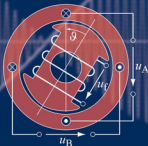


Ekbert Hering · Rolf Martin
Jürgen Gutekunst · Joachim Kempkes

Elektrotechnik und Elektronik für Maschinenbauer

2. Auflage



 Springer

VDI

Elektrotechnik und Elektronik für Maschinenbauer

Weitere Bände siehe
www.springer.com/series/3482

Ekbert Hering • Rolf Martin
Jürgen Gutekunst • Joachim Kempkes

Elektrotechnik und Elektronik für Maschinenbauer

2. vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage

 Springer

Prof. Dr. Dr. Ekbert Hering
Hochschule Aalen
Beethovenstr.1
73430 Aalen
Deutschland
ekbert.hering@htw-aalen.de

Prof. Dr. Dr. h.c. Rolf Martin
Hochschule Esslingen
Kanalstr. 33
73728 Esslingen
Deutschland
rolf.martin@hs-esslingen.de

Unter Mitarbeit von:
Dipl. - Ing. Klaus Bressler
Dipl. - Ing. Alois Vogt

Dipl.-Ing. Jürgen Gutekunst
Eichenweg 18
72622 Nürtingen
Deutschland
jgutekunst@web.de

Prof. Dr. Joachim Kempkes
Hochschule Würzburg-Schweinfurt
Mechatroniklabor I
Elektrische Aktoren
Ignaz-Schön-Str. 11
97421 Schweinfurt
Deutschland
joachim.kempkes@fhws.de

ISBN 978-3-642-12880-6 e-ISBN 978-3-642-12881-3
DOI 10.1007/978-3-642-12881-3
Springer Heidelberg Dordrecht London New York

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

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

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.

Einbandentwurf: WMXDesign GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier

Springer ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.com)

Vorwort zur zweiten, vollständig überarbeiteten Auflage

Im Maschinenbau werden die Anlagen und Maschinen immer komplexer, unter anderem weil immer mehr Elektrotechnik, Elektronik und Kommunikationstechnik eingebaut wird. Deshalb werden die Grundlagen dieser Bereiche und ihre praktischen Anwendungen im Maschinenbau immer wichtiger.

Die erste Auflage des erfolgreichen Standardwerkes für den Ingenieur wurde zu diesem Zweck völlig neu konzipiert und strukturiert. Die Grundlagen in Kapitel A wurden didaktisch überarbeitet, die Definitionen und Ableitungen der Formelzusammenhänge ausführlich dargestellt und mit Anwendungen praxisgerecht aufbereitet. Im nächsten Kapitel B wurden alle Grundlagen und Anwendungen der Halbleitertechnik zusammengefasst. Daran schließt sich das verbesserte Kapitel C über Leistungselektronik an. Völlig neu in das Werk aufgenommen wurden die sehr wichtigen Kapitel D: Elektrische Maschinen, Kapitel E: Antriebstechnik und Kapitel F: Energieversorgung. Diese Anwendungen werden auch vor den Hintergrund der zunehmenden Elektromobilität und einer Ressourcen schonenden Energieversorgung immer bedeutender. Diese Kapitel wurden von unserem neuen Autor, Prof. Dr. *Joachim Kempkes* von der Hochschule Würzburg-Schweinfurt in hervorragender Weise in Theorie und Praxis herausgearbeitet. Im nächsten Kapitel G werden die Sensoren und Aktoren behandelt, die im Maschinen- und Anlagenbau eine immer wichtigere Rolle spielen. Die vielfältigen Signale müssen zu den Auswerte- und Aktorstationen transportiert werden. Deshalb spielen die dazu notwendigen Kommunikationstechnologien eine wichtige Rolle, wie sie bei den Feldbussen vorliegt (Kapitel H). Das Werk schließt im Kapitel I mit der Messtechnik und ihren Anwendungen. Die meisten Kapitel enthalten Übungsaufgaben, mit denen der Leser seine Kenntnisse prüfen und vertiefen kann. Am Ende jedes Kapitels wird auf weiterführende Literatur verwiesen, durch die der Leser seine erworbenen Kenntnisse vertiefen kann.

Jeder Abschnitt ist in gleicher Weise gegliedert: Eine strukturierte Übersicht zeigt die Zusammenhänge auf, Beispiele verdeutlichen die Rechnungen und die Gedankengänge, Diagramme und Fotos zeigen anschaulich die Anwendungen.

Das Werk ist speziell für Maschinenbauingenieure geschrieben, die entweder noch studieren oder im Beruf elektronische Anwendungen in der Praxis einsetzen müssen. So ist dieses Werk ein Lehrbuch und ein praktisches Nachschlagewerk.

Interessanterweise wird dieses Werk auch von Wirtschaftsingenieuren und Mechatronikern wegen seines übersichtlichen Aufbaus, seines strukturierten Wissens und seiner didaktischen Konsistenz sehr geschätzt.

Zu danken haben wir zahlreichen Unternehmen, die uns durch Anschauungsmaterial und durch Beispiele im praktischen Einsatz unterstützt haben. Ganz besonderer Dank gilt dem Springer-Verlag, hier insbesondere Frau *Eva Hestermann-Beyerle* und Herrn Dr. *Hubertus von Riedesel*, die in gewohnter exzellenter Weise dieses Werk betreut haben. Ein herzliches Dankeschön gilt aber auch den Damen und Herren der Herstellung, die oft komplizierte Zeichnungen in eine optimale, lesegerechte und verständliche Form gebracht haben. Nicht vergessen möchten wir unsere Ehefrauen und Kinder, die uns mit viel Verständnis bei der Arbeit begleitet haben.

Wir hoffen, dass dieses völlig neu konzipierte Werk den Studierenden der Ingenieurwissenschaften, speziell den Maschinenbauern, aber auch den Wirtschaftsingenieuren und Mechatronikern, eine gute Hilfe bei der Erarbeitung des Wissens bietet und den Ingenieuren im Beruf ein wertvoller Begleiter bei den praktischen Umsetzungen sein wird. Gerne nehmen wir Kritik und Verbesserungsvorschläge aus dem Leserkreis entgegen und wünschen Spaß und Kenntnisgewinn mit diesem Werk.

Heubach, Esslingen, Nürtingen und Schweinfurt
Juli 2011

Ekbert Hering
Rolf Martin
Jürgen Gutekunst
Joachim Kempkes

Inhaltsverzeichnis

A Grundlagen der Elektrotechnik	1
A.1 Physikalische Grundgesetze und Definitionen	1
A.1.1 Ladung	1
A.1.2 Spannung	2
A.1.3 Strom	3
A.1.4 Ohm'sches Gesetz	4
A.1.5 Widerstand	5
A.1.6 Arbeit und Leistung	6
A.1.7 Kirchhoff'sche Regeln	7
A.2 Gleichstromkreise mit linearen Komponenten	10
A.2.1 Zweipolquellen	10
A.2.2 Reihenschaltung von Widerständen	14
A.2.3 Parallelschaltung von Widerständen	15
A.2.4 Gemischte Schaltungen	16
A.2.5 Messung elektrischer Größen	23
A.3 Elektrisches Feld	28
A.3.1 Feldbegriff	28
A.3.2 Kondensator	29
A.3.3 Laden und Entladen von Kondensatoren	32
A.3.4 Energieinhalt des elektrischen Feldes	32
A.4 Magnetisches Feld	35
A.4.1 Feldbegriff	35
A.4.2 Kraftwirkungen im Magnetfeld	39
A.4.3 Materie im Magnetfeld	42
A.4.4 Magnetischer Kreis	46
A.4.5 Elektromagnetische Induktion	54
A.4.6 Selbstinduktion	58
A.4.7 Gegeninduktion	60
A.4.8 Ein- und Ausschalten von Stromkreisen mit Induktivitäten	62
A.4.9 Energieinhalt des magnetischen Feldes	63

A.5	Wechselstromkreise	66
A.5.1	Benennungen und Definitionen	66
A.5.2	Sinusförmige Ströme und Spannungen	69
A.5.3	Zeigerdiagramm	72
A.5.4	Widerstand, Spule und Kondensator bei sinusförmigem Wechselstrom	78
A.5.5	Wechselstromschaltungen von Widerstand, Spule und Kondensator	80
A.5.6	Blindstromkompensation	90
A.5.7	Schwingkreise	92
A.5.8	Ortskurven	99
A.5.9	Transformator	101
A.6	Drehstrom	115
A.6.1	Entstehung der Dreiphasenwechselspannung	115
A.6.2	Sternschaltung	117
A.6.3	Dreieckschaltung	121
B	Halbleitertechnik	127
B.1	Bauelemente	127
B.1.1	Leitungsmechanismen	127
B.1.2	Dioden	136
B.1.3	Transistoren	145
B.1.4	Feldeffekttransistoren (FET)	154
B.1.5	Thyristoren und Triacs	168
B.1.6	Optoelektronik	171
B.2	Analoge integrierte Schaltungen	193
B.2.1	Operationsverstärker	193
B.2.2	Weitere analoge integrierte Schaltungen	197
B.2.3	DA- und AD-Wandler	200
B.3	Digitale integrierte Schaltungen	211
B.3.1	Logische Verknüpfungen und Schaltzeichen	212
B.3.2	Logikfamilien	216
C	Leistungselektronik	223
C.1	Bauelemente der Leistungselektronik	223
C.1.1	Passive Bauelemente	224
C.1.2	Aktive Bauelemente	245
C.2	Leistungselektronik in der Praxis	257
C.2.1	Anwendung passiver Bauelemente	257
C.2.2	Aktorsteuerung	260
C.2.3	Brückenschaltungen	267
C.2.4	Unterbrechungsfreie Stromversorgungen (USV)	274
C.2.5	Spannungswandler	280

D Elektrische Maschinen	293
D.1 Wirkungsprinzipien elektromechanischer Energiewandler	293
D.1.1 Elektrodynamisches Prinzip	293
D.1.2 Kräfte auf Grenzflächen	295
D.1.3 Prinzipieller Aufbau rotierender elektrischer Maschinen	296
D.2 Leistungsbilanz	299
D.3 Ausführungsvarianten	300
D.4 Ausnutzung und Baugröße	301
D.5 Gleichstrommotor	307
D.5.1 Prinzipieller Aufbau	307
D.5.2 Aufbau des Ankers	308
D.5.3 Kommutierung	311
D.5.4 Induzierte Spannung und Drehmoment	313
D.5.5 Betriebsverhalten	316
D.5.6 Reihenschlussmaschine/Universalmotor	319
D.5.7 Drehzahlverstellung des Universalmotors	322
D.5.8 Typische Daten von Gleichstrommaschinen	323
D.6 Synchronmotor	326
D.6.1 Synchronmotor als elektronisch kommutierter Gleichstrommotor	327
D.6.2 Wechselfelder und Drehfelder	332
D.6.3 Drehfeldwicklungen	335
D.6.4 Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm	338
D.6.5 Drehmoment der Vollpolmaschine	341
D.6.6 Permanent erregter Synchronservomotor	342
D.6.7 Synchronmotoren mit Zahnspulenwicklung	346
D.6.8 Reluktanzmotor	347
D.6.9 Schrittmotoren	350
D.6.10 Klauenpolgenerator („Lichtmaschine“)	351
D.7 Asynchronmotor	353
D.7.1 Bedeutung der Asynchronmaschine	353
D.7.2 Aufbau und Ersatzschaltbild	354
D.7.3 Stromortskurve der Asynchronmaschine	359
D.7.4 Drehmoment und Kloss'sche Formel	362
D.7.5 Drehzahlverstellung der Asynchronmaschine	364
D.7.6 Einphasen-Asynchronmotor	368
E Antriebstechnik	373
E.1 Prozessbeeinflussung durch elektrische Antriebe	373
E.2 System „Arbeitsmaschine – Antriebsmaschine“	374
E.3 Betriebsarten	375
E.4 Bauformen, Schutzarten, Kühlung, Isolation	377
E.4.1 Bauformen	377
E.4.2 Schutzarten	378
E.4.3 Wärmeklassen und Kühlung	379

E.5	Wirkungsgradklassen	382
E.6	Optimale Getriebeübersetzung	383
E.6.1	Optimale Getriebeübersetzung ohne Drehzahl-Begrenzung	384
E.6.2	Optimale Getriebeübersetzung mit begrenzter Lastdrehzahl	386
E.6.3	Optimale Getriebeübersetzung mit begrenzter Motordrehzahl	388
E.7	Servoantriebe	388
E.7.1	Struktur und Komponenten eines Servoantriebs	390
E.7.2	Anforderungen	391
E.7.3	Sensoren	392
E.8	Aktorsysteme für Massenströme (Stellantriebe)	395
E.9	Generatorkonzepte für Windkraftanlagen	401
E.9.1	Grundlagen	401
E.9.2	Polumschaltbare Asynchrongeneratoren	403
E.9.3	Doppelt-gespeister Asynchrongenerator	403
E.9.4	Synchrongenerator	407
F	Elektrische Energieversorgung	409
F.1	Energieerzeugung	410
F.1.1	Primärenergie	410
F.1.2	Belastungskurven	411
F.1.3	Kraftwerke	413
F.2	Energieübertragung	421
F.2.1	Übertragungssysteme	421
F.2.2	Drehstromnetze	423
F.2.3	Netzstrukturen	424
F.2.4	Verbundbetrieb	424
F.3	Schutzmaßnahmen	425
F.4	Niederspannungsschaltanlagen	429
G	Sensoren und Aktoren	433
G.1	Sensoren	433
G.1.1	Grundlagen	433
G.1.2	Weg- und Positions-Sensoren	435
G.2	Aktoren	460
G.2.1	Hydraulische Aktoren	461
G.2.2	Pneumatische Aktoren	463
G.2.3	Piezo-Steller	464
G.3	Anschluss technik	467
G.3.1	Aktorstecker	467
G.3.2	Sensorstecker	468
G.3.3	Standardisierung der Steckerbelegung und die Vorteile	469

H	Feldbusse	471
H.1	Grundlagen zu Feldbussen	474
H.1.1	Topologie von Feldbussen	474
H.1.2	Allgemeine Anforderungen an Feldbussysteme	475
H.2	Standard-Feldbusse	476
H.2.1	Profibus	478
H.2.2	CAN-Bus/DeviceNet	482
H.2.3	AS-Interface	488
H.2.4	Interbus-S	490
H.2.5	CC-Link	493
H.3	Ethernet basierende Feldbusse	494
H.3.1	Grundlegendes zur Ethernet-Kommunikation	496
H.3.2	TCP/IP	503
H.3.3	ProfiNet	504
H.3.4	Ethernet/IP	506
H.4	IO-Link	509
I	Elektrische Messtechnik	515
I.1	Grundlagen	515
I.1.1	Definitionen und Begriffe	515
I.1.2	Einteilung elektrischer Messgeräte	518
I.1.3	Übersicht über die Darstellung der Messwerte	519
I.1.4	Messfehler, Genauigkeit und Empfindlichkeit	519
I.2	Messung von Spannung und Strom	526
I.2.1	Gleichstromkreis	526
I.2.2	Wechselstromkreis	528
I.2.3	Zeitlich veränderliche Spannungen	531
I.3	Messung von Widerständen	533
I.3.1	Messung Ohm'scher Widerstände im Gleichstromkreis	533
I.3.2	Messung von Blind- und Scheinwiderständen im Wechselstromkreis	535
I.4	Arbeitsmessung	537
I.5	Leistungsmessung	538
I.6	Zeit- und Frequenzmessung	538
I.6.1	Elektronischer Zähler	538
I.6.2	Zeit- und Frequenzmessung	540
	Lösungen der Übungsaufgaben	543
	Sachverzeichnis	561

Über die Autoren

Dipl.-Ing. Jürgen Gutekunst Der Berufseinstieg erfolgte 1984 bei SEL in Zuffenhausen im Bereich der Flugzeugnavigation. Seit 1990 leitete er bei der Fa. Gebr. Heller GmbH in Nürtingen die Hardware-Entwicklung, bevor er 1999 die technische Geschäftsleitung bei Murrelektronik übernommen hat. Seit 2006 ist er bei der Fa. Balluff GmbH mit dem Auf- und Ausbau des neuen Geschäftsbereiches Networking und Connectivity beauftragt und in verschiedenen Arbeitskreisen zum Thema „dezentrale Installationstechnik“ tätig.

Prof. Dr. rer. nat. Dr. rer. pol. Ekbert Hering Er war über 10 Jahre Rektor der Hochschule Aalen und verfügt über eine über 30 Jahre währende Lehrererfahrung. Er hat sich seit dem Erscheinen des Buches „Physik für Ingenieure“ als erfolgreicher Autor von Fach-, Sach- und Lehrbüchern einen Namen gemacht. Der Name Hering steht für die Fähigkeit, mit Hilfe eines kompetenten Autorenteam's Themengebiete vorbildlich strukturiert und praxisnah aufzuarbeiten.

Prof. Dr.-Ing. Joachim Kempkes Während seiner Assistentenzeit am Institut für Elektrische Maschinen der RWTH Aachen beschäftigte er sich ab 1987 mit der Optimierung von Servomotoren. Danach war er bei der Siemens AG in Nürnberg ab 1992 als Entwicklungsingenieur im Bereich Bahnantriebe tätig und ab 1994 als Entwicklungsleiter für den Bereich Stellantriebe verantwortlich. 1997 erfolgte der Ruf an die Fachhochschule Würzburg-Schweinfurt für das Lehrgebiet Elektromechanische Energiewandlung und Mechatronische Systeme. Dort leitet er in Schweinfurt das „Mechatroniklabor I - Elektrische Aktoren“.

Prof. Dr. rer. nat. Dr. h. c. Rolf Martin In einer typischen Laufbahn des zweiten Bildungswegs folgte auf eine Mechanikerlehre ein Maschinenbau-Studium an der Staatlichen Ingenieurschule Esslingen und anschließend ein Physik-Studium an der Universität Stuttgart mit Schwerpunkt Halbleiterphysik. Als Professor an der Hochschule Esslingen konnte er in über 30 Jahren der Lehre in Physik und Optoelektronik seine Fähigkeiten zur anschaulichen Vermittlung technisch-naturwissenschaftlicher Zusammenhänge weiterentwickeln.

Kapitel A

Grundlagen der Elektrotechnik

A.1 Physikalische Grundgesetze und Definitionen

A.1.1 Ladung

Die elektrischen Erscheinungen gehen zurück auf die Existenz elektrischer Ladungen. Ob ein Körper elektrisch geladen ist kann man beispielsweise daran erkennen, dass er auf andere geladene Körper eine Kraft ausübt oder dass er in elektrischen und magnetischen Feldern eine Kraft erfährt.

Es gibt zwei Arten elektrischer Ladungen, die als *positive* und *negative* Ladung bezeichnet werden. Zwischen den verschiedenen Ladungstypen treten folgende Wechselwirkungen auf:

Gleichnamige Ladungen stoßen sich ab, ungleichnamige Ladungen ziehen sich an.

Die elektrische Ladung ist quantisiert, das bedeutet, dass die Ladung Q , die ein Körper trägt, immer ein ganzzahliges Vielfaches der *Elementarladung* e ist:

$$Q = Ne \quad (\text{A-1})$$

mit $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{C}$.

Die Maßeinheit der Ladung ist das *Coulomb* oder die *Ampere-Sekunde*:

$$[Q] = 1 \text{ C} = 1 \text{ As}.$$

Die elektrische Ladung ist stets an Materie gebunden. Die Träger der elektrischen Ladung sind die Elementarteilchen, aus denen die Atome aufgebaut sind. Beispielsweise tragen die *Protonen* im Atomkern jeweils eine *positive* Elementarladung, während die *Elektronen* in der Atomhülle jeweils eine *negative* Elementarladung tragen. Insgesamt ist ein Atom elektrisch neutral, da die Zahl der positiven Elementarladungen im Kern so groß ist wie die Zahl der negativen in der Elektronenhülle.

Ist ein Körper geladen, so bedeutet das stets, dass dieses Gleichgewicht gestört ist und zusätzliche Ladungen aufgebracht bzw. Ladungen von dem Körper entfernt wurden. Wird beispielsweise ein Glasstab mit einem Leder kräftig gerieben, dann werden Elektronen abgestreift und der Glasstab bleibt positiv geladen zurück (Vorzeichendefinition nach *Benjamin Franklin*).

A.1.2 Spannung

Eine räumlich verteilte Ansammlung elektrischer Ladungen spannt ein *elektrisches Feld* auf, d. h. ein Raumgebiet, in dem auf eine Ladung eine Kraft ausgeübt wird (mehr zum Feldbegriff in Abschn. A.3). Die Kraft auf eine *positive Probeladung* Q_0 wird bestimmt durch die elektrische *Feldstärke* E am Ort der Probeladung:

$$\mathbf{F} = Q_0 \mathbf{E} \quad (\text{A-2})$$

Wird die Ladung Q_0 von einem Ort 1 längs einer beliebigen Kurve zum Ort 2 verschoben, dann erfordert dies die Arbeit

$$W_{12} = - \int_1^2 \mathbf{F} \, ds = -Q_0 \int_1^2 \mathbf{E} \, ds \quad (\text{A-3})$$

Ist diese Arbeit positiv, dann liegt der Punkt 2 auf höherer potenzieller Energie als der Punkt 1, wobei gilt:

$$E_{\text{pot}, 2} - E_{\text{pot}, 1} = W_{12}. \quad (\text{A-4})$$

Die Verschiebearbeit W_{12} ist nach Gl. (A-3) abhängig von der Probeladung Q_0 . Eine Größe, die nur abhängig ist vom vorhandenen elektrischen Feld ist die *elektrische Spannung*

$$\begin{aligned} U_{12} &= \int_1^2 \mathbf{E} \, ds = -\frac{W_{12}}{Q_0} \\ &= \frac{E_{\text{pot},1}}{Q_0} - \frac{E_{\text{pot},2}}{Q_0} = \varphi_1 - \varphi_2. \end{aligned} \quad (\text{A-5})$$

Die elektrische Spannung zwischen zwei Punkten 1 und 2 ist also identisch mit der Arbeit, welche die Feldkräfte verrichten, wenn sie die Ladungsmenge $Q = 1 \text{ C}$ von 1 nach 2 bewegen.

Die Einheit der Spannung ist das Volt:

$$[U] = 1 \text{ V} = 1 \text{ J/C} = 1 \text{ J/(As)}.$$

Mit φ_1 und φ_2 bezeichnet man die *Potenziale* der Punkte 1 und 2. Deren Absolutwert kann willkürlich festgelegt werden. Die Spannung als Potentialdifferenz zwischen zwei Punkten des elektrischen Feldes ist unabhängig vom Absolutwert des Potentials. Ist das Potenzial φ_1 des Punktes 1 höher als das Potenzial φ_2 des Punktes 2, dann ist die Spannung U_{12} positiv.

In einer Schaltung wird meist einem Punkt das Bezugspotenzial $\varphi = 0$ zugeordnet. Dieser Punkt wird auch als *Masse* bezeichnet. In der Regel ist die Masse mit dem Gehäuse des elektrischen Gerätes verbunden, das seinerseits *geerdet* ist, also auf gleichem Potenzial wie die Erde liegt. Dies verhindert, dass gefährliche Potenzialunterschiede zwischen Gehäuse und Benutzer entstehen können.

Aufgrund einer Spannung zwischen zwei Punkten werden sich bewegliche positive Ladungsträger vom Ort des höheren Potentials (höhere potenzielle Energie) zum Ort des niedrigeren Potentials (niedrigere potenzielle Energie) bewegen: es fließt ein elektrischer Strom.

A.1.3 *Strom*

Ladungsträger, die sich beispielsweise durch einen Leiter bewegen, bilden einen elektrischen Strom. Bewegt sich an einer bestimmten Stelle des Leiters in der Zeit t gleichmäßig die Ladungsmenge Q vorbei, dann fließt ein *Gleichstrom* der *Stromstärke* (meist kurz *Strom*)

$$I = \frac{Q}{t} \quad (\text{A-6})$$

Die Einheit der Stromstärke ist das Ampere: $[I] = 1 \text{ A}$. Sie ist eine Basiseinheit im SI-System:

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

Fließt die Ladung nicht gleichmäßig, so ist die Stärke eines zeitlich veränderlichen Stromes

$$i(t) = \frac{dQ}{dt}. \quad (\text{A-7})$$

Für die zwischen den Zeitpunkten t_1 und t_2 transportierte Ladung gilt:

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt. \quad (\text{A-8})$$

Wird die Stromstärke I auf den Querschnitt A bezogen, durch den der Strom fließt, dann ergibt sich die *Stromdichte*

$$J = \frac{I}{A}, \quad (\text{A-9})$$

mit der Einheit $[J] = 1 \text{ A/m}^2$.

Die Stromdichte in einem Draht darf einen bestimmten Grenzwert nicht überschreiten. Hinweise zur *Strombelastbarkeit* von Kabeln finden sich in DIN VDE 0298, Teil 4.

Der *Richtungssinn* des elektrischen Stromes stimmt nach DIN EN 60375 mit der Bewegungsrichtung *positiver* Ladungsträger überein. Diese Richtung wird auch als *technische Stromrichtung* bezeichnet. Durch diese an sich willkürliche Festlegung ergibt sich, dass in metallischen Leitern bei denen der Ladungstransport auf der Bewegung negativ geladener Elektronen beruht, die Bewegung der Ladungsträger entgegengesetzt zum Richtungssinn des Stromes erfolgt.

In einer Schaltung wird für den Strom ein *Bezugssinn* gewählt, der durch einen Bezugspfeil in den Schaltplan eingezeichnet wird (Bild A-1a). Ist der Strom positiv, dann stimmen Bezugssinn und Richtungssinn überein. Bei negativem Strom ist die Stromrichtung dem Bezugspfeil entgegengesetzt gerichtet.