

Handbuch Leistungselektronik

Grundlagen • Stromversorgung • Antriebe

Herausgeber

Prof. (em.) Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. e. h.
Rudolf Lappe

5., stark bearbeitete Auflage

Verlag Technik GmbH Berlin • München

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	17
Grundlagen	20
1. Einführung und Übersicht	20
1.1. Aufgaben der Leistungselektronik	20
1.2. Grundsätzlicher Aufbau von Stromrichtern	21
1.2.1. Gleichrichter und Wechselrichter	21
1.2.2. Energieumwandlung in einer oder mehreren Stufen	22
1.2.3. Aufbau eines Stromrichters	22
1.2.4. Konstruktion	23
1.3. Einsatzgebiete und Vorteile der Leistungselektronik	23
1.3.1. Halbleiterschalter	24
1.3.2. Stromrichter im Bereich der Erzeugung, Übertragung und Ver- teilung der Energie	25
1.3.3. Stromrichter im Bereich der Energieverbraucher	26
1.4. Innovationen der Leistungselektronik	28
1.4.1. Neue Bauelemente der Leistungselektronik	28
1.4.2. Fortschritte bei der Gerätetechnik	29
1.4.3. Weiterentwicklung der Informationselektronik	30
1.4.4. Rechnergestützte Entwurfsverfahren	30
2. Halbleiterventile	32
2.1. Übersicht	32
2.2. pn-Übergang	32
2.3. Dioden	35
2.3.1. Aufbau und Kennlinien	35
2.3.2. Schaltverhalten	37
2.3.3. Grenzwerte und Kenngrößen	38
2.3.4. Beanspruchung und Belastbarkeit	39
2.3.5. Dioden-Varianten	40
2.4. Thyristoren	40
2.4.1. Übersicht	40
2.4.2. Konventionelle Thyristoren	42
2.4.2.1. Vorwärtssperrzustand	42
2.4.2.2. Zündung	42
2.4.2.3. Durchlaßzustand	43
2.4.2.4. Rückwärtssperrzustand	43
2.4.2.5. Einschalt- und Ausschaltverhalten	43
2.4.3. Varianten konventioneller Thyristoren	45
2.4.4. Abschaltthyristoren	45
2.4.5. Triacs	47

2.5.	Thermisches Verhalten	48
2.5.1.	Einführung	48
2.5.2.	Verlustleistung und Temperatur des Kristalls %	48
2.5.2.1.	Konstante Verlustleistung	48
2.5.2.2.	Veränderliche Verlustleistung	50
2.5.2.3.	Scheitelwert der Temperatur des Kristalls bei Impulsfolgen	52
2.6.	Bipolare Leistungs-Schalttransistoren	53
2.6.1.	Übersicht	53
2.6.2.	Aufbau und Wirkungsweise	53
2.6.2.1.	Durchlaß- und Vorwärts-Sperrzustand	53
2.6.2.2.	Schaltverhalten	56
2.6.2.3.	Schaltbelastbarkeit	57
2.6.3.	Darlington-Transistoren, IGBT, ASIC	58
2.6.3.1.	Darlington-Transistoren	58
2.6.3.2.	IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors)	58
2.6.3.3.	ASIC (Application-Specific Integrated Circuits)	59
2.7.	Leistungs-MOSFET für Schaltbetrieb	60
2.7.1.	Übersicht	60
2.7.2.	Vorwärtssperrzustand, Vorwärts- und Rückwärtsdurchlaßzustand	60
2.7.3.	Schaltverhalten	62
2.7.4.	Grenzwerte und Kenngrößen	62
2.8.	Reihen- und Parallelschaltung, Schutzeinrichtungen	64
2.9.	Zuverlässigkeit von Halbleiterventilen	66
3.	Schaltungen der Stromrichter	68
3.1.	Gleichrichter	68
3.1.1.	Einpulsleichrichter	69
3.1.1.1.	Widerstandslast	69
3.1.1.2.	Glättung mit einer Drossel	72
3.1.1.3.	Glättung mit einem Kondensator	72
3.1.1.4.	Arbeit auf Gegenspannung	73
3.1.1.5.	Schaltung mit Freilaufzweig	73
3.1.1.6.	Spannungsverdoppler- und -Vervielfacherschaltungen	74
3.1.2.	Zweipulsleichrichter »	74
3.1.2.1.	Mittelpunkt- und Brückenschaltung	74
3.1.2.2.	Widerstandslast	75
3.1.2.3.	Belastung mit Widerstand, Glättung mit Drossel oder Kondensator	75
3.1.2.4.	Betrieb mit Freilaufzweig, halbgesteuerte Schaltung	78
3.1.2.5.	Verdopplerschaltung	81
3.1.3.	Dreipulsleichrichter	81
3.1.4.	Sechspulsleichrichter	83
3.1.4.1.	Brückenschaltung	83
3.1.4.2.	Saugdrosselschaltung	86
3.1.5.	Gleichrichter mit $p = 12, 24$ usw.	87
3.1.6.	Lückender Gleichstrom	89
3.2.	Stromrichtertransformator, Oberschwingungen, Steuerung	89
3.2.1.	Stromrichtertransformator	89
3.2.1.1.	Auslegung	89

3.2.1.2.	Streureaktanz des Transformators und Netzreaktanz	91
3.2.2.	Oberschwingungen der Gleichspannung und der Netzströme	94
3.2.2.1.	Oberschwingungen der Gleichspannung	94
3.2.2.2.	Oberschwingungen der Netzströme	96
3.3.	Steuerung der Gleichspannung	98
3.3.1.	Anschnittsteuerung	98
3.3.1.1.	Zündsteuerung	99
3.3.1.2.	Blindstromsparende Schaltungen	101
3.3.1.3.	Lösch- und Sektorsteuerung	101
3.3.2.	Transformator mit Anzapfungen oder Stelltransformator	102
3.4.	Wechselrichter	103
3.4.1.	Selbstgeführte Wechselrichter	104
3.4.1.1.	Selbstgeführte Spannungs-Wechselrichter mit Transistoren oder Abschaltthyristoren	104
3.4.1.2.	Selbstgeführte Spannungs-Wechselrichter mit nicht abschaltbaren Thyristoren	109
3.4.1.3.	Selbstgeführte Strom Wechselrichter	110
3.4.1.4.	Weitere Entwicklung	112
3.4.2.	Netzgeführte Wechselrichter	115
3.4.3.	Maschinengeführte Wechselrichter	117
3.4.4.	Lastgeführte Wechselrichter	118
3.4.4.1.	Wechselrichter mit reihenkompensierter Last	119
3.4.4.2.	Wechselrichter mit reihenkompensierter Last und abschaltbaren Ventilen	120
3.4.4.3.	Wechselrichter mit parallelkompensierter Last	121
3.4.4.4.	Berechnungsbeispiel	124
3.5.	Umkehrstromrichter	127
3.5.1.	Zwei-Quadrant-Stromrichter	128
3.5.2.	Vier-Quadrant-Stromrichter	128
3.5.2.1.	Kreisstromfreier Betrieb	130
3.5.2.2.	Betrieb mit Kreisstrom	131
3.6.	Umrichter	132
3.6.1.	Wechselstrom-Direktumrichter	132
3.6.1.1.	Trapezumrichter	134
3.6.1.2.	Steuerungsumrichter	134
3.6.2.	Zwischenkreis-Wechselstromumrichter	135
3.6.2.1.	Wechselstromumrichter mit Spannungszwischenkreis	136
3.6.2.2.	Wechselstromumrichter mit Stromzwischenkreis	136
3.6.3.	Gleichstromsteller	138
3.6.3.1.	Tiefsetz-Gleichstromsteller	138
3.6.3.2.	Hochsetz-Gleichstromsteller	139
3.6.3.3.	Zwei- und Vier-Quadranten-Betrieb	139
3.6.4.	Zwischenkreis-Gleichstromumrichter	141
3.7.	Wechselstrom- und Drehstromsteller	141
3.7.1.	Wirkungsweise	142
3.7.1.1.	Wechselstromsteller	142
3.7.1.2.	Vollgesteuerter Drehstromsteller	144
3.7.1.3.	Halbgesteuerter Drehstromsteller	148
3.7.2.	Kennlinien und Kenngrößen	148

3.7.2.1.	Wechselstromsteller.	148
3.7.2.2.	Drehstromsteller.	150
3.7.3.	Wechselstrom- und Drehstromsteller mit naeigeschaltetem Gleichrichter.	150
3.7.4.	Schaltungswahl.	152
3.8.	Steuersätze.	152
3.8.1.	Aufgaben.	152
3.8.2.	Steuersätze für die Zündsteuerung netzgeführter Stromrichter.	153
3.8.2.1.	Steuersätze für Zweipulsstromrichter.	153
3.8.2.2.	Steuersätze für m-Puls-Stromrichter.	156
3.8.3.	Ausführungsformen der Funktionseinheiten.	156
3.8.3.1.	Spannungsanpassung und Phasenschwenkung.	156
3.8.3.2.	Filter und Synchronisation.	160
3.8.3.3.	Steuerbare Verzögerer.	161
3.8.3.4.	Zündimpulsformung.	162
3.8.3.5.	Zündimpulsverteilung.	163
3.8.3.6.	Zündimpulsverstärkung.	164
3.8.3.7.	Potentialtrennung.	165
3.8.3.8.	Steuersätze mit anwendungsspezifischen Schaltkreisen.	166
3.8.4.	Steuersätze für selbst- und lastgeführte Wechselrichter.	168
3.8.5.	Steuersätze für Gleichstromsteller.	169
3.8.6.	Treiber für abschaltbare Ventile.	171
3.8.6.1.	Treiber für bipolare Leistungs-Schalttransistoren.	173
3.8.6.2.	Treiber für MOS-Schalttransistoren.	176
3.8.6.3.	Treiber für IGBT.	177
3.8.6.4.	Treiber für GTO-Thyristoren.	177
3.9.	Rechnergestützte Analyse und Projektierung von Anlagen der Leistungselektronik.	179
3.9.1.	Berechnung der Knotenspannungen eines Netzwerks.	179
3.9.2.	Rechnergestützter Entwurf von Anlagen der Leistungselektronik.	183
4.	Grundsätzliches über Geräte und Anlagen der Leistungselektronik.	185
4.1.	Anforderungen, Betriebsverhalten, Auslegung des Transformators und der Ventile.	185
4.1.1.	Anforderungen an Stromrichtergeräte und-anlagen.	185
4.1.2.	Belastungskennlinien *.	185
4.1.2.1.	Gleichrichter kleiner Leistung.	186
4.1.2.2.	Gleichrichter mittlerer und großer Leistung.	187
4.1.3.	Wirkungsgrad.	188
4.1.4.	Blindleistung, Verschiebungsfaktor.	189
4.1.5.	Auslegung des Stromrichtertransformators und der Ventile.	192
4.1.5.1.	Stromrichtertransformator.	192
4.1.5.2.	Ventile.	192
4.2.	Kurzschlußströme.	193
4.2.1.	Grundlagen.	193
4.2.2.	Überschlägige Berechnung.	194
4.2.3.	Rechnergestützte-Analyse.	196
4.3.	Elektromagnetische Verträglichkeit.	197
4.3.1.	Netzurückwirkungen.	198
4.3.1.1.	Kriterien für die Qualität der Netzspannung.	198

4.3.1.2.	Verzerrung der Netzspannung am Anschlußpunkt	199
4.3.1.3.	Netzurückwirkungen ohne Kompensation bei Industrienetzen	199
4.3.1.4.	Netzurückwirkungen bei Niederspannungsnetzen z/jr Versorgung von Hausanschlüssen	204
4.3.2.	Verringerung der Netzurückwirkungen.	205
4.3.2.1.	Kompensation mit Parallelkondensatoren	205
4.3.2.2.	Kompensation mit Saugkreisen	209
4.3.2.3.	Beispiel für eine Anlage mit dynamischer Kompensation des Blindstroms.	210
4.3.2.4.	Blindleistungsstromrichter.	210
4.3.3.	Oberschwingungen in von Stromrichtern gespeisten Netzen	214
4.3.4.	Störspannungen	216
4.3.5.	Funktstörungen	216
4.3.6.	Störfestigkeit	217
4.4.	Informationseinrichtungen	218
4.4.1.	Bausteine der Informationsverarbeitung	219
4.4.2.	Entwicklungstendenzen analoger und digitaler Signalverarbei- tung	221
4.4.3.	Analoge Signalverarbeitung	222
4.4.4.	Digitale Informationsverarbeitung mit Mikrorechnern.	224
4.4.4.1.	Funktionsweise.	224
4.4.4.2.	Merkmale und Funktionsanpassung	227
4.4.5.	Regelung	229
4.4.5.1.	Regelkreis.	229
4.4.5.2.	Regelverstärker und Rechenfunktionseinheiten.	231
4.4.5.3.	Bestandteile der Regelung mit Mikrorechnern.	233
4.4.5.4.	Softwaremodule.	234
4.4.5.5.	Weitere Bauteile.	235
4.4.6.	Zuverlässigkeit und Service.	236
4.4.7.	Einsatzbedingungen.	237
4.4.8.	Baugruppensysteme.	238
4.5.	Baugruppen, Geräte und Anlagen.	239
4.5.1.	Allgemeine Anforderungen, Normen	239
4.5.2.	Kühlung von Stromrichtern.	241
4.5.2.1.	Anforderungen und Möglichkeiten	241
4.5.2.2.	Luftkühlung	242
4.5.2.3.	Flüssigkeitskühlung	245
4.5.2.4.	Verdampfungskühlung	247
4.5.3.	Bauelemente und Bauteile durch Funktions- und Schaltkreis- integration.	248
4.5.3.1.	Leistungsteile.	248
4.5.3.2.	Monolithische und hybride Integration.	249
4.5.3.3.	Module	250
4.5.4.	Ventilbaugruppen, Ventilsätze, Stromrichtergeräte und -anlagen	254
4.5.4.1.	Ventilbaugruppen und Ventilsätze.	254
4.5.4.2.	Stromrichtergeräte und -anlagen.	254
4.5.4.3.	Einbaugeräte.	256
4.5.4.4.	Stromrichtergeräte im Schrank	258

4.5.4.5.	Stromrichterkomponenten zum Aufbau von Anlagen	258
4.5.5.	Berücksichtigung besonderer Umweltbedingungen	260
4.5.6.	Inbetriebnahme und Service	261
Einsatzgebiete		264
5.	Geräte und Anlagen zur Stromversorgung	264
5.1.	Speisung von Gleichstromnetzen	264
5.1.1.	Industrienetze	264
5.1.2.	Gleichstrom-Bahnnetze	266
5.1.3.	Bahnstromrichter	269
5.1.3.1.	Forderungen	269
5.1.3.2.	Bemessung des Stromrichters	270
5.1.3.3.	Kurzschlußschutz	271
5.1.3.4.	Spannungsbeanspruchungen	274
5.1.3.5.	Konstruktive Ausführung	275
5.1.3.6.	Periphere Einrichtungen und elektromagnetische Verträglichkeit	276
5.1.4.	Dimensionierungsbeispiel für einen Gleichrichter für eine Straßenbahn	276
5.1.5.	Unterwerke mit Thyristorschaltern	280
5.1.5.1.	Elektronischer Gleichstromschalter	280
5.1.5.2.	Elektronischer Drehstromschalter	280
5.1.5.3.	Vor- und Nachteile der Thyristorschalter	282
5.2.	Netzgeräte, Ersatz- und autarke Stromversorgungen mit Stromrichtern	285
5.2.1.	Netzgeräte	285
5.2.1.1.	Spannungsgeregelte Netzgeräte	285
5.2.1.2.	Prinzipschaltungen wichtiger Netzgeräte	287
5.2.1.3.	Sperr- und Durchflußwandler	289
5.2.1.4.	Magnetisch geregelte Netzgeräte	290
5.2.1.5.	Stromverlauf und Leistungsfaktor	290
5.2.2.	Gesicherte Stromversorgung	290
5.2.2.1.	Versorgungssicherheit	290
5.2.2.2.	Elektronische Netzentstörkombinationen und batteriegestützte Anlagen	292
5.2.3.	Unterbrechungsfreie Stromversorgungen (USV)	293
5.2.3.1.	USV mit Gleichspannungszwischenkreis	293
5.2.3.2.	USV mit Umkehrstromrichtern	296
5.2.4.	Stromrichter für die Nutzung von Sonnen- und Windenergie	297
5.3.	Ladegeräte, Anlagen zur Versorgung mit Gleichstrom	298
5.3.1.	Batterien in Anlagen für gesicherte Stromversorgungen	299
5.3.2.	Ladegleichrichter	299
5.3.2.1.	Kennlinien von Gleichrichtern mit Batterielast	299
5.3.2.2.	Unregelmäßiges Ladegerät	301
5.3.2.3.	Thyristorgeregeltes Ladegerät	302
5.3.2.4.	Transistorgeregeltes Ladegerät	305
5.3.3.	Schaltungen von Anlagen zur Versorgung mit Gleichstrom	306
5.3.3.1.	Einfacher Parallelbetrieb	306
5.3.3.2.	Bereitschaftsparallelbetrieb mit Gegenzellen	307
5.3.3.3.	Bereitschaftsparallelbetrieb mit unterteilter Batterie	309
5.3.3.4.	Bereitschaftsparallelbetrieb mit elektronischer Zusatzeinrichtung	311

5.4.	Stromversorgung für Hochspannungsanlagen	314
5.4.1.	Hochspannungsfiler.	314
5.4.2.	Gleichspannungsprüfanlagen. $\wedge$	317
5.5.	Elektronische Erregung von Synchronmaschinen.	317
5.5.1.	Allgemeine Gesichtspunkte.	317
5.5.2.	Ruhende Gleichrichter.	318
5.5.3.	Bürstenlose Erregung von Generatoren.	320
5.5.4.	Bürstenlose Erregung von Synchronmotoren.	320
5.6.	Thyristorschalter.	322
5.6.1.	Anforderungen an Schalter.	322
5.6.2.	Gleichstromschalter.	324
5.6.3.	Wechselstromschalter.	325
5.6.4.	Drehstromschalter.	327
5.6.5.	Ansteuerung von Thyristoren in Schaltern.	328
5.6.5.1.	Ansteuern mit Gleichspannung.	328
5.6.5.2.	Ansteuern ohne Hilfsenergie.	329
5.6.5.3.	Ansteuern mit Impulsen.	331
5.6.6.	Einsatzbeispiele.	331
6.	Stromrichter für drehzahlverstellbare Antriebe.	334
6.1.	Übersicht	334
6.1.1.	Aufgaben und Grundaufbau.	334
6.1.1.1.	Stellantriebe und Arbeit leistende Antriebe.	334
6.1.1.2.	Wahl des Antriebssystems.	335
6.1.1.3.	Grundsätzlicher Aufbau.	337
6.1.2.	Auswahl und Dimensionierung von Stromrichtern für Antriebe	337
6.1.2.1.	Leistung und Lastmoment	340
6.1.2.2.	Umkehr des Drehmoments und der Drehrichtung	342
6.1.2.3.	Drehstrom- oder Gleichstromantriebe?.	342
6.1.2.4.	Anpassung Stromrichter und Motor.	345
6.1.2.5.	Versorgungssicherheit und Energiequalität	346
6.2.	Stromrichter mit Thyristoren zur Speisung von Gleichstromantrieben	347
6.2.1.	Netzgeführte Stromrichter für Einrichtungsantriebe.	350
6.2.1.1.	Stellglieder kleiner Leistung ($P \leq 30 \text{ kW}$).	351
6.2.1.2.	Stellglieder mittlerer Leistung ($30 \leq P \leq 500 \text{ kW}$).	353
6.2.1.3.	Stellglieder großer Leistung ($500 \text{ kW} \leq P < \text{einige Megawatt}$)	358
6.2.2.	Selbstgeführte Stromrichter für Einrichtungsantriebe.	361
6.2.2.1.	Gleichstromsteller.	361
6.2.2.2.	Netzstromrichter mit Selbstführung	364
6.3.2.	Anpassung Stellglied - Gleichstrommaschine.	364
6.2.4.	Stromrichterauswahl mit Berechnungsbeispiel	367
6.2.5.	Übertragungsverhalten und analoge Informationsverarbeitung	368
6.2.6.	Zusatzeinrichtungen.	372
6.2.7.	Digitale Informationsverarbeitung	375
6.2.7.1.	Mikrorechnereinsatz.	375
6.2.7.2.	Forderungen an die Systemsoftware.	377
6.2.7.3.	Behandlung durch Projektanten und Nutzer.	379
6.2.7.4.	Antriebe im Automatisierungsverbund.	382
6.2.7.5.	Spezifische Meßprobleme (Sensortechnik).	383
6.2.8.	Umkehr des Drehmoments.	386

6.2.8.1.	Netzgeführte Stromrichter mit und ohne Kreisstrom	387
6.2.8.2.	Umschaltung im Ankerkreis	388
6.2.8.3.	Umschaltung im Feldkreis.	392
6.2.8.4.	Selbstgeführter Stromrichter.	393
6.2.8.5.	Übertragungsverhalten und Informationsverarbeitung	393
6.3.	Stromrichter mit Transistoren zur Steuerung von Gleichstrommotoren . . .	394
6.3.1.	Gleichstromsteller für die Ankerspannung	394
6.3.2.	Betrieb nur im 1. Quadranten	395
6.3.3.	Zwei- und Vier-Quadranten-Betrieb.	395
6.4.	Stromrichter mit Thyristoren zur Speisung von Drehfeldmaschinen	397
6.4.1.	Steuerung von Asynchronmaschinen.	398
6.4.1.1.	Verstellen der Läuferspannung (Kaskadenschaltungen).	400
6.4.1.2.	Verstellen der Ständerspannung (Spannungssteuerung).	402
6.4.1.3.	Verstellen der Ständerspannung und -frequenz (Frequenzsteuerung).	406
6.4.1.4.	Schaltungen, Leistungsbereiche, Anwendungen.	409
6.4.1.5.	Steuer- und Regelstrukturen.	413
6.4.1.6.	Mehrmotorenantriebe.	419
6.4.2.	Steuerung von Synchronmotoren (Frequenzsteuerung).	420
6.4.2.1.	Steuerprinzipien, Schaltungen, Leistungsbereiche, Einsatzgebiete	420
6.4.2.2.	Fremdgesteuerter Synchronmotor.	421
6.4.2.3.	Selbstgesteuerter Synchronmotor.	422
6.4.3.	Frequenzsteuerung von Linearmotoren.	424
6.4.4.	Analoge und digitale Informationsverarbeitung	425
6.4.5.	Hinweise zur Wahl des „optimalen“ Antriebs.	425
6.5.	Stromrichter mit Transistoren zur Speisung von Drehfeldmaschinen	426
6.5.1.	Funktionseinheiten des Leistungsteils.	427
6.5.1.1.	Netzfilter und Schützbaugruppe	427
6.5.1.	Gleichrichter.	428
6.5.1.3.	Gleichspannungszwischenkreis.	429
6.5.2.	Meßglieder.	430
6.5.3.	Steuerverfahren für Transistorumrichter.	430
6.5.3.1.	Puls-Amplituden- und Puls-Breiten-Modulation	431
6.5.3.2.	Vektormodulation *.	432
6.5.4.	Technische Merkmale und Einsatzgebiete.	434
6.5.4.1.	Technische Merkmale	434
6.5.4.2.	Einsatzgebiete.	434
6.6.	Stromrichter für Triebfahrzeuge.	435
6.6.1.	Allgemeines.	435
6.6.2.	Traktionsstromrichter für Wechselstrom-Triebfahrzeuge	437
6.6.2.1.	Stellglieder für Kommutatorfahrmotoren und Synchronmotoren	437
6.6.2.2.	Traktionsumrichter für Asynchron-Fahrmotoren.	441
6.6.3.	Traktionsstromrichter für Gleichstrom-Triebfahrzeuge.	444
6.6.4.	Stellglieder für spezielle Traktionsantriebe.	449
6.6.4.1.	Stromrichter für Mehrsystemlokomotiven.	449
6.6.4.2.	Stromrichter für dieselelektrische Triebfahrzeuge.	450
6.6.5.	Stellglieder für batteriegespeiste Triebfahrzeuge.	452

7. Stromversorgung für technologische Prozesse	454
7.1. Gleichrichteranlagen für Elektrolysen und Galvanik	454
7.1.1. Einführung	454
7.1.2. Forderungen an die Gleichrichteranlagen	454
7.1.3. Anlagengestaltung	455
7.1.4. Gleichrichter	457
7.1.4.1. Gleichrichtersatz	457
7.1.4.2. Transformator	457
7.1.4.3. Aufstellung	458
7.1.4.4. Beispiel für die Auslegung eines Gleichrichters für eine Elektrolyse	458
7.1.5. Schutz- und Überwachungseinrichtungen	460
7.1.6. Regeleinrichtungen	460
7.2. Stromrichter zum Speisen von Lichtbogen- und Plasma-Schmelzöfen und -Schweißgeräten	461
7.2.1. Anwendungsgebiet und Forderungen an die Stromversorgungseinrichtung	461
7.2.1.1. Anwendungsgebiet	461
7.2.1.2. Forderungen an die Stromversorgungseinrichtung und Besonderheiten der Lichtbogen- und der Plasmabogenspeisung	461
7.2.2. Grundsaltungen der Stromversorgungseinrichtungen	464
7.2.2.1. Lichtbogen- und Plasmaschweißgeräte	464
7.2.2.2. Vakuum-Lichtbogen- und Plasmaschmelzöfen	469
7.2.3. Gleichstromspeisung für einen Plasmaschmelzofen großer Leistung	470
7.3. Umrichter für induktive Erwärmungseinrichtungen	475
7.3.1. Anforderungen von Seiten des zu erwärmenden Gutes	475
7.3.2. Umrichter mit nicht abschaltbaren Thyristoren	477
7.3.3. Umrichter mit abschaltbaren Leistungshalbleitern	482
7.3.4. Umrichter zur Speisung einer induktiven Kochanlage	485
7.4. Wechselstromsteller für Beleuchtungsanlagen, Widerstandsöfen und Schweißgeräte	485
7.4.1. Steller für Beleuchtungsanlagen	485
7.4.2. Steller für Widerstandsöfen	489
7.4.3. Steller für Widerstands-Schweißgeräte	490
Literaturverzeichnis	491
Sachwörterverzeichnis	504
Inserentenverzeichnis	511