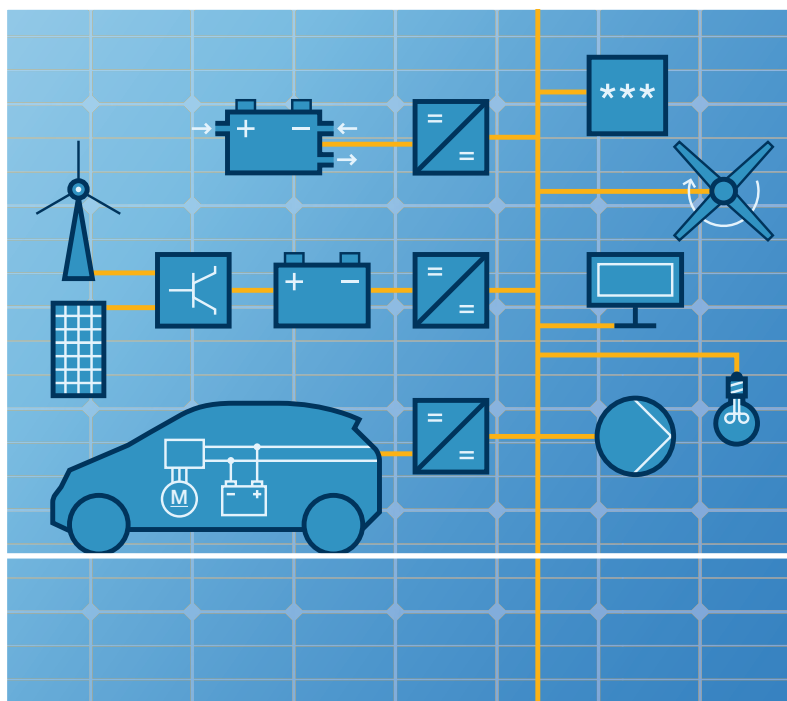


Andreas F. X. Welsch

Mobile und stationäre Niederspannungs- Gleichstromnetze

Aufbau – Schalten – Dimensionierung – Schutz



HANSER

Welsch

Mobile und stationäre Niederspannungs- Gleichstromnetze



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Andreas F. X. Welsch

Mobile und stationäre Niederspannungs- Gleichstromnetze

Aufbau – Schalten – Dimensionierung – Schutz

HANSER

Der Autor:

Prof. Dr.-Ing. Andreas F. X. Welsch, Wenzenbach (ehemals Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg)



Print-ISBN: 978-3-446-47997-5

E-Book-ISBN: 978-3-446-48039-1

Alle in diesem Werk enthaltenen Informationen, Verfahren und Darstellungen wurden zum Zeitpunkt der Veröffentlichung nach bestem Wissen zusammengestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Werk enthaltenen Informationen für Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht. Ebenso wenig übernehmen Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt also 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 benützt werden dürften.

Die endgültige Entscheidung über die Eignung der Informationen für die vorgesehene Verwendung in einer bestimmten Anwendung liegt in der alleinigen Verantwortung des Nutzers.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Werkes, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 UrhG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2024 Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München

www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Julia Stepp

Herstellung: Melanie Zinsler

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Titelmotiv: © Max Kostopoulos unter Verwendung von Grafiken von © [shutterstock.com/BillionsPhoto](https://www.shutterstock.com/BillionsPhoto)

Satz: Andreas F. X. Welsch

Druck: CPI Books GmbH, Leck

Printed in Germany

Inhalt

Vorwort	XIII
Einführung	1
1 Topologien von Niederspannungs-Gleichstromnetzen	5
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

2	Spannungsquellen für Gleichstrom	29
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
3	Akkumulatoren	47
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

4	Spannungswandler für Gleichstrom	83
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
5	Unterbrechung von Niederspannungs-Gleichströmen	133
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	Mehrpolige Unterbrechung	156
5.3.2	Lichtbogenlöschbleche	158
5.3.3	Kühlung des Lichtbogens	160
5.4	Zusammenfassung	161
5.5	Literatur	163
6	Schalter und Steckverbindungen	165
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
7	Dimensionierung des Leitungsnetzes	203
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
8	Umstellung von Wechsel- auf Gleichstrom	235
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
9	Berechnung von Kurzschlussströmen	259
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
10	Leitungs-, Geräte- und Personenschutz	281
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

11	Brandschutz bei Längsfehlern	323
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
	Symbole und Abkürzungen	359
	Index	361

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° versetzte Wicklungen an und speist diese mit drei zeitlich um 120° 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 ± 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.

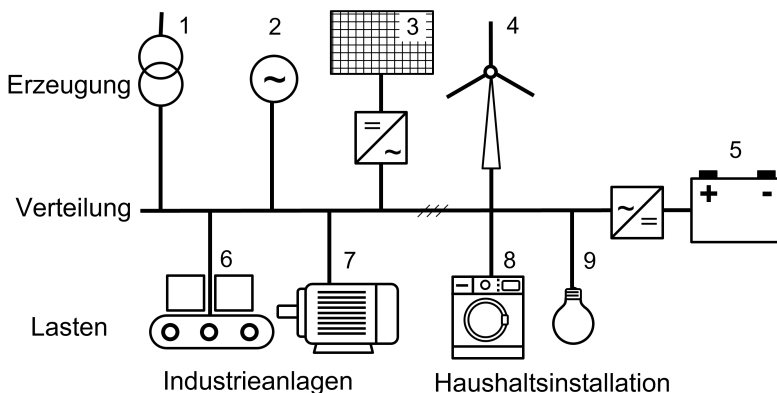


Bild 1.1 Topologie eines hybriden elektrischen Niederspannungsnetzes:

(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.

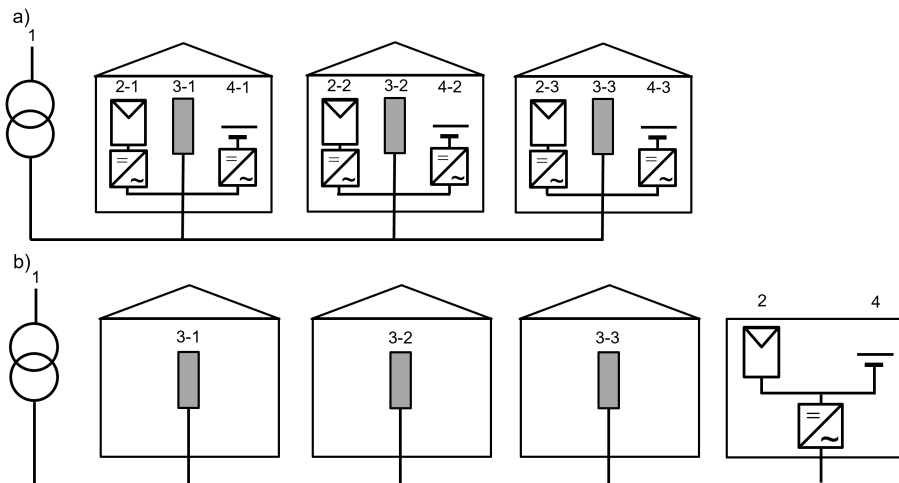


Bild 1.2 Topologien einer Energieversorgung von Gebäuden:

- 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.

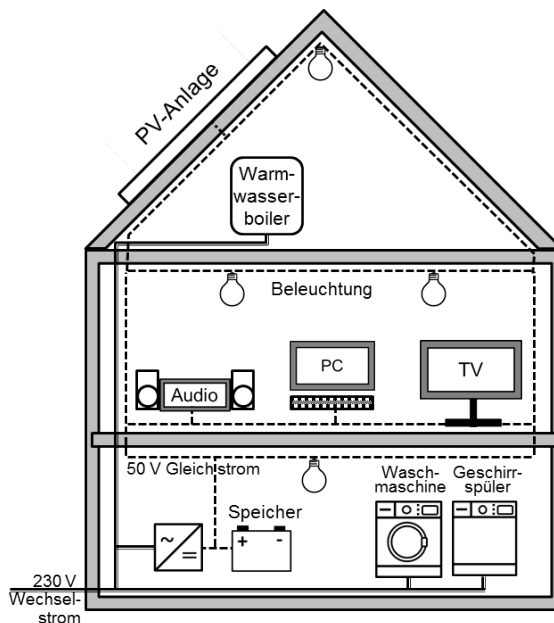


Bild 1.3 Schema einer Hausinstallation mit parallelem 50-V-Gleichstromsystem mit Stromspeicher und 230-V-Wechselstromsystem nach [6]

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.

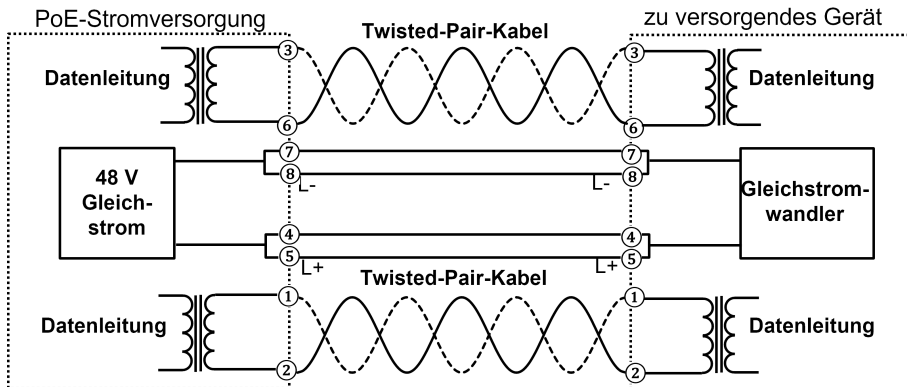


Bild 1.4 Gleichstromversorgung von Kommunikationsgeräten mit PoE-System

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.

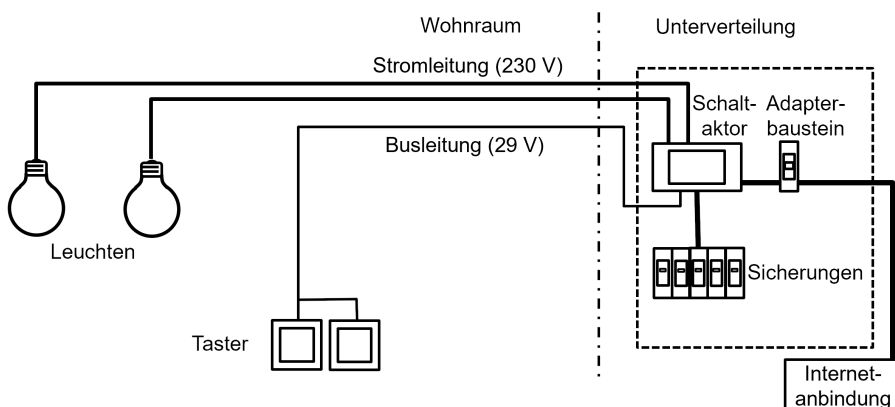


Bild 1.5 29-V-Gleichstromversorgung von Steuerungselementen in der Gebäudeautomatisierung mit dem KNX-Bussystem

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

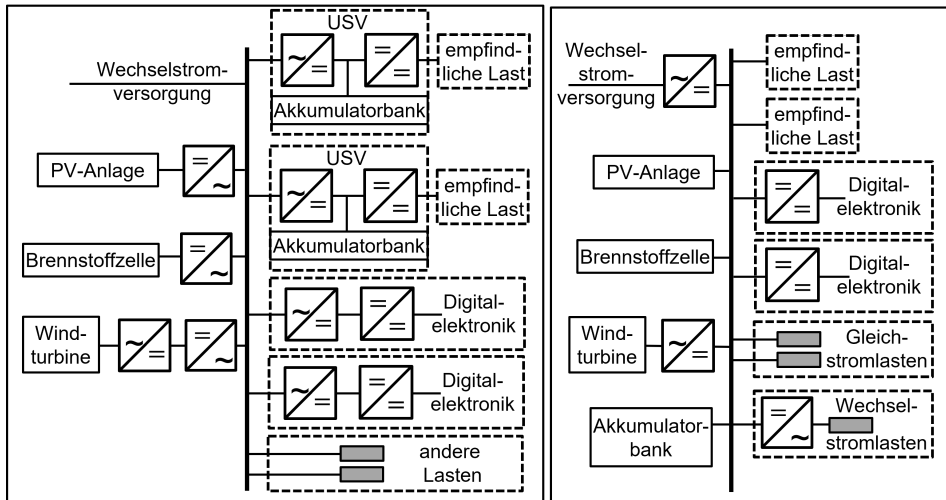


Bild 1.6 Gleichstromversorgung eines Bürogebäudes: bestehende Wechselstrominstallation (links), vorgeschlagenen Gleichstrominstallation nach [10] (rechts)

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-

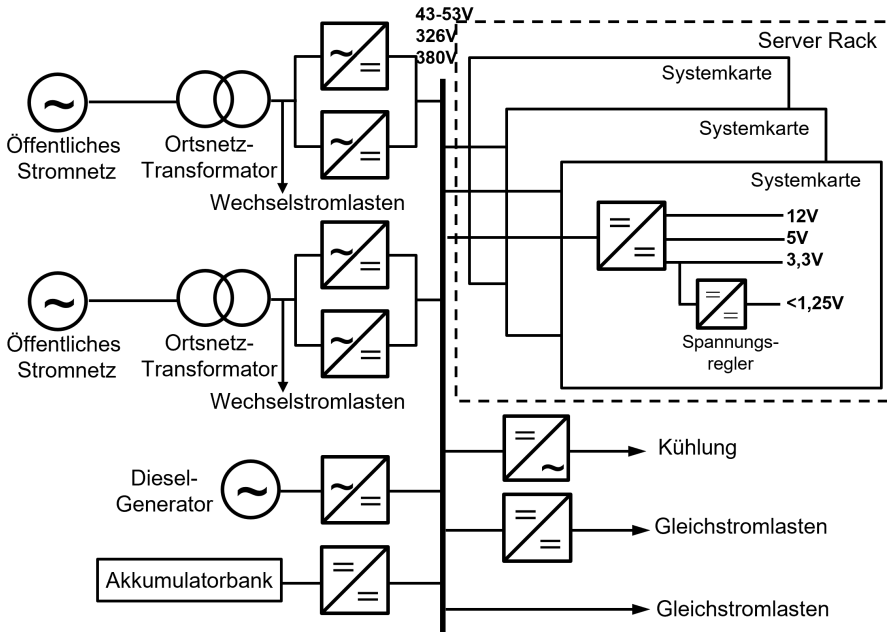


Bild 1.7 Gleichstromversorgung von Rechenzentren aus dem öffentlichen Stromnetz mit Transformator, Gleichrichter, Akkumulatorbank und Lasten nach [8]

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

Abgesehen von diesen Vorteilen im Betrieb gibt es für die Rechenzentren eine weitere Kostenreduzierung. Die niedrige Spannung von 48 V, die anfangs eingesetzt wurde, hatte zur Folge, dass große elektrische Leistungen sehr hohe Stromstärken voraussetzen und diese wiederum hohe Kabelquerschnitte erfordern. Die Verwendung von Gleichstrom bei 380 V bringt zusätzlich eine deutliche Reduzierung der Kabelquerschnitte und somit der Investitionskosten bei Neubaumaßnahmen, wie die Vielzahl der weltweit so versorgten Gleichstrom-Rechenzentren zeigt.

1.4.3 Gleichstromsysteme für netzferne Gebiete

Laut der Internationalen Energieagentur (IEA) hatten 2011 in der Welt 1,3 Milliarden Menschen keinen Zugang zu Elektrizität und 2,7 Milliarden Menschen keinen Zugang zu rauchgasarmer, sauberer Energie zum Kochen. Autarke Systeme ohne Anschluss an ein großes Energieversorgungsnetz werden in den letzten Jahren immer mehr als Alternative betrachtet, um Elektrizität für Haushalte und kleinere Betriebe zu liefern.

Insbesondere in netzfernen Gebieten der Entwicklungsländer, in denen eine öffentliche Stromversorgung mit Wechselstrom in naher Zukunft nicht erreichbar ist, können autarke kleine Gleichstromsysteme mit z. B. 48 V, sogenannte Mini- oder Mikronetze, einen Beitrag zu einer flächendeckenden Stromversorgung der Bevölkerung leisten. In Indien gibt es dazu bereits einige Projekte [18]. Bild 1.8 zeigt eine mögliche Topologie.

Je nach Ausstattung des Haushalts und der Gleichzeitigkeit der Benutzung ist ein Leistungsbedarf von 100 W bis 400 W pro Wohneinheit denkbar. Werden Staubsauger oder Mikrowellenherde verwendet, ist mit 2000 W pro Wohneinheit und mehr zu rechnen. Für die Dimensionierung der Energieerzeugung und -speicherung ist die durchschnittliche tägliche Betriebsdauer der Geräte wichtig. Bei allen Elektroinstallationen ist jedoch darauf zu achten, dass alle Schutzgeräte, die die Personensicherheit gewährleisten sollen, unbedingt vor unsachgemäßem Gebrauch bzw. Entwendung geschützt sind.

Typische Verbraucher sind LED-Leuchtmittel, Ventilatoren, Ladegeräte für Mobiltelefone, Computer sowie Fernsehgeräte mit Flachbildschirmen. In Tabelle 1.1 sind für verschiedene Geräte Bemessungsleistung und Betriebsdauer angegeben.

Eine leistungsautarke und damit vom Netz unabhängige elektrische Energieversorgung erfordert natürlich auch eine entsprechende Energieerzeugung. Ziel verschiedener Studien ist, den Aufbau, die Machbarkeit und die Rahmenbedingungen einer dezentralen regene-

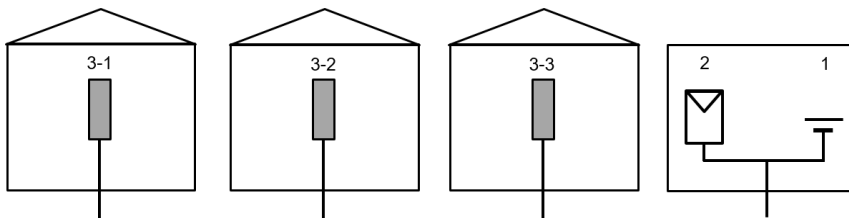


Bild 1.8 Netzferne Gleichstromversorgung von Wohngebäuden: (1) gemeinsamer Speicher, (2) gemeinsame PV-Anlage, (3-1)(3-2)(3-3) individuelle Verbraucher

Tabelle 1.1 Leistungsbedarf und durchschnittliche tägliche Betriebsdauer verschiedener Geräte in netzfernen Gebieten in Entwicklungsländern [18]

Gerät	Bemessungsleistung in W	Tägliche Betriebsdauer in h
Beleuchtung	9 bis 30	5
21-Zoll-Farbfemseher	70	5
Klein-Waschmaschine	150	2
Kühlschrank	120	10
Wasserpumpe	165	0,5
Radio	10	1
Staubsauger	750	1
Ventilator	50	2
Tintenstrahldrucker	20	1
Desktop-Computer	400	5
Monitor	200	5
Faxgerät	100	0,5
Mikrowellenherd	1000	0,2

rativen Energieversorgung mit einer Gleichstrominstallation zu betrachten [5] und damit einen leistungsautarken Betrieb in diesen Kleinstnetzen zu ermöglichen.

Großes Gewicht wird auf die dezentrale Energiegewinnung und die Einbindung von regenerativen Energieträgern gelegt. Dazu werden Versuchsgebäude mit regenerativer Energieerzeugung und einem Gleichstromnetz ausgerüstet (Bild 1.9).

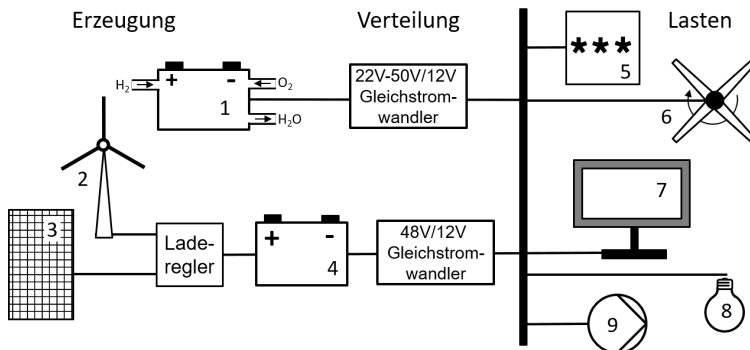


Bild 1.9 Autarkes 12-V-Gleichstromnetz mit Erzeugern, Speichern und Gleichstromlasten: (1) Brennstoffzelle, (2) Windturbine, (3) PV-Module, (4) Akkumulatorbank, (5) Kühltruhe, (6) Ventilatoren, (7) Fernseher, (8) Beleuchtung, (9) Umwälzpumpe [5]

Als Energieerzeuger werden Brennstoffzellen, eine Windenergieanlage, eine fest montierte und eine nachgeführte Photovoltaik-Anlage verwendet. Die Photovoltaik-Anlage und die Windenergieanlage sind meist über eine Akkumulatorbank und einen Gleichstrom-Spannungswandler an das Gleichstromnetz angeschlossen [17]. Die Brennstoffzellen besitzen einen eigenen Gleichstrom-Spannungswandler. Als Systemspannung wird häufig 12 V gewählt [5], da es bereits eine große Zahl an haushaltstypischen Verbrauchern für diese Spannung gibt. Diese Spannung ist jedoch ungeeignet für die Versorgung von Haushalten.

Durch eine dezentrale Energieversorgung können zusätzlich zu den bereits vorhandenen Einsparungen die Übertragungsverluste beim Energietransport reduziert werden. Ein netzunabhängiger autarker Betrieb erscheint möglich. Diese Form der Einbindung der dezentralen Energiegewinnung ist vor allem für Entwicklungsländer und Länder mit instabilen Energieversorgungsnetzen hoher Ausfallhäufigkeit interessant.

■ 1.5 Bordnetze für Straßenkraftfahrzeuge

Das Bordnetz eines Kraftfahrzeugs, ob mit Verbrennungs- oder Elektromotor angetrieben, stellt ein mobiles, räumlich begrenztes Gleichstromnetz dar, das sich während der Fahrt autark selbst versorgen muss. Es dient zur Versorgung elektrischer und elektronischer Komponenten mit elektrischer Energie. Da nur Energie erzeugt werden kann, wenn der Verbrennungsmotor läuft, muss in diesem Fahrzeugtyp die elektrische Energie zwischengespeichert werden. Bei reinen Elektrofahrzeugen muss die für eine Fahrt erforderliche Energie schon vor Antritt der Fahrt gespeichert sein.

1.5.1 Bordnetze für Verbrennungsmotorantriebe

Wichtig für die Dimensionierung der Komponenten des Bordnetzes sind die zu versorgenden Verbraucher mit ihren Anschlussleistungen. Insbesondere für die Dimensionierung des Bordnetz-Akkumulators sind jedoch auch die mittleren Leistungen über die gesamte Betriebsdauer zu betrachten. In [Tabelle 1.2](#) sind Verbraucher eines Kraftfahrzeugs, die sowohl für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor als auch für Elektrofahrzeuge für die Sicherheit notwendig sind, mit den entsprechenden Leistungen aufgelistet. Die Gesamtleistung von 350 W für diese Verbraucher ist relativ gering. Über alle Verbraucher liegt das Verhältnis

Tabelle 1.2 Übersicht über typische elektrische Verbraucher in einem Kraftfahrzeug [20]

Verbraucher	Anschlussleistung [W]	Mittlere Leistung [W]
Radio	20	20
Standlicht	8	7
Abblendlicht	110	90
Schlussleuchte	30	25
Kontrollleuchte, Instrumente	22	20
Beheizbare Heckscheibe	200	60
Innenraumheizung mit Gebläse	120	50
Kühlerventilator	120	30
Scheibenwischer	50	10
Bremslicht	42	11
Blinklicht	42	5
Nebelscheinwerfer	110	20
Nebelschlussleuchte	21	2
Summe	895	350

von mittlerer Leistung zu Anschlussleistung bei 40 %. Dabei sind die einzelnen Relationen sehr unterschiedlich.

In modernen konventionellen Fahrzeugen kommen jedoch weitere leistungsintensive Verbraucher hinzu, die für Optimierung und Überwachung des Verbrennungsmotors sowie für die Sicherheit und den Komfort der Fahrzeuginsassen wichtig sind:

- Einspritzsysteme für Otto- und Dieselmotoren
- Kraftstoffmanagementsysteme
- Luft- und Abgasaktuatoren
- Überwachung des Verbrennungsvorgangs
- Kraftübertragungssysteme
- Kleinantriebe für Komfort und Sicherheit (Motorkühlung, Klimatisierung, Brems-, Lenk- und Getriebesteuerung)
- Elektronik für Komfort und Sicherheit (Reifendruck, Zugangskontrollsysteme, Fahrodynamik, Brake-by-Wire)
- Systeme für Sicherheit von Fahrzeuginsassen
- Fahrerinformationssysteme

Dies führte dazu, dass bei Mittelklassewagen mittlerweile die durchschnittliche Bordnetzleistung auf 4 bis 5 kW und bei Oberklassewagen auf 6 bis 7 kW angestiegen ist. Demzufolge gibt es bei diesem Fahrzeugtyp schon Zwei-Akkumulatoren-Bordnetze mit einem gesamten Speicherinhalt der Akkumulatoren von mehr als 2 kWh und Drehstrom-Generatoren (siehe [Abschnitt 2.1.2](#)) mit einer Bemessungsleistung von bis zu 3 kW. Die Bordnetze solcher Fahrzeuge sind sehr komplex und beinhalten nicht selten Kabelbäume mit bis zu 2200 Einzelleitungen mit einer Gesamtlänge von bis zu 4000 m. Der prinzipielle Aufbau solcher Bordnetze ist in [Bild 1.10](#) zu finden.

Als Betriebsspannung wird ausnahmslos 12 V verwendet. Vorteil dieser Spannungshöhe ist die Einordnung in die Kategorie Schutzkleinspannungen, für die keine Schutzmaßnahmen zur Personensicherheit erforderlich sind. Ein weiterer Vorteil von Gleichstrom-Bordnetzen im Kraftfahrzeug ist die einfache Ausführung der Energieverteilung, die aus einem einzelnen Hinleiter zu den Verbrauchern und einem Rückleiter zu den Stromquellen besteht, den die Karosserie bildet. Gleichzeitig dient die Karosserie auch als Potenzialausgleich, um Potenzialunterschiede im Bordnetz zu minimieren.

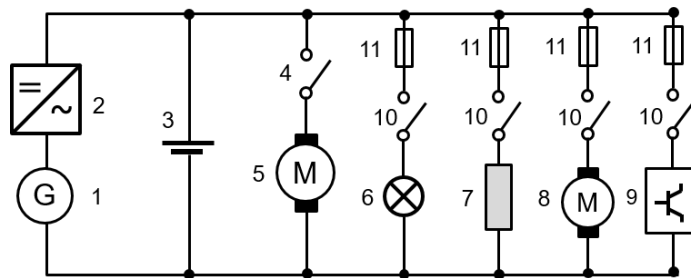


Bild 1.10 Mobiles 12-V-Gleichstrom-Bordnetz: (1) Drehstromgenerator, (2) Gleichrichter, (3) Energiespeicher, (4) Zündschalter, (5) Starter, (6) Beleuchtung, (7) Heizungen, (8) Stellmotoren, (9) Elektronik, (10) Schalter, (11) Sicherungen

Eine immer häufiger vorzufindende Bordnetzvariante stellt das kombinierte 48-V-/12-V-Bordnetz dar. Dabei werden große Lasten, wie z. B. der elektrische Turbolader oder der Starter, aus dem 48-V-Bordnetz versorgt, die konventionellen Verbraucher dagegen aus dem 12-V-Bordnetz. Da diese Betriebsspannung ebenfalls im SELV-Spannungsbereich (Safety Extra Low Voltage bis 60 V) liegt, sind auch hier keine besonderen Maßnahmen für die Personensicherheit erforderlich. Für diese Bordnetzvariante gibt es zwei unterschiedliche Konzepte. Das einfachste Konzept besteht aus Akkumulatoren oder Superkondensatoren für 48 V, die über einen unidirektionalen Gleichstromwandler aus dem 12-V-Netz geladen werden. Wird kurzzeitig eine hohe Leistung gefordert, wird diese aus den 48-V-Speichern gedeckt. Die elektrische Leistung wird konventionell von einem 12-V-Drehstrom-Synchrongenerator zur Verfügung gestellt.

Beim kombinierten Konzept erfolgt der Leistungsfluss in umgekehrter Richtung, also vom 48-V-Netz zum 12-V-Netz. Ein uni- oder bidirektionaler Gleichstromwandler verbindet die 12-V-Seite mit der 48-V-Seite. An das 48-V-Bordnetz ist der sogenannte Starter-Generator, eine geregelte elektrische Maschine, angeschlossen. Dieser kann im Motorbetrieb den Verbrennungsmotor starten. Bei laufendem Verbrennungsmotor versorgt der Startergenerator im Generatorbetrieb das 48-V-Bordnetz und lädt den 48-V-Lithium-Ionen-Akkumulator (Bild 1.11). Der Inverter, ein bidirektionaler Wandler, wandelt im Generatorbetrieb die Wechselspannung in Gleichspannung und im Elektromotorbetrieb die Gleichspannung in Wechselspannung um. Mit einer solchen Kombination aus elektrischer Maschine und bidirektionalem Wandler lassen sich verschiedene Möglichkeiten zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs realisieren, wie z. B. die Rekuperation oder das Abschalten des Verbrennungsmotors während der Fahrt.

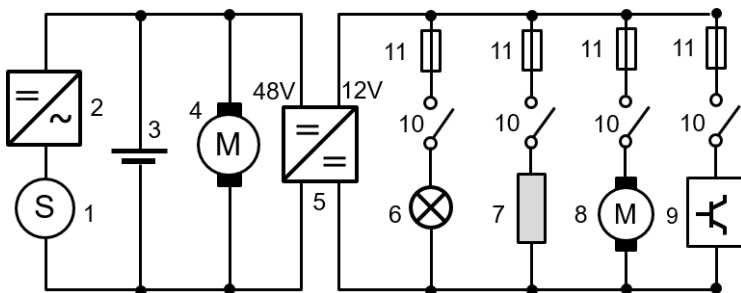


Bild 1.11 Kombiniertes 48-V-/12-V-Gleichstrom-Bordnetz: (1) Starter-Generator, (2) bidirektionaler Wandler, (3) Energiespeicher, (4) z. B. Turbolader, (5) Gleichstromwandler, (6) Beleuchtung, (7) Heizungen, (8) Stellmotoren, (9) Elektronik, (10) Schalter, (11) Sicherungen

Ein weiterer Vorteil eines 48-V-Bordnetzes sind die bei gleicher Leistung auf ein Viertel reduzierten Leiterströme, die zu deutlich geringeren Leiterquerschnitten führen. Daraus resultiert ein erhebliches Einsparpotenzial bei Material und Gewicht von Kabelbäumen. Darüber hinaus können viele Kabel und Stecker weiter verwendet werden, da diese in der Regel bereits für den SELV-Spannungsbereich bis 60 V spezifiziert sind.

Nachteil dieser Bordnetzspannung ist das Auftreten von Lichtbögen beim Öffnen von Kontakten oder Trennstellen unter Last. Dieses Phänomen kann je nach Kontaktsystem schon ab einer Spannung von ca. 30 V und einem Strom von ca. 1 A beobachtet werden und erfordert besondere Maßnahmen. Dies wird in [Abschnitt 6.3](#) behandelt.

1.5.2 Bordnetze für Elektromotorantriebe

Bei reinen Elektrofahrzeugen fallen die Systeme, die den Verbrennungsmotor sowie den Elektromotor zum Anlassen des Verbrennungsmotors betreffen, weg. Dafür muss im Winter deutlich mehr Leistung für die Elektroheizung eingeplant werden. Im Mittel wird im Winter eine Leistung über alles ohne Fahrbetrieb von 2 bis 3 kW benötigt. Damit ist die Reichweite im Winter auch durch die Witterungsverhältnisse eingeschränkt.

Eine wesentliche Grundlage für die Dimensionierung des Bordnetzes für den Antriebsstrang sind die erforderliche Ladeleistung, die verwendete Bordnetzspannung sowie die Akkumulatorkapazität. [Tabelle 1.3](#) enthält diese Basisdaten für momentan am Markt erhältliche Elektrofahrzeuge. Wie zu sehen, steigt die Betriebsspannung mit der Größe und Art des Elektrofahrzeugs. Bei den meisten Elektrofahrzeugen liegt die Betriebsspannung dagegen zwischen 350 V und 400 V. Allerdings wird nur der Antriebsstrang mit einer solch hohen Bordnetzspannung betrieben. Ein dreiphasiger Wechselrichter wird für den Drehstrom-Antriebsmotor benötigt. Für die normalen Verbraucher reicht dagegen die klassische Betriebsgleichspannung von 12 V. Ein Gleichstromwandler von beispielsweise 400 V auf 12 V versorgt das Bordnetz der konventionellen Verbraucher aus dem Hochvolt-Bordnetz ([Bild 1.12](#)).

Tabelle 1.3 Basisdaten von Elektrostraßenfahrzeugen verschiedener Hersteller

Elektrofahrzeug	Ladeleistung Normal/Schnell [kW]	Betriebs- spannung [V]	Speicher- kapazität [kWh]
VW E-UP	3,7 / 40	374	18,7
VW E-Golf	3,7 / 40	374	24,2
Renault Zoe	11 / 43	400	41,0
Audi e-tron	11 / 150	396	95,0
BMW i3 V1	7,4 / 50	360	18,8
BMW i3 V2	11 / 50	363	27,2
BMW i3 V3	11 / 50	352	37,9
Tesla Model 3	11 / 125	375	75,0
Tesla Model S	11 / 250	400	100,0
Porsche Taycan	11 / 270	800	93,4

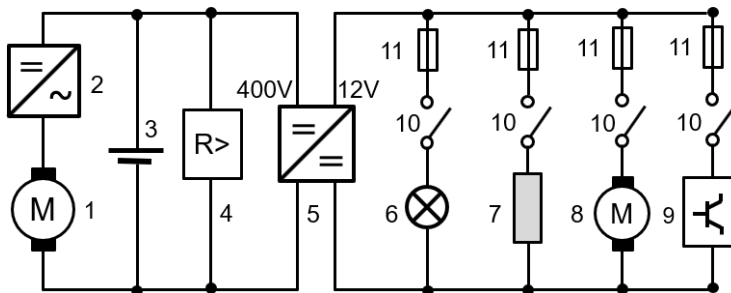


Bild 1.12 400-V/12-V-Bordnetz eines Elektrofahrzeugs: (1) Antriebsmotor, (2) Wechselrichter, (3) Energiespeicher, (4) Isolationsüberwachung, (5) Gleichstromwandler, (6) Beleuchtung, (7) Heizungen, (8) Stellmotoren, (9) Elektronik, (10) Schalter, (11) Sicherungen

Wie aus [Tabelle 1.3](#) ersichtlich, liegt bei allen Elektrofahrzeugen für das Normladen die notwendige Ladeleistung zwischen 3,7 kW und 11 kW. Die Leistung von 3,7 kW entspricht der Leistung, die maximal aus einem Wechselstromanschluss für 230 V und 16 A entnommen werden kann. Entsprechend ergeben sich für zwei getrennte Anschlüsse 7,4 kW oder für einen Drehstromanschluss 11 kW. Wird die Leistung von 11 kW aus einer einphasigen Gleichstromquelle mit einer Quellenspannung von 400 V bedient, benötigt man schon einen Ladestrom von 27,5 A und bei 350 V sogar einen Ladestrom von 31,5 A.

Die hohen Bordnetzspannungen von Elektrofahrzeugen erfordern jedoch besondere Maßnahmen zum Schutz vor dem elektrischen Schlag, welche in [Abschnitt 1.6](#) behandelt werden. Insbesondere IT-Systeme mit Isolationsüberwachung sind hier zu finden.

■ 1.6 Systeme nach Art ihrer Erdverbindung

Gleichstrom-Niederspannungssysteme bestehen im einfachsten Fall aus einer Einspeisung, einer Leitung, einem Schutzgerät und einem Verbraucher. Die notwendige Erdung des Systems kann in der Einspeiseanlage und in der Verbraucheranlage unterschiedlich ausgeführt werden. Deshalb werden auch die Gleichstromsysteme nach Art ihrer Erdverbindung unterschieden. Zur Kennzeichnung dienen die in der DIN VDE 0100-100 [\[21\]](#) eingeführten Buchstabenkombinationen, die generell für alle Stromsysteme gelten. Der erste Buchstabe bezeichnet die Art der Erdverbindung in der Einspeiseanlage und der zweite Buchstabe die Art der Erdverbindung in der Verbraucheranlage. Ein Zusatzbuchstabe kennzeichnet die Ausführungsform des Schutzleiters (Kurzzeichen PE = Protective Earth), der zum Schutz von Personen gegen den elektrischen Schlag dient. Die für die Sicherheit von Personen relevanten Aspekte werden in [Kapitel 10](#) behandelt.

1. Buchstabe (Erdung der Einspeiseanlage)

T (*frz. Terre, Erde*);

niederohmige oder starre Verbindung der Einspeiseanlage mit der Erde

I (*frz. Isolé, Isoliert*);

hochohmige oder keine Verbindung der Einspeiseanlage mit der Erde

2. Buchstabe (Erdung der Verbraucheranlage)

T (*frz. Terre, Erde*);

leitfähige Gehäuse der Geräte in der Verbraucheranlage geerdet, Erde der Verbraucheranlage und der Einspeiseanlage voneinander getrennt

N (*frz. Neutr , Neutral*);

leitfähige Gehäuse der Geräte in der Verbraucheranlage geerdet, Erde der Verbraucheranlage und der Einspeiseanlage über einen neutralen Leiter miteinander verbunden

Zusatzbuchstabe (Ausführung des Schutzleiters)

C (*frz. Combine, Kombiniert*); Rückleiter und Schutzleiter zwischen Einspeise- und Verbraucheranlage zusammengefasst verlegt (ein Leiter)

S (*frz. Separ , Separiert*); Rückleiter und Schutzleiter zwischen Einspeise- und Verbraucheranlage getrennt verlegt (zwei Leiter)

1.6.1 TN-Systeme

In TN-Systemen ist die Einspeiseanlage geerdet (T) und mit der Erde der Verbraucheranlage (N) verbunden. Ein leitender Kontakt des spannungsführenden Leiters mit der Schutz-erde (Erdschluss) führt bei ausreichend niedrigem Widerstand des Hauptstromkreises zu Kurzschlussströmen, die die vorgeschalteten Überstromeinrichtungen in der notwendigen Zeit zum Ausschalten bringen.

Kommt es aber bei einem Fehler zum Rückschluss des Stromkreises über einen hochohmigen Widerstand, könnte der Strom nicht mehr ausreichen, die notwendigen Abschaltzeiten zu erreichen. Dies ist besonders gefährlich, da es zum elektrischen Schlag oder Leitungsbrand führen kann. Aus diesem Grund wird bei TN-Systemen für Wechselstrom in der DIN VDE 0100-410 als Zusatzschutz eine empfindlichere Überwachung des Fehlerstroms mithilfe eines Fehlerstrom-Schutzschalters (RCD) empfohlen [22]. Eine Ausnahme stellt das TN-C-System dar (siehe [Abschnitt 10.2.2.1](#)). Diese Empfehlungen aus der Norm gelten auch für Gleichstrom-TN-Systeme. Eine besondere Gefährdung von Personen liegt bei TN-Systemen vor, wenn der PEL-- bzw. der PE-Leiter in der Stromversorgungsleitung oder in der Verbraucheranlage selbst unterbrochen ist. Darauf wird in [Abschnitt 10.2.2](#) eingegangen.

a) TN-C-System

Im TN-C-System ist, zusätzlich zur Erdung der Einspeiseanlage und zur Verbindung mit der Erde der Verbraucheranlage, der Schutzleiter (PE) mit dem Rückleiter (L-) zu einem gemeinsamen Leiter (PEL-) zusammengefasst (C für kombiniert). Ein leitendes Gehäuse wird mit dem Leiter PEL- verbunden. Da eine Erdung des Leiters PEL- keinen Einfluss auf die Schutzfunktion hat, darf dieser auch in der Verbraucheranlage geerdet werden (punkt-ierte Erdung in [Bild 1.13](#)).

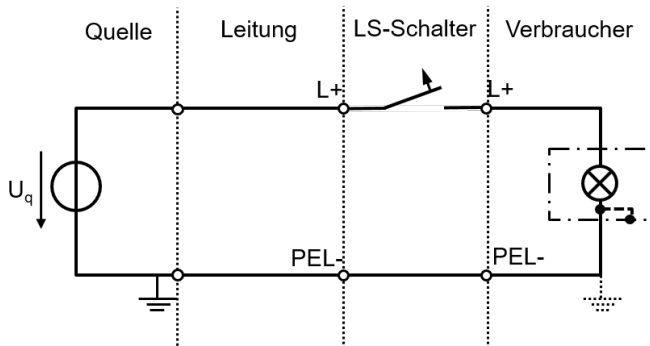


Bild 1.13 TN-C-System mit Leitungsschutzschalter (LS-Schalter)

b) TN-S-System

Im TN-S-System ist die Einspeiseanlage geerdet und mit der Erde der Verbraucheranlage verbunden. Der Schutzleiter (PE) ist bis zur Einspeiseanlage getrennt vom Rückleiter (L-) verlegt (S für separiert). Ein leitendes Gehäuse wird mit dem PE-Leiter verbunden. Da eine