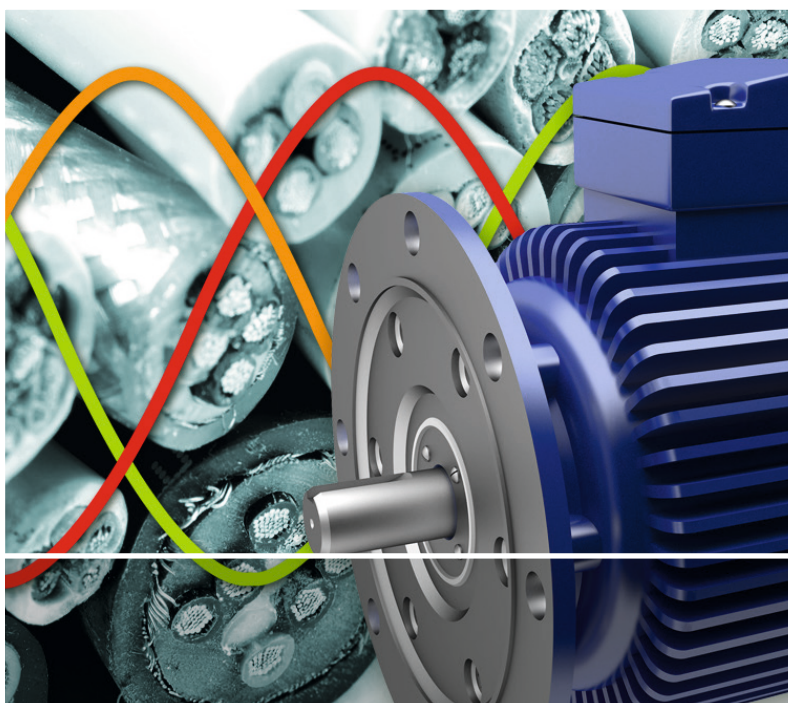


Josef Uphaus

Grundlagen der Drehstrom-Antriebstechnik

Betriebsverhalten, Auslegung und EMV-gerechte
Antriebsprojektierung von Asynchronmotoren



HANSER



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Josef Uphaus

Grundlagen der Drehstrom- Antriebstechnik

Betriebsverhalten, Auslegung und EMV-gerechte
Antriebsprojektierung von Asynchronmotoren

Mit 343 Bildern, 53 Tabellen und 146 Aufgaben



Fachbuchverlag Leipzig
im Carl Hanser Verlag

Dipl.-Ing. (FH) Josef Uphaus
Hans-Böckler-Berufskolleg, Münster



Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen, Verfahren und Darstellungen wurden nach bestem Wissen erstellt und mit Sorgfalt getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieses Programm-Materials oder Teilen davon entsteht.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN: 978-3-446-45495-8
E-Book-ISBN: 978-3-446-45697-6

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2019 Carl Hanser Verlag München
Internet: www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Manuel Leppert, M. A.
Satz und Herstellung: le-tex publishing services GmbH
Coverconcept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München
Coverrealisierung: Stephan Rönigk
Druck und Bindung: Pustet, Regensburg
Printed in Germany

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 Kenndaten 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

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

1	Dreiphasenwechselspannung und -strom	13
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
2	Drehstrom-Asynchronmotor	39
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

3 Projektierung des Motorabgangs **135**

3.1	Motorschutz	135
3.1.1	Überlastschutz	136
3.1.2	Thermisches Überlastrelais (Motorschutzrelais)	142
3.1.3	Motorschutzscharter	144
3.1.4	Elektronisches Überlastrelais	149
3.1.5	Thermistorschutz (Motor-Vollschutz)	152
3.1.6	Motorschutz- und Schütz-Dimensionierung (Y- Δ -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
4 Auslegung nach Mechanik	213
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
5	Softstarter	247
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
6	Frequenzumrichter	265
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
7	EMV – Elektromagnetische Verträglichkeit	289
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
8	Komplexaufgaben	343
A	Anhang	349
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	Motorschutzscharter	353
A.5	Kompensationstabelle	355
A.6	Sanftstarter	357
A.7	Frequenzumrichter	358
	Bildquellen	359
	Literatur und Tools	361
	Index	365

1

Dreiphasenwechselspannung 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 unsymmetrischen 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° 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° aufweisen.

Die Dreiphasenwechselspannung 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.

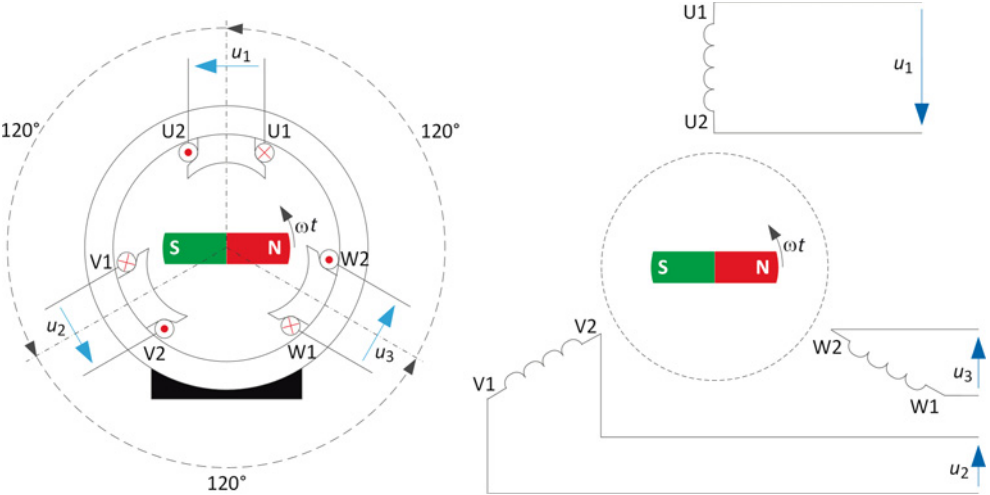


Bild 1.1 2-poliger Generator (links) und Schaltbild (rechts)

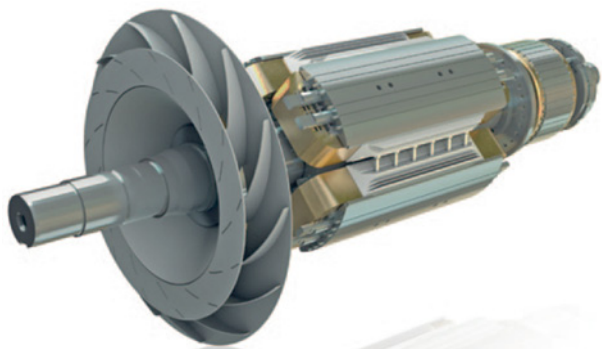


Bild 1.2 4-poliger Rotor/Läufer eines Drehstrom-Synchrongenerators (© ABB AG, 2018)

Zeigerbild und Liniendiagramm

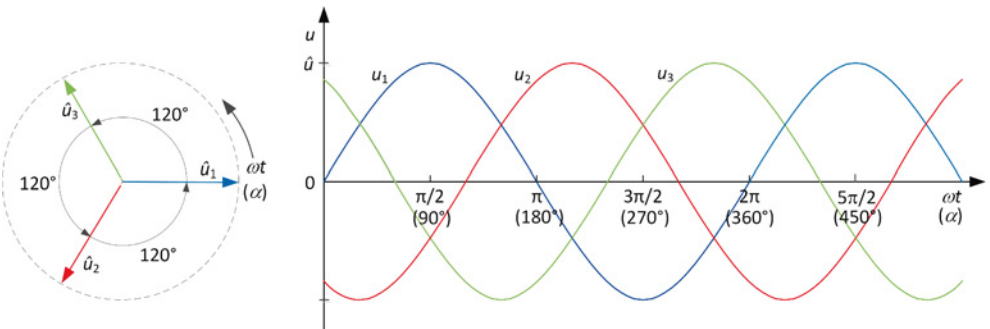


Bild 1.3 Zeigerbild (links) und Liniendiagramm (rechts)

Momentanwertgleichung (Sinusform)

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

Für die Sinusform gilt:

$$\hat{u} = \sqrt{2} \cdot U \quad (1.2)$$

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

U – Effektivwert (quadratischer Mittelwert)

Damit gilt:

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

Komplexe Schreibweise (Vektorform)

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



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° nach und
- die Phase W eilt der Phase V um 120° 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** (Δ -Schaltung) vor.

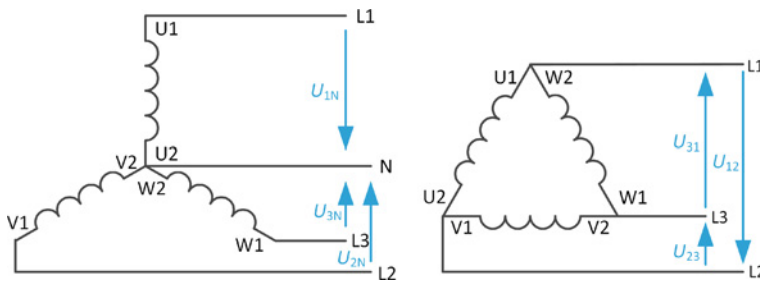


Bild 1.5 Sternschaltung (links) und Dreieckschaltung (rechts)

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 U1N oder zwischen den Außenleitern L1 und L2 U12.

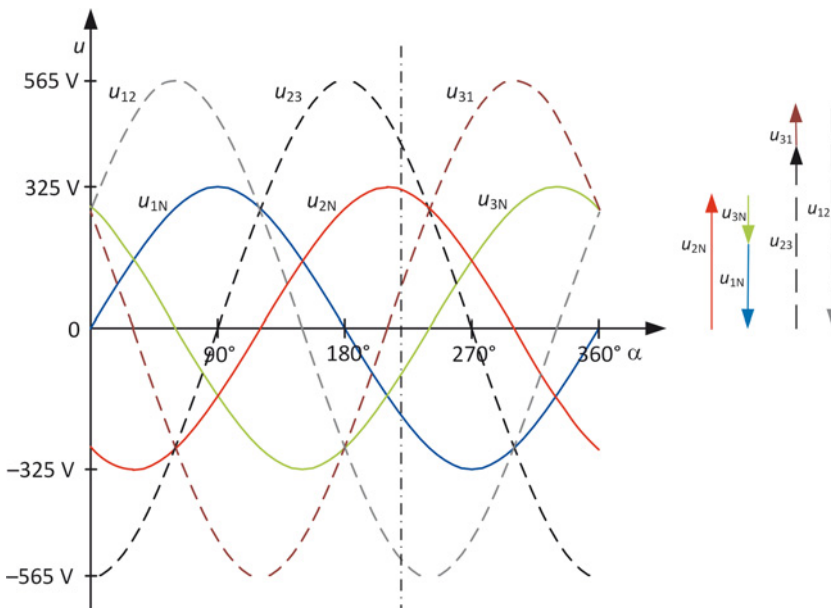
Tabelle 1.1 Leiter- und Spannungsbezeichnungen

Bezeichnungen	Erläuterungen
L1 L2 L3: Außenleiter	- alte Bezeichnung: R – S – T - am Betriebsmittel allgemein: U – V – W - Farbkennzeichnung: grau – schwarz – braun
N: Neutraleiter	- auch Sternpunkt- oder Mittelleiter (früher: MP) - Farbkennzeichnung: hellblau
U_{12} U_{23} U_{31} : Außenleiterspannung	Leiterspannung oder Dreiecksspannung zwischen zwei Außenleitern mit zeitlich aufeinanderfolgenden Phasen (Dreiecksspannungen)
U_{1N} U_{2N} U_{3N} : Sternspannung	Spannung zwischen einem Außenleiter und dem Sternpunktleiter
U_{UV} U_{VW} U_{WU} : Strangspannung	Spannung zwischen den beiden Enden eines Strangs

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:

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

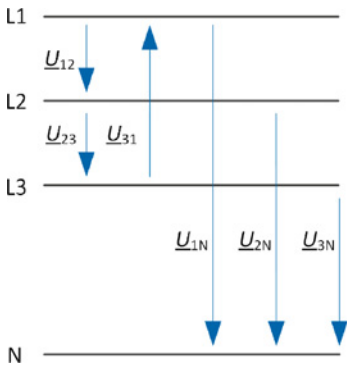


Bild 1.7 Leiterspannungen im 4-Leiter-System

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

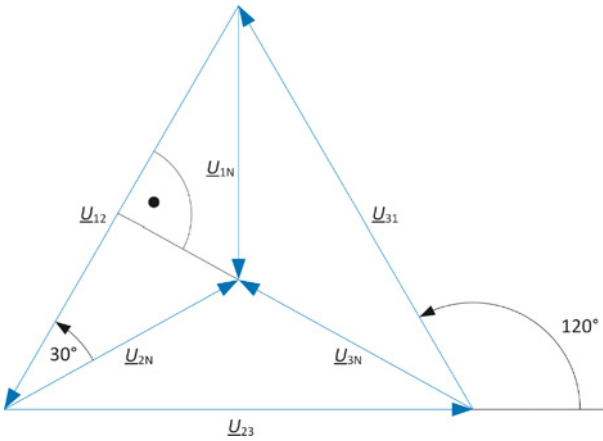


Bild 1.8 Verkettung

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.

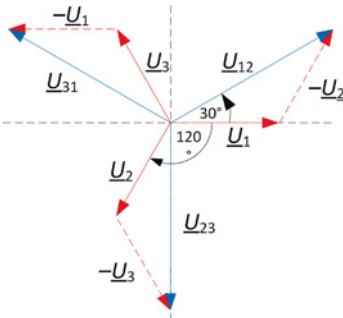


Bild 1.9 Spannungszeigerbild des 4-Leiter-Systems

■ 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).

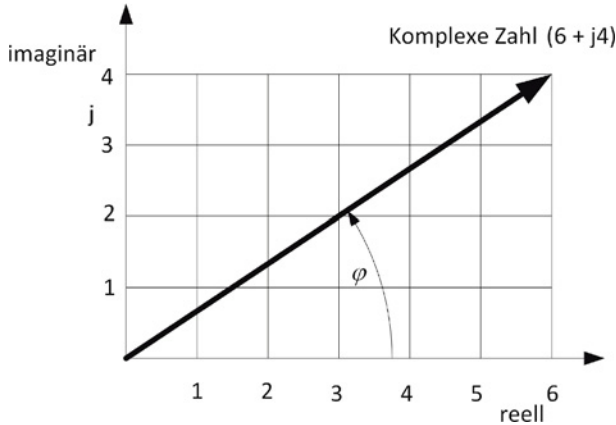


Bild 1.10 Komplexe Ebene

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:

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

φ – 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 :

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

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 φ (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:

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

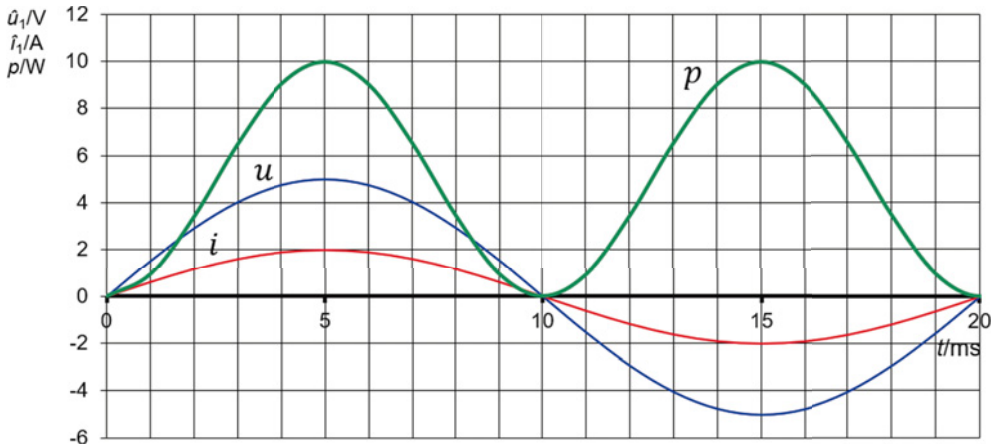


Bild 1.11 Leistungsverlauf bei einer Phasenverschiebung $\varphi = 0^\circ$

In dem Ausdruck der Gleichung (1.29) sind zwei Komponenten enthalten:

- eine zeitunabhängige Komponente mit $\frac{\hat{u} \cdot \hat{i}}{2} \cos \varphi$ und
- eine zeitliche mit doppelter Frequenz $\frac{\hat{u} \cdot \hat{i}}{2} \cos(2\omega t - \varphi)$.

Die erste zeitunabhängige Komponente beinhaltet die **Wirkleistung** P mit der Einheit Watt (Einheitenzeichen: W). Die Wirkleistung ist stets positiv und oszilliert um den Mittelwert (Bild 1.11).

$$[P] = \text{W} \quad (1.30)$$

Die zweite zeitabhängige Komponente, die mit doppelter Frequenz ($2\omega t$) oszilliert, beinhaltet die **Scheinleistung** S mit der Einheit Voltampere (Einheitenzeichen: VA).

$$[S] = \text{VA} \quad (1.31)$$

Ohmscher Widerstand

Für den ohmschen Widerstand mit der Phasenverschiebung $\varphi = 0$ zwischen Spannung und Strom (Bild 1.11) gilt:

$$\begin{aligned} P &= \frac{\hat{u}_R \cdot \hat{i}_R}{2} \\ P &= U_R \cdot I_R \\ \underline{P} &= P \end{aligned} \quad (1.32)$$

Ideale Spule

Für die ideale Spule mit der Phasenverschiebung $\varphi = 90^\circ$ zwischen Spannung und Strom (Strom eilt nach) gilt für die Leistung:

$$p(t) = \frac{\hat{u}_L \cdot \hat{i}_L}{2} (\cos(90^\circ) - \cos(2\omega t - (-90^\circ))) \quad (1.33)$$

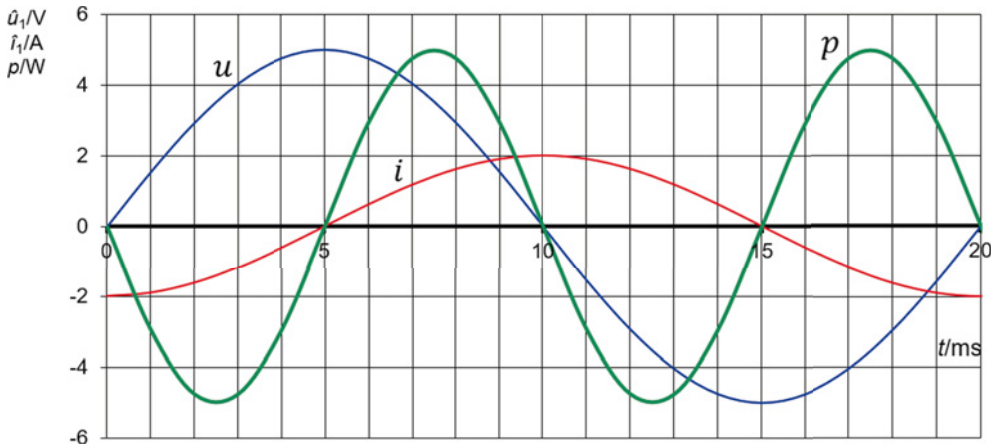


Bild 1.12 Leistungsverlauf bei einer Phasenverschiebung $\varphi = 90^\circ$

Mit $\cos(-90^\circ) = 0$ hat die Leistung die doppelte Frequenz, oszilliert um die Nulllinie, d. h., sie ist abwechselnd positiv und die Spule nimmt elektrische Energie auf und sie ist negativ und gibt elektrische Energie wieder zurück. Die mittlere Leistung (Wirkleistung) ist daher null (Bild 1.12).

Diese zwischen Energiequelle und Betriebsmittel hin- und herpendelnde Leistung wird als **Blindleistung** Q bezeichnet und mit der Einheit Var (Einheitenzeichen: var) angegeben (von „voltampère réactif“).

$$[Q] = \text{var} \quad (1.34)$$

Für die induktive Blindleistung gilt:

$$\begin{aligned} Q_L &= \frac{\hat{u}_L \cdot \hat{i}_L}{2} \\ Q_L &= U_L \cdot I_L \\ \underline{Q}_L &= U \cdot I \sin \varphi \\ \underline{Q}_L &= +jQ_L \end{aligned} \quad (1.35)$$

Idealer Kondensator

Für den idealen Kondensator mit $\varphi = +90^\circ$ Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom (Strom eilt vor) gilt für die Leistung:

$$p(t) = \frac{\hat{u}_C \cdot \hat{i}_C}{2} (\cos(-90^\circ) - \cos(2\omega t - (+90^\circ))) \quad (1.36)$$

Die Leistung pendelt auch beim idealen Kondensator zwischen Erzeuger und Verbraucher hin und her, hat gegenüber der idealen Spule lediglich eine um 180° verschobene Phasenlage.

Für die kapazitive Blindleistung gilt:

$$\begin{aligned}
 Q_C &= \frac{\hat{u}_C \cdot \hat{i}_C}{2} \\
 Q_C &= U_C \cdot I_C \\
 \underline{Q}_C &= U \cdot I \sin \varphi \\
 \underline{Q}_C &= -jQ_C
 \end{aligned}
 \tag{1.37}$$

Ohmsch-induktive oder ohmsch-kapazitive Betriebsmittel

Beträgt die Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom weder 0 noch $\pm 90^\circ$, so tritt neben der Wirkleistung P auch eine Blindleistung Q auf (Bild 1.13). Sie bilden gemeinsam die Scheinleistung S .

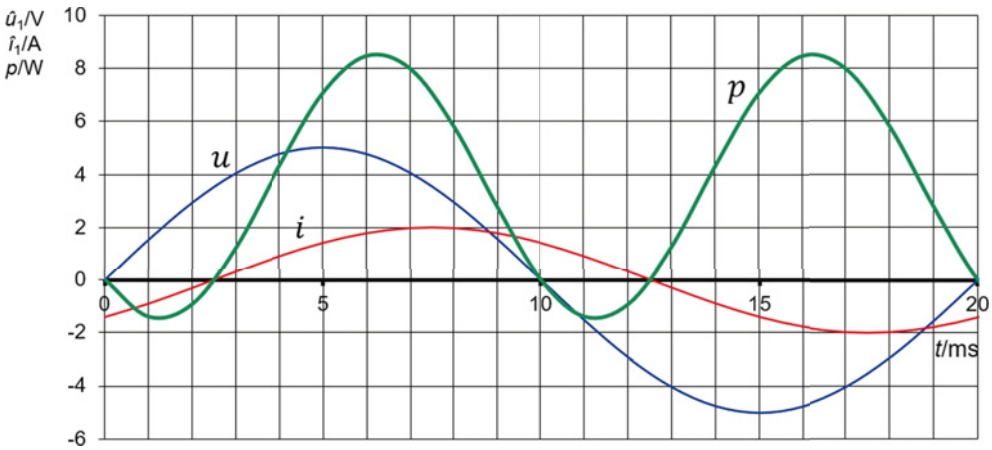


Bild 1.13 Leistungsverlauf bei einer Phasenverschiebung $\varphi = -45^\circ$

In der Elektrotechnik können die Leistungen auf zweierlei Art dargestellt und beschrieben werden, in der

- Betragsform oder
- Komplexform.

Die Betragsform oder reellwertige Scheinleistung ist der Betrag der komplexen Scheinleistung und ergibt sich als Produkt der Effektivwerte von Spannung und Strom:

$$S = U \cdot I \tag{1.38}$$

Die Scheinleistung kann über die Blindleistung und Wirkleistung (Bild 1.14) geometrisch ermittelt werden.

Das Leistungsdreieck zeigt den Zusammenhang zwischen **Scheinleistung**, **Blindleistung** und **Wirkleistung**.

$$S^2 = P^2 + Q^2 \tag{1.39}$$

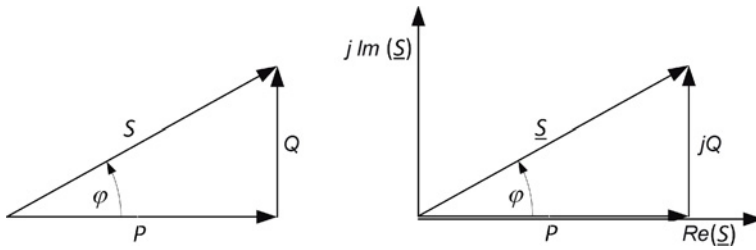


Bild 1.14 Leistungsdreieck in der Betragsform (links) und der Komplexform (rechts)

Alle drei Leistungskennwerte stehen über den **Leistungsfaktor $\cos \varphi$** miteinander in Zusammenhang.

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (1.40)$$

Der **Leistungsfaktor $\cos \varphi$** beschreibt, welcher Anteil der Gesamt- oder Scheinleistung in Wirkleistung umgesetzt wird und ist daher eine aussagekräftige Größe für die Effektivität oder Wirtschaftlichkeit von Betriebsmitteln, wie elektrischen Maschinen. Aus diesem Grunde wird er z. B. auch auf dem Leistungsschild elektrischer Maschinen angegeben. Da zu einem späteren Zeitpunkt nochmals vom Leistungsfaktor gesprochen wird, soll hier schon der Hinweis erfolgen, dass es sich beim $\cos \varphi$ genau genommen „nur“ um den **Verschiebungsfaktor** handelt, der sich aus der Phasenverschiebung von Spannung und Strom bei reiner Sinusform ergibt.

Der Gesamtleistungsfaktor oder kollektive Leistungsfaktor (DIN 40110-2) ist definiert als:

$$\lambda = \frac{|P|}{S} \quad (1.41)$$

Die komplexe Scheinleistung wird über den komplexen Effektivwert der Spannung und den komplexen Effektivwert des Stroms berechnet.

In der komplexen Darstellung gilt für die Scheinleistung S :

$$\underline{S} = P + jQ \quad \underline{S} = \underline{U} \cdot \underline{I}^* \quad \underline{S} = \frac{\hat{u} \cdot \hat{i}^*}{2} \quad \underline{S} = S \cdot e^{j\varphi} \quad (1.42)$$

Sie berechnet sich aus dem Produkt des komplexen Effektivwertes der Spannung mit dem konjugiert komplexen Effektivwert der Stromstärke (I^*). Dadurch ist der Nullphasenwinkel von Spannung und Strom ohne Bedeutung, es wird nur die Phasenverschiebung zwischen den beiden Größen berücksichtigt.

$$\underline{u} \cdot \underline{i}^* = \hat{u} \cdot e^{j\omega t} \cdot \hat{i} e^{-j(\omega t + \varphi)} \quad \underline{u} \cdot \underline{i}^* = \hat{u} \cdot \hat{i} (\cos \varphi - j \sin \varphi) \quad (1.43)$$

Der Betrag der komplexen Scheinleistung S ist die quadratische Summe aus Wirk- und Blindleistung:

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (1.44)$$

Die Wirkleistung P ist der Realteil, die Blindleistung Q der Imaginärteil der komplexen Scheinleistung.

■ 1.5 Symmetrische Belastung im Dreiphasen-System

Eine symmetrische Belastung liegt immer dann vor, wenn die am Dreiphasen-Wechselspannungssystem angeschlossenen Betriebsmittel gleiche Impedanzen oder Wechselstromwiderstände aufweisen, also Leiterströme bewirken, die gleiche Beträge haben ($I_1 = I_2 = I_3$) und gleiche Phasenverschiebungen zu der jeweils zugehörigen Stern- oder Leiterspannung aufweisen.

Symmetrisch belastete Dreieckschaltung

Die folgenden Angaben und Berechnungen beziehen sich auf die Größen der in Bild 1.15 dargestellten Dreieckschaltung.

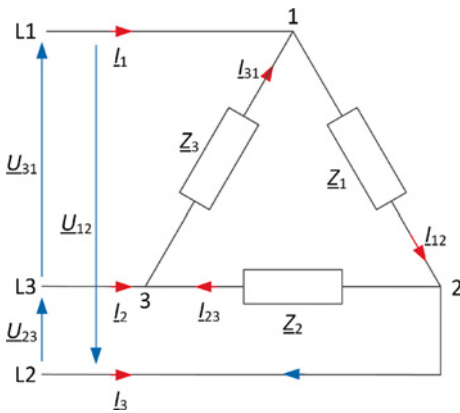


Bild 1.15 Betriebsmittel in Dreieckschaltung

Spannungsverhalten

Für die Spannungen an den Betriebsmitteln gilt:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{Z1} &= \underline{U}_{12} \\ \underline{U}_{Z2} &= \underline{U}_{23} \\ \underline{U}_{Z3} &= \underline{U}_{31} \end{aligned} \quad (1.45)$$

Oder allgemein:

$$\underline{U} = U_{\text{Str}} \quad (1.46)$$

Stromverhalten

Bei symmetrischer Belastung gilt:

$$\sum \underline{I} = 0 \quad (1.47)$$

Mit den Angaben der Betriebsmittelimpedanzen Z können die Leiterströme aus den Strangströmen berechnet werden:

$$\begin{aligned} I_{12} &= \frac{U_{12}}{Z_1} \\ I_{23} &= \frac{U_{23}}{Z_2} \\ I_{31} &= \frac{U_{31}}{Z_3} \end{aligned} \quad (1.48)$$

Dadurch, dass in den komplexen Größen für Strom $\underline{I}$ und Spannung $\underline{U}$ neben dem Betrag auch immer die Phasenlage beinhaltet ist, können mit der komplexen Rechnung die Spannungen und Ströme summiert oder subtrahiert werden, wie dies die Gesetzmäßigkeiten z. B. bei der Maschen- oder Knotenregel erfordern.

Für die einzelnen Knotenpunkte gilt:

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 &= \underline{I}_{12} - \underline{I}_{31} \\ \underline{I}_2 &= \underline{I}_{23} - \underline{I}_{12} \\ \underline{I}_3 &= \underline{I}_{31} - \underline{I}_{23} \end{aligned} \quad (1.49)$$

Bezogen auf den Knotenpunkt 1 (Bild 1.15) gilt:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{12} - \underline{I}_{31} \quad (1.50)$$

Oder betragsmäßig (Bild 1.16):

$$\begin{aligned} I_1 &= I_{12} \cdot \cos 30^\circ + I_{31} \cdot \cos 30^\circ \\ I_1 &= 2 \cdot I_{12} \cdot \cos 30^\circ \quad \text{mit} \quad \cos 30^\circ = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{3} \\ I_1 &= \sqrt{3} \cdot I_{12} \end{aligned} \quad (1.51)$$

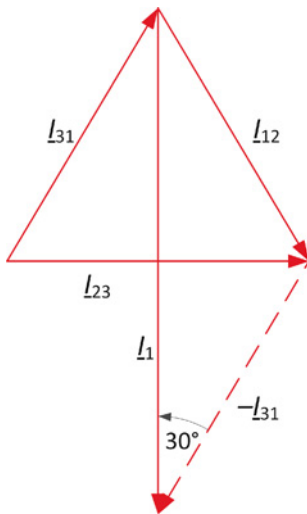


Bild 1.16 Leiterstrom I_1 zeichnerisch

Bei symmetrischer Belastung gilt für die Dreieckschaltung allgemein:

$$I = \sqrt{3} \cdot I_{\text{Str}} \quad (1.52)$$

Leistungsverhalten

Bei symmetrischer Belastung gilt:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_2 = I_3 \\ U_{12} &= U_{23} = U_{31} = U \\ \varphi_1 &= \varphi_2 = \varphi_3 \end{aligned} \quad (1.53)$$

Für die Scheinleistung bei symmetrischer Dreiecksbelastung gilt:

$$S = 3 \cdot U_{\text{Str}} \cdot I_{\text{Str}} \quad (1.54)$$

Mit

$$\begin{aligned} U_{\text{Str}} &= U \\ I &= \sqrt{3} \cdot I_{\text{Str}} \end{aligned} \quad (1.55)$$

gilt

$$S = 3 \cdot U_{\text{Str}} \cdot I_{\text{Str}} \quad (1.56)$$

oder

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \quad (1.57)$$

In komplexer Darstellung ist:

$$\underline{S} = P + jQ \quad (1.58)$$

Für die **Wirkleistung** gilt:

$$P = S \cdot \cos \varphi \quad (1.59)$$

oder

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (1.60)$$

Bei symmetrischer Belastung in Dreieckschaltung entspricht die Gesamtwirkleistung der drei Stränge einer zeitlich konstanten Wirkleistung, die bei Drehstrommaschinen wiederum ein zeitlich konstantes Drehmoment bewirkt.

Für die **Blindleistung** gilt:

$$Q = S \cdot \sin \varphi \quad (1.61)$$

oder

$$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (1.62)$$