

Physik

H. Niedrig, M. Sternberg

0 Übersicht

Die Grundlagen der Physik wurden traditionell ungefähr entsprechend der historischen Entwicklung der einzelnen Teilgebiete dargestellt, also etwa in der Reihenfolge:

- Mechanik
- Schwingungen und Wellen
- Akustik
- Wärmelehre
- Elektrizitätslehre
- Optik
- Elektromagnetische Strahlung
- Atomphysik
- Kerne und Elementarteilchen
- Relativitätsprinzip.

In dieser Abfolge von Teilgebieten werden übergeordnete Prinzipien der Physik, wie z. B. das Feldkonzept, die vier grundlegenden Wechselwirkungsarten, oder die Wellenausbreitung, nicht sehr deutlich.

Deshalb wurde in der vorliegenden Darstellung der Physik eine andere Systematik gewählt, die – ähnlich wie in den Feynman Lectures und in den Büchern von Alonso und Finn oder von Stroppe, vgl. den Abschnitt Literatur – von nur wenigen Grundkonzepten ausgeht, und hier zu einer Gliederung in drei Teile führt:

- * Teil I: Teilchen und Teilchensysteme
 - Kinematik
 - Kraft und Impuls
 - Dynamik starrer Körper
 - Statistische Mechanik – Thermodynamik
 - Transporterscheinungen
 - Hydro- und Aerodynamik
- * Teil II: Wechselwirkungen und Felder
 - Gravitationswechselwirkung
 - Elektrische Wechselwirkung
 - Magnetische Wechselwirkung
 - Zeitveränderliche elektromagnetische Felder

- Elektrische Stromkreise
- Transport elektrischer Ladung: Leitungsmechanismen
- Starke und schwache Wechselwirkung: Atomkerne und Elementarteilchen
- * Teil III: Wellen und Quanten
 - Wellenausbreitung
 - Elektromagnetische Wellen
 - Wechselwirkung elektromagnetischer Strahlung mit Materie
 - Reflexion und Brechung, Polarisation
 - Geometrische Optik
 - Interferenz und Beugung
 - Wellenaspekte bei der optischen Abbildung
 - Materiewellen.

Hier können die systematischen Zusammenhänge in den verschiedenen Bereichen der Physik leichter als in der traditionellen Darstellung deutlich gemacht werden.

Beispielsweise werden bei der Mechanik des Massenpunktes und der Teilchensysteme in Teil I die Relativitätsprinzipie (Galilei- und Lorentz-Transformation) bereits mitbehandelt, ebenso die Schwingungen. Starre Körper, Fluide und Gase werden als Teilchensysteme aufgefasst, und die Thermodynamik wird mithilfe der kinetischen Gastheorie als statistische Mechanik dargestellt. Die Transporterscheinungen (Diffusion, Wärmeleitung, Viskosität) werden als Nichtgleichgewichtsvorgänge im Anschluss an die thermodynamischen Gleichgewichtsprozesse (Kreisprozesse) behandelt.

In Teil II werden die vier bekannten fundamentalen Wechselwirkungsarten (Gravitations-, elektromagnetische, starke und schwache Wechselwirkung) mit ihren Kraftfeldern im Zusammenhang besprochen, wobei das Schwerkraft naturgemäß bei der Elektrodynamik liegt. Die Atomstruktur wird einführend bei den elektrischen Leitungsmechanismen erläutert. Kernstruktur, -zerfall und -energiegewinnung finden

sich unter dem Stichwort Starke Wechselwirkung. Die Elementarteilchensystematik wird einschließlich des Standardmodells unter dem Stichwort Schwache Wechselwirkung behandelt.

Teil III geht zunächst von der allgemeinen Beschreibung von Wellenbewegungen und der daraus resultierenden Wellengleichung aus, um dann elastische Wellen, akustische Wellen (inklusive Doppler-Prinzip) und vor allem elektromagnetische Wellen zu behandeln. Es schließen sich die Wechselwirkung elektromagnetischer Strahlung mit Materie, die Strahlungsgesetze, das Quantenkonzept des Lichtes und die Spektroskopie an bis hin zur induzierten Emission und dem Laser. Die Optik wird zunächst im Grenzfall der (unendlich) kleinen Wellenlänge betrachtet (Strahlenoptik, geometrische Optik). Der entgegengesetzte Fall führt zur Interferenz und Beugung (Huygens, Fresnel, Fraunhofer), zur Abbe'schen Mikroskoptheorie und zur Holografie. Als letzter Aspekt werden Elektronen als Materiewellen (de Broglie) betrachtet: Schrödinger-Gleichung, Elektronenbeugung und Elektronenoptik.

Dem Ganzen vorgeschaltet ist ein Abschnitt über physikalische Größen und Einheiten und das Internationale Einheitensystem, das hier durchgängig verwendet wird.

1 Physikalische Größen und Einheiten

Physik ist die Wissenschaft von den Eigenschaften, der Struktur und der Bewegung der (unbelebten) Materie, und von den Kräften oder Wechselwirkungen, die diese Eigenschaften, Strukturen und Bewegungen hervorrufen. Aufgabe der Physik ist es, solche physikalischen Vorgänge in Raum und Zeit zu verfolgen (zu beobachten) und in logische Beziehungen zueinander zu setzen. Die Sprache, in der das geschieht, ist die der Mathematik. Die Beobachtungsergebnisse müssen daher in messbaren, d. h. zahlenmäßig erfassbaren Werten (Vielfachen oder Teilen von festgelegten Einheiten) ausgedrückt werden, um physikalische Gesetzmäßigkeiten erkennen zu können. Der Vergleich mit der Einheit stellt einen *Messvorgang* dar. Er ist stets mit einem *Messfehler* verknüpft, der die Genauigkeit der Messung begrenzt.

1.1 Physikalische Größen

Physikalische Gesetzmäßigkeiten sind mathematische Zusammenhänge zwischen *physikalischen Größen*. Physikalische Größen G kennzeichnen (im Prinzip) *messbare* Eigenschaften und Zustände von physikalischen Objekten oder Vorgängen. Sie werden ihrer Qualität nach bestimmten *Größenarten* (z. B. Länge, Zeit, Kraft, Ladung usw.) zugeordnet. Der Wert einer physikalischen Größe ist das Produkt aus einem *Zahlenwert* $\{G\}$ (früher: Maßzahl) und einer *Einheit* $[G]$ (früher: Maßeinheit):

$$G = \{G\}[G] . \quad (1-1)$$

Außerdem haben Größen und Einheiten eine *Dimension*, z. B. haben Kreisumfang und die Einheit Femtometer beide die Dimension Länge. Formal kann man einen Ausdruck für die Dimension aus der SI-Einheit ableiten, indem man im Potenzprodukt der Basiseinheiten diese durch die entsprechenden Basisdimensionen ersetzt.

1.2 Basisgrößen und -einheiten

Man unterscheidet heute zwischen Basisgrößenarten und abgeleiteten Größenarten. Letztere können als Potenzprodukte mit ganzzahligen Exponenten der Basisgrößenarten dargestellt werden (z. B. Geschwindigkeit = Länge \cdot Zeit $^{-1}$). Welche Größenarten als Basisgrößenarten gewählt werden, ist in gewissem Maße willkürlich und geschieht nach Gesichtspunkten der Zweckmäßigkeit. In den verschiedenen Gebieten der Physik kommt man mit unterschiedlich vielen Basisgrößenarten aus (Tabelle 1-1).

1.3 Das Internationale Einheitensystem, Konstanten und Einheiten

Die neben den SI-Einheiten üblichen und zugelassenen Einheiten sind heute definitorisch sämtlich an das SI (Système International d'Unités) angeschlossen. Die sieben Basisgrößen und -einheiten des SI sind in Tabelle 1-2 aufgeführt. Alle anderen physikalischen Größen lassen sich als Potenzprodukte der Basisgrößen darstellen (abgeleitete Größen). Bei wichtigen abgeleiteten Größen werden die zugehörigen Po-

Tabelle 1–1. Schema der Basisgrößenarten, auf denen das SI basiert

Teilgebiete der Physik			Anzahl der Basisgrößen
Geometrie: Länge l			1
Kinematik: l , Zeit t			2
Dynamik: l , t , Masse m			3
Elektrodynamik:	Phänomenologische Thermodynamik:	Atomistik:	4
l , t , m , Ladung Q	l , t , m , Temperatur T	l , t , m , Stoffmenge ν	
Elektrothermik:	Statistische Physik:	Elektrische Transportphänomene:	5
l , t , m , Q , T	l , t , m , T , ν	l , t , m , Q , ν	
Physik der Materie: l , t , m , Q , T , ν			6

tenzprodukte der Basiseinheiten durch weitere Einheitenamen abgekürzt, z. B. für die elektrische Spannung: $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{s}^{-3} = \text{V}$ (Volt). Anstelle der sich als Basisgröße natürlich anbietenden elektrischen Ladung wird die besser messbare elektrische Stromstärke verwendet.

Definitionen der *Basiseinheiten* (in Klammern die Größenordnung der relativen Unsicherheiten der Realisierungen):

- 1 *Meter* (m) ist die Länge der Strecke, die Licht im Vakuum während der Dauer von 1/299 792 458 Sekunden durchläuft (10^{-14}).
- 1 *Sekunde* (s) ist das 9 192 631 770-fache der Periodendauer der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustands von Atomen des Nuklids ^{133}Cs entsprechenden Strahlung (10^{-14}).
- 1 *Kilogramm* (kg) ist die Masse des internationalen Kilogrammprototyps (10^{-9}).
- 1 *Ampere* (A) ist die Stärke eines zeitlich unveränderlichen Stroms, der, durch zwei im Vakuum par-

allel im Abstand von 1 Meter angeordnete, geradlinige, unendlich lange Leiter von vernachlässigbar kleinem kreisförmigem Querschnitt fließend, zwischen diesen Leitern je 1 Meter Leiterlänge die Kraft $2 \cdot 10^{-7}$ Newton hervorruft (10^{-6}).

- 1 *Kelvin* (K) ist der 273,16-te Teil der thermodynamischen Temperatur des Tripelpunktes des Wassers (10^{-6}).
- 1 *Mol* (mol) ist die Stoffmenge eines Systems, das aus ebenso viel Teilchen besteht, wie Atome in 0,012 Kilogramm des Kohlenstoff-Nuklids ^{12}C enthalten sind (10^{-6}).
- 1 *Candela* (cd) ist die Lichtstärke in einer bestimmten Richtung einer Strahlungsquelle, die monochromatische Strahlung der Frequenz 540 THz aussendet und deren Strahlstärke in dieser Richtung 1/683 W/sr beträgt ($5 \cdot 10^{-3}$).

Aufgrund der Fortschritte in der Messgenauigkeit insbesondere der Zeitmessung wurde auf der XVII. Generalkonferenz für Maß und Gewicht am 20. 10. 1983 der Zahlenwert der *Vakuumlichtgeschwindigkeit* als Naturkonstante genau festgelegt:

$$c_0 = 299\,792\,458\,\text{m/s} \, .$$

(1-2)

Tabelle 1–2. Basisgrößen und Basiseinheiten des SI

Basisgröße	Basiseinheit Name	Zeichen
Länge	Meter	m
Zeit	Sekunde	s
Masse	Kilogramm	kg
elektr. Stromstärke	Ampere	A
Temperatur	Kelvin	K
Stoffmenge	Mol	mol
Lichtstärke	Candela	cd

Damit ist das Meter seit dieser Festlegung metrologisch von der Sekunde abhängig geworden.

Es ist Aufgabe der staatlichen Mess- und Eichlaboratorien, in der Bundesrepublik Deutschland der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, für die experimentelle Realisierung der Basiseinheiten in *Normalen* mit größtmöglicher Genauigkeit zu sorgen, da hiervon die Messgenauigkeiten physikalischer

Tabelle 1–3. Vorsätze zur Bildung dezimaler Vielfacher und Teile von Einheiten

Faktor	Vorsatz	Vorsatzzeichen
10^{24}	Yotta	Y
10^{21}	Zetta	Z
10^{18}	Exa	E
10^{15}	Peta	P
10^{12}	Tera	T
10^9	Giga ^a	G
10^6	Mega ^a	M
10^3	Kilo ^a	k
10^2	Hekto ^b	h
10^1	Deka ^b	da
10^{-1}	Dezi ^b	d
10^{-2}	Zenti ^b	c
10^{-3}	Milli	m
10^{-6}	Mikro	μ
10^{-9}	Nano	n
10^{-12}	Piko	p
10^{-15}	Femto	f
10^{-18}	Atto	a
10^{-21}	Zepto	z
10^{-24}	Yocto	y

^a Die Vorsätze Kilo (K), Mega (M) und Giga (G) sind in der Informatik abweichend wie folgt definiert: $K = 2^{10} = 1024$, $M = 2^{20} = 1\,048\,576$, $G = 2^{30} = 1\,073\,741\,824$.

^b Die Vorsätze c, d, da und h werden heute im Wesentlichen nur noch in folgenden 9 Einheiten angewandt: cm, dm; ha; cl, dl, hl; dt, hPa sowie (in Österreich) dag.

Beobachtungen und die Herstellungsgenauigkeiten technischer Geräte abhängen.

Zur Vervielfachung bzw. Unterteilung der Einheiten sind international vereinbarte Vorsätze und Vorsatzzeichen zu verwenden (Tabelle 1–3).

Aus der theoretischen Beschreibung der physikalischen Gesetzmäßigkeiten, d.h. der mathematischen Zusammenhänge zwischen den physikalischen Größen, ergeben sich universelle Proportionalitätskonstanten, die sog. *Naturkonstanten*, die entsprechend den Fortschritten der physikalischen Messtechnik von der CODATA Task Group on Fundamental Constants als konsistenter Satz von Naturkonstanten empfohlen und hier verwendet werden (P.J. Mohr, B.N. Taylor: CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 2002, <http://www.physicstoday.org/guide/fundconst.pdf>; Reviewed 2005 by P.J. Mohr and B.N. Taylor, Rev. Mod. Phys. **77**, 1, 2005).

In der älteren Literatur sind verschiedene andere Einheitensysteme verwendet, aus denen man manche Einheiten noch antrifft. Tabelle 1–4 enthält daher einige Umrechnungen heute ungültiger und sonstiger Einheiten.

International vereinbarte Normwerte von Kenngrößen der Erde sowie von Luft, Wasser und Sonnenstrahlung enthält Tabelle 1–5.

Tabelle 1–4. Einheiten außerhalb des SI

Einheit	Einheitenzeichen, Definition, Umrechnung in das SI	Anwendung
<i>Gesetzliche Einheiten</i>		
Gon	gon = $(\pi/200)$ rad	ebener Winkel
Grad	° = $(\pi/180)$ rad	ebener Winkel
Minute	' = $(1/60)^\circ$	ebener Winkel
Sekunde	" = $(1/60)'$	ebener Winkel
Liter	l = L = $1\text{ dm}^3 = 10^{-3}\text{ m}^3$	Volumen
Minute	min = 60 s	Zeit
Stunde	h = 60 min	Zeit
Tag	d = 24 h	Zeit
Tonne	t = 10^3 kg	Masse
Bar	bar (= 10^6 dyn/cm^2) = 10^5 Pa	Druck
<i>– mit beschränktem Anwendungsbereich</i>		
Dioptrie	dpt = 1/m	Brechwert opt. Systeme
Ar	a = 100 m^2 [1 ha = 100 a]	Fläche von Grundstücken
Barn	b = $10^{-28}\text{ m}^2 = 100\text{ fm}^2$	Wirkungsquerschnitt in der Kernphysik

Tabelle 1–4. Fortsetzung

Einheit	Einheitenzeichen, Definition, Umrechnung in das SI	Anwendung
atomare Masseneinheit	$u = \text{kg}/(10^3 \cdot N_A \cdot \text{mol})$ $= 1,66053886 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	Masse in der Atomphysik
metrisches Karat	$(\text{Kt} = \text{ct}) = 0,2 \text{ g}$	Masse von Edelsteinen
mm Quecksilbersäule	$\text{mmHg} = 133,322 \text{ Pa}$	Blutdruck in der Medizin
Elektronenvolt	$\text{eV} = e \cdot (1 \text{ V}) = 1,60217653 \cdot 10^{-19} \text{ J}$	Energie in der Atomphysik
<i>Englische und US-amerikanische Einheiten mit verbreiteter Anwendung</i>		
inch (vereinheitl.)	$\text{in} = 0,0254 \text{ m}$	Länge
— imperial inch (U.K.)	$\text{imp. in} = 25,399978 \text{ mm}$	Länge
— US inch	$= (1/39,37) \text{ m} = 25,4000508 \text{ mm}$	Länge
foot	$\text{ft} = 12 \text{ in} = 0,3048 \text{ m}$	Länge
yard	$\text{yd} = 3 \text{ ft} = 0,9144 \text{ m}$	Länge
mile	$\text{mile} = 1760 \text{ yd} = 1609,344 \text{ m}$	Länge
gallon (U.K.)	$\text{imp. gallon} = 277,42 \text{ in}^3 = 4,54609 \text{ l}$	Volumen (Hohlmaß)
gallon (US)	$\text{gal} = 231 \text{ in}^3(\text{US}) = 3,7854345 \text{ l}$	Volumen (Hohlmaß) f. Flüss.
petroleum gallon (US)	$\text{ptr. gal} = 230,665 \text{ in}^3(\text{US}) = 3,779949 \text{ l}$	Volumen von Erdöl
petroleum barrel (US)	$\text{ptr. bbl} = 42 \text{ ptr. gal} = 158,7579 \text{ l}$	Volumen von Erdöl
pound (vereinheitl.)	$\text{lb} = 0,45359237 \text{ kg}$	Masse
ounce	$\text{oz} = (1/16) \text{ lb} = 28,349523 \text{ g}$	Masse
troy ounce	$\text{ozt} = \text{oztr} = (480/7000) \text{ lb} = 31,1034768 \text{ kg}$	Masse von Edelmetallen
pound-force (U.K.)	$\text{lbf} = \text{lb} \cdot g_n = 4,4482216 \text{ N}$	Kraft
horse-power (U.K.)	$\text{h.p.} = 550 \text{ ft} \cdot \text{lbf/s} = 745,700 \text{ W}$	Leistung
<i>International übliche SI-fremde Einheiten für besondere Gebiete</i>		
internationale Seemeile	$\text{sm} = 1852 \text{ m}$	Länge in der Seefahrt
international nautical air mile	$\text{NM} = \text{NAM} = 1 \text{ sm}$	Länge in der Luftfahrt
Knoten	$\text{kn} = \text{sm/h} = 1,852 \text{ km/h} = 0,5144 \text{ m/s}$	Geschw. in der Seefahrt
Knoten	$\text{kt} = \text{NM/h} = 0,5144 \text{ m/s}$	Geschw. in der Luftfahrt
astronom. Einheit	$\text{AE} = 149,597870 \cdot 10^9 \text{ m}$	Länge in der Astronomie
Lichtjahr	$\text{ly} = c_0 \cdot a_{\text{tr}} (a_{\text{tr}} = 365,24219878 \text{ d})$ $= 9,460528 \cdot 10^{15} \text{ m}$	Länge in der Astronomie
Parsec	$\text{pc} = \text{AE}/\sin 1'' = 30,856776 \cdot 10^{15} \text{ m}$	Länge in der Astronomie
<i>Nicht mehr gesetzliche abgeleitete CGS-Einheiten mit besonderem Namen und verwandte</i>		
Dyn	$\text{dyn} = \text{g} \cdot \text{cm/s}^2 = 10^{-5} \text{ N}$	Kraft
Erg	$\text{erg} = \text{dyn} \cdot \text{cm} = 10^{-7} \text{ J}$	Energie
Poise	$\text{P} = \text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s}) = 10^{-1} \text{ Pa} \cdot \text{s}$	dynamische Viskosität
Stokes	$\text{St} = \text{cm}^2/\text{s} = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$	kinematische Viskosität
Gal	$\text{Gal} = \text{cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$	Fallbeschleunigung
Stilb	$\text{sb} = \text{cd}/\text{cm}^2 = 10^4 \text{ cd/m}^2$	Leuchtdichte
Phot	$\text{ph} = \text{cd} \cdot \text{sr}/\text{cm}^2 = 10^4 \text{ lx (lux)}$	Beleuchtungsstärke
Oersted	$\text{Oe} = (10/4\pi) \text{ A}/\text{cm} = (1000/4\pi) \text{ A}/\text{m}$	magnetische Feldstärke
Gauß	$\text{G} = 10^{-4} \text{ T (Tesla)}$	magnetische Flussdichte
Maxwell	$\text{M} = \text{G} \cdot \text{m}^2 = 10^{-8} \text{ Wb (Weber)}$	magnetischer Fluss
<i>Sonstige nicht mehr gesetzliche Einheiten</i>		
Kilopond	$\text{kp} = \text{kg} \cdot g_n = 9,80665 \text{ N}$	Kraft
Kalorie	$\text{cal} = c_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{K} \cdot \text{g} = 4,1868 \text{ J}$	Wärmemenge, (Energie)

Tabelle 1-4. Fortsetzung

Einheit	Einheitenzeichen, Definition, Umrechnung in das SI	Anwendung
Pferdestärke	$PS = 75 \text{ m} \cdot \text{kp/s} = 735,49875 \text{ W}$	Leistung
Apostilb	$asb = (10^{-4}/\pi) sb = 1/\pi \text{ cd/m}^2$	Leuchtdichte
Röntgen	$R = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg}$	Ionendosis
Rad	$rd = 10^{-2} \text{ J/kg} = 10^{-2} \text{ Gy (Gray)}$	Energiedosis
Rem	$rem = 10^{-2} \text{ J/kg} = 10^{-2} \text{ Sv (Sievert)}$	Äquivalentdosis
Curie	$Ci = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1} = 37 \cdot 10^9 \text{ Bq (Becquerel)}$	Aktivität eines Radionuklids
Ångström	$\text{\AA} = 10^{-10} \text{ m}$	Länge in der Spektroskopie und Elektronenmikroskopie
X-Einheit	$XE = (1,00202 \pm 3 \cdot 10^{-5}) \cdot 10^{-13} \text{ m}$	Länge in der Röntgenspekt.

Tabelle 1-5. Genormte Werte von physikalischen Umweltdaten

Größe (Quelle)	Formelzeichen	Wert
<i>Sonnenstrahlung</i>		
Solarkonstante (DIN 5031-8)	$E_{\text{e}0}$	1,37 kW/m ²
<i>Erde (Geodätisches Referenzsystem, 1980)</i>		
Äquatorradius	a	6 378 137 m
Polradius	b	6 356 752 m
mittlerer Erdradius (der volumengleichen Kugel)	$R_E = (a^2 \cdot b)^{1/3}$	6 371 000 m
Oberfläche	S_E	510,0656 · 10 ⁶ km ²
Volumen	$V_E = (4\pi/3)a^2b$	1083,207 · 10 ⁹ km ³
Masse	M_E	5,9742 · 10 ²⁴ kg
Normfallbeschleunigung	g_n	9,80665 m/s ²
Breitenabhängigkeit der Fallbeschleunigung auf NN	$g(\varphi)$	9,780327(1 + 0,00530244 sin ² φ – 0,00000582 sin ² 2 φ)
<i>Luft im Normzustand (DIN ISO 2533, basiert auf älteren Werten der Fundamentalkonstanten)</i>		
Normdruck	p_n	101 325 Pa
Normtemperatur (anders DIN 1343!)	T_n	228,15 K = 15°C
Dichte der trockenen Luft	ϱ_n	1,225 kg/m ³
molare Masse der trockenen Luft	$M_L = \varrho_n RT_n / p_n$	28,964420 kg/kmol
spezifische Gaskonstante der trockenen Luft	$R_L = R/M_L = p_n/(\varrho_n T_n)$	287,05287 J/(kg · K)
Schallgeschwindigkeit	$a_n = c_{a,n} = (1,4 p_n / \varrho_n)$	340,294 m/s
Druckskalenhöhe	$H_{pn} = p_n / (g_n \varrho_n)$	8434,5 m
mittlere freie Weglänge der Luftteilchen	l_n	66,328 nm
Teilchendichte	$n_n \approx n_0 T_0 / T_n$	25,471 · 10 ²⁴ m ⁻³
mittlere Teilchengeschwindigkeit	\bar{v}_n	458,94 m/s
Wärmeleitfähigkeit	λ_n	25,383 mW/(m · K)
dynamische Viskosität	μ_n	17,894 μPa · s
Brechzahl (DIN 5030-1) im sichtb. Spektralber.	$n(\lambda)$	1,00021 ... 1,00029
<i>Wasser</i>		
Dichte bei 4 °C und p_n (DIN 1306)	ϱ	999,972 kg/m ³
Eispunktemperatur bei p_n	T_0	273,15 K $\hat{=}$ 0 °C
dyn. Viskosität bei 20 °C (DIN 51 550)	η	1,002 mPa · s
Verdampfungsenthalpie bei 25 °C, spezifische –, molare	$r(= h_{1g})$ r_m	2442,5 kJ/kg 44,002 kJ/mol

I. TEILCHEN UND TEILCHENSYSTEME

In den folgenden Abschnitten 2 bis 7 werden die physikalischen Grundlagen der Mechanik dargestellt, die später in der Technischen Mechanik E im Hinblick auf technische Anwendungen spezieller behandelt werden.

2 Kinematik

Die *Kinematik* (Bewegungslehre) behandelt die Gesetzmäßigkeiten, die die Bewegungen von Körpern rein geometrisch beschreiben, ohne Rücksicht auf die Ursachen der Bewegung. Die die Bewegung erzeugenden bzw. dabei auftretenden Kräfte werden erst in der Dynamik behandelt. Es wird zunächst die Kinematik des Massenpunktes besprochen.

Definition des Massenpunktes: Der Massenpunkt ist ein idealisierter Körper, dessen gesamte Masse in einem mathematischen Punkt vereinigt ist. Jeder reelle Körper, dessen Größe und Form bei dem betrachteten physikalischen Problem ohne Einfluss bleiben, kann als Massenpunkt behandelt werden (Beispiele: Planetenbewegung, Satellitenbahnen, H-Atom). Die Lage oder der Ort eines Massenpunktes zur Zeit t in einem vorgegebenen Bezugssystem (Bild 2-1) kann durch einen (bei Bewegung des Massenpunktes zeitabhängigen) *Ortsvektor*

$$\mathbf{r}(t) = (x(t), y(t), z(t))$$

mit

$$r(t) = |\mathbf{r}(t)| = \sqrt{x^2(t) + y^2(t) + z^2(t)} \quad (2-1)$$

oder durch die entsprechenden Ortskoordinaten $x(t), y(t), z(t)$ beschrieben werden.

Kinematische Operationen: Hierunter wird die Durchführung bestimmter Bewegungsoperationen verstanden, die zu einer Veränderung der Lage ausgedehnter Körper im Raum führen (Translation, Rotation, Spiegelung). Die Lageveränderung einzelner Massenpunkte wird allein durch die Translation ausreichend beschrieben.

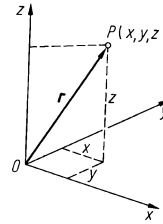


Bild 2-1. Ortsvektor eines Massenpunktes P

2.1 Geradlinige Bewegung

Die die geradlinige Bewegung eines Massenpunktes beschreibenden Größen sind der Weg s , die Zeit t , die Geschwindigkeit v , die Beschleunigung a . Definitionen der Geschwindigkeit:

$$\text{mittlere Geschwindigkeit } \bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t}, \quad (2-2)$$

$$\begin{aligned} \text{Momentan-} \\ \text{geschwindigkeit } v &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} = \dot{s} \\ &= \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \dot{\mathbf{r}}. \end{aligned} \quad (2-3)$$

SI-Einheit: $[v] = \text{m/s}$.

Für die *gleichförmig geradlinige Bewegung* gilt:

$$v = \text{const}$$

Ist zum Zeitpunkt t_0 der Ort des Massenpunktes s_0 (Bild 2-2), so ergibt sich sein Ort s zu einem späteren Zeitpunkt t durch Integration von $ds = v dt$ aus (2-3):

$$\begin{aligned} \int_{s_0}^s ds &= \int_{t_0}^t v dt, \\ s &= s_0 + v(t - t_0). \end{aligned} \quad (2-4)$$

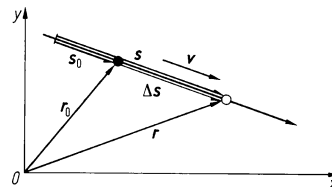


Bild 2-2. Geradlinige Bewegung eines Massenpunktes

Definitionen der Beschleunigung:

$$\text{mittlere Beschleunigung } \bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t}, \quad (2-5)$$

$$\begin{aligned} \text{Momentan-} \quad a &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt} = \dot{v} \\ \text{beschleunigung} \quad &= \frac{d^2 s}{dt^2} = \ddot{s} = \frac{d^2 r}{dt^2} = \ddot{r}. \end{aligned} \quad (2-6)$$

SI-Einheit: $[a] = \text{m/s}^2$.

Verzögerung liegt vor, wenn $a < 0$ ist, d. h. der Betrag der Geschwindigkeit mit t abnimmt. Verzögerung ist also *negative Beschleunigung*.

Bemerkung: Für die geradlinige Bewegung ist eine skalare Schreibweise ausreichend. In der hier gewählten vektoriellen Schreibweise sind die Definitionen (2-3) und (2-6) auch für *krummlinige Bewegungen* gültig. In diesem Fall ist die Geschwindigkeitsänderung $d\mathbf{v}$ und damit die Beschleunigung \mathbf{a} i. Allg. nicht parallel zu \mathbf{v} (Bild 2-3).

Sonderfälle:

- Ändert sich nur der Geschwindigkeitsbetrag, nicht aber die Richtung, so handelt es sich um eine geradlinige Bewegung mit $\mathbf{a} \parallel \mathbf{v}$. *Bahnbeschleunigung*.
- Ändert sich nur die Geschwindigkeitsrichtung, nicht aber der Betrag, so handelt es sich um eine krummlinige Bewegung mit $\mathbf{a} \perp \mathbf{v}$. *Normalbeschleunigung*.

Für die *gleichmäßig beschleunigte, geradlinige Bewegung* gilt

$$a = \text{const}, \text{ Anfangsgeschwindigkeit } v_0 \parallel a.$$

Ist zum Zeitpunkt t_0 der Ort des Massenpunktes s_0 und seine Geschwindigkeit v_0 (Anfangsgeschwindigkeit), so ergibt sich für einen späteren Zeitpunkt t durch Integration von $dv = a dt$ aus (2-6)

$$\begin{aligned} \int_{v_0}^v dv &= \int_{t_0}^t a dt \\ v &= v_0 + a(t - t_0), \end{aligned} \quad (2-7)$$

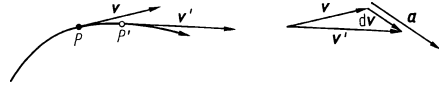


Bild 2-3. Änderung von Geschwindigkeitsbetrag und -richtung bei krummliniger Bewegung

und durch Integration von $ds = v dt$ aus (2-3)

$$\begin{aligned} \int_{s_0}^s ds &= \int_{t_0}^t v dt = \int_{t_0}^t [v_0 + a(t - t_0)] dt \\ s &= s_0 + v_0(t - t_0) + \frac{a}{2}(t - t_0)^2. \end{aligned} \quad (2-8)$$

Für die Anfangswerte $s_0 = 0$ und $t_0 = 0$ folgt aus (2-7) und (2-8)

$$v = v_0 + at \quad (2-9)$$

$$s = v_0 t + \frac{a}{2} t^2 \quad (2-10)$$

und durch Elimination von t aus (2-9) und (2-10)

$$v = \sqrt{v_0^2 + 2as}. \quad (2-11)$$

Freier Fall:

Im Schwerfeld der Erde unterliegen Massen der Fallbeschleunigung g , deren Betrag in der Nähe der Erdoberfläche näherungsweise konstant etwa mit dem Wert $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ angesetzt werden kann (vgl. 3.2.1). Für die Fallhöhe $h (= s)$ und $a = g$ folgt aus (2-9) bis (2-11)

$$v = v_0 + gt, \quad (2-12)$$

$$h = v_0 t + \frac{g}{2} t^2, \quad (2-13)$$

$$v = \sqrt{v_0^2 + 2gh}, \quad (2-14)$$

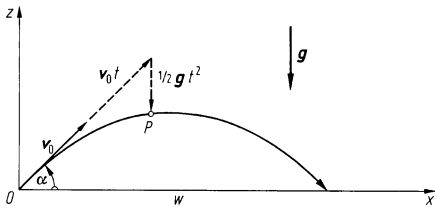
wobei v_0 die Fallgeschwindigkeit zur Zeit $t = 0$ ist. Dieselben Gleichungen gelten auch für den *senkrechten Wurf* nach unten mit der Anfangsgeschwindigkeit v_0 .

Der *senkrechte Wurf* nach oben ist in der Steigphase (bis zur maximalen Steighöhe h_{max}) eine gleichmäßig verzögerte Bewegung mit der Anfangsgeschwindigkeit v_0 und der Beschleunigung $a = -g$. Aus (2-9) bis (2-11) folgt dann:

$$v = v_0 - gt \quad (2-15)$$

$$h = v_0 t - \frac{g}{2} t^2 \quad (2-16)$$

$$v = \sqrt{v_0^2 - 2gh}. \quad (2-17)$$

Bild 2-4. Schräger Wurf unter dem Winkel α

Aus (2-17) ergibt sich die maximale Steighöhe h_{\max} für $v = 0$:

$$h_{\max} = \frac{v_0^2}{2g}. \quad (2-18)$$

Aus (2-15) folgt für $v = 0$ die Steigzeit

$$t_m = \frac{v_0}{g}. \quad (2-19)$$

Schräger Wurf im Erdfeld:

Die Bahnkurve $\mathbf{r}(t)$ beim schrägen Wurf unter dem Winkel α zur Horizontalen (Bild 2-4) ergibt sich analog zu (2-8) oder (2-10) aus der Vektorgleichung

$$\mathbf{r} = \mathbf{v}_0 t + \frac{\mathbf{g}}{2} t^2, \quad (2-20)$$

lässt sich also interpretieren als zusammengesetzt aus zwei geradlinigen Bewegungen:

1. einer gleichförmigen Translation in Richtung der Anfangsgeschwindigkeit \mathbf{v}_0 ,
2. dem freien Fall in senkrechter Richtung; siehe Bild 2-4.

Aus (2-20) folgen die Koordinaten des Massenpunktes zur Zeit t :

$$\begin{aligned} x &= v_0 t \cos \alpha \\ z &= v_0 t \sin \alpha - \frac{g}{2} t^2. \end{aligned} \quad (2-21)$$

Durch Elimination von t ergibt sich als Bahnkurve eine Parabel:

$$z = x \tan \alpha - \frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} x^2. \quad (2-22)$$

Die Wurfweite w lässt sich aus der Koordinate des zweiten Schnittpunktes der Bahnkurve mit der Horizontalen berechnen:

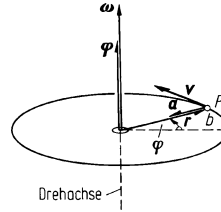


Bild 2-5. Gleichförmige Kreisbewegung

$$w = v_0^2 \frac{\sin 2\alpha}{g}. \quad (2-23)$$

Die maximale Wurfweite ergibt sich für $\sin 2\alpha = 1$, d. h. für $\alpha = 45^\circ$, und beträgt

$$w_{\max} = \frac{v_0^2}{g}. \quad (2-24)$$

2.2 Kreisbewegung

Die die Kreisbewegung eines Massenpunktes beschreibenden Größen sind:

- der Drehwinkel φ , die Zeit t , die Winkelgeschwindigkeit ω , die Winkelbeschleunigung α .

Diese Größen beschreiben die Kreisbewegung in analoger Weise wie die Größen Weg, Zeit, Geschwindigkeit und Beschleunigung die geradlinige Bewegung. Der Drehwinkel φ und die Winkelgeschwindigkeit ω sind axiale Vektoren, die senkrecht auf der Ebene der Kreisbewegung stehen und deren Richtung sich aus der Rechtsschraubenregel in Bezug auf den Drehsinn der Bewegung ergeben (Bild 2-5). Winkelbeträge können in der Einheit Grad ($^\circ$) oder im Bogenmaß (Einheit: rad) angegeben werden. Der Winkel im Bogenmaß ist definiert als die Länge des von den Winkelschenkeln eingeschlossenen Kreisbogens im Einheitskreis. Der Zusammenhang zwischen Winkel φ im Bogenmaß, zugehöriger Bogenlänge b auf einem Kreis und dessen Radius r ist dann (Bild 2-5)

$$\varphi = \frac{b}{r} \text{ rad}.$$

Umrechnungen:

$$\begin{aligned} \frac{\varphi/\text{rad}}{\varphi/^\circ} &= \frac{\pi}{180}, \quad 1 \text{ rad} = 57,29 \dots^\circ, \\ 1^\circ &= 0,01745 \dots \text{ rad} = 17,45 \dots \text{ mrad}. \end{aligned}$$

Definitionen:

Winkel-
geschwindigkeit $\omega = \frac{d\varphi}{dt} = \dot{\varphi}$, (2-25)

Winkel-
beschleunigung $\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \dot{\omega} = \frac{d^2\varphi}{dt^2} = \ddot{\varphi}$. (2-26)

SI-Einheiten:

$$[\omega] = \text{rad/s} = 1/\text{s}, [\alpha] = \text{rad/s}^2 = 1/\text{s}^2 .$$

Für die *gleichförmige Kreisbewegung* gilt

$$\omega = \text{const} .$$

Ist zum Zeitpunkt t_0 die Lage des Massenpunktes auf der Kreisbahn durch den Winkel φ_0 gegeben, so ergibt sich seine Lage φ zu einem späteren Zeitpunkt t durch Integration von $d\varphi = \omega dt$ aus (2-25) zu

$$\varphi = \varphi_0 + \omega(t - t_0) . \quad (2-27)$$

Nennen wir die Dauer eines vollständigen Umlaufs T (Umlaufzeit, Periodendauer) und die auf die Zeit bezogene Zahl der Umläufe Drehzahl (Umdrehungsfrequenz) n , so gelten die Zusammenhänge

$$n = \frac{1}{T} \quad \text{und} \quad \omega = 2\pi n = \frac{2\pi}{T} . \quad (2-28)$$

Die Winkelgeschwindigkeit ω bei der Kreisbewegung wird auch Drehgeschwindigkeit genannt. Zwischen den Vektoren ω , v und r bei der Kreisbewegung (Ursprung von r auf der Drehachse, Bild 2-5, jedoch nicht notwendig in der Kreisebene) besteht der Zusammenhang

$$v = \omega \times r . \quad (2-29)$$

Durch Einsetzen in (2-6) und Ausführen der Differenziation unter Beachtung von $\omega = \text{const}$ ergibt sich für die Beschleunigung bei der gleichförmigen Kreisbewegung

$$a = \omega \times v = \omega \times (\omega \times r) . \quad (2-30)$$

Demnach ist $a \parallel -r$ (Bild 2-5), also eine reine Normalbeschleunigung ($a \perp v$), bei der Kreisbewegung auch *Zentripetalbeschleunigung* genannt. Für den Be-

trag der Zentripetalbeschleunigung folgt aus (2-29) und (2-30)

$$a = \omega v = \omega^2 r = \frac{v^2}{r} . \quad (2-31)$$

Wenn ω zeitabhängig ist, also eine Tangentialbeschleunigung auftritt, so ergibt sich aus (2-6), (2-26) und (2-29) für die Kreisbewegung die Gesamtbeschleunigung

$$a = \alpha \times r + \omega \times v \quad (2-32)$$

mit der Tangentialbeschleunigung

$$a_t = \alpha \times r \quad (2-33)$$

und der Normalbeschleunigung

$$a_n = \omega \times v . \quad (2-34)$$

2.3 Gleichförmig translatorische Relativbewegung

Die Angaben der kinematischen Größen einer Bewegung gelten stets für ein vorgegebenes *Bezugssystem*. Soll die Bewegung in einem anderen Bezugssystem beschrieben werden, so müssen die kinematischen Größen umgerechnet (transformiert) werden. Ruhen beide Bezugssysteme relativ zueinander, so sind lediglich die Ortskoordinaten zu transformieren, während die zurückgelegten Wege, die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen in beiden Systemen gleich bleiben. Das wird anders, wenn sich beide Bezugssysteme gegeneinander bewegen. Nicht beschleunigte, relativ zueinander mit konstanter Geschwindigkeit sich bewegende Bezugssysteme werden *Inertialsysteme* genannt. Ist die Relativgeschwindigkeit v der beiden Inertialsysteme klein, so kann die *Galilei-Transformation* verwendet werden. Bei großer Relativgeschwindigkeit ist die *Lorentz-Transformation* zu benutzen.

2.3.1 Galilei-Transformation

Die Galilei-Transformation drückt das Relativitätsprinzip der klassischen Mechanik aus. Sie ist gültig, wenn für die Relativgeschwindigkeit $v = (v_x, v_y, v_z)$ der beiden Bezugssysteme S und S' gilt: $v \ll c_0$ (c_0 Vakuumlichtgeschwindigkeit).



<http://www.springer.com/978-3-642-41127-4>

Das Ingenieurwissen: Physik

Niedrig, H.; Sternberg, M.

2014, X, 289 S. 370 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-642-41127-4