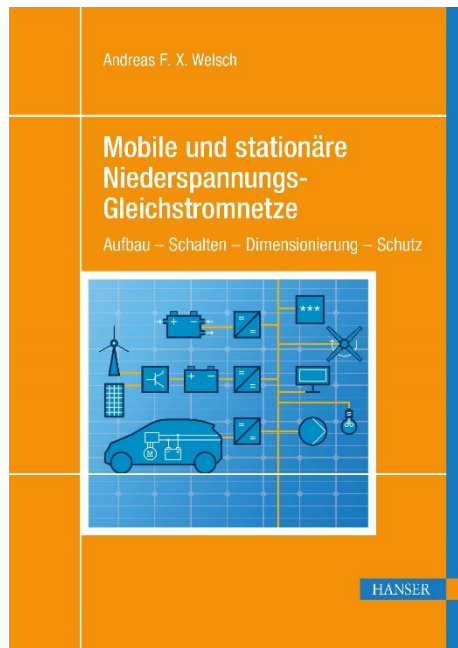


# HANSER



## Leseprobe

zu

# Mobile und stationäre Niederspannungs- Gleichstromnetze

von Andreas F. X. Welsch

Print-ISBN: 978-3-446-47997-5  
E-Book-ISBN: 978-3-446-48039-1

Weitere Informationen und Bestellungen unter  
<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446479975>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# Inhalt

<b>Vorwort</b> .....	<b>XIII</b>
<b>Einführung</b> .....	<b>1</b>
<b>1 Topologien von Niederspannungs-Gleichstromnetzen</b> .....	<b>5</b>
1.1 Betriebsspannungen und Abnahmeleistungen.....	5
1.2 Hybride Gleich- und Wechselstromsysteme .....	6
1.2.1 Drehstromnetze mit Gleichstromkomponenten.....	7
1.2.2 Wechselstromnetze mit Gleichstromkomponenten .....	8
1.3 Parallele Gleich- und Wechselstromsysteme .....	8
1.3.1 Parallele Gleichstromsysteme für Gebäude .....	9
1.3.2 PoE-Systeme für Kommunikationsgeräte .....	10
1.3.3 KNX-Systeme für die Gebäudeautomatisierung .....	11
1.4 Reine Gleichstromsysteme .....	12
1.4.1 Gleichstromsysteme für kommerziell genutzte Gebäude .....	12
1.4.2 Gleichstromsysteme für Rechenzentren .....	13
1.4.3 Gleichstromsysteme für netzferne Gebiete .....	15
1.5 Bordnetze für Straßenkraftfahrzeuge .....	17
1.5.1 Bordnetze für Verbrennungsmotorantriebe .....	17
1.5.2 Bordnetze für Elektromotorantriebe .....	20
1.6 Systeme nach Art ihrer Erdverbindung .....	21
1.6.1 TN-Systeme.....	22
1.6.2 TT-Systeme .....	23
1.6.3 IT-Systeme .....	24
1.6.4 Erdungssysteme für Elektrofahrzeuge .....	25
1.7 Literatur .....	26

<b>2</b>	<b>Spannungsquellen für Gleichstrom</b>	<b>29</b>
2.1	Gleichgerichteter Drehstrom	29
2.1.1	Drehstromnetz mit Brückengleichrichter	29
2.1.2	Drehstrom-Synchrongenerator mit Brückengleichrichter	31
2.2	Photovoltaik-Anlagen	33
2.2.1	Elektrisches Verhalten	33
2.2.2	Netzunabhängiger Betrieb eines PV-Moduls mit einer Last	36
2.2.2.1	PV-Modul mit Lastwiderstand	36
2.2.2.2	PV-Modul mit Akkumulator	38
2.2.2.3	PV-Modul mit Gleichspannungswandler	40
2.2.3	Dimensionierungshinweise	41
2.3	Literatur	45
<b>3</b>	<b>Akkumulatoren</b>	<b>47</b>
3.1	Physikalische Grundlagen	47
3.2	Bleiakkumulatoren	50
3.2.1	Aufbau und Funktionsweise	51
3.2.2	Nennkapazität	51
3.2.3	Leerlaufspannung	54
3.2.4	Innenwiderstand	55
3.3	Lithium-Ionen-Akkumulatoren	58
3.3.1	Aufbau und Funktionsweise	59
3.3.2	Technische Kennwerte	60
3.4	Laden und Entladen von Akkumulatoren	63
3.4.1	Ladeverfahren	63
3.4.2	Laden von Akkumulatoren in Reihe	66
3.4.2.1	Problematik beim Laden	66
3.4.2.2	Ladungsausgleich durch Entladen von Zellen	68
3.4.2.3	Ladungsausgleich durch Umladen von Zellen	70
3.4.2.4	Ladungsausgleich durch Nachladen von Zellen	73
3.4.3	Entladen von Akkumulatoren	75
3.4.3.1	Entladen eines einzelnen Akkumulators	75
3.4.3.2	Entladen von Akkumulatoren in Reihe	76
3.5	Batterie-Management-Systeme	77
3.6	Dimensionierungshinweise	78
3.7	Literatur	80

<b>4</b>	<b>Spannungswandler für Gleichstrom .....</b>	<b>83</b>
4.1	Tiefsetzsteller .....	83
4.1.1	Prinzip des Tiefsetzstellers .....	84
4.1.2	Periodisches Aus- und Einschalten des Schalters .....	86
4.1.3	Zeitverlauf und Mittelwert von Ausgangsstrom und -spannung .....	87
4.1.4	Tiefsetzsteller mit Glättungskondensator .....	91
4.1.4.1	Wirkungsweise des Glättungskondensators .....	92
4.1.4.2	Abschätzung der Glättungskapazität .....	94
4.1.5	Ausgangsstrom und -spannung mit realen Bauelementen .....	98
4.1.5.1	Wirkungsweise einer realen Diode .....	98
4.1.5.2	Abschätzung der Lückgrenze .....	101
4.2	Hochsetzsteller .....	103
4.2.1	Prinzip des Hochsetzstellers .....	104
4.2.2	Zeitverlauf und Mittelwert von Spulen- und Ausgangsstrom .....	107
4.2.3	Hochsetzsteller mit Glättungskondensator .....	109
4.2.3.1	Wirkungsweise des Glättungskondensators .....	109
4.2.3.2	Abschätzung der Kapazität .....	113
4.3	Eintaktwandler .....	114
4.3.1	Prinzip des Eintaktwandlers .....	115
4.3.2	Eintaktwandler mit Übersetzung .....	118
4.3.3	Eintaktwandler mit Glättungskondensator .....	119
4.4	Gegentaktwandler .....	123
4.4.1	Prinzip des Gegentaktwandlers .....	124
4.4.2	Kaskadierung des Gegentaktwandlers .....	126
4.5	Dimensionierungshinweise .....	127
4.6	Literatur .....	132
<b>5</b>	<b>Unterbrechung von Niederspannungs-Gleichströmen .....</b>	<b>133</b>
5.1	Theorie des Gleichstrom-Lichtbogens .....	133
5.1.1	Entstehung eines Lichtbogens .....	133
5.1.2	Spannung-Strom-Kennlinie .....	135
5.1.3	Stabilität des Lichtbogens .....	137
5.2	Theorie der Gleichstromunterbrechung .....	139
5.2.1	Löschung eines Lichtbogens durch Verlängerung .....	139
5.2.2	Gleichstromunterbrechung einer ohmschen Last .....	142
5.2.3	Lichtbogenleistung und -energie .....	145
5.2.3.1	Maximale Lichtbogenleistung .....	145
5.2.3.2	Minimale Lichtbogen-Zündleistung .....	146
5.2.3.3	Lichtbogenenergie .....	148

5.2.4	Gleichstromunterbrechung einer ohmsch-induktiven Last .....	149
5.2.5	Gleichstromunterbrechung einer motorischen Last .....	153
5.3	Forcierung der Gleichstromunterbrechung .....	156
5.3.1	Mehrpole Unterbrechung .....	156
5.3.2	Lichtbogenlöschbleche .....	158
5.3.3	Kühlung des Lichtbogens .....	160
5.4	Zusammenfassung .....	161
5.5	Literatur .....	163
<b>6</b>	<b>Schalter und Steckverbindungen .....</b>	<b>165</b>
6.1	Stromunterbrechung bei Schaltern .....	165
6.1.1	Mechanische Schalter .....	165
6.1.2	Halbleiterschalter .....	167
6.1.3	Hybridschalter .....	168
6.2	Stromunterbrechung bei zweipoligen 230-V-Steckverbindungen .....	168
6.2.1	Lichtbogenentwicklung bei ohmscher Last .....	169
6.2.2	Verlauf der Lichtbogenkennwerte mit dem Steckerweg .....	171
6.2.3	Parameter der Lichtbogengleichung .....	178
6.2.4	Abhängigkeit der Lichtbogenkennwerte von der Betriebsspannung ....	181
6.2.5	Öffnen einer Steckverbindung bei induktiven oder motorischen Lasten	186
6.2.6	Vergleich der Stromunterbrechung mit Wechselstrom .....	188
6.3	Stromunterbrechung bei 48-V-Bordnetzsteckverbindungen .....	192
6.3.1	Lichtbogenentwicklung bei ohmscher Last .....	192
6.3.2	Verlauf der Lichtbogenkennwerte mit dem Steckerweg .....	194
6.3.3	Parameter der Lichtbogengleichung .....	198
6.3.4	Grenzen der Lichtbogenentstehung .....	199
6.4	Literatur .....	201
<b>7</b>	<b>Dimensionierung des Leitungsnetzes .....</b>	<b>203</b>
7.1	Leiterquerschnitt und Belastungsstrom .....	203
7.1.1	Belastungsstrom der Leitungen .....	204
7.1.2	Erforderlicher Leitungsquerschnitt .....	205
7.2	Leitungslänge und Spannungsfall .....	207
7.2.1	Spannungsfall längs einer Leitung .....	207
7.2.2	Maximale Leitungslänge .....	208
7.2.3	Maximaler Spannungsfall und minimale Betriebsspannung .....	209
7.3	Leistungsverluste und übertragbare Leistung .....	212
7.3.1	Leistungsverluste .....	212
7.3.2	Übertragbare Leistung .....	213

7.4	Spannungsfall und Verluste typischer Leitungsanordnungen .....	215
7.4.1	Einfach gespeiste Leitung mit mehrfacher Belastung .....	216
7.4.2	Einfach gespeiste Leitung mit teils gleichmäßiger Belastung .....	218
7.4.3	Einfach gespeiste Leitung mit gleichmäßiger Belastung .....	220
7.4.4	Ringleitung mit einfacher oder mehrfacher Belastung .....	223
7.4.5	Ringleitung mit gleichmäßiger Belastung .....	226
7.5	Reduzierung von Spannungsfall und Verluste durch Ringleitungen.....	229
7.5.1	Ringleitungen mit gleichmäßiger Strombelastung .....	229
7.5.2	Ringleitungen mit ungleichmäßiger Strombelastung.....	232
7.6	Literatur .....	233
<b>8</b>	<b>Umstellung von Wechsel- auf Gleichstrom .....</b>	<b>235</b>
8.1	Betrieb von Wechselstromgeräten mit Gleichstrom .....	235
8.2	Auswahl der Betriebsspannung .....	236
8.3	Berechnungsgleichungen .....	237
8.3.1	Verwendung von Wechselstromleitungen .....	237
8.3.2	Verwendung von Drehstromleitungen .....	238
8.4	Dimensionierung einer Umstellung auf Gleichstrom .....	240
8.4.1	Beschreibung der Niederspannungsinstallation .....	240
8.4.2	Berechnung der Stromkreise für Gleichstrom .....	242
8.4.3	Vergleich mit Wechselstrom bei 230 V .....	250
8.4.4	Minimierung der Betriebsspannung .....	251
8.5	Umstellung von Einfachleitungen auf Ringleitungen .....	253
8.6	Literatur .....	257
<b>9</b>	<b>Berechnung von Kurzschlussströmen .....</b>	<b>259</b>
9.1	Entstehung eines Kurzschlusses .....	259
9.2	Kurzschlussstromquellen und Kurzschlussstromzeitverläufe.....	260
9.3	Netzeinspeisung mit Drehstrombrücke .....	263
9.3.1	Berechnungsverfahren der DIN EN 61660-1 .....	263
9.3.2	Vereinfachtes Berechnungsverfahren .....	265
9.3.2.1	Dauerkurzschlussstrom .....	265
9.3.2.2	Stoßkurzschlussstrom .....	268
9.3.3	Dimensionierungshinweise.....	269
9.3.3.1	Kurzschlussströme für ein 200-V-Netz .....	269
9.3.3.2	Kurzschlussströme in Abhängigkeit von der Betriebsspannung .....	271
9.4	Einspeisung ortsfester Bleiakumulatoren .....	273
9.4.1	Berechnungsverfahren der DIN EN 61660-1 .....	273

9.4.2	Einflussgrößen .....	275
9.4.3	Dimensionierungshinweise.....	277
9.4.3.1	Kurzschlussströme für ein 200-V-Netz .....	277
9.4.3.2	Kurzschlussströme in Abhängigkeit von der Betriebsspannung .....	278
9.5	Literatur .....	280
<b>10</b>	<b>Leitungs-, Geräte- und Personenschutz .....</b>	<b>281</b>
10.1	Leitungs- und Geräteschutz (Schutz gegen Überstrom) .....	282
10.1.1	Geräteschutz .....	284
10.1.2	Leitungsschutz.....	284
10.1.3	Photovoltaik-Schutz .....	286
10.2	Personenschutz (Schutz gegen elektrischen Schlag) .....	288
10.2.1	Gefährdung von Personen bei Durchströmung mit Gleichstrom .....	288
10.2.2	Körperstrom und Berührspannung im Fehlerfall .....	289
10.2.2.1	TN-System .....	289
10.2.2.2	TT-System .....	295
10.2.2.3	IT-System .....	298
10.2.2.4	Bipolare Systeme .....	299
10.2.3	Zulässige Durchströmungsdauer und erforderliche Abschaltzeit .....	300
10.2.3.1	Zulässige Durchströmungsdauer im Vergleich zu Wechselstrom .....	300
10.2.3.2	Abhängigkeit des Körperstroms von der Berührspannung ....	302
10.2.3.3	Abhängigkeit der erforderlichen Abschaltzeit von der Berührspannung .....	303
10.2.4	Einhaltung der erforderlichen Abschaltzeit .....	305
10.2.4.1	Überstrom-Schutzeinrichtung.....	305
10.2.4.2	Fehlerstrom-Schutzeinrichtung (RCD) .....	307
10.3	Personenschutz bei TN- und TT-Systemen .....	307
10.3.1	Erforderliche Abschaltzeit in Abhängigkeit von der Betriebsspannung	307
10.3.2	Mindest-Kurzschlussströme zur Einhaltung der Abschaltzeit .....	309
10.4	Betriebsspannungsgrenzen für Überstrom-Schutzeinrichtungen als Personenschutz .....	312
10.4.1	Netzgespeiste TN-Systeme .....	312
10.4.1.1	Berechnung des minimalen Dauerkurzschlussstroms .....	312
10.4.1.2	Ermittlung der Betriebsspannungsgrenzen.....	316
10.4.2	Bleiakkumulatorgespeiste TN-Systeme .....	317
10.4.2.1	Berechnung des minimalen Dauerkurzschlussstroms .....	317
10.4.2.2	Ermittlung der Betriebsspannungsgrenzen.....	319
10.4.3	Zusammenfassung .....	321
10.5	Literatur .....	321

<b>11</b>	<b>Brandschutz bei Längsfehlern .....</b>	<b>323</b>
11.1	Lichtbögen und Brandauslösung .....	323
11.1.1	Arten von Fehlerlichtbögen .....	323
11.1.2	Brandentstehung bei Längsfehlern .....	324
11.2	Gefährdungsbeurteilung von Fehlern mit Lichtbögen .....	326
11.2.1	Fehlerlichtbogenprüfungen .....	326
11.2.1.1	Kabelprobe und Prüfanordnung .....	326
11.2.1.2	Prüfparameter .....	328
11.2.1.3	Auswertegrößen .....	328
11.2.2	Lichtbogen- und Flammenentwicklung bei Gleichstrom .....	329
11.2.3	Lichtbogenspannung und Lichtbogenleistung beim Flammenauftritt ..	332
11.2.4	Gefährdungspotenzial für die Entzündung einer Kabelisolierung.....	334
11.2.4.1	Abhängigkeit von der Spannung .....	334
11.2.4.2	Abhängigkeit vom Strom .....	335
11.2.4.3	Abhängigkeit von der Leistung.....	337
11.2.5	Gefährdungspotenzial im Vergleich mit Wechselstrom .....	338
11.2.5.1	Lichtbogenspannung und Lichtbogenleistung bei Flammenauftritt .....	338
11.2.5.2	Gefährdungspotenzial für die Entzündung einer Kabelisolierung .....	339
11.2.5.3	Zusammenfassung .....	341
11.3	Detektion von Gleichstrom-Fehlerlichtbögen .....	342
11.3.1	Lichtbogenrauschen bei Kupferleitern .....	342
11.3.1.1	Lichtbogenzündung und Lichtbogenlöschung .....	342
11.3.1.2	Elektrisches Rauschen des Lichtbogenplasmas .....	345
11.3.1.3	Rauschleistung des Lichtbogens .....	346
11.3.2	Messtechnische Erfassung des Lichtbogenrauschens .....	349
11.4	Abschaltung eines seriellen Fehlerlichtbogens .....	352
11.4.1	Lichtbogenkennwerte bei einem simulierten Leiterbruch .....	352
11.4.2	Detektion des Lichtbogens anhand des Stromrückgangs .....	353
11.4.3	Abschaltung des Lichtbogens mittels der Empfangssignallautstärke ....	354
11.5	Fehlerlichtbogen-Schutzeinrichtung für Gleichstrom .....	356
11.6	Literatur .....	357
	<b>Symbole und Abkürzungen .....</b>	<b>359</b>
	<b>Index .....</b>	<b>361</b>





# Vorwort

Die Idee für dieses Buch entstand, da zu diesem Fachgebiet sehr wenig grundlegende Literatur existiert, obwohl Gleichstromnetze seit einigen Jahren eine Renaissance erleben. Gleichstrom wird immer häufiger als die Stromversorgung der Zukunft ausgerufen – sei es zur regenerativen Energieerzeugung, aus Energieeffizienzgründen für die weltweite Versorgung von Rechenzentren oder für sogenannte Hochvolt-Elektrofahrzeuge und deren Gleichstrom-Schnellladestationen. Die DKE-Normungs-Roadmap „Gleichstrom im Niederspannungsbereich“ zeugt davon.

Ein weiterer Antrieb, dieses Buch zu schreiben, liegt in der Vorlesung „Dreh- und Gleichstromnetze“, die ich an der Ostbayerischen Technischen Hochschule Regensburg im Rahmen des Masterstudiengangs „Elektromobilität und Energienetze“ halten durfte. Dieses Buch ist deshalb auch für Studierende der Energie- und Automatisierungstechnik im Hauptstudium eines Bachelor- oder Masterstudiengangs gedacht, die sich mit Niederspannungs-Gleichstromnetzen beschäftigen. Die Besonderheiten von Gleichstromnetzen werden deshalb in diesem Buch ausführlich dargestellt.

Viele der praxisnahen Ergebnisse werden in diesem Buch ausführlich vorgestellt, und zwar in Kapitel 6 (Schalter und Steckverbindungen), in Kapitel 10 (Leitungs-, Geräte- und Personenschutz) sowie in Kapitel 11 (Brandschutz bei Längsfehlern). Der Theorie der Gleichstromunterbrechung, genauer gesagt der Unterbrechung von Niederspannungs-Gleichströmen, ist ein eigenes Kapitel (Kapitel 5) gewidmet. Damit stellt das Buch auch für Fachleute und Entwicklungsingenieure, die auf diesem Fachgebiet tätig sind, eine wertvolle Unterstützung für ihre Arbeit dar.

Darüber hinaus habe ich das Buch um Kapitel ergänzt, die unbedingt in ein Grundlagenbuch über Niederspannungs-Gleichstromnetze hineingehören, aber aus anderen Fachgebieten stammen. Dazu zählen Kapitel 4 (Spannungswandler für Gleichstrom) aus dem Fachgebiet (Leistungs-)Elektronik und Kapitel 9 (Berechnung von Kurzschlussströmen) aus dem Fachgebiet Kraftwerks- und Schaltanlagentechnik. Kapitel über Spannungsquellen für Gleichstrom (Kapitel 2) und über Akkumulatoren (Kapitel 3) dürfen natürlich auch nicht fehlen. Da eine Motivation für den Einsatz von Niederspannungs-Gleichstromnetzen die Energieeffizienz ist, wird das Buch durch Kapitel zur Dimensionierung des Leitungsnetzes (Kapitel 7) und zur Umstellung von Wechsel- auf Gleichstrom (Kapitel 8) abgerundet. Da Gleichstromnetze anderen Randbedingungen unterworfen sind, wurde bei allen wichtigen Themengebieten immer auch ein Vergleich zu den Wechselstromnetzen gezogen. Dies hilft bei der Einordnung von möglichen Auswirkungen von Gleichströmen.

Bei der Wahl der Betriebsspannung von Niederspannungs-Gleichstromnetzen ist man – im Gegensatz zu den Niederspannungs-Wechselstromnetzen, in denen fast nur noch 230 V vorkommen – zunächst frei. Deshalb habe ich den Fokus vor allem auf den Einfluss der Höhe der Betriebsspannung, auf den Aufbau, auf das Schalten, auf die Dimensionierung sowie auf den Schutz von Niederspannungs-Gleichstromnetze gelegt. Überall da, wo es sich anbietet, werden die theoretischen Herleitungen und analytischen Formeln um mehr oder weniger umfangreiche Beispielrechnungen oder Dimensionierungshinweise ergänzt, so dass ein Gefühl für praxisgerechte Werte entstehen kann.

Abschließend möchte ich mich bei denjenigen bedanken, die zum Gelingen dieses Buches beigetragen haben. Zunächst möchte ich meinem akademischen Lehrer Prof. Dr.-Ing. W. Boeck danken, der mich für das Fachgebiet Hochspannungs- und Anlagentechnik so stark begeistern konnte, dass ich diesem mein ganzes Berufsleben als Ingenieur und Hochschullehrer treu geblieben bin und der somit in mir die Grundlage für dieses Buch gelegt hat. Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Dipl.-Ing. G. Luber, der diese Buchidee an mich herangetragen und auch die Korrektur von Kapitel 5, Kapitel 6, Kapitel 10 und Kapitel 11 übernommen hat. Viele seiner fachlichen Anregungen aus den gemeinsamen Forschungsprojekten sind in dieses Buch mit eingeflossen. Mein Dank gilt zudem Herrn Dr.-Ing. J. Berger, der Kapitel 1 bis Kapitel 4 und Kapitel 7 bis Kapitel 9 Korrektur gelesen und dabei seine große berufliche Erfahrung mit eingebracht hat. Für die Unterstützung bei meinen experimentellen Forschungsarbeiten möchte ich Herrn H. Sigler und den betreffenden Studentinnen und Studenten der Ostbayerischen Technischen Hochschule Regensburg meinen Dank aussprechen. Zuletzt danke ich meiner Frau Petra, die mir immer mit Rat und Tat bei der Erstellung dieses Buches zur Seite stand und es sich nicht nehmen ließ, es auf die korrekte Rechtschreibung zu überprüfen.

Wenzenbach, im Juli 2023

*Andreas F. X. Welsch*



Der Verlag und die Autoren haben sich mit der Problematik einer gendergerechten Sprache intensiv beschäftigt. Um eine optimale Lesbarkeit und Verständlichkeit sicherzustellen, wird in diesem Werk auf Gendersternchen und sonstige Varianten verzichtet; diese Entscheidung basiert auf der Empfehlung des Rates für deutsche Rechtschreibung. Grundsätzlich respektieren der Verlag und die Autoren alle Menschen unabhängig von ihrem Geschlecht, ihrer Sexualität, ihrer Hautfarbe, ihrer Herkunft und ihrer nationalen Zugehörigkeit.

# Einführung

In den Anfängen der elektrischen Energieversorgung wurde ausschließlich Gleichstrom verwendet. Für die kleinen lokalen Gleichstromnetze existierten neben Generatoren auch Motoren, Akkumulatoren sowie Kohlebogenlampen und später Kohlefadenlampen für die Beleuchtung von Straßen oder Hallen. Thomas Edison besaß mit seinem Unternehmen General Electric die meisten der US-amerikanischen Patente dazu.

Der weltweite erste Versuch, Gleichstrom über eine größere Strecke zu transportieren, wurde allerdings 1882 für die Internationale Elektrizitätsausstellung in München unternommen. Dazu wurde eine Telegrafenerleitung mit zwei Drähten über eine Strecke von 57 km von Miesbach nach München errichtet. In Miesbach trieb eine Dampfmaschine einen Gleichstromgenerator an, um im Glaspalast in München, wo die Ausstellung stattfand, eine von einem Gleichstrommotor angetriebene Wasserpumpe für einen kleinen künstlichen Wasserfall zu betreiben. Die Gleichstromleitung war für eine Gleichspannung von 1350 V bis 2000 V ausgelegt. Der Wirkungsgrad betrug nur 25 %. Somit kamen von der am Anfang eingespeisten Leistung von ca. 1000 W nur 250 W an Ende der Leitung an. Entsprechend verminderte sich die Spannung am Ende von ursprünglich 2000 V auf 500 V. Der über die Leitung fließende Strom betrug dabei nur 0,5 A. Eine Anekdote dazu besagt, die Leitung sei zur Ausstellung gar nicht fertig geworden und man habe den Wasserfall mechanisch betrieben.

Erst der stark steigende Energieverbrauch und die damit einhergehende Zunahme der Übertragungsverluste erforderte eine Transformierbarkeit der Elektrizität in deutlich höhere Spannungen, die nur mit Wechselstrom gelingen konnte. Insbesondere George Westinghouse und sein Mitarbeiter Nikola Tesla standen für diese neue Technik. Die Auseinandersetzung um die bessere Technik zwischen den Firmen General Electric und Westinghouse wurde um 1890 mit aller Härte geführt, vor allem vonseiten Edisons, mit leichten Vorteilen für Westinghouse. Ein großer Nachteil war, dass man damals mit Wechselstrom keinen Motor antreiben konnte.

Erst die Erfindung des Dreiphasen-Wechselstroms, des sogenannten Drehstroms, brachte den endgültigen Durchbruch für die Wechselstromtechnik. Ordnet man im Stator drei räumlich um  $120^\circ$  versetzte Wicklungen an und speist diese mit drei zeitlich um  $120^\circ$  versetzten Strömen, entsteht ein sich drehendes magnetisches Feld, das sogenannte Drehfeld. Dieses konnte mit Wechselstrom betriebene Elektromotoren, wie Synchron- und Asynchronmotoren, erst in Drehung versetzen. Weitere Vorteile, wie die zeitlich konstante Leistungszufuhr und der Wegfall des Rückleiters, führten dazu, dass heute in der öffentlichen Stromversorgung fast ausschließlich Drehstromsysteme zum Einsatz kommen.

Die Gleichstromtechnik wird heutzutage als Schlüsseltechnologie für die Netzanbindung und die Integration von erneuerbaren Energiequellen sowie für die Realisierung von integrierten elektrischen Energieversorgungssystemen angesehen. Zudem sind Gleichstromnetze ein wesentlicher Bestandteil neuer urbaner und industrieller Energieverteilungsnetze und dienen als Brücke zu oder als Unterstützung von bestehenden Wechselstromnetzen.

Einige elektrische Verbraucher wie Glüh- bzw. Halogenlampen oder Elektro-Direktheizungen können ohne Probleme direkt an Gleichstromnetze angeschlossen werden, sofern die richtige Spannung herrscht. Viele elektrische Verbraucher in Haushalt und Büro arbeiten intern mit Gleichstrom. Sie werden zwar über das Wechselstromnetz versorgt, zur Nutzung muss aber der Wechselstrom in Gleichstrom umgewandelt werden. Da Energieeffizienz eine immer wichtigere Rolle spielt, liegt es nahe, Verbraucher, die Gleichstrom benötigen, direkt damit zu versorgen, um eine Umwandlung von Wechselstrom in Gleichstrom und die dadurch entstehenden Verluste zu vermeiden. Die aktuell noch notwendigen Netzteile, die im Wesentlichen aus Gleichrichtern bestehen, könnten dann entfallen.

Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl tragbarer Geräte wie Handys, MP3-Player, schnurlose Telefone oder Elektrowerkzeuge, deren Gleichstrom-Akkumulatoren über Ladegeräte mit Energie versorgt werden. Diese Ladegeräte wandeln meist – mit geringem Wirkungsgrad – ebenfalls den Wechselstrom aus dem Netz in Gleichstrom um. Alle diese kleinen Wandlungen könnte man mit einer zentralen Umwandlung pro Gebäude oder Wohneinheit vermeiden und so die dadurch entstehenden Verluste verringern.

Eine Gebäudeinstallation auf Gleichstrombasis macht es einfacher, die immer wichtiger werdende lokale regenerative Energieerzeugung in das Stromnetz einzubinden. Photovoltaik-Anlagen und Brennstoffzellen erzeugen Gleichstrom, der mit Hilfe von Wechselrichtern in Wechselstrom umgewandelt werden muss, damit die Einspeisung ins Netz erfolgen kann. Diese Umwandlung verringert den Gesamtwirkungsgrad der regenerativen Energieerzeugung. Ein Gleichstromnetz hat auch während des Betriebs erhebliche Vorteile gegenüber einem Wechsel- bzw. Drehstromnetz. In Gleichstromnetzen gibt es keine Blindleistung. Mit Gleichstrom kann daher mehr Strom und damit mehr Leistung über ein und denselben Leiter übertragen werden als mit Wechselstrom, da der Blindanteil des Stromes entfällt. Zudem verringern sich die Spannungsfälle längs der Leitungen und die frequenzabhängigen Phänomene.

Eine große Bedeutung könnte den Niederspannungs-Gleichstromnetzen jedoch als Inselnetzen in der Versorgung netzferner Gebiete, insbesondere in Entwicklungsländern, zukommen. Laut der Internationalen Energieagentur (IEA) hatten 2011 1,3 Milliarden Menschen in der Welt keinen Zugang zu Elektrizität. In vielen dieser Regionen ist in naher Zukunft zudem nicht an eine öffentliche Stromversorgung mit Wechselstrom zu denken. Autarke kleine Gleichstromsysteme, sogenannte Mini- oder Mikronetze, könnten eine flächendeckende Stromversorgung der dortigen Bevölkerung ermöglichen.

Für einen zunehmenden Einsatz von Niederspannungs-Gleichstromnetzen spricht auch, dass die Komponenten, die für einen Betrieb erforderlich sind, schon lange am Markt erhältlich sind. Insbesondere Überstrom-Schutzeinrichtungen, wie Leitungsschutzschalter und Sicherungen sowie allstromsensitive Fehlerstrom-Schutzschalter, sind hier zu nennen. Aufgrund des großen Interesses an Gleichstromnetzen werden immer mehr Komponenten dafür entwickelt. Zur Anpassung der Netzgleichspannung an die Gerätespannung sind beispielsweise bereits Gleichstrom-Spannungswandler verschiedener Bauformen erhält-

lich. Für den höheren Leistungsbereich gibt es Spannungswandler für 600 V und für kleine Leistungen Bauformen, die in Steckdosen Platz finden.

Für Gleichstrom-Kleinverbraucher in Haushalt und Büro sind Niederspannungs-Gleichstrom-Steckersysteme verfügbar, die mit einem einheitlichen Stecker für alle Anwendungen, wie z. B. Handys, Notebooks oder Monitore, arbeiten und im Bereich von 5 V bis 24 V jeden Verbraucher über eine Codierung automatisch mit der richtigen Gleichspannung versorgen. Die Systeme verfügen über einen Lichtbogenschutz beim Abziehen der Stecker und verbrauchen im Stand-by-Betrieb keine Leistung.

Für den Einsatz der Technologie der Niederspannungs-Gleichstromnetze in großen Wohn- oder Bürogebäuden muss das öffentliche Energieverteilungsnetz jedoch entsprechend angepasst werden. Einen wesentlichen Einfluss hat der Ort, wo im Verteilungsnetz die Gleichrichter installiert werden. Erhält jedes einzelne Gebäude einen Gleichrichter, bleibt das öffentliche Drehstromnetz weitgehend erhalten. Werden mehrere Gebäude zusammengefasst und ein großer Gleichrichter installiert, muss das öffentliche Netz auf Gleichstrom umgestellt werden. Soll ein komplettes Gebäudeareal direkt mit Gleichstrom versorgt werden, spielen die Anforderungen an die Ausfallsicherheit der Gleichstromversorgung eine größere Rolle. Stromausfälle könnten z. B. durch ortsfeste Akkumulatoren in den einzelnen Gebäuden kompensiert werden.

Ein breites Einsatzgebiet von Niederspannungs-Gleichstromnetzen darf dabei nicht vergessen werden: die Kfz-Bordnetze von Straßenfahrzeugen. Solche mobilen Gleichstromnetze zur Versorgung der Verbraucher an Bord werden sowohl für Verbrennungs- als auch für Elektromotorantriebe benötigt. Diese werden mit 12 V oder bei höherem Leistungsbedarf mit 48 V betrieben. Auch das Hochvoltnetz von Elektrofahrzeugen stellt ein kleines lokales Gleichstromnetz mit allerdings hohem Leistungsbedarf dar, der aufgrund des elektromotorischen Antriebs entsteht. Entsprechend hohe Netzspannungen und Akkumulatorkapazitäten sind daher erforderlich. Deshalb wurde das Gleichstromladen entwickelt, das die Ladezeit erheblich verkürzt. Dabei wird der Traktionsakkumulator direkt mit Gleichstrom hoher Leistung unter Umgehung des Ladegeräts geladen. Der leistungsstarke Gleichrichter sitzt dabei in der ortsfesten Ladestation.

All dies zeigt, dass der Bedarf an mobilen und stationären Niederspannungs-Gleichstromnetzen weiter zunehmen wird. Für Ausbildung und Beruf erfordert dies eine grundlegende Beschäftigung mit den Besonderheiten von Gleichstromnetzen, was dieses Buch Ihnen in den folgenden elf Kapiteln in ausführlicher Weise ermöglicht.



# 1

## Topologien von Niederspannungs-Gleichstromnetzen

Die Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik (DKE) arbeitet seit einigen Jahren an der „Deutsche Normungs-Roadmap: Gleichstrom im Niederspannungsbereich“ [1]. Der Bereich der Niederspannung reicht bei Gleichspannung bis 1500 V. In den internationalen Normen findet man diesen Gleichspannungsbereich unter dem Begriff „Low Voltage Direct Current (LVDC)“. Die Normungs-Roadmap behandelt im Wesentlichen vier Hauptgruppen. Im Anschluss an wirtschaftliche und rechtliche Rahmenbedingungen befasst sie sich mit der Sicherheit, Schutzkonzepten und Netzstrukturen. Danach wird näher auf Anlagentopologien und Anwendungsfälle eingegangen, bevor das letzte Kapitel über Betriebsmittel und Komponenten die Normungs-Roadmap inhaltlich abrundet [1]. Eine wesentliche Grundlage für die Normungs-Roadmap sind die Betriebsspannungen und die Abnahmeleistungen.

### ■ 1.1 Betriebsspannungen und Abnahmeleistungen

In Gleichstromnetzen ist im Gegensatz zu Dreh- und Wechselstromnetzen der Bereich der verwendeten Betriebsspannungen groß. In Deutschland findet man bei Wechselstromnetzen nur noch 230 V und bei Drehstromnetzen nur noch 400 V. In einigen Industrienetzen werden außerdem 500 V bzw. 690 V verwendet. Bei Gleichstrom reichen dagegen die Betriebsspannungen in der Anwendung von Kleinspannungen unter 50 V bis zu 1000 V und mehr:

- 1000-V-Photovoltaik-Anlagen für einige 10 MW (teilweise bis 1500 V)
- 750-V- bzw. 660-V-Nahverkehrsbahnen
- 400-V-Ladeinfrastrukturen für Hochvolt-Elektrofahrzeuge (350 V bis 400 V)
- 380-V-Gleichstromnetze für Bürogebäude
- 380-V-Stromversorgung für große Rechenzentren (bipolar  $\pm 190$  V)
- 230-V-Hausinstallation von Wohngebäuden
- 220-V-Gleichstromanlagen für Steuerung, Regelung, Schutz, Messung und Automatisierung von Schaltanlagen und Kraftwerken



- 120-V-Bahnanwendungen
- 75-V-Kleinspannungsanwendungen
- 48-V-Stromversorgung für unfallgefährdete Bereiche in Wohngebäuden, wie z. B. für sichere Kinderzimmer oder Badezimmer
- 48-V-Stromversorgung als Netzinsel für netzferne Gebiete wie z. B. Wohngebäude in Entwicklungsländern und auch für Almhütten und Ferienhäuser
- 48-V-Bordnetze für Verbrennungskraftfahrzeuge
- 24/12-V-Netz für Beleuchtungen in Gebäuden und klassische Kfz-Bordnetze

Bis auf die singulären 1000-V-Photovoltaik-Anlagen können alle genannten Betriebsspannungen in Bereichen zur Anwendung kommen, in denen elektrotechnische Laien Anlagen und Geräte betreiben bzw. nutzen. Daher müssen diese aus Gründen der Personensicherheit einer besonderen Betrachtung unterzogen werden. Eine Besonderheit ist das mobile durch einen Akkumulator gespeiste Bordnetz eines Kraftfahrzeugs bzw. eines Elektrofahrzeugs. Durch die hohe Standzeit solcher Fahrzeuge wäre es von Vorteil, wenn die Akkumulatoren dieser Fahrzeuge als Speicher für den Netzbetrieb genutzt werden könnten, beispielsweise mit bidirektionalem AC-DC-Wandler [3] [4]. Bordnetzspannungen bei Elektrofahrzeugen reichen heute von 200 V für Kleinwagen bis zu 800 V für Oberklassewagen.

Die Dimensionierung und Auslegung dieser Niederspannungsnetze ist von der Abnahmeleistung der Verbraucher abhängig. Bei Gleichstromnetzen liegen die Abnahmeleistungen meist im Bereich von einigen 100 W bis einigen 1000 W. Insbesondere bei der Stromversorgung von Bürogebäuden und Rechenzentren sind sogar einige 100 kW und mehr Abnahmeleistung gefordert.

Eine nur geringe Abnahmeleistung von **100 W** erreicht man, wenn wie in Entwicklungsländern als Gleichstromverbraucher nur LED-Beleuchtungen, Ladegeräte für Mobiltelefone und ein TV-Gerät zum Einsatz kommen. Werden Geräte mit höherer Abnahmeleistung genutzt, wie z. B. Ventilatoren oder Kühlschränke, ergeben sich etwa **400 W**. Auch ein Elektroller mit einem 1,5-kWh-Akkumulator könnte darüber geladen werden. Mit einer Abnahmeleistung von **2000 W** muss man beim Einsatz von Staubsaugern und Waschmaschinen rechnen. Für den klassischen Bereich der Gebäudestromversorgung kann eine Abnahmeleistung von **4000 W** (z. B. Föhn, Kaffeemaschine, Mikrowellen- und/oder Elektroherd) angenommen werden (siehe Tabelle 8.1). Mit dieser Leistung könnte sogar eine einphasige Ladestation für **3,7 kW** für ein Elektrofahrzeug betrieben werden (230 V, 16 A). Höhere Leistungen ergeben sich, wenn zwei einphasige Anschlüsse für maximal **7,4 kW** (zweimal 230 V, 16 A) oder dreiphasige Drehstromanschlüsse für maximal **11 kW** (dreimal 230 V, 16 A) benötigt werden.

## ■ 1.2 Hybride Gleich- und Wechselstromsysteme

Gleich- und Wechselstromsysteme sind häufig hybrid aufgebaut, d. h., sie sind direkt miteinander gekoppelt. Wechsel- und Gleichstrombetriebsmittel sind an ein und derselben

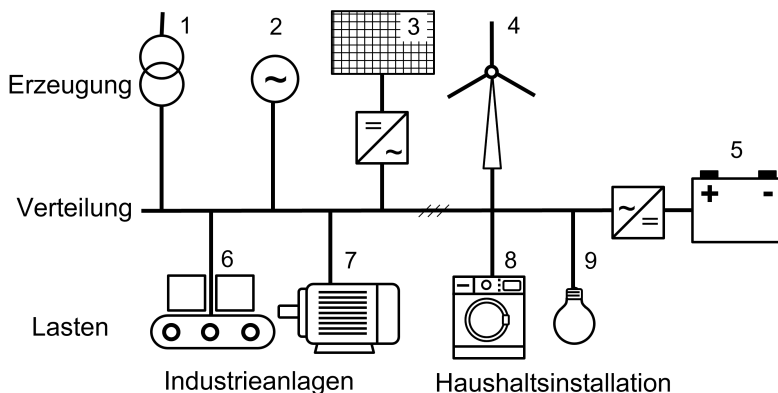
Verteilung angeschlossen. Grundsätzlich können Betriebsmittel für Gebäudestromversorgungen in elektrischen Anlagen und Komponenten, die zur Stromeinspeisung, Stromverteilung sowie zur Stromanwendung dienen, unterteilt werden:

- Stromeinspeisung: Netzanschluss, Photovoltaik, Windenergieanlagen, Akkumulatoren
- Stromverteilung: Verteilerschränke, Schutzeinrichtungen, Leitungsnetz
- Stromanwendung: Motoren, Heizsysteme, Leuchtmittel, Aufzüge, Akkumulatoren

Dabei ist zu beachten, dass Stromspeicher, wie wiederaufladbare Akkumulatoren, sowohl Einspeiser als auch Verbraucher sind und unter Umständen auch ein autarker, vom Netz getrennter Betrieb des Netzes stattfindet. Aus diesem Grund müssen bei der Betrachtung von Gleichstromnetzen, insbesondere bei der Dimensionierung der Leitungen und der Schutzeinrichtungen, die unterschiedlichen Betriebsweisen Abnahmebetrieb, Einspeisebetrieb sowie der autarke Betrieb berücksichtigt werden.

### 1.2.1 Drehstromnetze mit Gleichstromkomponenten

Gleichstrom-Teilnetze in Verbindung mit großen Drehstromnetzen können eine Vielzahl sehr unterschiedlicher Anlagen und Komponenten enthalten. Bild 1.1 zeigt ein großes Drehstromnetz mit direkt über einen Wechselrichter verbundenen Gleichstromkomponenten, wie eine Photovoltaik-Anlage und einen Akkumulator. Gleichstromlasten gehören auch dazu. Die Synchronisation der Gleichstromkomponenten erfolgt mit fremdgeführten Wechselrichtern mit Hilfe der Wechselspannung. Die Erfahrung mit solchen Niederspannungsnetzen zeigt, dass das Zusammenspiel von Drehstrom- bzw. Wechselstromkomponenten mit Gleichstromkomponenten technisch mittlerweile kein Problem mehr darstellt. Soll eine Notstromversorgung möglich sein, muss ein selbst geführter Wechselrichter eingesetzt werden.



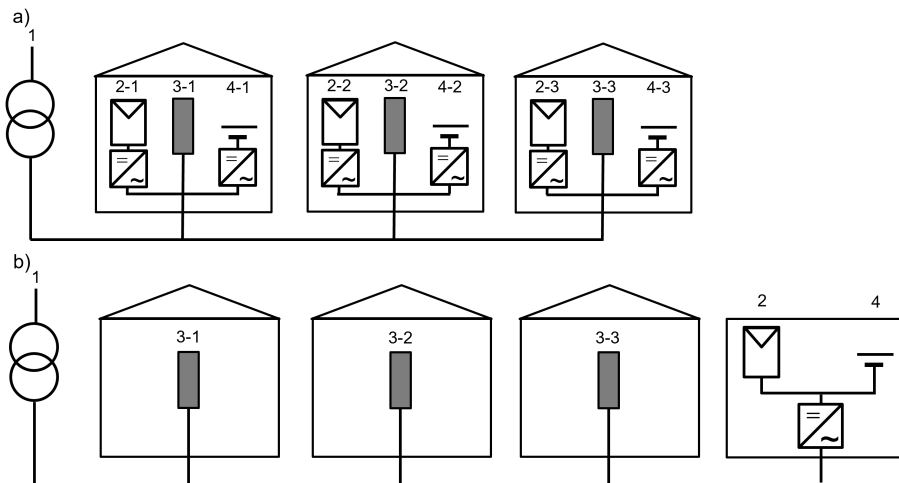
**Bild 1.1** Topologie eines hybriden elektrischen Niederspannungsnetzes:

(1) Netzeinspeisung, (2) Generator, (3) Photovoltaik-Anlage, (4) Windenergieanlage, (5) Akkumulatorsystem, (6) Fließband, (7) Elektromotor, (8) Waschmaschine, (9) Beleuchtung

## 1.2.2 Wechselstromnetze mit Gleichstromkomponenten

Die Anzahl der verwendeten Gleichstromkomponenten in Wechselstromnetzen von Wohn- und Bürogebäuden ist gegenüber großen Drehstromnetzen deutlich geringer. Häufig findet man aufgrund der stark gestiegenen Installationen Photovoltaik-Anlagen für die Stromerzeugung. Vermehrt werden zur Stromspeicherung stationäre Akkumulatoren verwendet, die aufgrund der selbst geführten Wechselrichter einen Inselbetrieb des Wechselstromnetzes ermöglichen. Die Topologie eines Kollektivs von Gebäuden mit individueller Energieerzeugung und -speicherung zeigt Bild 1.2a. Verbraucher sind hier in der Regel Wechselstromverbraucher.

Aus wirtschaftlicher Sicht interessant ist auch eine gemeinsame Energieerzeugung und Energiespeicherung für ein Gebäudekollektiv (Bild 1.2b). Vorteile ergeben sich hier beim Platzbedarf, beim Wirkungsgrad und bei der Wartung. Nachteilig wirkt sich allerdings der Ausfall einzelner Komponenten der Energieversorgung aus, da gleich mehrere Wohngebäude davon betroffen sind.



**Bild 1.2** Topologien einer Energieversorgung von Gebäuden:

- a) mit individueller Energieerzeugung und Energiespeicherung: (1) Netzeinspeisung, (2-1)(2-2)(2-3) individuelle Energieerzeuger, (3-1)(3-2)(3-3) individuelle Verbraucher, (4-1)(4-2)(4-3) individuelle Speicher
- b) mit kollektiver Energieerzeugung und Energiespeicherung: (1) Netzeinspeisung, (2) gemeinsamer Energieerzeuger, (3-1)(3-2)(3-3) individuelle Verbraucher, (4) gemeinsamer Speicher

## ■ 1.3 Parallele Gleich- und Wechselstromsysteme

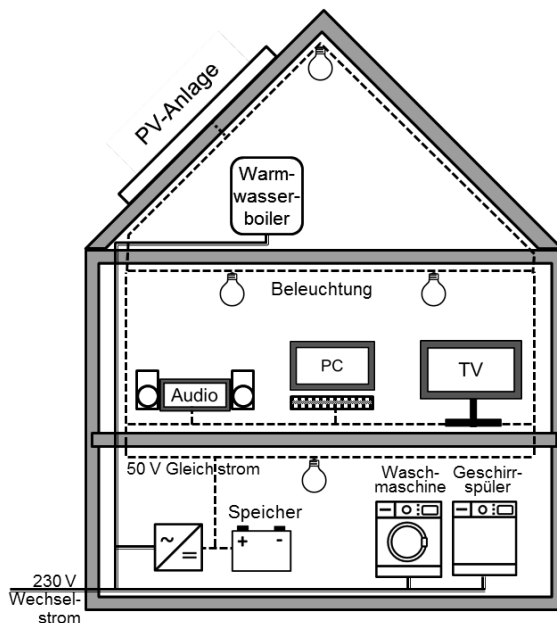
Eine weitere Möglichkeit, die Vorteile von Gleichstrom zu nutzen, sind parallel zu Wechselstromsystemen installierte Gleichstromsysteme. Beide Systeme sind galvanisch voneinander

der getrennt. Dabei werden Verbraucher geringer Leistung mit Gleichstrom und Verbraucher mit hoher Leistung mit Wechselstrom versorgt. Typische Anwendungen sind hier Ein- und Mehrfamilienhäuser, Kommunikationssysteme sowie die Gebäudeautomatisierung

### 1.3.1 Parallele Gleichstromsysteme für Gebäude

Verbraucher in Haushalten bzw. Gebäuden benötigen meist sehr unterschiedliche Leistungen und werden auch unterschiedlich lang genutzt. Verbraucher wie Kochherde, Waschmaschinen und Geschirrspüler, die einen hohen Leistungsbedarf über längere Zeit besitzen, werden wie bisher über das 230/400-V-Wechselstromnetz versorgt. Verbraucher mit niedrigem Leistungsbedarf oder nur kurzzeitig höherem Leistungsbedarf werden z. B. über eine 50-V-Gleichstrominstallation versorgt [6]. Dabei werden kurzzeitige Leistungsspitzen von Verbrauchern wie z. B. von einem Föhn zusätzlich von einer in die Gleichstrominstallation integrierten Akkumulatorbank abgedeckt. Ein mögliches Schema ist in Bild 1.3 dargestellt.

Neben der Energieeffizienz ist heute auch die demografische Entwicklung mit ihren steigenden Anforderungen an eine Energieversorgung ein Thema, wie z. B. Ausfallsicherheit oder Benutzerfreundlichkeit. Um die Energieversorgung jederzeit optimal anpassen zu können, wäre es von Vorteil, die Kabel für die Gleichstromnetze, die mit ungefährlichen Schutzkleinspannungen betrieben werden, nicht in, sondern auf den Wänden zu verlegen. Diese sind dann jederzeit variabel, und Räume können individuellen Bedürfnissen angepasst werden.



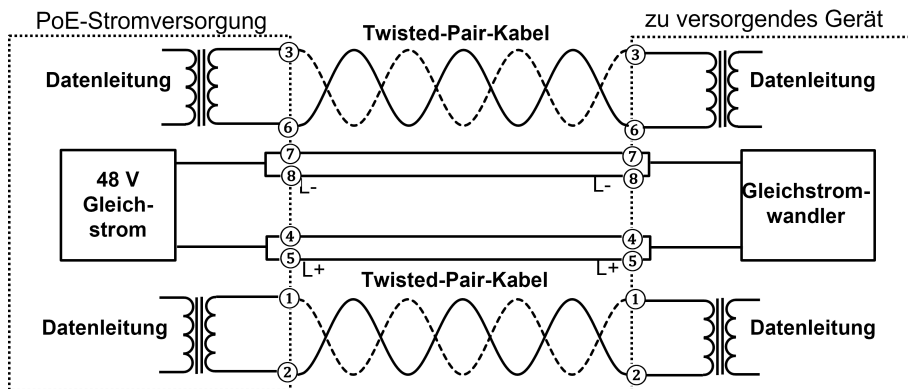
**Bild 1.3** Schema einer Hausinstallation mit parallelem 50-V-Gleichstromsystem mit Stromspeicher und 230-V-Wechselstromsystem nach [6]

Haushalte mit älteren Menschen stellen in jedem Fall höhere Anforderungen in Bezug auf den sicheren Umgang mit der Stromversorgung. Eine solche parallele Stromversorgung in Privathaushalten wird durch die Entwicklung neuer Technologien in der Gleichstromtechnik und den damit einhergehenden Kostensenkungen in Zukunft durchaus wirtschaftlich tragbar sein.

### 1.3.2 PoE-Systeme für Kommunikationsgeräte

Power over Ethernet (PoE) ist ein System, das immer öfter zur Spannungsversorgung von IP-Telefonen, WLAN Access Points, Netzwerkkameras und anderen Netzwerkgeräten, aber auch von LED-Leuchtmitteln eingesetzt wird. Die derzeitige PoE-Technologie ist im Standard IEEE 802.3af beschrieben, der die Funktionsweise von Ethernet-Spannungsversorgungen für Kommunikationsgeräte spezifiziert [9]. Die Spezifikation sieht die Bereitstellung von Leistungen bis 25 Watt bei einer Nenn-Gleichspannung von 48 Volt über ungeschirmte Twisted-Pair-Verkabelung vor (Bild 1.4). Die Betriebsspannungen dürfen zwischen 36 V und 57 V liegen. Die Technologie funktioniert ohne Anpassung an der vorhandenen Verkabelungsanlage bei Cat 5, 5e oder 6, an horizontalen Kabeln, Patchkabeln, Patchpanels, Anschlüssen und Anschlusskomponenten. Netzwerkgeräte benötigen sowohl Datenverbindungen als auch eine Spannungsversorgung. Der Vorteil von PoE-Systemen ist, dass eine einzige Leitung beide Aufgaben übernehmen kann und folglich Einsparungen an Platz, Kosten und Installationszeiten möglich werden. PoE-Systeme erleichtern auch die Umpositionierung von Geräten, da sie einfach in eine PoE-fähige Netzwerkdose eingesteckt werden können. Aufgrund der geringen Leistung bis maximal 25 Watt würden zwei Zusatzleitungen mit  $0,75 \text{ mm}^2$  ausreichen.

Um den Leistungsbereich zu erhöhen, werden in der IEC 60950-21 Remote-Power-Feeding-Systeme für bis zu 100 W mit einer Betriebsspannung von 120 V ohne Schutzschalter und von 200 V mit Schutzschalter vorgeschlagen.

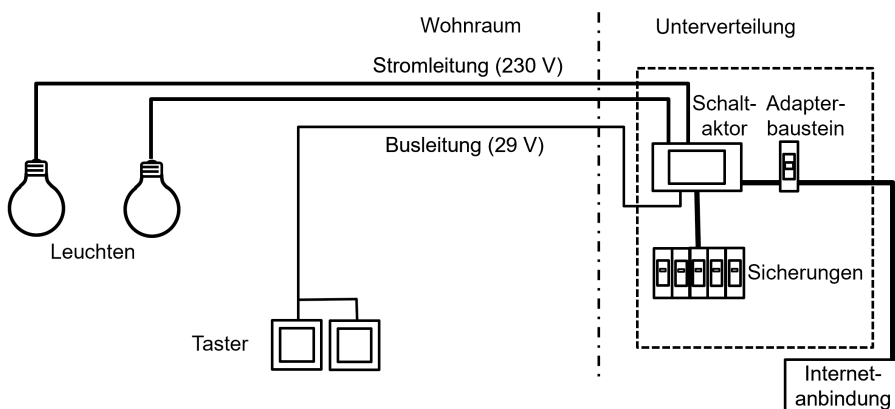


**Bild 1.4** Gleichstromversorgung von Kommunikationsgeräten mit PoE-System

### 1.3.3 KNX-Systeme für die Gebäudeautomatisierung

Seit 1991 gibt es ein ähnliches System für die Gebäudeautomatisierung, den Feldbus KNX. Seit 2002 ist der Feldbus KNX als Standard auch in der europäischen Norm EN 50090 beschrieben. In herkömmlichen Elektroinstallationen sind die Steuerfunktionen mit der Energieverteilung fest verbunden und erfolgen mittels Parallel- oder Reihenschaltung. Nachträgliche Schaltungsänderungen sind daher schwierig umzusetzen. Auch übergeordnete Steuerfunktionen wie ein zentrales Schalten aller Beleuchtungsstromkreise in einem Gebäude können nur mit hohem Aufwand realisiert werden.

KNX trennt die Gerätesteuerung und die Spannungsversorgung auf in zwei Netze: das klassische Stromversorgungsnetz mit Wechselspannung, aus dem die Lasten versorgt werden, und das Busleitungsnetz (KNX-Bus) aus Twisted-Pair-Leitungen. Dabei werden die KNX-Komponenten mit einer Gleichspannung von 29 V versorgt und dieser die Steuerungssignale überlagert (Bild 1.5). Die Steuerungssignale sind gepulste Wechselspannungen, wobei Zeitabschnitte ohne Signalspannung als eine logische 1 und Zeitabschnitte mit Signalspannung als eine logische 0 interpretiert werden. Die Übertragungsrate beträgt nur 9,6 kbit/s, ist aber ausreichend für eine Kommunikation mit 10.000 Einzelgeräten. Es existiert auch eine Powernet-Variante, bei der die Steuersignale über ein phasengekoppeltes Stromnetz gesendet werden. Powernet-KNX ist in erster Linie für die nachträgliche Installation gedacht. Das Spannungsversorgungsnetz und das Busleitungsnetz können unabhängig voneinander oder direkt parallel in einem Kabelkanal im Haus verlegt werden, da keine großen Anforderungen an die Schirmung der Leitungen gestellt werden [19]. Die Busleitung besteht aus einer Mantelleitung mit Schirmfolie und vier Leitern mit einem Durchmesser von 0,8 mm bis 1 mm. Der Leiter KNX+ und der Leiter KNX-, die in der Regel nicht angeschlossen sind, können zur zusätzlichen Stromversorgung eines Strangs verwendet werden. Die maximale Leitungslänge ist auf 1000 m und die maximale Anzahl von Teilnehmern auf 256 begrenzt. Dabei fällt die Versorgungsspannung auf minimal 21 V ab. Da ein Netzteil des KNX-Busses eine galvanisch getrennte und damit potenzialfreie Gleichspannung zur Verfügung stellt, darf der Metallschirm weder verbunden noch geerdet werden.



**Bild 1.5** 29-V-Gleichstromversorgung von Steuerungselementen in der Gebäudeautomatisierung mit dem KNX-Bussystem

Es können alle Geräte über den KNX-Bus miteinander verbunden werden und so Daten austauschen. Die Funktion der einzelnen Busteilnehmer, wie Taster, Displays, Aktoren und Sensoren, wird durch ihre Programmierung bestimmt, die jederzeit verändert und angepasst werden kann. Die Geräte unterschiedlicher Hersteller können dabei uneingeschränkt miteinander in einem System eingesetzt werden, sofern sie die entsprechende Zertifizierung durch die KNX-Association besitzen.

## ■ 1.4 Reine Gleichstromsysteme

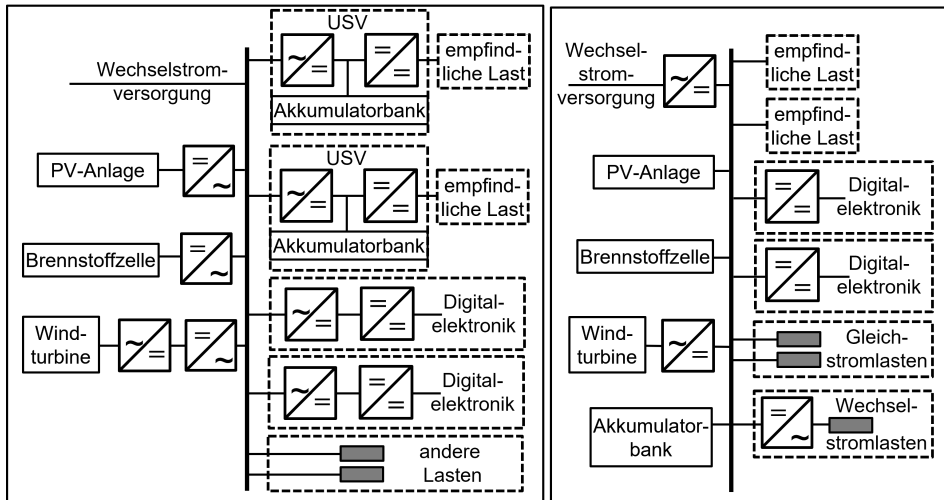
In reinen Gleichstromsystemen wird auf Wechselstromkomponenten und -geräte verzichtet. Deshalb sind hier spezielle Anforderungen zu beachten, insbesondere bei Art und Leistung der eingesetzten Geräte [14]. Zum Einsatz kommen solche Gleichstromsysteme bereits für Rechenzentren, aber auch für Bürogebäude und Supermärkte gibt es erste Installationen [15]. Motivation ist hier immer die höhere Energieeffizienz. Der Aufbau von autarken oder netzfernen Energieversorgungsnetzen als reines Gleichstromsystem ist dagegen ohne Alternative.

### 1.4.1 Gleichstromsysteme für kommerziell genutzte Gebäude

Bei Stromversorgungssystemen mit hohem Leistungsbedarf, wie bei kommerziell genutzten Gebäuden, wird häufig eine Gleichspannung von 380 V verwendet [2]. Vor allem in Bürogebäuden erweisen sich die Schaltprozesse der Beleuchtung beim Einsatz von 380 V als Herausforderung. So wird die Beleuchtung in den Räumen und im Treppenhaus zu den Nutzungszeiten laufend ein- und ausgeschaltet. Dafür sind spezielle Schalter notwendig, die den Effekt des Lichtbogens bei Gleichstrom vermeiden [13] (siehe auch Abschnitt 6.2).

Verschiedene Studien zeigen die Möglichkeiten auf, wie ein Bürogebäude vollständig mit Gleichstrom versorgt werden kann [10] [16]. Bild 1.6 links zeigt ein bestehendes Wechselstromnetz mit Einspeisern erneuerbarer Energien, mit empfindlichen Lasten, die über eine unterbrechungsfreie Stromversorgung angeschlossen sind, und mit Digitalelektronik, wie z. B. PCs oder Faxgeräte. Das dargestellte Netz besteht aus insgesamt zwölf Wandlern: drei Wechselrichter, fünf Gleichrichter und vier Gleichstromwandler. Dieses Netz kann in ein reines Gleichstromnetz, das nur noch fünf Wandler aufweist, überführt werden (Bild 1.6 rechts), dabei ist ein zentraler Gleichrichter an die Wechselstromversorgung angeschlossen. Die Digitalelektronik und die empfindlichen Lasten können direkt mit der Gleichstromverteilung verbunden werden, da sie über die zentrale Akkumulatorbank abgesichert sind. Einzig für reine Wechselstromlasten muss noch ein Wechselrichter vorgesehen werden.

In den Studien werden umfangreiche Berechnungen durchgeführt: Vor allem der Spannungsfall entlang der Leitungen und die Leitungsverluste werden betrachtet. Aus den Studien geht hervor, dass eine Gleichstrominstallation mit 326 V, dem Scheitelwert der Netzspannung von 230 V, aus wirtschaftlicher und technischer Sicht am besten für die Nutzung in Bürogebäuden geeignet ist. Vorhandene Kabel und Leitungen können ohne Probleme



**Bild 1.6** Gleichstromversorgung eines Bürogebäudes: bestehende Wechselstrominstallation (links), vorgeschlagenen Gleichstrominstallation nach [10] (rechts)

auch mit Gleichstrom benutzt werden, wodurch eine Umrüstung von Wechselstrominstallationen auf Gleichstrom einfacher und kostengünstiger wird. So sind in einem Bürogebäude in der Regel viele Computerarbeitsplätze vorhanden. Das bietet auch die Möglichkeit, eine stationäre Akkumulatorbank als unterbrechungsfreie Stromversorgung einzusetzen. Wirtschaftliche Betrachtungen dieser Netzsysteme zeigen, dass größere Kosteneinsparungen erreicht werden können, wenn Wechselrichter entfallen und direkt Gleichstrom verwendet wird. Ein weiterer Vorteil von Gleichstrom liegt unter anderem in den höheren Grenzwerten von elektromagnetischen Feldern, in diesem Fall z. B. am Arbeitsplatz.

Zusätzlich könnte man schon das vorgelagerte Verteilnetz mit Gleichstrom betreiben, bei Bedarf auch mit höherer Spannung von beispielsweise 1 kV. An jedem Gebäude müsste allerdings je ein Gleichstrom-Spannungswandler vorgesehen werden [11] [12].

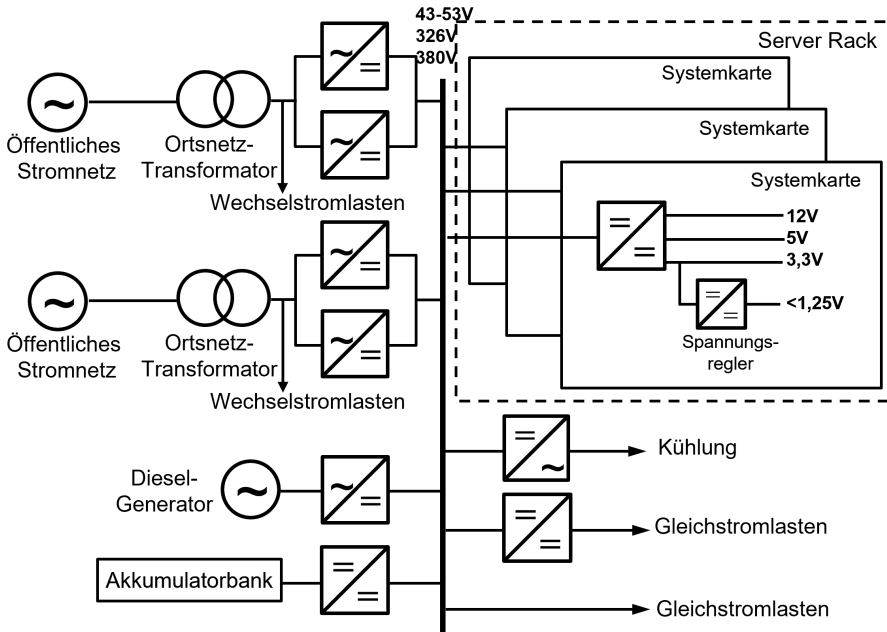
## 1.4.2 Gleichstromsysteme für Rechenzentren

Bei Rechenzentren dagegen spielen naturgemäß Schaltprozesse keine Rolle, weil die Geräte, wie Server, Switches und Kommunikationsgeräte, fest angeschlossen sind und nicht abgeschaltet werden dürfen (Bild 1.7).

Nachdem man sich in den letzten Jahren auf die Optimierung der Klimatechnik in Rechenzentren konzentriert hat, liegt der Fokus heute auf der Energieversorgung selbst. Eine konsequente Verwendung der Gleichstromtechnologie im Rechenzentrum ist wirtschaftlicher und effizienter als die konventionelle Wechselstromtechnologie. Anfänglich wurden Betriebsspannungen von 43 V bis 53 V verwendet, später 326 V. Heute gibt es weltweit über 20 Rechenzentren, die mit 380 V versorgt werden. Es fehlt jedoch an technischen Standards und Normen für die Komponenten und Schnittstellen.

Bedingt durch die Gleichspannung entfallen zudem die aufwendigen PFC-Filter (PFC = Power Factor Correction) in den Netzteilen, die deren schlechten Leistungsfaktor korri-





**Bild 1.7** Gleichstromversorgung von Rechenzentren aus dem öffentlichen Stromnetz mit Transformator, Gleichrichter, Akkumulatorbank und Lasten nach [8]

gieren. Diese Filter enthalten unter anderem relativ große Elektrolytkondensatoren, welche über die Jahre austrocknen und den Neustart eines Servers eventuell nicht mehr gewährleisten können. Weiterhin generieren moderne Schaltnetzteile Oberschwingungen im Netz, die seitens der Netzbetreiber nicht erwünscht sind und die aus Sicht der Rechenzentren andere eingesetzte elektronische Geräte durch hohe Spannungen schädigen könnten. Als Nebeneffekt verringert sich außerdem der Platzbedarf der Netzteile, was wiederum Vorteile für die interne Luftführung mit sich bringt. Auch die Wandlungsprozesse innerhalb eines unterbrechungsfreien Netzes würden durch die Verwendung von Gleichstrom eliminiert und zwangsläufig zu einer weiteren Effizienzsteigerung führen. Letztendlich erleichtert sich bei der Verwendung von Gleichstrom im Rechenzentrum auch die Integration von erneuerbaren Energien erheblich. USV-Anlagen neuester Generation erlauben den direkten Anschluss von PV- oder Windkraftanlagen an die USV-Anlage. Die USV koppelt dabei die erzeugte Gleichspannung der Anlagen mit der Spannung des Akkumulatorzwischenkreises und regelt damit die Gleichspannung am Ausgang entsprechend.

Ein Gleichstromverteilungssystem bietet also zahlreiche Vorteile [7]:

- reduzierter Kühlbedarf
- Stromreduzierung um 10 bis 20 %
- Platzersparnis
- geringere Komplexität und höhere Ausfallsicherheit
- niedrigere Betriebskosten

# Index

## B

- Berühren, direktes 237, 252, 310
- Berühren, indirektes 237, 251, 320
- Betrieb mit Gleichstrom
  - Asynchronmotor 236, 242
  - Diodengleichrichter 237
  - Gleich-/Wechselrichter 242, 251
  - Leistungsfaktor-Korrektur 236
  - Reihenschluss-Gleichstrommaschine 235
  - Schaltkontakte 236
  - Spaltpolmotor 235
  - Universalmotor 235
- Bleiakkumulatoren
  - Aufbau 51
  - Aufbau, gasdichter 51
  - Elektrolyt 47, 48, 51
  - Entladeschlussspannung 52, 75
  - Entladetiefe 54, 55, 58
  - Innenwiderstandsabschätzung 56
  - Innenwiderstandsfaktor 58
  - Kapazität, entnehmbare 51, 52
  - Ladeschlussspannung 66
  - Leerlaufspannung 54
- Bordnetze
  - 48-V-Technik 19
  - Gleichstromwandler 19, 20
  - Isolationsüberwachung 20, 25
  - Ladeleistung 20
  - Personensicherheit 25
  - Schutzleiter 25
  - Starter-Generator 19
  - Verbraucherleistungen 18

## E

- Eintaktwandler
  - Ausgangsleistung 122
  - Funktionsweise 115
  - Glättungskapazität 119, 122

- HF-Transformator 118, 119, 121
- Ladungsmenge 121
- Mittelwert des Ausgangsstroms 117
- Schaltung 115
- Trennung, galvanische 115
- Welligkeit 115, 116

## F

- Fehlerklärung
  - Durchlasskennlinie 285
  - Fehlerstrom-Schutzschalter 282, 309, 312
  - Längsfehler 281, 282
  - Leitungsschutzschalter 282–284, 286, 306, 307, 311
  - NH-Sicherung 284, 286, 290, 307, 310
  - PV-Sicherung 286
  - PV-Sicherung 286
  - Querfehler 281
  - Schmelzsicherungen 282
  - Sicherungscharakteristik 284, 287, 297
  - Überstromfehler 281
  - Zylinder-Sicherung 286
- Fehlerlichtbogen-Detektion
  - Auftrieb, thermischer 343
  - Coulomb-Kraft 345
  - elektromagnetische Wellen 345
  - Elektronengas 345
  - Energieniveaus 343
  - Ladungsdichtewellen 345
  - Lichtbogenrauschen 329, 345, 348, 351, 353, 354
  - Lichtquanten 343
  - Plasmaentionisierung 344
  - Plasmafrequenzen 345
  - Plasmaionisierung 343
  - Plasmaoszillationen 345
  - Rauschen, rosa 346
  - Stromanteil, hochfrequenter 345

- Fehlerlichtbogen-Messtechnik
  - Empfangssignalstärke 349
  - HF-Stromwandler 345
  - Kommunikationseinrichtungen 349
  - Lichtbogendetektor 355
  - Rauschleistung 346
- Fehlerlichtbogen-Schutzeinrichtung
  - Anregungszustand 356
  - Auslösekriterium 356
  - Feuchtraumleitung 326
  - HF-Transformator 356
  - Infrarot-Sensor 327
  - Schrittmotor 327
  - Signalprozessor, digitaler 327

**G**

- Gebäudenetze
  - Anlagen/Komponenten 7–9
  - Anwendungen 5
  - Bürogebäude 12
  - Energieeffizienz 14
  - Leistung, geforderte 6
  - Mini-Grids 15
  - Netz, autarkes 15
  - Personensicherheit 21
  - Schutzleiter 22, 24
  - Spannungsversorgung 10, 11
- Gegentaktwandler
  - Ausgangsleistung 126
  - Funktionsweise 125
  - Glättungskapazität 124
  - Gleich-/Gegentakt 124
  - HF-Transformator 123, 125, 126
  - Mittelwert des Ausgangsstroms 125
  - pulsweitenmoduliert 124
  - Reihen- und Parallelschaltung 127
  - Schaltung 123
  - Trennung, galvanische 123, 126
  - Welligkeit 124, 126
- Generator
  - Erregerwicklung 31
  - Fremderregung 32
  - Klauenpolgenerator 31
  - Selbsterregung 32
  - Vorerregung 32
- Glättungskapazität 92, 95, 96, 109, 112, 119, 122, 124
- Gleichrichter 12, 18, 29, 33, 263, 272
- Grundlagen zu Akkumulatoren
  - Ersatzschaltbild 48
  - Leerlaufspannung 47
  - Nennkapazität 50

- Reihen-/Parallelschaltung 49, 80
- Zellenaufbau 48

**H**

- HF-Transformator 115, 118, 121, 123, 126, 131, 356
- Hochsetzsteller
  - Funktionsweise 104
  - Glättungskapazität 109, 112
  - Lösung, analytische 104
  - Mittelwert des Ausgangsstroms 107
  - Schaltung 103
  - Spulenstrom 107
  - Welligkeit 105, 108, 112, 114

**I**

- Innenwiderstand 48, 55, 58, 60, 61, 203, 212, 259, 273–279

**K**

- Kabelisolierung-Entzündung
  - Fehlerlichtbogen, paralleler 323, 324, 352
  - Fehlerlichtbogen, serieller 324, 351
  - Feld, elektrisches 325
  - Glühemission 326
  - Isoliertes 325
  - Polyethylen (PE) 325
  - Polyvinylchlorid (PVC) 325
  - Strompfad, verengter 324
- Kurzschlussstrom-Auswirkung
  - Erwärmung, kurzzeitige 273
  - Klemmen-Kurzschlussstrom 273
  - Stromkräfte 273
  - Überstrom-Schutzeinrichtungen 273
- Kurzschlussstrom-Berechnungsgrößen
  - Dauer-Kurzschlussstrom 260, 261, 264, 266, 267, 269–271, 273, 277, 278
  - Impedanzwinkel 264, 268, 270
  - Innenwiderstand 273, 274, 277–280
  - Scheitelzeit 262, 264, 265, 272, 278, 279
  - Spannungsfaktor 265, 269, 270
  - Stoß-Kurzschlussstrom 259, 261, 264, 268–271, 273, 275, 278
- Kurzschlussstrom-Betriebsmittel
  - Bleiakumulatoren, ortsfeste 260
  - Eigenbedarfsanlagen 260, 262
  - Glättungsdrossel 263, 266
  - Gleichstrommotor 260
  - Kommutierungsdrossel 263, 266, 268
  - Kondensatorbank 260

- Netzeinspeisung/Drehstrombrücke 260, 263, 267
- Stromrichtertransformator 263, 265–267, 269, 273

## L

### Ladeverfahren

- Konstantspannung 64
- Konstantstrom 64
- Ladeverfahren, kombiniertes 64

### Ladungsausgleich

- HF-Transformatoren 73
- Kondensatoren 70
- Passive Balancing 68
- Spulen 71
- Überladen von Zellen 67
- Widerstände 68
- Z-Dioden 68

### Leerlaufspannung 33, 34, 47, 54, 60, 61

### Leitungen

- Betriebstemperatur 243, 244
- Dauerbelastungsstrom 206
- Grenzleistung, thermische 213
- Grenztemperatur 205
- Kupferwiderstand 243, 244
- Nennquerschnitt 206
- Stromkreislänge 208
- Strommoment 210
- Leitungsanordnungen, typische
  - Belastung, einfache 213, 223
  - Belastung, mehrfache 211, 216, 224, 244, 245
  - Rechteck-/Linienvariante 231
  - Superposition 217, 224
  - Teilleiterstrom 217
  - Teilspannungsfall 217
  - Verbrauchergruppen 220, 221, 230
  - Zuleitung 228–231, 245, 246

### Leitungsnetz

- Anschlussstelle 204
- Betriebsspannung, minimale 210
- Hauptverteilung 221, 242, 245, 246, 251
- Industriestecker 207
- Ortsnetzstation 251
- Spannungsfall, zulässiger 207
- Verbraucherwiderstand 205

### Lichtbogenkennlinie

- Arbeitspunkte 136, 137, 141, 146
- Ayrton-Gleichung 135, 194
- Krater der Kathode 199
- Löschlänge 182
- Löschspannung 170, 182
- Löschstrom 182

- Materialkonstanten 135
- Parameter 178–181, 198, 199
- Verlauf, dynamischer 190

### Lichtbogenlöschung

- Aktoren 149
- Anker-/Erregerinduktivität 154, 188
- Anker-/Erregerwicklung 153
- Differentialgleichung, gewöhnliche 150
- Eisenkerndrossel 186
- Elektromagnet 149
- Elektromotor 153
- Gleichstrommotor 155
- Kontakttrennung 141–143, 146, 155, 159, 160
- Kraft, elektromotorische 154
- Lichtbogenverlängerung 140
- Plasmabebulung 160
- Reihenschlussmotor 153, 186
- Selbstinduktionsspannung 150, 186, 188
- Universalmotor 153, 186
- Zuggeschwindigkeit 148–150, 153, 161

### Lichtbogenprüfung

- Auswertegrößen-Flammen 329
- Auswertegrößen-Lichtbogen 328
- Auswertung, statistische 328
- Prüfparameter 328
- Verkohlungsphase 331
- Zündphase 331

### Lichtbogentheorie

- Austrittsenergie 133
- Elektrodenfallgebiete 135
- Elektrodenfallspannungen 134, 141, 142, 159, 162
- Elektronenemission 133
- Energie, kinetische 133
- Entladung, selbstständige 134
- Fermi-Energie 133
- Gitterverband 133
- Glüh-/Feldemission 133
- Kräfte, elektrostatische 133
- Lorentz-Kraft 159
- Potenzial-Napfmodell 133
- Raumladungszonen 134
- Stoß-/Thermoionisation 134
- Tunneleffekt 133
- Weglänge, mittlere freie 135
- Zünd-/Brennspannung 134
- Lithium-Ionen-Akkumulatoren
  - Aktivmaterial 58
  - Elektrodenaufbau 59
  - Elektrolyt 59
  - Energiedichte 62
  - Entladetiefe 61

- Innenwiderstand 62
- Leerlaufspannung 60, 61
- Lithium-Eisen-Phosphat 59, 60, 62, 63, 77

**P**

## Personengefährdung

- Durchströmungsdauer 288, 300, 303, 307, 309, 310, 317
- Herzkammerflimmern 288
- Körperstrom 282, 288–290, 294, 296, 297, 301–304
- Körperwiderstand 302, 303
- Loslassschwelle 289
- Muskelkontraktionen 288
- Störung der Reizleitung 288
- Thrombosen 289
- Wirkungen, pathophysiologische 288, 300

## Personenschutzsysteme

- Berühren, direktes 237, 252
- Berühren, indirektes 237, 251
- Berührspannung 290, 294, 296, 298, 299, 302, 304, 305, 308, 310
- Dauerkurzschlussstrom 312, 314, 317, 320
- Fehlerschleifenlänge 277, 313, 314, 316, 318, 320
- Isolationsüberwachung 298
- Mittelpunkterdung 299
- Schutzklasse 306
- Zusatzschutz 307

## Photovoltaik-Anlagen

- Arbeitskennlinie 37
- Arbeitspunkte eines Akkumulators 39
- Arbeitspunkte eines Gleichspannungswandlers 40
- Arbeitspunkte eines Lastwiderstands 36
- Einstrahlungsleistung 34
- I-U-Kennlinie 33
- Kennwerte 33
- Leerlaufspannung 33, 34
- Leistung, abgebbare 36, 40
- Skalierung 35

**S**

## Schalten von Gleichstrom

- Beblasung, magnetische 166
- Deionisations-Kammer 166
- Kühlmittel 166
- Lorentz-Kraft 166
- Löschgrenze 165
- Löschkammer 166
- Löschkondensator 166
- Schaltkammer 166
- Thermoionisation 165
- Vakuumkammer 166

## Schaltgeräte

- IGBT 167
- Kompaktleistungsschalter 167
- Kurzschlussauslöser 167
- Lasttrennschalter 167
- MOSFET 167
- Nullpunktlöscher 166
- Schalten, lichtbogenfreies 168
- Schaltvermögen 166, 167
- SiC 167
- Sperrspannung 167
- strombegrenzende 166
- Trennschalter 168

## Spannungsfallberechnungen

- Blindleistung 238, 240, 250
- Drehstromkabel 242, 243, 248, 250, 251, 253
- Knotenregel 226, 254, 256
- Korridorbeleuchtung 220, 221, 240, 246, 249, 251, 253, 255
- Längsspannungsfall 238
- Leistungsfaktor 238, 242, 250
- Querspannungsfall 238
- Scheinleistung 250
- Wirkleistung 238, 240, 252

## Spannungswandler für Gleichstrom

- Abwärts-/Aufwärtswandler 83
- Dimensionierung 128
- Durchflusswandler 84, 123
- Sperrwandler 103, 107, 115
- Taktung, primäre/sekundäre 83

## Steckverbindungen

- Auftrieb, thermischer 170
- Bordnetzstecker 192
- Kontakt, voreilender 168
- Leuchterscheinung 169
- Plasma-Deionisation 170
- Schutzkontaktstecker 168
- Zuggeschwindigkeit 171, 184, 186, 192, 194, 195, 198

**T**

## Tiefsetzsteller

- Ausgangsleistung 90
- Betrieb, lückender 101
- Diode, ideale/reale 98
- Funktionsweise 84
- Glättungskapazität 92, 95, 96
- Lösung, analytische 86
- Lückgrenze 103
- Mittelwert des Ausgangsstroms 88
- Schaltung 83
- Welligkeit 86–88, 91, 92, 94
- Zeitverlauf 87, 88, 90