

# Kapitel 1

## Einführung

### 1.1 Einordnung des Elektromagnetismus

Wie die Mechanik und die Thermodynamik (= Wärmelehre) stellt auch die Elektrizitätslehre eine Domäne (= Teilgebiet) der Physik dar. Diese ist die umfassendste der Naturwissenschaften und verfolgt das Ziel, Erscheinungen und Vorgänge in der Natur

- systematisch zu beobachten (Naturbeobachtung),
- zu messen (Quantifizierung),
- allgemein gültige Gesetzmäßigkeiten zu erkennen und
- diese mathematisch zu beschreiben.

Zu den wichtigsten Leistungen der Physik zählen,

- dass ihre Experimente reproduzierbare Ergebnisse liefern, und
- dass ihre Theorien hohe Erklärungs- und Vorhersagekraft besitzen.

Weil alle physikalischen Theorien auf Erfahrungstatsachen beruhen, sind sie im Unterschied zu mathematischen Sätzen nicht allgemein beweisbar. Sie können jedoch experimentell widerlegt werden. Weiterhin beinhalten physikalische Theorien oftmals Idealisierungen, die ihren Geltungsbereich einschränken. Allgemein anerkannte und bewährte Theorien werden als physikalische Gesetze bezeichnet.

### 1.2 Physikalische Größen

Als physikalische Größen bezeichnet man jene Eigenschaften der Natur, die der physikalischen Methodik zugänglich sind. In Formeln kürzt man sie durch Buchstaben ab, für die es unverbindliche Konventionen gibt. Dennoch sollten, um Missverständnisse auszuschließen, in jeder wissenschaftlichen Arbeit alle Symbole vor ihrer ersten Verwendung ausdrücklich eingeführt werden.

*Beispiel* 1.2.1. Auszug aus einem fiktiven Aufsatz:

„Wir bezeichnen die Länge mit  $l$ , die Zeit mit  $t$ , den Druck mit  $p$ , die Temperatur mit  $T$  und die elektrische Ladung mit  $Q$ .“

### 1.2.1 Messen

Die Lehre vom Messen heißt *Metrologie*. Das Messen einer physikalischen Größe geschieht durch Vergleich einer unbekanntem Menge mit einer definierten Maßeinheit. Somit werden physikalische Größen durch ein Produkt von *Zahlenwert* und *Maßeinheit* quantifiziert. Für diese sind die Operatoren  $\{\cdot\}$  und  $[\cdot]$  gebräuchlich:

$$\{x\} := \text{Zahlenwert der physikalischen Größe } x, \quad (1.2.1a)$$

$$[x] := \text{Maßeinheit der physikalischen Größe } x. \quad (1.2.1b)$$

Daher gilt allgemein

$$x = \{x\}[x]. \quad (1.2.2)$$

Für Maßeinheiten gibt es standardisierte Kürzel, die üblicherweise nicht kursiv dargestellt werden.

*Beispiel* 1.2.2. Einen Sportwettkampf gewinnt, wer eine vorgegebene Weglänge  $l$  in der kürzesten Zeit  $t$  zurücklegt. Man misst:

$$\text{Weg} = 100 \text{ Meter}, \quad \text{Zeit} = 9.58 \text{ Sekunden} \quad (1.2.3)$$

$$l = 100 \text{ m}, \quad t = 9.58 \text{ s}, \quad (1.2.4)$$

$$\{l\} = 100, \quad \{t\} = 9.58, \quad (1.2.5)$$

$$[l] = \text{m}, \quad [t] = \text{s}. \quad (1.2.6)$$

Durch *Größengleichungen* lassen sich physikalische Zusammenhänge mathematisch formulieren und neuartige physikalische Größen einführen.

Im Falle einer gleichförmigen geradlinigen Bewegung ist die Geschwindigkeit  $\vec{v}$  definiert als der zurückgelegte Weg  $\vec{l}$  bezogen auf die benötigte Zeit  $t$ :

$$\vec{v} := \frac{\vec{l}}{t}. \quad (1.2.7)$$

Durch Einsetzen von (1.2.2) folgt

$$\vec{v} := \frac{\vec{l}}{t} = \frac{\{\vec{l}\} [\vec{l}]}{\{t\} [t]} = \frac{\{\vec{l}\}}{\{t\}} \frac{\text{m}}{\text{s}}. \quad (1.2.8)$$

Man erkennt, dass sich die Einheit der Geschwindigkeit aus jenen für Länge und Zeit ableitet. Jene Einheiten, die nicht aus anderen ableitbar sind, heißen Basiseinheiten. Welchen physikalischen Größen Basiseinheiten beziehungsweise abgeleitete Einheiten zugeordnet sind, hängt vom verwendeten Einheitensystem ab. Für viele abgeleitete Einheiten sind eigene Namen gebräuchlich.

*Beispiel 1.2.3* (Einheit der Kraft: Newton (N)).  $1 \text{ N} = 1 \text{ kg m} / \text{s}^2$ .

Weil in Größengleichungen die jeweiligen Einheiten ausdrücklich angegeben werden, sollten Unklarheiten der Art

„Ist die Länge in Meter oder Kilometer einzusetzen?“

nicht auftreten. Weiterhin ermöglichen sie in mathematischen Herleitungen einfache Plausibilitätsprüfungen: Stimmt im Ergebnis die Einheit nicht, so muss etwas falsch sein.

In der Praxis werden auch einfache *Zahlenwertgleichungen* verwendet, wobei die zugrunde gelegten Einheiten häufig auf die Anwendung zugeschnitten sind. Im Fall von (1.2.8) erhält man

$$\{\vec{v}\} := \frac{\{\vec{l}\}}{\{t\}}. \quad (1.2.9)$$

Der Nachteil ist, dass die verwendeten Einheiten nicht ersichtlich sind. Daher sind Zahlenwertgleichungen schwer zu überprüfen, und ihre Anwendung ist fehleranfällig. Sie sollten im wissenschaftlichen Bereich nicht benutzt werden.

*Beispiel 1.2.4* (Zahlenwertgleichung für die Geschwindigkeit).

$$v = 3.6 \frac{l}{t}. \quad (1.2.10)$$

Hierin bezeichnet  $v$  den skalaren Zahlenwert der Weglänge in m und  $t$  den Zahlenwert für die Zeit in Sekunden. Das Ergebnis  $v$  ist der skalare Zahlenwert für den Betrag der Geschwindigkeit in km/h. Wie in (1.2.10) angedeutet, ist in der Praxis eine Kennzeichnung, dass es sich um Zahlenwerte handelt, nicht üblich.

## 1.2.2 Das Internationale Einheitensystem

In der Europäischen Union ist im amtlichen und geschäftlichen Verkehr das *Internationale Einheitensystem* (*SI-System*; fr. *système international d'unités*) gesetzlich vorgeschrieben. Es hat bis zum 20.05.2019 auf den in Tab. 1.2.1 zusammengestellten Basisgrößen und Basiseinheiten beruht [1].

Allerdings erfolgt die Festlegung der Basiseinheiten per Konvention unter der Zielsetzung, Unsicherheiten zu minimieren. Sie unterliegt daher dem Stand der Messtechnik im Wandel der Zeit. Aktuell werden die früheren Basiseinheiten von den Naturkonstanten in Tab. 1.2.2 abgeleitet [2] [3]:

**Definition 1.2.1** (Sekunde). Die Sekunde (s) ist die SI-Einheit der Zeit. Sie ist über die Cäsiumfrequenz  $\Delta\nu_{Cs}$  definiert, das ist die Frequenz des ungestörten Hyperfeinübergangs des Grundzustands des Cäsium-Nuklids  $^{133}\text{Cs}$ . Man legt fest:

$$\Delta\nu_{Cs} := 9192631770/\text{s}. \quad (1.2.11)$$

Tabelle 1.2.1: Basisgrößen und -einheiten des SI-Systems bis zum 20.05.2019

Größe	Zeichen	Basiseinheit	Zeichen
Länge	l	der Meter	m
Masse	m	das Kilogramm	kg
Zeit	t	die Sekunde	s
elektrischer Strom	I	das Ampere	A
Temperatur	T	das Kelvin	K
Lichtstärke	$I_v$	die Candela	cd
Stoffmenge	n	das Mol	mol

Tabelle 1.2.2: Naturkonstanten

Cäsiumfrequenz	$\Delta\nu_{Cs}$	9 192 631 770	$s^{-1}$
Vakuum-Lichtgeschwindigkeit	$c$	299 792 458	m / s
Planck-Konstante	$h$	$6.62\ 070\ 15 \cdot 10^{-34}$	$kg\ m^2\ s^{-1}$
Elementarladung	$e$	$1.602\ 176\ 634 \cdot 10^{-19}$	A s
Boltzmann-Konstante	$k$	$1.380\ 649 \cdot 10^{-23}$	$kg\ m^2\ s^{-2}\ K^{-1}$
Avogadro-Konstante	$N_A$	$6.022\ 140\ 76 \cdot 10^{23}$	$mol^{-1}$
Photometr. Strahlungsäquiv.	$K_{cd}$	681	lm / W

**Definition 1.2.2** (Meter). Der Meter (m) ist die SI-Einheit der Länge. Er ist über die Lichtgeschwindigkeit in Vakuum  $c$  definiert. Man legt fest:

$$c := 299\ 792\ 458\ \text{m/s.} \quad (1.2.12)$$

**Definition 1.2.3** (Kilogramm). Das Kilogramm (kg) ist die SI-Einheit der Masse. Es ist über die Planck-Konstante  $h$  definiert. Man legt fest:

$$h := 6.626\ 070\ 15 \times 10^{-34}\ \text{kg}\ \text{m}^2/\text{s.} \quad (1.2.13)$$

Alt: ... ist die Masse des internationalen Kilogrammprototyps, der im Internationalen Büro für Maß und Gewicht (BIPM) (*fr. Bureau International des Poids et Mesures*) in der französischen Stadt Sèvres aufbewahrt wird.

**Definition 1.2.4** (Ampere). Das Ampere (A) ist die SI-Einheit der elektrischen Stromstärke. Es ist über die Elementarladung  $e$  definiert, das ist der Betrag der Ladung des Elektrons. Man legt fest:

$$e := 1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19}\ \text{As.} \quad (1.2.14)$$

Alt: ... ist die Stärke eines zeitlich unveränderlichen elektrischen Stromes, der durch zwei im Vakuum parallel im Abstand 1 Meter voneinander angeordnete, geradlinige, unendlich lange Leiter von vernachlässigbar kleinem, kreisförmigem Querschnitt fließend, zwischen diesen Leitern je 1 Meter Leiterlänge elektrodynamisch die Kraft  $2 \cdot 10^{-7}$  Newton hervorrufen würde.

Tabelle 1.2.3: Längenskala

	Typische Länge		
Durchmesser Atomkern	$(1 \dots 10) \cdot 10^{-15}$ m	1 ... 10	fm
Durchmesser Atom	$100 \cdot 10^{-12}$ m	100	pm
Strukturen Halbleiterelektronik	$> 10 \cdot 10^{-9}$ m	$> 10$	nm
Wellenlänge sichtbares Licht	$(380 \dots 750) \cdot 10^{-9}$ m	380 ... 750	nm
Durchmesser menschliches Haar	$(40 \dots 120) \cdot 10^{-6}$ m	40 ... 120	$\mu$ m
mittlerer Erddurchmesser	$12.7 \cdot 10^6$ m	12.7	Mm
Bahnradius geostationärer Satellit	$35.8 \cdot 10^6$ m	35.8	Mm
mittlerer Abstand Mond – Erde	$384 \cdot 10^6$ m	384	Mm
größter Abstand Erde – Sonne	$152 \cdot 10^9$ m	152	Gm
Abstand Erde – Alpha Centauri	$40 \cdot 10^{15}$ m	140	Pm
Durchmesser Milchstraße	$(1.6 \dots 1.9) \cdot 10^{21}$ m	1.6 ... 1.9	Zm

Tabelle 1.2.4: SI-Vorsätze

Name	Zeichen	Potenz	Name	Zeichen	Potenz
Deka	da	$10^1$	Dezi	d	$10^{-1}$
Hekto	h	$10^2$	Zenti	c	$10^{-2}$
Kilo	k	$10^3$	Milli	m	$10^{-3}$
Mega	M	$10^6$	Mikro	$\mu$	$10^{-6}$
Giga	G	$10^9$	Nano	n	$10^{-9}$
Tera	T	$10^{12}$	Pico	p	$10^{-12}$
Peta	P	$10^{15}$	Femto	f	$10^{-15}$
Exa	E	$10^{18}$	Atto	a	$10^{-18}$
Zetta	Z	$10^{21}$	Zepto	z	$10^{-21}$

Die Festlegung der Maße ist ein nationales Hoheitsrecht. Das nationale Metrologieinstitut der Bundesrepublik Deutschland ist die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB). Sie veröffentlicht die gesetzlichen Einheiten, und ihr obliegt die Maßverkörperung durch nationale Normale. Die entsprechende Behörde der U.S.A. ist das National Institute of Standards and Technology (NIST).

Abhängig vom betrachteten Objekt können Maßzahlen über viele Größenordnungen hinweg variieren. Dies verdeutlicht die Längenskala in Tab. 1.2.3. Zur einfacheren Darstellung dienen Dezimalvorsätze, die zusammen mit ihren Abkürzungen gesetzlich festgelegt worden sind. Eine Auswahl ist in Tab. 1.2.4 dargestellt. Man erkennt, dass als Vorsatz für *Mikro-* der griechische Kleinbuchstabe  $\mu$  Verwendung findet. In Tabelle 1.2.5 sind alle griechischen Buchstaben zusammengefasst.

Tabelle 1.2.5: Griechische Buchstaben

Groß	Klein	Bezeichnung	Groß	Klein	Bezeichnung
A	$\alpha$	Alpha	N	$\nu$	Ny
B	$\beta$	Beta	$\Xi$	$\xi$	Xi
$\Gamma$	$\gamma$	Gamma	O	o	Omikron
$\Delta$	$\delta$	Delta	$\Pi$	$\pi, \varpi$	Pi
E	$\epsilon, \varepsilon$	Epsilon	P	$\rho, \varrho$	Rho
Z	$\zeta$	Zeta	$\Sigma$	$\sigma, \varsigma$	Sigma
H	$\eta$	Eta	T	$\tau$	Tau
$\Theta$	$\theta, \vartheta$	Theta	Y	$\upsilon$	Ypsilon
I	$\iota$	Iota	$\Phi$	$\phi, \varphi$	Phi
K	$\kappa, \varkappa$	Kappa	X	$\chi$	Chi
$\Lambda$	$\lambda$	Lambda	$\Psi$	$\psi$	Psi
M	$\mu$	My	$\Omega$	$\omega$	Omega