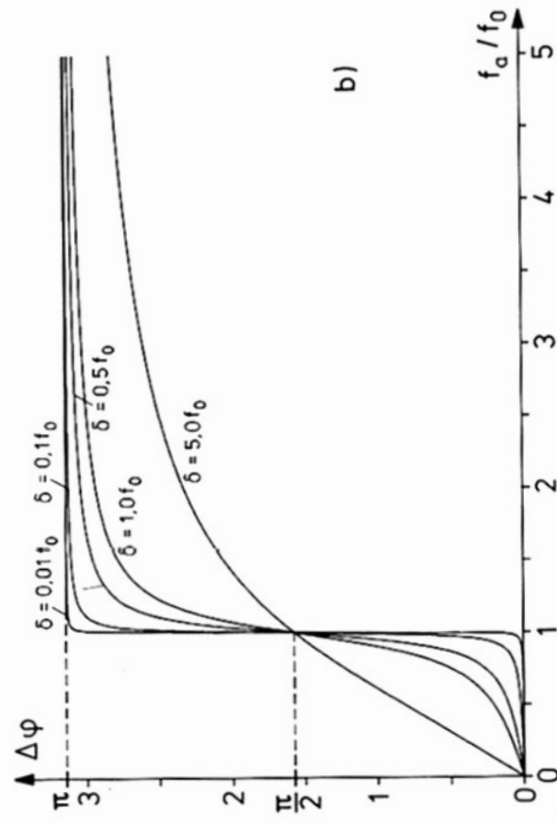
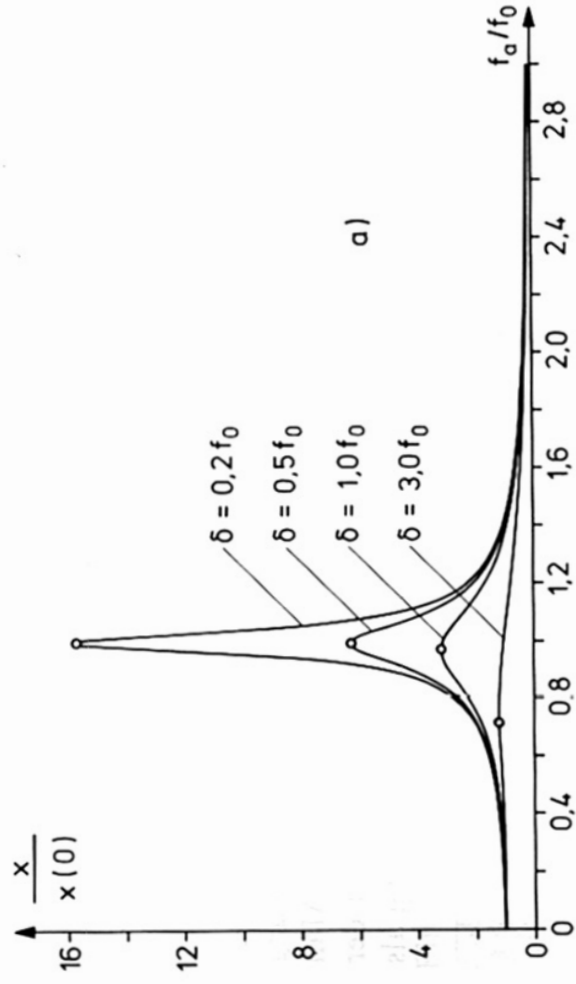


Fig. 13.11 a) Schwingungsamplituden eines mechanischen Pendels mit verschiedener Dämpfung in Abhängigkeit von der Anregungsfrequenz f_a ; $x(0)$ ist die Amplitude der Anregung, wenn $f_a = 0$ ist. -
b) Phasenverschiebung $\Delta\varphi$ zwischen anregender Kraft und ausgeführter Schwingung beim Pendel von Teilfigur a)

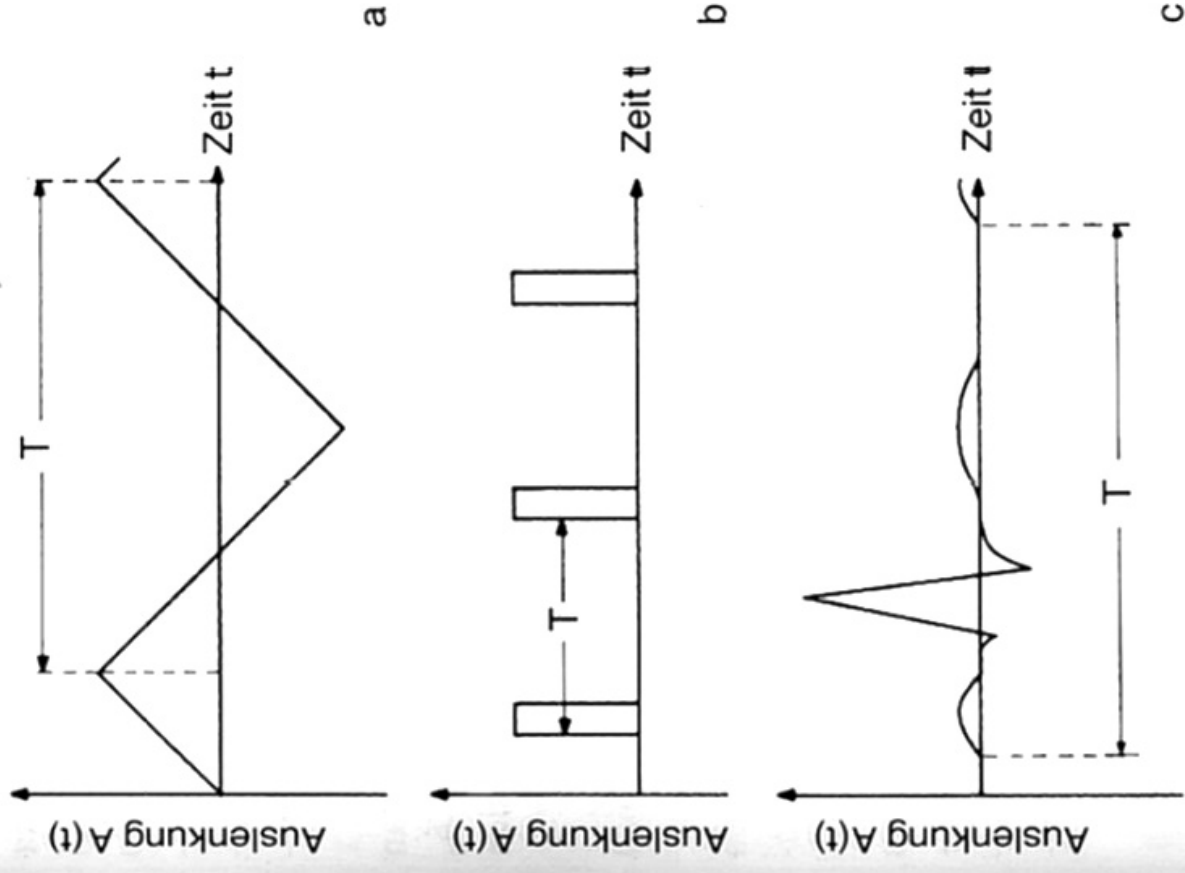


Abb. 6.7 Anharmonische periodische Vorgänge:
 (a) Dreieckschwingung, (b) Rechteckimpulsfolge,
 (c) Elektrokardiogramm (EKG).

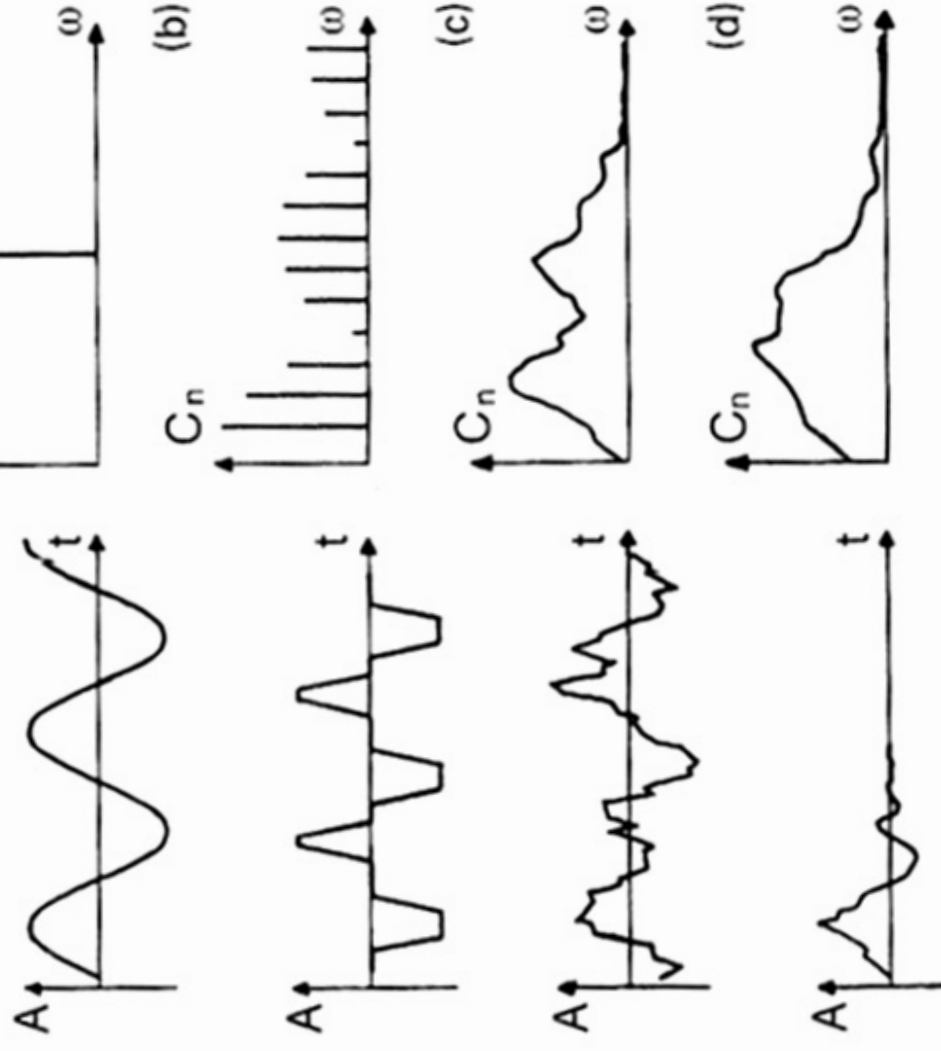


Abb. 7.12 (a) Amplitudenfunktion und Spektrum eines Tones; (b) Amplitudenfunktion und Spektrum eines Klages; (c) Amplitudenfunktion und Spektrum eines Geräuschs; (d) Amplitudenfunktion und Spektrum eines Knalls.

Gekoppelte Schwingungen:

(z.B. “Hantel” an Schraubenfeder hängend) geht die **Bewegungsenergie von einem auf das andere System über und umgekehrt.**

Wellen

Physikalische Größe ändert sich nicht nur **mit der Zeit** (wie bei Schwingungen) sondern **auch mit dem Ort periodisch:**

$$u(x, t) = u_0 \sin \left(2\pi \frac{x}{\lambda} - 2\pi \frac{t}{T} \right)$$

u, u_0 : entsprechende physikalische Größe (z.B. Auslenkung; Druck bei Schallwellen; magnetische und elektrische Feldstärke bei elektromagnetischen Wellen),

λ : Wellenlänge (Periodizität im Ort),

$T = 1/f$: Schwingungsdauer.

Wellen auf einem See:

Form einer “Störung” bewegt sich fort, nicht aber z.B. Blätter, die auf See schwimmen: es findet kein Materialtransport statt!
Wasserteilchen führen Schwingungen um ihre Ruhelage **senkrecht zur Ausbreitungsrichtung** aus.

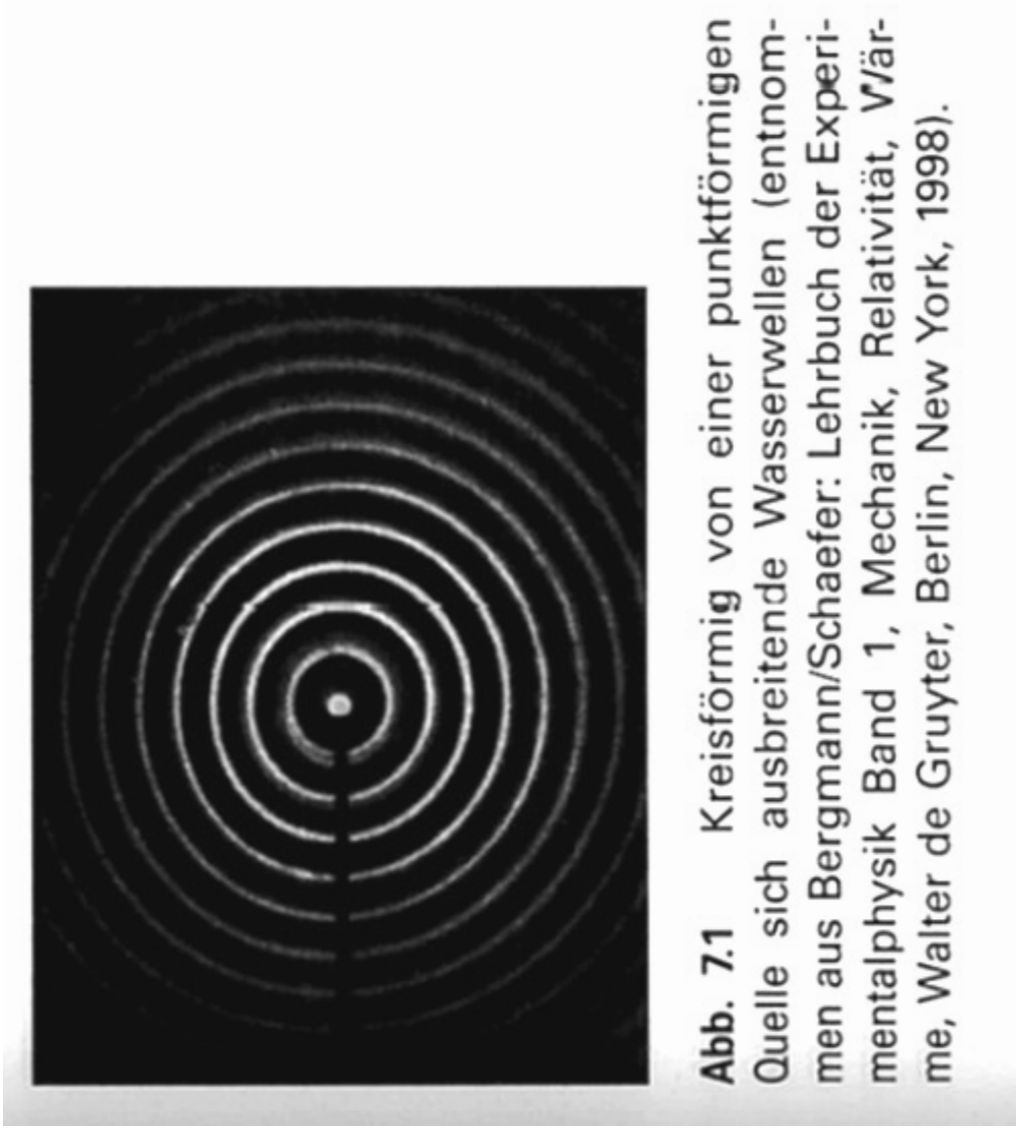


Abb. 7.1 Kreisförmig von einer punktförmigen Quelle sich ausbreitende Wasserwellen (entnommen aus Bergmann/Schaefer: Lehrbuch der Experimentalphysik Band 1, Mechanik, Relativität, Wärme, Walter de Gruyter, Berlin, New York, 1998).

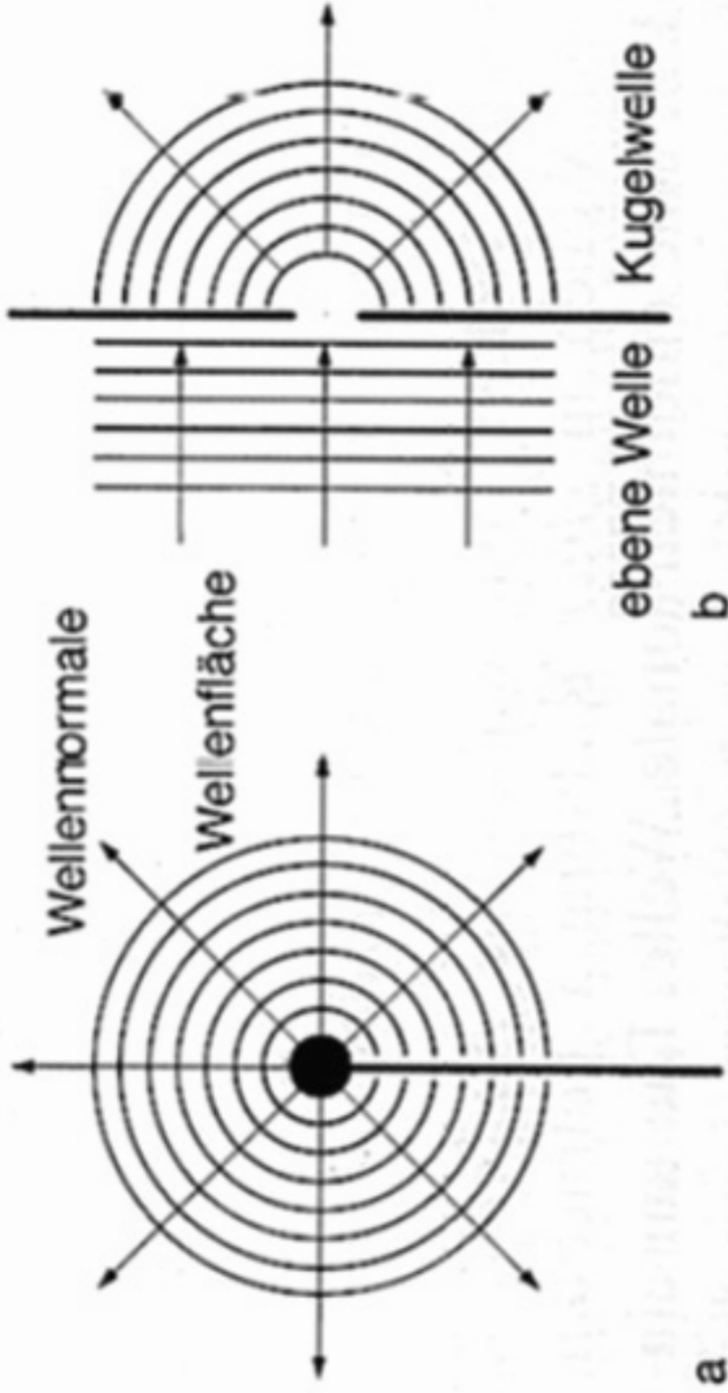


Abb. 7.2 Kugelwellen: (a) Schallwellen eines Gelstrahlers; (b) Lichtwellen hinter einer von einer ebenen Welle beleuchteten Lochblende (siehe hierzu auch Kap. 18.2.3).

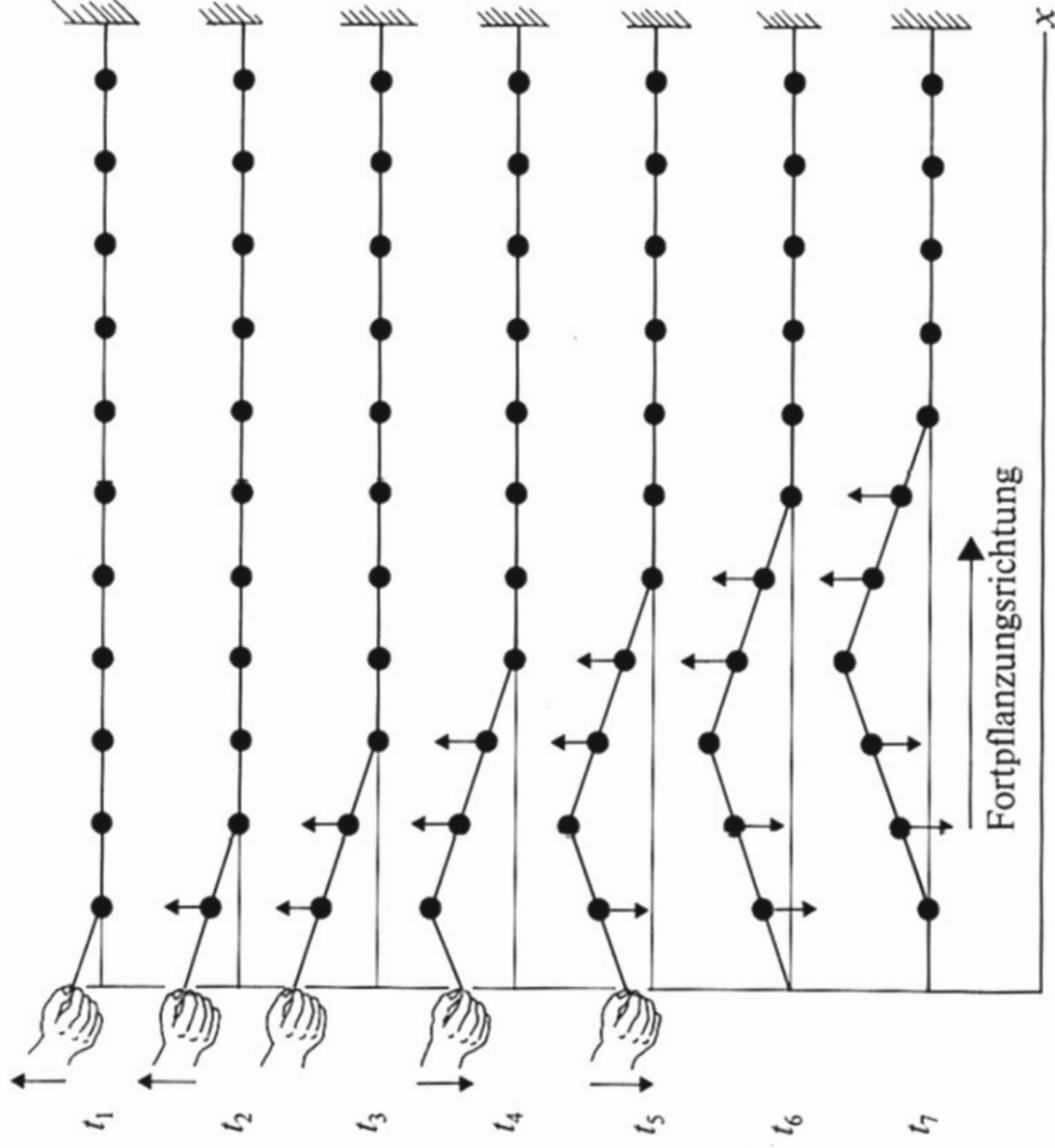


Abb. 7.17. Fortpflanzung eines Wellenimpulses in einer Pendelkette.

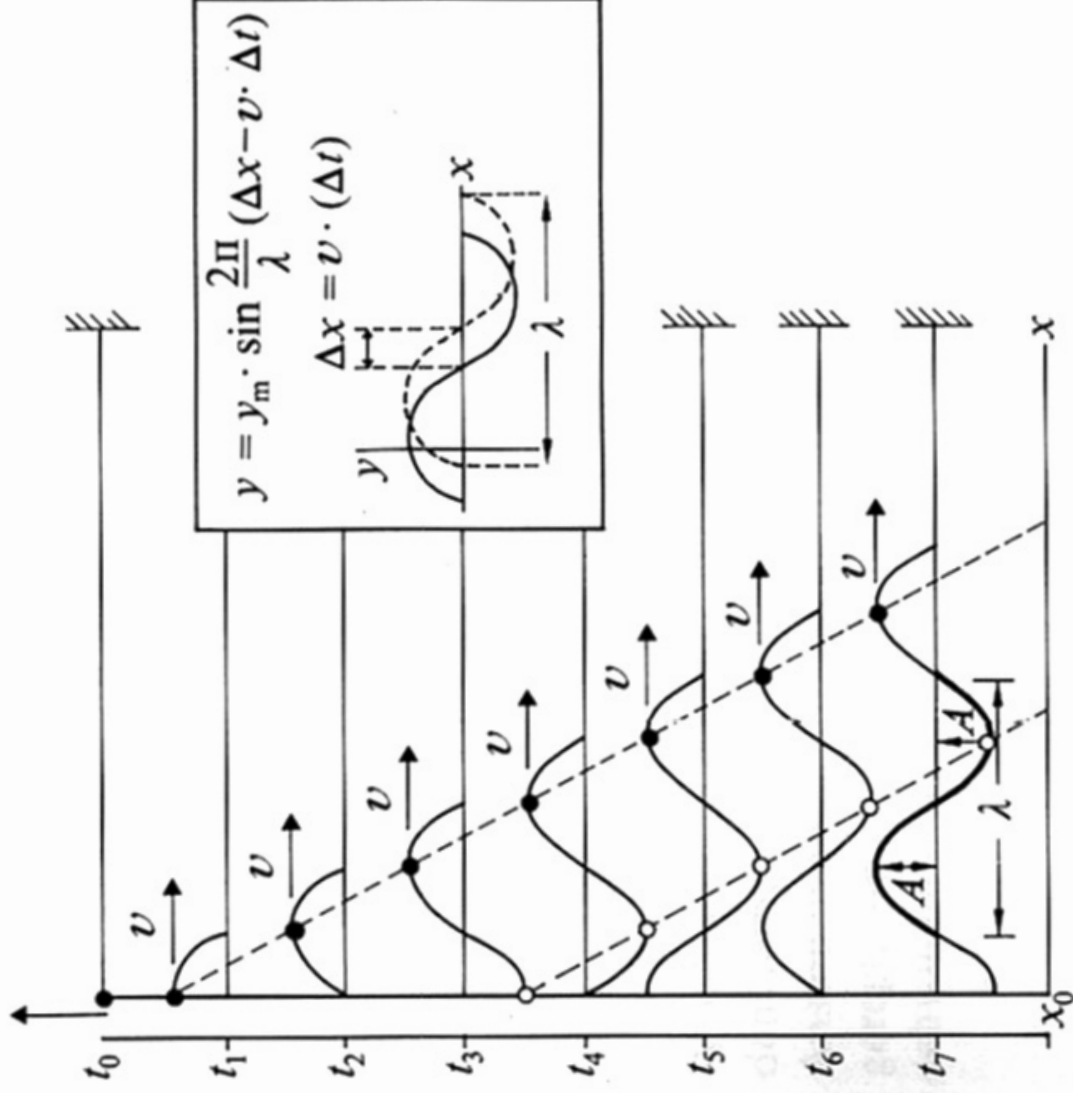


Abb. 7.18. Eine mit der Geschwindigkeit v nach rechts laufende Seilwelle mit der Wellenlänge λ und der Amplitude A . Im Kasten ist die mathematische Form der Welle und die im Zeitintervall zurückgelegte Strecke Δx dargestellt.

Die Störung wird von einem Teilchen zum nächsten weitergegeben, dessen Bewegung erfolgt etwas später. Teilchen sind miteinander „irgendwie“ gekoppelt.

Allgemein gilt:

Transportiert wird bei einer Welle nicht Materie, sondern nur die Störung und damit Energie.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit c einer Welle (Störung) ist gegeben durch:

$$c \cdot T = \lambda \text{ oder } c = f \cdot \lambda$$

Während einer Schwingungsdauer T eines Teilchens an einem festen Ort x läuft der ursprüngliche Schwingungszustand um die Strecke λ (Wellenlänge) weiter.

Transversalwellen:

Schwingungsrichtung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung . Hierzu gehören elektromagnetische Wellen (Radiowellen, Licht, Röntgenstrahlen), Seilwellen.

Transversalwellen sind polarisierbar (eine Schwingungsebene wird “durchgelassen”).

Longitudinalwellen: Schwingung in Ausbreitungsrichtung (z.B. Schallwellen in Gasen und Flüssigkeiten).

Reflexion von Wellen:

Wellen werden an Inhomogenitäten (z.B. Medienübergängen) **teilweise reflektiert**. Bei Reflexion an **festem Ende** (z.B. Seilwelle an Wand) **Phasensprung von π** , am offenen Ende kein Phasensprung der reflektierten Welle.

Überlagerung von “hinlaufender” und “rücklaufender” Welle führt zu **stehenden Wellen**:

Es gibt **Knotenpunkte** der Schwingung (Abstand $\ell = n \cdot \frac{\lambda}{2}$).

Dazwischen liegen **Schwingungsbäuche** mit maximaler Amplitude.

Schallwellen:

Mechanische Schwingungen mit Frequenzen von **16 Hz – 20 kHz**, darunter Infraschall, von 20 kHz – 1 GHz Ultraschall.

Ausbreitung der Schallwellen ist **an Materie gebunden**; in Flüssigkeiten und Gasen sind Schallwellen Dichteschwankungen, die sich als Longitudinalwellen ausbreiten.

Schallgeschwindigkeit (20°C):

in Luft **331 ms⁻¹**,
in Helium 965 ms⁻¹,
in Wasser 1530 ms⁻¹.

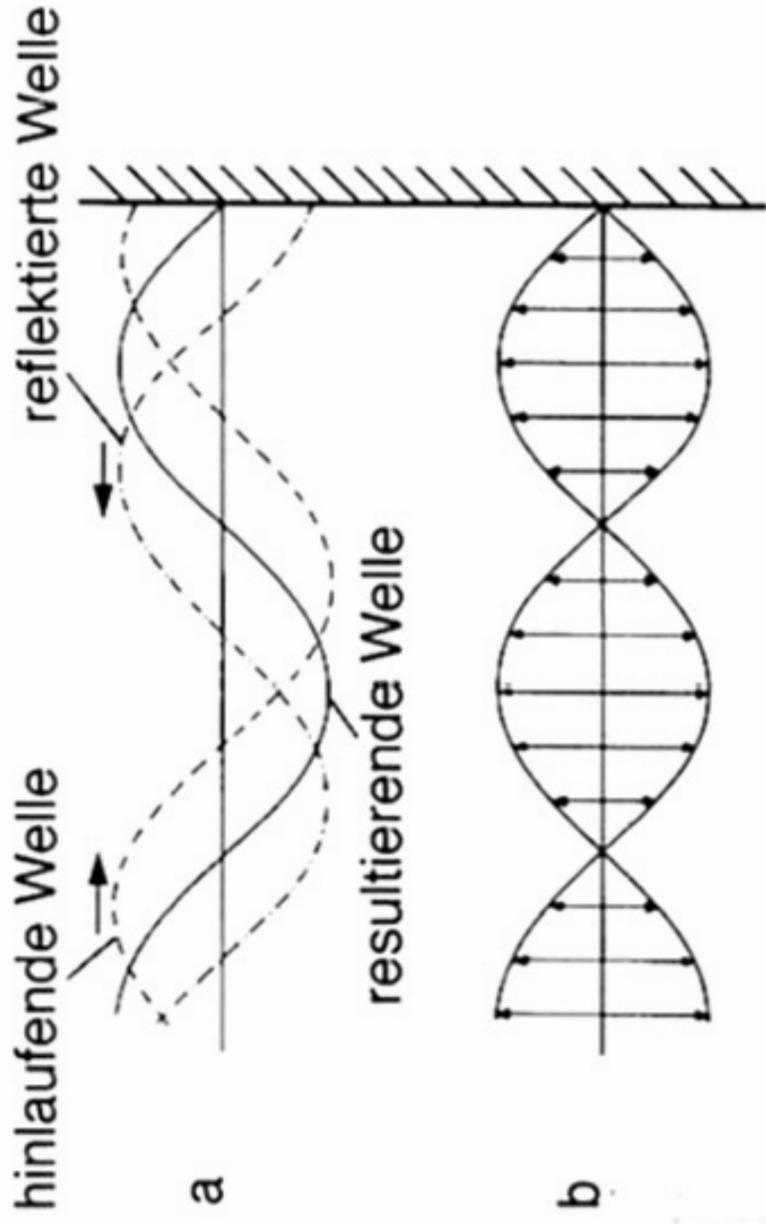


Abb. 7.18 (a) Hinlaufende und am festgebundenen Ende reflektierte Seilwelle und Superposition der beiden zur resultierenden Welle (Momentanbild); (b) stehende Welle (Verlauf der resultierenden Amplitude). Die Pfeile zeigen die sich mit dem Ort ändernden Maximalauslenkungen.

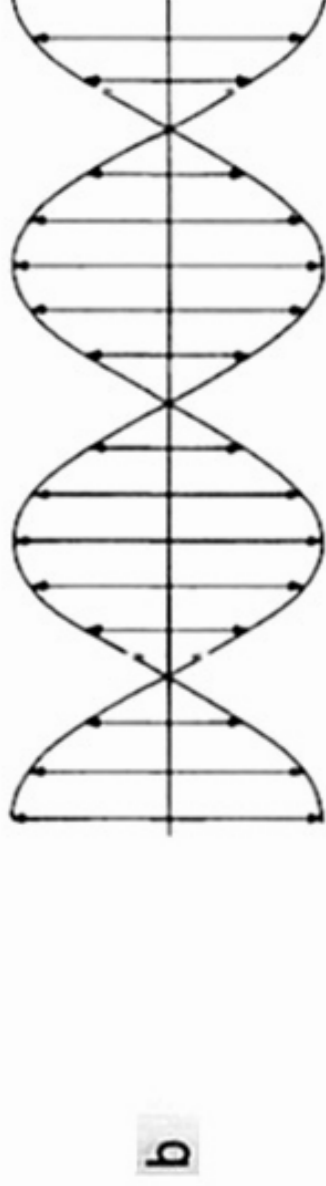
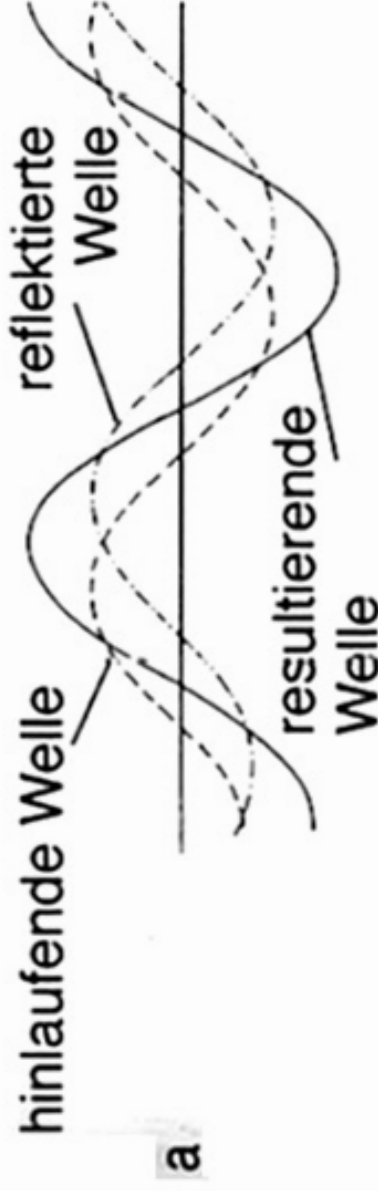


Abb. 7.19 (a) Hinlaufende und am freien Ende reflektierte Seilwelle und Superposition der beiden (Momentanbild); (b) stehende Welle (Verlauf der resultierenden Amplitude). Die Pfeile zeigen die sich mit dem Ort ändernden Maximalauslenkungen.

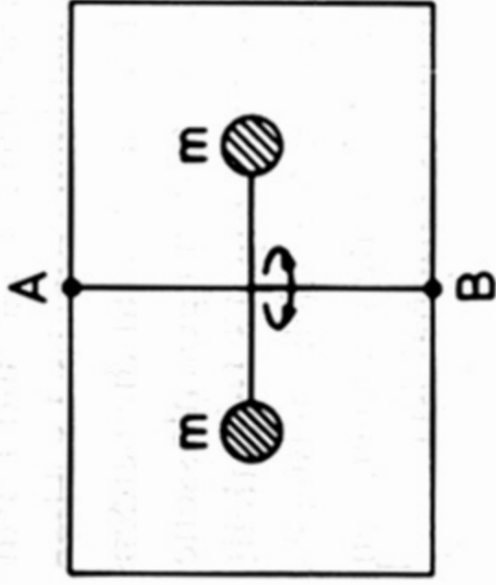


Fig. 13.17 Mechanisches Drehpendel: die Hantel m , m kann mittels des bei A und B eingespannten Drahtes Drillschwingungen ausführen



Fig. 13.18 Viele auf einem langen Draht aufgereihete Drehpendel bilden eine Pendelkette (Seitenansicht)

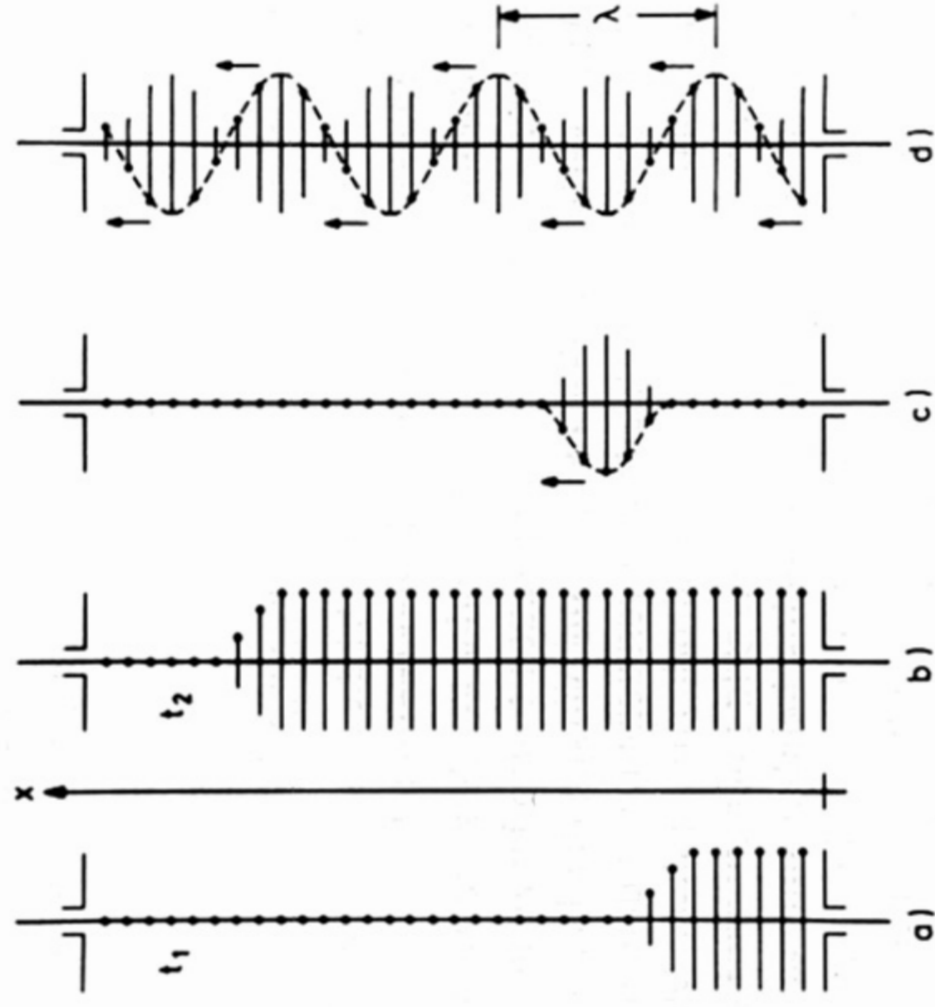


Fig.13.19 Ausbreitung verschiedener „Störungen“ auf der Pendelkette, s. Text (Frontansicht der Pendelkette)

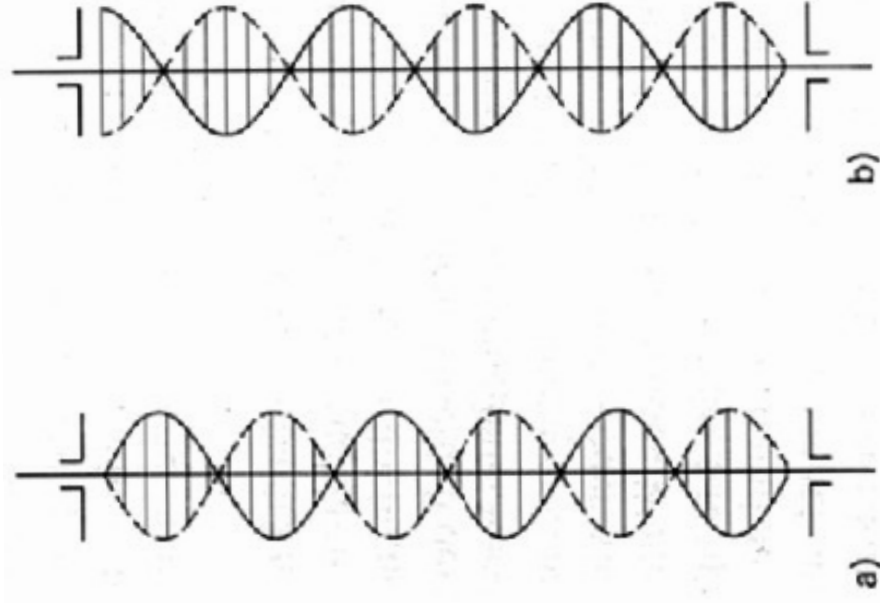


Fig. 13.20
Zwei Eigenschwingungen der Pendelkette bei
a) festem und b) losem Abschluß
a) $L = n\lambda/2$ ($n = 6$),
b) $L = (n + \frac{1}{2})\lambda/2$ ($n = 5$)

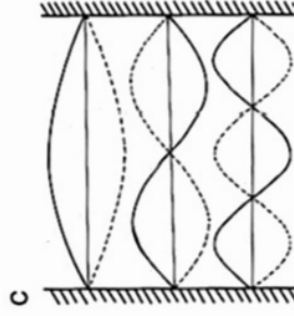
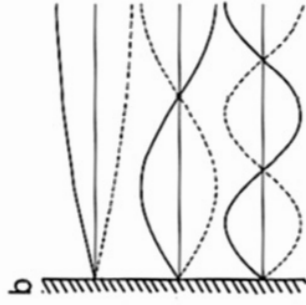
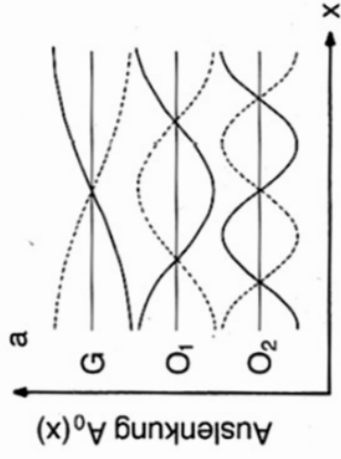


Abb. 6.14 Räumlicher Verlauf der Maximalauslenkung der transversalen Grundschwingung G und der ersten beiden Oberschwingungen O_1 und O_2 eines Stabes: (a) frei schwingend, (b) an einem Ende fest eingespannt, (c) an beiden Enden fest eingespannt. (Analoge Bilder erhält man auch für die longitudinalen Eigenschwingungen, da die Ordinate nur den Betrag, nicht aber die Richtung der Auslenkung angibt).

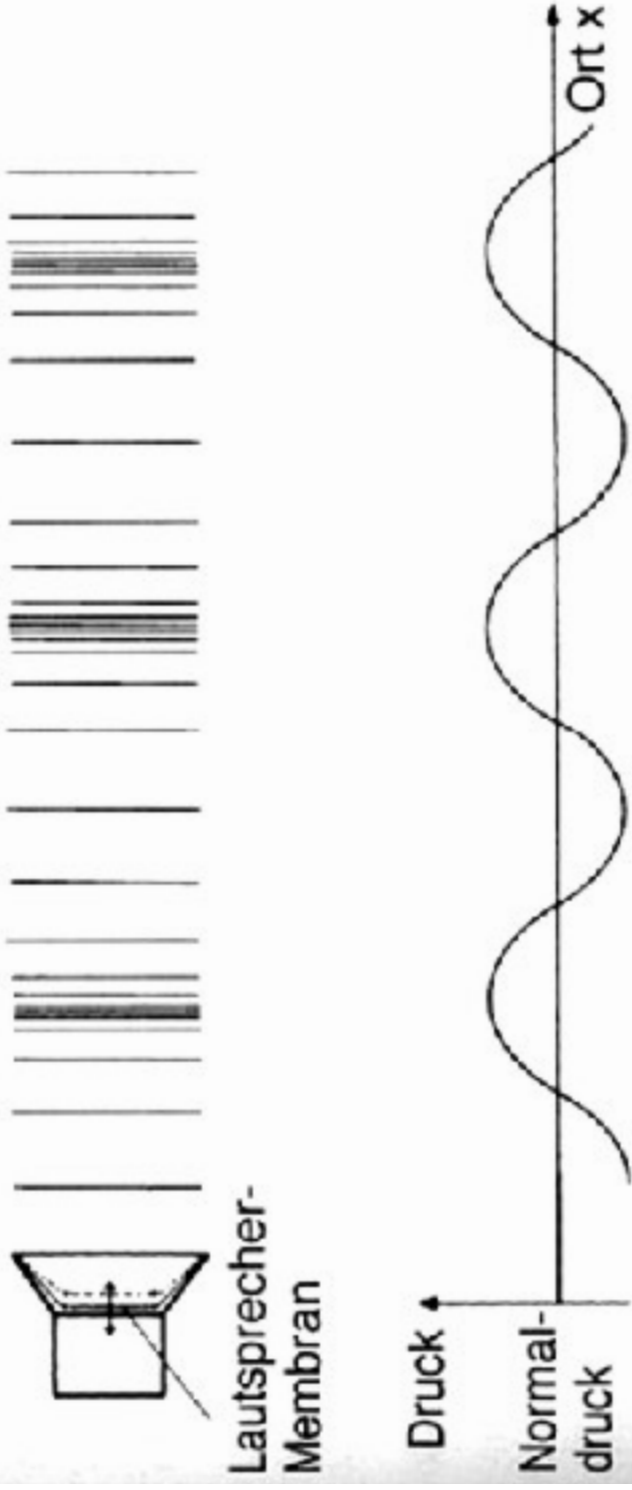


Abb. 7.5 Schwingung einer Lautsprechermembran erzeugt geringfügige periodische Dichtänderungen der Luft (Über- und Unterdruck).

Schallgeschwindigkeit in Festkörpern: $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$,

in Gasen: $c = \sqrt{\frac{c_p}{c_v} \cdot \frac{R \cdot T}{M}}$.

Ohr:

Das Ohr wandelt **mechanische Schwingungen in Nervensignale** um.

Ankommende Wellen werden über **Außenohr** (Schalltrichter), **Trommelfell** und **Hebelsystem** (Knöchelchen) sowie **Flüssigkeit des Innenohrs** zur **Schnecke** (trichterförmige Aufwicklung) übertragen.

Dort wandelt **Cortisches Organ**, mechanisch gekoppelt an die **Basilarmembran**, die Schwingungen in elektrische Signale um.

Trommelfell mit Hebelsystem bilden **richtigen Wellenwiderstand**, damit die Welle nicht an der Flüssigkeitsoberfläche reflektiert wird.

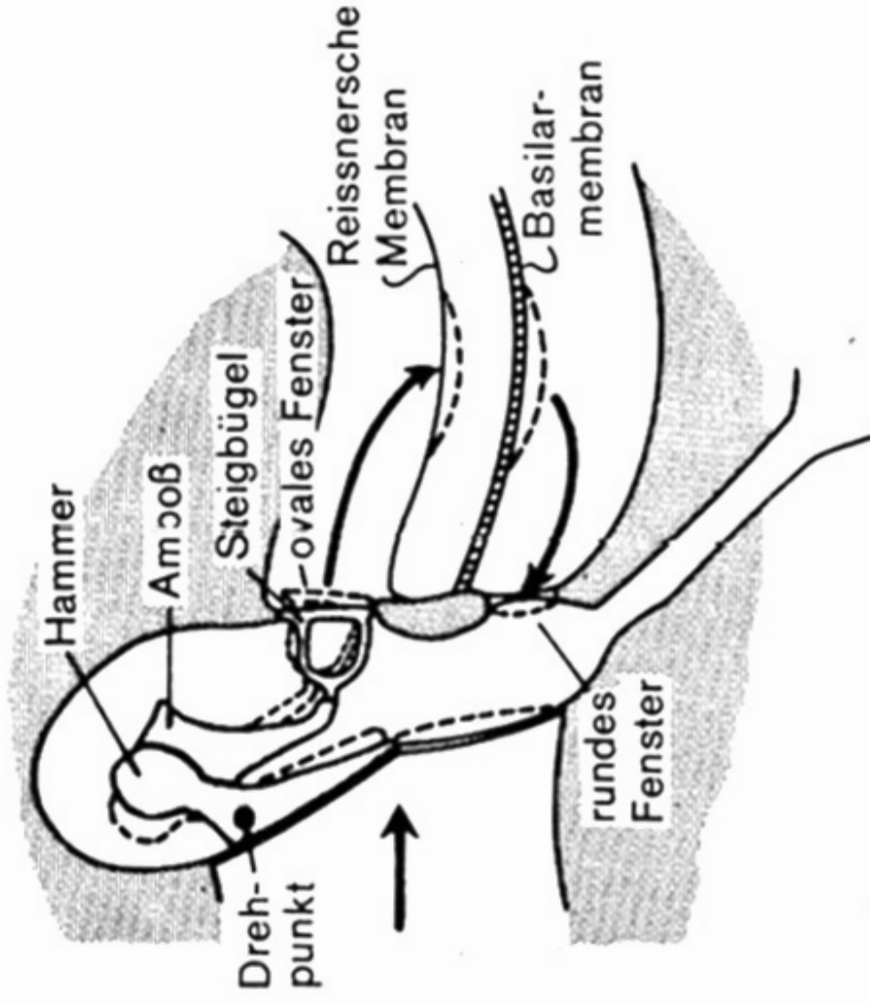
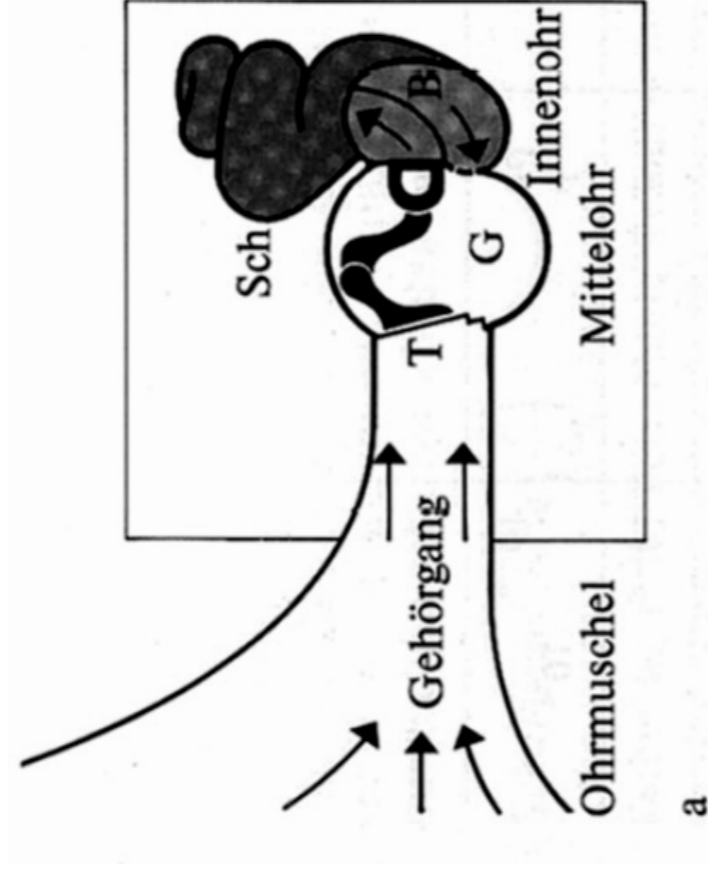
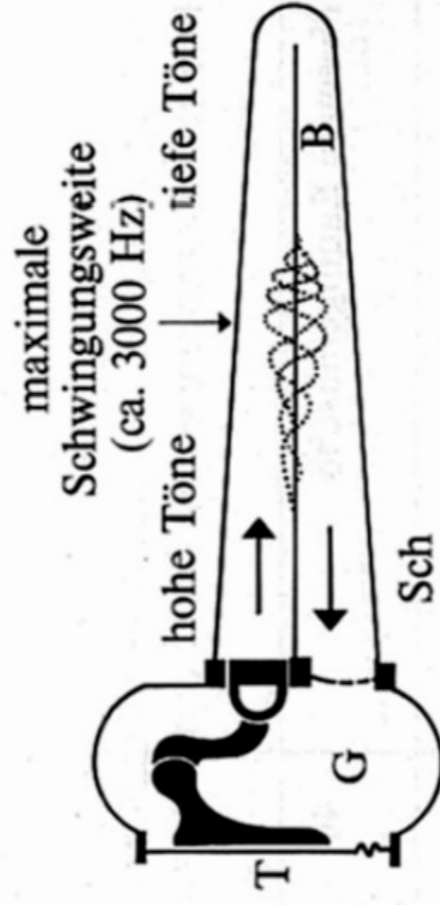


Abb. 4.28. Mittelohr. Der Schall versetzt zunächst das schallweiche *Trommelfell* in Schwingungen; diese werden von *Hammer*, *Amboß* und *Steigbügel* auf die (der nachfolgenden Flüssigkeit wegen) schallharte Haut des *ovalen Fensters* übertragen



a



b

Abb. 7.24. Darstellung von Ohr und Hörvorgang (nähere Erklärung s. Text).

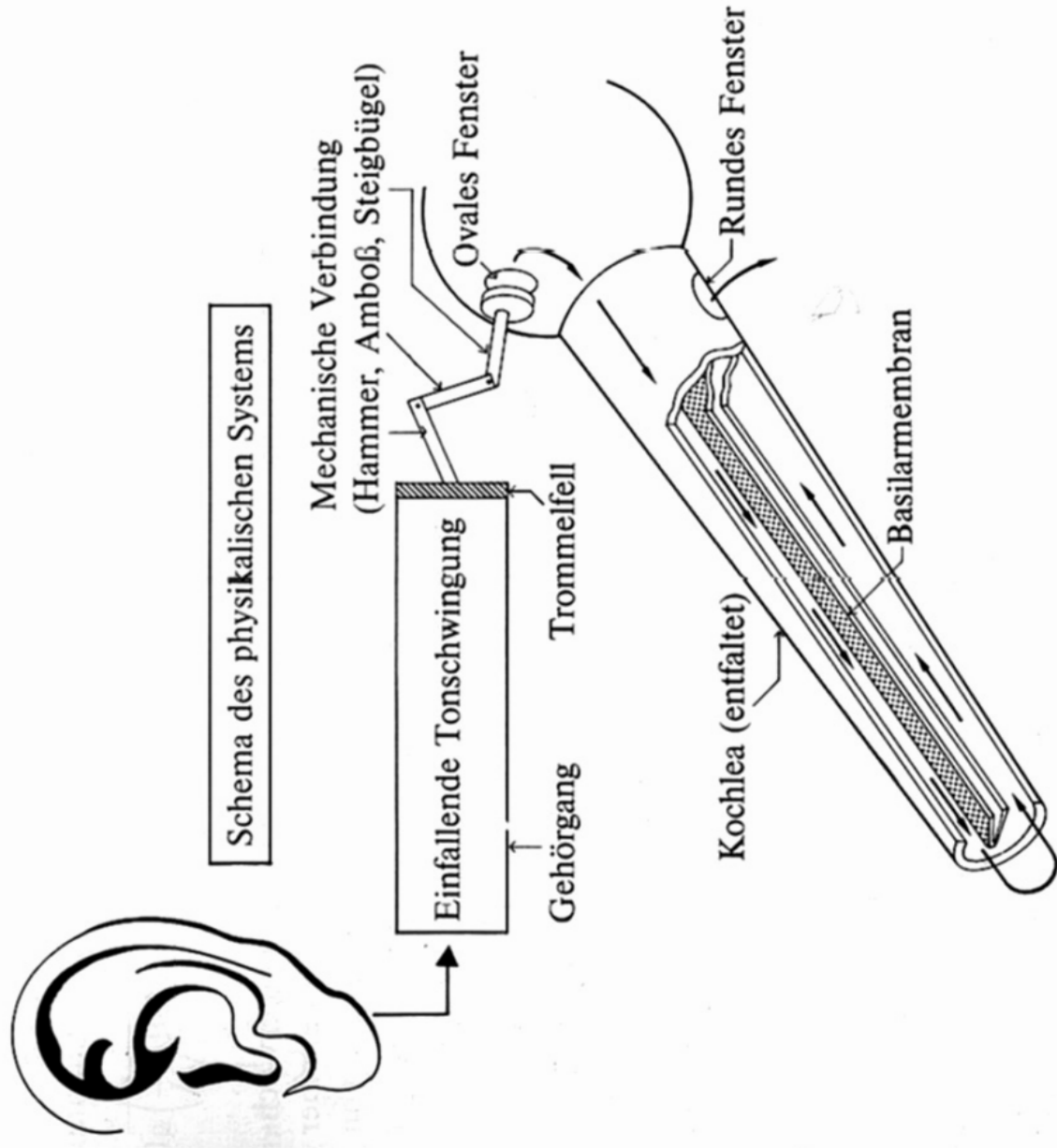


Abb. 7.25. Schematische Darstellung der Struktur des Ohres (nähere Erklärung s. Text).

Schallstärke oder Schallintensität:

$$I = \frac{\text{Energie}}{\text{Zeit} \cdot \text{Fläche}}, \quad \text{Einheit} \quad 1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Hörschwelle	I_0	$= 10^{-12}$	Wm^{-2}	0 dB Schallpegel
Sprache hat etwa	I	$= 10^{-7}$	Wm^{-2}	50 dB Schallpegel
Schmerzschwelle	$I_{\max}$	$= 1$	Wm^{-2}	120 dB Schallpegel

Der Wertebereich der hörbaren Schallintensitäten erstreckt sich über viele Zehnerpotenzen. Kein Gerät – auch nicht Sinnesorgan Ohr – kann solchen Bereich mit linearer Skala überdecken.

Nach Gesetz von Weber-Fechner reagiert Sinnesorgan logarithmisch.

Deshalb Definition des Schallpegels:

$$L_S = 10 \cdot \lg \frac{I}{I_0} \text{ dB}$$

dB: Dezibel

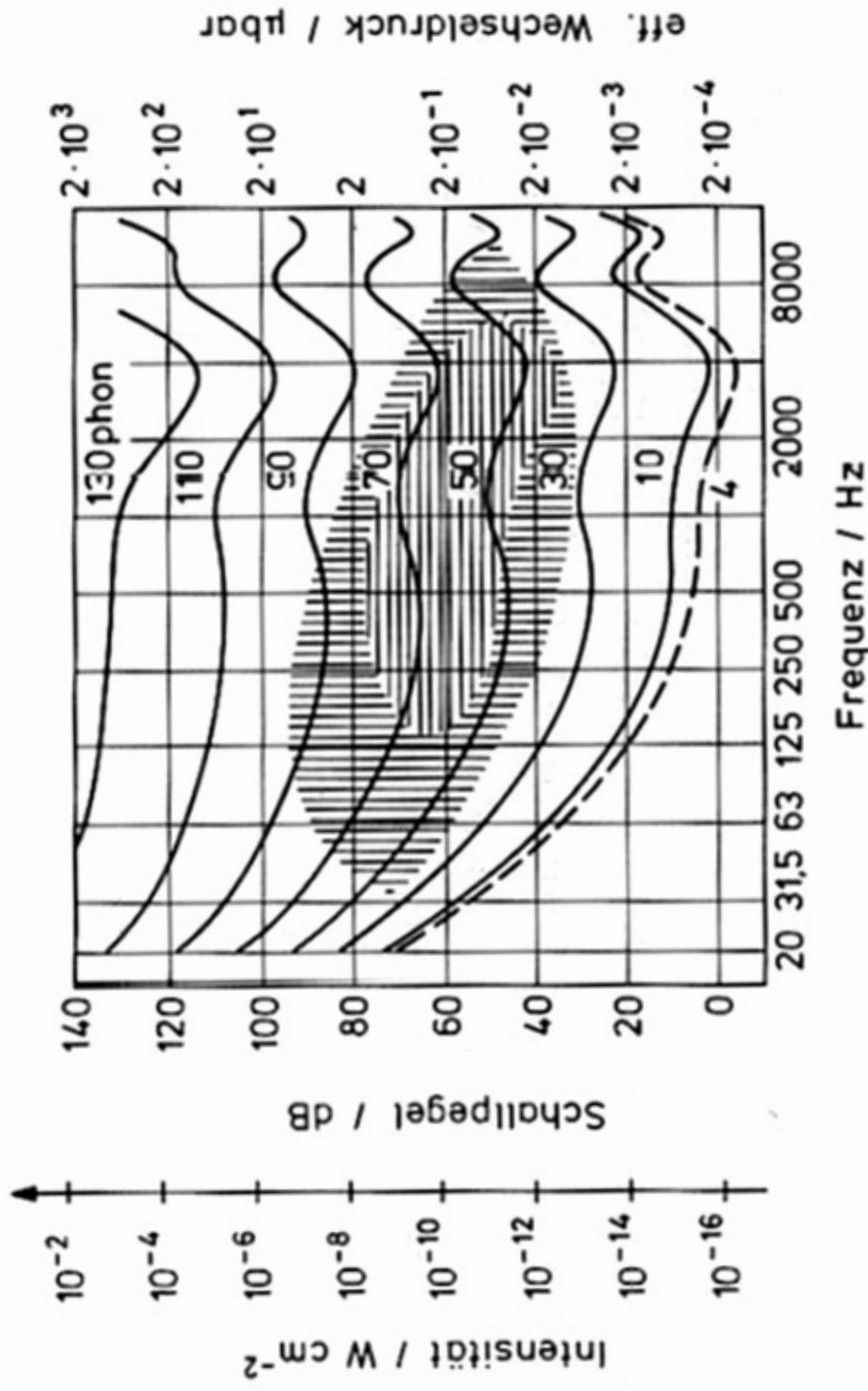


Fig. 13.31 Der Hörbereich des menschlichen Gehörs

≡ Bereich der Sprache

||||| Bereich der Musik

Die unterste Kurve stellt die Hörschwelle dar

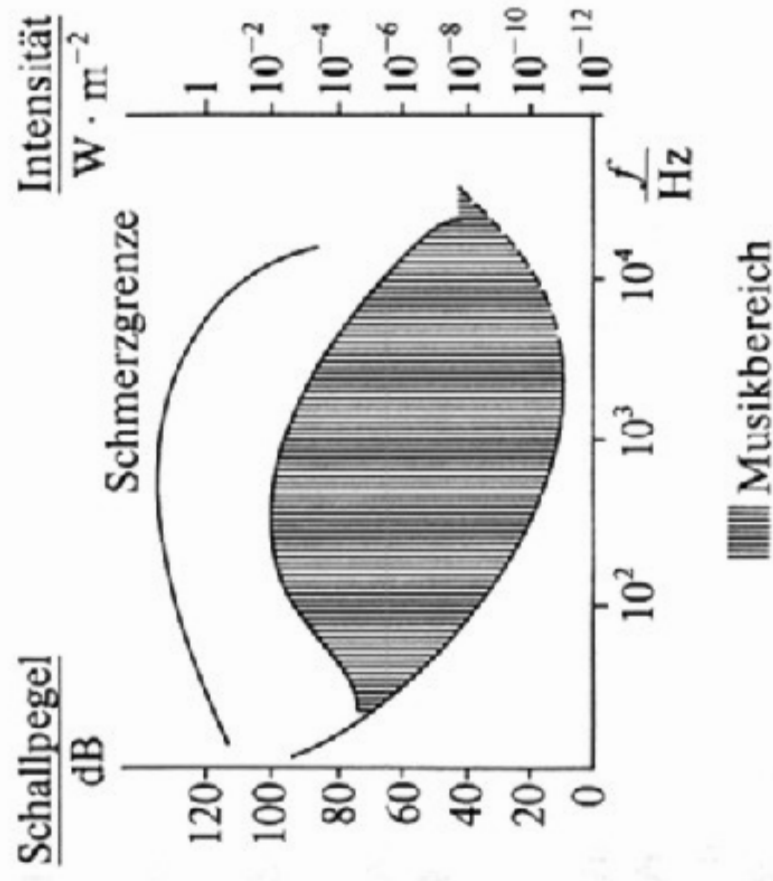


Abb. 7.23. Untere Schwelle der Hörempfindlichkeit des menschlichen Ohres in Abhängigkeit von der Frequenz; ermittelt mit einem Audiometer. Die Schmerzgrenze ist ebenfalls angegeben.

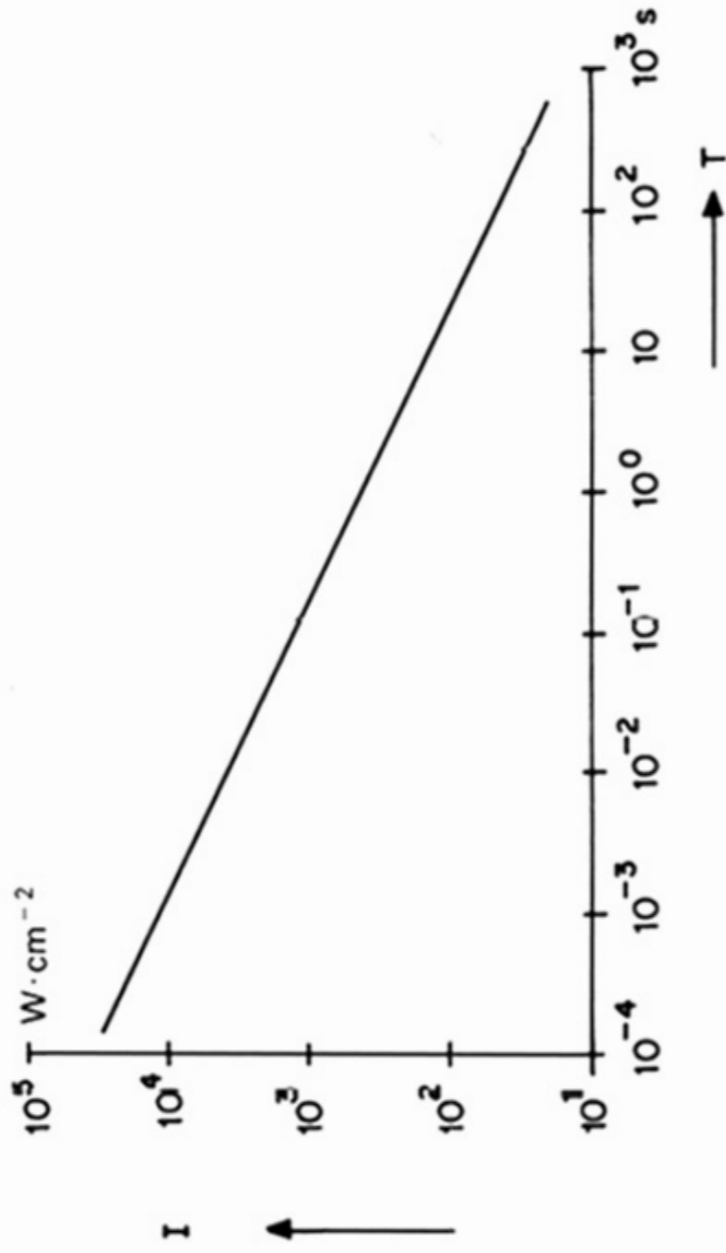


Abb. 4.29. Ungefährer Verlauf der Intensitätsschwelle für histologisch nachweisbare Schädigungen von Säugergewebe mit normalem Stoffwechsel in Abhängigkeit von der Beschallungsdauer T (nach A. R. Williams, 1983)

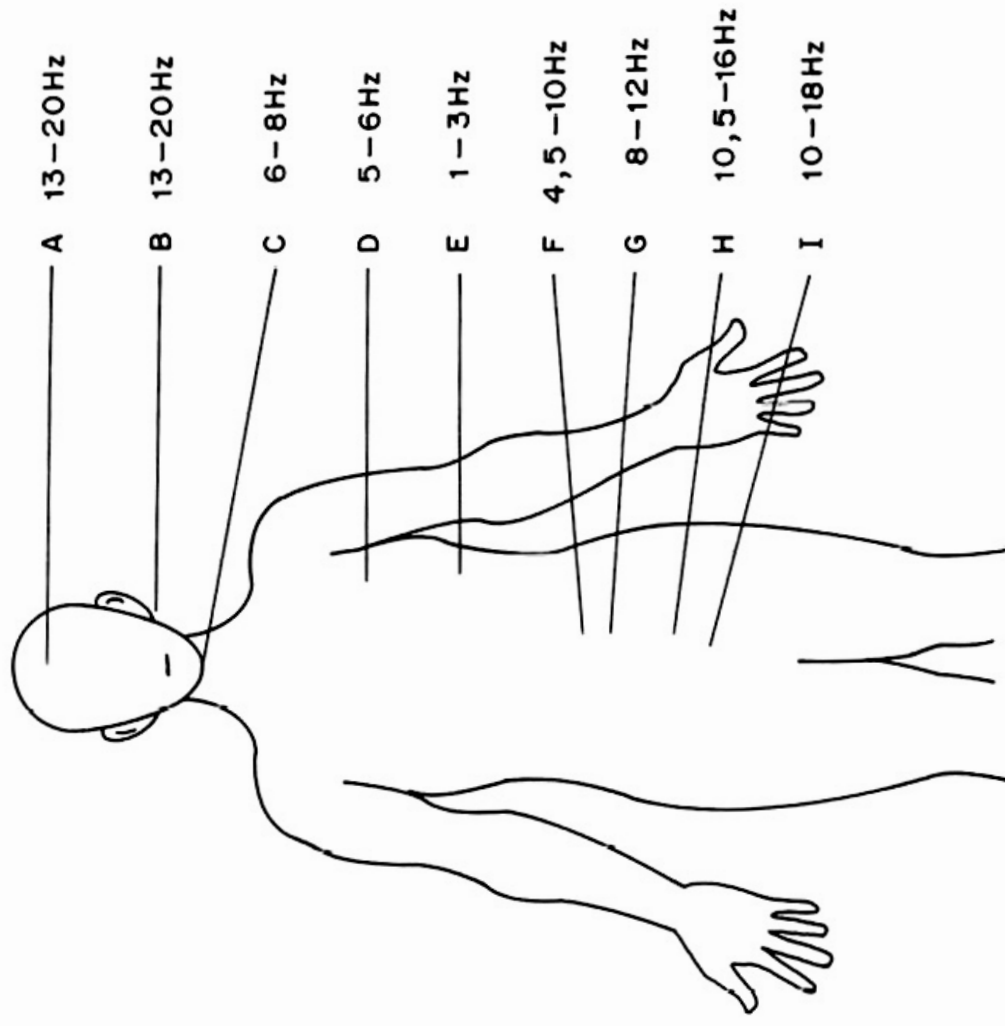


Abb. 4.5. Durch Schwingungen im angegebenen Frequenzbereich hervorgerufene Beschwerden: A Kopfschmerzen, B Sprechschwierigkeiten, C Kieferschmerzen, D Brustschmerzen, E Atembeschwerden, F Bauchschmerzen, G Kreuzschmerzen, H Defäkationsdrang, I Miktionsdrang; nach J. R. Cameron and J. G. Skofronic, 1978

Der **Schallpegel** bezieht sich auf die **physikalischen Eigenschaften** von Schallwellen, das **Schallempfinden** des menschlichen Gehörs hängt aber noch von seiner spektralen Empfindlichkeit ab.

Dies beschreibt die physiologische Größe **Lautstärke L** , die in **Phon** (Abk. phon) gemessen wird.

Töne (auch unterschiedlicher Frequenz), die **gleich laut empfunden werden**, haben **dieselbe Lautstärke L** . Bei 1000 Hz sollen der Schallpegel L_S in dB und die Lautstärke L in phon übereinstimmen.

Danach hat ein **Ton einer beliebigen Frequenz von x phon dieselbe Lautstärke wie der Ton des Schallpegels x dB bei 1000 Hz**.

Ultraschall:

Verwendung in Medizin für Diagnose, Therapie und Chirurgie.

Um Reflexionen am Körper zu vermeiden, muß Gel aufgebracht werden.

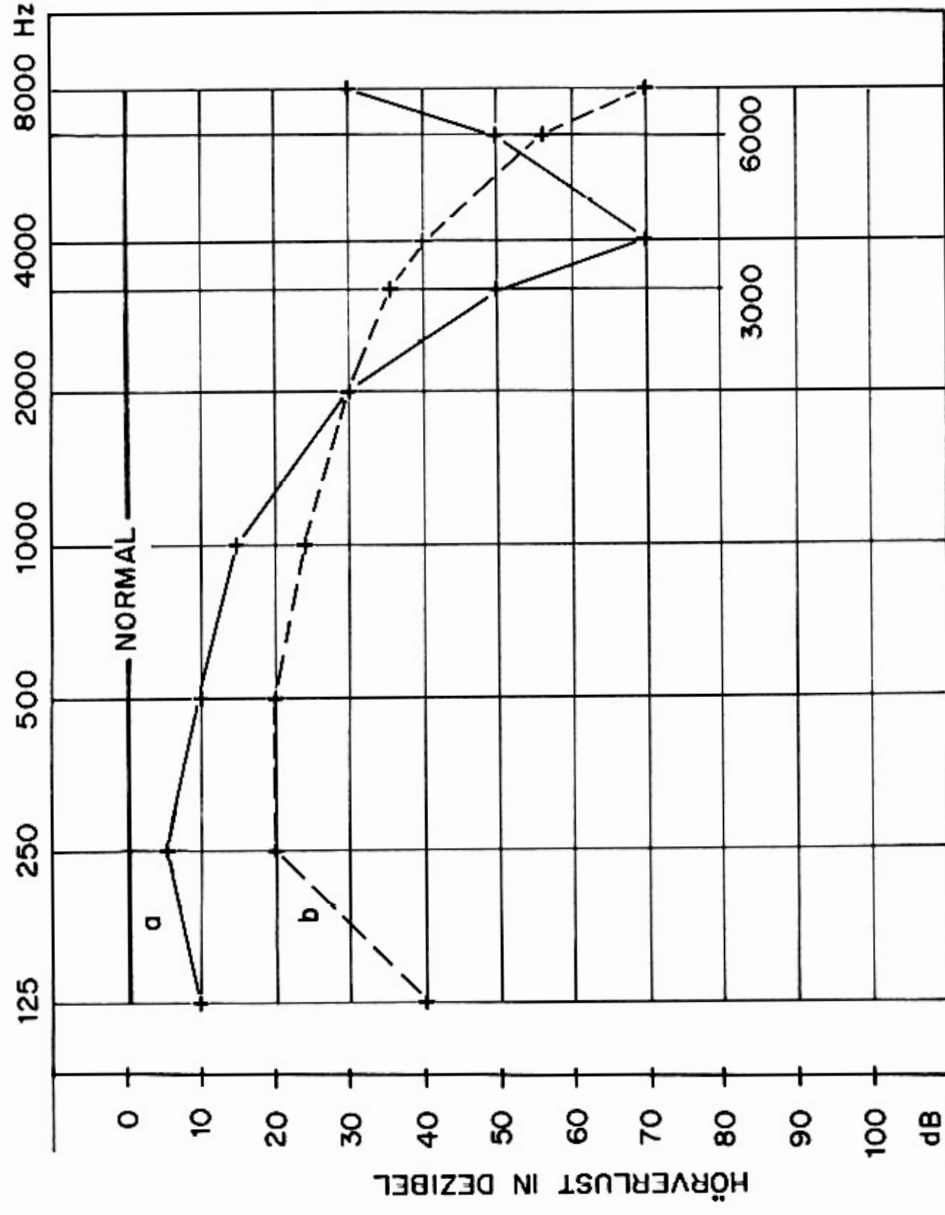


Abb. 4.13. Audiogramme. Üblicherweise wird, wie hier angedeutet, der Hörverlust in Dezibel auf der Abszisse nach unten aufgetragen. Bei Lärmschwerhörigkeit tritt eine typische Absenkung der Hörschwelle im Bereich zwischen 3 und 6 kHz auf (Graph a). Graph b ist typisch für Altersschwerhörigkeit

Ultraschall-Sender (piezoelektrisch oder magnetostraktiv)

erzeugt **Pulse, die an "Inhomogenitäten" des Gewebes reflektiert werden.**

Echo wird in Empfänger registriert und auf Bildschirm sichtbar gemacht.

Intensität nicht zu groß ($< 3 \cdot 10^4 \text{ W/m}^2$), sonst aufgrund großer örtlicher Druckschwankungen Zerreißen von Zellmembranen möglich.

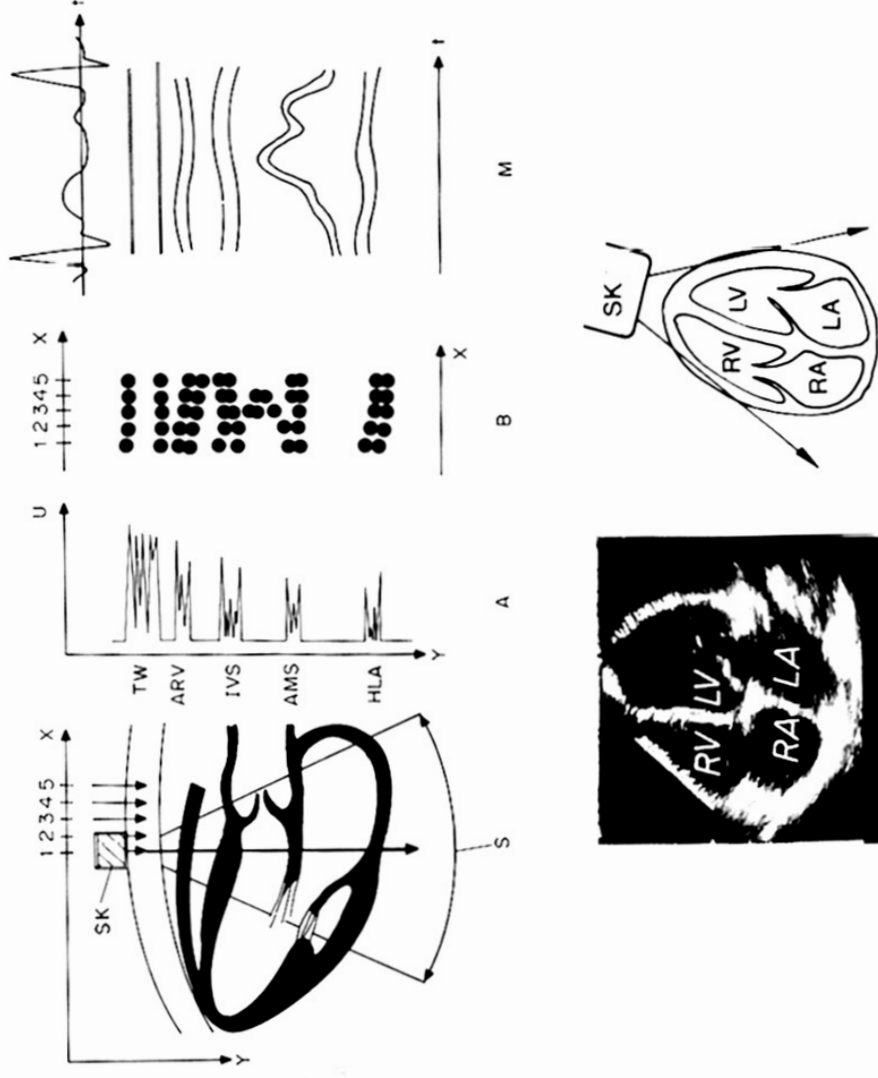


Abb. 4.22. a A-Bild, B-Bild und M-Bild bei der Durchschallung des Herzens. Links sind Struktur und Lage des Herzens hinter der Thoraxwand TW dargestellt. SK ist der Schallkopf, er emittiert kurze Schallimpulse, deren Echos in Spannungsimpulse umgewandelt werden. Das A-Bild entsteht, wenn man diese Spannungsimpulse am Bildschirm eines Oszilloskops darstellt (ARV = Vorderwand des rechten Ventrikels, IVS = interventrikuläres Septum, AMS = anteriores Mitralsegl, HLA = Hinterwand des linken Vorhofs). Das B-Bild entsteht durch Verschieben des Schallkopfs in x-Richtung und Registrierung der positionsabhängigen Schallechos in einem Bild unter Berücksichtigung der x-Koordinate. Eine Variante des B-Bilds ist das Sek-orscan-Verfahren, bei dem das Schallbündel durch Schwenken des Schallkopfs (im Innern des Schallkopfgehäuses, s. Abb. 23.6) ein fächerförmiges Gebiet (S) überstreicht. Das M-Bild entsteht durch Aufzeichnung des zeitlichen Verlaufs der Echoorte bei fester x-Position. b Beispiel einer Vierkammer-Sektoraufnahme des Herzens. Apikal; der Schallkopf (= gleichzeitig Empfänger) befindet sich nahe der Herzspitze. SK = Schallkopf, RV = rechter Ventrikel, LV = linker Ventrikel, RA = rechter Vorhof, LA = linker Vorhof. Foto: Kretztechnik