

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Grundbegriffe der Energietechnik</b> . . . . .	1
1.1 Grundeinheiten . . . . .	1
1.2 Drehstromsysteme . . . . .	5
1.2.1 Drehfeld . . . . .	5
1.2.2 Symmetrischer Betrieb . . . . .	9
1.2.3 Stern- und Dreieckschaltung . . . . .	10
1.3 Bezugene Größen . . . . .	13
1.3.1 Grundsysteme . . . . .	13
1.3.2 per-unit-System . . . . .	15
1.3.3 %/MVA-System . . . . .	17
1.4 Transformationen . . . . .	18
1.4.1 Diagonaltransformation . . . . .	18
1.4.2 Transformationsmatrix . . . . .	19
1.4.3 Symmetrische Komponenten . . . . .	20
1.4.4 Diagonalkomponenten . . . . .	27
1.4.5 Park-Komponenten . . . . .	29
1.4.6 Raumzeiger . . . . .	32
Literatur . . . . .	33
<b>2 Elektrische Maschinen</b> . . . . .	35
2.1 Transformatoren . . . . .	35
2.1.1 Aufbau eines Zweiwicklungstransformators . . . . .	36
2.1.2 Drehstromtransformator . . . . .	43
2.1.3 Dreiwicklungstransformatoren . . . . .	49
2.1.4 Stufenstellung . . . . .	50
2.1.5 Sonderbauformen . . . . .	52
2.1.6 Schutz von Transformatoren . . . . .	53
2.2 Drosselpulen . . . . .	55
2.3 Kondensatoren und Filter . . . . .	57

---

2.4	Messwandler . . . . .	59
2.4.1	Spannungswandler . . . . .	59
2.4.2	Stromwandler . . . . .	61
2.5	Grundprinzipien der rotierenden elektrischen Maschinen . . . . .	63
2.6	Gleichstrommaschine . . . . .	65
2.6.1	Aufbau der Gleichstrommaschine . . . . .	65
2.6.2	Modell der Gleichstrommaschine . . . . .	69
2.6.3	Kennlinien der Gleichstrommaschine . . . . .	73
2.6.4	Sonderbauformen der Gleichstrommaschine . . . . .	75
2.6.5	Gleichstromantriebe . . . . .	77
2.7	Synchronmaschinen . . . . .	80
2.7.1	Aufbau der Synchronmaschine . . . . .	81
2.7.2	Modell der Synchronmaschine . . . . .	85
2.7.3	Synchronmaschine im stationären Bereich . . . . .	90
2.7.4	Die Synchronmaschine im Kurzschluss . . . . .	92
2.8	Asynchronmaschine . . . . .	99
2.8.1	Stationäres Modell der Asynchronmaschine . . . . .	100
2.8.2	Betriebsverhalten der Asynchronmaschine . . . . .	102
2.8.3	Wechselstrommaschine . . . . .	105
2.8.4	Feldorientierte Regelung . . . . .	106
2.9	Sondermaschinen . . . . .	111
2.9.1	Linearmotor . . . . .	111
2.9.2	Reluktanzmotor . . . . .	112
2.9.3	Schrittmotoren . . . . .	113
2.9.4	Elektronikmaschine . . . . .	114
	Literatur . . . . .	115
3	<b>Leistungselektronik</b> . . . . .	117
3.1	Grundlagen der Stromrichter . . . . .	118
3.1.1	Grundfunktionen von Stromrichterschaltungen . . . . .	118
3.1.2	Leistungshalbleiter . . . . .	119
3.1.3	Eigenschaften von Stromrichterschaltungen . . . . .	122
3.2	Stromrichter . . . . .	123
3.2.1	Stromrichter mit Dioden . . . . .	123
3.2.2	Stromrichter mit Thyristoren . . . . .	128
3.2.3	Thyristorschaltungen mit Löscheinrichtung . . . . .	141
3.2.4	Schaltungen mit abschaltbaren Halbleitern . . . . .	143
3.3	Steuerteil und Zusatzeinrichtungen . . . . .	152
3.3.1	Zündgerät . . . . .	152
3.3.2	Ansteuerung der Halbleiterventile . . . . .	155
3.3.3	Schutz . . . . .	155
3.3.4	Kühlung . . . . .	156
	Literatur . . . . .	159

---

<b>4 Leitungen</b>	161
4.1 Beschreibung der Leitungen	161
4.1.1 Leitungswiderstand	162
4.1.2 Induktivitäten und Kopplungen	162
4.1.3 Ersatzschaltung für gekoppelte Leiter	165
4.1.4 Kapazitive Kopplung	168
4.1.5 Ersatzschaltung für kapazitiv gekoppelte Leiter	171
4.1.6 Leitungsersatzschaltung	172
4.1.7 Ersatzleiter	174
4.1.8 Mittlerer geometrischer Abstand	177
4.2 Fernleitungen	178
4.2.1 Leitungsgleichungen	178
4.2.2 Stationärer Betrieb	183
4.3 Bau von Freileitungen	185
4.4 Kabel	188
4.5 Beeinflussung und EMV	191
4.5.1 Ohmsche Beeinflussung	192
4.5.2 Induktive Beeinflussung	192
4.5.3 Kapazitive Beeinflussung	194
4.5.4 Kompensationsleiter	195
4.5.5 Erdungsanlagen	197
4.5.6 Hochfrequente Beeinflussung	198
4.5.7 Beeinflussung des Menschen	199
Literatur	202
<b>5 Schaltanlagen</b>	203
5.1 Primärtechnik	203
5.1.1 Aufbau von Schaltanlagen	203
5.1.2 Bauformen von Schaltanlagen	206
5.1.3 Schalter	209
5.1.4 Sammelschienen	216
5.1.5 Überspannungsableiter	217
5.2 Sekundärtechnik	218
5.2.1 Meldung	219
5.2.2 Steuerung	219
5.2.3 Messung	220
5.2.4 Zählung	221
5.2.5 Stationsleittechnik	222
5.3 Arbeiten in elektrischen Anlagen	225
Literatur	226
<b>6 Hochspannungstechnik</b>	227
6.1 Erzeugung hoher Spannungen	227
6.2 Hochspannungsmesstechnik	231

6.3	Hochspannungsprüftechnik.....	232
6.4	Hochspannungsfestigkeit .....	233
6.4.1	Gasförmige Isolierstoffe.....	234
6.4.2	Lichtbogen .....	238
6.4.3	Flüssige Isolierstoffe .....	240
6.4.4	Feste Isolierstoffe.....	241
6.5	Feldberechnung .....	242
6.6	Isolationskoordination .....	248
6.7	Blitzschutz .....	250
	Literatur.....	253
7	<b>Energieerzeugung</b> .....	255
7.1	Energiebedarf und Energievorräte .....	255
7.1.1	Energieverbrauch und Wirtschaftswachstum .....	256
7.1.2	Energiebedarf .....	258
7.1.3	Energiebereitstellung und Energievorräte.....	259
7.2	Elektrizitätswirtschaft .....	265
7.2.1	Energieversorgungsunternehmen .....	265
7.2.2	Verbundnetz .....	267
7.2.3	Strompreisgestaltung .....	272
7.2.4	Kraftwerkseinsatz .....	275
7.3	Wasserkraftwerke.....	278
7.3.1	Potentielle Energie des Wassers .....	279
7.3.2	Wasserkraftmaschinen.....	280
7.4	Fossile Kraftwerke .....	285
7.4.1	Verbrennungsprozess.....	285
7.4.2	Kesselanlage.....	287
7.4.3	Dampfprozess .....	289
7.4.4	Dampfturbinen .....	290
7.4.5	Kraft-Wärme-Kopplung .....	291
7.4.6	Gasturbinen-Kraftwerk .....	294
7.5	Kernkraftwerke.....	296
7.5.1	Kernphysikalische Grundlagen.....	296
7.5.2	Leichtwasserreaktoren .....	297
7.5.3	Reaktorsicherheit .....	298
7.5.4	Hochtemperaturreaktor.....	303
7.5.5	Schwerwasserreaktor .....	303
7.5.6	Schneller Brutreaktor.....	303
7.5.7	Fusionsreaktor.....	304
7.5.8	Radioaktivität .....	304
7.5.9	Kernkraftdiskussion .....	306

7.6	Regenerative Energieerzeugung .....	308
7.6.1	Wasserkraftwerke .....	309
7.6.2	Gezeitenkraftwerke .....	309
7.6.3	Meereswellen und Meerewärme .....	310
7.6.4	Windkraft .....	310
7.6.5	Solarenergie .....	316
7.6.6	Biomasse .....	320
7.6.7	Geothermische Kraftwerke .....	320
7.6.8	Wasserstofftechnologie .....	322
7.6.9	Perpetuum Mobile .....	323
7.7	Netzregelung .....	324
7.8	Rationelle Energieanwendung .....	328
7.9	Technikfolgenabschätzung .....	332
7.9.1	Einführung neuer Techniken .....	336
7.9.2	Arbeitsplätze .....	337
7.9.3	CO <sub>2</sub> -Problematik .....	337
7.9.4	Kyoto-Protokoll .....	339
7.9.5	Emissionsrechtehandel .....	339
7.9.6	Ethikkommissionen .....	340
	Literatur .....	340
8	Energieversorgungsnetze .....	343
8.1	Netzformen .....	344
8.2	Sternpunktbehandlung .....	345
8.2.1	Netze mit niederohmigen Sternpunktterdungen .....	346
8.2.2	Netze mit isolierten Sternpunkten .....	348
8.2.3	Netze mit Erdschlusslöschung .....	350
8.3	Netzberechnung .....	351
8.3.1	Lastfluss .....	351
8.3.2	Kurzschlussstromberechnung .....	364
8.3.3	Unsymmetrische Fehler .....	368
8.3.4	Zuverlässigkeitssberechnung .....	373
8.4	Netzrückwirkungen .....	376
8.4.1	Qualitätsmerkmale der Spannung .....	376
8.4.2	Netzlast .....	378
8.4.3	Oberschwingungen .....	379
8.4.4	Unsymmetrische Lasten .....	380
8.4.5	Spannungsschwankungen .....	381
8.5	Dynamisches Verhalten von Netzen .....	384
8.5.1	Elektromagnetische Ausgleichsvorgänge .....	386
8.5.2	Elektromechanische Ausgleichsvorgänge .....	394

---

<b>8.6</b>	<b>Netzplanung</b>	403
8.6.1	Grundsätzliche Vorgehensweise.	403
8.6.2	Netzausbau.	404
8.6.3	Investitionskostenrechnung	405
8.6.4	Niederspannungsnetze.	407
<b>8.7</b>	<b>Netzbetrieb</b>	411
8.7.1	Netzleittechnik	411
8.7.2	State Estimation	414
8.7.3	Ersatznetze	416
8.7.4	Netzsicherheitsrechnung	417
<b>8.8</b>	<b>Netzschutz</b>	418
8.8.1	Aufbau der Schutzeinrichtung	418
8.8.2	Überstromschutz	420
8.8.3	Distanzschutz	421
8.8.4	Differenzialschutz	426
8.8.5	Frequenzschutz	429
8.8.6	Erdschlussenschutz	429
8.8.7	Überlastschutz	430
	Literatur	432
<b>9</b>	<b>Energieanwendung</b>	435
<b>9.1</b>	<b>Traktion</b>	435
9.1.1	Elektrolokomotiven	436
9.1.2	Straßenbahnen	439
9.1.3	Elektroauto	440
9.1.4	Elektromobilität	441
<b>9.2</b>	<b>Beleuchtungstechnik</b>	442
9.2.1	Grundlagen	443
9.2.2	Lampen	445
9.2.3	Vorschaltgeräte	448
<b>9.3</b>	<b>Elektrowärme</b>	450
9.3.1	Widerstandserwärmung	450
9.3.2	Induktive Erwärmung	453
9.3.3	Lichtbogenerwärmung	456
	Literatur	458
	<b>Symbole</b>	461
	<b>Sachwortverzeichnis</b>	467