

# Grundlagen der Drehstrom-Antriebstechnik

Betriebsverhalten, Auslegung und EMV-gerechte Antriebsprojektierung von Asynchronmotoren

Bearbeitet von  
Von Josef Uphaus

1. Auflage 2018. Buch. 376 S. Hardcover  
ISBN 978 3 446 45495 8  
Format (B x L): 16,7 x 24,2 cm  
Gewicht: 697 g

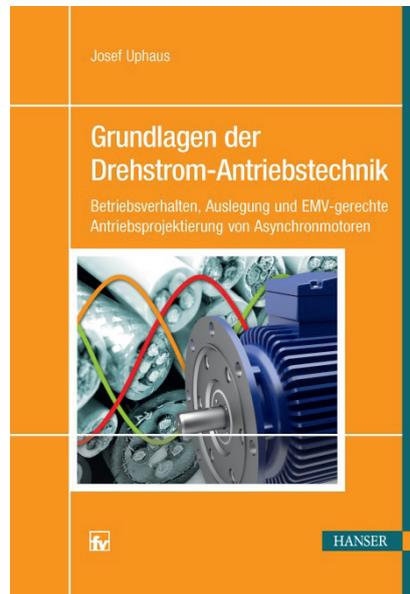
[Weitere Fachgebiete > Technik > Energietechnik, Elektrotechnik > Elektrotechnik](#)

schnell und portofrei erhältlich bei

  
DIE FACHBUCHHANDLUNG

Die Online-Fachbuchhandlung [beck-shop.de](http://beck-shop.de) ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.

# HANSER



## Leseprobe

zu

## Grundlagen der Drehstrom-Antriebstechnik

von Josep Uphaus

ISBN (Buch): 978-3-446-45495-8

ISBN (E-Book): 978-3-446-45697-6

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-45495-8>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# Vorwort

Der Drehstrom-Asynchronmotor ist zweifelsohne *die* Antriebsmaschine in der industriellen Umgebung, aber nicht nur dort. Dementsprechend häufig kommt der Elektrotechniker in seiner beruflichen Praxis mit dieser Maschine in Kontakt: bei der Wartung von Pumpen, Lüftern oder automatisierten Anlagen, bei der Reparatur von Maschinen und Anlagen, bei der Modernisierung oder dem Retrofit oder auch bei der Projektierung neu zu errichtender Maschinen und Anlagen.

In vielen Fällen besteht die Aufgabe darin, einen vorhandenen Motor zu ersetzen, um damit die Maschine oder Anlage schnell wieder in Betrieb nehmen zu können. Wichtig sind dann die auf dem Leistungsschild des „alten“ Motors angegebenen Kenn- oder Bemessungsdaten. Diese „äußeren“ Merkmale bestimmen die Verwendung des Motors. Genau aus diesem Grunde weicht die Reihenfolge der einzelnen Kapitel des Buches auch von der sonst üblichen ab.

Zunächst wird daher im 1. Kapitel dem Anwender die elektrische Energieversorgung mit dem Dreiphasen-Wechselspannungsnetz beschrieben. Das 2. Kapitel beginnt dann mit den Kenn- und Betriebsbedingungen, den „äußeren Daten“, bevor in den weiteren Kapiteln der „innere Aufbau“ und die Wirkungsweise erläutert werden.

Zu den „äußeren Kenndaten“ zählen u. a. heute besonders die Energieeffizienz, da hier normative Vorgaben zu beachten sind, bevor die Motoren in der betrieblichen Umgebung eingesetzt werden dürfen.

Es schließen sich im Kapitel 3 Berechnungshinweise zum Schutz des Motors und der Projektierung seiner Zuleitung unter Beachtung der jeweiligen Verlegesituation der elektrischen Leitungen an.

In den meisten Fällen erfolgt die Auswahl eines Antriebsmotors bezüglich seiner zu erbringenden Leistung und seines Drehmoments vom Konstrukteur. Dennoch sollte auch der Elektrotechniker Grundkenntnisse diesbezüglich haben, um einfache Auslegungen selbstständig durchführen zu können. Diese Hinweise erfährt der Leser im Kapitel 4.

Neben den klassischen Startvarianten folgt dann im Kapitel 5 eine Übersicht über die „modernen“ Motorstartmöglichkeiten bis zum Softstarter. Gerade in diesem Zusammenhang bieten die verschiedenen Hersteller heute Tools zur Auswahl geeigneter Softstarter an, von denen ein Tool (STS) beispielhaft beschrieben wird.

Da viele Antriebe drehzahlvariabel arbeiten müssen und dazu Frequenzumrichter Verwendung finden, werden diese im Kapitel 6 ausführlich dargestellt.

Mit dem häufigeren Einsatz der Frequenzumrichter kommt es vielfach in den Anlagen zu EMV-Problemen. Auch hierzu beinhaltet das Buch im Kapitel 7 Hintergrundinformationen, Normbezüge und Projektierungshinweise, mit denen der Leser in der Praxis auftretende Probleme verstehen und ihnen dadurch vorbeugen kann.

Trotz des breiten Spektrums der Inhalte erhebt das Buch nicht den Anspruch, umfassend über die Drehstrom-Antriebstechnik zu informieren. Gleichwohl soll der Leser einen Überblick gewinnen über die moderne Drehstrom-Antriebstechnik und anhand der vielen Beispiele und

Aufgaben in die Lage versetzt werden, Auswahl und Auslegung, Installation und den störungsfreien Betrieb unter Beachtung der aktuellen Normen zu realisieren. Die Lösungen zu allen Aufgaben stehen auf der Website des Hanser-Fachbuchverlages unter

[www.hanser-fachbuch.de](http://www.hanser-fachbuch.de)

kostenfrei zur Verfügung.

Das Buch richtet sich in erster Linie an die Auszubildenden in den Feldern Industrie- und Energieelektronik, die Studierenden der Fachschulen für Technik und die Erstsemester der Fachhochschulen.

Dem Carl Hanser Verlag danke ich für die vertrauensvolle Zusammenarbeit und insbesondere Herrn Manuel Leppert für die Betreuung des Projekts.

Ein besonderer Dank gilt allen Firmen, die mir die Möglichkeit gegeben haben, u. a. durch die Verwendung ihrer Abbildungen die beschriebenen Inhalte auch bildlich zu ergänzen und zu veranschaulichen.

Ich wünsche allen Lesern eine erfolgreiche Arbeit mit dem Buch.

Horstmar, im August 2018

*Josef Uphaus*

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Dreiphasenwechselfeldspannung und -strom</b> .....	<b>13</b>
1.1	Erzeugung und Beschreibungsformen .....	13
1.2	Verkettung .....	16
1.3	Komplexe Darstellung .....	20
1.4	Leistung im Wechselstromkreis .....	22
1.5	Symmetrische Belastung im Dreiphasen-System .....	27
1.6	Vergleich des Leitungsaufwands: Einphasen- und Dreiphasen-System .....	34
1.7	Wirkungsgrad .....	34
1.8	Aufgaben .....	36
<b>2</b>	<b>Drehstrom-Asynchronmotor</b> .....	<b>39</b>
2.1	Kenndaten und Betriebsbedingungen .....	40
2.1.1	Leistungsschild .....	41
2.1.2	Baugrößen, Bauformen, Aufstellungsarten und Klemmkasten-Lage (DIN EN 60034-7) .....	43
2.1.3	Schutzarten .....	44
2.1.4	Thermische Klassen/Wärme­klassen/Temperaturklassen .....	44
2.1.5	Kühlarten .....	46
2.1.6	Betriebsarten elektrischer Maschinen (DIN EN 60034-1) .....	47
2.1.7	Energieeffizienz .....	48
2.1.8	Drehsinn .....	51
2.1.9	Technische Anschlussbedingungen .....	52
2.1.10	Belastung beim Anlauf .....	53
2.1.11	Motorauswahl .....	54
2.1.12	Antriebsanalyse .....	55
2.1.13	Life Cycle Costs .....	57
2.1.14	Aufgaben .....	58
2.2	Aufbau und Wirkungsweise des Drehstrommotors .....	60
2.2.1	Entstehung des Drehfeldes .....	61
2.2.2	Drehfeldbestimmung .....	66
2.2.3	Läufer oder Rotor .....	67
2.2.4	Aufgaben .....	69

2.3	Entstehung der Drehbewegung .....	72
2.3.1	Grundgleichungen .....	75
2.3.2	Hochlaufkennlinie .....	76
2.3.3	Stromverdrängungsläufer .....	77
2.3.4	Aufgaben .....	80
2.4	Betriebsverhalten .....	84
2.4.1	Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie .....	84
2.4.2	Leerlauf- und Kurzschlusskennlinie .....	87
2.4.3	Ersatzschaltbild des Asynchronmotors .....	88
2.4.4	Betriebszustände .....	89
2.4.5	Leistungsbilanz .....	93
2.4.6	Bemessungsspannung und -frequenz .....	94
2.4.7	Aufgaben .....	97
2.5	Anlassverfahren: klassisch .....	99
2.5.1	Direktanlauf .....	100
2.5.2	Stern-Dreieck-Anlauf .....	101
2.5.3	Kusa-Schaltung .....	104
2.5.4	Anlasstransformator .....	106
2.5.5	Anlassdrosseln .....	106
2.5.6	Anlasswiderstände .....	107
2.5.7	Läuferanlasser .....	107
2.5.8	Aufgaben .....	109
2.6	Anlassverfahren: modern .....	115
2.6.1	Hybrid-Motorstarter .....	116
2.6.2	Softstarter .....	118
2.6.3	Frequenzumrichter .....	120
2.7	Drehzahländerung .....	122
2.7.1	Frequenz- und Schlupfvariation .....	122
2.7.2	Polumschaltung .....	122
2.7.3	Aufgaben .....	129
<b>3</b>	<b>Projektierung des Motorabgangs .....</b>	<b>135</b>
3.1	Motorschutz .....	135
3.1.1	Überlastschutz .....	136
3.1.2	Thermisches Überlastrelais (Motorschutzrelais) .....	142
3.1.3	Motorschutzschalter .....	144
3.1.4	Elektronisches Überlastrelais .....	149
3.1.5	Thermistorschutz (Motor-Vollschutz) .....	152
3.1.6	Motorschutz- und Schütz-Dimensionierung (Y- $\Delta$ -Schaltung) .....	153

3.1.7	Zusammenfassung .....	154
3.1.8	Aufgaben .....	155
3.2	Einbauanleitung und Inbetriebnahmeanleitung .....	162
3.3	Störungen – Ursachen – Beseitigung.....	163
3.4	Bremsen .....	164
3.4.1	Elektrische Bremsverfahren .....	164
3.4.2	Elektrische Bremsen mit Anbaukomponenten .....	166
3.4.3	Mechanische Bremse .....	171
3.4.4	Störungen an der Bremse .....	174
3.5	Drehrichtungsumkehr .....	175
3.5.1	Drehrichtungsumkehr – schützgesteuert .....	175
3.5.2	Drehrichtungsumkehr – elektronisch .....	177
3.5.3	Aufgaben .....	178
3.6	Motorzuleitung .....	180
3.6.1	Kurzschlusschutz .....	181
3.6.2	Überlastschutz.....	182
3.6.3	Projektierungsschritte .....	182
3.6.4	Auswahlkriterien für Niederspannungssicherungen.....	187
3.6.5	Leitungsschutzsicherungen .....	188
3.6.6	Leitungsschutzschalter .....	191
3.6.7	Leistungsschalter.....	193
3.6.8	Schutz von Motorstromkreisen mit Motorstartern .....	193
3.6.9	Aufgaben .....	194
3.7	Kompensation .....	197
3.7.1	Leistungsbetrachtung .....	197
3.7.2	Kompensationsarten .....	201
3.7.3	Ermittlung der erforderlichen Kompensationsleistung.....	204
3.7.4	Einzelkompensation von Motoren.....	206
3.7.5	Kompensation in einem Netz mit Oberschwingungen .....	207
3.7.6	Aufgaben .....	210
<b>4</b>	<b>Auslegung nach Mechanik .....</b>	<b>213</b>
4.1	Grundlagen.....	213
4.1.1	Lastmomente .....	215
4.1.2	Stabilität im Arbeitspunkt.....	217
4.1.3	Aufgaben .....	219
4.2	Aspekte der Antriebsauslegung.....	221
4.2.1	Statische Antriebsauslegung.....	221
4.2.2	Dynamische Antriebsauslegung .....	223

4.2.3	Getriebe .....	226
4.2.4	Umwandlung der Translation in Rotation .....	230
4.2.5	Thermische Antriebsauslegung .....	232
4.2.6	Positionierung .....	234
4.2.7	Aufgaben .....	236
4.3	Beschleunigung und Hochlaufzeiten .....	236
4.3.1	Berechnung von Hochlaufzeiten .....	237
4.3.2	Aufgaben .....	242
<b>5</b>	<b>Softstarter .....</b>	<b>247</b>
5.1	Grundlagen .....	247
5.2	Schaltungsarten .....	254
5.3	Sanftanlasser-Auswahl .....	255
5.4	Kurzbeschreibung: Einstellparameter .....	255
5.5	Projektierung .....	257
5.6	Auswahl-Tools für Sanftanlasser .....	260
5.7	Aufgaben .....	263
<b>6</b>	<b>Frequenzumrichter .....</b>	<b>265</b>
6.1	Übersicht .....	265
6.2	Frequenzumrichter-Arten .....	268
6.3	Stellbereich .....	277
6.4	87-Hz-Eckfrequenz .....	278
6.5	Auslegung .....	281
6.6	Boost .....	282
6.7	Bremswiderstand .....	282
6.8	Aufgaben .....	286
<b>7</b>	<b>EMV – Elektromagnetische Verträglichkeit .....</b>	<b>289</b>
7.1	Übersicht .....	289
7.2	Messen von Wechselgrößen .....	296
7.2.1	Arithmetischer Mittelwert .....	296
7.2.2	Gleichrichtwert .....	297
7.2.3	Quadratischer Mittelwert .....	298
7.2.4	Mischgrößen .....	299
7.2.5	Formfaktor .....	299
7.2.6	Scheitelfaktor .....	300
7.2.7	Grund- und Oberschwingungsgehalt .....	300
7.2.8	Aufgaben .....	301

7.3 Elektrische Antriebe als Störquelle .....	303
7.4 Netzqualitätskriterien .....	305
7.5 Messungen der Netzqualität .....	307
7.6 Die 3. Oberschwingung .....	311
7.7 Auswirkungen von Oberschwingungen .....	312
7.8 Normen: Grenzwerte für Oberschwingungsströme .....	313
7.9 Auswirkungen des FU-Betriebs auf den Motor .....	316
7.10 Filter und Drosseln .....	318
7.10.1 Filter .....	318
7.10.2 Netzdrossel .....	320
7.10.3 Motordrossel .....	321
7.10.4 Sinusfilter .....	322
7.10.5 Harmonic-/EMI-/EMV-Filter .....	323
7.10.6 $du/dt$ -Filter .....	324
7.10.7 Zwischenkreisdrosseln .....	324
7.10.8 Passive und aktive Oberschwingungsfilter .....	325
7.11 Motorleitung .....	326
7.12 Schutzleiterstrom .....	327
7.13 EMV-verträgliche Installation .....	336
7.14 Aufgaben .....	340
<b>8 Komplexaufgaben .....</b>	<b>343</b>
<b>A Anhang .....</b>	<b>349</b>
A.1 Normen für „drehende elektrische Maschinen“ .....	349
A.2 Auswahlhilfe für Elektromotoren (NORD) .....	351
A.3 Thermisches Überlastrelais (Motorschutzrelais) .....	352
A.3.1 Auswahltabelle .....	352
A.3.2 Kurzschlusschutz des thermischen Überlastrelais (Motorschutzrelais) .....	352
A.4 Motorschutzschalter .....	353
A.5 Kompensationstabelle .....	355
A.6 Sanftstarter .....	357
A.7 Frequenzumrichter .....	358
<b>Bildquellen .....</b>	<b>359</b>
<b>Literatur und Tools .....</b>	<b>361</b>
<b>Index .....</b>	<b>365</b>

# 1

## Dreiphasenwechselfspannung und -strom

In den Anfängen der elektrischen Energieerzeugung bestand lange Zeit ein Wettstreit zwischen der „richtigen“ Form der Übertragung der elektrischen Energie: dem Gleichstrom- oder Wechselstromsystem, bei dem sich schon bald das Wechselstromsystem durchsetzen konnte.

In den folgenden Abschnitten wird das aktuelle Dreiphasen-Wechselspannungssystem von der Erzeugung, den Beschreibungsformen über die Verkettung bis hin zur symmetrischen und un-symmetrischen Belastung in komplexer Darstellungsform dargestellt.

### ■ 1.1 Erzeugung und Beschreibungsformen

Das heutige Dreiphasen-Wechselspannungssystem bildet die Hauptform der elektrischen Energieübertragung. Gegenüber dem Einphasen-Wechselspannungssystem oder dem Gleichspannungssystem besitzt es verschiedene Vorteile:

- einfache Erzeugung mit Drehstrom-Synchrongeneratoren
- gute Ausnutzung der Transportleitungen (Übertragungsleistung/Leitermaterialaufwand)
- zwei unterschiedliche Spannungen (Stern- und Leiterspannung)
- einfache Wandlung in Gleichspannung
- direkter Betrieb von Drehstrommotoren
- konstante Leistung bei symmetrischer Last:  $p(t) = P$

Drehstrom-Synchrongeneratoren erzeugen in den drei Wicklungssträngen des Stators (Ständers) drei voneinander unabhängige sinusförmige Wechselspannungen (Bild 1.1)

In Bild 1.2 ist der 4-polige Läufer (Rotor) eines Drehstrom-Synchrongenerators dargestellt. Die drei Ständerwicklungen  $U$ ,  $V$  und  $W$  des Stators sind räumlich in einem Winkel von  $120^\circ$  zueinander angeordnet. Bei gleichmäßiger Drehung des Rotors wird durch dessen Magnetfeld in den drei Wicklungen jeweils eine Spannung induziert, die von Wicklung zu Wicklung eine zeitliche Verschiebung (Phasenverschiebung) von ebenfalls  $120^\circ$  aufweisen.

Die Dreiphasenwechselfspannung kann auf verschiedene Arten dargestellt oder beschrieben werden:

- grafisch, als Zeigerbild oder im Liniendiagramm (Bild 1.3),
- mathematisch, als Funktions- oder Momentanwertgleichung oder
- als komplexe Gleichung.

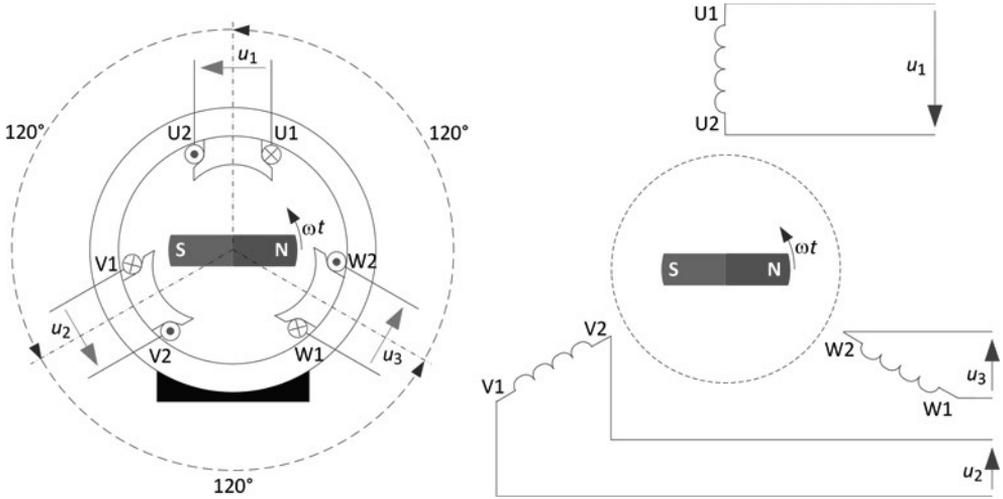


Bild 1.1 2-poliger Generator (links) und Schaltbild (rechts)

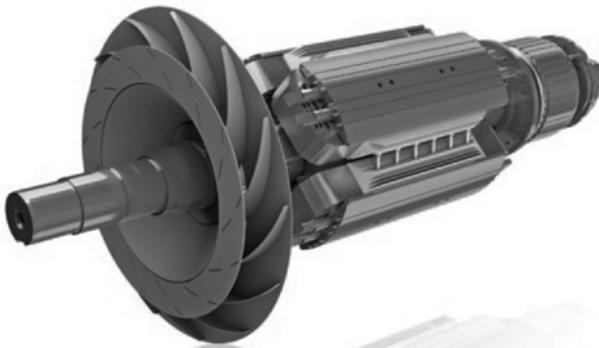


Bild 1.2 4-poliger Rotor/Läufer eines Drehstrom-Synchrongenerators (© ABB AG, 2018)

### Zeigerbild und Liniendiagramm

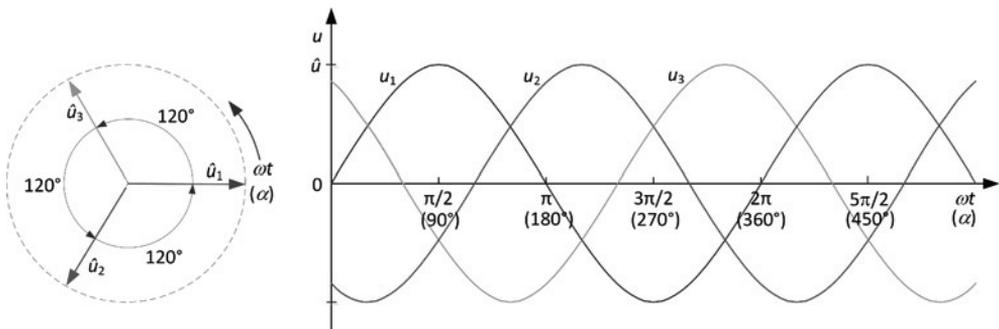


Bild 1.3 Zeigerbild (links) und Liniendiagramm (rechts)

**Momentanwertgleichung (Sinusform)**

$$\begin{aligned}
 u_1 &= \hat{u}_1 \cdot \sin \omega t \\
 u_2 &= \hat{u}_2 \cdot \sin(\omega t - 120^\circ) \\
 u_3 &= \hat{u}_3 \cdot \sin(\omega t - 240^\circ)
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

Für die Sinusform gilt:

$$\hat{u} = \sqrt{2} \cdot U \tag{1.2}$$

$\hat{u}$  – Scheitel- oder Maximalwert

$U$  – Effektivwert (quadratischer Mittelwert)

Damit gilt:

$$\begin{aligned}
 u_1 &= \sqrt{2} \cdot U_1 \sin \omega t \\
 u_2 &= \sqrt{2} \cdot U_2 \sin(\omega t - 120^\circ) \\
 u_3 &= \sqrt{2} \cdot U_3 \sin(\omega t - 240^\circ)
 \end{aligned}
 \tag{1.3}$$

**Komplexe Schreibweise (Vektorform)**

$$\begin{aligned}
 \underline{U}_1 &= U_1 e^{j0^\circ} \\
 \underline{U}_2 &= U_2 e^{-j120^\circ} \\
 \underline{U}_3 &= U_3 e^{-j240^\circ}
 \end{aligned}
 \tag{1.4}$$



Die komplexe Darstellung bietet sich immer dann an, wenn bei Berechnungen nicht nur die Beträge, sondern auch die Winkel von Bedeutung sind. Da Spannungen und Ströme in Wechsel- und Drehstromsystemen immer neben den Beträgen auch eine Phasenlage besitzen, also eine zeitlich/räumliche Orientierung aufweisen, ist die einfache Betragsrechnung eher die Ausnahme.

Die Spannungen der drei Phasen werden mit  $U$ ,  $V$  und  $W$  bezeichnet. Entspricht die Phasenfolge der in Bild 1.3 dargestellten,

- die Phase  $V$  eilt der Phase  $U$  um  $120^\circ$  nach und
- die Phase  $W$  eilt der Phase  $V$  um  $120^\circ$  nach,

also der Phasenfolge  $U \rightarrow V \rightarrow W$ , so entsteht in einem Dreiphasen-Wechselstrommotor ein Rechtsdrehfeld, d. h., der Motor läuft im Rechtslauf (positive Phasenfolge).

Durch Vertauschen von zwei Phasen kommt es zu einer Änderung der Drehrichtung im Drehstrommotor, und der Motor würde in Linkslauf betrieben (negative Phasenfolge).



Drehstrom-Steckvorrichtungen (Bild 1.4) müssen so angeschlossen werden, dass sich ein Rechtsdrehfeld ergibt, wenn man die Steckbuchsen von vorn im Uhrzeigersinn betrachtet (vgl. DIN VDE 0100-550:1988-04).

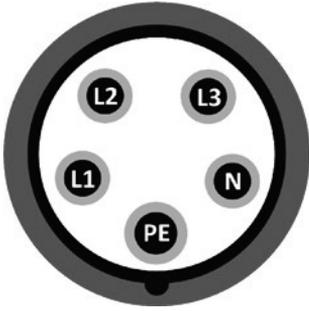


Bild 1.4 CEE-Steckbuchse

## 1.2 Verkettung

Zur Leistungsübertragung mit dem offenen System würden sechs Leitungen benötigt. In der Praxis werden die drei getrennten Spannungen zu einem **Dreiphasen-System** verbunden oder verkettet. Unter dem Begriff **Verkettung** versteht man die Verbindung einzelner Stromkreise zu einem Stromkreis – hier zum Dreiphasen-Wechselspannungssystem oder zum Dreiphasen-Wechselstromsystem (Drehstrom).

Bei der Verkettung sind zwei Varianten möglich:

- Sternschaltung
- Dreieckschaltung

Werden die drei Wicklungsstränge des Generators so miteinander verbunden oder verkettet, wie in Bild 1.5 (links) dargestellt ist, so liegt die **Sternschaltung** (Y-Schaltung) vor.

Werden die drei Wicklungsstränge des Generators so miteinander verbunden oder verkettet, wie in Bild 1.5 (rechts) dargestellt ist, so liegt die **Dreieckschaltung** ( $\Delta$ -Schaltung) vor.

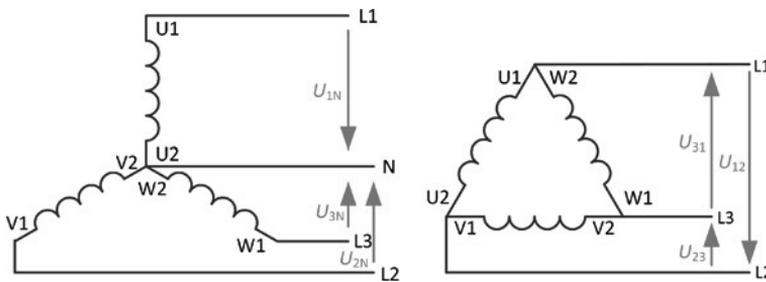


Bild 1.5 Sternschaltung (links) und Dreieckschaltung (rechts)

### Leiter- und Spannungsbezeichnungen

Die spannungsführenden elektrischen Leiter, die die Versorgungsspannung, elektrische Betriebsmittel oder Geräte bilden, werden bei Gleichspannungsversorgung mit L+ und L–, im einphasigen Wechselspannungsnetz mit L1 und N und im dreiphasigen Wechselspannungsnetz mit L1, L2 und L3 (entsprechend der Phasenfolge) gekennzeichnet (Tabelle 1.1). Um bei Spannungsangaben ebenfalls eine Eindeutigkeit zu haben, werden diese entsprechend der beiden Punkte bezeichnet, zwischen denen die jeweilige Potenzialdifferenz oder Spannung gemessen wird. Tragen z. B. die beiden Punkte die Bezeichnungen L1 und N, so lautet die von Punkt L1 nach N gemessene Spannung  $U_{1N}$  oder zwischen den Außenleitern L1 und L2  $U_{12}$ .

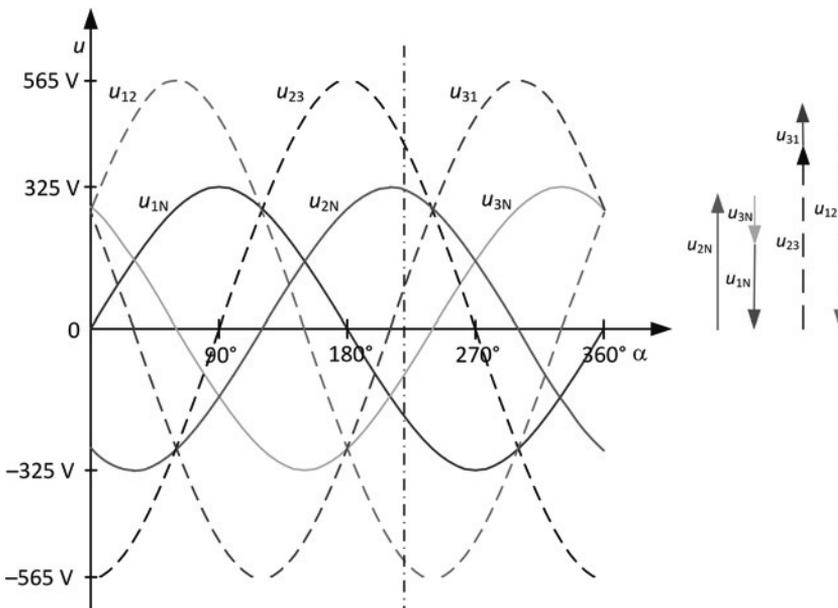
**Tabelle 1.1** Leiter- und Spannungsbezeichnungen

Bezeichnungen	Erläuterungen
L1 L2 L3: Außenleiter	<ul style="list-style-type: none"> <li>alte Bezeichnung: R – S – T</li> <li>am Betriebsmittel allgemein: U – V – W</li> <li>Farbkennzeichnung: grau – schwarz – braun</li> </ul>
N: Neutraleiter	<ul style="list-style-type: none"> <li>auch Sternpunkt- oder Mittelleiter (früher: MP)</li> <li>Farbkennzeichnung: hellblau</li> </ul>
$U_{12}$ $U_{23}$ $U_{31}$ : Außenleiterspannung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Leiterspannung oder Dreiecksspannung zwischen zwei Außenleitern mit zeitlich aufeinanderfolgenden Phasen (Dreiecksspannungen)</li> </ul>
$U_{1N}$ $U_{2N}$ $U_{3N}$ : Sternspannung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Spannung zwischen einem Außenleiter und dem Sternpunktleiter</li> </ul>
$U_{UV}$ $U_{VW}$ $U_{WU}$ : Strangspannung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Spannung zwischen den beiden Enden eines Strangs</li> </ul>

Werden zwei Indizes verwendet, so entspricht die Reihenfolge der Indizes der Bezugsrichtung, z. B.  $U_{12}$ . Durch die Verkettung können zwei Spannungen bereitgestellt werden:

- **Leiterspannung** (Außenleiterspannung oder Dreiecksspannung) und
- **Sternspannung** (zwischen einem Außenleiter und dem Sternpunkt gemessene Spannung)

Im Liniendiagramm (Bild 1.6) sind die Signal-Zeitverläufe der Sternspannungen ( $u_{1N}$ ,  $u_{2N}$ ,  $u_{3N}$ ) und der Leiterspannungen ( $u_{12}$ ,  $u_{23}$ ,  $u_{31}$ ) abgebildet. Aus dem Liniendiagramm ist erkennbar, dass die beiden Spannungen unterschiedliche Scheitelwerte und damit auch Effektivwerte (geometrische Mittelwerte) aufweisen.

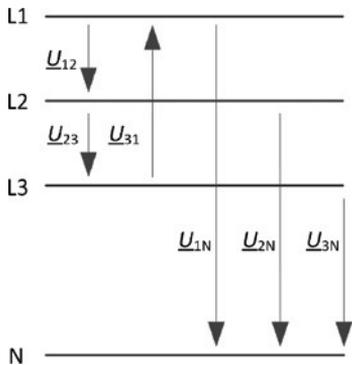
**Bild 1.6** Liniendiagramm (links) und Augenblickswerte (rechts)

Für die Spannungen des symmetrischen Dreiphasen-Wechselspannungssystems gilt (wie zum Zeitpunkt der Strich-Punkt-Linie dargestellt):

$$\sum u = 0 \quad (1.5)$$

Der Scheitelfaktor  $\sqrt{2}$  behält weiterhin seine Gültigkeit, da sich an der Sinusform der Spannungen nichts geändert hat. Die Sternschaltung (Bild 1.5 links) bildet ein 4-Leiter-System, bei dem neben den Sternspannungen auch die Leiterspannungen abgegriffen werden können (Bild 1.7). Für diese Spannungen gelten folgende Spannungsgleichungen, mit denen die Umrechnung von der Sternschaltung in die Dreieckschaltung u. U. erfolgen kann:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{12} &= \underline{U}_{1N} - \underline{U}_{2N} \\ \underline{U}_{23} &= \underline{U}_{2N} - \underline{U}_{3N} \\ \underline{U}_{31} &= \underline{U}_{3N} - \underline{U}_{1N} \end{aligned} \quad (1.6)$$



**Bild 1.7** Leiterspannungen im 4-Leiter-System

Anhand des Zeigerbildes (Bild 1.8) kann dann die Umrechnung durchgeführt werden:

$$U_{12} = U_{1N} \cdot \cos 30^\circ + U_{2N} \cdot \cos 30^\circ \quad (1.7)$$

mit  $U_{1N} = U_{2N}$

$$U_{12} = 2 \cdot U_{1N} \cdot \cos 30^\circ \quad (1.8)$$

mit  $\cos 30^\circ = \frac{1}{2}\sqrt{3}$

$$U_{12} = \sqrt{3} \cdot U_{1N} \quad (1.9)$$

oder allgemein

$$U = \sqrt{3} \cdot U_{St} \quad (1.10)$$

oder: Leiterspannung =  $\sqrt{3}$  · Sternspannung

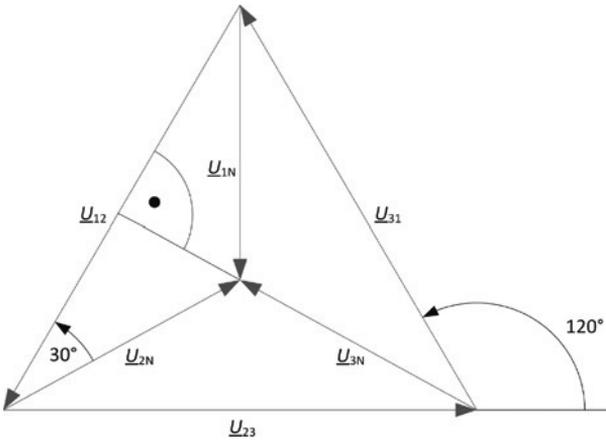


Bild 1.8 Verkettung

Im Dreiphasen-System wird der Faktor  $\sqrt{3}$  auch als **Verkettungsfaktor** bezeichnet.  
Bei symmetrischen Systemen gilt:

$$\begin{aligned}\underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_3 &= 0 \\ \underline{U}_{12} + \underline{U}_{23} + \underline{U}_{31} &= 0\end{aligned}\quad (1.11)$$

Für die Sternschaltung gilt:

$$U = \sqrt{3} \cdot U_{St} \quad (1.12)$$

$U$  – Leiterspannung (z. B.  $U_{12}$ )  
 $U_{St}$  – Sternspannung (z. B.  $U_{1N}$ )

Für die Dreieckschaltung gilt:

$$U = U_{St} \quad (1.13)$$

$U$  – Leiterspannung (z. B.  $U_{12}$ )  
 $U_{St}$  – Strangspannung (z. B.  $U_{12}$ )

Die im 4-Leiter-System verknüpften Spannungen lassen sich auch, wie in Bild 1.9 abgebildet, mit ihren jeweiligen Phasenlagen darstellen.

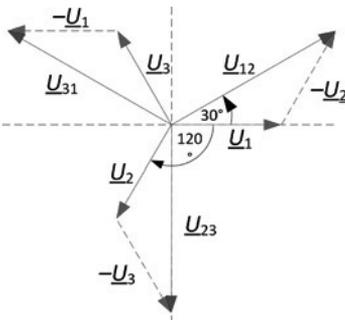
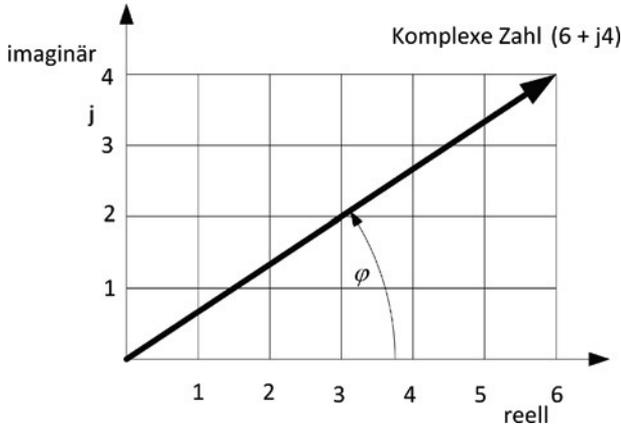


Bild 1.9 Spannungszeigerbild des 4-Leiter-Systems

## ■ 1.3 Komplexe Darstellung

Jede komplexe Zahl kann durch die Angabe von Realteil (Re) und Imaginärteil (Im) in der Gauß'schen Zahlenebene dargestellt werden (Bild 1.10).



**Bild 1.10** Komplexe Ebene

Die Kennzeichnung des Imaginärteils erfolgt durch den Buchstaben **j** (oder **i** für imaginäre Einheit).

Diese Darstellungsform ist auch bei Wechselspannungen und -strömen möglich, da auch sie einen Betrag und eine Phasenlage besitzen:

$$\hat{u} \cdot \sin(\omega t \pm \varphi) = \hat{u}_1 \sin \omega t \pm \hat{u}_2 \cos \omega t \quad (1.14)$$

Oder als komplexe Spannungsgleichung:

$$U = U_1 \pm jU_2 \quad (1.15)$$

Eine komplexe Größe wird durch einen Unterstrich am Formelzeichen gekennzeichnet:

$$\underline{U}$$

Alternativ wird die Vektordarstellung auch durch einen Pfeil über dem Formelzeichen der jeweiligen physikalischen Größe gekennzeichnet:

$$\vec{u}$$

Für die Darstellung komplexer Größen sind drei Schreibweisen entwickelt worden:

**Normalform**

$$\underline{U} = \underline{U}_1 \pm j\underline{U}_2 \quad (1.16)$$

**Trigonometrische Form**

$$\underline{U} = U(\cos \varphi \pm j \sin \varphi) \quad (1.17)$$

Die Umrechnung für den Betrag lautet:

$$|\underline{U}| = \sqrt{U_1^2 + U_2^2} \quad (1.18)$$

Für den Phasenwinkel gilt:

$$\tan \varphi = \frac{U_2}{U_1} \quad (1.19)$$

$\varphi$  – Nullphasenwinkel

**Exponentialform nach Euler**

$$e^{\pm j\varphi} = \cos \varphi \pm j \sin \varphi \quad (1.20)$$

$$\underline{U} = U \cdot e^{\pm j\varphi} \quad (1.21)$$

$U$  – Betrag

Die Darstellungsform einer komplexen Größe richtet sich nach ihrer Verwendung:

- Normalform: Addition und Subtraktion komplexer Größen
- Exponentialform: Multiplikation und Division komplexer Größen
- Trigonometrische Form: Umrechnung von der Normalform in die Exponentialform v. v.

**Beispiel 1.1**

Wandeln Sie die Spannung mit der Gleichung  $u = 45,5 \text{ V} \sin(\omega t + 20,2^\circ)$  in die drei Darstellungsformen komplexer Größen um!

*Lösung*

Exponentialform:  $\underline{U} = 32 \text{ V} e^{+j20,2^\circ}$

Trigonometrische Form:  $\underline{U} = 32 \text{ V} (\cos 20,2^\circ + j \sin 20,2^\circ)$

Normalform:  $\underline{U} = 30 \text{ V} + j11 \text{ V}$

## ■ 1.4 Leistung im Wechselstromkreis

Für die Berechnung der elektrischen Leistung muss berücksichtigt werden, ob es sich um den Betrieb an Gleichspannung, Wechselspannung oder Dreiphasen-Wechselspannung handelt. Bei Betrieb an Gleichspannung, die am Betriebsmittel einen Gleichstrom hervorruft, gilt mit  $U = \text{konst.}$  und  $I = \text{konst.}$ :

$$P = U \cdot I \quad (1.22)$$

Diese elektrische Leistung wird dabei vollständig in thermische, chemische oder z. B. mechanische Energie umgewandelt, als Wirkleistung bezeichnet und in der Einheit Watt (W) angegeben.

Bei Betrieb an nicht konstanten Spannungen und den dadurch ebenso nicht konstanten Strömen kann nur der jeweilige Augenblickswert der elektrischen Leistung berechnet werden.

Da bei nicht konstanten Größen Kleinbuchstaben verwendet werden, gilt bei  $U \neq \text{konst.}$  und  $I \neq \text{konst.}$ :

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (1.23)$$

Bei veränderlichen Werten von Spannung ( $u$ ) und Strom ( $i$ ) entspricht die Wirkleistung dem Gleichwert der Augenblicksleistung  $p$ :

$$P = \bar{p} = \bar{u} \cdot \bar{i} \quad (1.24)$$

Für periodische Spannungen und Ströme ist diese über eine Periode  $T$  zu mitteln:

$$P = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u \cdot i dt \quad (1.25)$$

Bei sinusförmigen Spannungen und Strömen mit  $\varphi$  (Phasenverschiebungswinkel zwischen Spannung und Strom) gilt mit

$$\begin{aligned} u(t) &= \hat{u} \cdot \sin(\omega t) \\ i(t) &= \hat{i} \cdot \sin(\omega t - \varphi) \end{aligned} \quad (1.26)$$

somit:

$$p(t) = \hat{u} \sin \omega t \cdot \hat{i} \sin(\omega t - \varphi) \quad (1.27)$$

Mit

$$\sin \alpha \cdot \sin \beta = \frac{1}{2} (\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)) \quad (1.28)$$

gilt:

$$p(t) = \left( \frac{\hat{u} \cdot \hat{i}}{2} (\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)) \right) \quad (1.29)$$

# Index

## A

Ableitströme 327  
Ableitstrom-Kompensation 336  
Abschaltbedingung 185  
Aluminiumgehäuse 66  
Anbaubremsen 171  
Anfangsspannung 255  
Anlassdrosseln 106  
Anlasstransformator 106  
Anlasswiderstände 107  
Anlaufmoment 76  
Anlaufstrom 54, 76  
Antriebsauslegung  
– dynamische 223  
– statische 221  
– thermische 232  
Anzugsmoment 84, 99  
Anzugsstrom 99  
Arbeitspunkt 218  
– instabiler 218  
– stabiler 218  
Arbeitsstromprinzip 173  
Asynchronmotor 74  
Auslaufzeit 120  
Auslöseklassen 138  
Auslösestrom 145, 146  
Auslöseverhalten 143  
Außenleiter 17

## B

Bauarten 188  
Bauform 43  
Baugröße 43  
Belastungsdauer 233  
Bemessungsdaten 41  
Bemessungsleistung 42  
Bemessungsmoment 53, 85  
Bemessungspunkt 216

Bemessungsspannung 94  
Bemessungsstrom 53  
Berührstrom 328  
Beschleunigung 215, 217  
Beschleunigungsmoment 218  
Betriebsart 47  
Betriebsklasse 189  
Blindleistung 24, 198, 292  
– Grundschiebung- 293  
– Steuer- 294  
– Verschiebungs- 293  
– Verzerrungs- 293  
Boost 282  
Brandschutz 327  
Bremsbetrieb 91  
Brems-Chopper 283  
Bremse  
– mechanische 171  
– Störungen 174  
Bremsen 164  
Bremswiderstand 282  
– Dauerleistung 284  
– Spitzenleistung 284  
Bypass-Kontakte 119, 248

## D

Dahlander-Schaltung 123  
Delta-Schaltung 254  
Differenzstromüberwachungsgerät 334  
Direktanlauf 100  
DOL-Schaltung 254  
Doppelstaffelläufer 69  
DO-System 188  
Drehfeld 61  
Drehfelddrehzahl 64, 73  
Drehfeldprüfer 67  
Drehmoment 75, 215  
Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie 84  
Drehrichtung 51

Drehrichtungsumkehr  
– elektronisch 177  
– schützgesteuert 175  
Drehsinn 51  
Drehstrom-Synchrongeneratoren 13  
Drehzahl 215  
Drehzahlverstellung 122  
Dreieckschaltung 16, 27, 63  
Dreiphasen-Wechselspannungssystem 13  
D-System 188

**E**

Echt-Effektivwert-Messer 298  
Effektivwert 298  
Effizienzklassen 48  
Einbauanleitung 162  
Einschaltdauer 232  
Einzelkompensation 202  
Elektromagnetische Schnellauslösung 145  
Elektromagnetische Verträglichkeit 289  
EMI-Filter 323  
EMV 289  
EMV-Filter 323  
EMV-Gesetz 289  
EMV-Richtlinie 289  
Energieeffizienz 40, 48  
Energieverbrauchsrelevante-Produkte-  
Gesetz 40  
ErP-Richtlinie 40  
EUSAS-Motor 95  
Exponentialform 21

**F**

Fahrtdiagramm 214  
Fehlerschutz 327  
Feldorientiertes Verfahren 276  
Feldschwächebereich 277, 280  
Filter 318  
Filterkreisdrosseln 209  
Formfaktor 299  
Fourier-Analyse 291  
Frequenzumrichter 120, 265  
Funktions-Potenzialausgleich 333

**G**

Gegenstrombremsbetrieb 91  
Gegenstrombremsung 166  
Generatorbetrieb 90  
Getriebe 226  
Getriebemotor 55  
Gleichrichter 267  
Gleichrichtwert 297  
Gleichstrombremsung 165  
Gleichstromumrichter 267  
Graugussgehäuse 66  
Grunddrehzahlbereich 280  
Grundswingungsgehalt 295, 300  
Grundswingungs-Leistungsfaktor 292  
Grundstellbereich 277  
Gruppenkompensation 202

**H**

Harmonic-Filter 323  
Hochlaufkennlinie 84  
Hochlaufzeit 119, 238  
Hybrid-Motorstarter 116  
Hysteresebremsen 168

**I**

Inbetriebnahmeanleitung 162  
Inline-Schaltung 254  
Inrushstrom 49  
Isolierstoffklasse 45

**K**

Käfigläufer 68  
Kickstart 256  
Kippmoment 77, 85  
Klemmkasten 61, 62  
Kompensation 197  
Kompensationsanlage  
– unverdrosselt 207  
– verdrosselt 208  
Kompensationsarten 201  
Konstantflussbereich 280  
Konusanker-Bremsmotor 172  
Kühlarten 46

Kurzschlussläufer 68  
 Kurzschlussringe 68  
 Kurzschlusschutz 145, 181  
 Kurzschlussstrom 181  
 Kusa-Schaltung 104

**L**

Lagergeräusch 317  
 Lagerströme 317  
 Lastmoment  
 – konstant 215  
 – linear ansteigend 215  
 – quadratisch 215  
 – umgekehrt proportional 216  
 Lastwechsel 214  
 Läufer 61  
 Läuferanlasser-Verfahren 107  
 Läuferblechpaket 61  
 Läuferstabformen 78  
 Läuferstillstandsspannung 73  
 Lebenszykluskosten 57  
 Leerlaufkennlinie 88  
 Leichtanlauf 101  
 Leistungsbilanz 93  
 Leistungsfaktor 26  
 – „totaler“ 294  
 Leistungsschalter 193  
 Leistungsschild 40, 41  
 Leiterspannung 17  
 Leitungsschutzschalter 191  
 Lenz'sche Regel 72  
 life cycle costs 57  
 Linkslauf 15, 52, 65  
 Losbrechmoment 222, 253

**M**

Magnetfeld 61  
 Magnepulverbremse 169  
 Mehrspannungsauslegung 95  
 Messverfahren  
 – Differenzstrom 330  
 – direktes 330  
 – Ersatzableitstrom 330

Mittelwert  
 – Arithmetischer 296  
 – Quadratischer 298  
 Motorbetrieb 90  
 Motordrossel 321  
 Motorleitung 326  
 Motorschutz 137  
 Motorschutzschalter 141, 144  
 Motor-Vollschutz 152

**N**

Nenndaten 41  
 Nennmoment 85  
 Netzdrossel 320  
 Netzgleichrichter 270  
 Netzqualität 290  
 Netzurückwirkung 290, 292  
 Neutralleiter 17  
 Neutralleiterunterbrechung 312  
 NH-System 189  
 Normalanlauf 101, 255  
 Normalform 21

**O**

Oberschwingungsfiler  
 – aktiv 325  
 Oberschwingungsgehalt 300  
 Oberschwingungsspektrum 308  
 Oberwellen 292

**P**

PAM 272  
 PAM-Wicklung 128  
 Pendelmomente 317  
 PFC 305  
 – aktiv 305  
 – passiv 305  
 Phasenanschnittsteuerung 119, 248  
 Phasenfolge 15  
 Polpaarzahl 65  
 Polumschaltung 122  
 Positionierung 234  
 PWM 272

**R**

Rampenzeit  
 – für den Auslauf 255  
 – für den Start 255  
 RCD 330  
 Rechtslauf 15, 52, 65  
 Reihenschaltung 254  
 Rotor 61  
 Ruhestromprinzip 173

**S**

Sattelmoment 84  
 Scheinleistung 23, 198  
 Scheitelfaktor 18, 300  
 Schleifringläufermotoren 107  
 Schlupf 73  
 Schutzarten 44  
 Schütz-Dimensionierung 153  
 Schutzleiterstrom 327, 328  
 Schutzleiterströme  
 – dynamisch 330  
 – statisch 329  
 – transiente 330  
 Schutz-Potenzialausgleich 333  
 Schweranlauf 101, 255  
 Senk- oder Nutzbremmung 164  
 Sinusfilter 322  
 Softstarter 118, 247  
 spannungsumschaltbare Motoren 95  
 Spannungsvektorverfahren 277  
 Spannungszwischenkreis 270  
 Spieldauer 232  
 Staffelläufer 69  
 Stahlgehäuse 66  
 Ständer 61  
 Ständerblechpaket 61  
 Ständerwicklungen 13  
 Startspannung 119, 256  
 Startstoß 250  
 Stator 61  
 Stern-Dreieck-Umschaltung 101, 103  
 Sternpunktverschiebung 312  
 Sternschaltung 16, 30, 63  
 Sternspannung 17  
 Stopprampe 256

Störungen–Ursachen–Beseitigung 163  
 Strangströme 63  
 Stromrichter 267  
 Stromvektorverfahren 277  
 Stromverdrängung 78  
 Stromverdrängungsläufer 77  
 Stromzwischenkreis 270  
 Synchrondrehzahl 64, 73  
 Synchronmotor 67

**T**

Teilspannungsanlauf 101  
 THD-Wert 309  
 Thermische Bimetallauslösung 145  
 thermische Klasse 45  
 thermisches Überlastrelais  
 (Motorschutzrelais) 141, 142  
 Thermistoren 63, 152  
 Thermistorschutz 152  
 Trägheitsmoment 225  
 Trigonometrische Form 21  
 True-RMS-Messgerät 298  
 Typenschild 40

**U**

$U/f$ -Kennlinie 266  
 $U/f$ -Verfahren 276  
 $du/dt$ -Filter 324  
 Überlastrelais  
 – elektronisches 149  
 Überlastschutz 182  
 Übersetzung 226  
 Überstromschutz 145, 180  
 Umdrehungsfrequenz 67  
 Umrichter 267

**V**

Verdrosselungsfaktor 209  
 Verkettung 16  
 Verkettungsfaktor 19  
 Verlustleistung 43  
 Verschiebeankermotor 171  
 Verschiebungsfaktor 26, 292, 295

**W**

Wärmeklasse 45  
Wechselrichter 267  
Wechselstromumrichter 267  
Weitbereichswicklungen 95  
Wellenspannungen 317  
Wendeschutzsteuerung 175  
Wicklungsstränge 62  
Wiederbereitschaftszeit 258  
Winkelbeschleunigung 225  
Winkelgeschwindigkeit 225  
Wirbelstrombremsen 166  
Wirkleistung 23, 197

Wirkungsgrad 35, 42  
Wurzel-3-Schaltung 254

**Z**

Zentralkompensation 203  
Zuordnungsart 1 193  
Zuordnungsart 2 193  
Zuordnungsarten 138  
Zusätzlicher Schutz 327  
Zustandsanalyse 135  
Zwischenkreis 270  
Zwischenkreisdrosseln 324  
Zwischenkreisumrichter 269