
Brennstoffzellentechnik

Peter Kurzweil

Brennstoffzellentechnik

Grundlagen, Materialien, Anwendungen,
Gaserzeugung

3., überarbeitete und aktualisierte Auflage

Unter Mitarbeit von Ottmar Schmid

 Springer Vieweg

Peter Kurzweil
Technische Hochschule Amberg-Weiden
Amberg, Deutschland

ISBN 978-3-658-14934-5

ISBN 978-3-658-14935-2 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-658-14935-2

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2003, 2013, 2016

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Lektorat: Thomas Zipsner

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Strasse 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Vorwort zur 3. Auflage

Dieses Fachbuch und Nachschlagewerk in deutscher Sprache wurde in der Hochschulausbildung und der beruflichen Praxis gut aufgenommen. Die dritte, überarbeitete und erweiterte Auflage berücksichtigt Anregungen aus Leserzuschriften. Für das neue Kapitel „Kühlsystem“ und die Aktualisierung von Kapitel 4 konnte ich die fundierte Mitarbeit meines früheren Arbeitskollegen Dipl.-Ing. (FH) OTTMAR SCHMID (Daimler AG) gewinnen.

Amberg, im August 2016

Prof. Dr. PETER KURZWEIL

p.kurzweil@oth-aw.de

Aus dem Vorwort früherer Auflagen

Brennstoffzellen — welche Faszination geht von dieser Technik aus! Leidenschaft und Ideenreichtum trieb Generationen von Forschern an, die Urgewalt chemischer Energie für die Menschheit nutzbar zu machen. Die greifbare Anwendung, Strom aus fossilen und anorganischen Brennstoffen ohne Umweg über mechanische Energie zu gewinnen, scheint so nah. Doch fordernd stehen die technischen und ökonomischen Ziele für den flächendeckenden Einsatz.

Die Geschichte der Brennstoffzelle zeichnet den Weg vom ausgehenden 19. Jahrhundert über die technischen Anstrengungen während der Weltkriege bis in unsere Zeit der bemannten Raumfahrt. Brennstoffzellen treiben U-Boote und Elektrofahrzeuge, heizen Wohnräume, versorgen Raumkapseln und das Space-Shuttle mit Strom. Was ab den späten 1950er Jahren für die zeitlich begrenzte Anwendung in Orbit und Meerestiefe gedieh, konkurriert in der irdischen Alltagswelt mit robust-langlebiger Verbrennungstechnik. Die Ölkrise 1973, die Umweltgesetze der 1980er Jahre und die Golfkrise 1990 gaben kraftvolle Impulse zur Fortentwicklung. Brennstoffzellen weisen in die Zukunft der alternativen Energie- und Fahrzeugtechnik. Sie verknüpfen die überkommene Nutzung fossiler Rohstoffe mit der dringend gebotenen Erschließung nachwachsender und regenerativer Quellen, bis hin zur Stromerzeugung aus Biomasse, Altstoffen und Wohlstandsmüll.

Wie kann diese Maschine funktionieren: ohne Kolben, ohne bewegliche Teile, ohne Verbrennungsflamme, ohne CARNOT-Grenze des Wirkungsgrades? Fragen, die einer interdisziplinären Antwort harren. Dieses Buch wendet sich an Studenten und Praktiker aller Fachrichtungen. Es führt durch die spannende Welt zwischen Chemie, Physik, Verfahrenstechnik, Maschinenbau und Elektrotechnik. Denn die Brennstoffzellentechnik erfordert und vereinigt breites Wissen und fachübergreifende Fähigkeiten, damit nach 150 Jahren die frühen Erfahrungen von GROVE und OSTWALD in allgemein verfügbare Anwendungen münden.

Der übersichtliche Satzspiegel erlaubt Einsteigern und Fortgeschrittenen den raschen Wechsel zwischen erläuterndem Text und praxisnaher Zusatzinformation an den Rändern. Informative Tabellen schlagen die Brücke vom Lehrtext in die aktuelle Forschung. Die Grundlagen werden durch Rechenbeispiele ergänzt.

Inhaltsverzeichnis

I	Grundlagen	1
1	Das Prinzip der Brennstoffzelle	2
1.1	Wasserstoff-Sauerstoff-Elemente	3
1.2	Brennstoffzellentypen	5
1.3	Zellkomponenten	7
1.4	Verstromung von Flüssigbrennstoffen	9
1.5	Kohleverstromung	10
1.6	Biologische Brennstoffzellen	11
1.7	Redoxprozesse in Lösungen	12
1.8	Stationäre Brennstoffzellensysteme	13
1.9	Mobile Anwendungen	14
1.10	Stromerzeugung mit Elektrosynthese	15
2	Thermodynamik und Kinetik der Brennstoffzelle	17
2.1	Stille Verbrennung	17
2.2	Energiewandler	18
2.3	Zellspannung und Elektrodenpotential	19
2.4	Entropie und Abwärme	23
2.5	Wirkungsgrad	24
2.6	Zellspannung	26
2.7	Leistung	26
2.8	Überspannung	27
2.9	Strom-Spannungs-Kennlinie	28
2.10	Impedanzspektrum	30
2.11	Ersatzschaltbilder	32
2.12	Die Elektrodenoberfläche	33
2.13	Kinetik der Elektrodenvorgänge	35
2.14	Wasserstoffelektrode	39
2.15	Wasserstoffoxidation	40
2.16	Sauerstoffelektrode	41
2.17	Sauerstoffreduktion	42
2.18	Cyclovoltammetrie	43
2.19	Elektrokatalysatoren	45
2.20	Gasdiffusionselektroden	47
II	Technik und Anwendungen	53

3	Alkalische Brennstoffzelle (AFC)	54
3.1	Kenndaten des AFC-Systems	55
3.2	Thermodynamik der AFC	56
3.3	Alkalische Elektrolyte	57
3.4	Elektrodenmaterialien	60
3.5	Betriebsverhalten der AFC	63
3.6	Zelldesign	65
3.7	Brennstoffzellen für die Raumfahrt	66
3.8	FAE-Brennstoffzelle	67
3.9	AFC mit mobilen Elektrolyten	69
3.10	Alkalische Fallfilmzelle	72
3.11	Anwendungen	72
3.12	Ammoniak-Brennstoffzelle	73
3.13	Hydrazin-Brennstoffzelle	74
4	Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle	77
4.1	Kenndaten der PEM-Brennstoffzelle	78
4.2	Polymerelektrolyte	79
4.3	Elektrodenmaterialien	87
4.4	Betriebsverhalten	98
4.5	Anwendungen	106
4.6	Brennstoffzellenboote und -flugkörper	109
4.7	Antriebskonzepte im Vergleich	112
4.8	Brennstoffzellenkraftfahrzeuge	115
4.9	Wasserstoff aus Sekundärbrennstoffen	123
4.10	Stationäre PEM-Brennstoffzellen	126
4.11	Tragbare PEM-Brennstoffzellen	127
4.12	Kühlsystem	129
5	Direktmethanol-Brennstoffzelle (DMFC)	145
5.1	Kenndaten des DMFC-Systems	146
5.2	Thermodynamik der Direktzelle	147
5.3	Elektrodenreaktionen und -materialien	148
5.4	Betriebsverhalten der DMFC	153
5.5	Anwendungen	158
5.6	Direktverstromung von Ethern	159
6	Phosphorsaure Brennstoffzelle (PAFC)	163
6.1	Kenndaten des PAFC-Systems	164
6.2	Saure Elektrolyte	165
6.3	Elektrodenmaterialien	166
6.4	Betriebsverhalten	169

6.5	Stationäre Anlagen	170
6.6	Systemvergleich von Brennstoffzellen	176
6.7	Feststoff-Säure-Brennstoffzellen	176
7	Schmelzelektrolyt-Brennstoffzelle (MCFC)	179
7.1	Kenndaten des MCFC-Systems	180
7.2	Schmelzflüssige Elektrolyte	181
7.3	Elektrodenmaterialien	183
7.4	Betriebsverhalten	186
7.5	Anwendungen	188
7.6	Verstromung von Biogas	193
8	Festoxid-Brennstoffzelle (SOFC)	195
8.1	Kenndaten des SOFC-Systems	196
8.2	Festelektrolyte	197
8.3	Elektrodenmaterialien	199
8.4	Betriebsverhalten	203
8.5	Zelldesign	206
8.6	SOFC-Kraftwerke	209
8.7	Festoxidzellen in Fahrzeugen	212
9	Redoxbrennstoffzellen und Hybridsysteme	215
9.1	Metall-Luft-Elemente	215
9.2	Metalloxid-Wasserstoff-Batterien	217
9.3	Redoxbrennstoffzellen	218
9.4	Brennstoffzellen in Chemieprozessen	219
10	Gaserzeugung und Brennstoffaufbereitung	221
10.1	Wasserstoffgewinnung	221
10.2	Wasserstoff aus Erdgas	222
10.3	Treibstoffe aus Erdöl	232
10.4	Treibstoffe aus Kohle	236
10.5	Wasserstoff aus Methanol	239
10.6	Synthetische Kraftstoffe	240
10.7	Wasserstoff aus Biomasse	243
10.8	Wasserstoff aus regenerativen Quellen	243
10.9	Wasserstoff aus unedlen Metallen	244
10.10	Wasserstoffspeicherung	246
Index	251

Konstanten

Vakuumllichtgeschwindigkeit	c	= 299 792 458	m/s (exakt)
Elementarladung	e	= 1,602 176 565(35)·10 ⁻¹⁹	C
FARADAY-Konstante	$F = N_A e$	= 96 485,336 5(21)	C/mol
Normalfallbeschleunigung	g	= 9,806 65	m s ⁻² (exakt)
PLANCKSches Wirkungsquantum	h	= 6,626 069 57(29)·10 ⁻³⁴	J s
BOLTZMANN-Konstante	$k = R/N_A$	= 1,380 648 8(13)·10 ⁻²³	J/K
AVOGADRO-Konstante	N_A	= 6,022 141 29(27)·10 ²³	mol ⁻¹
Normdruck	p^0	= 101 325	Pa (exakt)
Molare Gaskonstante	$R = k F/e$	= 8,314 462 1(75)	J mol ⁻¹ K ⁻¹
NERNST-Spannung (25 °C)	$U_N = RT/F$	= 0,025 693	V
	$U_N = \ln 10 \cdot RT/F$	= 0,059 159	V
Molares Normvolumen, ideales Gas			
– 273,15 K, 101 325 Pa	$V_m = RT/p$	= 22,413 968(20)·10 ⁻³	m ³ /mol
– 273,15 K, 100 kPa		= 22,710 953(21)·10 ⁻³	m ³ /mol
– 298,15 K, 101 325 Pa		= 24,465 40	l/mol
LOSCHMIDT-Konstante	$N_L = N_A/V_m$	= 2,686 780 5(24)·10 ²⁵	m ⁻³
Atomare Masseneinheit	$u = \frac{1}{12}m(^{12}\text{C})$	= 1,660 538 921(73)·10 ⁻²⁷	kg
Vakuuimpedanz	$Z_0 = \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} = \mu_0 c$	= 376,730 313 461...	Ω (exakt)
Elektrische Feldkonstante	$\epsilon_0 = 1/(\mu_0 c^2)$	= 8,854 187 817...·10 ⁻¹²	F/m (exakt)
Vakuupermeabilität	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$	= 12,566 370 614...·10 ⁻⁷	NA ⁻² (exakt)
STEFAN-BOLTZMANN-Konstante	$\sigma = \frac{\pi^2}{60} \frac{k^4}{h^3 c^2}$	= 5,670 373(21)·10 ⁻⁸	W m ⁻² K ⁻⁴

Quelle: CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants 2010: physics.nist.gov/constants

Beispiel: $R = 8,314 462 1 (75) \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ist zu lesen als: $R = (8,314 4721 \pm 0,000 0075) \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Umrechnung von Teilchendichte N/V und Stoffmengenkonzentration: $N/V = N_A c$

Formelzeichen

Physikalische Größe	Symbol	Einheit	Definition
Fläche, Querschnitt	A	m ²	
Beschleunigung	a	m/s ²	= m s ⁻²
Aktivität (Ion i in Phase α)	$a_i^{(\alpha)}$	mol/l	= m ⁻³ kmol
Temperaturleitfähigkeit	a	m ² /s	= m ² s ⁻¹
magnetische Flussdichte	\vec{B}	T = V s m ⁻²	= Wb/m ² = kg s ⁻² A ⁻¹
Molalität	b	mol/kg	
Elektrische Kapazität	C	F = C/V	= m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
molare Wärmekapazität	C_m	J mol ⁻¹ K ⁻¹	= m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
spezifische Wärmekapazität	c_p	J kg ⁻¹ K ⁻¹	= m ² s ⁻² K ⁻¹
Stoffmengenkonzentration	c	mol/l	= m ⁻³ kmol
elektrische Flussdichte	\vec{D}	C/m ²	= m ⁻² s A
Diffusionskoeffizient	D	m ² /s	= m ² s ⁻¹
Abstand, Durchmesser, Dicke	d	m	
Aktivierungsenergie	E_A	J/mol	= m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
elektrische Feldstärke	\vec{E}	V/m	= m kg s ⁻³ A ⁻¹
Zellspannung	E	V	= m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
Normalpotential	E^0	V	= m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
reversible Zellspannung	E_0	V	= m ² kg s ⁻³ A ⁻¹

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \dot{\vec{v}}$$

$$a_i = \gamma_i c_i$$

$$a = \lambda / (\rho c_p)$$

$$\vec{F} = Q \vec{v} \times \vec{B}$$

$$b_i = n_i / m_{Lm}$$

$$C = Q/U$$

$$c_p = C_p/m$$

$$c_i = n_i/V$$

$$\text{div } \vec{D} = Q/V$$

$$\dot{n} = -DA dc/dx$$

$$E_A = RT^2 d \ln k/dT$$

$$\vec{E} = -\text{grad } \phi$$

$$E = E^0 - (RT/zF) \ln K$$

$$E^0 = -\Delta_r G^0/(zF)$$

$$E^0 = -\Delta_r G^0/(zF)$$

$$E_0 = \Delta E^0 = E_{\text{red}}^0 - E_{\text{ox}}^0$$

Physikalische Größe	Symbol	Einheit	Definition
Kraft	\vec{F}	N	$\vec{F} = d\vec{p}/dt = m\vec{a}$
HELMHOLTZsche Freie Energie	F	J	$F = U - TS$
Frequenz	f, ν	Hz	$f = T^{-1} = c/\lambda$
GIBBSsche Freie Enthalpie	G	J	$G = H - TS$
Elektrischer Leitwert	G	$S = \Omega^{-1} = A/V = m^{-2}kg^{-1}s^3A^2$	$G = 1/R$
Enthalpie	H	J	$dH = dU + pdV = TdS$
spezifischer Heizwert	H_u	J/kg	
spezifischer Brennwert	H_o	J/kg	$H_o = -\Delta_r H$
Stromstärke	I	A	
elektrische Stromdichte	i	A/m^2	$i = I/A$
Austauschstromdichte	i_0	A/m^2	
Gleichgewichtskonstante	K	versch.	$K = c_1^{\nu_1} c_2^{\nu_2} \dots$
Geschwindigkeitskonstante	k	$(mol^{-1}m^3)^{n-1}s^{-1}$	$k_{ox} = I/(zFAK)$
Elektrochemisches Äquivalent	k	kg/C	$k = M/zF$
Zellkonstante	k	m^{-1}	$k = d/A$
Wärmedurchgangszahl	k	$W m^{-2}K^{-1}$	$\dot{Q} = kA \Delta T$
(charakteristische) Länge	l	m	
Drehmoment	\vec{M}	N m	$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$
molare Masse	M	kg/mol	$M_i = m_i/n_i$
Masse	m	kg	
Massenstrom	\dot{m}	kg/s	$\dot{m} = dm/dt$
Teilchenzahl	N	–	$= 1$
Stoffmenge	n	mol	$n_i = N_i/N_A$
Stoffmengenstrom	\dot{n}	mol/s	$\dot{n} = dn/dt$
Reaktionsordnung	n	–	$= 1$
Leistung	P	W	$P = dW/dt$
Impuls	\vec{p}	N s	$\vec{p} = m\vec{v}$
Druck, Partialdruck	p	$Pa = N m^{-2}$	$p = F/A = \Sigma p_i$
Wärmemenge, Wärmeenergie	Q	J	
Wärmestrom	\dot{Q}	$W = J/s$	$\dot{Q} = dQ/dt$
Elektrische Ladung	Q	C	$Q = It$
elektrischer (Wirk-)Widerstand	R	Ω	$R = U/I = Z \cos \varphi$
Ionenradius	r_i	m	
Reaktionsgeschwindigkeit	r	$mol m^{-3}s^{-1}$	$r = \dot{\xi}/V = \dot{c}/v_i$
Oberfläche	S	m^2	
Entropie	S	J/K	$dS \geq dQ/T$
Scheinleistung	\underline{S}	W	$\underline{S} = \underline{U}\underline{I}^*$
Temperatur	T	K	Basiseinheit
Zeit	t	s	Basiseinheit
Überführungszahl	t	–	$t_i = Q_i/Q$
Innere Energie	U	J	
elektrische Spannung	U	$V = J/As$	$U = \Delta\phi$
Beweglichkeit (eines Ladungsträgers)	u	$m^2V^{-1}s^{-1}$	$u_i = v_i/E$
Volumen	V	m^3	
Volumenstrom, Durchfluss	\dot{V}	m^3/s	$\dot{V} = dV/dt$
Molares Volumen	V_m	m^3/mol	$V_m = V/n_i$
Geschwindigkeit	\vec{v}	m/s	$\vec{v} = d\vec{r}/dt = \dot{\vec{r}}$
Arbeit, Energie	W	J	$W = \int \vec{F} d\vec{s}$
Massenanteil, Gew.-%	w	–	$w_i = m_i/\Sigma m_i$
Blindwiderstand	X	Ω	$X = Z \sin \varphi$
Molenbruch, Stoffmengenanteil	x	–	$x_i = n_i/n_{ges}$
Impedanz	\underline{Z}	Ω	$\underline{Z} = R + iX$
Ionenladung, elektrochemische Wertigkeit	$z, z_{\oplus}, z_{\ominus}$	–	$z_i = Q_i/e$

Griechische Formelzeichen

Physikalische Größe	Symbol	Einheit		Definition
Stromausbeute	α	–	= 1	
Elektrochemischer Symmetriekoeffizient	α	–	= 1	
Dissoziationsgrad	α	–	= 1	
Wärmeübergangszahl	α	$\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$	$= \text{kg s}^{-3}\text{K}^{-1}$	
thermischer Längenausdehnungskoeffizient	α	K^{-1}		$\alpha = (dI/dT)/I$
Massenkonzentration	β	kg/m^3		$\beta_i = m_i/V$
Stoffübergangskoeffizient	β	m/s	$= \text{m s}^{-1}$	
Chi-, Oberflächenpotential	χ	V		$\chi = \psi - \varphi$
Magnetische Suszeptibilität	χ	–	= 1	$\chi = \mu_r - 1$
Schicht-, Film-, Grenzschichtdicke	δ	m		
Verlustwinkel	δ	rad	= 1	$\delta = (\pi/2) + \varphi_1 - \varphi_2$
Permittivität	ϵ	F/m	$= \text{m}^{-3}\text{kg}^{-1}\text{s}^4\text{A}^2$	$\vec{D} = \epsilon_{ij} \vec{E}$
dynamische Viskosität	η	Pa s	$= \text{m}^{-1}\text{kg s}^{-1}$	$\tau_{x,z} = \eta dv_x/dz$
Wirkungsgrad	η	–	= 1	
Überspannung	η	V	$= \text{m}^2\text{kg s}^{-3}\text{A}^{-1}$	$\eta = E - E_0 - IR_{el}$
Oberflächenkonzentration	Γ	mol/m^2		$\Gamma = n/A$
Aktivitätskoeffizient	γ	–	= 1	$a_i = \gamma_i c_i / c^*$
therm. Volumenausdehnungskoeffizient	γ	K^{-1}		$\Delta V = \gamma V_1 \Delta T$
elektrische Leitfähigkeit	κ	$\text{S/m} = \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$	$= \text{m}^{-3}\text{kg}^{-1}\text{s}^3\text{A}^2$	$\vec{j} = \kappa \vec{E}$
Isentropenexponent	κ	–	= 1	
Molare Leitfähigkeit	Λ_m	$\text{S m}^2/\text{mol}$	$= \text{kg}^{-1}\text{s}^3\text{A}^2\text{mol}^{-1}$	$\Lambda_i = \kappa / c_i$
Ionenleitfähigkeit	λ	$\text{S m}^2/\text{mol}$	$= \text{kg}^{-1}\text{s}^3\text{A}^2\text{mol}^{-1}$	$\lambda_i = z_i F u_i$
Wellenlänge	λ	m		$\lambda = c/\nu$
Wärmeleitfähigkeit	λ	$\text{W K}^{-1}\text{m}^{-1}$	$= \text{m kg s}^{-3}\text{K}^{-1}$	$d\Phi = -\lambda (\delta T / \delta l) dA$
Permeabilität	μ	$\text{H/m} = \text{N/A}^2 = \text{Vs}/(\text{A m}) = \text{m kgs}^{-2}\text{A}^{-2}$		$\vec{B} = \mu \vec{H}$
Elektrisches Dipolmoment	$\vec{\mu}, \vec{p}$	C m	$= \text{m s A}$	$\vec{p} = \int \vec{P} dV$
Magnetisches Dipolmoment	$\vec{\mu}, \vec{m}$	$\text{A m}^2 = \text{J/T}$	$= \text{m}^2\text{A}$	
Chemisches Potential (in Phase α)	$\mu_i^{(\alpha)}$	J/mol	$= \text{m}^2\text{kg s}^{-2}\text{mol}^{-1}$	$\mu_i = (\partial G / \partial n_i)_{T,p,n_j}$
Elektrochemisches Potential	$\tilde{\mu}_i$	J/mol	$= \text{m}^2\text{kg s}^{-2}\text{mol}^{-1}$	
Wellenzahl, Repetenz	$\tilde{\nu}$	m^{-1}		$\tilde{\nu} = \lambda^{-1}$
kinematische Viskosität	ν	m^2/s	$= \text{m}^2\text{s}^{-1}$	$\nu = \eta/\rho$
Stöchiometriefaktor	ν_i	–	= 1	(i Komponente)
Raumwinkel	Ω	sr	= 1	$\Omega = A/r^2$
Kreisfrequenz, Winkelgeschwindigkeit	ω	rad/s	$= \text{s}^{-1}$	$\omega = \dot{\varphi} = 2\pi f$
elektrisches \sim , GALVANI-Potential	φ	$\text{V} = \text{J/C}$	$= \text{m}^2\text{kg s}^{-3}\text{A}^{-1}$	
Phasenverschiebungswinkel	φ	rad	= 1	
Volumenanteil	φ	–	= 1	
Fugazitätskoeffizient	φ	–	= 1	
VOLTA-Potential	ψ	V	$= \text{m}^2\text{kg s}^{-3}\text{A}^{-1}$	
Dichte	ρ	kg m^{-3}		$\rho = m/V$
Spezifischer Widerstand	ρ	Ωm	$= \text{m}^3\text{kg s}^{-3}\text{A}^{-2}$	$\rho = RA/d$
Mechanische Spannung	σ	Pa	$= \text{m}^{-1}\text{kg s}^{-2}$	$\sigma = dF_n/dA$
Oberflächenspannung	σ, γ	$\text{N/m} = \text{kg/s}^2$	$= \text{m kg}^{-2}$	
Flächenladungsdichte	σ	C/m^2	$= \text{A s m}^{-2}$	$\sigma = Q/A$
Zeitkonstante	τ	s		$\tau = RC$
Schubspannung	τ	$\text{Pa} = \text{N/m}^2$	$= \text{m}^{-1}\text{kg s}^{-2}$	$\tau = dF_t/dA$
Oberflächenbelegungsgrad	θ	–	= 1	
Reaktionslaufzahl, Umsatz	ξ	mol		$\Delta \xi = \Delta n/\nu$
Umsatzrate	$\dot{\xi}$	mol s^{-1}		$\dot{\xi} = d\xi/dt$
Zeta-Potential	ζ	V	$= \text{m}^2\text{kg s}^{-3}\text{A}^{-1}$	

Periode	Elektronen-Konfiguration	s ¹	s ²	1	2	13	14	15	16	17	18	
				Hauptgruppen		Hauptgruppen						Schale
				Ia	IIa	IIIa	IVa	Va	VIa	VIIa	0	
1	1,008 1 H 1s ¹ -1, +1	3	2								4,003 2 He 1s ² 0	
2	6,94 3 Li 2s ¹ +1	3	2								20,18 9 O 2s ² 2p ⁴ -2(-1) • -1 •	
3	22,99 11 Na 3s ¹ +1	3	2								39,95 18 Ar 3s ² 3p ⁶ 0	
4	39,10 19 K 4s ¹ +1	3	2								79,90 36 Kr 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 0 (2, 4)	
5	85,47 37 Rb 5s ¹ +1	3	2								126,9 54 Xe 4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁶ 0 (2, 4, 6)	
6	132,9 55 Cs 6s ¹ +1	3	2								226,0 86 Rn 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁶ 0 (2)	
7	(233,0) 87 Fr 7s ¹ +1	3	2								(294) 117 Uus 118 Uuo (294)	

Periodensystem der Elemente

Relative Atommasse
Elementsymbol
 Ordnungszahl
 Elektronenkonfiguration
 Oxidationsstufen
 *radioaktives Element
 (stabiles Isotop)

Nichtmetalle
 Edelgase
 Halbmetalle
 Metalle
 Übergangsmetalle
 M Metallell

• Säurebildner
 amphoter
 Basenbildner

Übergangsmetalle (Nebengruppen)

d ¹	d ²	d ³	d ⁴	d ⁵	d ⁶	d ⁷	d ⁸	d ⁹	d ⁸	d ⁹	d ¹⁰
3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	11b	12
IIIb	IVb	Vb	VIb	VIIb	VIII	VIII	VIII	VIII	VIII	IIb	IIb
44,96 21 Sc 3d ¹ 4s ² +3	47,87 22 Ti 3d ² 4s ² +3, +4	50,94 23 V 3d ³ 4s ² +3, +4	52,00 24 Cr 3d ⁴ 4s ² +2, 3, 4, 5	54,94 25 Mn 3d ⁵ 4s ² +2, 3, 4, 6, 7	55,85 26 Fe 3d ⁶ 4s ² +2, 3, 6	58,93 27 Co 3d ⁷ 4s ² +2, 3	58,69 28 Ni 3d ⁸ 4s ² +2, 3	63,55 29 Cu 3d ¹⁰ 4s ¹ +1, 2	65,38 30 Zn 3d ¹⁰ 4s ² +2	69,72 31 Ga 3d ¹⁰ 4s ² 4p ¹ +3	72,63 32 Ge 3d ¹⁰ 4s ² 4p ² +4
88,91 39 Y 4d ¹ 5s ² +3	91,22 40 Zr 4d ² 5s ² +4	92,91 41 Nb 4d ⁴ 5s ¹ +3, 4	93,96 42 Mo 4d ⁵ 5s ¹ +3, 5	98,91 43 Tc 4d ⁵ 5s ¹ +7	101,1 44 Ru 4d ⁷ 5s ¹ +3, 4, 8	102,9 45 Rh 4d ⁸ 5s ¹ +3, 4	106,4 46 Pd 4d ¹⁰ +2, 4	107,9 47 Ag 4d ¹⁰ 5s ¹ +1	112,4 48 Cd 4d ¹⁰ 5s ² +2	114,8 49 In 4d ¹⁰ 5s ² 5p ¹ +3	121,8 50 Sn 4d ¹⁰ 5s ² 5p ² +2, 4
137,3 56 Ba 6s ² +2	178,5 72 Hf 4f ¹⁴ 5d ² 6s ² +4	180,9 73 Ta 4f ¹⁴ 5d ³ 6s ² +5	183,8 74 W 4f ¹⁴ 5d ⁴ 6s ² +6	186,2 75 Re 4f ¹⁴ 5d ⁵ 6s ² +7	190,2 76 Os 4f ¹⁴ 5d ⁶ 6s ² +6	192,2 77 Ir 4f ¹⁴ 5d ⁷ 6s ² +6	195,1 78 Pt 4f ¹⁴ 5d ⁹ 6s ¹ +2, 4	197,0 79 Au 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ¹ +1, 3	200,6 80 Hg 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² +2	204,4 81 Tl 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ¹ +3	207,2 82 Pb 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ² +2, 4
(233,0) 87 Fr 7s ¹ +1	(261) 104 Rf 4f ¹⁴ 5d ⁴ 6s ² +4	(262) 105 Db 4f ¹⁴ 5d ⁵ 6s ² +5	(266) 106 Sg 4f ¹⁴ 5d ⁶ 6s ² +6	(264) 107 Bh 4f ¹⁴ 5d ⁷ 6s ² +7	(277) 108 Hs 4f ¹⁴ 5d ⁸ 6s ² +8	(268) 109 Mt 4f ¹⁴ 5d ⁹ 6s ² +9	(281) 110 Ds 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² +10	(272) 111 Rg 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² +11	(285) 112 Cn 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² +12	(284) 113 Uut 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ¹ +3	(289) 114 Fl 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ² +3
(294) 117 Uus 7s ¹ +1	(294) 118 Uuo 7s ² +2	(294) 119 Uue 7s ² 7p ¹ +3	(294) 120 Uuq 7s ² 7p ² +4	(294) 121 Uuq 7s ² 7p ³ +5	(294) 122 Uuq 7s ² 7p ⁴ +6	(294) 123 Uuq 7s ² 7p ⁵ +7	(294) 124 Uuq 7s ² 7p ⁶ +8	(294) 125 Uuq 7s ² 7p ⁶ 8s ¹ +9	(294) 126 Uuq 7s ² 7p ⁶ 8s ² +10	(294) 127 Uuq 7s ² 7p ⁶ 8s ² 8p ¹ +11	(294) 128 Uuq 7s ² 7p ⁶ 8s ² 8p ² +12

140,1 58 Ce 4f ⁷ 6s ² [Xe]	144,2 59 Pr 4f ⁶ 6s ² 3, 4	146,9 60 Nd 4f ⁶ 6s ² 3, 4	148,9 61 Pm 4f ⁶ 6s ² 2, 3	150,4 62 Sm 4f ⁶ 6s ² 2, 3	152,0 63 Eu 4f ⁷ 6s ² 2, 3	157,3 64 Gd 4f ⁷ 5d ¹ 6s ² 2, 3, 4	158,9 65 Tb 4f ⁹ 6s ² 3, 4	164,9 66 Dy 4f ¹⁰ 6s ² 3	167,3 67 Er 4f ¹² 6s ² 3	168,9 69 Tm 4f ¹³ 6s ² 3	173,1 70 Yb 4f ¹⁴ 6s ² 3	175,0 71 Lu 4f ¹⁴ 5d ¹ 6s ² 3	
232,0 90 Th 6d ² 7s ² [Rn]	231,0 91 Pa 5f ² 6d ¹ 7s ² 4, 5	238,0 92 U 5f ³ 6d ¹ 7s ² 3, 4, 5, 6	(237,0) 93 Np 5f ⁴ 6d ¹ 7s ² 3, 4, 5, 6	(244,1) 94 Pu 5f ⁶ 7s ² 3, 4, 5, 6	(243,1) 95 Am 5f ⁷ 7s ² 3, 4, 5, 6	(247,1) 96 Cm 5f ⁷ 6d ¹ 7s ² 3, 4, 5, 6	(247,1) 97 Bk 5f ⁹ 7s ² 3, 4, 5, 6	(251,1) 98 Cf 5f ¹⁰ 7s ² 3, 4, 5, 6	(252,1) 99 Es 5f ¹² 7s ² 3	(257,2) 100 Fm 5f ¹² 7s ² 3	(258,1) 101 Md 5f ¹³ 7s ² 3	(259,1) 102 No 5f ¹⁴ 7s ² 3	(262,1) 103 Lr 5f ¹⁴ 6d ¹ 7s ² 3

Lanthanoide
f^{1...f¹⁴}

Actinoide
f^{1...f¹⁴}