Applied Superconductivity:

Josephson Effect and Superconducting Electronics

Manuscript to the Lectures during WS 2003/2004, WS 2005/2006, WS 2006/2007, WS 2007/2008, WS 2008/2009, and WS 2009/2010

Prof. Dr. Rudolf Gross

and

Dr. Achim Marx

Walther-Meißner-Institut
Bayerische Akademie der Wissenschaften
and
Lehrstuhl für Technische Physik (E23)
Technische Universität München

Walther-Meißner-Strasse 8
D-85748 Garching
Rudolf.Gross@wmi.badw.de

Contents

List of Figures

List of Tables

Chapter J

Physikalische Konstanten

Fundamentalkonstanten treten im Netz der physikalischen Theorien als quantitative Verknüpfungspunkte dieser Theorien auf. So ist beispielsweise die Theorie der Hohlraumstrahlung über die Planck-Konstante h mit der Quantentheorie sowie über die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit mit der Elektrodynamik und über die Boltzmann-Konstante k mit der Statistischen Mechanik verknüpft. Die Konstanten werden durch die Theorien nicht festgelegt, sie sind vielmehr experimentell so genau wie überhaupt nur möglich zu ermitteln. Denn die quantitativen Aussagen der Theorien können nur so genau sein, wie die Konstanten bekannt sind. Die möglichst genaue Kenntnis der Fundamentalkonstanten setzt aber eine möglichst genaue experimentelle Darstellung der im Internationales Einheitensystem (SI) definierten physikalischen Einheiten voraus. Dieser Sachverhalt bindet die Ermittlung der Werte der Fundamentalkonstanten eng an die Metrologie, die Wissenschaft vom genauen Messen, deren vornehmste und wichtigste Aufgabe die bestmögliche experimentelle Realisierung der definierten Einheiten ist.

Umgekehrt aber sind die Fundamentalkonstanten deshalb von besonderem Interesse für die Metrologie, weil sie selbst als ideale Einheiten dienen oder die ideale Basis für Einheiten bilden können. Schon heute werden sie zur Darstellung der SI-Einheiten herangezogen. Experimente zur Bestimmung einer Fundamentalkonstanten werden häufig direkt an metrologischen Instituten wie der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt oder zumindest in enger Zusammenarbeit mit solchen Instituten ausgeführt.

Im Jahre 1999 hat die Task Group on Fundamental Constants des *Committee on Data for Science and Technology* (CODATA) des International Council of Scientific Unions (ICSU) einen neuen Satz von Fundamentalkonstanten erstellt und ihn zur einheitlichen Verwendung in Wissenschaft und Technik empfohlen. Dessen Werte sind das Ergebnis einer multivariaten Ausgleichsrechnung und beruhen auf Daten, die bis zum 31. Dezember 1998 publiziert vorlagen. Es ist geplant, zukünftig regelmäßig alle vier Jahre eine neue Ausgleichsrechnung unter Hinzuziehung neuer Daten vorzunehmen.

Eine Auswahl der wichtigsten Fundamentalkonstanten sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst. Quelle: Peter J. Mohr und Barry N. Taylor, *CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants 1998*, *Journal of Physical and Chemical Reference Data* **28**, No. 6, (1999) und *Reviews of Modern Physics* **72**, No. 2, (2000).

Physikalische Konstante	Symbol	Wert	Einheit	rel. Fehler
universelle Konstanten				
Lichtgeschwindigkeit	c	299 792 458	m/s	exakt
Plancksche Konstante	h	$6.626\,068\,76(52)\times10^{-34}$	Js	7.8×10^{-8}
$h/2\pi$	$\hbar$	$1.054\,571\,596(82)\times10^{-34}$	Js	7.8×10^{-8}
		$6.582\,118\,89(26)\times10^{-16}$	eVs	3.9×10^{-8}
Gravitationskonstante	G	$6.673(10)\times10^{-11}$	$m^3/kg\,s^2$	
Induktionskonstante, magnetische Feldkonstante	μ_0	$4\pi\times10^{-7}$	N/A^2	exakt
Influenzkonstante, elektrische Feldkonstante, $1/\mu_0c^2$	ε_0	$8.854\,187\,817\ldots\times10^{-12}$	F/m	exakt
	$1/4\pi\varepsilon_0$	$8.987\,551\ldots\times10^{9}$	Nm^2/C^2	exakt
Vakuumimpedanz $1/\mu_0c^2$	Z_0	$376.730\,313\,461\ldots$	Ω	exakt
Planck-Masse $\sqrt{\hbar c/G}$	m_P	$2.1767(16)\times10^{-8}$	kg	7.5×10^{-4}
elektromagnetische Konstanten				
Elementarladung	e	$1.602\,176\,462(63)\times10^{-19}$	C	3.9×10^{-8}
Magnetisches Flussquant $h/2e$	Φ_0	$2.067\,833\,636(81)\times10^{-15}$	Vs	3.9×10^{-8}
von Klitzing Konstante h/e^2	R_K	$25\,812.807\,572(95)$	Ω	3.7×10^{-9}
Leitfähigkeitsquant $2e^2/h$	G_0	$7.748\,091\,696(28)\times10^{-5}$	S	3.7×10^{-9}
Josephson-Konstante $2e/h$	K_J	$483\,597.898(19)$	GHz/V	3.9×10^{-8}
Bohrsches Magneton $e\hbar/2m_e$	μ_B	$9.274\,008\,99(37)\times10^{-24}$	J/T	4.0×10^{-8}
		$5.788\,381\,749(43)\times10^{-5}$	eV/T	7.3×10^{-9}
		$1.399\,624\,624(56)\times10^{10}$	Hz/T	4.0×10^{-8}
Kernmagneton	μ_K	$5.050\,783\,17(20)\times10^{-27}$	J/T	4.0×10^{-8}
		$3.152\,451\,238(24)\times10^{-8}$	eV/T	7.6×10^{-9}
		$7.622\,593\,96(31)\times10^{6}$	Hz/T	4.0×10^{-8}
atomare und nukleare Konstanten				
Feinstrukturkonstante $e^2/4\pi\varepsilon_0\hbar c$	α	$7.297\,352\,533(27)\times10^{-3}$		3.7×10^{-9}
	$1/\alpha$	$137.036\,999\,76(83)$		3.7×10^{-9}
Ruhemasse des Elektrons	m_e	$9.109\,381\,88(72)\times10^{-31}$	kg	7.9×10^{-8}
		$5.485\,799\,110(12)\times10^{-4}$	u	2.1×10^{-9}
Ruheenergie des Elektrons	m_ec^2	$5.109\,989\,02(21)\times10^{5}$	eV	4.0×10^{-8}
Ruhemasse des Protons	m_p	$1.672\,621\,58(13)\times10^{-27}$	kg	7.9×10^{-8}

Fortsetzung auf nächster Seite

Fortsetzung von letzter Seite

Physikalische Konstante	Symbol	Wert	Einheit	rel. Fehler
		1.007 276 466 88(13)	u	1.3×10^{-10}
Ruheenergie des Protons	m_pc^2	$9.382\,719\,98(38)\times10^{8}$	eV	4.0×10^{-8}
Ruhemasse des Neutrons	m_n	$1.674\,927\,16(13)\times10^{-27}$	kg	7.9×10^{-8}
		1.008 664 915 78(55)	u	5.4×10^{-10}
Ruheenergie des Neutrons	m_nc^2	$9.395\,653\,30(38)\times10^{8}$	eV	4.0×10^{-8}
Magnetisches Moment des Elektrons	μ_e	$9.284\,763\,62(37)\times10^{-24}$	J/T	4.0×10^{-8}
	μ_e/μ_B	1.001 159 652 1869(41)		4.1×10^{-12}
Magnetisches Moment des Protons	μ_p	$1.410\,606\,633(58)\times10^{-26}$	J/T	4.1×10^{-8}
	μ_p/μ_B	1.521 032 203(15)		1.0×10^{-8}
	μ_p/μ_N	2.792 847 337(29)		1.0×10^{-8}
Massenverhältnis Proton/Elektron	m_p/m_e	1836.152 6675(39)		2.1×10^{-9}
spezifische Ladung des Elektrons	e/m_e	$1.758\,820\,174(71)\times10^{11}$	C/kg	4.0×10^{-8}
Rydberg-Konstante $\alpha^2m_ec/2h$	R_∞	10 973 731.568 549(83)	1/m	7.6×10^{-12}
		$2.179\,871\,90(17)\times10^{-18}$	J	7.8×10^{-8}
		13.605 691 72(53)	eV	3.9×10^{-8}
Bohrscher Radius $\alpha/4\pi R_\infty = 4\pi\varepsilon_0\hbar^2/m_ee^2$	a_B	$5.291\,772\,083(19)\times10^{-11}$	m	3.7×10^{-9}
Klassischer Elektronenradius α^2a_B	r_e	$2.817\,940\,285(31)\times10^{-15}$	m	1.1×10^{-8}
Compton Wellenlänge des Elektrons h/m_ec	λ_C	$2.426\,310\,215(18)\times10^{-12}$	m	7.3×10^{-9}
physikalisch-chemische Konstanten				
Loschmidtsche Zahl, Avogadro Konstante	N_A	$6.022\,141\,99(47)\times10^{23}$	1/mol	7.9×10^{-8}
Atomare Masseneinheit $\frac{1}{12}m(^{12}\mathrm{C})$	u	$1.660\,538\,73(13)\times10^{-27}$	kg	7.9×10^{-8}
Faradaysche Konstante N_Ae	F	96 485.3415(39)	C/mol	4.0×10^{-8}
Gaskonstante	R	8.314 472(15)	J/mol K	1.7×10^{-6}
Boltzmann-Konstante	k_B	$1.380\,6503(24)\times10^{-23}$	J/K	1.7×10^{-6}
Molvolumen eines idealen Gases RT/p (bei $T = 273.15$ K, $p = 101\,325$ Pa)	V_m	$22.413\,996(39)\times10^{3}$	m^3/mol	1.7×10^{-6}

Fortsetzung auf nächster Seite

Fortsetzung von letzter Seite

Physikalische Konstante	Symbol	Wert	Einheit	rel. Fehler
Tripelpunkt des Wassers	T_t	273.15	K	
	T_0	272.16	K	
		0	°C	
Stefan-Boltzmannsche Strahlungskonstante $(\pi^2/60)k_B^4/\hbar^3c^2$	σ	$5.670\,400(40) \times 10^{-8}$	W/m^2K^4	7.0×10^{-6}
Wiensche Verschiebungskonstante $b = \lambda_{max}T$	b	$2.897\,7686(51) \times 10^{-3}$	m K	1.7×10^{-6}
fundamentale physikalische Konstanten – angenommene Werte				
Normaldruck	p_0	101 325	Pa	exakt
Standard Fallbeschleunigung	g	9.806 65	m/s^2	exakt
konventioneller Wert der Josephson-Konstante	K_{J-90}	483 597.9	Hz/V	exakt
konventioneller Wert der von Klitzing-Konstante	R_{K-90}	25 812.807	Ω	exakt