

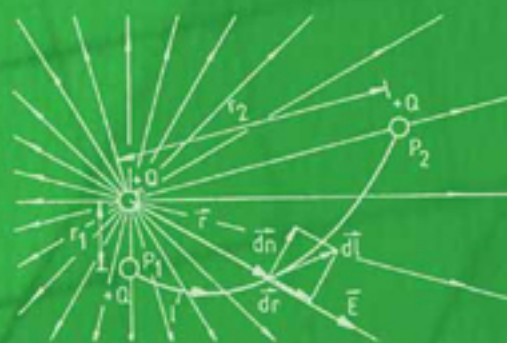
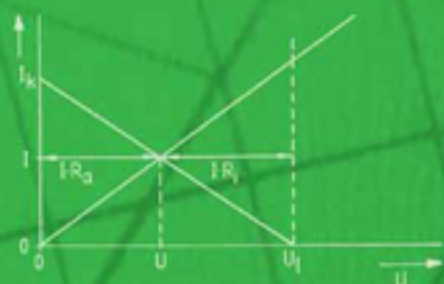
Wilfried Weißgerber

Elektrotechnik für Ingenieure 1

Gleichstromtechnik und Elektromagnetisches Feld
Ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Grundstudium

8. Auflage

STUDIUM



Wilfried Weißgerber

Elektrotechnik für Ingenieure 1

Wilfried Weißgerber

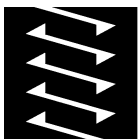
Elektrotechnik für Ingenieure 1

Gleichstromtechnik und Elektromagnetisches Feld
Ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Grundstudium

8., überarbeitete Auflage

Mit 469 Abbildungen, zahlreichen Beispielen
und 121 Übungsaufgaben mit Lösungen

STUDIUM



VIEWEG+
TEUBNER

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

1. Auflage 1990
- 2., überarbeitete Auflage 1992
- 3., überarbeitete Auflage 1994
- 4., verbesserte Auflage 1997
- 5., verbesserte Auflage 2000
- 6., verbesserte Auflage 2005
- 7., überarbeitete Auflage 2007
- 8., überarbeitete Auflage 2009

Alle Rechte vorbehalten

© Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2009

Lektorat: Reinhard Dapper | Andrea Broßler

Vieweg+Teubner ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.

www.viewegteubner.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, 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.

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg

Druck und buchbinderische Verarbeitung: MercedesDruck, Berlin

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Printed in Germany

ISBN 978-3-8348-0473-0

Vorwort

Die drei vorliegenden Bände „Elektrotechnik für Ingenieure“ sind ein Lehr- und Arbeitsbuch für Ingenieurstudenten im Hochschulbereich, die im Grundstudium die Grundlagen der Elektrotechnik verstehen möchten. Das Buch soll dem Studienanfänger das Verständnis für elektrotechnische Probleme erleichtern. Deshalb ist der Stoff sehr ausführlich und systematisch dargestellt. Gleichzeitig soll es bei der Lösung von Übungsaufgaben und bei der Prüfungsvorbereitung behilflich sein, also auch den Anforderungen im Selbststudium genügen.

Das Buch ist aus einem Vorlesungs-Skript entstanden, das in gedruckter Form vorliegt und schon von mehreren Studentengenerationen im Unterricht intensiv genutzt wurde. Von den Studenten, ohne deren helfende Kritik das Buch in dieser Form nicht entstanden wäre, wird die Ausführlichkeit der Darstellung besonders gewürdigt. Bei keiner Herleitung heißt es „wie man leicht sieht“, vielmehr ist die mathematische Herleitung der Ergebnisformeln so ausführlich gehalten, dass sie sofort nachvollzogen und ohne eigene Zwischenrechnungen verstanden werden kann. Dem Studierenden wird es somit ermöglicht, sich auf die dargestellten physikalischen Zusammenhänge und vor allem auf die praktischen Beispiele zu konzentrieren, die sowohl im Text als auch als Aufgaben zum Selbststudium reichlich zu finden sind. Im Anhang sind die Lösungen der Aufgaben zusammengestellt, nicht nur als Zahlenergebnisse, sondern in ausführlicher Form eines Lösungsweges. Bei Neuerscheinungen ist es selbstverständlich, dass die Bezeichnungen dem neuesten Stand der Normen entsprechen. Dadurch ist dem Studierenden oft der Zugang zu älterer Literatur verwehrt, weil Widersprüche das neu erworbene Wissen in Frage stellen. Zwischen der heute üblichen und der nicht mehr gebräuchlichen Darstellung gibt es oft nur kleine Unterschiede, die aber leicht zu verstehen sind, wie beispielsweise die Quellspannung und die EMK in Kapitel 1 oder die elektrostatische Feldstärke und die induzierte Feldstärke beim Induktionsgesetz oder die elektrostatische Feldstärke und die Hallfeldstärke beim Halleffekt in Kapitel 3. Die heute verwendeten Bezeichnungen sind bei der direkten Gegenüberstellung links angeordnet; die auf der rechten Seite aufgeführten veralteten Größen ermöglichen das Verständnis älterer bewährter Literatur. Unterzieht man sich der kleinen Mühe, die heute oft verpönte EMK zu verstehen, dann wird es leichter, die Größen des magnetischen Feldes über Analogiebetrachtungen zu erfassen; im magnetischen Feld gibt es zwei verschiedene Arten von „Spannungen“.

Die Lösungsverfahren der Gleichstrom-Netzberechnung werden in Kapitel 2 nicht nur dargestellt, sondern auch hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit bei umfangreicheren Netzen untersucht. Deshalb wird auch der Gaußsche Algorithmus, der häufig in Rechnerprogrammen zu finden ist, ausführlich beschrieben.

Bei der Behandlung der elektromagnetischen Felder in Kapitel 3 ist die Übersicht über die vier feldbeschreibenden Größen und deren Zusammenhänge an den Anfang gestellt, damit die Analogien und die Unterschiede zwischen den Feldern deutlich werden. Bei der Beschreibung der Felder im einzelnen wird prinzipiell gleich vorgegangen: Wesen des Feldes, messtechnischer Nachweis, Fluss, Flussdichte, Spannung (Durchflutung), Widerstand/Leitwert (Kapazität), Feldstärke. Damit wird die Systematik noch unterstrichen.

Bewusst ist mit der Behandlung des elektrischen Strömungsfeldes begonnen worden, weil der Feldbegriff mit bekannten Größen der Gleichstromtechnik des Kapitels 2 erläutert werden kann.

Auf die Differentialform der Maxwellschen Gleichungen ist absichtlich verzichtet worden, weil oft die mathematischen Voraussetzungen zum Verständnis fehlen und weil die meisten praktischen Berechnungen mit der Integralform möglich sind.

Die Bewegungsinduktion und die Induktion durch zeitlich veränderliche Magnetfelder werden durch gleiche Bilder erläutert. Um die Richtungen der Größen, die die Induktionsvorgänge beschreiben, einfach ermitteln zu können, wird die Rechte-Hand-Regel für alle behandelten Fälle benutzt.

Bei magnetisch gekoppelten Kreisen wird deutlich unterschieden, ob die beiden Spulenströme eingeprägt sind oder – wie beim Transformator – nicht.

Die 6. Auflage wurde um ein Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Einheiten ergänzt.

Die 7. Auflage ist noch einmal überarbeitet und durch Erläuterungen ergänzt worden.

In der 8. Auflage sind einige Korrekturen und Verbesserungen vorgenommen worden.

Für die vielen Anregungen meiner Kollegen und Studenten möchte ich herzlich danken. Ebenso danken möchte ich allen Mitarbeitern des Verlags, die zum Gelingen des dreibändigen Werks beitragen.

Wedemark, im Oktober 2008

Wilfried Weißgerber

Inhaltsverzeichnis

1 Physikalische Grundbegriffe der Elektrotechnik	1
1.1 Ungeladene und geladene Körper	1
1.2 Das Coulombsche Gesetz und das elektrische Feld	4
1.3 Das elektrische Potential und die elektrische Spannung	5
1.4 Der elektrische Strom	10
1.5 Der elektrische Widerstand	12
1.6 Die elektrische Energie und die elektrische Leistung	22
Übungsaufgaben zu den Abschnitten 1.1 bis 1.6	25
2 Gleichstromtechnik	27
2.1 Der unverzweigte Stromkreis	27
2.1.1 Der Grundstromkreis	27
2.1.2 Zählpeilsysteme	31
2.1.3 Die Reihenschaltung von Widerständen	33
2.1.4 Anwendungen der Reihenschaltung von Widerständen	34
2.1.5 Die Reihenschaltung von Spannungsquellen	35
2.2 Der verzweigte Stromkreis	37
2.2.1 Die Maschenregel (Der 2. Kirchhoffsche Satz)	37
2.2.2 Die Knotenpunktregel (Der 1. Kirchhoffsche Satz)	39
2.2.3 Die Parallelschaltung von Widerständen	39
2.2.4 Anwendungen der Parallelschaltung von Widerständen	41
2.2.5 Ersatzspannungsquelle und Ersatzstromquelle	44
2.2.6 Die Parallelschaltung von Spannungsquellen	54
2.2.7 Messung von Widerständen	58
2.2.8 Der belastete Spannungsteiler	62
2.2.9 Kompensationsschaltungen	66
2.2.10 Umwandlung einer Dreieckschaltung in eine Sternschaltung und umgekehrt	69
Übungsaufgaben zu den Abschnitten 2.1 und 2.2	74
2.3 Verfahren zur Netzwerkberechnung	80
2.3.1 Netzwerkberechnung mit Hilfe der Kirchhoffschen Sätze (Zweigstromanalyse)	80
2.3.2 Netzwerkberechnung mit Hilfe des Überlagerungssatzes (Superpositionsverfahren)	86
2.3.3 Netzwerkberechnung mit Hilfe der Zweipoltheorie (Zweipolverfahren)	90
2.3.4 Netzwerkberechnung nach dem Maschenstromverfahren	98
2.3.5 Netzwerkberechnung nach dem Knotenspannungsverfahren	102
2.3.6 Matrizen und Determinanten und ihre Anwendung bei der Netzwerkberechnung	108
2.3.6.1 Matrizen	108
2.3.6.2 Determinanten und Bilden der inversen Matrix	114
2.3.6.3 Lösung der Netzberechnungs-Gleichungssysteme	118
Übungsaufgaben zum Abschnitt 2.3	129

2.4	Elektrische Energie und elektrische Leistung	132
2.4.1	Energie und Leistung.....	132
2.4.2	Energieumwandlungen	135
2.4.3	Messung der elektrischen Energie und Leistung	138
2.4.3.1	Messung der elektrischen Energie	138
2.4.3.2	Messung der elektrischen Leistung	140
2.4.4	Wirkungsgrad in Stromkreisen	142
2.4.5	Anpassung	145
	Übungsaufgaben zum Abschnitt 2.4	149
3	Das elektromagnetische Feld	150
3.1	Der Begriff des Feldes	150
3.2	Das elektrische Strömungsfeld	154
3.2.1	Wesen des elektrischen Strömungsfeldes	154
3.2.2	Elektrischer Strom und elektrische Stromdichte	156
3.2.3	Elektrische Spannung und elektrische Feldstärke, elektrischer Widerstand und spezifischer Widerstand	160
	Übungsaufgaben zum Abschnitt 3.2	166
3.3	Das elektrostatische Feld	167
3.3.1	Wesen des elektrostatischen Feldes	167
3.3.2	Verschiebungsfluss und Verschiebungsflussdichte	170
3.3.3	Elektrische Spannung und elektrische Feldstärke, Kapazität und Permittivität (Dielektrizitätskonstante)	175
3.3.4	Verschiebestrom - Strom im Kondensator	197
3.3.5	Energie und Kräfte des elektrostatischen Feldes	201
3.3.6	Das Verhalten des elektrostatischen Feldes an der Grenze zwischen Stoffen verschiedener Dielektrizitätskonstanten	206
	Übungsaufgaben zum Abschnitt 3.3	211
3.4	Das magnetische Feld	214
3.4.1	Wesen des magnetischen Feldes	214
3.4.2	Magnetischer Fluss und magnetische Flussdichte	216
3.4.3	Durchflutung, magnetische Spannung und magnetische Feldstärke (magnetische Erregung), magnetischer Widerstand und Permeabilität	222
3.4.4	Das Verhalten des magnetischen Feldes an der Grenze zwischen Stoffen verschiedener Permeabilitäten	242
3.4.5	Berechnung magnetischer Kreise	246
3.4.5.1	Berechnung geschlossener magnetischer Kreise	246
3.4.5.2	Berechnung des nichteingeschlossenen magnetischen Kreises einer Doppelleitung und mehrerer paralleler Leiter	276
3.4.5.3	Berechnung magnetischer Kreise mit Dauermagneten	279
3.4.6	Elektromagnetische Spannungserzeugung - das Induktionsgesetz	288
3.4.6.1	Bewegte Leiter in einem zeitlich konstanten Magnetfeld – die Bewegungsinduktion	288
3.4.6.2	Zeitlich veränderliches Magnetfeld und ruhende Leiter – die Ruheinduktion	300

3.4.7 Selbstinduktion und Gegeninduktion	305
3.4.7.1 Die Selbstinduktion	305
3.4.7.2 Die Gegeninduktion	319
3.4.7.3 Haupt- und Streuinduktivitäten, Kopplungs- und Streufaktoren	337
3.4.8 Magnetische Energie und magnetische Kräfte	343
3.4.8.1 Magnetische Energie	343
3.4.8.2 Magnetische Kräfte	352
Übungsaufgaben zum Abschnitt 3.4	363
Anhang:	
Lösungen der Übungsaufgaben	379
1 Physikalische Grundbegriffe der Elektrotechnik	379
2 Gleichstromtechnik	381
2.1 und 2.2 Der unverzweigte und der verzweigte Stromkreis	381
2.3 Verfahren zur Netzwerkberechnung	391
2.4 Elektrische Energie und elektrische Leistung	396
3 Das elektromagnetische Feld	398
3.2 Das elektrische Strömungsfeld	398
3.3 Das elektrostatische Feld	399
3.4 Das magnetische Feld	410
Verwendete und weiterführende Literatur	435
Sachwortverzeichnis	436

Inhaltsübersicht

Band 2

- 4 Wechselstromtechnik
- 5 Ortskurven
- 6 Der Transformator
- 7 Mehrphasensysteme
- Anhang mit Lösungen der Übungsaufgaben

Band 3

- 8 Ausgleichsvorgänge in linearen Netzen
- 9 Fourieranalyse
- 10 Vierpoltheorie
- Anhang mit Lösungen der Übungsaufgaben

Formelsammlung

Kompakte Darstellung der zehn Kapitel der Bände 1 bis 3

Klausurenrechnen

40 Aufgabenblätter mit je vier Aufgaben, ausführlichen Lösungen und Bewertungen

Schreibweisen, Formelzeichen und Einheiten

Schreibweise physikalischer Größen und ihrer Abbildungen

u, i	Augenblicks- oder Momentanwert zeitabhängiger Größen: kleine lateinische Buchstaben
U, I	Gleichgrößen, Effektivwerte: große lateinische Buchstaben
\hat{u}, \hat{i}	Maximalwert
$\vec{E}, \vec{D}, \vec{r}$	vektorielle Größen

Schreibweise von Zehnerpotenzen

$10^{-12} = p = \text{Piko}$	$10^{-2} = c = \text{Zenti}$	$10^3 = k = \text{Kilo}$
$10^{-9} = n = \text{Nano}$	$10^{-1} = d = \text{Dezi}$	$10^6 = M = \text{Mega}$
$10^{-6} = \mu = \text{Mikro}$	$10^1 = da = \text{Deka}$	$10^9 = G = \text{Giga}$
$10^{-3} = m = \text{Milli}$	$10^2 = h = \text{Hekto}$	$10^{12} = T = \text{Tera}$

Die in diesem Band verwendete Formelzeichen physikalischer Größen

a	Länge	G	elektrischer Leitwert
A	Fläche, Querschnittsfläche	G_m	magnetischer Leitwert
b	Länge	h	Höhe, Länge
B, \vec{B}	magnetische Flussdichte oder magnetische Induktion	H, \vec{H}	magnetische Feldstärke oder magnetische Erregung
c	Länge Konstante Lichtgeschwindigkeit $c = 2,99792 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ spezifische Wärmekapazität (spe- zifische Wärme)	i	zeitlich veränderlicher Strom (Augenblicks- oder Momentan- wert)
C	elektrische Kapazität	I	laufender Index Stromstärke (Gleichstrom)
d	Dicke Durchmesser	k	Knotenzahl Kopplungsfaktor
D, \vec{D}	elektrische Verschiebungsfluss- dichte oder Erregungsflussdichte	K	Konstante
D	Durchmesser	l, \vec{l}	Länge
D^*	Drehfederkonstante	l	Anzahl
e	Elementarladung $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$	L	Induktivität
E, \vec{E}	elektrische Feldstärke	m	Masse Anzahl
E, e	EMK	M	Gegeninduktivität Drehmoment
f	Frequenz	n	Anzahl Drehzahl
f_{Fe}	Eisenfüllfaktor	N	Entmagnetisierungsfaktor
F, \vec{F}	Kraft	\vec{N}	Normale
		p	Verhältniszahl

P	Leistung (Gleichleistung)	α	Winkel
q	zeitlich veränderliche Ladung		Temperaturkoeffizient
Q	Ladung, Elektrizitätsmenge		Zeigerausschlag
r	variabler Radius	β	Winkel
\vec{r}	Radiusvektor, Ortsvektor		Temperaturkoeffizient
R	elektrischer Widerstand	γ	Winkel
	Radius		Zeigerausschlag
R_m	magnetischer Widerstand	Δ	Differenz, Abweichung
s	Weg, Länge	ε	Dielektrizitätskonstante
S, \vec{S}	Stromdichte		Dielektrizitätskonstante des Vakuums, Influenzkonstante:
t	Zeit		$\varepsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$
T	Periodendauer (Dauer einer Schwingung)	η	Wirkungsgrad
u	zeitlich veränderliche elektrische Spannung (Augenblicks- oder Momentanwert)	φ	elektrisches Potential
U	elektrische Spannung (Gleichspannung)	Φ	magnetischer Fluss
v, \vec{v}	Geschwindigkeit	ϑ	Temperatur
v	Widerstandsverhältnis	κ	spezifischer Leitwert
V	Volumen	μ	Permeabilität
	magnetische Spannung		Permeabilität des Vakuums:
w	Windungszahl		$\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \frac{Vs}{Am}$
w'	Energiedichte	ν	laufender Index
W	Arbeit, Energie	ρ	spezifischer Widerstand
x	laufende Ordinate auf der Abzissenachse	Θ	Durchflutung
y	laufende Ordinate auf der Ordina- tenachse	σ	Streifaktor
z	Zweigzahl	τ	Zeitkonstante
	Ankerumdrehungen		Temperaturkennwert
		ω	Kreisfrequenz
		Ψ	Verschiebungsfluss
			Induktionsfluss oder verketteter Fluss

Einheiten des SI-Systems (Système International d'Unités)**Basiseinheit**

der Länge l	das Meter, m
der Masse m	das Kilogramm, kg
der Zeit t	die Sekunde, s
der elektrischen Stromstärke I	das Ampere, A
der absoluten Temperatur T	das Kelvin, K
der Lichtstärke I	die Candela, cd
der Stoffmenge n	das Mol, mol

von den Basiseinheiten abgeleitete Einheit

der Kraft F	Newton,	$1\text{N} = 1\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} = 1\text{V} \cdot \text{A} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$
der Energie W	Joule,	$1\text{J} = 1\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} = 1\text{V} \cdot \text{A} \cdot \text{s}$
der Leistung P	Watt,	$1\text{W} = 1\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3} = 1\text{V} \cdot \text{A}$
der Ladung Q gleich	Coulomb,	$1\text{C} = 1\text{A} \cdot \text{s}$
des Verschiebungsflusses Ψ		
der elektrischen Spannung U	Volt,	$1\text{V} = 1\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1} = 1\text{W} \cdot \text{A}^{-1}$
des elektrischen Widerstandes R	Ohm,	$1\Omega = 1\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-2} = 1\text{V} \cdot \text{A}^{-1}$
des elektrischen Leitwertes G	Siemens,	$1\text{S} = 1\text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^3 \cdot \text{A}^2 = 1\text{V}^{-1} \cdot \text{A}$
der Kapazität C	Farad,	$1\text{F} = 1\text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^4 \cdot \text{A}^2 = 1\text{C} \cdot \text{V}^{-1}$
des magnetischen Flusses Φ	Weber,	$1\text{Wb} = 1\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1} = 1\text{Vs}$
der Induktivität L	Henry,	$1\text{H} = 1\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-2} = 1\text{Wb} \cdot \text{A}^{-1}$
der magnetischen Induktion B	Tesla,	$1\text{T} = 1\text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1} = 1\text{Wb} \cdot \text{m}^{-2}$
der Frequenz f	Hertz,	$1\text{Hz} = \text{s}^{-1}$

Die komplette Liste der verwendeten Formelzeichen und Schreibweisen befindet sich in der Formelsammlung vom selben Autor unter dem Titel „Elektrotechnik für Ingenieure – Formelsammlung“.

1 Physikalische Grundbegriffe der Elektrotechnik

1.1 Ungeladene und geladene Körper

Um elektrische Erscheinungen erklären zu können, ist es notwendig, die wichtigsten Zusammenhänge über den *Aufbau der Materie* zu kennen.

Bereits vor etwa 2500 Jahren wurde von den Griechen Leukipp und Demokrit der Begriff des Atoms als kleinsten Baustein der Materie geprägt (atomos – unteilbar). Gleichartige Atome setzen sich zu den Grundstoffen der Materie – den chemischen Elementen – zusammen. Auf der Erde gibt es 83 verschiedene stabile und 22 instabile Elemente, die im so genannten „Periodensystem der Elemente“ zusammengestellt werden:

Stoff	chemisches Zeichen	Ordnungszahl
Wasserstoff	H	1
Helium	He	2
Lithium	Li	3
Beryllium	Be	4
.	.	.
.	.	.
Chlor	Cl	17
.	.	.
.	.	.
Wismut	Bi	83
Polonium	Po	84
Astatin	At	85
.	.	.
.	.	.
.	.	.
Uran	U	92
.	.	.
.	.	.
.	.	.
Nobellium	No	102
.	.	.
.	.	.
.	.	.

Verschiedenartige Elemente chemisch in bestimmten Gewichtsverhältnissen verbunden, werden „chemische Verbindungen“ genannt. Die kleinsten Bestandteile heißen Moleküle. Gleichartige Atome können sich auch zu Molekülen zusammenlagern.

Beispiele:

Wasser $\text{H}_2\text{O} = 2\text{H} + \text{O}$

1 Wassermolekül gleich 2 Wasserstoffatome und 1 Sauerstoffatom

Kochsalz $\text{NaCl} = \text{Na} + \text{Cl}$

1 Kochsalzmolekül gleich 1 Natriumatom und 1 Chloratom

Verschiedene Atome unterscheiden sich durch ihren Atomaufbau. Atommodelle sind theoretisch erarbeitet und experimentell nachgewiesen worden, durch die der Atomaufbau veranschaulicht werden kann.

Nach dieser Theorie besteht jedes Atom aus einem Atomkern, um den Elektronen kreisen, ähnlich wie Planeten um die Sonne. Das Atom ist also entgegen der griechischen Auffassung teilbar.

Die Art der Atome wird durch die Anzahl der Kernbestandteile – im wesentlichen Protonen und Neutronen – und die Anzahl der umkreisenden Elektronen bestimmt. Nach den Modellvorstellungen bewegen sich die Elektronen auf Bahnen – den Elektronenschalen.

Die im Periodensystem nacheinander aufgeführten Elemente besitzen entsprechend ihrer Ordnungszahl entsprechend viele Protonen im Kern und umkreisende Elektronen. Dabei wird zunächst die 1. Schale mit zwei Elektronen, die 2. und 3. Schale jeweils mit acht Elektronen, usw. aufgefüllt [1].

Beispiele:

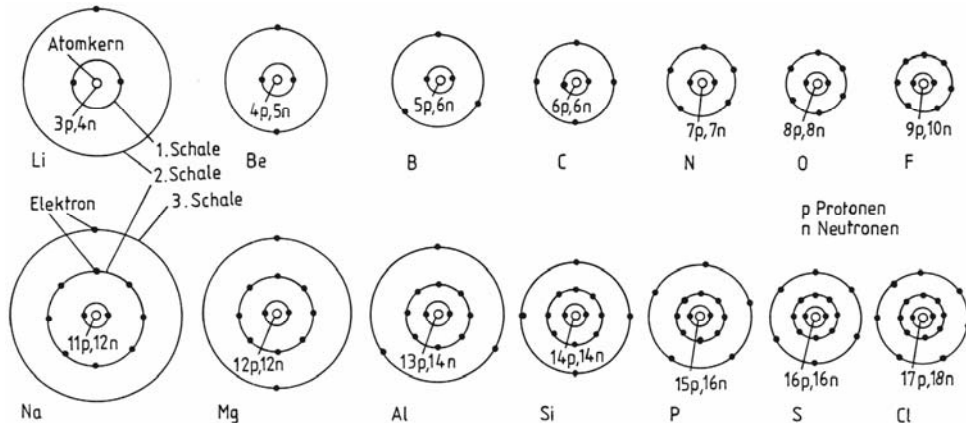


Bild 1.1 Elektronenschalen und Atomdurchmesser

Innerhalb einer waagerechten Elementperiode nimmt der Atomradius entsprechend der wachsenden Anziehung des positiven Kerns auf die negative Elektronenhülle mit steigender Kernladung ab. Innerhalb einer senkrechten Elementgruppe nimmt dagegen der Atomradius mit steigender Kernladung zu, weil von einem zum nächsten Gruppenglied eine neue Elektronenschale hinzukommt.

Die Größenordnung eines Atoms soll anhand eines Wasserstoffatoms veranschaulicht werden, dessen Durchmesser $2 \cdot 10^{-8}$ cm beträgt. Der Durchmesser des Wasserstoffatomkerns beträgt nur $6 \cdot 10^{-12}$ cm, d. h. fast das gesamte Atom ist masselos. Die Größenverhältnisse des Atomkerns werden anschaulich, wenn der Kern als ein Ball mit einem Durchmesser von 6 cm gedacht wird, dann umkreist das Elektron das Zentrum in einem Abstand von 100 m:

$$\frac{1 \cdot 10^{-8} \text{ cm}}{6 \cdot 10^{-12} \text{ cm}} = \frac{10^4 \text{ cm}}{6 \text{ cm}}.$$

Die Bahngeschwindigkeit des den Atomkern umkreisenden Elektrons beträgt etwa 2200 km/s. Obwohl die Masse des Elektrons mit $0,91 \cdot 10^{-30}$ kg sehr klein ist, entsteht durch die hohe Bahngeschwindigkeit eine beträchtliche Fliehkraft – zu berechnen nach $F = m \cdot v^2/r$ – die das Elektron aus der Umlaufbahn bringen möchte. Es existiert zwischen Elektronen und Atomkern eine Anziehungskraft, die die Fliehkraft aufhebt. Man könnte annehmen, dass die Massenanziehungskraft (Gravitationskraft) genauso wie beim Sonnensystem die Fliehkraft aufhebt. Eine Abschätzung ergibt jedoch, dass die Fliehkraft eines Elektrons etwa 10^{35} mal so groß ist wie die Massenanziehungskraft zwischen Elektronen und Atomkern [2].

Die Anziehungskraft, die das Kreisen der Elektronen um den Atomkern ermöglicht, ist ebenso nicht erklärbar wie die Massenanziehungskraft. Sie wird „elektrische Kraft“ genannt; den Namen hat sie von dem griechischen Bernstein – electron – erhalten, denn es tritt diese Kraft nach außen in Erscheinung, wenn Bernstein Papierschnitzel anzieht, nachdem der Bernstein mit einem Wolllappen gerieben wurde.

Um sich die elektrische Kraft zu veranschaulichen, wurde der Begriff der *elektrischen Ladung* eingeführt, der für Materie kennzeichnend ist. Das Elektron wird als kleinste negative Ladung und das Proton im Atomkern als kleinste positive Ladung angenommen; die Elementarladung des Elektrons bzw. des Protons beträgt $1,602 \cdot 10^{-19}$ C (Coulomb). Ist in einem Körper die Anzahl der Protonen (positive Ladungen) gleich der Anzahl der Elektronen (negative Ladungen), dann ist der Körper nach außen hin elektrisch neutral, d. h. ungeladen. Ein Körper, bei dem die Anzahl der Protonen überwiegt, weil Elektronen durch äußere Energien entzogen worden sind, heißt „positiv geladen“. Ein Körper ist „negativ geladen“, wenn die Elektronenanzahl gegenüber der Protonenanzahl größer ist, d. h. wenn ein Elektronenüberschuss vorliegt.

Wie beim Atom bestehen zwischen geladenen Körpern elektrische Kräfte: Anziehungskräfte zwischen ungleich geladenen Körpern, Abstoßungskräfte zwischen gleich geladenen Körpern. Auf elektrisch neutrale Körper wirken keine elektrischen Kräfte. Von außen ist einem Körper nicht anzusehen, ob er geladen oder ungeladen ist; das ist erst festzustellen durch einen anderen geladenen Körper. Die Einführung des Begriffs „Ladung“ erleichtert also die Beschreibung der elektrischen Kraft.

Experimenteller Nachweis: Der „Ping-Pong-Versuch“

Zwei tellerförmige Metallnetze sind in einem Abstand von ca. 30cm gegenüber angeordnet und werden mittels eines Bandgenerators unterschiedlich aufgeladen, d. h. das eine Netz hat einen Elektronenüberschuss (negativ geladen), das andere hat einen Elektronenmangel (positiv geladen). Zwischen den beiden geladenen Netzen befindet sich pendelförmig aufgehängt ein mit Graphit überzogener Tischtennisball, der sich nicht bewegt, weil er elektrisch neutral, also ungeladen ist. Eine isolierte Metallscheibe wird an das positiv geladene Netz gehalten und damit selbst positiv geladen. Berührt nun die positiv geladene Metallscheibe den Tischtennisball, wird dieser ebenfalls positiv geladen, und er bewegt sich nun nach dem negativ geladenen Netz hin. Beim Anstoß an das negativ geladene Netz wird der Tischtennisball negativ geladen und von dem negativ geladenen Netz abgestoßen und gleichzeitig von dem positiv geladenen Netz angezogen. Beim Berühren des negativ geladenen Balles mit dem positiv geladenen Netz wird der Ball positiv geladen, wodurch er wieder abgestoßen wird, usw.