

Heinz Fehling

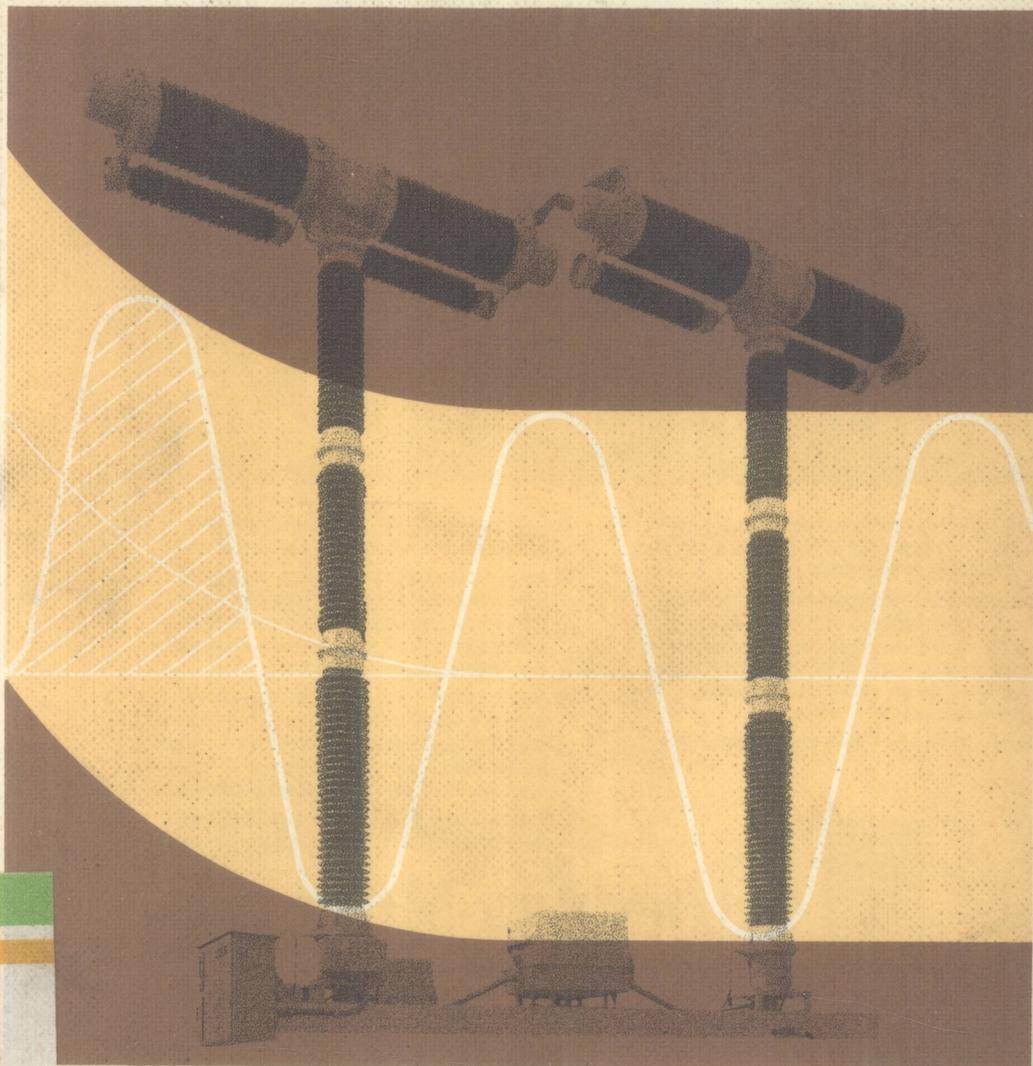
8862450



# Elektrische Starkstromanlagen

Stromsysteme, Netze, Leitungen,  
Kurzschlußschutz

VDE-VERLAG GmbH



T417  
E295

8662450

Heinz Fehling

## **Elektrische Starkstromanlagen**

Stromsysteme, Netze, Leitungen,  
Kurzschlußschutz



E8662450



VDE-VERLAG GmbH  
Berlin und Offenbach

Redaktion: Dipl.-Ing. Roland Werner

## **CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek**

**Fehling, Heinz:**

Elektrische Starkstromanlagen: Stromsysteme,

Netze, Leitungen, Kurzschlußschutz / Heinz

Fehling. – Berlin ; Offenbach : VDE-VERLAG, 1983.

ISBN 3-8007-1299-7



ISBN 3-8007-1299-7

© 1984 VDE-VERLAG GmbH, Berlin und Offenbach  
Bismarckstraße 33, D-1000 Berlin 12

Alle Rechte vorbehalten

Druck: Mercedes-Druck, Berlin

8402

## Vorwort

Das hier vorliegende neue Lehr- und Sachbuch über elektrische Starkstromanlagen soll die bereits verfügbaren, umfangreichen Kompendien auf dem Sektor der elektrischen Energietechnik ebensowenig ersetzen wie die zahlreiche, durch den technischen Fortschritt sich in permanenter Ergänzung befindliche Spezialliteratur.

Das Buch stellt vielmehr in Verbindung mit den einschlägigen Vorschriften und den *neuesten Begriffsbildungen nach DIN-Normen und VDE-Bestimmungen* eine seit langem notwendige Ergänzung dar, die vor allem den Studenten der elektrischen Energietechnik beider Hochschularten auf einem geeigneten pädagogischen und didaktischen Hintergrund als begleitende Vorlesungsliteratur dienen soll. Aber auch der in der Praxis stehende Ingenieur der elektrischen Energietechnik kann diesem Buch Anregungen entnehmen, die ihm bei der Lösung relevanter Probleme dienlich sind.

Das Buch baut auf didaktischen Erfahrungen auf, die der Verfasser in einer über viele Jahre an einer Fachhochschule gehaltenen und in zahlreiche Ingenieurabschlußarbeiten mündenden praxisorientierten Lehrveranstaltung gesammelt hat, die dem größeren curricularen Bereich der allgemeinen elektrischen Energietechnik angehört, dem der „Elektrischen Starkstromanlagen“. Die zunehmende Bedeutung der Energieverteilung mit geeigneten Betriebsmitteln sowie die Fragen eines ökonomischen und wirksamen Anlagenschutzes haben den Verfasser bewogen, neben den grundsätzlichen Methoden zur Leitungs- und Kurzschlußberechnung auch die Mittel aufzuzeigen, die heute nach dem letzten technischen Stand geeignet sind, einen optimalen Schutz im Störfall zu gewährleisten.

Die Technik der Mehrfachstromsysteme und deren unmittelbare Anwendung auf Problemstellungen des dreiphasigen Drehstromsystems sowie zahlreiche durchgerechnete Beispiele und Aufgaben ergänzen die übrigen Kapitel.

Für die Berechnung der Kurzschlußströme konnten aus Platzgründen – aber auch aus didaktischen Überlegungen heraus – nur die symmetrischen Fälle behandelt werden. Für die Kurzschlußberechnung bei unsymmetrischer Netzbelastung – symmetrische Komponenten – muß auf die einschlägige Literatur verwiesen werden.

Dort, wo mit möglicherweise ungewohntem mathematischen Kalkül gearbeitet wird – Determinanten, Matrizen, Algorithmen –, bietet eine im Teil IV befindliche Kurzfassung der wichtigsten Rechenregeln mit entsprechenden Beispielen eine leicht verständliche Einführung.

Für das Überlassen von geeignetem Bildmaterial und aktuellen technisch-wissenschaftlichen Veröffentlichungen danke ich den Firmen AEG-Telefunken, Siemens, BBC, Klöckner-Moeller und Calor-Emag. Für wertvolle Hinweise

und für die Durchsicht der Teile II und III bedanke ich mich recht herzlich bei Herrn Dr. Schramm von der Firma Siemens-Energietechnik.

Herrn cand. math. Pfeiffer vom mathematischen Institut der Universität Kiel und den Herren cand. ing. Haß und Gronau von der FH Kiel ist für die mühevollle Arbeit des Korrekturlesens der Aufgaben und Beispiele mit Lösungen zu danken. Dem VDE-VERLAG danke ich für die Buchausstattung.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. R. Werner von der Buchredaktion, der sich in vorbildlicher Weise für die Buchgestaltung eingesetzt hat und der durch sachkundige Anregungen zum Gelingen des vorliegenden Werkes beitragen konnte.

Alle Anregungen aus dem fachkundigen Leserkreis, die zu einer Verbesserung bzw. Ergänzung des Buches auch im didaktischen Bereich beitragen können, werden gern entgegengenommen.

Kiel, im Sommer 1983

HEINZ FEHLING

# Einleitung

Der diesem Buch als Oberbegriff zugrundeliegende Ausdruck *Elektrische Starkstromanlagen* stellt nach den Begriffsbestimmungen gemäß VDE 0100/5.73, aber auch nach VDE 0105 Teil 1/5.75, eine deutliche Abgrenzung zu den sogenannten *Schwachstromanlagen* dar.

Starkstromanlagen sind nach *VDE 0100* und *VDE 0101* elektrische Anlagen mit Betriebsmitteln zum Erzeugen, Umwandeln, Speichern, Fortleiten, Verteilen und Verbrauchen elektrischer Energie mit dem Zweck des Verrichtens von Arbeit – z. B. von mechanischer Arbeit –, zur Wärme- und Lichterzeugung oder bei elektrochemischen Vorgängen.

So gesehen umfaßt der Begriff „Starkstromanlagen“ weit mehr Teilgebiete der Elektrischen Energietechnik als in den folgenden Kapiteln des Buches behandelt werden können. An den Technischen Universitäten und Fachhochschulen haben sich bereits frühzeitig jene spezifischen Disziplinen der elektrischen Energietechnik herausgebildet, die heute einigen Instituten und Lehrstühlen ihren Namen gegeben haben: Elektrische Maschinen und Antriebe, Hochspannungstechnik und elektrische Starkstromanlagen.

Die elektrischen Starkstromanlagen umfassen hierbei im allgemeinen die Probleme der Energieversorgung und der Energieverteilung mit Hilfe von Leitungen und Netzen sowie den Anlagen- und Verbraucherschutz durch Schaltgeräte im Störfall, ganz besonders bei Kurzschlußvorgängen.

Besonders die nach dem Zweiten Weltkrieg einsetzende und stark wachsende Elektrifizierung auf allen Gebieten des täglichen Lebens sowie eine expandierende Industrie führten zu völlig neuen Aspekten bei der Verwirklichung einer optimalen Energieversorgung.

In der Schwer- und Grundstoffindustrie, einschließlich der Stahlwerke, der chemischen Betriebe und der GroÙelektrolyseanlagen, hatte die Konzentration der installierten elektrischen Energie eine Steigerung der Kurzschlußleistung zur Folge, die oft nur noch mit Mühe durch geeignete Schutzeinrichtungen beherrscht werden konnten.

Entgegen den Gepflogenheiten bisheriger Lehrbücher hat der Verfasser die zumeist aus physikalisch-elektrischen Betrachtungen bestehende *Elektrische Festigkeitslehre* aus dem Darstellungsbereich herausgenommen und dafür im dritten Teil dieses Buches dem technischen Stand des Anlagen- und Verbraucherschutzes mehr Gewicht gegeben.

Im **ersten Teil** werden nach einer grundlegenden Einführung in die Drehstromtechnik – unter Beachtung der geltenden Begriffsbestimmungen nach DIN und VDE – elektrische Betriebsmittel behandelt, die für den kontinuierlichen elektrischen Energietransport zwischen dem Erzeuger und dem Ver-

braucher von Bedeutung sind: Leitungen, Kabel und Netze. Hierbei finden die Strahlen-, Ring- und Maschennetze mit den unterschiedlichen Einspeisestellen besondere Beachtung.

Neben der eingehenden Erörterung rechnerischer Methoden für die Auslegung verschiedener Leitungssysteme, stehen dem Leser zahlreiche durchgerechnete Beispiele und Aufgaben für eine Vertiefung des Stoffes zur Verfügung.

Der **zweite Teil** behandelt die möglichen Störungsfälle, insbesondere das Kurzschlußverhalten im Hoch- und Niederspannungsnetz. Ebenfalls wird wieder anhand relevanter Beispiele und unter besonderer Berücksichtigung der in VDE 0102 Teil 1 und 2 festgelegten Begriffe und Leitsätze die Berechnung der Kurzschlußströme in Drehstromanlagen behandelt.

Der **dritte Teil** des Buches ist schließlich dem weiten Spektrum des Anlagen- und Verbraucherschutzes gewidmet und befaßt sich neben grundsätzlichen Fragen der Selektivität in Strahlen-, Ring- und Maschennetzen auch mit der Entwicklung der modernen Schaltertechnik, insbesondere der SF<sub>6</sub>-Schaltanlagen für Hochspannung, dem Vakuumschalter für Mittelspannung und dem staffelbaren Leistungsschalter für Niederspannung.

Eine kurze Betrachtung des physikalischen Verhaltens elektrischer Lichtbögen, die als Kurzschlußlichtbögen in Starkstromanlagen ein hohes Zerstörungspotential aufweisen und die als Schaltlichtbögen in Schaltgeräten gezielten Löschmethoden unterworfen werden, ergänzt den letzten Teil des Buches.

Im **vierten Teil** sind neben einer Zusammenstellung der wichtigsten Formeln die Lösungen der Aufgaben aus den vier Buchteilen wiedergegeben. Eine Übersicht der einschlägigen Literatur, der wichtigsten VDE-Bestimmungen und DIN-Normen beschließt das Buch.

# Inhalt

<b>I</b>	<b>Mehrphasensysteme, elektrische Leitungen und Netze in Starkstromanlagen</b> .....	13
<b>1</b>	<b>Theoretische Grundlagen der Drehstromtechnik</b> .....	13
1.1	Symmetrische Mehrphasensysteme, Dreieck- und Sternschaltung im Drehstromsystem .....	13
1.1.1	Leistung im symmetrischen Drehstromsystem .....	21
1.1.2	Leistung im Mehrphasensystem .....	23
1.1.3	Genormte Darstellung dreiphasiger Drehstromsysteme .....	23
1.1.4	Umlaufrichtung der Spannungszeiger im Drehstromsystem ....	24
1.1.5	Beziehungen zwischen den Spannungen im Drehstromsystem bei Wahl einer Bezugsgröße .....	26
1.2	Unsymmetrische Belastung im Drehstromsystem .....	29
1.2.1	Unsymmetrische Belastung eines Dreiphasen-Vierleitersystems ohne Neutralleiter .....	33
1.3	Leistungsmessung im Drehstromsystem .....	38
<b>2</b>	<b>Elektrische Energieverteilung</b> .....	41
2.1	Historische Entwicklung .....	41
2.2	Formen der elektrischen Energieübertragung heute .....	44
2.2.1	Netzformen .....	45
2.2.2	Leitungen, Kabel und Maste .....	48
2.3	Genormte Spannungssysteme für elektrische Energieübertragung	55
<b>3</b>	<b>Elektrische Eigenschaften der Leitungen</b> .....	57
3.1	Leitungskonstanten .....	57
3.2	Ersatzschaltbilder für elektrische Leitungen .....	60
<b>4</b>	<b>Berechnung elektrischer Leitungen und Netze</b> .....	62
4.1	Mit Gleichstrom betriebene Leitungen .....	62
4.1.1	Offene und am Ende belastete Gleichstromleitung .....	62
4.1.2	Offene und an mehreren Stellen belastete Gleichstromleitung	65
4.1.3	Offene Gleichstromleitung mit gleichmäßig verteilter spezifischer Belastung .....	66
4.1.4	Offene Zweigleitung .....	68
4.1.5	Ringleitungen und zweiseitig gespeiste Leitungen .....	73
4.2	Mit Wechsel- oder Drehstrom betriebene Leitungen .....	79
4.2.1	Offene und am Ende belastete Wechsel- oder Drehstromleitung mit Längswiderstand $R$ .....	79

4.2.2	Offene und an mehreren Stellen belastete Wechsel- oder Drehstromleitung .....	82
4.2.3	Ringleitungen, zweiseitig gespeiste Wechselstrom- oder Drehstromleitungen .....	86
4.3	Mit Wechsel- oder Drehstrom betriebene Leitungen unter Berücksichtigung der Längswiderstände $R$ und $X$ .....	91
4.3.1	Offene und am Ende belastete Leitung mit $R$ und $X$ .....	91
4.3.2	Wirtschaftlichkeit von Freileitungen und Kabel .....	94
4.3.3	Offene und an mehreren Stellen belastete Leitung mit $R$ und $X$ .....	96
4.3.4	Zweiseitig gespeiste Leitung mit $R$ und $X$ .....	97
4.4	Leitungen für Wechsel- oder Drehstrom mit Längswiderständen $R$ und $X$ sowie Querkapazität $C$ und Ableitung $G$ .....	99
4.4.1	Offene und am Ende belastete Leitung mit $R$ , $X$ und $C$ .....	99
4.4.2	Offene und am Ende belastete Leitung mit $R$ , $X$ , $C$ und $G$ .....	100
4.5	Beliebig lange Fernleitung für Wechsel- und Drehstromübertragung mit $R$ , $X$ , $C$ und $G$ .....	102
<b>5</b>	<b>Elektrische Energieübertragung mit hochgespanntem Gleichstrom</b> .....	<b>105</b>
<b>6</b>	<b>Berechnung von Maschennetzen</b> .....	<b>108</b>
6.1	Allgemeines über vermaschte Netze .....	108
6.2	Methoden zur Berechnung einfacher Maschen: Gleichsetzungsmethode .....	109
6.3	Verlegungs- oder Verwerfungsmethode .....	114
6.4	Netzumwandlung, Netzabbau und Netzaufbau .....	119
<b>7</b>	<b>Netzberechnung mit Hilfe von Matrizen</b> .....	<b>126</b>
7.1	Orientiertes Gerüst und Hilfskoeffizientenmatrix .....	126
7.2	Knotenpunktverfahren .....	131
<b>II</b>	<b>Kurzschlüsse in elektrischen Starkstromanlagen und ihre Berechnung</b> .....	<b>135</b>
<b>1</b>	<b>Kurzschlußvorgänge und Folgeerscheinungen in Starkstromanlagen</b> .....	<b>135</b>
1.1	Allgemeine Probleme bei Kurzschlüssen in Netzen .....	135
1.2	Kurzschluß in Mittel- und Hochspannungsanlagen .....	136
1.3	Kurzschluß in Niederspannungsanlagen .....	137
1.4	Arten der Kurzschlüsse .....	138
1.4.1	Fehlerarten im Netz .....	139
1.5	Kurzschluß im Einphasen-Wechselstromkreis .....	142
<b>2</b>	<b>Kurzschlußstromverlauf und Grundlagen seiner Berechnung</b> .....	<b>145</b>
2.1	Einschaltvorgänge im Gleichstrom- und Wechselstromkreis als Äquivalenz zum Kurzschlußstromverlauf .....	145

2.1.1	Kurzschluß im Gleichstromkreis .....	145
2.1.2	Kurzschluß im Wechselstromkreis .....	147
2.2	Ausgleichsvorgang im Wechselstromnetz bei plötzlichen Stromänderungen .....	148
2.2.1	Symmetrischer Kurzschlußstromverlauf .....	151
2.2.2	Vollständig asymmetrischer Kurzschlußstromverlauf .....	151
2.3	Kurzschlußstromverlauf im Drehstrom-Dreileitersystem .....	154
2.4	Interpretation der Begriffe nach VDE 0102 Teil 1 und 2 .....	155
2.4.1	Generatornahe und generatorferne Kurzschlüsse .....	155
2.4.2	Kurzschlußstromgrößen nach VDE 0102 Teil 1 und 2 .....	157
2.4.3	Stoßfaktor $\kappa$ und seine Wirkung auf $I_s$ .....	158
2.5	Stromkräfte und ihre Wirkung in Starkstromanlagen .....	161
2.5.1	Kurzschlußkräfte zwischen Leitern .....	161
2.5.2	Umbruchfestigkeit der Stützer .....	164
2.6	Thermische Beanspruchung von Starkstromanlagen .....	165
<b>3</b>	<b>Berechnung dreipoliger Kurzschlüsse in Drehstromanlagen</b> .....	167
3.1	Berechnung bei Einspeisung ohne Netzverzweigung .....	167
3.1.1	Berechnungsverfahren bei dreipoligen Kurzschlüssen .....	169
3.2	Transformator in der Kurzschlußbahn – Spannungsebenen und Bezugsspannung $U_B$ .....	172
3.3	Widerstandsgrößen der Betriebsmittel in der Kurzschlußbahn ..	174
3.3.1	Beitrag des Generators .....	174
3.3.2	Beitrag des Transformators .....	176
3.3.3	Beitrag der Freileitungen und Kabel .....	177
3.3.4	Beitrag einer Kurzschlußstrom-Begrenzungs-drossel .....	177
3.4	Beispiele für die Berechnung dreipoliger Kurzschlüsse in Strahlennetzen mit Transformatoren .....	178
3.4.1	Netz mit Transformatoren und starrer Einspeisung .....	178
3.4.2	Ersatzreaktanzen bei starrer Einspeisung .....	181
3.4.3	Netz mit Generatoren, Transformatoren und Kurzschlußstrom-Begrenzungs-drosseln bei nichtstarrer Einspeisung .....	186
3.5	Dreipolige Kurzschlüsse in der Nähe eines Generators oder einer Generatorgruppe .....	191
3.5.1	Kurzschlußstromverlauf .....	191
3.5.2	Beeinflussung der Kurzschlußstromauswirkung durch gekapselte Generatorableitungen .....	192
<b>4</b>	<b>Berechnung dreipoliger Kurzschlüsse in Ringnetzen und in Netzen mit mehrfacher Einspeisung</b> .....	193
4.1	Kurzschluß im Ringnetz .....	193
4.2	Kurzschlüsse in Ringnetzen mit mehreren Speisestellen .....	197
4.2.1	Dreieck-Stern-Umwandlung: Netzverwandlung .....	197
4.3	Methode der fiktiven Quellenspannung .....	201
4.4	Kurzschlüsse in vermaschten und mehrfach vermaschten Netzen .....	203

4.4.1	Lösung mit Hilfe der Cramerschen Regel.....	204
4.4.2	Lösung mit Hilfe des verketteten Algorithmus .....	206
4.4.3	Lösung mit dem Knotenpunktverfahren .....	207
<b>III</b>	<b>Schaltgeräte und Schutzeinrichtungen in elektrischen Starkstromanlagen .....</b>	<b>209</b>
<b>1</b>	<b>Schutzeinrichtungen für elektrische Starkstromanlagen</b>	
1.1	Rückblick auf die Entwicklung der Schaltgeräte .....	209
1.2	Einteilung der Schutzeinrichtungen.....	211
1.2.1	Niederspannungs-Schaltgeräte .....	211
1.2.2	Hochspannungs-Schaltgeräte .....	213
<b>2</b>	<b>Elektrischer Lichtbogen in Starkstromanlagen .....</b>	<b>217</b>
2.1	Physikalischer Hintergrund der Lichtbogenentladung .....	217
2.2	Elektrischer Schaltlichtbogen .....	222
<b>3</b>	<b>Niederspannungs-Leistungsschalter .....</b>	<b>228</b>
3.1	Auslöseeinrichtungen für den Anlagenschutz in Niederspannungsnetzen .....	229
3.2	Staffelbarer Niederspannungs-Leistungsschalter .....	230
3.2.1	Kennlinie der staffelbaren Niederspannungs-Leistungsschalter .....	236
3.3	Kurzschlußstrombegrenzende Niederspannungs-Leistungsschalter .....	237
3.3.1	Kennlinie der kurzschlußstrombegrenzenden Niederspannungs-Leistungsschalter .....	240
<b>4</b>	<b>Niederspannungs-Hochleistungs-Sicherung .....</b>	<b>241</b>
4.1	Aufbau und Wirkung der NH-Sicherung .....	241
4.2	Kennlinie der NH-Sicherung .....	245
4.3	Kombination Leistungsschalter und Sicherung .....	247
4.4	Prüfung und Qualitätssicherung der Niederspannungs-Schaltgeräte .....	248
<b>5</b>	<b>Selektivität in Niederspannungsnetzen .....</b>	<b>251</b>
5.1	Selektivität zwischen Leistungsschaltern.....	253
5.2	Selektivität zwischen NH-Sicherungen .....	255
5.3	Selektivität zwischen Leistungsschaltern, Sicherungen und strombegrenzenden Leistungsschaltern .....	257
5.4	Selektivität im Niederspannungs-Maschennetz .....	258
<b>6</b>	<b>Kurzschlußschutz in Mittelspannungs- und Hochspannungsanlagen</b>	<b>265</b>
6.1	Grundlegendes zur Relaisstechnik .....	265
6.1.1	Erdschlußschutz .....	269
6.1.2	Kurzunterbrechung oder Kurzschlußfortschaltung.....	272

<b>7</b>	<b>Leistungsschalter im Mittelspannungs- und Hochspannungsnetz</b>	274
7.1	Ölarmer Leistungsschalter bis 36 kV	278
7.2	Druckluft-Leistungsschalter bis 36 kV	279
7.3	Vakuum-Leistungsschalter bis 36 kV	280
7.4	Hochspannungs-Leistungsschalter in SF <sub>6</sub> -Technik bis 800 kV	284
7.5	Prüfung und Qualitätssicherung der Hochspannungs-Schaltgerä- te	288
7.5.1	Prinzip der synthetischen Prüfschaltung	289
<b>8</b>	<b>Schaltanlagenbau</b>	291
8.1	Fremdisolierte Hochspannungs-Schaltanlagen	291
8.1.1	Überspannungsschutz in Hochspannungs-Schaltanlagen	293
8.2	Luft- und fremdisolierte Mittelspannungs-Schaltanlagen	296
8.3	Niederspannungs-Schaltanlagen	299
<b>IV</b>	<b>Anhang</b>	301
<b>1</b>	<b>Zusammenstellung wichtiger Formeln</b>	301
1.1	Aus Teil I	301
1.2	Aus Teil II	308
<b>2</b>	<b>Angewandte Determinanten- und Matrizenrechnung</b>	311
2.1	Einführung in den Determinantenbegriff	311
2.2	Determinanten dritter Ordnung und ihre Anwendung	315
2.3	Determinanten höherer Ordnung	320
2.4	Matrizenrechnung, Begriffe und Rechenregeln	327
2.4.1	Regeln der Matrizenalgebra	328
2.4.2	Darstellungen von Gleichungssystemen aus der elektrischen Anlagentechnik mit Hilfe von Matrizen	335
2.5	Gaußscher Algorithmus und seine Anwendung	338
2.5.1	Verketteter Algorithmus	338
<b>3</b>	<b>Aufgabenlösungen der Teile I bis IV</b>	340
3.1	Teil I, Aufgaben 1.1 bis 6.2	340
3.2	Teil II, Aufgaben 2.1 bis 4.3	356
3.3	Teil III, Aufgaben 5.1 bis 5.3	362
3.4	Teil IV, Aufgaben 2.1 bis 2.7	365
<b>4</b>	<b>Schrifttum</b>	371
4.1	Sammel- und Nachschlagewerke	371
4.2	Lehr- und Fachbücher über Starkstromanlagen und deren Schutz- einrichtungen	371

4.3	Veröffentlichungen über Einzelprobleme der elektrischen Anlagentechnik .....	372
4.4	VDE-Bestimmungen und DIN-Normen für elektrische Starkstromanlagen (Auswahl) .....	373
5	<b>Sachregister</b> .....	371

# I Mehrphasensysteme, elektrische Leitungen und Netze in Starkstromanlagen

## 1 Theoretische Grundlagen der Drehstromtechnik

### 1.1 Symmetrische Mehrphasensysteme, Dreieck- und Sternschaltung im Drehstromsystem

Der Normenausschuß für Einheiten und Formelgrößen (AEF) im DIN – Deutsches Institut für Normung e.V. – hat auch im Bereich der elektrischen Energietechnik für Stromsysteme einheitliche Begriffsbestimmungen erarbeitet.

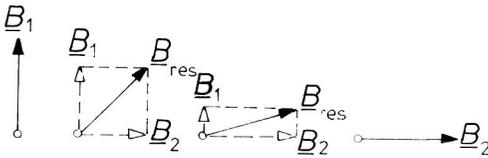
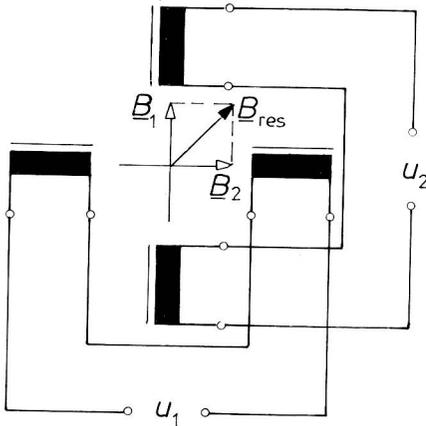
„DIN 40 108 vom August 1978 definiert ein *Mehrphasensystem* als ein Wechselstromsystem mit mehr als zwei Strombahnen in und entlang denen die elektrischen und magnetischen Größen mit gleicher Frequenz, mit gleichen oder angenähert gleichen Amplituden in vorgegebener Phasenfolge mit gleichen oder angenähert gleichen Phasenverschiebungswinkeln verlaufen. Mit Mehrphasensystemen kann man räumlich umlaufende elektrische und magnetische Felder erzeugen. Diese werden *Drehfelder* genannt. Deshalb werden Mehrphasensysteme als *Drehstromsysteme* bezeichnet.“

Magnetische Drehfelder wurden bereits Ende des 19. Jahrhunderts angestrebt, um elektrische in mechanische Energie umzuwandeln. Zum Verwirklichen dieses „Motorprinzips“ waren Wechselspannungen mit Phasenverschiebung nötig. Erste funktionsfähige Systeme entwickelten die Franzosen *Deprez* und *Carpentier*, die 1881 in England patentiert wurden. 1885 baute *Ferraris* einen Motor, indem er zwei Wechselspannungsquellen auf senkrecht zueinander stehende Spulen schaltete, wobei die Quellenspannungen um eine viertel Periode gegeneinander verschoben waren. Das magnetische Drehfeld brachte eine Kupferschleife zum Umlaufen. *Bradley*, *Haselwander* und *Tesla* arbeiten in den USA an Systemen mit mehrphasigem Wechselstrom. *Tesla* beendete seine Versuche 1890 ergebnislos, da er – bei zweiphasigem Wechselstrom – mit dem Wirkungsgrad immer unter 50 Prozent blieb. Seine Patente kaufte schließlich die Firma Westinghous für eine Million Dollar! Erst *Dolivo Dobrowolsky* gelang die Entwicklung eines Versuchsmotors mit wesentlich höherem Wirkungsgrad, bei dem er mit drei Wechselspannungen arbeitete.

**Bild 1.1** zeigt die Anordnung von Spulen mit Eisenkern, die nach dem Ferraris-Prinzip mit zwei Wechselspannungen ein magnetisches Drehfeld erzeugen. Die Wechselspannungen haben eine Phasenverschiebung von 90 Grad elek-

$$u_1 = \hat{u}_1 \sin \omega t$$

$$u_2 = \hat{u}_2 \sin (\omega t - 90^\circ)$$



**Bild 1.1** Magnetisches Drehfeld durch zwei Wechselspannungen

trisch, die beiden magnetischen Induktionen  $\underline{B}_1$  und  $\underline{B}_2$  erzeugen ein resultierendes kreisförmiges Magnetfeld mit der Induktion  $\underline{B}_{res}$ .

Ein Mehrphasensystem kann dann als *symmetrisch* bezeichnet werden, wenn die Impedanzen aller Stränge in Ring- oder Sternschaltung untereinander gleich sind. Für  $m$  Quellenspannungen in  $m$  Strängen gilt nach dem Vorangegangenen das folgende Bildungsgesetz für die Anordnung auf der Erzeugerseite:

$$\begin{aligned} u_{1,2} &= \hat{u} \cdot \sin \omega t \\ u_{2,3} &= \hat{u} \cdot \sin (\omega t - 2\pi/m) \\ &\vdots \\ u_{m,1} &= \hat{u} \cdot \sin (\omega t - (m-1) \cdot 2\pi/m). \end{aligned} \quad (1.1)$$

Hierin sind:

$u_{ik}$  zeitabhängige elektrische Spannungen  
 $\hat{u}$  Amplitude der Spannung

$\omega \cdot t$  Kreisfrequenz ( $2 \cdot \pi \cdot f$ )  
 $m$  Anzahl der Quellenspannungen ( $m \geq 3$ ).

Für  $m = 3$  ergibt sich das gebräuchliche und heute am meisten verwendete dreiphasige Wechselstromsystem, das die übliche Bezeichnung *Drehstromsystem* führt.

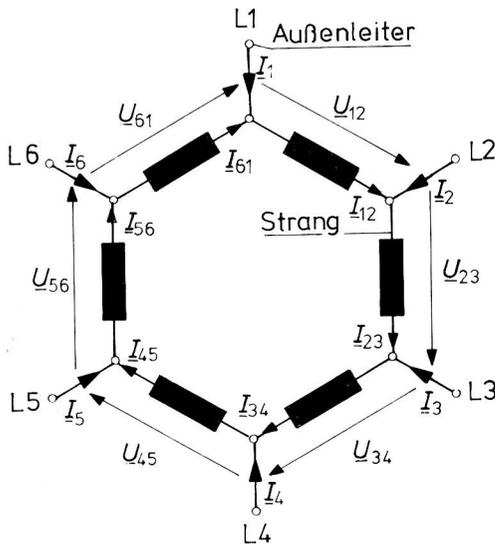
Bei einem  $m$ -Phasensystem können die einzelnen Strangleitungen entweder miteinander in einer *Ring-* oder *Polygonschaltung* oder in einer *Sternschaltung* verbunden werden. In einer Ringschaltung werden die Stränge hintereinandergeschaltet, das ist eine *Reihenschaltung* der *Quellenspannungen* bzw. der *Verbraucher*.

Die *Außenleiter*  $L_1 \dots L_m$  führen dem Verbraucher die *Außenleiterströme*  $I_1 \dots I_m$  zu. Da immer zwei Strangströme mit einem Außenleiterstrom verbunden sind, war früher der heute nicht mehr empfohlene Ausdruck „verkettetes Mehrphasensystem“ üblich. Die in einer Ringschaltung befindlichen Strangströme heißen auch *Ringströme*.

Bei *symmetrischen Mehrphasensystemen* in der Ringschaltung besteht zwischen den Strangströmen und den Außenleiterströmen der folgende Zusammenhang:

$$I_{\text{aub}} = 2 \cdot I_{\text{str}} \cdot \sin(\pi/m). \tag{1.2}$$

Die Summe der Augenblickswerte aller *Strangspannungen* ist unter den gegebenen Voraussetzungen ebenfalls Null, in dem Ring fließt daher kein Kurz-



**Bild 1.2** Ring- oder Polygonschaltung von sechs Quellenspannungen

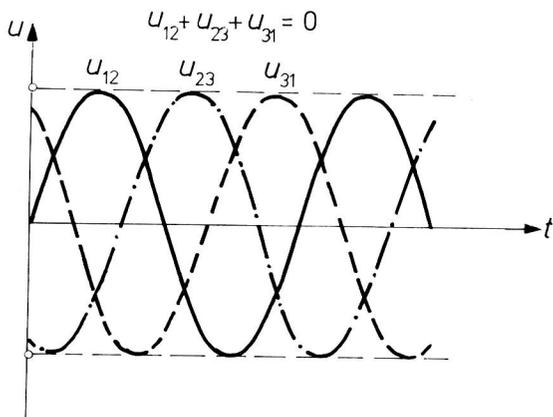
schlußstrom. Die Spannungen zwischen den Außenleitern sind nach DIN 40108 *Außenleiterspannungen*, sie sind bei der Ringschaltung immer mit der Strangspannung identisch (**Bild 1.2**).

In Ring- oder Polygonschaltungen mit gleichartigen Impedanzen – symmetrisches Mehrphasensystem – fließt kein Kurzschlußstrom. Die Summe aller Stromaugenblickswerte  $i_v(t)$  ( $v = 1 \dots m$ ) ist immer Null!

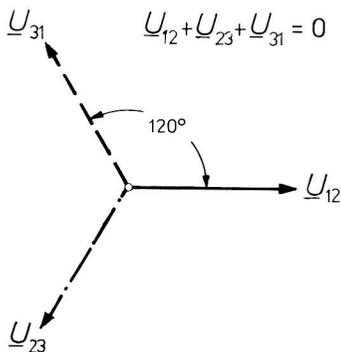
Eine Ringschaltung speziell für  $m = 3$  liefert die folgenden Beziehungen:

$$\begin{aligned} u_{1,2} &= \hat{u} \cdot \sin \omega t, \\ u_{2,3} &= \hat{u} \cdot \sin (\omega t - 120^\circ), \\ u_{3,1} &= \hat{u} \cdot \sin (\omega t - 240^\circ). \end{aligned} \quad (1.3)$$

Der *Phasenverschiebungswinkel* zwischen den drei Wechselspannungen beträgt 120 Grad. Die mit gleich großen Amplituden und gleicher Frequenz ver-



**Bild 1.3** Linienbild von drei Quellenspannungen bei 120 Grad Phasenverschiebung



**Bild 1.4** Zeigerdarstellung der drei Spannungen