

Big Bang 5

2 Die sieben SI-Einheiten

Basisgröße und Formelbuchstabe	Basiseinheit
Länge l	m (Meter)
Zeit t	s (Sekunde)
Masse m	kg (Kilogramm)
Stoffmenge n	mol (Mol)
Temperatur T	K (Kelvin)
Stromstärke I	A (Ampere)
Lichtstärke I_v	cd (Candela)

Tab. 2.1: Hier siehst du die 7 Basiseinheiten nach dem SI. Wenn man die Einheiten angibt, dann setzt man die Größe in Klammer. Statt „Die Einheit der Länge ist das Meter“ schreibt man also kurz und bündig $[l] = \text{m}$.

	ungefähre Dichte in kg/m^3
Styropor	20–60
Kork	120–550
Holz	450–900
Aluminium	2700
Eisen	7860
Kupfer	8920
Blei	11.340
Gold	19.320
Erde als Schwarzes Loch	10^{30}

Tab. 2.4: Beispiel für Dichten verschiedener Festkörper. Naturstoffe und Stoffe mit Hohlräumen haben je nach Beschaffenheit ziemlich schwankende Dichten.

Vielfaches der Einheit	Vorsilbe	Abkürzung	Beispiele
10^{12}	Tera	T	16 TB Festplatte (seit 2019 erhältlich)
10^9	Giga	G	Lichtgeschwindigkeit $3 \cdot 10^8 \text{ m/s} = 0,3 \text{ Gm/s}$
10^6	Mega	M	700 MB CD-Rohling: für 80 min. Spielzeit
10^3	Kilo	k	Kilometer, Kilogramm
10	Deka	da	wird nur für $10 \text{ g} = 1 \text{ dag}$ benutzt
10^{-1}	Dezi	d	wird z. B. für Dezimeter und Deziliter benutzt
10^{-2}	Centi	c	wird z. B. für cm benutzt
10^{-3}	Milli	m	z. B. Millimeter
10^{-6}	Mikro	μ	Dicke von Blattgold oder kleines Bakterium: ca. $1 \mu\text{m}$
10^{-9}	Nano	n	Haarwuchs: 4 nm pro Sekunde
10^{-12}	Pico	p	Der Durchmesser eines Atomkerns liegt um $0,01 \text{ pm}$

Tab. 2.2: Eine Auswahl von Vorsilben, die in Physik und Alltag vorkommen. Die Tabelle geht in beide Richtungen noch viel weiter, das ist aber vor allem für Wissenschaftler bedeutsam.

	ungefähre Dichte in kg/m^3
Helium	0,18
Luft, 20 °C, Normaldruck	1,20
Kohlenstoffdioxid	1,98
Olivenöl	910
Eis 0 °C	917
Mensch, eingeatmet	940–990
Wasser, 4 °C	1000
Mensch, ausgeatmet	1010–1100
Meerwasser normal	1025
Totes Meer	1170
Quecksilber	13.546

Tab. 2.3: Beispiele für Dichten verschiedener Flüssigkeiten und Gase

5 Geradlinige Bewegungen

F	Formel: Geschwindigkeit
$\mathbf{v} = \frac{\Delta \mathbf{s}}{\Delta t} \Rightarrow \Delta \mathbf{s} = \mathbf{v} \cdot \Delta t$	
$\mathbf{v}$... Geschwindigkeit	$[v] = \text{m/s}$
$\Delta \mathbf{s}$... Wegstück	$[\Delta s] = \text{m}$
Δt ... Zeitintervall	$[\Delta t] = \text{s}$

Beispiel	m/s	Kommentar
Haarwuchs	$4 \cdot 10^{-9}$	umgerechnet 1 mm in drei Tagen
Weinbergschnecke	$8,3 \cdot 10^{-4}$	entspricht etwa 3 m pro Stunde
Mensch, Gehen	1	Bummeltempo → Info: Bummeltempo
Mensch, Marathon	5,19/5,72	errechnete Durchschnittsgeschwindigkeit beim Marathonweltrekord Frauen/Männer
Mensch, Sprint	12,5	maximale gemessene Geschwindigkeit beim 100-m-Sprint der Männer; entspricht über 44 km/h
Gepard	28 bis 33	etwa 100 bis 120 km/h; schnellstes Säugetier
Schall in Luft, 20 °C	342	Schall benötigt in der Luft etwa 3 Sekunden pro km (→ F8). v ist von der Temperatur abhängig.
Satellit	$7,9 \cdot 10^3$	Geschwindigkeit für Kreisbahn um die Erde
Satellit	$11,2 \cdot 10^3$	Geschwindigkeit, um Erde zu verlassen; ist um den Faktor 10^4 kleiner als c
Lichtgeschwindigkeit (c)	$3 \cdot 10^8$	höchstmögliche Geschwindigkeit im gesamten Universum

Tab. 5.1: Einige Beispiele zu Geschwindigkeiten

F	Formel: Beschleunigung
$\mathbf{a} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} \Rightarrow \Delta \mathbf{v} = \mathbf{a} \cdot \Delta t$	
$\mathbf{a}$... Beschleunigung	$[a] = [v]/[t] = (\text{m/s})/\text{s} = \text{m/s}^2$
$\Delta \mathbf{v}$... Geschwindigkeitsänderung	$[\Delta v] = \text{m/s}$
Δt ... Zeitintervall	$[\Delta t] = \text{s}$

Big Bang 5

F Formel: Falltiefe beim freien Fall

$$s = \frac{v \cdot t}{2} = \frac{a \cdot t \cdot t}{2} = \frac{a}{2} t^2 \Rightarrow t = \sqrt{\frac{2s}{a}}$$

a ... Beschleunigung $[a] = \text{m/s}^2$
 v ... Geschwindigkeitsänderung $[v] = \text{m/s}$
 t ... Zeit $[t] = \text{s}$
 Gilt, wenn s , t und v zu Beginn der Messung null sind.

Strecke	Zeit [s] [m/s]	t pro 10 m [s]	mittlere v
10 m	2,38	2,38 - 0 = 2,38	4,20
20 m	3,81	3,81 - 2,38 = 1,43	6,99
30 m	5,13	5,13 - 3,81 = 1,32	7,58
40 m	6,52	6,52 - 5,13 = 1,39	7,19
50 m	7,88	7,88 - 6,52 = 1,36	7,35
60 m	9,29	9,29 - 7,88 = 1,41	7,09

Tab. 5.2: Protokoll eines 60-m-Laufs

Unbeschleunigte Bewegungen	beschleunigte Bewegungen
Werden auch gleichförmige Bewegungen genannt.	Werden auch ungleichförmige Bewegungen genannt.
Es treten keine Beschleunigungen auf.	Es treten Beschleunigungen in irgendwelcher Form auf.
Der Geschwindigkeitsvektor bleibt gleich.	Richtung und/oder Betrag des Geschwindigkeitsvektors ändern sich.
Nur bei reiner Translation möglich.	Bei Translation und Rotation möglich.
Kann nur relativ gemessen werden. Relativ bedeutet „vergleichsweise“.	Kann absolut gemessen werden. Absolut bedeutet „losgelöst“.
Alle Experimente funktionieren ganz normal.	Durch die Beschleunigung treten Kräfte auf, die Experimente verfälschen können.
Es gibt nur eine Möglichkeit, nicht zu beschleunigen.	Es gibt unendlich viele Möglichkeiten zu beschleunigen.

Tab. 5.3: Überblick über die beiden Arten von Bewegungen

7 Newton mal drei

F Formel: Bewegungsgleichung

Kraft = Masse · Beschleunigung

$$F = m \cdot a \text{ oder } a = F/m$$

F ... beschleunigende Kraft $[F] = [m] \cdot [a] = \text{kg} \cdot \text{m/s}^2 = \text{N}$
 m ... Masse des Gegenstands $[m] = \text{kg}$
 a ... Beschleunigung des Gegenstands $[a] = \text{m/s}^2$

Stoffpaare	Haftreibungszahl	Gleitreibungszahl
Holz auf Stein	0,7	0,3
Gummi auf Beton (trocken)	0,65	0,5
Gummi auf Beton (nass)	0,4	0,35
Gummi auf Eis (trocken)	0,2	0,15
Gummi auf Eis (nass)	0,1	0,08
Stahl auf Teflon	0,04	0,04
Schlittschuh auf Eis	0,03	0,01

Tab. 7.1: **Reibungszahlen** für verschiedene Materialien. Der Bremsweg eines Autos ist indirekt proportional zur Reibungszahl: doppelte Reibungszahl, halber Bremsweg (siehe → F32, S. 68). Auf nasser Fahrbahn ist der Bremsweg also um 1/3 länger und auf nassem Eis sogar etwa 6-mal so lang wie auf trockener Straße.

F Formel: Zentripetalkraft

$$F_{zp} = m \frac{v^2}{r}$$

$[F] = \text{N}$
 m ... Masse $[m] = \text{kg}$
 r ... Radius der Kreisbahn $[r] = \text{m}$
 v ... Tangentialgeschwindigkeit $[v] = \text{m/s}$
 v^2/r ... Zentripetalbeschleunigung $[a] = \text{s}^{-2}$

8 Arbeit und Energie

F Formel: Arbeit

Arbeit = Kraft (in Wegrichtung) mal Weg

$$W = F_p \cdot s$$

W ... Arbeit (work) $[W] = \text{N} \cdot \text{m} = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} = \text{J (Joule)}$
 F_p ... Kraft parallel zum Weg $[F_p] = \text{N}$
 s ... Weg $[s] = \text{m}$

F Formel: Hebearbeit

Hebearbeit (W_H) und potenzielle Energie (Hebeenergie E_p)

$$W_H = E_p = m \cdot g \cdot h$$

m ... Masse $[m] = \text{kg}$
 g ... Erdbeschleunigung $[g] = \text{m/s}^2$
 $m \cdot g$... Gewicht $[m \cdot g] = \text{N}$
 h ... Hebehöhe $[h] = \text{m}$

F Formel: Beschleunigungsarbeit

Beschleunigungsarbeit (W_B) und kinetische Energie (E_k)

$$W_B = E_k = \frac{mv^2}{2}$$

m ... Masse $[m] = \text{kg}$
 v ... Geschwindigkeit $[v] = \text{m/s}$

Big Bang 5

F Formel: Leistung

Leistung = Arbeit/Zeit

$$P = W/t$$

P ... Leistung (power)

t ... Zeit

$$[P] = [W]/[t] = J/s = W \text{ (Watt)}$$

$$[t] = s$$

Beispiel	Leistung	Kommentar
Mensch, Dauerleistung	100–500 W	Der untere Wert gilt für Untrainierte, der obere Wert für Weltklasseathleten (siehe Kap. 8.8, S. 81).
helle, alte Glühbirne, PC	100 W	Seit 2009 dürfen nur mehr Lagerbestände der alten Glühbirnen verkauft werden.
Toaster	800 W	Diese Angaben sind geräteabhängige Richtwerte.
Fön	1300 W	
Backrohr	3000 W	
Mensch, Höchstleistung	≈7500 W	Berechenbare kurzzeitige Höchstleistung von Weltklasseathleten
PKW-Motor	37–882 kW	Vom kleinen Smart bis zum kräftigen Bugatti Veyron: Nach oben gibt es fast keine Grenzen!
Taurus (stärkste Lok der ÖBB)	6400 kW	Entspricht 8.700 PS und somit der Leistung von etwa 235 Smarts.
Donaukraftwerke	$2 \cdot 10^8$ W	
Blitz	10^9 W	Ein Blitz hat eine sehr hohe Leistung, dauert aber nur etwa 10^{-4} s.
Sonne	10^{26} W	Mit Abstand die größte Energiequelle im Sonnensystem.

Tab. 8.1: Einige Beispiele zu Leistungen. Beim Menschen sind die Nettowatt angegeben. Die Bruttowatt sind etwa 3- bis 5-mal so groß (siehe Wirkungsgrad S. 81/82).

F Formel: Wirkungsgrad

$$\text{Wirkungsgrad } \eta = \frac{\text{Nettoenergie } E_N}{\text{Bruttoenergie } E_B}$$

$$[\eta] = J/J = 1$$

η (sprich: eta) ist eine reine Zahl ohne Einheit. Der Wirkungsgrad wird auch oft in % angegeben

System	η	Bruttoenergie $\Rightarrow$ Nettoenergie
Generator	99 %	mechanisch $\Rightarrow$ elektrisch
Elektromotor	95 %	elektrisch $\Rightarrow$ mechanisch
Batteriezele	90 %	chemisch $\Rightarrow$ elektrisch
Automotor	25 %	chemisch $\Rightarrow$ mechanisch
Dauerleistung Mensch	15–25 %	chemisch $\Rightarrow$ mechanisch
Energiesparlampe	25 %	elektrisch $\Rightarrow$ Licht
Solarzelle	15–20 %	Licht $\Rightarrow$ elektrisch
alte Glühlampe	5 %	elektrisch $\Rightarrow$ Licht
Photosynthese	1 %	Licht $\Rightarrow$ chemisch

Tab. 8.2: Richtwerte für den Wirkungsgrad bei verschiedenen Energieumwandlungen

1 g Kohlenhydrate	17 kJ	(4,1 kcal)
1 g Eiweiß	17 kJ	(4,1 kcal)
1 g Körperfettgewebe	30 kJ	(7,1 kcal)
1 g Fett	39 kJ	(9,3 kcal)
1 g Alkohol	30 kJ	(7,1 kcal)

Tab. 8.3: Energiegehalt verschiedener Nährstoffe

Betätigung		kJ/h	h, um 1 kg abzunehmen
Gehen in der Ebene	3 km/h	600	50
	5 km/h	1000	30
	7 km/h	1800	17
Laufen in der Ebene (Person mit 60 kg)	10 km/h (6 min/km)	2400	12,5
	12 km/h (5 min/km)	2880	10,4
	15 km/h (4 min/km)	2600	8,3
Radfahren in der Ebene	12 km/h (5 min pro km)	890	34
	16 km/h (3:35 min pro km)	1300	23
	20 km/h (3 min pro km)	2000	15
Schwimmen	1,7 km/h (20 m/min)	1730	17
	2,2 km/h (36 m/min)	2500	12
	3 km/h (50 m/min)	2850	11

Tab. 8.4: Energieumsatz bei verschiedenen Betätigungen und wie viele Stunden man braucht, um 30.000 kJ bzw. ein kg Fett zu verbrennen

9 Von Aristoteles bis Kepler

F Formel: 3. Kepler'sche Gesetz

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}$$

T ... Umlaufzeit

a ... große Halbachse

	Merkur	Venus	Erde	Mars	Jupiter	Saturn	Uranus	Neptun	Pluto
Abstand zur Sonne in AE	0,39	0,72	1	1,52	5,2	9,5	19,2	30,1	39,4
Umlaufzeit in Erdjahren	0,24	0,62	1	1,88	11,9	29,5	84,0	164,8	247,7
Masse in Erdmassen (ohne Monde)	0,06	0,81	1	0,11	318	95,2	14,5	17,2	0,0023
Masse in Prozent der gesamten Planetenmasse	0,013%	0,18%	0,22%	0,02%	71,2%	21,3%	3,2%	3,8%	$5 \cdot 10^{-4}$ %
Durchmesser in Erddurchmessern	0,38	0,94	1	0,53	22,4	18,9	8,2	7,8	0,36
Neigung der Planetenbahn zur Erdbahn (Ekliptik)	7°	3,4°	0°	1,85°	1,3°	2,5°	0,8°	1,8°	17,2°
Unterschied in den Halbachsen a und b	2,14%	0%	0,01%	0,43%	0,12%	0,14%	0,13%	0,01%	3,36%
mittlere Dichte des Planeten in kg/dm³	5,43	5,24	5,52	3,94	1,31	0,69	1,20	1,66	2,00
Monde (Stand 2016)	0	0	1	2	≈67	≈62	≈27	≈14	1
Entdeckungsjahr	prähistorisch	prähistorisch	prähistorisch	prähistorisch	prähistorisch	prähistorisch	1781	1846	1930

Tab. 9.1: Einige wichtige Daten zu den acht Planeten und zu Pluto. Für die Reihenfolge der Planeten gibt es folgenden Merkspruch: Mein Vater erklärt mir jeden Sonntag unsere Nachbarnplaneten.

Big Bang 5

Ursache	Entdeckungsjahr	geschätzte Durchmesser
Pluto	1930	2370 km
Quaoar	2002	1100 km
Sedna	2003	995 km
Orcus	2004	917 km
Eris	2005	2326 km

Tab. 9.2: Einige große Objekte des Kuiper-Gürtels

10 Newtons Gravitationsgesetz

F	Formel: Gravitationsgesetz
	$F_G = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$
F_G ... Gravitationskraft	$[F_G] = \text{N}$
m_1 und m_2 ... Massen der Gegenstände	$[m] = \text{kg}$
r ... Abstand der Schwerpunkte	$[r] = \text{m}$
G ... Gravitationskonstante	
$G = 6,673 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$	

Grundkraft (Wechselwirkung)	relative Stärke	Reichweite
starke Kraft	1	$\approx 10^{-15} \text{ m}$
elektromagnetische Kraft	10^{-2}	unendlich
schwache Kraft	10^{-5}	$\approx 10^{-18} \text{ m}$
Gravitation	10^{-38}	unendlich

Tab. 10.1: Vergleich zwischen Stärke und Reichweite der vier Grundkräfte in der Natur. Die elektromagnetische Kraft ist um den Faktor 10^{36} größer als die Gravitationskraft.

F	Formel: Hebearbeit (W_H) und potenzielle Energie (E_p)
	$W_H = E_p = m \cdot GM \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_n} \right)$
m ... Masse des gehobenen Objekts	$[m] = \text{kg}$
M ... Zentralmasse	$[M] = \text{kg}$
G ... Gravitationskonstante	
$G = 6,673 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$	
r_1, r_n ... Abstand der beiden Massen vor und nach der Hebung	$[r] = \text{m}$

Objekt	h in km	v_{Abschuss} in km/s	v_{Orbit} in km/s	T
„Tiefelfieger“	0	7,91	7,91	84 min
Space Shuttle	300	8,08	7,73	90 min
GPS-Satellit	20.000	10,48	3,88	12 h
geostationärer Satellit	36.000	10,75	3,07	24 h
theoretischer Satellit in Mondentfernung	373.630	11,13	1,02	27 d

Tab. 10.2: zu Abb. 10.25: h = Höhe über der Erdoberfläche, T = Umlaufzeit um die Erde ($\rightarrow$ F21).

11 Grundlagen der Thermodynamik

Begriff	Bedeutung in diesem Buch
ungeordnete Bewegungsenergie Einheit J	jene Energie, die in der ungeordneten Bewegung der Moleküle und Atome eines Objekts gespeichert ist
innere Energie (U) Einheit J	die Summe aus ungeordneter Bewegungsenergie und Bindungsenergie der Atome und Moleküle eines Objekts
Brown'sche Bewegung	unregelmäßige Bewegung eines sichtbaren Teilchens, die durch die thermische Bewegung kleinerer, nicht sichtbarer Teilchen verursacht wird
Temperatur (T) Einheit K	ein indirektes Maß für die thermische Bewegung der Atome und Moleküle eines Objekts
Wärme (Q) Einheit J	jener Teil der ungeordneten kinetischen Energie, der bei Berührung zweier Körper von selbst überfließt
Wärmekapazität (c) Einheit $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	sie gibt an, wie viel Energie notwendig ist, um 1 kg eines Stoffes um 1 °C zu erwärmen
Entropie (S) Einheit J/K	Maß für die Unordnung in einem System

Tab. 11.1: Einige Begriffe aus der Thermodynamik mit Bezeichnungen und Einheiten

Skala	Fahrenheit	Celsius	Kelvin
Erfinder	DANIEL FAHRENHEIT	ANDERS CELSIUS	WILLIAM THOMSON („LORD KELVIN“)
Jahr	≈ 1720	1742	1848
Fixpunkt 1	Kältemischung 0 °F	Schmelzpunkt Eis 0 °C	absoluter Nullpunkt 0 K
Fixpunkt 2	Körpertemperatur Mensch 100 °F	Siedepunkt Wasser 100 °C	Tripelpunkt des Wassers 273,16 K
spricht	Grad Fahrenheit	Grad Celsius	Kelvin

Tab. 11.2: Die drei wichtigsten Temperaturskalen im Vergleich. Bei Fahrenheit sind die historischen Fixpunkte angegeben. Der Tripelpunkt liegt bei 0,01 °C!

Fahrenheit in Celsius	$^{\circ}\text{C} = (^{\circ}\text{F} - 32) / 1,8$
Kelvin in Celsius	$^{\circ}\text{C} = \text{K} - 273$
Celsius in Kelvin	$\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273$
Celsius in Fahrenheit	$^{\circ}\text{F} = ^{\circ}\text{C} \times 1,8 + 32$

Tab. 11.3: Die wichtigsten Umrechnungsregeln

F	Formel: Zusammenhang Wärme – Temperatur
	$Q = c \cdot m \cdot \Delta T$
Q ... Wärme in J	
c ... spezifische Wärmekapazität in $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	
m ... Masse des erwärmten Objekts in kg	
ΔT ... Temperaturdifferenz in K	

Big Bang 5

12 Formen der Wärmeübertragung

F Formel: Wärmestrom

$$I = \frac{\Delta Q}{t} = \lambda \frac{A}{d} \Delta T$$

I ... Wärmestrom [J/s]
 λ ... Wärmeleitfähigkeit [Wm⁻¹K⁻¹]
 A ... Querschnitt [m²]
 d ... Wanddicke [m]
 ΔT ... Temperaturdifferenz [K]

Stoff	λ [W/(m · K)]	relativ
Silber	430	18.000
Aluminium	205	8500
Eisen	80	3300
Haut (stark durchblutet)	0,8	33
Wasser (ruhend)	0,6	25
Haut (schwach durchblutet)	0,2–0,3	8–13
Fett	0,16	6,7
Fichtenholz	0,13	5,4
Styropor (Polystyrol)	0,035	1,5
Wolle, Federn, Fell	0,025	1
Luft (20 °C, ruhend)	0,024	1

Tab. 12.1: Absolute und gerundete relative Wärmeleitfähigkeit einiger Stoffe (bezogen auf Luft)

Material	U-Wert [W/(m ² · K)]
Doppelfenster Normalglas	2,5
Doppelfenster Thermoglas	1,3
Beton, 1 m	0,6
Ziegel voll 40 cm bzw. hohl 25 cm	0,6
Styropor 5 cm	0,6
Hohlziegel 45 cm + Styropor 5 cm	0,29
Planziegel Porotherm 50 (verputzt)	0,19

Tab. 12.2

13 Ausdehnung, Diffusion und Phasenübertragung

Material	α , relative Längenausdehnung pro Grad	γ , relative Volumenausdehnung pro Grad
Luft und N ₂ -Gas	–	$3,7 \cdot 10^{-3}$
Quecksilber	–	$0,18 \cdot 10^{-3}$
Alkohol	–	$1,1 \cdot 10^{-3}$
Wasser	–	$0,2 \cdot 10^{-3}$
Zink	$3,6 \cdot 10^{-5}$	$10,8 \cdot 10^{-5}$
Stahl	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$3,9 \cdot 10^{-5}$
Beton	$0,7\text{--}1,3 \cdot 10^{-5}$	$2,1\text{--}3,9 \cdot 10^{-5}$
Glas	$0,9 \cdot 10^{-5}$	$2,7 \cdot 10^{-5}$
Quarzglas	$0,05 \cdot 10^{-5}$	$0,15 \cdot 10^{-5}$

Tab. 13.1: Relative Ausdehnungen einiger Materialien. Um auf den absoluten Wert zu kommen, musst du mit der Temperaturdifferenz und dem Ausgangswert multiplizieren. Es gilt: $\gamma \approx 3\alpha$.

Stoff	Schmelzwärme bzw. Erstarrungswärme kJ/kg	Verdampfungswärme bzw. Kondensationswärme kJ/kg	spez. Wärmekapazität kJ/(kg · K)
Eis	334	–	2,1
Wasser	–	2256	4,2
Wasserdampf	–	–	1,9
Eisen	268	6364	0,47
Zinn	59	2450	0,22
Blei	23,2	921	0,13

Tab. 13.2: Spezifische Wärmekapazität und Wärmemenge für Phasenübergänge (siehe Abb. 13.18). Blei und Zinn haben einen sehr niedrigen Schmelzpunkt und eine sehr geringe Schmelzwärme und eignen sich daher gut zum „Bleigießen“ (→ F18). Beachte, dass die spezifische Wärmekapazität für Eis, Wasser und Wasserdampf unterschiedlich ist. Die Werte gelten für Normaldruck.

relativer Druck	Siedetemperatur	Höhe und Beispiel
0,33	70 °C	8848 m, Mount Everest
0,56	84 °C	4810 m, Mont Blanc
1	100 °C	0 m, Meeresniveau
2	120 °C	–5500 m, Druckkochtopf

Tab. 13.3: Beispiele für Druck, Siedetemperatur und Seehöhe

14 Die Gasgesetze

F Formel: Allgemeine Druckgleichung

$$p = \frac{F}{A}$$

Druck eines idealen Gases

$$p = \frac{2N}{3V} \bar{E}_{kin}$$

p ... Druck [Pa]; F ... Kraft [N]; A ... Fläche [m²];
 N ... Anzahl der Teilchen; V ... Volumen [m³]
 $\bar{E}_{kin}$... durchschnittliche kinetische Energie eines Moleküls [J]

Big Bang 5

Druckeinheit	Normaldruck
Pascal (Pa) = 1N/m ²	101.300 Pa = 1013 hPa
Bar (bar)	1,013 bar
Millibar (mbar)	1013 mbar
Torr (torr oder mmHg)	760 Torr
Physikalische Atmosphären (atm)	1 atm

Tab. 14.1: Das **Pascal** ist eine SI-Einheit. Das **Bar** basiert auf cm, s und g und wird meistens beim Reifendruck verwendet. 1 **Torr** entspricht dem Druck einer Quecksilbersäule mit 1 mm. Diese Einheit wird in der Medizin verwendet, etwa bei der Blutdruckmessung. Ein hPa ist gleich einem mbar.

Gesetz von	besagt, dass	Bedingung
J. A. C. CHARLES (1746–1823)	$V/T = \text{konstant}$ $V \sim T$	$p = \text{konstant}$ isobar
JOSEPH GAY-LUSSAC (1778–1850)	$p/T = \text{konstant}$ $p \sim T$	$V = \text{konstant}$ isochor
ROBERT BOYLE (1627–1691) und EDME MARIOTTE (1620–1684)	$pV = \text{konstant}$ $p \sim 1/V$	$T = \text{konstant}$ isotherm
allgemeines Gasgesetz	$pV/T = \text{konstant}$	keine

Tab. 14.2: Überblick über die drei Gasgesetze. Die Teilchenzahl des Gases ist immer konstant angenommen. Aus $V \sim T$ und $p \sim T$ folgt $pV \sim T$. Daraus folgt wiederum $pV = T \cdot \text{konstant}$ und somit $pV/T = \text{konstant}$. Diese Konstante kann nur im Experiment ermittelt werden.

F	Formel: Allgemeine Gasgleichung
	$\frac{pV}{T} = nR$ oder $\frac{pV}{T} = Nk$
	p ... Druck [Pa]; V ... Volumen [m ³]; n ... Anzahl der Mol; R ... allgemeine Gaskonstante = 8,135 J/mol · K T ... absolute Temperatur [K]; N ... Anzahl der Teilchen; k ... Boltzmann-Konstante $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K

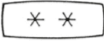
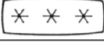
Jahr	Forscher	
1877	LOUIS PAUL CAILLETET	Verflüssigung von Sauerstoff bei -183 °C (90 K)
1895	GOTTFRIED VON LINDE	stellt bei -193 °C (80 K) erstmals größere Mengen flüssiger Luft her
1898	JAMES DEWAR	Verflüssigung von Wasserstoff bei -253 °C (20 K)
1908	HEIKE KAMERLINGH-ONNES	Verflüssigung von Helium bei -269 °C (4,2 K)
1911	HEIKE KAMERLINGH-ONNES	Entdeckung der Supraleitung von Quecksilber unter 4,2 K
1995	ERIC CORNELL u. a.	Erzeugung eines Bose-Einstein-Kondensats bei weniger als 10^{-6} K
2005	WOLFGANG KETTERLE u. a.	Erzeugung von weniger als 1 Nanokelvin (10^{-9} K)

Tab. 15.2: Meilensteine der Tieftemperaturphysik

Ottomotor	Dieselmotor
Es wird ein Luft-Benzin-Gemisch angesaugt und verdichtet.	Es wird reine Luft angesaugt und verdichtet.
Die Zündung des Kraftstoffs erfolgt durch den Funken einer Zündkerze (Fremdzündung).	Die Zündung des Kraftstoffs erfolgt von selbst, wenn Diesel in die heiße Luft eingespritzt wird (Selbstzündung).
explosionsartige Verbrennung	gleichmäßige Verbrennung
Wirkungsgrad bis 40 %	Wirkungsgrad bis 50 %
billiger in der Anschaffung, teurer im Betrieb	teurer in der Anschaffung, billiger im Betrieb

Tab. 15.4: Unterschiede zwischen Otto- und Dieselmotor. Weil die Anschaffung eines Dieselaautos mehr kostet, der Betrieb aber billiger ist, eignen sich diese vor allem für Vielfahrer.

15 Kältetechnik und Wärmekraftmaschinen

Symbol	Temperatur	Haltbarkeit der Lebensmittel
	-6 °C	einige Tage
	-12 °C	ca. 2 Wochen
	-18 °C	ca. 3 Monate
	-18 bis -25 °C	3 - 12 Monate

Tab. 15.1: Die Sterne geben an, wie kalt es im Tiefkühlfach bzw. der Tiefkühltruhe wird. Die Temperatur beträgt maximal -6 °C.

Big Bang 6

16 Impuls

F Formel: Impuls

$$\mathbf{p} = m \cdot \mathbf{v}$$

p ... Impuls $[p] = \text{kg} \cdot \text{m/s}$
 m ... Masse $[m] = \text{kg}$
 v ... Geschwindigkeit $[v] = \text{m/s}$

Massenverhältnis	Geschwindigkeiten: schwarz vor dem Stoß, rot danach	Beispiel
1) $m_1 \ll m_2$		Flummi wird auf die Erde geworfen
2) $m_1 < m_2$		
3) $m_1 = m_2$		Billardstoß
4) $m_1 > m_2$		Fußball, Tennis, Hammer auf Meißel

Tab. 16.1: Qualitative Zusammenfassung der Möglichkeiten bei einem elastischen Stoß

F Formel: Kraft und Kraftstoß

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} = m \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{\Delta \mathbf{p}}{\Delta t}$$

$$\text{Kraftstoß} = \mathbf{F} \Delta t = \Delta \mathbf{p} = m \Delta \mathbf{v}$$

Δp ... Impulsänderung $[\Delta p] = [F \cdot t] = \text{Ns} = \text{kgm/s}$
 m ... Masse $[m] = \text{kg}$
 a ... Beschleunigung $[a] = \text{m/s}^2$
 Δv ... Geschwindigkeitsänderung $[\Delta v] = \text{m/s}$

Objekt	Drehmasse
	$I = \frac{2}{5} mR^2$
	$I = \frac{1}{2} mR^2$ Bsp.: $r = 0,01 \text{ m}, m = 1 \text{ kg}$ $I = 5 \cdot 10^{-5} \text{ kgm}^2$
	$I = \frac{1}{12} mR^2$ Bsp.: $r = 0,77 \text{ m}, m = 1 \text{ kg}$ $I = 5 \cdot 10^{-2} \text{ kgm}^2$
	$I = \frac{1}{3} mR^2$

Tab. 17.1: Vier Beispiele für durch Integration berechnete Drehmassen bei geometrischen Objekten: Wenn der Stab 77cm lang ist und einen Radius von 1cm hat, dann ist es 1000-mal so schwer, ihn in Rotation um die Querachse zu bringen wie um die Längsachse.

F Formel: Das Drehmoment

$$\mathbf{M} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{r}$$

$$[M] = [F][r] = \text{Nm}$$

F ... Kraft $[F] = \text{N}$
 r ... Abstand zwischen Drehachse und Wirkungslinie der Kraft $[r] = \text{m}$

17 Rotationen

F Formel: Winkelgeschwindigkeit

$$\omega = \Delta \varphi / \Delta t$$

$$[\omega] = 1/\text{s} = \text{s}^{-1}$$

φ ... Drehwinkel „phi“ im Bogenmaß $[\varphi] = \text{m/m} = 1$

F Formel: Tangentialgeschwindigkeit

$$\mathbf{v} = \omega \mathbf{r}$$

$$[v] = \text{ms}^{-1}$$

ω ... Winkelgeschwindigkeit $[\omega] = \text{s}^{-1}$
 r ... Abstand von der Drehachse $[r] = \text{m}$

F Formel: Drehmasse (Trägheitsmoment)

$$I = \sum I_{\text{Teil}} = \sum m_i r_i^2$$

m ... Masse $[I] = \text{kgm}^2$
 r ... Abstand von der Drehachse $[m] = \text{kg}$
 $[r] = \text{m}$

F Formel: Drehimpuls

$$\mathbf{L} = I\omega$$

$$[L] = [I][\omega] = \text{kgm}^2\text{s}^{-1} = \text{kgm}^2\text{s}^{-2}\text{s} = \text{Js}$$

I ... Drehmasse $[I] = \text{kgm}^2$
 ω ... Winkelgeschwindigkeit $[\omega] = \text{s}^{-1}$

F Formel: Rotationsenergie (Drehenergie)

$$E_{\text{rot}} = \frac{I\omega^2}{2}$$

$$[E_{\text{rot}}] = [I][\omega^2] = \text{kgm}^2\text{s}^{-2} = \text{J}$$

I ... Drehmasse $[I] = \text{kg} \cdot \text{m}^2$
 ω ... Winkelgeschwindigkeit $[\omega] = \text{s}^{-1}$

F Formel: Zentripetalkraft

$$F_{\text{ZP}} = m \frac{v^2}{r} = m \frac{(r\omega)^2}{r} = m\omega^2 r$$

m ... Masse $[F] = \text{N}$
 r ... Radius der Kreisbahn $[m] = \text{kg}$
 v ... Tangentialgeschwindigkeit $[r] = \text{m}$
 ω ... Winkelgeschwindigkeit $[v] = \text{m/s}$
 $[\omega] = \text{s}^{-1}$

Big Bang 6

18 Grundlagen der Schwingungen

F Formel: Schwingungsdauer eines Fadenpendels (mathematischen Pendels)

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

$$T \sim \sqrt{l} \text{ und } T \sim \frac{1}{\sqrt{g}}$$

T ... Dauer für eine Hin- und Herbewegung (= Schwingungsdauer) in s
 l ... Pendellänge in m
 g ... Erdbeschleunigung (9,81 m/s²)

Ort	g	tägliche Abweichung
Graz	9,8070 m/s ²	0 s
Wien	9,8086 m/s ²	+7 s
Pol	9,832 m/s ²	+110 s
Äquator	9,780 m/s ²	-119 s
Mond	1,63 m/s ²	-14 h 10 min

Tab. 18.1: Gangungenauigkeit in Abhängigkeit von der Erdbeschleunigung für eine Pendeluhr, die auf Graz abgestimmt ist (+ bedeutet schnelleren Gang)

Auslenkung in Grad	Abweichung vom berechneten Wert in % und in Sekunden pro Minute
5°	0,05 % +0,03 s
10°	0,2 % +0,1 s
23°	1 % +0,6 s
68°	10 % +6 s
90°	19 % +13 s

Tab. 18.2: Detaildaten zur Abb. 18.6: Bis zu einer Auslenkung von 23° beträgt die Abweichung der Schwingungsdauer weniger als 1%, was in einer Minute nur einen Fehler von 0,6 s verursacht. Die rechte Spalte bezieht sich auf die Ungenauigkeit pro Minute bei einer ungedämpften Schwingung.

F Formel: Schwingungsdauer eines Federpendels

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

T ... Schwingungsdauer in s
 m ... Masse an der Feder in kg
 k ... Federkonstante in N/m

F Frequenz

$$f = \frac{1}{T}$$

f ... Frequenz in s⁻¹ bzw. Hz (Hertz)
 T ... Schwingungsdauer in s

Schallschwingung	periodisch/aperiodisch	Frequenzen	Beispiele
Ton	periodisch	1	elektronisch erzeugte Sinusschwingung
Klang	periodisch	2 – ∞	Klänge von Klavier, Geige, Gitarre oder der Singstimme
Schwebung (sie ist ein spezieller Klang)	periodisch	2	Überlagerung von Tönen mit leicht unterschiedlicher Frequenz
Geräusch	aperiodisch	2 – ∞	Schlagzeug, Percussion, Türknarren, Raschen, Knall, Rascheln, ...

Tab. 18.3: Physikalische Bezeichnung für verschiedene Schallschwingungen und deren Eigenschaften.

19 Wellengrundlagen 1

Wellenart	Was schwingt?	Beispiel	Schwingungsrichtung	Medium nötig	v
mechanische Wellen	Materie	Schall, Wasser- und Erdbebenwellen, ...	longitudinal und transversal	ja	$< c$
elektromagnetische Wellen	Kraftfeld (elektromagnetisches Feld)	Licht, Radiowellen, Handywellen, ...	nur transversal	nein	c
Gravitationswellen	Kraftfeld (Gravitationsfeld)	Wellen in der Raum-Zeit	nur transversal	nein	c
Materiewellen	Wahrscheinlichkeitsdichte	Atome, Moleküle, Elektronen, Protonen, ...	longitudinal und transversal	nein	$< c$

Tab. 19.1: Überblick über die verschiedenen Arten von Wellen. In der Quantentheorie werden elektromagnetische Wellen, Gravitationswellen und Materiewellen als „Quantenfelder“ beschrieben. Aber das ist eine andere Geschichte ... („Big Bang 7 und 8“). Die fortig hervorgehobenen Wellen werden in den entsprechenden Kapiteln besprochen.

F Formel: allgemeine Wellengeschwindigkeit

$$v = f \cdot \lambda \text{ oder } v = \frac{\lambda}{T}$$

v ... Geschwindigkeit in m/s
 f ... Frequenz in Hertz
 λ ... Wellenlänge in m
 T ... Schwingungsdauer in s

Welle	λ [m]	v [m/s]	f [s ⁻¹]	T [s]
grünes Licht	$5 \cdot 10^{-7}$	$c \approx 3 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^{14}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$
„Kammerton“ 440 Hz	0,77	≈ 340	440	$2,3 \cdot 10^{-3}$
10.000 Hz	0,034	≈ 340	10.000	10^{-4}
Trägerwellen 03	3,003	$c \approx 3 \cdot 10^8$	99,9	$1,001 \cdot 10^{-9}$
Tsunami	$2 \cdot 10^5$	200	0,001	1000

Tab. 19.2: Fünf Beispiele für Wellenlängen: Licht hat eine extrem kurze Wellenlänge. Schall- und Radiowellen liegen im Zentimeter- bzw. Meterbereich. Tsunamis haben Wellenlängen von rund 200 km!

Big Bang 6

20 Wellengrundlagen 2

F Formel: Brechungsgesetz von Snellius

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2}$$

α und β ... Winkel des einfallenden und des gebrochen Strahls zum Lot
 v_1 und v_2 ... Geschwindigkeiten der Welle in Medium 1 und 2

Mechanische Wellen

bewegter Beobachter

+ v_B nähernd

- v_B entfernend

$$f_B = f_0 \left(1 \pm \frac{v_B}{v} \right)$$

bewegte Quelle

- v_Q nähernd

+ v_Q entfernend

$$f_B = f_0 \frac{1}{1 \pm \frac{v_Q}{v}}$$

Elektromagnetische Wellen

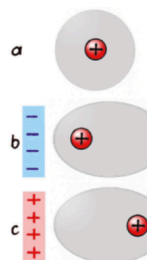
Bei Annäherung muss v_{BQ}
im Zähler und Nenner mit -1
multipliziert werden

v_{BQ} ... Relativgeschwindigkeit
zwischen Quelle und Beobachter
 c = Lichtgeschwindigkeit

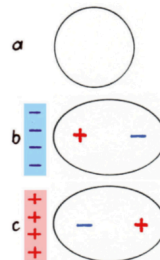
$$f_B = f_0 \left(\frac{1 - \frac{v_{BQ}}{c}}{1 + \frac{v_{BQ}}{c}} \right)$$

Tab. 20.1: Doppler-Frequenzveränderungen in Abhängigkeit von Bewegungsform und Wellenart: Elektromagnetische Wellen benötigen zur Ausbreitung kein Medium (siehe Tab. 19.1, S. 48). Daher kommt es nur auf die Relativgeschwindigkeit zwischen Beobachter und Sender an.

Atomkern (rot) und Elektronenorbital (blau)



Vereinfachte Vorstellung



Tab. 22.2: Polarisation eines Isolator-Atoms (linke Spalte) und vereinfachte Darstellung (rechts): Die Orbitale sind die Aufenthaltswahrscheinlichkeiten der Elektronen und werden im Rahmen der Quantenmechanik (siehe „Big Bang 7“) beschrieben.

F Formel: elektrische Spannung

$$U = \frac{W}{Q} \Rightarrow W = Q \cdot U$$

U ... elektrische Spannung [V]

W ... Arbeit [J]

Q ... Ladung [C]

22 Grundlagen der Elektrizität 1

F Formel: elektrische Kraft (Coulomb-Gesetz)

$$F_E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

F_E ... elektrische Kraft [N]

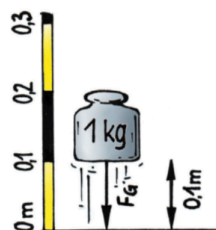
Q_1 und Q_2 ... Ladung der Gegenstände [C]

r ... Abstand der Ladungen [m]

ϵ_0 ... elektrische Feldkonstante

$\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$

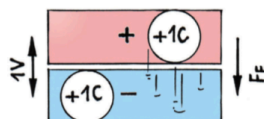
potenzielle mechanische Energie



$$W = E_p = m \cdot g \cdot h$$

Um eine Masse von 1 kg im Schwerfeld der Erde um 0,1 m zu heben, ist die Arbeit von einem Joule nötig.

potenzielle elektrische Energie



$$W = E_p = Q \cdot U$$

Um eine Ladung von 1 C im Spannungsfeld von 1 V zu transportieren, ist die Arbeit von einem Joule nötig.

Tab. 22.3: Vergleich zwischen der Hebearbeit im Schwerfeld und der Verschiebearbeit im elektrischen Feld

elektrische Kraft

$$F_E = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

proportional zu $1/r^2$; wirkt daher unendlich weit

proportional zum Produkt der beiden Ladungen

k kann nur experimentell ermittelt werden ($8,99 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$)

ungleiche Ladungen ziehen einander an, gleiche Ladungen stoßen einander ab

relative Stärke 10^{-2}

Gravitationskraft

$$F_G = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

proportional zu $1/r^2$; wirkt daher unendlich weit

proportional zum Produkt der beiden Massen

G kann nur experimentell ermittelt werden ($6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/(\text{kg s}^2)$)

Massen können einander nur anziehen

relative Stärke 10^{-38}

Tab. 22.1: Ähnlichkeiten und Unterschiede zwischen F_E und F_G :

Die relative Stärke gilt im Vergleich mit der starken Kraft, die die Quarks in den Neutronen und Protonen zusammenhält (siehe Tab. 10.1, Kap. 10.1, „Big Bang 5“).

Alkaline 1,5 V

Ladung/Typ	Energie $E_p = Q \cdot U$	relative Energie	„Hebehöhe“ von 1 kg
4000 C AAA	6 kJ	1	600 m
9400 C AA	14,1 kJ	2,4	1410 m
28000 C C	42 kJ	7	4200 m
59500 C D	89,3 kJ	15	8930 m

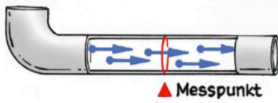
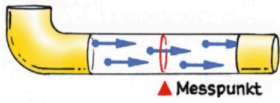
Tab. 22.4: Batterie-Typen, Ladungen und berechnete potenzielle elektrische Energie: In der rechten Spalte siehst du die Höhe, in der sich ein 1 kg-Stück über dem Meeresniveau befinden müsste, um dieselbe potenzielle Energie zu haben.

Big Bang 6

Stoff	Spannung	Stoff	Spannung
Gold (Au)	0 V	Blei (Pb)	-1,82 V
Platin (Pt)	-0,57 V	Eisen (Fe)	-2,14 V
Silber (Ag)	-0,89 V	Zink (Zn)	-2,45 V
Kohle (C)	-0,94 V	Aluminium (Al)	-4,03 V
Kupfer (Cu)	-1,17 V	Lithium (Li)	-4,73 V

Tab. 22.5: Spannungsreihe einiger Metalle und von Kohle. Volta erstellte seine Spannungsreihe ohne Angabe der Spannung. Der Nullpunkt wurde hier beim edelsten Metall gewählt. Die Spannung zwischen zwei Stoffen ist die Differenz der angegebenen Werte (bei Zink und Kupfer sind es knapp 1,3 V).

23 Grundlagen der Elektrizität 2

Wasserrohr	elektrischer Strom
	
Die „Stromstärke“ ist die Wassermenge, die pro Sekunde an einer bestimmten Stelle vorbeifließt.	Die elektrische Stromstärke ist die Ladungsmenge, die pro Sekunde an einer bestimmten Stelle vorbeifließt.
Damit man vernünftige Zahlen erhält, gibt man nicht die Moleküle, sondern die Kubikmeter pro Sekunde an.	Damit man vernünftige Zahlen bekommt, gibt man nicht Elementarladungen, sondern die Coulomb pro Sekunde an.

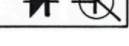
Tab. 23.1: Vergleich zwischen der „Stromstärke“ von Wasser und der von elektrischen Strom

F Formel: elektrische Stromstärke

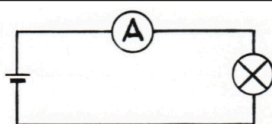
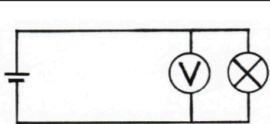
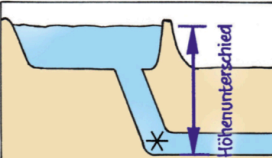
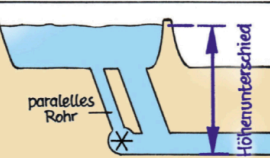
$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \Rightarrow \Delta Q = I \cdot \Delta t$$

I ... elektrische Stromstärke [A]
 Q ... Ladung [C]
 t ... Zeit [s]

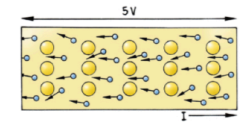
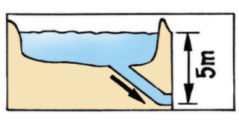
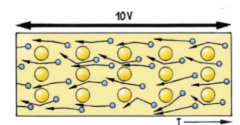
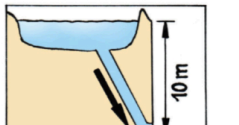


Leitung verbunden (a) kreuzend (b)		Erdung	
Batterie (Gleichspannungsquelle)		Wechselspannungsquelle	
Amperemeter		Kondensator	
Voltmeter		Spule	
Lampe		Widerstand	
Schalter		Diode (a) Transistor (b)	

Tab. 23.2: Einige wichtige Schaltzeichen

Strommessung	Spannungsmessung
	
Das Amperemeter ist seriell geschaltet. Sein Widerstand muss so klein wie möglich sein, um die Messung nicht zu beeinflussen. Durch Lampe und Amperemeter fließt gleich viel Strom.	Das Voltmeter ist parallel geschaltet. Sein Widerstand muss so groß wie möglich sein, um die Messung nicht zu beeinflussen. Der Strom durch das Voltmeter ist viel geringer als der durch die Lampe.
	

Tab. 23.3: Strom- und Spannungsmessung im Vergleich und Analogien mit dem Wasserfluss

	
	
Der Leiter hindert den elektrischen Strom am Fließen. Wenn der „elektrische Höhenunterschied“ (die Spannung) größer wird, wird auch der Stromfluss größer.	Das Rohr hindert das Wasser am Fließen. Wenn der Höhenunterschied größer wird, wird auch der Wasserfluss größer.

Tab. 23.4: Qualitativer Zusammenhang zwischen Spannung sowie Stromfluss und Vergleich mit fließendem Wasser. Beachte: Die technische Stromrichtung zeigt gegen den Elektronendrift.

F Formel: Ohm'sches Gesetz

$$R = \frac{U}{I} \Rightarrow I = \frac{U}{R} \Rightarrow U = R \cdot I$$

R ... Ohm'scher Widerstand [Ω]
 U ... Spannung [V]
 I ... Stromstärke [A]



F Formel: elektrischer Widerstand

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

ρ ... spezifischer Widerstand [$\Omega \text{m}^2/\text{m}$] = [Ωm]
 l ... Länge des Leiters [m]
 A ... Querschnitt des Leiters [m^2]

Big Bang 6

Material	spezifischer Widerstand [Ωm ² /m]	spezifischer Widerstand [Ωmm ² /m]	
Silber	1,6 · 10 ⁻⁸	1,6 · 10 ⁻²	Leiter geringer Widerstand = große Leitfähigkeit
Kupfer	1,7 · 10 ⁻⁸	1,7 · 10 ⁻²	
Gold	2,4 · 10 ⁻⁸	2,4 · 10 ⁻²	
Aluminium	2,8 · 10 ⁻⁸	2,8 · 10 ⁻²	
Stahl	14 · 10 ⁻⁸	14 · 10 ⁻²	
Kohlenstoff	3,5 · 10 ⁻⁵	35	Halbleiter
Germanium	0,42	4,2 · 10 ⁵	
Silizium	640	6,4 · 10 ⁸	Isolatoren (Nichtleiter) großer Widerstand = geringe Leitfähigkeit
Glas	2 · 10 ¹²	2 · 10 ¹⁸	
Porzellan	5 · 10 ¹²	5 · 10 ¹⁸	
Gummi	10 ¹³ bis 10 ¹⁵	10 ¹⁹ bis 10 ²¹	

Tab. 23.5: Spezifischer Widerstand bei 20 °C: Die Gradangabe ist wichtig, weil sich der Widerstand mit der Temperatur verändert.

F Formel: Stromarbeit und Stromleistung

$$W = Q \cdot U \Rightarrow W = I \cdot U \cdot t$$

$$P = \frac{W}{t} \Rightarrow P = U \cdot I$$

W ... Arbeit [J] I ... Stromstärke [A] P ... Leistung [W]
Q ... Ladung [C] U ... Spannung [V] t ... Zeit [s]

F Formel: elektrische Feldstärke

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1}{r_2^2}$$

$$E = F_E / Q_2$$

E ... elektrische Feldstärke [N/C] = [V/m]

F_E ... Kraft auf die Probeladung

Q₁ ... Zentralladung

Q₂ ... „Testladung“

F Formel: elektrische Kapazität

$$C = \frac{Q}{U}$$

C ... elektrische Kapazität in Farad [F]

Q ... Ladung [C]

U ... Spannung [V]

26 Elektrische Ströme und Magnetfelder

F Formel: Lorentz-Kraft

$$F_L = I \cdot s \cdot B \Rightarrow B = \frac{F_L}{I \cdot s}$$

F_L ... Lorentzkraft [N]

I ... Stromstärke [A]

s ... Länge des Leiters [m]

B ... magnetische Induktion [T] (Tesla)

25 Das elektrische Feld

Art des Feldes	Vektor/Skalar	Beispiel
Temperaturfeld	Skalarfeld	Wetterkarte (Abb. 25.1)
Druckfeld	Skalarfeld	Wetterkarte (Abb. 25.1)
Gravitationsfeld	Vektorfeld	Gravitationsfeld der Erde (Abb. 25.3)
elektrisches Feld	Vektorfeld	Feld unter einer Gewitterwolke (siehe Abb. 25.23, S. 100)
magnetisches Feld	Vektorfeld	Magnetfeld der Erde (siehe Abb. 26.9, S. 106)

Tab. 25.1: Beispiele für Felder

F Formel: elektrische Kraft (Coulomb-Gesetz)

$$F_E = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

F_E ... elektrische Kraft [N]

Q₁ und Q₂ ... Ladung der Gegenstände [C]

r ... Abstand der Ladungen [m]

k ... Proportionalitätskonstante

k = 8,99 · 10⁹ Nm²/C²

	B in Tesla
Gehirnströme	10 ⁻¹⁵
äußeres Erdmagnetfeld	≈ 5 · 10 ⁻⁵
Sonnenoberfläche	0,01
Hufeisenmagnet	0,1
Schreib-/Lesekopf einer Festplatte	0,15–0,3
Sonnenflecken	0,3
Supermagnete (Neodymmagnete); Maximalwert	1,5
Elektromagnete im Dauerbetrieb	45
Neutronensterne	10 ⁸

Tab. 26.1: Einige Magnetfelder im Vergleich

F Formel: Magnetische Induktion einer langen Spule

$$B = \mu_0 \cdot \frac{N \cdot I}{l}$$

B ... magnetische Induktion [T]

μ₀ ... magnetische Feldkonstante

μ₀ = 4 · π · 10⁻⁷ Vs/Am

N ... Anzahl der Windungen

I ... Stromstärke [A]

l ... Länge der Spule [m]

Big Bang 6

elektrische Feldstärke E Einheit V/m oder N/C	Gibt die Stärke des elektrischen Feldes an.
magnetische Induktion B Einheit Tesla	Gibt die Stärke des magnetischen Feldes an und ist das Gegenstück zu E . Besser wäre somit der Begriff magnetische Feldstärke. Die unglückliche Begriffswahl ist historisch bedingt.
elektromagnetische Induktion	Allgemeiner Ausdruck für die Veränderung des Stroms bzw. der Spannung , wenn sich ein Magnetfeld in irgendeiner Weise ändert.
Induktionsstrom Einheit A	Durch ein veränderliches Magnetfeld hervorgerufener Strom .
Induktionsspannung Einheit V	Durch ein veränderliches Magnetfeld hervorgerufene Spannung .
Magnetischer Fluss Φ Einheit Weber (Kap. 26.5)	Produkt der magnetischen Induktion B und der Fläche A , die davon durchsetzt wird, also $B \cdot A$.
Induktivität L Einheit Henry (Kap. 26.6)	Ähnlich wie die Kapazität das wichtigste Merkmal eines Kondensators ist, ist die Induktivität L das wichtigste Merkmal einer Spule. Je größer L , desto größer die Selbstinduktionsspannung (Kap. 26.6, S. 112).

Tab. 26.2: Gegenüberstellung einiger Fachausdrücke zum Elektromagnetismus

F Formel: magnetischer Fluss

$$\Phi = B \cdot A$$

Φ ... magnetischer Fluss [Wb] Weber

B ... magnetische Induktion [T]

A ... von B durchdrungene Fläche [m²]

F Formel: Induktionsgesetz für eine Schleife

$$U_{\text{ind}} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

U_{ind} ... Induktionsspannung [V]

Φ ... magnetischer Fluss [Wb] [Weber]

F Formel: Selbstinduktionsspannung

$$U_{\text{ind}} = -L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

U_{ind} ... Induktionsspannung [V]

L ... Induktivität einer Spule [H] (Henry)

I ... Stromstärke [A]

t ... Zeit [s]

Big Bang 7

27 Grundlagen der Elektrotechnik

F Formel: Leistung des Wechselstroms

$$\bar{P} = \frac{P_m}{2} = \frac{U_m I_m}{2} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \frac{I_m}{\sqrt{2}} = U_{\text{eff}} I_{\text{eff}}$$

$$U_m = U_{\text{eff}} \sqrt{2} \text{ und } I_m = I_{\text{eff}} \sqrt{2}$$

P_m, P ... maximale Leistung und mittlere Leistung [W]

U_m, U_{eff} ... maximale und effektive Spannung [V]

I_m, I_{eff} ... maximale und effektive Stromstärke [A]

F Formel: Induktiver Widerstand

$$R_L = \omega L$$

R_L ... induktiver Widerstand [Ω]

ω ... Kreisfrequenz ($= 2\pi f$) [s^{-1}]

L ... Induktivität der Spule [H]

F Formel: Kapazitiver Widerstand

$$R_C = \frac{1}{\omega C}$$

R_C ... kapazitiver Widerstand [Ω]

ω ... Kreisfrequenz ($= 2\pi f$) [s^{-1}]

C ... Kapazität des Kondensators [F]

F Formel: Wirkleistung

$$P = U_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \cos \varphi$$

P ... Wirkleistung bei einer Mischung von Ohm'schen, kapazitiven und induktiven Widerständen [W]

U_{eff} ... effektive Spannung [V]

I_{eff} ... effektive Stromstärke [A]

φ ... Phasenwinkel zwischen U und I

$\cos \varphi$... Leistungsfaktor

F Formel: Übersetzungsverhältnis eines Trafos

$$U_1 : U_2 = I_2 : I_1 = N_1 : N_2$$

U ... Spannung [V]

I ... Stromstärke [A]

N ... Windungszahlen

29 Einige Licht-Phänomene

Material	c absolut [m/s]	% von c_0	$n = c_0/c$
Vakuum	299.792.458	100	1
bodennahe Luft	299.704.944	99,97	1,000292
Wasser	225.407.863	75,19	1,33
Quarzglas	202.562.471	67,56	1,48
Diamant	123.881.181	41,32	2,42

Tab. 29.1: Einige Beispiele für Lichtgeschwindigkeiten in verschiedenen Materialien (→ F5): n bezeichnet man als **Brechzahl**.

30 Energieübertragung durch EM-Wellen

F Formel: Wien'sches Verschiebungsgesetz

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ mK}$$

λ_{max} ... Wellenlänge der max. Strahlung [m]

T ... absolute Temperatur des schwarzen Strahlers [K]

	relative Photonenenergie	Wellenlänge in 10^{-7} m	Frequenz 10^{14} Hz
rot	1–1,2	6,5–7,5	4,0–4,6
blau	1,5–1,8	4,2–4,9	6,1–7,1
UV-A	1,9–2,3	3,2–4,0	7,5–9,38
UV-B	2,3–2,7	2,8–3,2	9,38–10,7
UV-C	2,7–3,8	2,0–2,8	10,7–15

Tab. 30.1: Die absolute **Photonenenergie** lässt sich mit $E = h \cdot f$ berechnen ($h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$).

31 Informationsübertragung durch EM - Wellen

	Frequenzbereich	Bandbreite	Beispiele für Einsatz
AM	300 kHz–30 MHz	9 kHz	Amateurfunk, Flugfunk, Sprechradio (Kurz- und Mittelwelle)
FM	88 MHz–108 MHz	180 kHz	„normales“ Musikradio
		400 kHz	Musikradio mit Radio Data System (RDS)

Tab. 31.1: Frequenz-Richtwerte für AM und FM

Generation	Bezeichnung	max. Datenübertragungsrate	Frequenzbereiche
1G ab 1981	AMPS	–	0,88–0,96 GHz
2G ab 1991	GSM, GPRS und Edge	$2,2 \cdot 10^5 \text{ bit/s}$ (220 kbit/s)	1,7–1,88 GHz
3G ab 2001	UMTS, HSDPA, HSPA+	$1,44 \cdot 10^7 \text{ bit/s}$ (14,4 Mbit/s)	1,9–2,200 GHz
4G ab 2009	LTE, LTE-A	10^9 bit/s (1 Gbit/s)	Bänder um 0,8 GHz, 1,8 GHz, 2 GHz und 2,6 GHz

Tab. 31.2: Vergleichsdaten der verschiedenen Mobilfunkgenerationen: Welche Methode gerade verwendet wird, zeigt dein Handy links oben an (→ F13). E steht für Edge, also für 2G. Diese Technik wird nur mehr bei sehr schlechtem Empfang eingesetzt.

Kopf und Rumpf bei beliebiger Expositionsdauer	elektrische Feldstärke	magnetische Induktion
Allgemeinbevölkerung	5 kV/m	100
Arbeitsplatz	10 kV/m	500 μT

Tab. 31.3: Die Grenzwerte der **internationalen Strahlenschutzkommission**, die in den meisten EU-Ländern gelten und auch von Österreich übernommen wurden

Big Bang 7

CB-Funk	26,6–27,4 MHz
Modellbau (Funkautos und -flugzeuge)	35,1–35,9 MHz
UKW	88–108 MHz
Flugfunk und Seefunk	118–162 MHz
2G Mobiltelefone	880–960 MHz
GPS	1228–1228 MHz
Amateurfunk 23-cm-Band	1240–1300 MHz
GPS	1576–1576 MHz
2G Mobiltelefone	1700–1880 MHz
3G Mobiltelefone	1900–2200 MHz
Bluetooth	2400–2480 MHz
4G Mobiltelefone	um 2600 MHz
WLAN 2,4 GHz	2400–2485 MHz
WLAN 5 GHz	5150–5725 MHz

Tab. 31.4: Einige ausgewählte Beispiele aus dem EM-Wellen-Dschungel zur Informationsübertragung (→ F16; siehe auch Abb. 31.20, S. 40)

	TV-Sender	Radio-Sender	Mobilfunk-sender	Handy
Leistung	300 kW	100 kW	50 W	2 W
Messabstand	1500 m	1500 m	50 m	3 cm
Leistungsfluss-dichte	0,02 W/m ²	0,05 W/m ²	0,001 W/m ²	2 W/m ²

Tab. 31.5: Typische Leistungsflussdichten von Sendern: Die Werte fürs Handy sind Maximalwerte. Moderne Smartphones haben meistens wesentlich geringere Sendeleistungen um 0,2 W.

32 Klimaänderung und erneuerbare Energie

Treibhausgas	Kohlenstoffdioxid	Methan	Fluorkohlenwasserstoffe	Ozon	Distickstoffmonoxid (Lachgas)
Kurzbezeichnung	CO ₂	CH ₄	FKW	O ₃	N ₂ O
Geschätzter Anteil am Treibhauseffekt	55%	15%	5–10%	7%	4%
zusätzlicher Temperatureffekt bei Verdoppelung der Konzentration	2–4 °C	0,3 °C	0,3 °C	0,9 °C	0,4 °C
Quellen	fossile Brennstoffe, Waldrodung	Reisanbau, Rinderhaltung, Mülldeponien, Verbrennung von Biomasse	Treibgase, Kältemittel	indirekt durch CO, NO ₂ , CH ₄	fossile Brennstoffe, Dünger, Bodenkultivierung

Tab. 32.1: Treibhausgase und geschätzter Anteil am Treibhauseffekt: Wasserdampf ist nicht berücksichtigt. Er spielt zwar mit etwa 60% beim natürlichen Treibhauseffekt die größte Rolle, sein Gehalt in der Atmosphäre wird aber vom Mensch nicht direkt beeinflusst.

	Tonnen/Person	Millionen Tonnen pro Land	Prozent weltweit
Katar	40,37	85	0,23
USA	16,5	5167	13,96
Australien	14,47	374	1,01
Österreich	7,35	61	0,16
China	6,18	9087	24,56
Welt	5	37000	100,00
Indien	1,64	2020	5,46

Tab. 32.2: Relative und absolute Wert der CO₂-Emission für ausgewählte Länder für 2015: Jeder Österreicher produzierte im Schnitt über 7 Tonnen CO₂ pro Jahr (→ F11)! Unvorstellbar!

Solarkonstante, Ausgangswert	1367 W/m ²
Erdatmosphäre verringert den Wert durch Streuung und Absorption (–27%)	1000 W/m ²
Wolken verringern den Wert (–50%)	500 W/m ²
Sonne scheint im Schnitt nur 12 Stunden (–50%)	250 W/m ²
Sonne strahlt nicht senkrecht ein (–50%)	125 W/m ²
Wirkungsgrad einer Solarzelle (–80%)	25 W/m ²

Tab. 32.3: Abschätzung, wie sich die Strahlungsleistung der Sonne auf der Erde verringert und was im Schnitt in unseren Breiten am Boden übrig bleibt.

Solaranlagen	Das ist der allgemeine Ausdruck für Anlagen, die Sonnenenergie in andere Energieformen umwandeln.
thermische Solaranlagen	Sie wandeln Sonnenenergie in Wärme um. Sie werden oft kurz ebenfalls Solaranlagen genannt, was zu Verwechslungen führen kann.
Sonnenkollektoren	Dies sind die Kernstücke von thermischen Solaranlagen. Sie wandeln Sonnenstrahlung in Wärme um.
thermische Solarkraftwerke	Sie wandeln Sonnenenergie zuerst in Wärme um und diese dann in Strom.
Photovoltaik-Anlagen	Sie wandeln Sonnenenergie direkt in Strom um.
Solarzellen	Das sind Halbleiterelemente, die das Sonnenlicht in elektrischen Strom umwandeln. Sie sind Bestandteil von Photovoltaik-Anlagen.

Tab. 32.4: Gebräuchliche Ausdrücke im Zusammenhang mit Sonnenenergie

33 Welle und Teilchen

F	Formel: Photonen-Energie
	$E = h \cdot f$
	$E \dots$ Photonenenergie [J]
	$h \dots$ Planck'sches Wirkungsquantum [Js] $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Js
	$f \dots$ Frequenz des Lichts [s ⁻¹]

	relative Photonenenergie	Wellenlänge in 10 ⁻⁷ m	Frequenz 10 ¹⁴ Hz
rot	1–1,2	6,5–7,5	4,0–4,6
grün	1,3–1,5	4,9–5,8	5,2–6,1
blau	1,5–1,8	4,2–4,9	6,1–7,1
UV-A	1,9–2,3	3,2–4,0	7,5–9,38
UV-B	2,3–2,7	2,8–3,2	9,38–10,7

Tab. 33.1: Relative Photonenenergie von sichtbarem und ultraviolettem Licht: Die niedrigste Energie von roten Photonen wurde mit 1 angenommen. Um Elektronen aus einer Zinkplatte zu lösen oder einen Sonnenbrand auszulösen, sind mindestens rund 10¹⁵ Hz notwendig. Das ist nur bei UV-B-Licht der Fall.

F	Formel: Materiewellenlänge (de Broglie-Wellenlänge)
	$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m \cdot v}$
	$\lambda \dots$ Wellenlänge der Materiewellen [m]
	$p \dots$ Impuls [kgms ⁻¹]
	$m \dots$ Masse [kg]
	$v \dots$ Geschwindigkeit des Teilchens [ms ⁻¹]
	$h \dots$ Planck'sches Wirkungsquantum [Js]

Big Bang 7

	Wellenlänge in m
rotes Photon	10^{-6}
UV-B-Photon	10^{-7}
Röntgenlicht-Photon (harte Strahlung)	10^{-11}
Elektron, 10^8 m/s (30 keV)	10^{-11}
„Fußballmoleküle“ (C ₆₀), 220 m/s	10^{-12}
Tennisball, 30 m/s	10^{-34}
Mensch mit 75 kg bei 10 m/s	10^{-36}

Tab. 33.2: Größenordnungsmäßige Beispielswerte für Wellenlängen bei Licht und Materie: Auch makroskopischen Objekten, etwa einem Tennisball, kann man demnach eine Wellenlänge zuordnen. Diese ist aber so absurd winzig, dass ihre Welleneigenschaften im Alltag nicht zu bemerken sind.

Energie – Frequenz	$E = h \cdot f$
Impuls – Wellenlänge	$p = h/\lambda$
Aufenthaltswahrscheinlichkeit – Wellenfunktion	$P = \psi ^2 \Delta V$

Tab. 33.3: Jene drei Formeln, die den Zusammenhang zwischen dem Teilchen- und Wellenmodell herstellen: Auf der linken Seite der Gleichung steht immer die Teilcheneigenschaft. Verwechsle nicht den Impuls klein p mit der Wahrscheinlichkeit groß P !

F Formel: Heisenberg'sche Unschärferelation für Impuls und Ort
$\Delta p \cdot \Delta x \geq \frac{h}{4\pi} \approx \frac{h}{13} \approx 5 \cdot 10^{-35} \text{ Js}$
Δp ... Impulsunschärfe [kgms ⁻¹]
Δx ... Ortsunschärfe [m]
h ... Planck'sches Wirkungsquantum [Js] $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

F Formel: Heisenberg'sche Unschärferelation für Energie und Zeit
$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{4\pi} \approx \frac{h}{13} \approx 5 \cdot 10^{-35} \text{ Js}$
ΔE ... Energieunschärfe [J]
Δt ... Zeitunschärfe [s]
h ... Planck'sches Wirkungsquantum [Js] $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

34 Das moderne Atommodell

Atommodell	Jahr	stichwortartige Beschreibung
DEMOKRIT	~400	Atome sind unteilbare Kugeln.
Thomson weist die Existenz von Elektronen nach.		
THOMSON	1897	Elektronen befinden sich wie Rosinen im positiven Atomkuchenteig.
Rutherford weist den positiv geladenen Atomkern nach.		
RUTHERFORD	1911	Um einen positiven Kern kreisen negative Elektronen auf beliebigen Bahnen.
Gase haben Linienspektren.		
BOHR	1913	Wie Rutherford-Modell, aber Elektronen „dürfen“ nur auf bestimmten Bahnen kreisen..
Atome strahlen nicht und kollabieren nicht.		
HEISENBERG und SCHRÖDINGER	um 1926	Elektronen haben keine Bahnen, sondern Aufenthaltswahrscheinlichkeiten (Orbitale).

Tab. 34.1: Entwicklung des Atommodells sowie **fett gedruckt** experimentelle Erkenntnisse und Tatsachen, die zu dieser Entwicklung geführt haben (siehe auch Abb. 34.2, S. 66).

n	l	Orbital	m	s	z	
7	1	7p	-1 bis +1	$\pm \frac{1}{2}$	6	Nihonium (Nh) bis Oganesson (Og)
6	2	6d	-2 bis +2	$\pm \frac{1}{2}$	10	Lawrencium (Lr) bis Copernicium (Cn)
5	3	5f	-3 bis +3	$\pm \frac{1}{2}$	14	Actinium (Ac) bis Nobelium (No)
7	0	7s	0	$\pm \frac{1}{2}$	2	Francium (Fr) und Radium (Ra)
6	1	6p	-1 bis +1	$\pm \frac{1}{2}$	6	Thallium (Tl) bis Radon (Rn)
5	2	5d	-2 bis +2	$\pm \frac{1}{2}$	10	Lutetium (Lu) bis Quecksilber (Hg)
4	3	4f	-3 bis +3	$\pm \frac{1}{2}$	14	Lanthanum (La) bis Ytterbium (Yb)
6	0	6s	0	$\pm \frac{1}{2}$	2	Cäsium (Cs) und Barium (Ba)
5	1	5p	-1 bis +1	$\pm \frac{1}{2}$	6	Indium (In) bis Xenon (Xe)
4	2	4d	-2 bis +2	$\pm \frac{1}{2}$	10	Yttrium (Y) bis Cadmium (Cd)
5	0	5s	0	$\pm \frac{1}{2}$	2	Rubidium (Rb) und Strontium (Sr)
4	1	4p	-1 bis +1	$\pm \frac{1}{2}$	6	Gallium (Ga) bis Krypton (Kr)
3	2	3d	-2 bis +2	$\pm \frac{1}{2}$	10	Scandium (Sc) bis Zink (Zn)
4	0	4s	0	$\pm \frac{1}{2}$	2	Kalium (K) und Calcium (Ca)
3	1	3p	-1 bis +1	$\pm \frac{1}{2}$	6	Aluminium (Al) bis Argon (Ar)
3	0	3s	0	$\pm \frac{1}{2}$	2	Natrium (Na) und Magnesium (Mg)
2	1	2p	-1 bis +1	$\pm \frac{1}{2}$	6	Bor (B) bis Neon (Ne)
2	0	2s	0	$\pm \frac{1}{2}$	2	Lithium (Li) und Beryllium (Be)
1	0	1s	0	$\pm \frac{1}{2}$	2	Wasserstoff (H) und Helium (He)

Tab. 34.3: Die Orbitale sind, wie in Abb. 34.26 b (S. 75), ihrer Energie nach geordnet. Wenn ein Orbital aufgefüllt ist, wird das nächste „eröffnet“. z entspricht der Anzahl der möglichen Elektronen in diesem Orbital. In den s-Orbitalen sind 2, in den p-Orbitalen 6, in den d-Orbitalen 10 und in den f-Orbitalen 14 Elektronen möglich. Diese Anzahlen kannst du auch sehr schön in den „Blöcken“ in Abb. 34.29 erkennen.

35 Licht als Träger von Energie

F Formel: Energie-Differenz = Photonen-Energie
$\Delta E = E = h \cdot f$
ΔE ... Differenz der Energieniveaus [J]
E ... Photonenenergie [J]
h ... Planck'sches Wirkungsquantum [Js]
$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$
f ... Frequenz des Lichts [s ⁻¹]

	relativer Druck	Dichte [kg/m ³]
Erdatmosphäre	1	1
Sonneninneres	10^{11}	10^5
Eisen	–	10^4

Tab. 35.1: Größenordnungen von Druck und Dichte im Inneren der Sonne im Vergleich mit der Erdatmosphäre (→ F8): Obwohl der Sonnenkern aus Gas besteht, ist er rund 10-mal so dicht wie Eisen!

Einsatzbereich	
Computer und Medien	Optische Medien , Datenübertragung in Glasfaserkabeln , Laserdrucker
Materialbehandlung	Bohren, Schneiden, Schweißen
Wissenschaft	Entfernungsmessung des Mondes , Laserkühlung, Holografie, „Beamern“
Messtechnik	Scannerkassa , Laserzieleinrichtung (infrarot) bei Radarmessung, Brandmelder
Medizin	Laserskalpell , Hornhaut verändern
Militär	Lenksysteme für Raketen, Visiereinrichtung für Gewehre

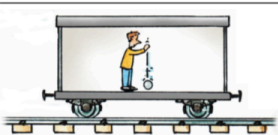
Tab. 35.2: Einige Einsatzmöglichkeiten des Lasers

37 Chaotische Systeme

Starkes Kausalitätsprinzip nicht-chaotische Systeme	schwaches Kausalitätsprinzip chaotische Systeme
Kleine Änderungen der Bedingungen führen zu ähnlichen Ergebnissen.	Kleine Änderungen der Bedingungen führen zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen.
In beiden Fällen gilt aber: Unter exakt gleichen Bedingungen würde die kausale Kette exakt gleich ablaufen.	
Beispiele: Schulweg, Eingießen von Tee (Abb. 37.4), Lenken eines Autos, Ball in einer Rinne und Reflexion an ebenen Objekten (Abb. 37.5 links), Flugbahn eines Balls	Beispiele: Werfen einer Münze, Flugbahn eines Luftballons mit ausströmender Luft, Ball auf Treppe und Reflexion an gekrümmten Objekten (Abb. 37.5 rechts)
Tab. 37.1: Gegenüberstellung von starkem und schwachem Kausalitätsprinzip	

Big Bang 8

38 Weltbilder vor 1905

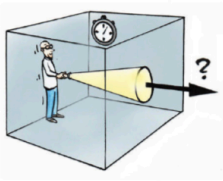
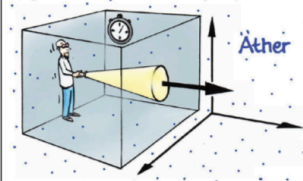
	
Eine Kugel bleibt am Tisch liegen. Kaffee schwappt nicht über. Du landest an derselben Stelle. Eine Kugel fällt senkrecht.	Eine Kugel am Tisch beginnt zu rollen. Kaffee schwappt über. Du landest nicht an derselben Stelle. Eine Kugel fällt nicht senkrecht.
Du kannst deine unbeschleunigte Bewegung nur feststellen, indem du beim Fenster hinausschaust. Diese Art der Bewegung ist daher relativ .	Du kannst deine beschleunigte Bewegung anhand der Experimente feststellen. Du musst nicht hinaussehen. Diese Art der Bewegung ist absolut .

Tab. 38.1: Einfache Experimente in unbeschleunigten (links) und beschleunigten Systemen (rechts). Der Waggon links steht oder fährt mit konstanter Geschwindigkeit. Der Waggon rechts wird gerade schneller, er könnte aber auch langsamer werden oder in eine Kurve fahren.

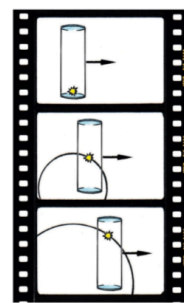
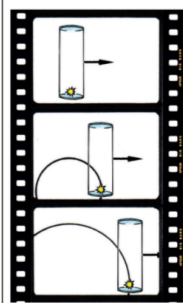
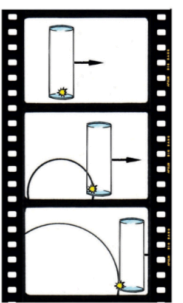
v	Objekt	t_r/t_b
130 km/h	Auto	$1,000000000000001$ $= 1 + 10^{-14}$
900 km/h	Flugzeug	$1,000000000000035$ $= 1 + 3,5 \cdot 10^{-13}$
7,7 km/s	ISS	$1,0000000003294$ $\approx 1 + 3,3 \cdot 10^{-10}$
0,1 c		1,0050
0,5 c		1,1547
0,995 c	Myonen in der Atmosphäre (Kap. 40.4, S. 20)	≈ 10
0,99942 c	Myonen am CERN (1959)	29,3653
0,999999993 c	Protonen am CERN (2016)	≈ 8500

Tab. 40.1: Zeitdehnung bei verschiedenen Geschwindigkeiten.

39 Relativitätsprinzip und Gleichzeitigkeit

Weltbild ab 1905 Relativitätstheorie	Weltbild vor 1905 Newton'sche Mechanik
	
Es existiert kein Äther und somit auch kein absolutes Bezugssystem . Es gibt keine Möglichkeit, seine Geschwindigkeit im tiefsten Weltall zu messen, außer man trifft auf ein anderes Objekt, etwa ein anderes Raumschiff. Bewegungen sind daher relativ. Die Lichtgeschwindigkeit ist immer gleich groß.	Es existiert ein Äther und somit auch ein absolutes Bezugssystem fürs ganze Weltall. Indem man die Bewegung zum Äther misst (Ätherwind), kennt man überall auch ohne ein anderes Objekt seine Geschwindigkeit. Bewegungen sind daher absolut. Die Lichtgeschwindigkeit hängt von der Bewegung ab.

Tab. 39.1: Mit dem Wegfall des Äthers fiel auch die Möglichkeit zur absoluten Geschwindigkeitsbestimmung.

0,6 c	c	1,1 c
		
$t_b = t_r \sqrt{1 - \frac{(0,6c)^2}{c^2}}$ $t_b = t_r \cdot 0,8$	$t_b = t_r \sqrt{1 - \frac{c^2}{c^2}}$ $t_b = t_r \cdot 0$	$t_b = t_r \sqrt{1 - \frac{(1,1c)^2}{c^2}}$ $t_b = t_r \cdot \sqrt{-0,12}$

Tab. 40.2: Grafische und mathematische Darstellung der Zeitdehnung: Die mittlere und die rechte Darstellung sind hypothetisch, weil c nicht erreicht oder überschritten werden kann. Bei Überlichtgeschwindigkeit liefert die Gleichung eine komplexe Lösung und der Lichtblitz könnte mit der Uhr nicht Schritt halten. Das kann man so interpretieren, dass dann die Zeit rückwärts läuft.

40 Zeitdehnung und Raumschrumpfung

F Formel: Zeitdehnung

$$t_b = t_r \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

t_r ... Zeit, die für den ruhenden Beobachter (also für dich) vergeht [s]
 t_b ... Zeit, die von dir aus gesehen für den bewegten Beobachter vergeht [s]
 c ... Lichtgeschwindigkeit [m/s]
 v ... Relativgeschwindigkeit [m/s]

41 Relativistische Masse und Energie

Relativitätstheorie	Newton'sche Mechanik
Die Lichtgeschwindigkeit ist absolut. Daraus ergibt sich, dass Zeit und Raum relativ sind.	Zeit und Raum sind absolut. Daraus ergibt sich, dass die Lichtgeschwindigkeit relativ ist.

Tab. 41.1

Big Bang 8

F Formel: Relativistische Massenzunahme

$$m_d = \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

m_d ... dynamische Masse [kg]
 m ... „Ruhemasse“ [kg]
 c ... Lichtgeschwindigkeit [m/s]
 v ... Relativgeschwindigkeit [m/s]

F Formel: Äquivalenz von Energie und Masse

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2} \quad E = mc^2$$

E ... Energie [J]
 m ... Masse [kg]
 c ... Lichtgeschwindigkeit [m/s]

42 Vertiefendes zur SRT

F Formel: Relativistischer Dopplereffekt

$$f_B = f_R \sqrt{\frac{1 - v/c}{1 + v/c}} \quad f_B = f_R \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v/c}}$$

entfernen annähern

f_B ... Frequenz, die der zur Quelle bewegte Beobachter misst [s⁻¹]
 f_R ... Frequenz, die der zur Quelle ruhende Beobachter misst [s⁻¹]
 c ... Lichtgeschwindigkeit [m/s]
 v ... Relativgeschwindigkeit [m/s]

F Formel: Relativistische Geschwindigkeitsaddition

$$w = \frac{u + v}{1 + \frac{u \cdot v}{c^2}}$$

u, v ... Einzelgeschwindigkeiten [m/s]
 w ... Gesamtgeschwindigkeit [m/s]
 c ... Lichtgeschwindigkeit [m/s]

F Formel: Galilei-Transformation

$$\begin{aligned} x' &= x - v \cdot t & x &= x' + v \cdot t' \\ y' &= y & y &= y' \\ z' &= z & z &= z' \\ t' &= t & t &= t' \end{aligned}$$

F Formel: Lorentz-Transformation

$$\begin{aligned} x' &= \frac{(x - v \cdot t)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} & x &= \frac{(x' + v \cdot t')}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ t' &= \frac{t - \frac{v \cdot x}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} & t &= \frac{t' + \frac{v \cdot x'}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \end{aligned}$$

43 Allgemeine Relativitätstheorie

F Formel: Frequenzverschiebung im homogenen Erdschwerefeld

$$f' = f \left(1 \mp \frac{gH}{c^2} \right)$$

g ... Erdbeschleunigung, 9,81 m/s²
 H ... Hebehöhe [m]
 c ... Lichtgeschwindigkeit [m/s]

F Formel: Frequenzverschiebung im inhomogenen Feld einer beliebigen Zentralmasse

$$f' = f \left(1 \mp \frac{GM}{c^2 r} \right)$$

G ... Gravitationskonstante (6,673 · 10⁻¹¹ Nm²/kg²)
 M ... Zentralmasse [kg]
 r ... Abstand vom (Massen)Mittelpunkt der Zentralmasse [m]

F Formel: Gravitative Zeitveränderung im homogenen Erdschwerefeld

$$T_A = T_B \left(1 - \frac{gH}{c^2} \right)$$

g ... Erdbeschleunigung, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
 H ... Hebehöhe [m]
 c ... Lichtgeschwindigkeit [m/s]
 T_A und T_B ... Zeit, die in der unteren und oberen Uhr vergeht [s]

F Formel: Gravitative Zeitveränderung im inhomogenen Feld einer beliebigen Zentralmasse

$$T_A = T_B \left(1 - \frac{GM}{c^2 r} \right)$$

G ... Gravitationskonstante (6,673 · 10⁻¹¹ Nm²/kg²)
 M ... Zentralmasse [kg]
 r ... Radius der Zentralmasse [m]
 c ... Lichtgeschwindigkeit [m/s]
 T_A und T_B ... Zeit, die in der unteren und oberen Uhr vergeht [s]

F Formel: Gravitative Längenveränderung im homogenen Erdschwerefeld

$$L_A = L_B \left(1 - \frac{gH}{c^2} \right)$$

g ... Erdbeschleunigung, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
 H ... Hebehöhe [m]
 c ... Lichtgeschwindigkeit [m/s]
 L_A und L_B ... Länge eines nahen (A) und eines entfernten Maßstabes (B) [m]

F Formel: Gravitative Längenveränderung im Feld einer beliebigen Zentralmasse

$$L_A = L_B \left(1 - \frac{GM}{c^2 r} \right)$$

G ... Gravitationskonstante (6,673 · 10⁻¹¹ Nm²/kg²)
 M ... Zentralmasse [kg]
 r ... Radius der Zentralmasse [m]
 c ... Lichtgeschwindigkeit [m/s]
 L_A und L_B ... Länge eines nahen (A) und eines entfernten Maßstabes (B) [m]

44 Die Struktur der Atomkerne

Teilchen	Masse in kg	Masse relativ	Ladung in C	Spin
Neutron (n)	$1,674927 \cdot 10^{-27}$	1839	neutral	$\frac{1}{2}$
Proton (p ⁺)	$1,672622 \cdot 10^{-27}$	1837	$+1,6 \cdot 10^{-19}$	$\frac{1}{2}$
Elektron (e ⁻)	$9,109 \cdot 10^{-31}$	1	$-1,6 \cdot 10^{-19}$	$\frac{1}{2}$

Tab. 44.1: Die Masse der Nukleonen ist rund 2000-mal größer als die der Elektronen. Elektronen und Protonen haben die kleinste elektrische Ladung, die in der Natur frei vorkommt.

	Masse in u	Kernladungszahl Z	Neutronenzahl N	Nukleonenzahl A	relative Häufigkeit
e	0,00055	–	–	–	–
p	1,00728	0	1	1	–
n	1,00867	1	0	1	–
^1_1H	1,00783	1	0	1	0,99985
^2_1H	2,01410	1	1	2	0,00015
^3_1H	3,01603	1	2	3	radioaktiv
$^{12}_6\text{C}$	12,00000	6	6	12	0,9889
$^{13}_6\text{C}$	13,00335	6	7	13	0,0111
$^{14}_6\text{C}$	14,00324	6	8	14	$1,3 \cdot 10^{-12}$

Tab. 44.2: Einige Isotope und der Vergleich mit Elektron und Nukleonen: Die **atomare Masseneinheit u** wurde als 1/12 der Masse eines C-12-Atoms festgelegt und hat absolut $1,66054 \cdot 10^{-27}$ kg.

45 Radioaktivität

	Ursache	allgemein und Beispiel	Reichweite in m in Luft, Wasser, Blei	relative biologische Wirkung
α	Kern ist zu schwer	$^A_Z\text{X} \rightarrow ^{A-4}_{Z-2}\text{Y} + ^4_2\text{He}$ $^{238}_{92}\text{U} \rightarrow ^{234}_{90}\text{Th} + \alpha$	$10^{-1}, 10^{-4}, 10^{-5}$	20
β^-	zu viele Neutronen	$^A_Z\text{X} \rightarrow ^A_{Z+1}\text{Y} + e^- + \bar{\nu}_e$ $^{14}_6\text{C} \rightarrow ^{14}_7\text{N} + e^- + \bar{\nu}_e$	$10, 10^{-3}, 10^{-4}$	1
β^+	zu viele Protonen	$^A_Z\text{X} \rightarrow ^A_{Z-1}\text{Y} + e^+ + \nu_e$ $^{40}_{19}\text{K} \rightarrow ^{40}_{18}\text{Ar} + e^+ + \nu_e$	10^{-4}	1
γ	Kern hat zu viel Energie	$^A_Z\text{X}^* \rightarrow ^A_Z\text{X} + \gamma$ $^{60}_{28}\text{Ni}^* \rightarrow ^{60}_{28}\text{Ni} + \gamma$	$10^3, 10^0, 10^{-1}$	1

Tab. 45.1: Die Arten der radioaktiven Strahlung: In Wasser ist die Reichweite aller Strahlen den Faktor 10^3 geringer als in Luft, in Blei noch mal um den Faktor 10. γ -Strahlung hat keine bestimmte Reichweite, sie wird in Abschirmmaterialien mehr und mehr geschwächt. In der Tabelle ist jene Dicke der Abschirmung angegeben, in der die Strahlung auf ca. 1/1000 ihrer ursprünglichen Stärke abgeschwächt wird.

Zahnröntgen, Einzelbild	0,01 mSv
Flug Wien – New York	0,04 mSv
Zahnröntgen, Panoramabild	0,05 mSv
Lungenröntgen	0,2 mSv
Schilddrüsen-Szintigramm	0,8 mSv
Halswirbelsäulen-Röntgen	2 mSv
durchschn. jährliche Äquivalentdosis (Abb. 45.12)	4,3 mSv
Brustwirbelsäulen-Röntgen	5 mSv
PET-Scan	6 mSv
Mondflug (→ F7)	6–9 mSv
Computer-Tomographie Bauchraum	15 mSv
Erlaubte jährliche Grenzdosis	20 mSv
tödliches Krebsrisiko: +1 je 1000 Menschen	
absolut tödliche Dosis	7000 mSv

Tab. 45.2: Beispiele für Strahlenbelastungen: Grau unterlegt sind Belastungen, die völlig oder zumindest teilweise auf Radioaktivität zurückzuführen sind.

Element	T1/2	Ursprung bzw. Anwendung
Tellur-128; β^-	$7,7 \cdot 10^{24}$ a	natürliches Isotop mit unvorstellbarer Halbwertszeit; das Universum ist „nur“ $1,4 \cdot 10^{10}$ Jahre alt
Uran-238; α	$4,5 \cdot 10^9$ a	natürlich vorkommendes, langlebiges Uran-Isotop
Uran-235; α	$7 \cdot 10^8$ a	wird in Brennstäben als spaltbares Element verwendet (Kap. 46.1, S. 67)
Kohlenstoff-14; β^-	5715 a	Altersbestimmung (siehe Abb. 45.16)
Cäsium-137; β^-	30,2 a	„Tschernobyl-Isotop“
Radon-222; α	3,82 d	macht den Großteil der natürlichen Strahlungsbelastung aus
Iod-131; β^-	8 d	„Tschernobyl-Isotop“
Iod-123; γ	13,2 h	Nuklearmedizin (Szintigraphie, Kap. 45.4, S. 66)
Uran-228; α	9,1 m	kurzlebige Uran-Isotop
Sauerstoff-15; β^-	2 m	Nuklearmedizin (PET-Scanner, Kap. 45.4, S. 65)
Wasserstoff-7	$2 \cdot 10^{-23}$ s	Wasserstoffisotop mit extrem kurzer Halbwertszeit

Tab. 45.3: Beispiele für den extremen Unterschied in den Halbwertszeiten (siehe auch Abb. 45.6, S. 60)

46 Energie aus den Atomkernen

Isotop	kritische Masse Neutronen werden ...	
	nicht reflektiert	reflektiert an 30 cm Stahl
Uran-235 kam in der Hiroshima-Bombe zum Einsatz.	49,0 kg	17,2 kg
Plutonium-239 kam in der Nagasaki-Bombe zum Einsatz.	10,0 kg	4,49 kg

Tab. 46.1: Kleinste kritische Massen bei Kugelform: Wird diese Menge überschritten, kommt es zur Kettenreaktion.

Big Bang 8

Bombe/Typ	TNT-Äquivalent	Energie	Seitenlänge „TNT-Würfel“
Hiroshima 1945 Uran-Bombe	13 kT	$5,5 \cdot 10^{13}$ J	20 m
Nagasaki 1945 Plutonium-Bombe	22 kT	$9,2 \cdot 10^{13}$ J	24 m
„Ivy Mike“ 1952 Wasserstoff-Bombe	10,4 MT	$4,4 \cdot 10^{16}$ J	185 m
Zar-Bombe 1961 Wasserstoff-Bombe	57 MT	$2,4 \cdot 10^{17}$ J	326 m

Tab. 46.2: Beispiele für freigesetzte Energien bei verschiedenen Kernbomben: 1 kT TNT entspricht $4,2 \cdot 10^{12}$ J. Ein Kubikmeter TNT hat eine Masse von 1650 kg.

	Atombombentests	Zeitraum
Weltweit	2056	1945–2017
Vereinigte Staaten	1039	1945–1992
Sowjetunion	718	1949–1990
Frankreich	198	1960–1996
Volksrepublik China	45	1964–1996
Vereinigtes Königreich	45	1952–1991
Nordkorea	6	2006–2017
Indien	3	1974 und 1998
Pakistan	2	1998

Tab. 46.3: Atombombentests weltweit und nach Staaten aufgeschlüsselt (Stand 2018): Viele Staaten haben das Testen vor langer Zeit beendet. Atombombenexplosionen werden heutzutage auch mit Supercomputern simuliert.

47 Teilchenphysik und Standardmodell

Fermionen	Bosonen
Für diese gilt das Pauli-Verbot. Sie sind nach dem italienischen Physiker ENRICO FERMI benannt.	Für diese gilt das Pauli-Verbot nicht. Sie sind nach dem indischen Physiker SATYENDRA NATH BOSE benannt.
Elektron: Spin $\frac{1}{2}$ Proton: Spin $\frac{1}{2}$ Neutron: Spin $\frac{1}{2}$	Photon: Spin 1

Tab. 47.1: Die prominentesten Fermionen und Bosonen

Fermionen, Spin $\frac{1}{2}$	Bosonen, Spin 0 oder 1
6 Leptonen Kap. 47.2.1	6 Quarks Kap. 47.2.2
Die 12 Leptonen und Quarks sind die Materiebausteine . Sie sind elementar und unterliegen dem Pauli-Verbot.	4 Kraftüberträger Kap. 47.2.3
	1 Masseerzeuger Kap. 47.2.4
	Mit Ausnahme der Gravitation kann man mit den Bosonen des Standardmodells alle bekannten Kräfte erklären.

Tab. 47.2: Das Standardmodell der Teilchenphysik: Je nach Zählart besteht es aus 17 bis 37 Teilchen (siehe auch Abb. 47.42, S. 89).

Leptonen, Spin $\frac{1}{2}$				
Name	Ladung	entdeckt	Ruhemasse MeV/c ²	mittlere Lebensdauer in s
Elektron e ⁻	-1	1897	0,511	stabil
Elektron-Neutrino ν_e	0	1956	$< 2 \cdot 10^{-6}$	stabil
Myon μ^-	-1	1937	106	$2,2 \cdot 10^{-6}$
Myon-Neutrino ν_μ	0	1962	$< 0,19$	stabil
Tauon τ^-	-1	1974	1777	$3,4 \cdot 10^{-13}$
Tauon-Neutrino ν_τ	0	2000	$< 18,2$	stabil

Tab. 47.3: Leptonen im Überblick: Man gibt nicht die Halbwertszeit $T_{1/2}$ an, sondern die mittlere Lebensdauer $\tau (= T_{1/2}/\ln 2 \approx T_{1/2} \cdot 1,4)$. Die Masse wird gemäß $E = mc^2$ und $m = E/c^2$ in Elektronvolt pro c^2 angegeben, wobei Teilchenphysiker meistens das c^2 weglassen – auch wenn das etwa schlampig ist.

Quarks, Spin $\frac{1}{2}$				
„Geschmack“ (flavour)	Ladung	entdeckt	Ruhemasse MeV/c ²	
Up u	+2/3	≈ 1970	3	normale Materie
Down d	-1/3	≈ 1970	6	
Strange s	-1/3	≈ 1970	105	Materie in höherem Energiezustand
Charm c	+2/3	1974	1200	
Bottom b	-1/3	1977	4250	
Top t	+2/3	1995	171000	

Tab. 47.4: Überblick über die Quarks: Es gibt 6 verschiedene Arten, die man „Geschmäcker“ (engl. **flavours**) nennt. Jeder kommt in drei Farben und drei Anti-Farben vor (siehe Tab. 47.6). Up und Down bezieht sich **nicht** auf den Spin!

Elektron	„elektron“ heißt „Bemstein“. An diesem wurde Elektrizität erstmals beobachtet.
Proton	„protos“ heißt „der Erste“. Das Proton war das erste Kernteilchen, das man entdeckte.
Baryon	„barys“ heißt „schwer“. Baryon bedeutet „schweres Teilchen“ (siehe Abb. 47.17).
Meson	„mesos“ heißt „mittel“. Meson bedeutet „mittelschweres Teilchen“ (siehe Abb. 47.17).
Lepton	„leptos“ heißt „leicht“. Lepton bedeutet „leichtes Teilchen“ (Kap. 47.2.1, S. 76).

Tab. 47.5: Beispiele für herkömmliche Teilchennamen

Quarks	Anti-Quarks
rot	anti-rot
grün	anti-grün
blau	anti-blau

Tab. 47.6: Alle Farbladungen einer Geschmacksrichtung: Weil es sich bei der Farbe ähnlich wie beim Spin um einen „inneren Freiheitsgrad“ handelt, werden diese Variationen nicht extra gezählt.

Bosonen, Spin 1 oder 2						
Wechselwirkung	Austauschteilchen	Reichweite in m	Masse in GeV/c ²	relative Stärke	Spin	Beispiele für die Rolle im Universum
starke	8 Gluonen	10^{-15}	0	1	1	bindet Quarks zu Protonen und Neutronen, bindet Atomkerne
elektromagnetische	Photonen	∞	0	10^{-2}	1	bestimmt die Struktur von Atomen, Molekülen, Flüssigkeiten und Festkörpern
schwache	W ⁺ , W ⁻ , Z ⁰	10^{-16}	W ⁺ 80,4 Z ⁰ 91,2	10^{-15}	1	ermöglicht langlebige instabile Atomkerne und die Kernfusion in der Sonne
gravitative	Graviton	∞	0	10^{-38}	2	bindet die Materie zu Planeten, Sternen und Galaxien

Tab. 47.7: Die fundamentalen Wechselwirkungen und ihre Austauschteilchen: Die Gravitation wird nicht durch das Standardmodell beschrieben. Wenn man Gluonen und W-Bosonen jeweils als nur 1 Teilchen zählt, gibt es im Rahmen des Standardmodells 4 Austauschteilchen. Wenn man Gluonen und W-Bosonen aufgedröselt zählt, kommt man auf 12 Austauschteilchen, Geschmackslosche!

48 Vom Leben und Sterben der Sterne

	Blauer Riese	Sonne	Roter Zwerg
relative Masse m	50	1	0,2
relativer Radius $r \sim m^{1/2}$	7	1	0,4
Temperatur [K] $T \sim m^{1/2}$	40.000	5800	2600
relative Leuchtkraft $L \sim m^3$	125.000	1	0,008
Hauptreihenzeit in Jahren $t_h \sim 1/m^2$	$4,4 \cdot 10^6$	$11 \cdot 10^9$	$275 \cdot 10^9$

Tab. 48.1: Beispiele zu wichtigen Sterneigenschaften, die von der Masse abhängig sind (siehe Infobox Proportionalitäten).

Phase	Dauer in 10^6 a	Dauer in %	relative Leuchtkraft	relativer Radius
Hauptreihenstern (2)	11.000	88,49	0,7–2,2	0,9–1,6
Übergangsphase (3)	700	5,63	2,3	1,6–2,3
Roter Riese (4)	600	4,83	2,3–2300	2,3–166
Beginn des He-Brennens (5)	130	1,04	44–2000	10–130
instabile Phase (6)	0,4	0,003	500–5000	50–200
Übergang zu Weißen Zwerg (7)	0,1	0,001	3500–0,1	100–0,08
Summe	12.430	100		

Tab. 48.2: Die Phasen der Sonne (siehe auch Abb. 48.10): Die Zahlen basieren auf computergestützten Modellrechnungen. Die relativen Werte sind auf die heutige Sonne bezogen.

Brennphase	Temperatur [K]	Dauer	Hauptprodukte
Wasserstoffbrennen	$0,04 \cdot 10^9$	$7,3 \cdot 10^6$ a	Helium
Heliumbrennen	$0,2 \cdot 10^9$	$0,7 \cdot 10^6$ a	Kohlenstoff, Sauerstoff
Kohlenstoffbrennen	$0,7 \cdot 10^9$	320 a	Neon, Magnesium
Neonbrennen	$1,2 \cdot 10^9$	< 10 a	Sauerstoff, Magnesium
Sauerstoffbrennen	$1,8 \cdot 10^9$	~ 0,5 a	Silizium, Schwefel
Siliziumbrennen	$3,4 \cdot 10^9$	< 1 d	Eisen

Tab. 48.3: Die Brennphasen eines Sterns mit 25 Sonnenmassen (siehe auch Abb. 48.14): Jede neue Phase dauert kürzer, und die Temperaturen werden größer.

Sterntyp	Radius in km	Sonnenmassen	Dichte kg/m ³
Sonne	10^6	1	10^3
Weißer Zwerg	10.000	< 1,4	10^9
Neutronenstern	10	≤ 2,5	10^{17}
Schwarzes Loch	<10	> 2,5	> 10^{19}

Tab. 48.4: Daten von Sternen in Größenordnungen

49 Einführung in die Kosmologie

F Formel: Hubble-Gesetz
$v = H \cdot r$
v ... Fluchtgeschwindigkeit einer Galaxie [km/s]
H ... Hubble-Konstante; $67,74 \pm 0,46$ km / (s · Mpc) (Stand 2018, Planck-Teleskop)
1 Megaparsec (Mpc) = $3,1 \cdot 10^{22}$ m
r ... Abstand zwischen Galaxis und Erde [Mpc]

Alter	$13,8 (\pm 0,02) \cdot 10^9$ Jahre
Entfernung bis zum Rand des theoretisch sichtbaren Universums	$46,6 \cdot 10^9$ Lichtjahre
Entfernung bis zur Hintergrundstrahlung	$45,7 \cdot 10^9$ Lichtjahre
Masse (inkl. dunkler Materie)	10^{52} kg bis 10^{53} kg
Anzahl der Galaxien	10^{11}
Anzahl der Sterne	10^{22} bis 10^{23}
Anzahl der Nukleonen	10^{78}
Anzahl der Photonen	10^{88}
Anzahl der Neutrinos	10^{89}
Hubble-Konstante je nach Art der Bestimmung	67,7 bis $77 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$
kritische Dichte je nach Hubble-Konstante	$1,1 \cdot 10^{-26} \text{ kg m}^{-3}$ bis $8,5 \cdot 10^{-27} \text{ kg m}^{-3}$

Tab. 49.1: Vermutete Daten zum beobachtbaren Universum: Die grau unterlegten Daten sind schwer zu bestimmen und daher nur in Größenordnungen angegeben.

50 Miniaturisierung und Nanotechnologie

Jahr	5,25"	3,5"	2,5"	1,8"	1,0"	0,85"
1980	5 MB	–	–	–	–	–
1984	20 MB	10 MB				
1991	1,3 GB	130 MB	40 MB	–	–	–
1995	9,1 GB	2,1 GB	422 MB			
2001	–	80 GB	40 GB	–	340 MB	–
2005	–	500 GB	120 GB	60 GB	8 GB	6 GB
2010	–	3 TB	1,5 TB	320 GB	–	–
2018	–	32 TB	5 TB	–	–	–

Tab. 50.1: Beispiele der fortschreitenden **Miniaturisierung von PC-Festplatten**: Verkleinerung und gleichzeitige Erhöhung der Kapazität führen zu immer höheren Speicherdichten. Ein Zoll (1) entspricht 2,54 cm.

Material	spezifischer Widerstand [Ωm]	frei bewegliche Elektronen [m ⁻³]	
Kupfer	10^{-8}	10^{28}	Leiter
Aluminium	10^{-8}	10^{28}	
Stahl	10^{-7}	10^{28}	
dotiertes Silicium	10^{-1} bis 10^{-3}	10^{22}	Halbleiter
reines Germanium	1		
reines Silicium	10^2	10^{16}	
Glas	10^{12}		Nichtleiter
Porzellan	10^{12}		
Gummi	10^{13} bis 10^{15}		

Tab. 50.2: Größenordnungen des spezifischen Widerstands und der frei beweglichen Elektronen bei 20 °C (siehe auch Kap. 24.4, „Big Bang 6“).

Big Bang 8

x	U_a	y	U_b	x NAND y	U_c
0	0 V	0	0 V	1	5 V
1	5 V	0	0 V	1	5 V
0	0 V	1	5 V	1	5 V
1	5 V	1	5 V	0	0 V

Tab. 50.3: Wahrheitstabelle der **NAND-Operation (fett)** und wie diese vom NAND-Gatter in Spannungen übersetzt wird: Die Zahl 0 entspricht 0 Volt, die Zahl 1 entspricht 5 Volt. Manche Chips verwenden auch 3,3 V.

Seitenlänge [m]	Oberfläche [m ²]	Volumen [m ³]	rel. Verhältnis O/V
1	6	1	6
0,1	0,06	0,001	60
10^{-8}	$6 \cdot 10^{-16}$	10^{-24}	$6 \cdot 10^8$

Tab. 50.4: Bei Verkleinerung eines Objekts sinkt das Volumen viel rascher als die Oberfläche.