

# **Elektrische Energieverteilung**

Von Dipl.-Ing. René Flosdorff  
Professor an der Fachhochschule Aachen

und Dr.-Ing. Günther Hilgarth  
Professor an der Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel

6., überarbeitete Auflage  
Mit 274 Bildern, 47 Tafeln und 71 Beispielen



**B.G. Teubner Stuttgart 1994**

# Inhalt

## 1 Elektrische Netze (Günther Hilgarth)

1.1 Betriebsgrößen und Begriffe . . . . .	1
1.1.1 Stromarten und Frequenzen . . . . .	1
1.1.2 Übertragungs- und Verteilungsspannungen . . . . .	2
1.1.3 Netzstrukturen . . . . .	3
1.2 Übertragungsmittel . . . . .	4
1.2.1 Kabel . . . . .	4
1.2.1.1 Kurzzeichen für Typenbezeichnung. 1.2.1.2 Metallmantelkabel. 1.2.1.3 Kunststoffkabel. 1.2.1.4 Ölkabel. 1.2.1.5 Gasdruckkabel. 1.2.1.6 Kabelerwärmung. 1.2.1.7 Hochleistungskabel	
1.2.2 Freileitung . . . . .	20
1.2.2.1 Freileitungsmaste. 1.2.2.2 Mastgründungen. 1.2.2.3 Masterdung und Blitzschutzraum. 1.2.2.4 Seile. 1.2.2.5 Durchhang. 1.2.2.6 Anordnung der Leiter. 1.2.2.7 Isolatoren und Armaturen	
1.2.3 Ermittlung der Kenngrößen . . . . .	31
1.2.3.1 Gleichstromwiderstand. 1.2.3.2 Induktivität bei Mehrleitersystemen. 1.2.3.3 Nullimpedanz einer Freileitung. 1.2.3.4 Kapazitäten einer Freileitung. 1.2.3.5 Blindwiderstände von Kabeln. 1.2.3.6 Normierte Widerstände	
1.2.4 Umrechnung von Widerständen auf andere Spannungen . .	47
1.2.5 Transformator . . . . .	48
1.3 Bemessung elektrischer Leitungen und Netze . . . . .	51
1.3.1 Richtlinien für die Bemessung . . . . .	51
1.3.1.1 Leitungsnachbildung und Ersatzschaltung. 1.3.1.2 Spannungsdifferenz. 1.3.1.3 Erwärmung	
1.3.2 Nieder- und Mittelspannungsnetze . . . . .	53
1.3.2.1 Einseitig gespeiste Leitung mit einer Abnahme. 1.3.2.2 Leitung mit verteilten Abnahmen. 1.3.2.3 Einseitig gespeiste, verzweigte Leitung. 1.3.2.4 Querschnittsabstufung. 1.3.2.5 Zweiseitig gespeiste Leitung. 1.3.2.6 Vermaschtes Netz	

1.3.3 Hochspannungs-Drehstromübertragung . . . . .	74
1.3.3.1 Leitungsgleichungen. 1.3.3.2 Komplexes Spannungs- und Stromverhältnis. 1.3.3.3 Verlustlose Leitung. 1.3.3.4 Ver- lustarme Leitung. 1.3.3.5 Natürliche Leistung. 1.3.3.6 Lei- tungsdiagramm. 1.3.3.7 Komplexes Leistungsverhältnis. 1.3.3.8 Stabilität der Energieübertragung	
1.3.4 Hochspannungs-Gleichstromübertragung . . . . .	91
1.3.5 Blindleistungskompensation . . . . .	92

## 2 Kurzschluß und Erdschluß (René Flosdorff)

2.1 Dreisträngiger Kurzschluß . . . . .	98
2.1.1 Verlauf des Kurzschlußstroms . . . . .	98
2.1.1.1 Generatorferner Kurzschluß. 2.1.1.2 Generatornaher Kurzschluß. 2.1.1.3 Kurzschlußentfernung	
2.1.2 Anfangs-Kurzschlußwechselstrom . . . . .	102
2.1.3 Stoßkurzschlußstrom und Stoßziffer . . . . .	104
2.1.3.1 Stoßziffer in Kurzschlußkreisen ohne Stromverzwei- gung. 2.1.3.2 Stoßziffer in Kurzschlußkreisen mit Stromver- zweigung	
2.1.4 Dauerkurzschlußstrom und Dauerfaktor . . . . .	107
2.1.5 Ausschaltstrom und Abklingfaktor . . . . .	108
2.1.6 Kurzschlußleistung und Ausschaltleistung . . . . .	109
2.1.7 Widerstände in der Kurzschlußbahn . . . . .	110
2.1.7.1 Dreiwicklungs-Transformator. 2.1.7.2 Kurzschluß- strombegrenzung. 2.1.7.3 Synchrongenerator. 2.1.7.4 Asyn- chronmotor. 2.1.7.5 Netzersatzimpedanz. 2.1.7.6 Kurzschlußbe- rechnung mit Bezugsspannung 10 kV. 2.1.7.7 Kurzschlußbe- rechnung in vermaschten Netzen	
2.2 Symmetrische Komponenten . . . . .	123
2.2.1 Entstehung unsymmetrischer Dreiphasensysteme . . . . .	123
2.2.1.1 Dreileiternetz. 2.2.1.2 Vierleiternetz	
2.2.2 Zerlegung unsymmetrischer Dreiphasen-Systeme in symmetri- sche Komponenten . . . . .	126
2.2.2.1 Dreileiternetz. 2.2.2.2 Vierleiternetz	
2.2.3 Verknüpfung der symmetrischen Komponenten von Span- nung und Strom . . . . .	128
2.2.3.1 Mit-, Gegen- und Nullimpedanz. 2.2.3.2 Quellenspan- nung und Teilspannungen. 2.2.3.3 Leistungen	

2.3	Unsymmetrische Fehler . . . . .	133
2.3.1	Zweisträngiger Kurzschluß . . . . .	133
2.3.1.1	Mit Erdberührung. 2.3.1.2 Ohne Erdberührung	
2.3.2	Einsträngiger Kurzschluß . . . . .	136
2.3.2.1	Ohne Übergangswiderstand. 2.3.2.2 Mit Übergangswiderstand	
2.3.3	Erdschluß im Netz mit isoliertem Sternpunkt . . . . .	142
2.3.3.1	Ladeleistung. 2.3.3.2 Erdschlußkompensation	
2.3.4	Stromverteilung bei Transformatoren mit drehender Schaltgruppe . . . . .	148
2.3.5	Sternpunktsschaltung in Drehstromnetzen . . . . .	150
2.4	Wirkungen des Kurzschlußstroms . . . . .	152
2.4.1	Mechanische Beanspruchung durch Stromkräfte . . . . .	153
2.4.1.1	Mechanische Festigkeit von Stromschienen. 2.4.1.2 Mechanische Festigkeit von Stützern	
2.4.2	Thermische Beanspruchung durch Stromwärme . . . . .	156

### 3 Schutzeinrichtungen (René Flosdorff)

3.1	Erder und Erdungsanlagen . . . . .	161
3.1.1	Elektrisches Verhalten des Erders . . . . .	161
3.1.2	Erderarten . . . . .	163
3.1.3	Erdungsarten . . . . .	166
3.2	Schutz des Menschen . . . . .	168
3.2.1	Unfallstromkreis . . . . .	169
3.2.2	Schutz bei indirektem Berühren im TN-Netz . . . . .	170
3.2.3	Schutz bei indirektem Berühren im IT-Netz . . . . .	172
3.2.4	Fehlerstrom-Schutzschaltung (FI-Schaltung) . . . . .	173
3.3	Überspannungsschutz . . . . .	174
3.3.1	Entstehung von Überspannungen . . . . .	175
3.3.1.1	Spannungserhöhungen bei Betriebsfrequenz. 3.3.1.2 Gegenseitige Beeinflussung paralleler Leitungen. 3.3.1.3 Kippschwingungen. 3.3.1.4 Schaltüberspannungen. 3.3.1.5 Atmosphärische Überspannungen	
3.3.2	Schutzeinrichtungen gegen Überspannungen . . . . .	179
3.3.2.1	Funkenstrecke. 3.3.2.2 Überspannungsableiter. 3.3.2.3 Koordination der Isolation. 3.3.2.4 Einsatz von Überspannungsableitern	

3.4	Schutz der Übertragungseinrichtungen . . . . .	184
3.4.1	Fehlerarten, Auswirkungen, Meßkriterien . . . . .	184
3.4.2	Grundlagen der Relais-technik . . . . .	186
	3.4.2.1 Kenngrößen der Relais. 3.4.2.2 Strom- und Spannungs- relais. 3.4.2.3 Zeitrelais. 3.4.2.4 Hilfs- und Melderelais	
3.4.3	Drehspulrelais mit Gleichrichterbrücken . . . . .	188
	3.4.3.1 Impedanzmessung. 3.4.3.2 Leistungsrichtungs-Mes- sung. 3.4.3.3 Differenzmessung	
3.4.4	Leitungs- und Netzschutz . . . . .	193
	3.4.4.1 Relaisanregungen. 3.4.4.2 Überstromschutz. 3.4.4.3 Di- stanzschutz. 3.4.4.4 Erdschlußschutz. 3.4.4.5 Kurzunterbre- chung	
3.4.5	Generatorschutz . . . . .	201
	3.4.5.1 Differentialschutz. 3.4.5.2 Überstromzeitschutz. 3.4.5.3 Ständererdschlußschutz. 3.4.5.4 Läufererdschlußschutz. 3.4.5.5 Schieflastschutz. 3.4.5.6 Windungsschlußschutz. 3.4.5.7 Entre- gungseinrichtungen	
3.4.6	Transformatorschutz . . . . .	207
	3.4.6.1 Gehäuseschlußschutz. 3.4.6.2 Buchholzschutz. 3.4.6.3 Differentialschutz	
3.4.7	Sammelschienen-schutz . . . . .	210
3.4.8	Gesamtstafelplan . . . . .	211
3.4.9	Elektronischer Schutz . . . . .	212
	3.4.9.1 Anregeschaltungen. 3.4.9.2 Phasenvergleichsverfahren. 3.4.9.3 Polygonkennlinie. 3.4.9.4 Elektronisches Erdschlußre- lais	
3.4.10	Prozeßrechner als Schutz-einrichtung . . . . .	217

#### 4 Schaltanlagen (René Flosdorff)

4.1	Schaltgeräte für Niederspannung . . . . .	218
4.1.1	Aufgabe der Schaltgeräte . . . . .	218
4.1.2	Einteilung der Schaltgeräte . . . . .	219
	4.1.2.1 Schalter. 4.1.2.2 Niederspannungssicherungen. 4.1.2.3 Sicherungstrennschalter	
4.2	Schaltgeräte für Hochspannung . . . . .	223
4.2.1	Einteilung der Schaltgeräte . . . . .	223
4.2.2	Trennschalter . . . . .	224
4.2.3	Lasttrennschalter . . . . .	225

4.2.4	Leistungsschalter . . . . .	226
4.2.4.1	Schaltaufgaben bei Wechselstrom.	
4.2.4.2	Schaltvorgang bei Wechsel- und Drehstrom.	
4.2.4.3	Wiederkehrende Spannung.	
4.2.4.4	Löschprinzipien.	
4.2.4.5	Ausführungsarten.	
4.2.4.6	Antriebsarten.	
4.2.4.7	Wichtige Kenngrößen	
4.2.5	Hochspannungs-Hochleistungs-Sicherungen . . . . .	236
4.2.5.1	Wirkungsweise.	
4.2.5.2	Ausführungsarten	
4.2.6	Sicherungstrennschalter . . . . .	238
4.2.7	Prüfung von Schaltgeräten . . . . .	238
4.3	Planung, Aufbau und Betrieb von Schaltanlagen . . . . .	240
4.3.1	Schaltplantechnik . . . . .	240
4.3.2	Planungsgrundlagen . . . . .	243
4.3.3	Schaltanlagen für Niederspannung . . . . .	245
4.3.4	Ortsnetzstationen . . . . .	246
4.3.5	Schaltanlagen für Hochspannung . . . . .	249
4.3.5.1	Schaltung des Einspeise- und Abgangsfeldes.	
4.3.5.2	Schaltung des Kuppelfeldes.	
4.3.5.3	Schaltung des Meßfeldes.	
4.3.5.4	Innenraumanlagen von 1 kV bis 30 kV/36 kV.	
4.3.5.5	Innenraumanlagen von 60 kV bis etwa 250 kV.	
4.3.5.6	Freiluft-Schaltanlagen	
4.3.6	Hilfsstromkreise in Schaltanlagen . . . . .	257
4.3.6.1	Gleichstrom-Hilfskreis.	
4.3.6.2	Stromwandler für Schaltanlagen.	
4.3.6.3	Spannungswandler für Schaltanlagen.	
4.3.6.4	Verriegelungs-Schaltung	
4.3.7	Schaltwarten . . . . .	264
4.3.7.1	Schalttafel.	
4.3.7.2	Zentralfeldsteuerung.	
4.3.7.3	Mosaikschaubild.	
4.3.7.4	Bildschirmüberwachung	
4.3.8	Betrieb von Schaltanlagen . . . . .	268

## 5 Kraftwerke (Günther Hilgarth)

5.1	Dampfkraftwerke . . . . .	270
5.1.1	Innerer Aufbau . . . . .	270
5.1.1.1	Dampf-Wasser-Kreislauf.	
5.1.1.2	Kühlwasser-Kreislauf.	
5.1.1.3	Feuerung	
5.1.2	Konventionelle Dampfkraftwerke . . . . .	273
5.1.2.1	Dampferzeuger.	
5.1.2.2	Äußerer Aufbau	
5.1.3	Kernenergie-Kraftwerke . . . . .	274
5.1.4	Dampfturbinen . . . . .	275

XII Inhalt

5.2 Gasturbinen-Kraftwerke . . . . . 276

    5.2.1 Bauarten . . . . . 276

    5.2.2 Anwendungsbereiche . . . . . 276

5.3 Dieselmotorkraftwerke . . . . . 278

5.4 Wasserkraftwerke . . . . . 279

    5.4.1 Arten der Wasserkraftwerke . . . . . 279

        5.4.1.1 Laufwasser-Kraftwerke. 5.4.1.2 Speicher-Kraftwerke.

        5.4.1.3 Gezeiten-Kraftwerke

    5.4.2 Wasserturbinen . . . . . 281

5.5 Generatoren . . . . . 282

    5.5.1 Bauarten . . . . . 282

        5.5.1.1 Aufbau. 5.5.1.2 Generatorspannung. 5.5.1.3 Erregung

    5.5.2 Betriebsverhalten . . . . . 284

        5.5.2.1 Widerstände. 5.5.2.2 Zeigerdiagramm und Ersatzschaltung

5.6 Kraftwerkseigenbedarf . . . . . 286

    5.6.1 Betriebsanforderung . . . . . 287

    5.6.2 Versorgung des Eigenbedarfs . . . . . 287

    5.6.3 Anfahren des Kraftwerks . . . . . 288

    5.6.4 Spannungen . . . . . 289

**6 Elektrizitätswirtschaft (Günther Hilgarth)**

6.1 Grundbegriffe . . . . . 290

    6.1.1 Belastungskurven . . . . . 290

    6.1.2 Verlustarbeit . . . . . 293

    6.1.3 Gleichzeitigkeitsgrad . . . . . 295

6.2 Kostenstruktur . . . . . 295

    6.2.1 Verlustkosten . . . . . 296

    6.2.2 Annuitätsmethode . . . . . 297

    6.2.3 Barwertmethode . . . . . 298

        6.2.3.1 Barwert von Kapitalbeträgen. 6.2.3.2 Barwert jährlich gleicher Verlustkosten. 6.2.3.3 Barwert jährlich steigender Verlustkosten

6.3 Wirtschaftlichkeit elektrischer Anlagen . . . . . 300

    6.3.1 Kraftwerk . . . . . 300

6.3.2 Freileitung . . . . .	302
6.3.2.1 Anlagekosten. 6.3.3.2 Wirtschaftliche Stromdichte.	
6.3.2.3 Wirtschaftliche Übertragungsleistung	
6.3.3 Kabel . . . . .	304
6.3.4 Transformatoren . . . . .	304
6.3.5 Wirtschaftlicher Netzbetrieb . . . . .	306
6.3.6 Verbundwirtschaft . . . . .	308
6.4 Strompreisregelung . . . . .	308
6.4.1 Leistungspreis-Tarif . . . . .	309
6.4.2 Arbeitspreis-Tarif . . . . .	309
6.4.3 Blindstromklausel . . . . .	310

## Anhang

1. Umrechnung von Einheiten . . . . .	311
2. Weiterführende Bücher . . . . .	311
3. Normblätter (Auswahl) . . . . .	313
4. VDE-Bestimmungen (Auswahl) . . . . .	314
5. Schaltzeichen (Auswahl aus DIN 40 710 bis 40 717) . . . . .	315
6. Kennwerte von Leitungen und Leitern (Auswahl) . . . . .	320
7. Kennbuchstaben in Schaltplänen . . . . .	333
8. Schutzmaßnahmen nach DIN VDE 0100 (Auswahl) . . . . .	336
9. Formelzeichen . . . . .	337

<b>Sachverzeichnis</b> . . . . .	<b>343</b>
----------------------------------	------------

Hinweise auf DIN-Normen in diesem Werk entsprechen dem Stand der Normung bei Abschluß des Manuskriptes. Maßgebend sind die jeweils neuesten Ausgaben der Normblätter des DIN Deutsches Institut für Normung e. V. im Format A 4, die durch die Beuth-Verlag GmbH, Berlin und Köln zu beziehen sind. – Sinngemäß gilt das gleiche für alle in diesem Buche angezogenen amtlichen Richtlinien, Bestimmungen, Verordnungen usw.