

# 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	Lichtbogenlösbleche .....	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>