

Elektrische Grössen, Einheiten und Einheitssysteme

Autor(en): **Feller, Ulrich**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **91 (2000)**

Heft 3

PDF erstellt am: **13.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-855525>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Elektrische Grössen, Einheiten und Einheitensysteme

Welche Erkenntnisse liegen den elektrischen Einheiten zugrunde, und wie sind diese im internationalen Einheitensystem festgelegt? Erläuterungen zu diesen Themen sind auch heute, fünfzig Jahre nach Billigung der Amperedefinition, noch aktuell. Die Erfahrung zeigt, dass Sinn und Zweck der Amperedefinition, wie sie ursprünglich formuliert wurden, in vielen Darstellungen nicht wiedergegeben werden. Dies erschwert das Verständnis der elektrischen Einheiten unnötigerweise.

In [1] wurde über Grössen, Einheiten und allgemeine Prinzipien zur Konstruktion eines Einheitensystems berichtet. Eine wichtige Rolle spielen die Konventionalfestlegungen. Es wurde gezeigt, dass die mechanischen Grössen im Système International d'Unités (SI) heute durch je eine Konventionalfestlegung für die Masseneinheit, die Lichtgeschwin-

ser Fragestellungen sollen kurz die wichtigsten Erkenntnisse des Elektromagnetismus in Erinnerung gerufen werden.

Coulombsches und amperesches Gesetz

Die Beobachtungen von Gilbert, Volta, Oersted und vielen anderen Naturforschern zeigten, dass es Erscheinungen in der Natur gibt, die mit den mechanischen Grössen nicht beschrieben werden können. Sie mussten zur Erklärung ihrer Beobachtungen neue Konzepte einführen, die wir heute mit Begriffen wie Ladung, Stromstärke usw. bezeichnen. Ladungen können erzeugt und mit Elektrometern gemessen werden. Man stellt fest, dass geladene Körper aufeinander

Kräfte ausüben und dass es zwei verschiedene Arten der Ladung gibt: Gleichartige Ladungen stossen sich ab, ungleichartige ziehen sich an. Die Beobachtungen können im coulombschen Gesetz zusammengefasst werden. Da die Ladungseinheit noch nicht festgelegt ist, muss eine später festzulegende Konstante k_1 eingefügt werden (Bild 1).

Die Naturforscher waren bald in der Lage, so etwas wie «Elektrisiermaschinen» zu bauen, mit denen in Metallen ein stetiger Strom von Ladungen erzeugt werden kann, sowie Strommesser, mit denen man feststellen kann, in welchem Verhältnis die Stromstärken in verschiedenen Leiterkreisen stehen. Diese stromführenden Leiter sind selber *nicht* geladen. Die Kräfte sind also nicht elektrostatischer Natur und rühren einzig von der Bewegung der Ladungen her. Die Beobachtungen konnten in allgemeiner Form schliesslich im ampereschen Gesetz zusammengefasst werden. Da die Einheit der Stromstärke noch nicht festgelegt ist, muss das Gesetz mit einer später festzulegenden Konstanten k_2 geschrieben werden (Bild 1).

Bemerkenswert ist, dass beide Gesetze in der angegebenen Form nicht Bezug auf besondere Einheiten nehmen. Sie geben einzig die funktionalen Abhängigkeiten zwischen den beteiligten Grössen wieder. Jeder Forscher könnte entsprechende Beobachtungen mit diesen Gesetzen beschreiben. Er hätte lediglich die Konstan-

Adresse des Autors

Dr. Ulrich Feller, Eidgenössisches Amt für Messwesen, 3084 Wabern
ulrich.feller@eam.admin.ch

digkeit und die Periode einer bestimmten Strahlung des Cäsiumatoms quantitativ festgelegt sind. In diesem Artikel wird auf die elektrischen Einheiten näher eingegangen. Fünfzig Jahre nach der Billigung der Amperedefinition durch die Conférence Générale des Poids et Mesures [2] ist dieses Thema immer noch aktuell, weil Sinn und Zweck der Amperedefinition, wie sie ursprünglich vom Comité International des Poids et Mesures (CIPM) [3] formuliert wurden, in vielen Lehrbüchern und im Unterricht nicht wiedergegeben werden. Dies erschwert das Verständnis der elektrischen Einheiten unnötigerweise. Heute stellt sich auch die Frage nach der Bedeutung des Josephson- und des Quantenhalleffektes im SI. Einerseits ist die bekannte Amperedefinition immer noch gültig. Andererseits werden heute elektrische Einheiten weltweit mit den erwähnten Quanteneffekten dargestellt. Ist das nicht ein Widerspruch? Für die Besprechung die-

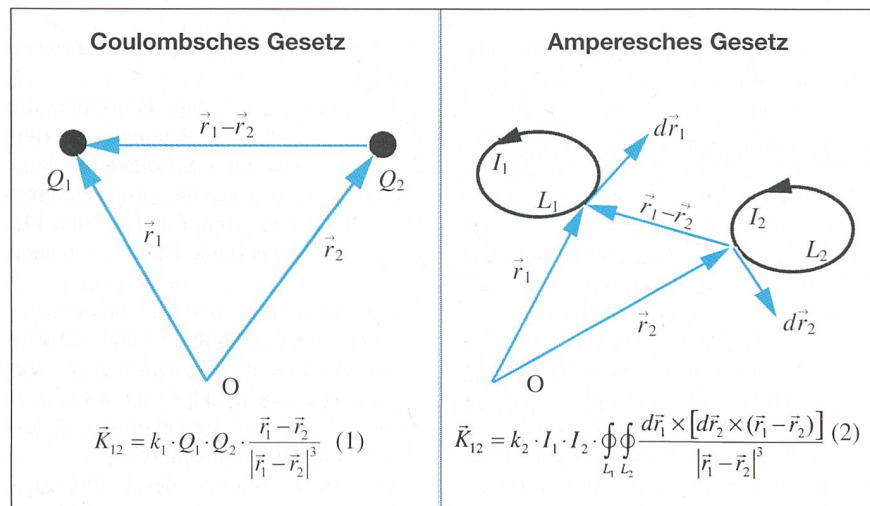


Bild 1 Kräfte zwischen ruhenden Punktladungen und elektrisch neutralen Stromschleifen

System	k_1	k_2	k_3	α
Elektrostatisch	1	c^{-2}	1	1
Elektromagnetisch	c^2	1	1	1
Gauss	1	c^{-2}	c^{-1}	c
Heaviside-Lorentz	$\frac{1}{4\pi}$	$\frac{1}{4\pi^2 c^2}$	c^{-1}	c
SI	$10^{-7} c^2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$	$10^{-7} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\frac{N}{A^2} \right]$	1	1

Tabelle I Das Einheitensystem wird mit der Wahl der Konstanten in den Maxwellgleichungen (5) bis (8) festgelegt.

Definierende Gleichung	SI-Einheit	CGS-Einheit el.-magn.	CGS-Einheit el.-magn. a: $g^{1/2} \cdot cm^{1/2} \cdot s^{-1}$
$I_{SI} : F/L = \mu_{0,SI} I'_{SI} / (2\pi d)$	A		
$I_m : F/L = 2 I'_m / d$		$g^{1/2} \cdot cm^{1/2} \cdot s^{-1}$	a
$\mu_{0,SI} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{N}{A^2}, \mu_{0,m} = 1$	$kg \cdot m \cdot A^{-2} \cdot s^{-2}$	1	$g \cdot cm \cdot a^{-2} \cdot s^{-2}$
$\epsilon_{0,SI} = 1/\mu_{0,SI} c^2, \epsilon_{0,m} = 1/c^2$	$A^2 \cdot s^4 \cdot kg^{-1} \cdot m^{-3}$	$s^2 \cdot cm^{-2}$	$a^2 \cdot s^4 \cdot g^{-1} \cdot cm^{-3}$
$Q = \int Idt$	A·s	$g^{1/2} \cdot cm^{1/2}$	a·s
$U = W/Q$	$kg \cdot m^2 \cdot A^{-1} \cdot s^{-3}$	$g^{1/2} \cdot cm^{3/2} \cdot s^{-2}$	$g \cdot cm^2 \cdot a^{-1} \cdot s^{-3}$
$\vec{E} = \vec{F}/Q$	$kg \cdot m \cdot A^{-1} \cdot s^{-3}$	$g^{1/2} \cdot cm^{1/2} \cdot s^{-2}$	$g \cdot cm \cdot a^{-1} \cdot s^{-3}$
$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}$	$A \cdot s \cdot m^{-2}$	$g^{1/2} \cdot cm^{-3/2}$	$a \cdot s \cdot cm^{-2}$
$\vec{B} : d\vec{F} = I(d\vec{s} \times \vec{B})$	$kg \cdot A^{-1} \cdot s^{-2}$	$g^{1/2} \cdot cm^{-1/2} \cdot s^{-1}$	$g \cdot a^{-1} \cdot s^{-2}$
$\vec{H} = \vec{B}/\mu_0$	$A \cdot m^{-1}$	$g^{1/2} \cdot cm^{-1/2} \cdot s^{-1}$	$a \cdot cm^{-1}$
$\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{S}$	$kg \cdot m^2 \cdot A^{-1} \cdot s^{-2}$	$g^{1/2} \cdot cm^{3/2} \cdot s^{-1}$	$g \cdot cm^2 \cdot a^{-1} \cdot s^{-2}$
$R = U/I$	$kg \cdot m^2 \cdot A^{-2} \cdot s^{-3}$	$cm \cdot s^{-1}$	$g \cdot cm^2 \cdot a^{-2} \cdot s^{-3}$
$C = Q/U$	$A^2 \cdot s^4 \cdot kg^{-1} \cdot m^{-2}$	$s^2 \cdot cm^{-1}$	$a^2 \cdot s^4 \cdot g^{-1} \cdot cm^{-2}$
$L : U = L \cdot \dot{I}$	$kg \cdot m^2 \cdot A^{-2} \cdot s^{-2}$	cm	$g \cdot cm^2 \cdot a^{-2} \cdot s^{-2}$

Tabelle II Das internationale Einheitensystem SI und das elektromagnetische CGS-System sind bis auf die Zehnerpotenzen identisch, wenn $g^{1/2} \cdot cm^{1/2} \cdot s^{-1}$ durch a (in Analogie zu A im SI) substituiert wird.

ten k_1 und k_2 entsprechend den verwendeten «Laboreinheiten» anzupassen.

Maxwellsche Gleichungen

Das coulombsche und das amperesche Gesetz fassen viele Erkenntnisse, die beim Experimentieren mit elektrischen Ladungen und Strömen in Abwesenheit polarisierbarer und magnetisierbarer Materie gewonnen werden können, bereits zusammen. Mit Hilfe einiger weiterer grundlegender Erkenntnisse auf dem Gebiete des Elektromagnetismus konnte Maxwell schliesslich mit rein mathematischen Methoden die berühmten, nach ihm benannten Gleichungen herleiten, mit denen die elektromagnetischen Na-

turscheinungen vollständig beschrieben werden.

Die Naturgesetze und Konzepte, die den maxwellschen Gleichungen zugrunde liegen, werden im Folgenden kurz skizziert, gestützt auf die ausgezeichnete Darstellung von Stumpf und Schuler [4]. Eine gute Darstellung findet sich auch in [5].

1. Ausgangspunkt sind die beiden Gesetze von Coulomb (1) und Ampere (2). Beide sind Fernwirkungsgesetze: Ladung 1 wirkt auf Distanz auf Ladung 2 ein und umgekehrt, desgleichen die beiden Stromkreise.
2. Mit der Einführung des Feldbegriffs können die nur schwer vorstellbaren Fernwirkungsgesetze in Nahwirkungs-

gesetze übergeführt werden: Ladung und Ströme sind Quellen von Feldern, welche den Raum um sie herum ausfüllen. Es sind diese Felder, die auf andere Ladungen und Ströme *am Ort der Kraftausübung* wirken. Dazu wird definiert

$$\vec{E}_2(\vec{r}_1) = k_1 \cdot Q_2 \cdot \frac{\vec{r}_1 - \vec{r}_2}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|^3} \quad (3)$$

$$\vec{B}_2(\vec{r}_1) = \alpha \cdot k_2 \cdot I_2 \cdot \oint_{L_2} \frac{d\vec{r}_2 \times (\vec{r}_1 - \vec{r}_2)}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|^3} \quad (4)$$

Da die elektrische Feldstärke und die magnetische Flussdichte möglicherweise nicht unabhängig voneinander sind, wird in der Definition von B vorerst eine später noch zu bestimmende Konstante α eingefügt. Die beiden Gesetze (1) und (2) erhalten mit diesen Definitionen die einfachere Form

$$\vec{K}_{12} = Q_1 \cdot \vec{E}_2(\vec{r}_1)$$

$$\vec{K}_{12} = \frac{I_1}{\alpha} \cdot \oint_{L_1} d\vec{r}_1 \times \vec{B}_2(\vec{r}_1)$$

3. Die Beobachtungen zeigen, dass sich die Felder einzelner Quellen (Ladungen, Ströme) in jedem Punkt des Raumes linear überlagern: Es gilt das Überlagerungsgesetz (auch Superpositionsprinzip genannt):

$$\vec{E}_i := \vec{E}(Q_i) \quad \vec{E} = \sum_i \vec{E}_i$$

$$\vec{B}_i := \vec{B}(I_i) \quad \vec{B} = \sum_i \vec{B}_i$$

4. Ladungen und Ströme können räumlich (fast) beliebig fein verteilt und zeitlich veränderlich sein. Solche Ladungs- und Stromverteilungen werden am besten mit kontinuierlichen Ladungsdichten $\rho(\vec{r}, t)$ und Stromdichten $\vec{j}(\vec{r}, t)$ beschrieben.

5. Experimente mit zeitlich variablen Magnetfeldern führen zur Entdeckung der elektromagnetischen Induktion: in elektrischen Leitern können Spannungen induziert werden. In differentieller Form lautet das Induktionsgesetz

$$\vec{\nabla} \times \vec{E}(\vec{r}, t) = -k_3 \frac{\partial \vec{B}(\vec{r}, t)}{\partial t}$$

Da bisher keine definierten Einheiten verfügbar sind, wird das Gesetz mit einer weiteren, später noch festzulegenden Konstanten k_3 versehen.

6. Genaue Beobachtungen führen auf das Gesetz der Ladungserhaltung: In einem abgegrenzten Bereich des Raumes bewirkt jeder Stromfluss durch die Grenzfläche hindurch eine entsprechende Ladungsänderung im Innern des Bereichs.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E}(\vec{r}, t) = 4\pi k_1 \rho(\vec{r}, t) \quad (5) \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{B}(\vec{r}, t) = 0 \quad (6)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E}(\vec{r}, t) = -k_3 \frac{\partial \vec{B}(\vec{r}, t)}{\partial t} \quad (7) \quad \vec{\nabla} \times \vec{B}(\vec{r}, t) = 4\pi \alpha k_2 \vec{j}(\vec{r}, t) + \frac{\alpha k_2}{k_1} \frac{\partial \vec{E}(\vec{r}, t)}{\partial t} \quad (8)$$

Gleichungen (5) bis (8) Maxwellgleichungen im Vakuum in einheitenunabhängiger Form

Ausgehend von den in den sechs Punkten aufgeführten Erkenntnissen können die maxwellschen Gleichungen (5) bis (8) auf Grund rein mathematischer Überlegungen hergeleitet werden. Da bisher nirgends Gebrauch eines speziellen Einheitensystems gemacht werden musste, sind in diesen Gleichungen noch die vier anzupassenden Konstanten k_1, k_2, k_3 und α enthalten.

Genauere Untersuchungen und Beobachtungen zeigten, dass die vier Konstanten nicht unabhängig voneinander sind. Eine einfache Dimensionsbetrachtung der beiden Gesetze (1) und (2) zeigt, dass das Verhältnis k_1/k_2 das Quadrat einer Geschwindigkeit sein muss. Präzisionsmessungen von Weber Mitte des 19. Jahrhunderts ergaben

$$\frac{k_1}{k_2} = c^2 \quad (9)$$

Untersuchungen von Hertz führten 1887 zur Entdeckung der elektromagnetischen Wellen. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit entsprach im Rahmen der damaligen Messgenauigkeit etwa der Lichtgeschwindigkeit. Das Phänomen elektromagnetischer Wellen wurde von den maxwellschen Gleichungen bereits vorweggenommen. Werden ρ und j darin null gesetzt, folgt daraus die Wellengleichung. Aus diesen Erkenntnissen lässt sich die Beziehung

$$k_3 \cdot \alpha = 1 \quad (10)$$

herleiten. Die beiden Konstanten sind nur für die Skalierung der Feldgrößen \vec{E} und \vec{B} untereinander eingeführt worden und für die Festlegung der übrigen elektrischen Größen nicht relevant.

Von den vier Konstanten sind deshalb nur zwei frei wählbar: entweder k_1 oder k_2 , und α oder k_3 .

Elektrische Einheitensysteme

Wichtig ist die Feststellung, dass zur Herleitung der Gleichungen (5) bis (8) nirgends Bezug auf ein besonderes Einheitensystem genommen werden muss. Die zur Beschreibung der elektromagnetischen Naturerscheinungen eingeführten

Größen, ihre Eigenschaften und die Gesetze, die diese Größen untereinander verbinden, sind in allen Einheitensystemen bis auf Skalierungskonstanten identisch. Dies ist logisch und einleuchtend: die Erkenntnisse über die Natur dürfen nicht davon abhängen, auf welche Art und Weise die numerischen Werte der Größen festgelegt werden.

Die verschiedenen Einheitensysteme unterscheiden sich nach der Art und Weise, wie die Konstanten festgelegt werden. Für die bekanntesten Einheitensysteme sind die Konstanten in Tabelle I angegeben. Im elektrostatischen CGS-(Centimeter/Gramm/Sekunde-)System wird die elektrische Ladung numerisch über das coulombsche Gesetz an die mechanischen Einheiten angeschlossen, indem $k_1=1$ gesetzt wird. Im elektromagnetischen CGS-System wird die Stromstärke numerisch an die mechanischen Einheiten angeschlossen, indem im ampereschen Gesetz $k_2=1$ geschrieben wird. Im gaussischen Einheitensystem haben k_1 und k_2 denselben Wert wie im elektrostatischen System, zusätzlich wird $k_3=1/c$ gesetzt. Aus dem Induktionsgesetz folgt, dass in diesem Einheitensystem \vec{E} und \vec{B} dimensionsgleich sind. Das Einheitensystem von Heaviside-Lorentz folgt dem gaussischen System, erreicht aber mit dem Faktor $1/4\pi$, dass in den maxwellschen Gleichungen π verschwindet. Einheitensysteme mit dieser Eigenschaft werden rationale Systeme genannt.

Das Internationale Einheitensystem SI ist bis auf Zehnerpotenzen identisch mit dem elektromagnetischen Einheitensystem. Zusätzlich wird aber im SI der Einheit der Stromstärke die Bezeichnung Ampere (Abkürzung: A) gegeben. Nach (2) erhält die Konstante k_2 damit die Einheit N/A^2 . Wie in [1] ausgeführt, ist die Namengebung für eine Einheit fakultativ. Ein eigener Name für die Einheit der Stromstärke ist aber insofern sinnvoll, als zur Festlegung der elektrischen Einheiten eine zusätzliche Konventionalfestlegung [1] nötig ist. Im SI wird dies durch Festlegung von k_2 erreicht. In allen hier besprochenen Einheitensystemen werden die elektrischen Einheiten mit der Festlegung der Konstanten k_1 oder k_2 an die mechanischen Einheiten angeschlossen.

Diese Situation ist heute unbefriedigend, weil damit die Unsicherheit von mechanischen Messungen und die unbekanntene Stabilität des Kilogramm-Prototyps [6] auf die elektrischen Einheiten übertragen werden. Diese Abhängigkeit könnte man vermeiden, wenn beispielsweise die elektrische Ladung des Elektrons mit einer Konventionalfestlegung fixiert würde. Da sich der Elektromagnetismus mit der Beobachtung neuartiger Kräfte historisch aus der Mechanik heraus entwickelt hat, ist es jedoch verständlich, dass die elektrischen Einheitensysteme auf die Kraftgesetze aufbauen.

In der Literatur wird im Zusammenhang mit den CGS-Systemen gelegentlich noch von dreidimensionalen Systemen, im Zusammenhang mit den elektromechanischen Einheiten des SI (MKSA) von einem vierdimensionalen Einheitensystem gesprochen [7]. Solche Aussagen sollten vermieden werden, da sie die Gefahr in sich bergen, eine dahinterliegende mathematische Struktur mit der entsprechenden Dimension zu suggerieren. Wie aus obigen Ausführungen hervorgeht, kann es eine solche Struktur nicht geben. Alle Einheitensysteme beruhen auf vier Konventionalfestlegungen, und zwar unabhängig davon, ob eine oder mehrere elektrische Einheiten einen eigenen Namen haben. Nach Festlegung einer der beiden Konstanten k_1 oder k_2 können alle weiteren Einheiten mit Hilfe der bekannten Gesetze des Elektromagnetismus abgeleitet werden (Tabelle II).

Amperedefinition

Es stellt sich die Frage, was die heutige Amperedefinition (Bild 2) mit der hier gegebenen Darstellung der elektrischen Einheiten zu tun hat. Der Zusammenhang wird klar, wenn das amperesche Gesetz (2) auf den Spezialfall zweier gerader,

« Das Ampere 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 Meter Leiterlänge die Kraft $2 \cdot 10^{-7}$ Newton hervorrufen würde. »

Bild 2 Amperedefinition im internationalen Einheitensystem (SI)

paralleler Drähte angewendet wird. Für diesen Fall nimmt (2) die einfache Form

$$\frac{F}{L} = \mu_0 \frac{I_1 \cdot I_2}{2\pi d} \quad (11)$$

an. Werden darin die Werte aus der Amperedefinition eingesetzt, ergibt sich der bekannte Wert von μ_0 . Die Amperedefinition gibt zwei Informationen weiter:

1. Die Einheit der Stromstärke trägt die Bezeichnung Ampere.
2. Der im ampereschen Gesetz festzulegenden Konstante wird ein Wert zugewiesen.

Leider wird in den meisten Zitaten der Amperedefinition verschwiegen, dass die Definition lediglich zur Festlegung von μ_0 dient und keinesfalls ein Vorschlag zur Realisierung der Stromstärkeeinheit sein soll, wozu die Definition auch denkbar ungeeignet wäre. In [3], S. 133, ist zur Definition der elektrischen Einheiten folgendes zu lesen: *«Les définitions données ... ont pour unique objet de fixer la grandeur des unités, et non les méthodes à suivre pour leur réalisation pratique. Cette réalisation s'effectue en accord avec les lois bien connues de l'électromagnétisme. Par exemple, la définition de l'ampère représente uniquement un cas particulier de la formule générale exprimant les forces qui s'exercent entre des conducteurs parcourus par des courants électriques, choisie pour la simplicité de son expression verbale. Elle sert à fixer la constante dans la formule générale qui doit être utilisée pour la réalisation de l'unité.»*

Didaktisch ist diese implizite Art der Einheitendefinition problematisch, da der Sinn einer solchen Definitionsweise nicht auf der Hand liegt. So sucht man denn auch in neuesten Publikationen aus Metrologiekreisen zum SI μ_0 vergeblich, obwohl diese Konstante zur Festlegung der elektrischen Einheiten entscheidend ist [8]!

Wie erwähnt unterscheiden sich das SI und das elektromagnetische Einheitensystem einzig um Potenzen von 10. Die formale Äquivalenz beider Systeme wird erzielt, wenn analog zum SI der Stromeinheit ein eigener Name gegeben wird. In Analogie zum Ampere wird dafür die Bezeichnung a gewählt, also $a = g^{1/2} \cdot cm^{1/2} \cdot s^{-1}$. Mit dieser Substitution verschwinden alle ungeraden Potenzen des CGS-Systems. Kolonne 4 in Tabelle II zeigt die formale Äquivalenz zu Kolonne 2, also den SI-Einheiten. Damit ist noch einmal gezeigt, dass die verschiedenen Einheitensysteme gleichwertig sind und die zitierte Verschiedenartigkeit des SI von den

anderen Einheitensystemen, was ihre Dimension betrifft, jeglicher mathematischer Grundlage entbehrt.

Unter Bezugnahme auf die Feststellungen in [1] kann festgehalten werden, dass die mechanischen und die elektromagnetischen Grössen im SI quantitativ durch vier Konventionalfestlegungen bestimmt sind. Es betrifft dies den Prototyp des Kilogramms, die Periode eines genau bestimmten Cäsium-Strahlungsüberganges, die Lichtgeschwindigkeit und die magnetische Feldkonstante. Die Werte dieser Grössenrealisierungen sind per Konvention festgelegt und deshalb exakt. Alle anderen Werte der mechanischen und der elektromagnetischen Grössen werden von diesen vier Festlegungen abgeleitet und sind mit einer Unsicherheit behaftet, mit Ausnahme der elektrischen Feldkonstante, die eine Kombination von c und μ_0 ist.

Bedeutung des Josephson- und des Quantenhalfeffektes für die Einheitenfestlegung

Mit dem Josephson- und dem Quantenhalfeffekt können Spannungs- und Widerstandsmessungen heute routinemässig mit einer relativen Reproduzierbarkeit von einigen 10^{-9} durchgeführt werden [9,10]. Mechanische Messungen haben dagegen eine etwa hundertmal schlechtere Reproduzierbarkeit. Da die Josephsonkonstante $K_J = h/2e$ und die von-Klitzing-Konstante $R_K = h/e^2$ im SI von mechanischen Messungen abhängen, können Spannungs- und Widerstandsmessungen nicht mit einer kleineren Messunsicherheit durchgeführt werden, als es diese mechanischen Messungen erlauben. Der zurzeit beste Wert, der für

Spannungs- und Widerstandskalibrationen seit dem 1. Januar 1990 weltweit verwendet und mit dem Suffix «90» gekennzeichnet wird, beträgt für die Josephsonkonstante

$$K_{J-90} = 483\,597,9(1 \pm 4 \cdot 10^{-7}) \text{GHz/V}$$

und für die von-Klitzing-Konstante

$$R_{K-90} = 25\,812,807(1 \pm 2 \cdot 10^{-7}) \Omega$$

Die Unsicherheit dieser Konstanten stellt heute den weitaus grössten Anteil der Messunsicherheit bei Spannungs- und Widerstandskalibrationen mit Josephson- und Quantenhalssystemen dar.

Zum Festlegen der Einheiten im SI sind die beiden Effekte theoretisch ohne Bedeutung. Sie kommen in den Einheitendefinitionen nicht vor. Da sie aber eine Reproduzierbarkeit erlauben, die etwa hundertmal besser ist als ihre Unsicherheit im SI, können elektrische Messungen, die auf Josephson- oder Quantenhalskalibrationen rückverfolgbar sind, heute weit unter ihrer Messunsicherheit miteinander verglichen werden.

Es muss aber mit allem Nachdruck darauf hingewiesen werden, dass es – wie bei allen Messungen – nicht zulässig ist, in K_{J-90} und R_{K-90} die Messunsicherheit zu unterschlagen. Wir hätten es sonst mit Konventionalfestlegungen zu tun, die logisch mit den das SI definierenden Konventionalfestlegungen inkompatibel wären.

Die künstliche Verschlechterung einer grossen Zahl elektrischer und atomarer Messungen durch eine Einheitenfestlegung, die auf ein Naturverständnis zurückgeht, das über hundert Jahre zurückreicht, ist natürlich unbefriedigend. Der Weg für eine Verbesserung der Situation ist heute vorgezeichnet: Erstens

Grandeurs et unités électriques

Quelles connaissances sont à la base des unités électriques, et comment sont-ils définies dans le cadre du système international des unités? Des explications sur ces thèmes restent encore aujourd'hui d'actualité, cinquante ans après l'approbation de la définition de l'ampère. L'expérience montre que la finalité de la définition de l'ampère, telle que formulée à l'origine, ne se retrouve pas toujours. Cela complique inutilement la juste compréhension des unités électriques.

müsste der Kilogramm-Prototyp durch etwas Fundamentaleres ersetzt werden. Hierzu drängt sich die Festlegung des planckschen Wirkungsquantums h auf, das in Theorie und Messung eine fundamentale Stellung einnimmt. Mit Hilfe des Watt-Experimentes [6] könnte die Masseneinheit dann abgeleitet werden. Zweitens sollten die elektrischen Einheiten nicht mit einem Kraftgesetz auf mechanische Einheiten zurückgeführt werden. Dazu gibt es mehrere Möglichkeiten. Man könnte entweder der Elektronenladung e , der Josephsonkonstanten K_J oder der von-Klitzing-Konstanten R_K einen festen Wert zuordnen. Diese drei Möglichkeiten sind äquivalent, da alle drei

Konstanten bei bekanntem h ineinander umgerechnet werden können. Bei einer solchen Festlegung müsste die Konventionalfestlegung von μ_0 , also die heutige Ampere-Definition, fallengelassen werden.

*

Nachdruck mit freundlicher Genehmigung des Eidgenössischen Amtes für Messwesen.

Literatur

- [1] U. Feller: Über Grössen, Einheiten und Einheitensysteme. Ofmet-Info 5(1998)1.
 [2] Conférence générale des poids et mesures (CGPM), Comptes rendus de la 9^e session, p. 46, 1948.

Bureau international des poids et mesures, Sèvres, France.

[3] Comité international des poids et mesures (CIPM), Procès-verbaux de la 46^e session, 1946. Bureau international des poids et mesures, Sèvres, France.

[4] H. Stumpf, W. Schuler: Elektrodynamik. Braunschweig: Vieweg, 1973.

[5] J. D. Jackson: Classical Electrodynamics. New York: J. Wiley & Sons, 1965.

[6] B. Jeckelmann, W. Beer: Hat das Urkilogramm ausgedient? Ofmet-Info 5(1998)2.

[7] J. de Boer: On the History of Quantity Calculus and the International System. Metrologia 31(1995)6.

[8] D. Kind, T. Quinn: Metrology, Quo Vadis. Physics Today, August 1998.

[9] U. Feller: Hochgenaue Spannungen mit dem Josephsonnormal. Ofmet-Info 1(1994)1.

[10] B. Jeckelmann, B. Jeanneret: Die Anwendung des Quantenhalleffekts in der Metrologie. Ofmet-Info 4(1997)2.

Vom Allgemeinpraktiker BKS: Kommunikationskabel, Koaxial- und Twinaxial-Kabel, Elektronik- und Steuerleitungen, Sonderleitungen, F.O.-Kabel, Anschluss-Systeme. Von der Einbaudose zum Verteilerschrank, vom Balun bis zum Gigabit Switch... Fortsetzung folgt. Verlangen Sie doch unsere Produkteübersicht.

Hertz-Fitmacher



BKS Kabel-Service AG
 Fabrikstrasse 8
 CH-4552 Derendingen
 Tel: +41 / 32-681 54 54
 Fax: +41 / 32-681 54 59

BKS Kabel-Service AG
 Chemin de la Sallaz
 CH-1400 Yverdon-les-Bains
 Tel: +41 / 24-423 94 09
 Fax: +41 / 24-423 94 10

BKS
 Plug in High-Tech!