

6.3 Elektromagnetische Schalter

Elektromagnetische Schalter sind Relais und Schütze. Schaltungen mit Relais oder Schützen bestehen immer aus einem **Steuerstromkreis** und einem **Hauptstromkreis** (Arbeitsstromkreis). Der Steuerstromkreis und der Hauptstromkreis (**Bild 1**) sind elektrisch getrennt (galvanische Trennung).

Elektromagnetische Schalter schalten mit einem kleinen Steuerstrom einen großen Laststrom.

Relais setzt man vorwiegend zur Steuerung und Kontaktvervielfachung im Bereich der Kommunikationstechnik ein. Schütze eignen sich zum Schalten von Leistungen von etwa 2 bis 500 kW.

Kontaktarten. Relais haben meist einfach unterbrechende Federkontakte (**Bild 2a**). Schütze haben doppelt unterbrechende Kontakte (**Bild 2b**).

Kontakte (Tabelle) können ausgeführt sein als:

- Schließer (Arbeitskontakte),
- Öffner (Ruhekontakte),
- Wechsler (Umschaltkontakte),
- Folgewechsler (unterbrechungsfreie Umschaltkontakte).

Ein Schließer schließt den Stromkreis, ein Öffner unterbricht den Stromkreis.

Relais und Schütze sind im Aufbau ähnlich. Sie bestehen aus einer Erregerspule mit Eisenkern, dem beweglichen Anker und einem oder mehreren Kontakten (**Bild 3**). Wird die Erregerspule vom Strom durchflossen, zieht der Anker an und betätigt mechanisch die angebauten Schaltkontakte.

Versuch: Legen Sie die Spule eines 24-V-Wechselstromrelais an 24 V Wechselspannung und messen Sie den Bemessungsstrom. Wiederholen Sie die Messung mit einer einstellbaren Gleichspannung. Erhöhen Sie die Gleichspannung, bis sich der Bemessungsstrom der Spule einstellt.

Bei der Wechselspannung AC 24 V fließt der Bemessungsstrom.

Bereits bei einer Gleichspannung von etwa DC 3 V fließt in der Spule der Bemessungsstrom des 24-V-Wechselstromrelais.

Beim Anlegen des Wechselstromrelais an 24 V Gleichspannung wird die Relaispule zerstört, da bei Gleichstrom nur der geringe ohmsche Wicklungswiderstand der Relaispule den Strom begrenzt. Betreibt man aber irrtümlich ein Gleichstromrelais an Wechselspannung, kann der zum Schalten notwendige Spulenstrom nicht fließen.

Relais und Schütze müssen nach Spulenspannung, Stromart und nach ihrer Schaltleistung ausgewählt werden.

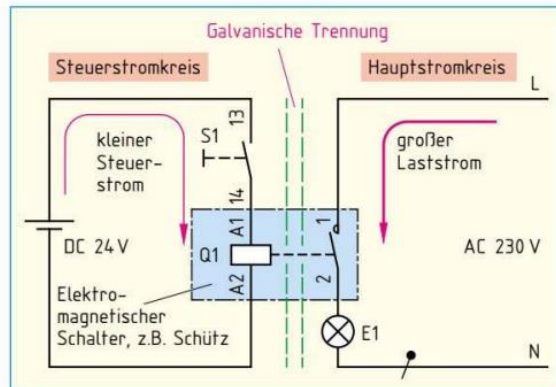


Bild 1: Stromkreise bei elektromagnetischen Schaltern

i Nach der Norm DIN EN 81346-2 werden Leistungsschütze mit Q (früher: K) gekennzeichnet. Relais und Hilfsschütze haben die Kennzeichnung K.

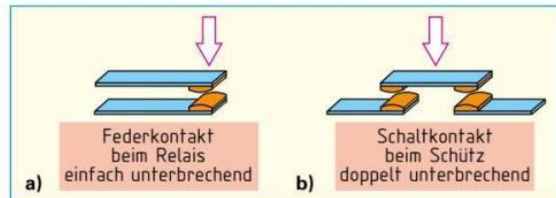


Bild 2: Schaltkontakte bei Relais und Schütz

Tabelle: Ausführungen von Kontakten (Beispiele)		
Bezeichnung	Schaltzeichen	Kontaktbild
Schließer NO (Normally Open)		
Öffner NC (Normally Closed)		
Wechsler		
Folgewechsler		

* ↓ Bewegungsrichtung (Kraftwirkung) bei Betätigung

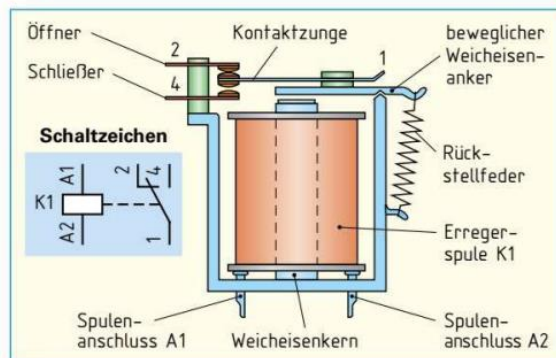


Bild 3: Relaisaufbau

6.3.1 Relais

Relais (Bild 1 und Übersicht) sind elektromagnetische Schalter. Sie haben gegenüber Schützen meist eine geringe Schaltleistung.

Abhängig von Kontaktausführung und Kontaktwerkstoff (Seite 606) können Relais bei **Spannungen bis 250 V Ströme bis etwa 10 A** schalten. Relais werden für Gleich- oder Wechselstrom und für **Spulenspannungen von 1,5 V bis 230 V** hergestellt. Man setzt z.B. Relais meist im Bereich der Kommunikationstechnik oder zur galvanischen Trennung (Potenzialtrennung) zwischen elektronischen Steuerungen und dem Leistungsteil (Netzseite) ein.

Bauarten von Relais. Relais mit Federkontaktsätzen werden meist als **Kammrelais (Bild 1)** oder als **Rundrelais** hergestellt.

Typische Schaltzeiten von Kamm- und Rundrelais sind:

- **Ansprechzeit** (Einschaltzeit): 10 ms
- **Rückstellzeit** (Abschaltzeit): 3 ms

Relais fallen nach dem Abschalten des Erregerstromes durch Federkraft selbstständig in ihre Ruhestellung zurück.

Den zum Ansteuern (Anziehen) erforderlichen Spulenstrom berechnet man bei Relais aus den Werten von **Spulenwiderstand** und **Spulenspannung**.

Bistabile Relais behalten durch den Restmagnetismus (Remanenz) des Eisenkernes nach einem Ansteuerimpuls ihren Schaltzustand bei. Sie werden grundsätzlich mit Gleichspannung betrieben. Bei bistabilen Relais mit nur einer Spule bewirken Impulse mit entgegengesetzter Polarität eine Umschaltung. Relais mit zwei getrennten Spulen haben meist einen gemeinsamen Spulenanschluss und jeweils einen Anschluss zum Setzen bzw. Rücksetzen (Bild 2). Bistabile Relais verwendet man z.B. zur Steuerung in Tonfrequenz-Rundsteueranlagen.

Relais kehren nach der Unterbrechung des Spulenstromes selbstständig in ihre Ruhelage zurück.
Bistabile Relais behalten ihren Schaltzustand bei.

Reedrelais¹ haben Kontaktzungen aus einer Nickel-Eisen-Legierung, die zum Schutz gegen Verunreinigungen und Korrosion in einem mit Schutzgas gefüllten Glasröhrchen eingeschmolzen sind (Bild 3). Bei Magnetisierung, z. B. durch eine Spule, bilden sich an den Kontaktzungen ungleiche Magnetpole, die ein Schließen oder Öffnen des Kontaktes bewirken. Reedrelais haben Schaltleistungen bis etwa 10 W.

Maßnahmen zur Begrenzung der Induktionsspannungen. Beim Schalten von induktiven Verbrauchern, z.B. von Spulen, entstehen Induktionsspannungen (Seite 97), die zu Kontaktabbrand führen, aber auch elektronische Bauelemente, z. B. Transistoren, schädigen können. Deshalb sind Schutzbeschaltungen (Bild 4) notwendig.

Schutzbeschaltung gegen Induktionsspannungen (Bild 4):

- In Gleichstromkreisen: Freilaufdioden oder Varistoren,
- in Wechselstromkreisen: Varistoren oder RC-Schaltungen.

Übersicht: Relaisarten (Auswahl)

- Kammrelais
- Bistabile Relais
- Reedrelais
- Relais mit mechanischer Verklüftung
 - Stromstoßschalter (Seite 106)
 - Zeitrelais (Seite 112)

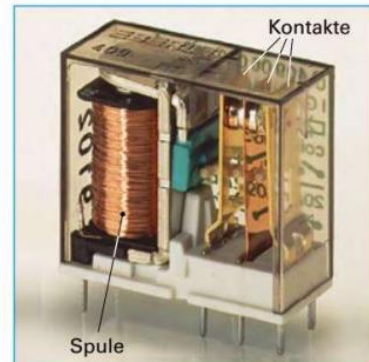


Bild 1: Kammrelais

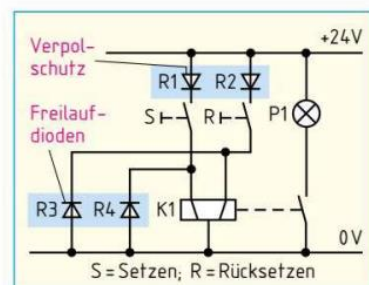


Bild 2: Bistabiles Relais

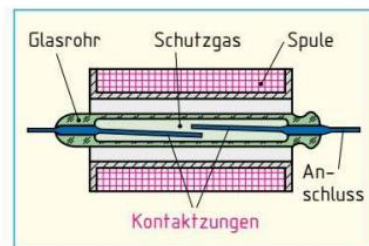


Bild 3: Reedrelais

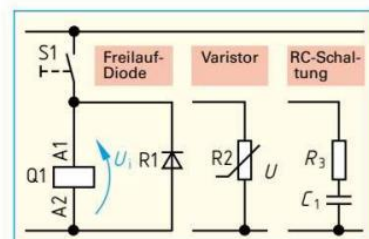


Bild 4: Begrenzung der Induktionsspannung

¹ von reed (engl.) = Schilfröhr, Blättchen, Zunge

Relaisschaltungen bestehen aus dem **Steuerstromkreis** und dem **Hauptstromkreis**. Die Energieversorgung des Steuerstromkreises und des Hauptstromkreises kann dabei wahlweise aus demselben Netz (**Bild 1a**) oder aus zwei voneinander getrennten Netzen (**galvanische Trennung, Bild 1b**) erfolgen.

Durch die elektrische Trennung zwischen Steuerstromkreis und Hauptstromkreis eignen sich Relais auch als Schnittstelle zwischen Steuerschaltungen der Kommunikationstechnik und dem Energieversorgungsnetz, z. B. bei der Steuerung von Verbrauchern in Schaltungen der Digitaltechnik (**Bild 1b**) oder bei programmierbaren Kleinststeuergeräten (**Seite 552**).

Relais können mit kleinen Steuerströmen große Lastströme schalten.

Beispiel: Relaisschaltung einer Alarmanlage. Einfache Alarmanlagen können mit Relais aufgebaut sein (**Bild 2**). Aus Sicherheitsgründen versorgt man den Alarmstromkreis nicht aus dem Netz, sondern durch eine netzunabhängige Stromquelle, z. B. einen Akkumulator. Damit ist die Hupe P2 unabhängig vom Stromversorgungsnetz. Der zweipolige Hauptschalter Q1 ist zugleich Kontrollschalter zur Überprüfung des Alarmstromkreises. Nach Betätigen von Schalter Q1 ertönt die Hupe P2.

Durch Betätigen des Tasters S1 zieht das Relais K1 an und hält sich über den Selbsthaltekontakt K1 an Spannung. Ein Öffner von K1 unterbricht den Alarmstromkreis, ein Schließer schaltet die Meldeleuchte P1 ein und zeigt die Betriebsbereitschaft an. Unterbricht einer der **Sensoren B1** oder **B2** die **Sicherheitschleife**, z. B. durch ein geöffnetes Fenster, fällt das Relais K1 ab. Der Alarmstromkreis wird geschlossen, die Hupe P2 ertönt und die Meldeleuchte P1 wird abgeschaltet.

Gefahrenmeldeanlagen: **Seite 448**

Zeitrelais. In der Steuerungstechnik sind viele Steuerungen zeitgeführt, z. B. **Seite 118**. In Steuerungen verwendet man hauptsächlich die Ansprechverzögerung oder die Rückfallverzögerung (**Bild 3** und **Bild 4**). Die Verzögerungszeit lässt sich am Zeitrelais in Bereichen, z. B. von 0,1 s bis 2 s oder 1 h bis 24 h, stufenlos durch ein Potenziometer oder stufig durch Wahlschalter einstellen.

Multifunktionszeitrelais sind vielseitig einsetzbar, weil man die Verzögerungszeit und die Art der Verzögerung einstellen kann. Sie enthalten meist neben der Ansprech- und der Rückfallverzögerung (**Bild 3**) eine Kombination aus Ansprech- und Rückfallverzögerung und zusätzlich die Funktionen Blinken, Einschaltwischimpuls und Ausschaltwischimpuls.

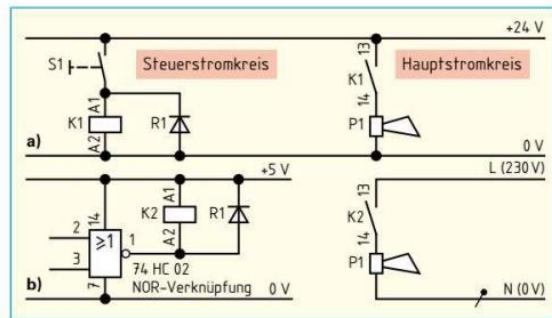


Bild 1: Relaisschaltung, Steuerstromkreis und Hauptstromkreis a) gemeinsam und b) getrennt

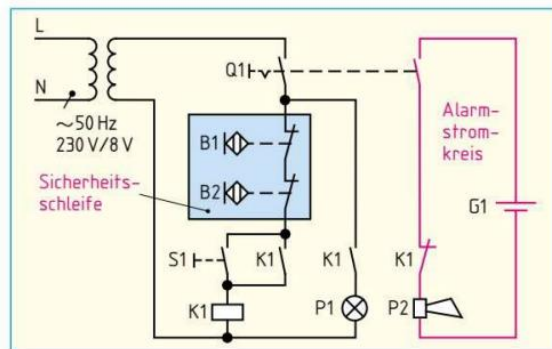


Bild 2: Prinzip einer einfachen Alarmanlage

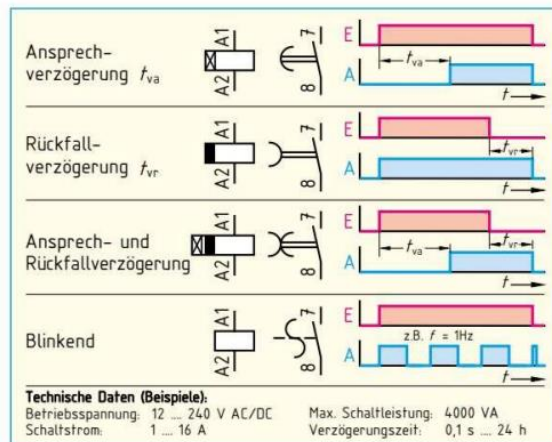


Bild 3: Zeitrelais, Schaltzeichen und Zeitablaufdiagramm

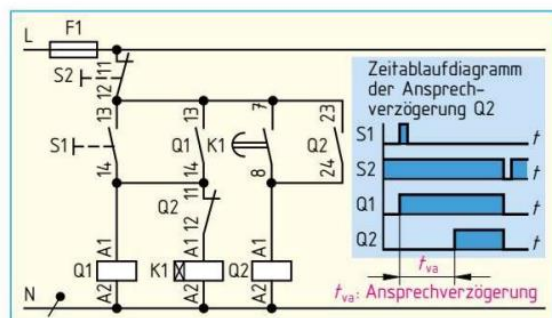


Bild 4: Steuerstromkreis einer Ansprechverzögerung

6.3.2 Schütze

Schütze sind elektromagnetische Schalter. Sie werden in Leistungsschütze und in Hilfs- oder Steuerschütze unterteilt.

Leistungsschütze (Schaltschütz, Bild 1) haben meist drei Hauptstromkontakte und können zusätzlich mit Steuerkontakten ausgerüstet sein.

Hauptstromkontakte schalten die Außenleiter an den Verbraucher, z.B. an Speicherheizgeräte oder Motoren. Sie sind in getrennten Schaltkammern angeordnet und bei größerer Schaltleistung mit Lichtbogen-Löscheinrichtungen ausgestattet.

Steuerkontakte werden nur zum Steuern oder Mel-den verwendet. Sie haben keine Lichtbogen-Löscheinrichtung.

Steuerkontakte dürfen nicht als Hauptstromkontakte verwendet werden.

Hilfsschütze verwendet man vor allem für Steuer- und Regelungsaufgaben in Befehls-, Melde- und Verriegelungsstromkreisen.

Kontaktbezeichnung. Hauptstromkontakte sind mit einstelligen Zahlen bezeichnet (**Bild 2**). Die Klemmen mit ungeraden Zahlen, also 1/L1, 3/L2 und 5/L3, führen zum Netz, an den Klemmen mit den geraden Zahlen 2/T1, 4/T2 und 6/T3 liegt der Verbraucher. In Schaltplänen verzichtet man meist auf die Zusätze L1, L2 und L3 bzw. T1, T2 und T3. Steuerkontakte haben eine zweistellige Bezeichnung. An der ersten Stelle steht die **Ordnungsziffer** (Zählziffer), z.B. eine 1 beim Kontakt 13–14 in **Bild 2**.

Die **Funktionsziffern** der Kontakte stehen an zweiter Stelle (**Bild 2**) und bedeuten:

- 1–2 Steuerkontakt Öffner, z.B. Q1: 21–22
- 3–4 Steuerkontakt Schließer, z.B. Q1: 13–14

Kennzahlen, z.B. 22 (**Bild 2** und **Übersicht**) bei Schützen nennen die Art und Anzahl der Steuerkontakte. Die erste Ziffer gibt die Anzahl der Steuerkontakte Schließer, die zweite Ziffer die Anzahl der Öffner an.

Steuerspannung. Bevorzugte Steuerspannungen in Wechselstromkreisen sind 24 V, 48 V und 230 V. Eine Schützspule mit kleiner Steuerspannung, z.B. AC 24 V, nimmt einen größeren Spulenstrom auf als eine gleichartige Schützspule für AC 230 V. Deshalb betreibt man Steuerstromkreise meist an AC 230 V.

Gebrauchskategorie. Das Einsatzgebiet von Schützen wird durch die Stromart und die Art der zu schaltenden Last bestimmt und durch **Gebrauchskategorien** angegeben. Ein Schütz der Gebrauchskategorie AC 3 eignet sich z.B. zum Schalten von Kurzschlussläufermotoren (**Seite 487**), die Gebrauchskategorie DC 3 setzt man zum Schalten von z.B. fremderregten Gleichstrommotoren ein (siehe Tabellenbuch Elektrotechnik).

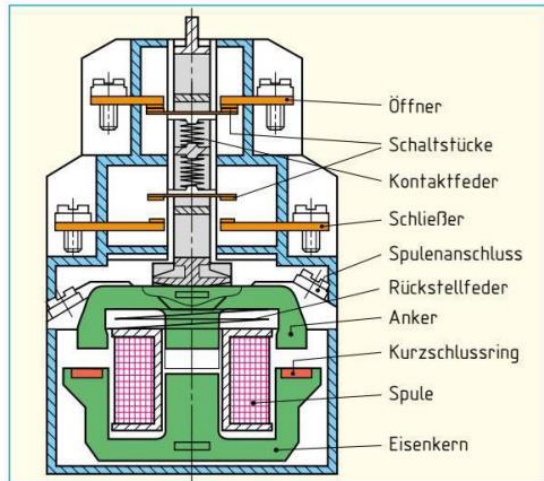


Bild 1: Aufbau eines Schaltschützes

- Kenndaten von Schaltschützen (Beispiel):**
- Ansprechzeit (Einschaltzeit): 20...40 ms
 - Rückfallzeit (Ausschaltzeit): 20...40 ms
 - Steuerspannung: DC 24...240 V, AC 110...120 V, AC 220...240 V
 - Schaltleistung: 3 kW...900 kW

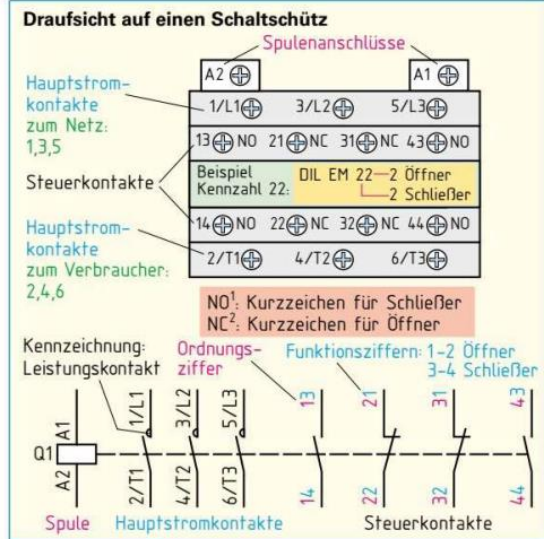


Bild 2: Kontaktbezeichnungen beim Schaltschütz

- Übersicht: Kennzahlen für Steuerkontakte bei Schaltschützen (Beispiele)**
- 01 kein Schließer, ein Öffner
 - 10 ein Schließer, kein Öffner
 - 31 drei Schließer, ein Öffner
 - 22 zwei Schließer, zwei Öffner

¹ NO, Abk. für: Normally Open (engl.) = normal geöffnet; ² NC, Abk. für: Normally Closed (engl.) = normal geschlossen

6.3.3 Schützsaltungen

Schützsaltungen mit Leistungsschützen (**Bild 1**) werden zum Schalten von Betriebsmitteln mit großen Leistungen, z. B. Antriebsmotoren oder Speicherheizungen, verwendet. Die häufigste Anwendung ist das Schalten von Drehstrommotoren (**Infokasten**).

Steuerstromkreise müssen nach DIN EN 60204-1 (VDE 0113-1) meist über Steuertransformatoren (**Bild, Seite 121**) betrieben werden. Die Leiter an der Ausgangsseite (Ausgangspotenziale) des Steuertransformators haben dann z. B. die Bezeichnung 1L1 und 1L2 (**Bild 3**).

Direkt am Netz dürfen nur Steuerstromkreise mit einem Motoranlasser, z. B. eine Kombination aus Schaltschütz und Überlastrelais, und höchstens zwei Steuergeräten betrieben werden, z. B. START-STOPP-Bedieneinheit (**Bild 2**).

Wichtige Schaltungen mit Schützen:

- Tippbetrieb (Bild b, Seite 116)
- Selbsthalteschaltung (Bild 2)
- Folgeschaltung (Bild 1, Seite 115)
- Wendeschützsaltung (Bild 3, Seite 115)
- Stern-Dreieck-Schützsaltung (Seite 116)
- Dahlanderschaltung (Seite 119)

Tippbetrieb

Im Tippbetrieb ist ein Schütz nur so lange in Betrieb, wie der Steuertaster betätigt ist.

Legt man über einen Steuertaster Spannung an die Schützspule, zieht das Schaltschütz an, und alle Schützkontakte ändern ihre Schaltstellung. Nach dem Abschalten der Steuerspannung kehren die Schützkontakte wieder in ihre Ruhelage zurück. Diese Betriebsart bezeichnet man als Tippbetrieb (**Bild b, Seite 116**). Der Tippbetrieb dient meist der Unfallsicherheit, z. B. bei Pressensteuerungen oder beim Einrichten von Werkzeugmaschinen.

Selbsthalteschaltung

Soll ein Schaltschütz nach kurzer Tasterbetätigung in der Einschaltstellung bleiben, schaltet man zum EIN-Taster einen Steuerkontakt (Schließer) parallel (**Bild 2** und **Bild 3**). Zieht das Schaltschütz nach der Betätigung des EIN-Tasters S2 an, überbrückt der Steuerkontakt Q1: 13-14 den EIN-Taster. Kehrt der Taster S2 wieder in seine Ruhelage zurück, hält sich das Schütz über den **Selbsthaltekontakt** (Kontakt Q1: 13-14) weiter (Selbsthaltung). Zum Abschalten unterbricht der in Reihe liegende AUS-Taster S1 den Steuerstromkreis (**Bild 2**) den Steuerstromkreis.

Selbsthaltekontakte sind Schließer und werden parallel zum EIN-Taster geschaltet.

Sind in einer Schützsaltung mehrere Schaltstellen notwendig, schaltet man die AUS-Taster in Reihe und alle EIN-Taster parallel (**Bild 3**).



Bild 1: Leistungsschütz mit drei Hauptstromkontakten und angebauten Hilfsschalterbausteinen

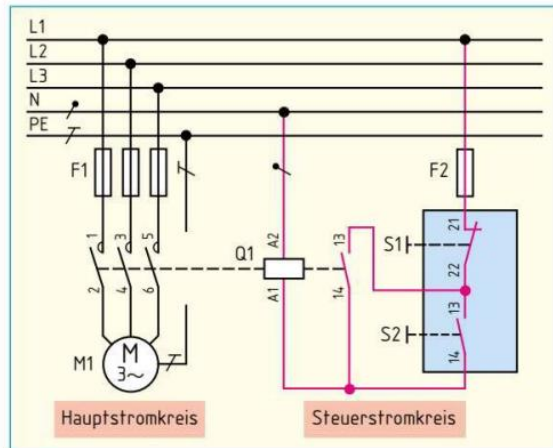
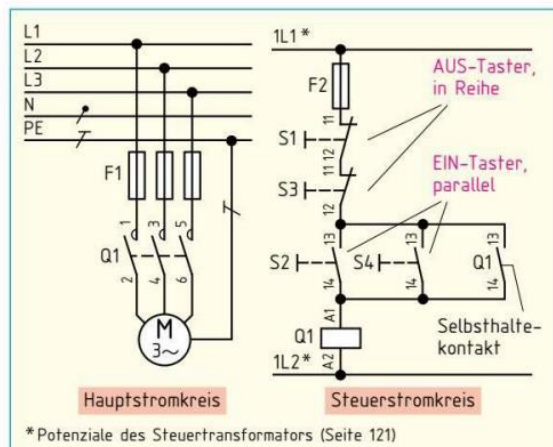


Bild 2: Schützsteuerung mit Selbsthaltung in zusammenhängender Darstellung



*Potenziale des Steuertransformators (Seite 121)

Bild 3: Schützsteuerung mit zwei Betätigungsstellen in aufgelöster Darstellung

In Schützschtaltungen werden alle AUS-Taster in Reihe geschaltet, die EIN-Taster parallel.

Von dieser Regel wird nur abgewichen, wenn Sicherheitsvorkehrungen dies erfordern.

Ein Steuerstromkreis mit zwei in Reihe geschalteten EIN-Tastern (Schließer) wirkt wie eine UND-Verknüpfung, mit zwei parallel geschalteten EIN-Tastern wie eine ODER-Verknüpfung.

Folgeschaltung

Eine Schützschtaltung, bei der ein Schütz erst dann einschalten kann, wenn ein anderes Schütz bereits eingeschaltet ist, bezeichnet man als Folgeschaltung.

Bei der Folgeschaltung, z.B. für eine Mischanlage (Bild 1), darf der Förderbandmotor M2 erst einschalten, wenn der Förderbandmotor M1 bereits in Betrieb ist. Damit steuert das Schütz Q1 (Mischer M1 in Bild 1a) die Funktion von Q2 (Förderband M2). Diese Funktion wird z.B. durch das ansprecherverzögernde Zeitrelais K3 in Bild 1b erreicht.

In Stromlaufplänen (Bild 1) sind die Strompfade zur besseren Übersicht mit einer Nummerierung (Seite 117) versehen.

Wendeschützschtaltung

Um die Drehrichtung von Drehstrommotoren zu ändern, verwendet man die Wendeschützschtaltung. Dazu müssen im Hauptstromkreis zwei Außenleiter, z.B. L1 und L3, vertauscht werden.

In Wendeschützschtaltungen, z.B. einer Torsteuerung (Bild 2), muss der gleichzeitige Betrieb beider Schütze (Bild 3) verhindert werden, da er zwei Außenleiter kurzschließt. Auch z.B. festgebrannte Kontakte können dazu führen, dass ein Schütz nicht abschaltet. Wendeschützschtaltungen haben daher eine **Schützverriegelung** und meist zusätzlich eine **Tasterverriegelung**. Bei der Schützverriegelung (Bild 3) ordnet man im Steuerstromkreis vor der Schützspule Q1 einen Öffnerkontakt von Q2 an, vor der Schützspule Q2 einen Öffnerkontakt von Q1. Ist z.B. Q1 in Betrieb, kann das Schütz Q2 wegen des geöffneten Verriegelungskontaktes nicht einschalten. Beide Verriegelungen erhöhen somit die Sicherheit gegen Kurzschluss. Der Endschalter B1 schaltet den Torantrieb über Schütz Q1 in der oberen Endlage ab, der Endschalter B2 schaltet den Torantrieb über Schütz Q2 in der unteren Endlage des Tores ab. Bei der Steuerung der **Drehrichtungsumkehr über AUS (indirekte Umschaltung, Bild 3)** überbrücken die Selbstthaltekontakte Q1: 13-14 und Q2: 13-14 die EIN-Taster S2 und S3. Der Motor kann erst nach dem Betätigen von AUS-Taster S1 in die andere Drehrichtung geschaltet werden.

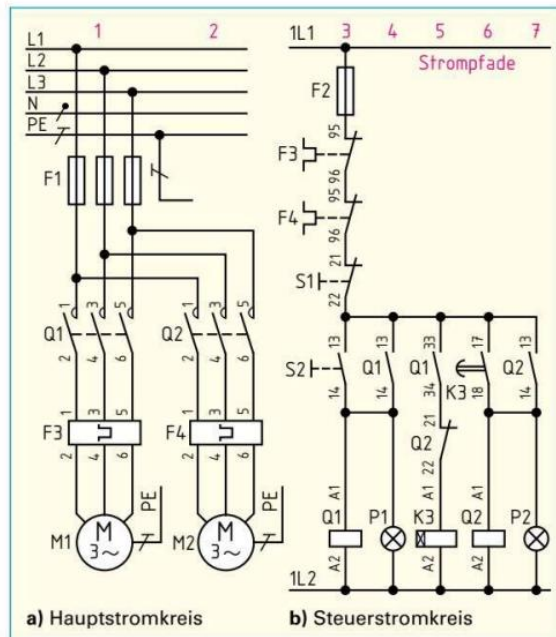


Bild 1: Hauptstrom- und Steuerstromkreis einer Mischanlage (Folgeschaltung)

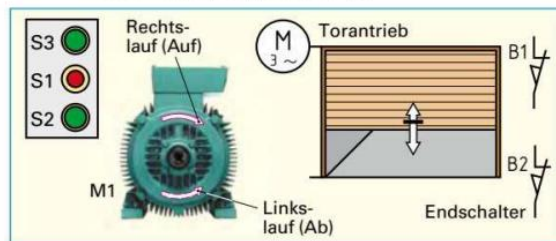


Bild 2: Technologieschema einer Wendeschützschtaltung (Beispiel)

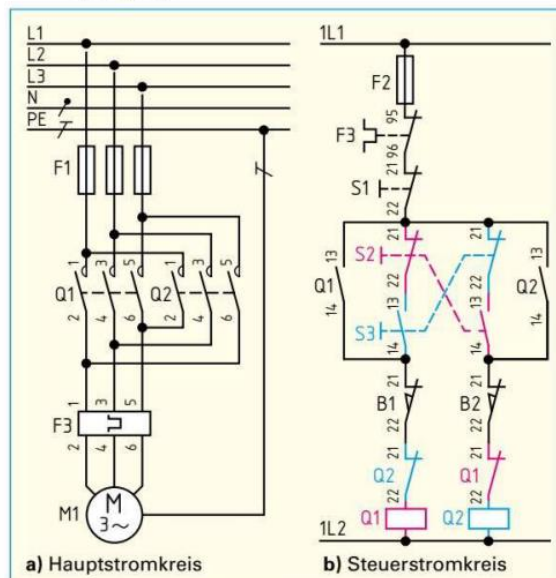


Bild 3: Hauptstrom- und Steuerstromkreis einer Wendeschützschtaltung mit indirekter Umschaltung der Drehrichtung

Bei der **direkten Drehrichtungsumkehr (Bild a)** überbrücken die Selbsthaltekontakte Q1: 13–14 bzw. Q2: 13–14 nur die EIN-Taster. Durch Betätigen der Taster S2 oder S3 kann man die Motordrehrichtung direkt umschalten.

Das **thermische Überlastrelais F3 (Bild 3, Seite 115 und Bild)** unterbricht bei Überlastung des Motors den Steuerstromkreis (Steuerkontakt F3: 95–96) und schaltet über die Hauptstromkontakte der Hauptschütze den Motor ab (**Bild 3 a, Seite 115**). Der Steuerkontakt F3: 97–98 (**Bild a**) schaltet den Leuchtmelder P1 (Störung) ein.

 Motorschutzeinrichtungen: **Seite 323**

Hebeeinrichtungen, z. B. Krane, steuert man meist mit Wendeschützsaltungen ohne Selbsthaltung im **Tippbetrieb (Bild b)**. Die Hubhöhe begrenzt dabei der Näherungsschalter B1 (**Bild b**).

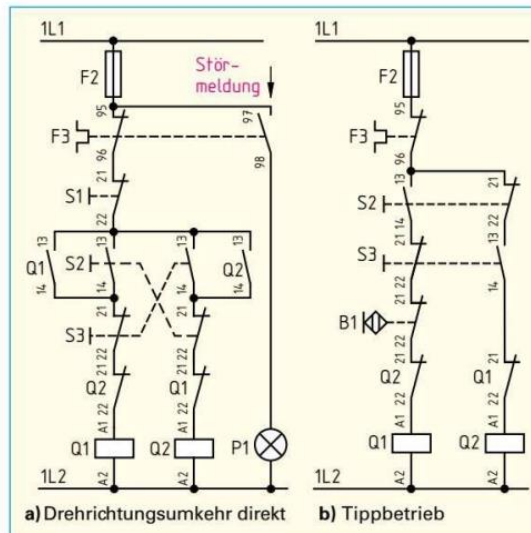


Bild: Steuerstromkreise der Wendeschützsaltung mit direkter Umschaltung

Stern-Dreieck-Schützsaltung

Die Stern-Dreieck-Schaltung vermindert den Anlaufstrom (**Seite 487**) von Drehstrom-Asynchronmotoren. Man unterscheidet die handbetätigte und automatische Stern-Dreieck-Schützsaltung.

Die Stern-Dreieck-Schützsaltung (**Bild, Seite 117**) von Drehstrom-Asynchronmotoren ist ebenfalls eine Folgeschaltung. Die Schaltfolge „AUS“ – „STERN“ – „DREIECK“ kann durch eine handbetätigte Schützsteuerung (**Bild, Seite 117**) oder durch eine automatische Stern-Dreieck-Schützsaltung mit Zeitrelais (**Bild 2, Seite 118**) erfolgen.

Stern-Dreieck-Schützsaltungen bestehen aus: Sternschütz, Dreieckschütz und Netzschütz.

Überlastschutz. Ein thermisches Überlastrelais schützt die Motorwicklung bei Überlastung oder Ausfall eines Außenleiters. Es wird meist nach dem Netzschütz Q1 in die Motorzuleitung eingebaut (F3 in **Bild, Seite 117**, Einbauort B) und dann auf den Wert des Strangstromes (Bemessungsstrom des Motors $I_N \cdot 0,58$) eingestellt. Das Überlastrelais liegt dann in Reihe mit dem Wicklungsstrang und bietet auch Schutz in der Anlaufstufe (Sternschaltung). Der Öffnerkontakt F3:95–96 des Überlastrelais (**Bild, Seite 117**) unterbricht bei Überlastung den Steuerstromkreis und schaltet den Motor ab.

Störungsanzeige. Zur Störungsanzeige, z. B. Störmeldeleuchte P1 in **Bild 2, Seite 118**, wird ein zusätzlicher Schließer 97–98 verwendet. Häufig haben Überlastrelais nur einen Wechselkontakt, die Zuleitung muss dann auf die Klemme 95 geführt werden.

Bei **Schweranlauf** oder bei langer Anlaufzeit ($t_a = 15$ bis 40 s) kann man in Stern-Dreieck-Schützsaltungen das Überlastrelais auch vor dem Netzschütz, Einbauort A in **Bild, Seite 117**, einbauen. Das Überlastrelais ist dann auf den Bemessungsstrom I_N des Motors einzustellen. Der Motor ist in dieser Schaltung jedoch nur im Dreieckbetrieb geschützt.

Einbauort und Einstellwert des Überlastrelais F3 (Bild, Seite 117):

- Einbauort A, in der Motorzuleitung:
Anlaufzeit: 15...40 s
Einstellwert = Motor-Bemessungsstrom $I_N = 10,1$ A
- Einbauort B, nach dem Netzschütz Q1:
Anlaufzeit: ≤ 15 s
Einstellwert (Strangstrom) = $0,58 \cdot$ Bemessungsstrom I_N des Motors, hier: $0,58 \cdot 10,1$ A = 5,9 A

Hersteller	3-Mot.	IE2	CE
Made in Germany	39	kg IM B3	132S IP 56 Th.C 155
50 Hz	400 V Δ	60 Hz	460 V Δ
5,5 kW	10,1 A	6,3 kW	10,1 A
cos	0,9	1450 /min	PF 0,9 1470 RPM
IE 2-87 %			
IEC/EN 60034			

Bei Motoren mit langer Anlaufzeit kann bei automatischem Stern-Dreieck-Anlauf das Überlastrelais auch in die Motorzuleitung, d.h. nach dem Netzschütz, eingebaut und während des Anlaufs durch ein zusätzliches Schütz überbrückt werden. Nach dem Hochlauf wird das Überbrückungsschütz dann abgeschaltet.

Für besonders schwere Anlaufbedingungen und bei Motoren großer Leistung verwendet man **Motorschutz mit Kaltleiter-Temperaturfühler**.

 Motorschutz mit Kaltleiter-Temperaturfühler: **Seite 325**

Handbetätigte Stern-Dreieck-Schützschaltung

Funktion. Wird der Taster S2 (Bild) betätigt, zieht das Sternschütz Q2 (Strompfad 4) an und betätigt seinen Schließer Q2: 13–14 (5). Damit wird auch das Netzschütz Q1 eingeschaltet. Der Öffner Q2: 21–22 (6) verhindert, dass gleichzeitig das Dreieckschütz Q3 anzieht. Der Schließer Q1: 13–14 (6) hält in dieser Schaltstellung Netzschütz Q1 und Sternschütz Q2 an Spannung. Hat der Motor seine Bemessungsdrehzahl erreicht, wird Taster S3 betätigt. Er unterbricht den Stromkreis für das Sternschütz, Q2 fällt ab. Der in seine Ruhelage zurückgehende Öffner Q2: 21–22 (6) schaltet das Dreieckschütz Q3 an Spannung. Der Öffner Q3: 21–22 (4) verriegelt Q2 gegen gleichzeitigen Betrieb mit dem Dreieckschütz Q3. Mit Taster S1 wird die Stern-Dreieck-Schaltung abgeschaltet.

Sollen die Betriebszustände, z.B. „Anlauf“ und „Betrieb“, angezeigt werden, schaltet man Meldeleuchten parallel zu den Schützspulen Q2 und Q3.

Strompfadnummerierung und Kontaktspiegel

Kontaktspiegel und Strompfadnummerierung erleichtern das Verdrahten von Steuerungen und das Auffinden von Hauptstrom- und Steuerkontakten in umfangreichen Stromlaufplänen.

Im Stromlaufplan der Steuerung (Bild) sind Strompfadnummerierungen und unter den Schaltzeichen der Spulen Q2, Q1 und Q3 Kontaktspiegel angegeben.

Strompfadnummerierung. In den Darstellungen (Bild) sind die Stromfäde mit 1 bis 6 bezeichnet. In den Strompfaden 1, 2 und 3 sind die Hauptstromkontakte und in den Strompfaden 4, 5 und 6 die Steuerkontakte im Stromlaufplan zu finden.

Für die drei Hauptstromkontakte von Q2 ist z.B. die Zahl 2 (Bild, Kontaktspiegel) dreimal aufgeführt, da im Hauptstromkreis, Strompfad 2, drei Hauptstromkontakte (Schließer) dargestellt sind.

Kontaktspiegel (Bild 1, Seite 118) zeigen übersichtlich, in welchem Strompfad Schaltkontakte des entsprechenden Schützes zu finden sind. Anstelle von Kontaktspiegeln können die Stromfäde der Schützkontakte auch in Kontakttabellen eingetragen werden (Bild).

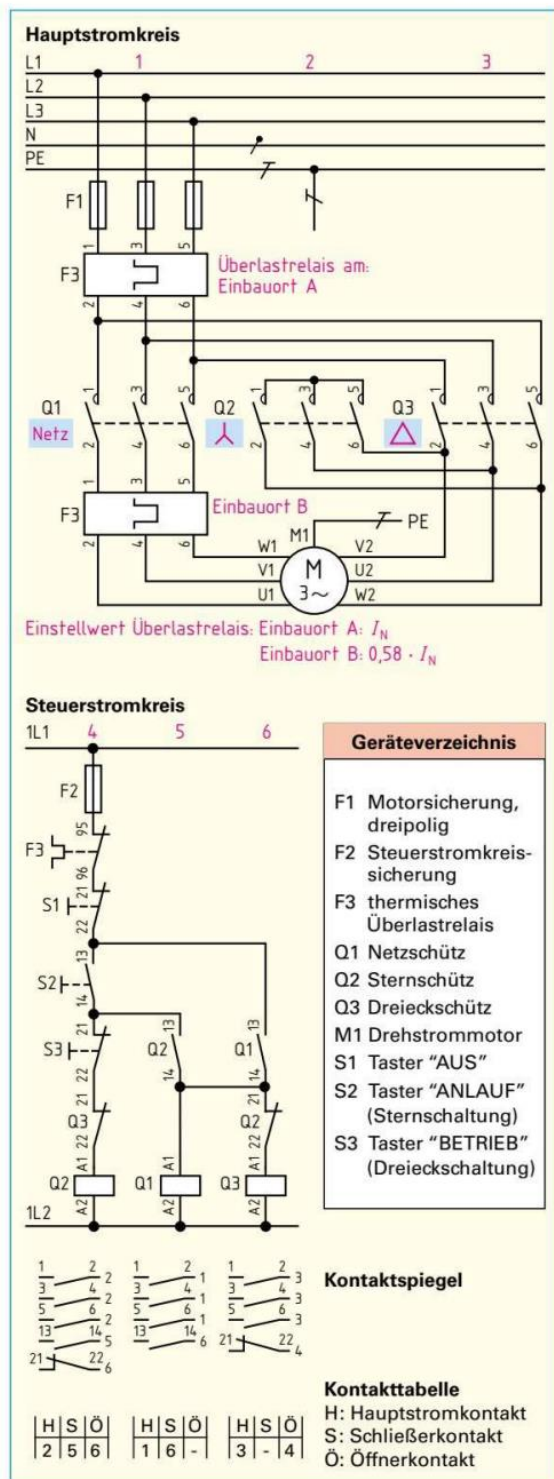


Bild: Handbetätigte Stern-Dreieck-Schützschaltung, (Steuerstromkreis mit Kontaktspiegel)

Der Kontaktspiegel wird unter der Schützspule dargestellt (**Bild 1**) und zeigt alle am Schaltschütz vorhandenen Kontakte mit der entsprechenden Kontaktbezeichnung. Neben jedem in der Steuerung verwendeten Schaltkontakt wird die Strompfadnummer eingetragen unter der man den Kontakt im Stromlaufplan findet (**Bild 1 und 2**).

Am Schaltschütz vorhandene freie Schaltkontakte, die in der Steuerung jedoch nicht verwendet werden, sind im Kontaktspiegel ohne Angabe einer Strompfadnummer eingetragen.

Strompfadnummerierung und Kontaktspiegel oder Kontakttabellen helfen beim Aufbau und bei der Fehlersuche in umfangreichen Steuerungen.

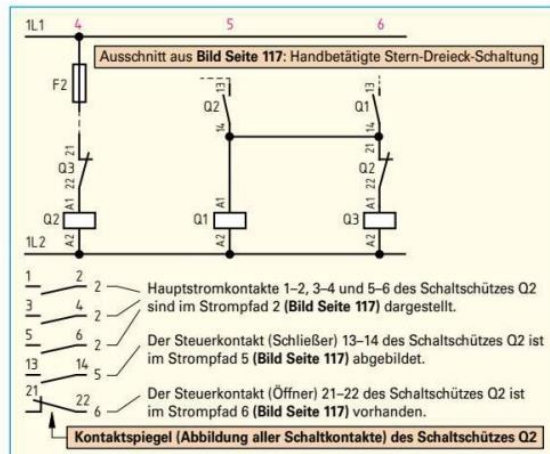


Bild 1: Kontaktspiegel am Beispiel des Schützes Q2

Automatische Stern-Dreieck-Schützschtaltung

In der Stern-Dreieck-Schützschtaltung (**Bild 2**) erfolgt die Umschaltung von Stern (Anlauf) in Dreieck (Betrieb) zeitgeführt durch das Zeitrelais K1 (**Bild 2**). Der Steuerstromkreis wird durch den Steuertransformator T1 (**Bild 2**, Strompfad 4) versorgt.

Steuertransformatoren: Seite 121

Funktion. Durch Betätigen des Tasters S2 (**Bild 2**) zieht das Sternschütz Q2 an. Gleichzeitig wird das Zeitrelais K1 im Strompfad 6 an Spannung gelegt. Der Öffner Q2: 21-22 im Strompfad 8 unterbricht die Ansteuerleitung zu Q3, und der Schließer Q2: 13-14 im Strompfad 7 legt das Netzschütz Q1 an Spannung. Die Selbsthaltung der Schütze Q1 und Q2 erfolgt über den Selbsthaltekontakt Q1: 13-14 im Strompfad 8. Der Motor M1 (**Bild 2**) wird jetzt in Sternschaltung betrieben.

Nach Ablauf der am Zeitrelais K1 eingestellten Verzögerungszeit, z.B. 8 Sekunden, unterbricht der Öffnerkontakt K1: 15-16 im Strompfad 5 die Ansteuerleitung zu Q2. Der Öffner Q2: 21-22 im Strompfad 8 legt das Dreieckschütz Q3 an Spannung, der in der Ruhelage geöffnete Schließer Q2: 13-14 im Strompfad 7 unterbricht die Selbsthaltung von Q2. Mit dem Einschalten von Q3 unterbricht der Öffner Q3: 21-22 im Strompfad 5 die Ansteuerleitung zu Q2/K1 und trennt das Zeitrelais K1 vom Netz. Durch die Ansteuerung der Schütze Q1 und Q3 (**Bild 2**) wird der Motor M1 in Dreieckschaltung betrieben.

Die Öffnerkontakte Q2: 21-22 und Q3: 21-22 (**Bild 2**) verhindern durch Verriegeln den gleichzeitigen Betrieb von Sternschütz Q2 und Dreieckschütz Q3 und damit einen Kurzschluss.

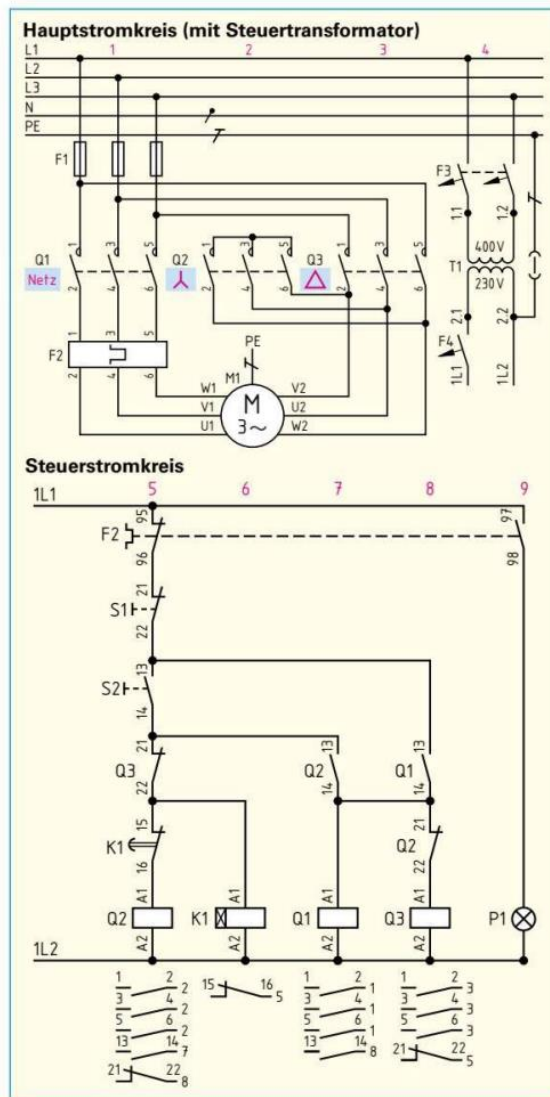


Bild 2: Automatische Stern-Dreieck-Schützschtaltung

6.4 Klemmenplan

Klemmenpläne sind bei der Montage der elektrischen Steuerung hilfreich. Sie erleichtern das Anschließen der externen Betriebsmittel, z.B. der Taster.

Zu den Schaltungsunterlagen umfangreicher elektrischer Steuerungen gehören auch Klemmenpläne. Sie zeigen den Aufbau der Klemmenleiste und geben Auskunft über:

- Klemmenbezeichnungen,
- Anschluss der Betriebsmittel auf der internen und externen Seite der Klemmenleiste und
- vorhandene Brücken zwischen einzelnen Klemmen der Klemmenleiste.

Klemmenpläne können auch Hinweise über Leiterquerschnitte, Aderzahlen der externen angeschlossenen Leitungen enthalten oder Angaben zu den Planabschnitten in umfangreichen Steuerungen geben.

Zum Erstellen eines Klemmenplanes einer elektrischen Anlage sind Kenntnisse über die Funktion und den vorgesehenen Aufbau (**Bild 1**) der Anlage erforderlich. Zunächst kennzeichnet man in den Stromlaufplänen von Haupt- und Steuerstromkreis die extern angeschlossenen Betriebsmittel (**Beispiel Dahlanderschaltung, Bild, Seite 119**). An jedem Übergang von einem internen Betriebsmittel, z.B. im Inneren von Schalt- oder Steuerströmen, zu einem äußeren (externen) Betriebsmittel, z.B. Steuertaster oder Antriebsmotor, ist eine Klemme erforderlich. Die Klemmenleiste und die zugehörigen Klemmen werden dann in der Anlage und in den Schaltungsunterlagen eindeutig bezeichnet.

Beispiel:

In den Schaltungsunterlagen einer Steuerung (**Bild 2**) findet man die Klemmenbezeichnung X1:5. **a)** Erklären Sie die Klemmenbezeichnung. **b)** Welche Betriebsmittel sind an der Klemme angeschlossen?

Lösung:

- a)** • X1: Klemmenleiste X1
• 5: Klemme 5 der Klemmenleiste X1

b) F3: 98, P1

Die Schaltungsunterlagen einer Steuerung, d.h. Stromlaufpläne und Klemmenplan (**Bild 2**), müssen so aufeinander abgestimmt sein, dass eine eindeutige Leitungsführung gewährleistet ist. Im Klemmenplan ist deshalb auf der internen Klemmenseite eine Zielgabe, z.B. Q3: 13 (**Bild 2**), sinnvoll. Auf der externen Seite der Klemmenleiste können die angeschlossenen Betriebsmittel eingezeichnet oder auch nur Zielbezeichnungen, z.B. S1:22, angegeben werden (**Bild 2**). Exakte Zielangaben in Klemmenplänen helfen bei der Fehlersuche, beim Prüfen, z.B. bei der Messung des Isolationswiderstandes, oder beim Umbau bestehender Steuerungen, die gesuchten Anschlusspunkte sicher zu finden.

In Reihenklemmen soll auf jeder Klemmenseite, d.h. intern und extern, nur je ein Leiter geklemmt werden.

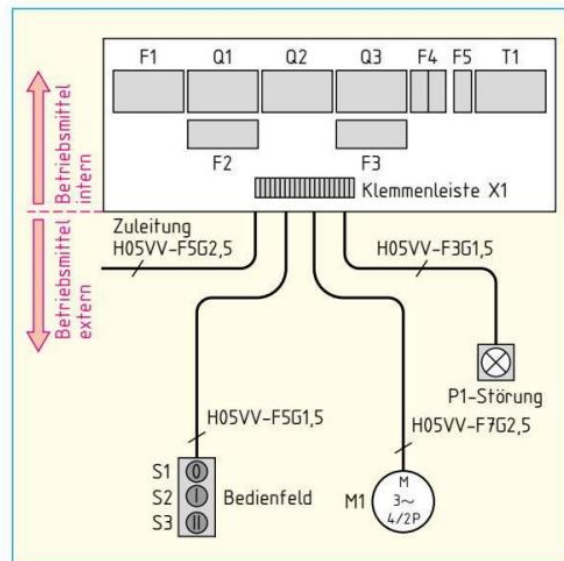


Bild 1: Aufbauskeizze der Dahlanderschaltung
(zu Bild, Seite 119)

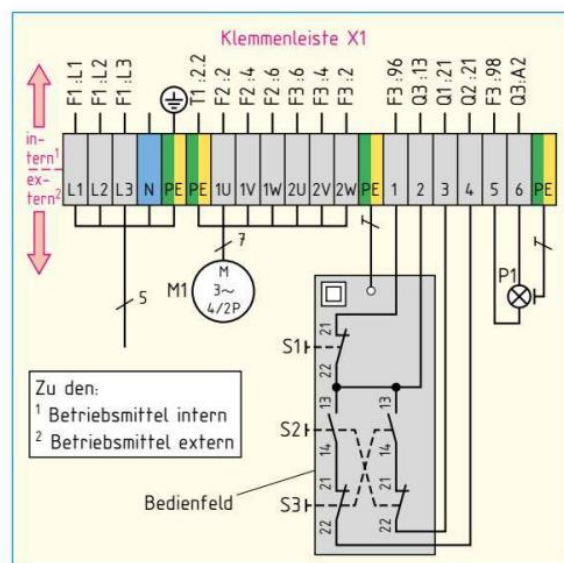



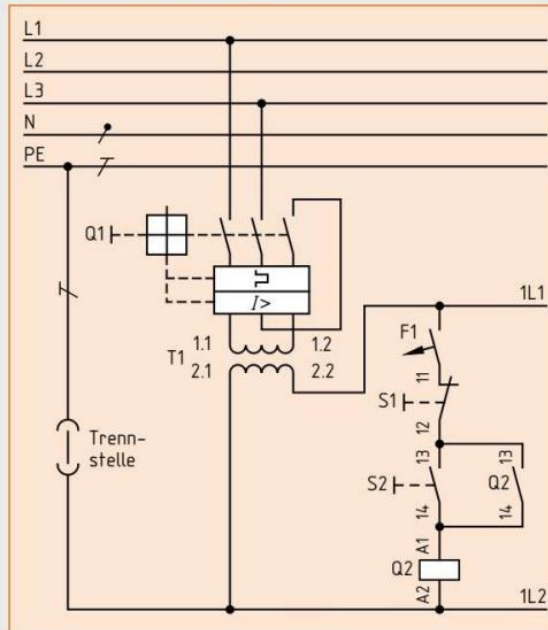
Bild 2: Klemmenplan der Dahlanderschaltung
(zu Bild, Seite 119)

Steuerstromkreise von elektrischen Maschinen

Steuerstromkreise von Maschinen sind

- mithilfe eines Steuertransformators zu betreiben (Ausnahme: direkter Anschluss),
- vorzugsweise mit einem Hauptschalter auszurüsten,
- einseitig zu erden (Bei einem Erdschluss des nicht geerdeten Leiters entsteht ein Kurzschluss, der die vorgeschaltete Überstrom-Schutzeinrichtung auslöst. Damit wird z.B. das unbeabsichtigte Einschalten eines Schützes bei zwei örtlich getrennten Erdschlüssen verhindert.),
- bei fehlender Erdung aus betrieblichen Gründen mit einer Isolationsüberwachungseinrichtung zu versehen (Bei Auftreten des ersten Erdschlusses erfolgt eine Meldung, beim zweiten Fehler wird der Steuerstromkreis abgeschaltet.),
- so anzuschließen, dass der Anschluss A2 von Q2 (Bild) mit dem geerdeten Transformatoranschluss 2.1 und die Schaltelemente mit dem nicht geerdeten Transformatoranschluss 2.2 verbunden werden.

 Elektrische Ausrüstung von Maschinen:
Seite 121

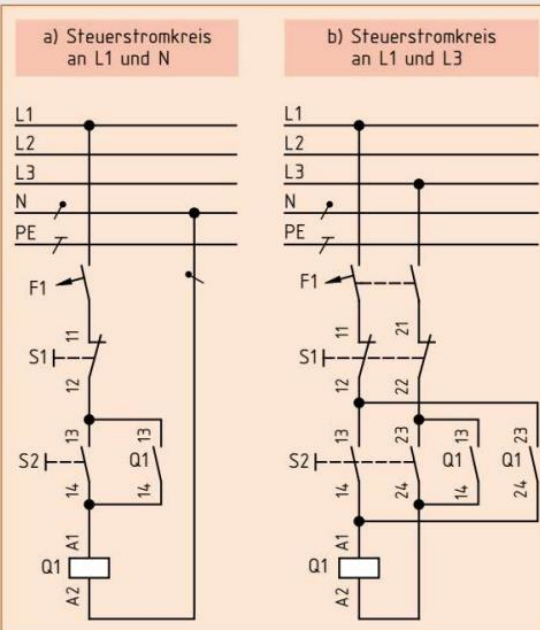


Direkter Anschluss von Steuerstromkreisen an ein TN-S-System

- Direkter Netzanschluss ist möglich, wenn die Maschine mit nur einem Motorstarter, z.B. einem Schalterschütz, und höchstens zwei Steuergeräten, z.B. START-STOPP-Taster, betrieben wird.
- Liegt die Steuerspannung zwischen einem Außenleiter und dem Neutralleiter, darf sie einpolig geschaltet werden (Bild a).
- Liegt die Steuerspannung zwischen zwei Außenleitern, muss sie zweipolig geschaltet werden (Bild b).

Anforderungen an die Leitungsverlegung:

- Meist werden Aderleitungen verlegt.
- Aderleitungen dürfen nicht beschädigt werden und werden deshalb meist im Kanal verlegt oder zu einem Rundbund zusammengefasst.
- Aderleitungen sind farblich nach DIN EN 60204-1 entsprechend den Stromkreisen zu kennzeichnen (Seite 122).
- Der Spannungsfall an Steuerleitungen darf 5% der Nennspannung nicht überschreiten.



Farbkennzeichnung der Aderleitungen nach DIN EN 60204-1 bei Maschinen (Auswahl, Empfehlung):

- Schwarz: Hauptstromkreise
- Rot: Steuerstromkreise AC
- Blau: Steuerstromkreise DC
- Orange: Verriegelungsstromkreise mit externer Energieversorgung

Anforderungen an den Steuertransformator:

- Der Steuertransformator muss:
- getrennte Wicklungen haben und
 - ein spannungssteifes Verhalten aufweisen.
 - Seine sekundäre Bemessungsspannung darf 230 V bei 50 Hz bzw. 277 V bei 60 Hz nicht überschreiten.

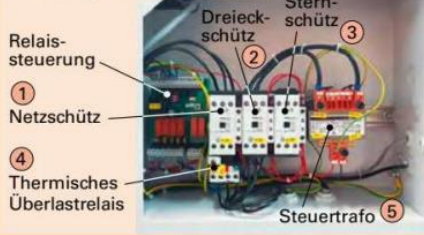
Situationsbeschreibung:

Ein Druckluftkompressor soll am öffentlichen Netz betrieben werden. Der Kompressor hat eine Bemessungsleistung von 11 kW. Nach den Technischen Anschlussbedingungen dürfen nur Drehstrommotoren bis 5,2 kVA Scheinleistung bzw. mit Anlaufströme bis 60 A direkt am Netz betrieben werden (**Tabelle 2, Seite 490**). Da der Kompressormotor eine Bemessungsleistung von 11 kW hat, kann zum Anlassen z. B. die Stern-Dreieck-Schaltung verwendet werden. Wie sieht der Einsatz dieser Schaltung in der Praxis aus?

Kompressordaten:

- Bemessungsspannung: 400 V/50 Hz
- Bemessungsleistung: 11 kW
- Thermisches Überlastrelais: Einstellwert 13 A (Tabelle Hauptstromkreis)
- Drehrichtung Kompressormotor: Links
- Luftmenge:
 - bei 7,5 bar 1,61m³/min
 - bei 15 bar 1,11m³/min

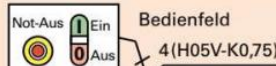
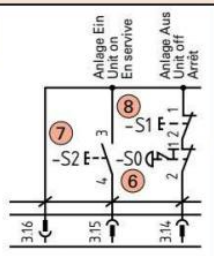
Steuerung und Schaltschütze



Kompressor-Aufbau ohne Gehäuse

Anschluss der Bedienelemente:

- Not-Aus 6
 - Ein 7
 - Aus 8
- an der Steuer-elektronik

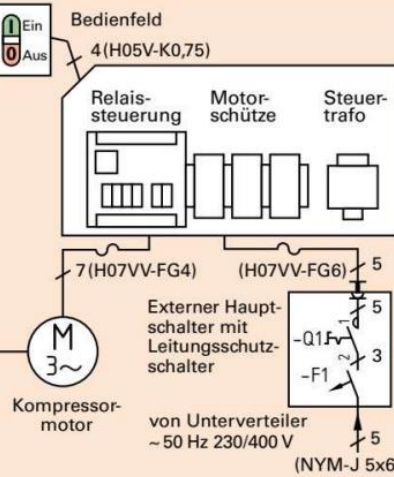


Kompressor-motor:

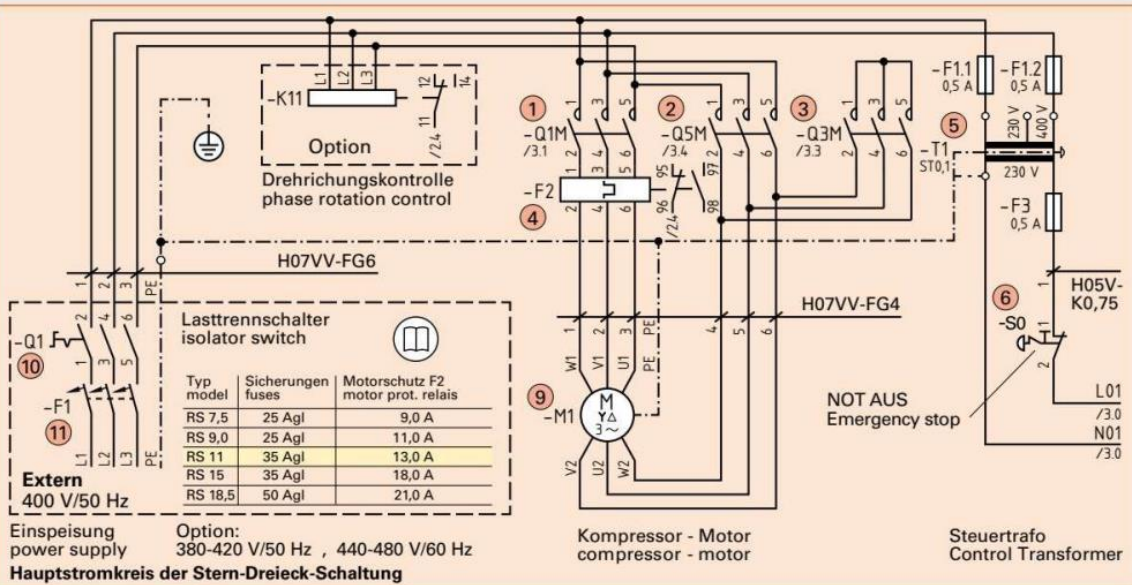
Drehstrom-
asynchron-
motor mit 11 kW



Aufbau-skizze der Stern-Dreieck-Schaltung



CEE-Unterverteiler mit Hauptschalter, LS-Schalter und CEE-Steckdose 32 A



7.9 Dreiphasenwechselstrom (Drehstrom)

7.9.1 Entstehung der Dreiphasenwechselspannung

Versuch 1: Drehen Sie einen starken Stabmagneten zwischen drei gleichen, um 120° räumlich versetzten Spulen (Bild 1). Schließen Sie an jede Spule einen Gleichspannungsmesser an, dessen Nullpunkt in der Mitte der Skala liegt. Drehen Sie den Stabmagneten mit konstanter Drehzahl um seine Achse.

Die Zeiger der drei Spannungsmesser schlagen bei jeder vollen Umdrehung des Polrades nacheinander je einmal nach links und nach rechts aus.

Dreht sich das Polrad, wird in jeder Spule eine Wechselspannung mit gleicher Amplitude und Frequenz induziert. Die Spannungen sind wegen der räumlichen Anordnung der Spulen auch zeitlich um $\frac{1}{3}$ Periode gegeneinander verschoben. Der Phasenverschiebungswinkel beträgt jeweils 120° (Bild 2b). Die drei Spulen eines solchen Generators bilden die **Stränge**. In jedem Strang wird eine Spannung induziert, die man **Strangspannung** nennt.

Die Anfänge der Stränge bezeichnet man mit U1, V1, W1, die Strangenden mit U2, V2, W2. Durch **Verkettung** (Verbindung) der drei Spulen miteinander kann man die Anzahl der zur Energieübertragung notwendigen Leiter auf drei Leiter (L1, L2, L3) verringern.

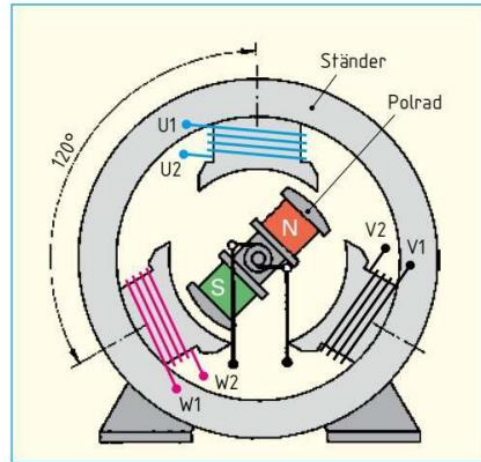


Bild 1: Erzeugung von drei um je 120° phasenverschobenen Wechselspannungen

Sternschaltung, Symbol: Y
Dreieckschaltung, Symbol: Δ

Drei um 120° phasenverschobene und verkettete Wechselspannungen nennt man Dreiphasenwechselspannung.

7.9.2 Verkettung

Verbindet man bei einem Erzeuger oder Verbraucher die drei Strangenden U2, V2 und W2, so entsteht die **Sternschaltung**, Zeichen: Y (Bild 2a und c). Den Verbindungspunkt von U2, V2 und W2 nennt man **Sternpunkt** (Bild 2a und c). Am Sternpunkt wird meist der **Neutralleiter** N angeschlossen.

Verbindet man das Ende eines Stranges mit dem Anfang des nächsten, z. B. U2 mit V1, V2 mit W1 und W2 mit U1, entsteht die **Dreieckschaltung**, Zeichen: Δ (Bild 2d). Die drei Leiter L1, L2 und L3, die bei beiden Schaltungen vom Erzeuger zu den Stranganfängen U1, V1 und W1 führen, nennt man **Außenleiter**.

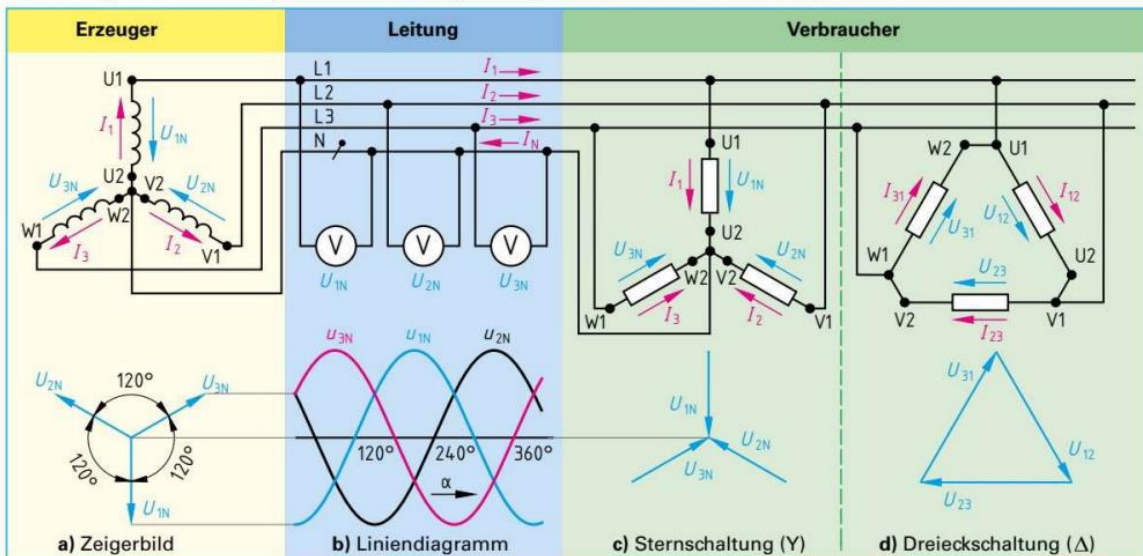


Bild 2: Drehstromsystem mit Liniendiagramm und Zeigerbildern

Die Spannung zwischen zwei Außenleitern, z. B. L1 und L2, bezeichnet man als **Außenleiter-spannung** oder **Leiterspannung**.

Verkettungsfaktor

Versuch 2: Messen Sie an einem Drehstromnetz (**Bild 1**) zuerst die Spannungen zwischen den Außenleitern, dann die Spannungen zwischen jedem Außenleiter und dem Neutralleiter N.

Zwischen L1 und L2, L1 und L3 sowie zwischen L2 und L3 misst man drei gleich große Spannungen. Zwischen L1 und N, L2 und N sowie zwischen L3 und N misst man ebenfalls drei gleich große Spannungen, die jedoch kleiner sind als die Spannungen zwischen den Außenleitern.

Setzt man die Spannung zwischen zwei Außenleitern, z. B. $U_{31} = 400\text{ V}$, zur Spannung zwischen Außenleiter und Neutralleiter N, z. B. $U_{1N} = 230\text{ V}$, ins Verhältnis, so erhält man den **Verkettungsfaktor**:

$$\frac{400\text{ V}}{230\text{ V}} = \sqrt{3} \Rightarrow \frac{U_{31}}{U_{1N}} = \sqrt{3}$$

Bei Drehstrom ist der Verkettungsfaktor $\sqrt{3}$.

Den Zusammenhang zwischen den Leiterspannungen und den Spannungen zwischen Außenleiter und Neutralleiter N kann man im Zeigerbild (**Bild 2**) und im Liniendiagramm (**Bild 3**) darstellen. Die Verbindung zwischen den Zeigern für die Strangspannungen sind die Zeiger der Leiterspannungen U_{12} , U_{23} und U_{31} (**Bild 2**). In **Bild 2** bilden die Spannungen U_{1N} , U_{3N} und U_{31} ein gleichschenkliges Dreieck mit dem Basiswinkel 30° . Dieses Dreieck kann man in zwei rechtwinklige Dreiecke zerlegen. Mithilfe der Winkelfunktionen ergibt sich:

$$\frac{U_{31}}{2} = U_{1N} \cdot \cos 30^\circ = U_{1N} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \Rightarrow U_{31} = U_{1N} \cdot \sqrt{3}$$

Die geometrische Addition der Spannungen der Masche M in **Bild 2** ergibt $U_{31} + U_{1N} - U_{3N} = 0 \Rightarrow$

$$U_{31} = U_{3N} - U_{1N} \text{ (geometrische Differenz)}$$

Bildet man im Liniendiagramm (**Bild 3**) die Differenz der Momentanwerte der Spannungen u_{3N} und u_{1N} , ergibt sich der Verlauf der Leiterspannung u_{31} . Auch hier zeigt sich, dass der Scheitelwert der Spannung u_{31} um den Faktor $\sqrt{3}$ größer ist als der Scheitelwert der Spannung u_{1N} .

Im 400-V-Vierleiter-Drehstromnetz betragen die Leiterspannungen (U_{12} , U_{23} , U_{31}) 400 V, die Spannung zwischen einem Außenleiter und dem Neutralleiter (U_{1N} , U_{2N} , U_{3N}) 230 V (**Bild 4**).

Dies ermöglicht den Betrieb von Drehstromverbrauchern mit einer Bemessungsspannung von 400 V, z. B. Drehstrommotoren oder Elektroherde und von Wechselstromverbrauchern für 230 V, z. B. Lampen, Haushaltsgeräte oder Fernsehgeräte, an einem Netz.

¹ Der Unterstrich, z. B. bei U_{31} , bedeutet, dass es sich um eine Größe mit Betrag und Richtung (Zeiger) handelt, die geometrisch addiert werden muss.

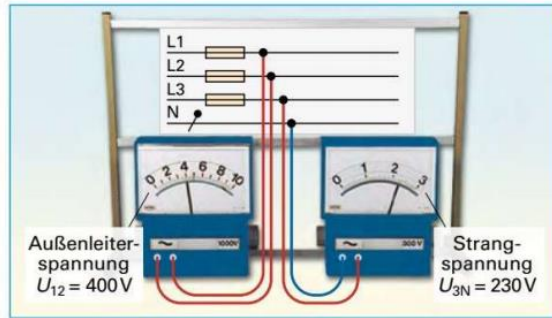


Bild 1: Spannungsmessungen am Drehstromnetz

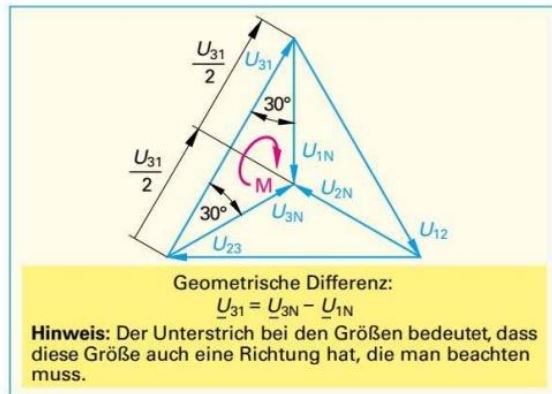


Bild 2: Zeigerbild der Spannungen in der Sternschaltung

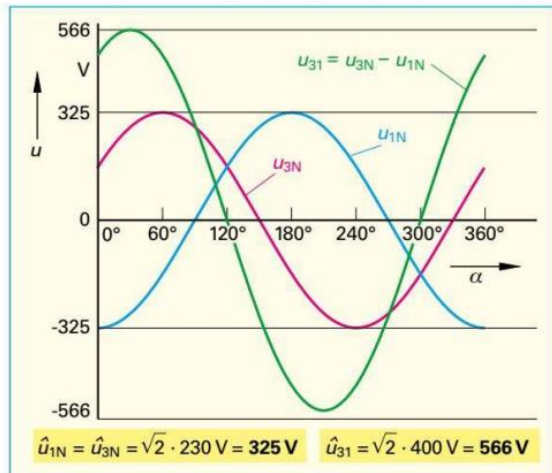


Bild 3: Strangspannungen und Leiterspannung im Liniendiagramm

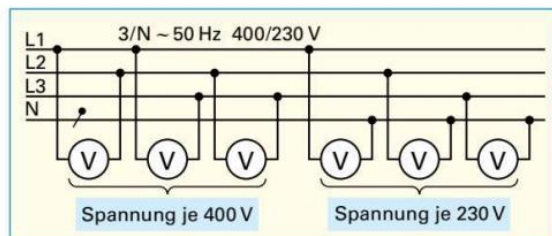


Bild 4: Spannungen im 400-V-Vierleiter-Drehstromnetz

7.9.3 Sternschaltung (Zeichen: Y)

Spannungen und Ströme bei symmetrischer (gleicher) Belastung

Versuch 3: Schließen Sie drei gleiche Verbraucher, z. B. 100-Ω-Widerstände, an einen Drehstromversuchstransformator. Messen Sie die Stromstärke in jedem Leiter und im Neutralleiter (**Bild 1**).

Die Stromstärken in den Leitern sind gleich groß. Im Neutralleiter fließt kein Strom.

Bei der Sternschaltung (**Bild 1**) fließt in jedem Strang derselbe Strom wie im Leiter. Den Strom durch den Strang nennt man **Strangstrom** I_{Str} , den Strom durch den Leiter **Leiterstrom** I .

Bei der Sternschaltung sind die Leiterströme so groß wie die Strangströme.

Die Spannung an einem Strang nennt man **Strangspannung** U_{Str} (**Bild 1**) oder Sternspannung.

Bei der Sternschaltung ist die Leiterspannung $\sqrt{3}$ -mal so groß wie die Strangspannung.

Tabelle: Bedingungen für symmetrische und unsymmetrische Belastungen

Belastung	symmetrisch	unsymmetrisch
Stromstärke in den Strängen	gleich	ungleich
Phasenlage zur Strangspannung	gleich	ungleich

Im Neutralleiter fließt zu jedem Zeitpunkt die Summe der Leiterströme. Betrachtet man z. B. im Liniendiagramm (**Bild 2**) den Punkt III, so hat der Strom i_1 seinen positiven Maximalwert. Die Ströme i_2 und i_3 sind jeweils halb so groß wie i_1 , jedoch negativ. Die Summe der Momentanwerte der drei Ströme ist somit null. Es fließt also kein Strom im Neutralleiter. Dies gilt für jeden Winkel zwischen 0° und 360° .

Die Stromstärke im Neutralleiter kann auch im Zeigerbild (**Bild 4**) ermittelt werden. Zum Erstellen des Zeigerbildes der Ströme ist folgende Vorüberlegung nötig:

Aus **Bild 2c**, Seite 156, ergibt sich für die Sternschaltung ein Zeigerbild, bei dem die Spannungen zum Sternpunkt hinweisen (**Bild 3a**). Zeiger darf man auf ihrer Wirkungslinie verschieben (**Bild 3b**). Es entsteht ein gleichwertiges Zeigerbild (**Bild 3c**). Für die Zeigerbilder der Ströme wird meist diese Darstellung (Zeiger nach außen) zugrunde gelegt.

Sind die Verbraucher wie in Versuch 3 gleiche Wirkwiderstände, haben die Ströme I_1 , I_2 und I_3 dieselbe Stromstärke und die gleiche Phasenlage wie die zugehörigen Strangspannungen (**Bild 4**). Die geometrische Summe der Leiterströme I_1 , I_2 und I_3 (**Bild 4**) ist null, es fließt also kein Strom im Neutralleiter.

Spannungen und Ströme bei Sternschaltung

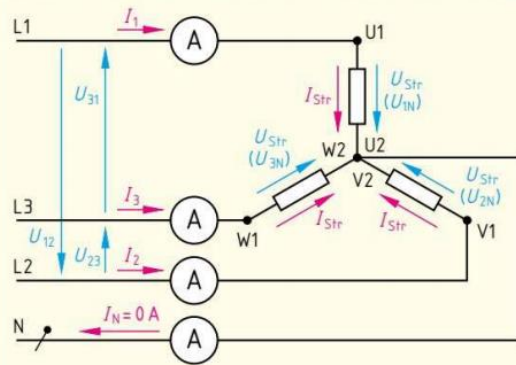


Bild 1

$U = \sqrt{3} \cdot U_{Str}$	$I = I_{Str}$
U Leiterspannung	I Leiterstrom
U_{Str} Strangspannung	I_{Str} Strangstrom

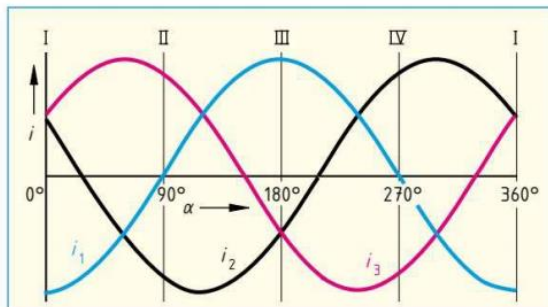


Bild 2: Liniendiagramm der Leiterströme

Bei der symmetrischen Belastung eines Drehstromnetzes fließt im Neutralleiter kein Strom.

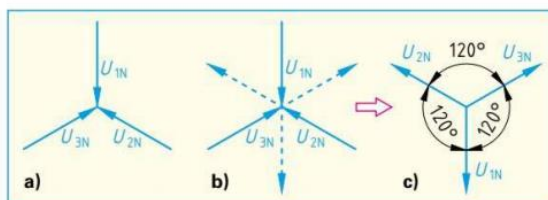


Bild 3: Zeigerbilder der Spannungen bei Sternschaltung

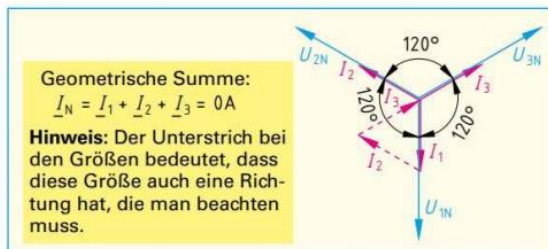


Bild 4: Zeigerbild der Ströme bei Sternschaltung

Geometrische Summe:
 $\underline{I}_N = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = 0 \text{ A}$

Hinweis: Der Unterstrich bei den Größen bedeutet, dass diese Größe auch eine Richtung hat, die man beachten muss.

Spannungen und Ströme bei unsymmetrischer (ungleicher) Belastung

Versuch 4: Schließen Sie drei unterschiedliche Verbraucher in Sternschaltung an ein Drehstromnetz (**Bild 1**). Messen Sie die Strangspannungen und die Stromstärken in den Außenleitern und im Neutralleiter.

Die Strangspannungen sind gleich groß. Die Ströme in den Außenleitern sind verschieden groß. Im Neutralleiter fließt ein Strom.

Werden im Drehstromnetz in Sternschaltung Verbraucher unterschiedlicher Leistung oder mit unterschiedlichem Wirkfaktor $\cos \varphi$ angeschlossen, entsteht eine unsymmetrische Belastung. In den Außenleitern fließen unterschiedliche Ströme. Im Zeigerbild sind die Stromzeiger deshalb unterschiedlich lang (**Bild 2**). Addiert man die Ströme geometrisch, ergibt sich der Strom im Neutralleiter I_N (**Bild 2**). Der Strom I_N wird umso größer, je unterschiedlicher die Ströme I_1, I_2 und I_3 in den Außenleitern sind.

Bei der Aufteilung der Wechselstromkreise auf die Außenleiter des Drehstromsystems ist auf eine gleichmäßige Belastung zu achten.

Versuch 5: Wiederholen Sie den Versuch 4, jedoch ohne angeschlossenen Neutralleiter. Messen Sie die Leiterspannungen, die Strangspannungen und die Leiterströme.

Die Leiterspannungen unterscheiden sich voneinander. Die Leiterströme sind unterschiedlich groß und unterscheiden sich zusätzlich von den Messwerten in Versuch 4.

Im Zeigerbild (**Bild 3**) ist zu erkennen, dass sich der Sternpunkt N' aus der Mitte verschoben hat. Da kein Neutralleiter angeschlossen ist, muss im **Sternpunkt** die geometrische Summe der Leiterströme null sein. Damit sich diese Bedingung erfüllt, verändern die Strangspannungen sowohl ihren Betrag als auch ihre Richtung. Es kommt zu einer **Sternpunktverschiebung** und damit zu Über- oder Unterspannungen an den Verbrauchern im Drehstromsystem. Der Verkettungsfaktor $\sqrt{3}$ gilt jetzt nicht mehr.

Treten an den Wechselstromverbrauchern in einem Drehstromsystem unterschiedliche Spannungen auf, so ist der Neutralleiter unterbrochen oder nicht angeschlossen.

Damit bei unsymmetrischer Belastung die Spannungen gleich bleiben, sind Niederspannungsnetze meist Vierleiternetze.

Beispiel:

Ermitteln Sie die Stromstärke I_N im Neutralleiter eines unsymmetrisch belasteten Vierleiter-Drehstromnetzes mit $I_1 = 2,5 \text{ A}$, $I_2 = 2,0 \text{ A}$ und $I_3 = 1,0 \text{ A}$. I_2 und I_3 sind Wirkströme, Strom I_1 eilt gegenüber U_{1N} um 30° nach.

Lösung:

Nach **Bild 2** ergibt sich: $I_N = 2,2 \text{ A}$
(Maßstab: $1 \text{ A} \cong 1 \text{ cm}$)

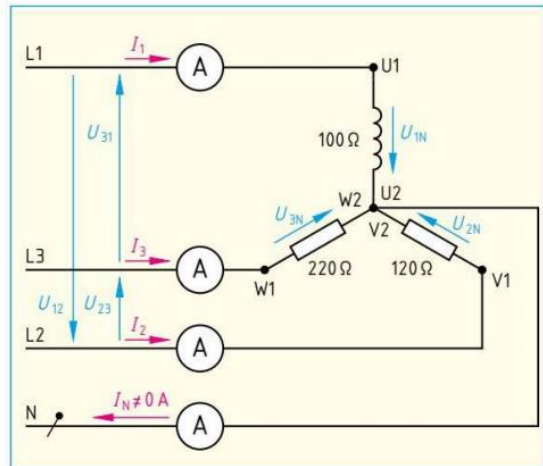


Bild 1: Sternschaltung von Verbrauchern (unsymmetrische Belastung)

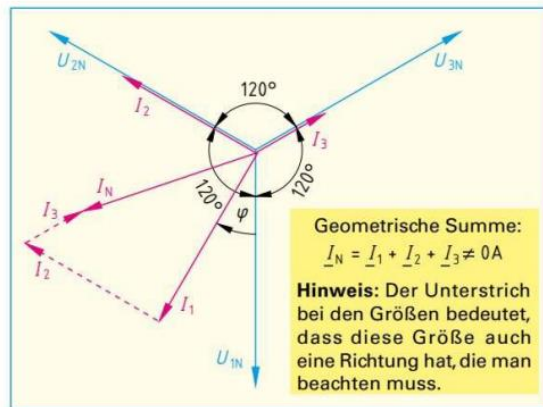


Bild 2: Zeigerbilder der Ströme bei Sternschaltung und unsymmetrischer Belastung des Vierleiternetzes

i Sternschaltung

- symmetrisch belastet: $I_N = 0 \text{ A}$
- unsymmetrisch belastet: $I_N \neq 0 \text{ A}$

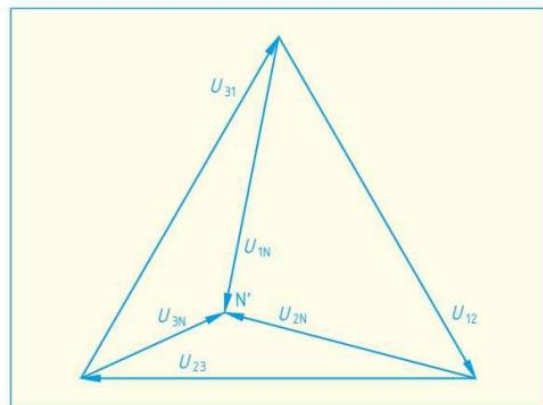


Bild 3: Zeigerbild der Leiter- und Strangspannungen bei einer unsymmetrisch belasteten Sternschaltung ohne N-Leiter-Anschluss

7.9.4 Dreieckschaltung (Zeichen: Δ)

Sind die Stränge des Erzeugers, z. B. des Generators, im Dreieck geschaltet, führen nur drei Leiter zum Verbraucher. Ein solches Netz nennt man Dreileiter-Drehstromnetz. Hochspannungsnetze (380 kV, 220 kV, 110 kV) sind Dreileiter-Drehstromnetze.

Bei der Dreieckschaltung (**Bild 1**) liegt an jedem Strang die Außenleiterspannung an.

Bei der Dreieckschaltung ist die Strangspannung gleich der Leiterspannung.

Ströme bei symmetrischer Belastung

Versuch 6: Schalten Sie drei gleiche Verbraucher, z. B. 100- Ω -Widerstände, in Dreieckschaltung (**Bild 1**) an einen Drehstromversuchstransformator. Messen Sie die Leiterströme und die Strangströme.

Die Leiterströme sind $\sqrt{3}$ -mal größer als die Strangströme.

In der Dreieckschaltung verzweigen sich die Leiterströme (**Bild 1**). Beim Aufstellen der Knotenregel sind die einzelnen, zueinander phasenverschobenen Ströme geometrisch zu addieren. Der Leiterstrom I_1 ist die geometrische Differenz $I_{12} - I_{31}$, der Leiterstrom I_2 ist die geometrische Differenz $I_{23} - I_{12}$ und der Leiterstrom I_3 ist die geometrische Differenz $I_{31} - I_{23}$.

Sind die Strangwiderstände Wirkwiderstände, haben die Strangströme I_{12} , I_{31} und I_{23} die gleiche Phasenlage wie die zugehörigen Strangspannungen U_{12} , U_{31} und U_{23} (**Bild 2a**). Zur Ermittlung der Leiterströme verschiebt man die Stromzeiger parallel. Es ergibt sich für die Strangströme I_{12} , I_{31} und I_{23} ein Stern (**Bild 2b**). Die Verbindungslinien zwischen den Strangströmen sind die Leiterströme I_1 , I_2 und I_3 (**Bild 2b**).

$$\frac{I_1}{2} = I_{31} \cdot \cos 30^\circ = I_{31} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \Rightarrow I_1 = I_{31} \cdot \sqrt{3} \quad I = I_{\text{Str}} \cdot \sqrt{3}$$

Bei der Dreieckschaltung ist der Leiterstrom $I \cdot \sqrt{3}$ -mal so groß wie der Strangstrom I_{Str} .

Beispiel:

Bei einem Drehstromverbraucher in Dreieckschaltung fließen in jedem Strang 2,5 A. Ermitteln Sie **a**) rechnerisch und **b**) zeichnerisch die Leiterströme (Maßstab: 1 A $\hat{=}$ 10 mm).

Lösung:

a) $I_1 = I_2 = I_3 = \sqrt{3} \cdot I_{\text{Str}} = \sqrt{3} \cdot 2,5 \text{ A} = 4,3 \text{ A}$

b) Lösung nach **Bild 2b**: $I_{23} = 2,5 \text{ A} \hat{=}$ 25 mm $\quad I_1 = I_2 = I_3 \hat{=}$ 43 mm $\hat{=}$ 4,3 A

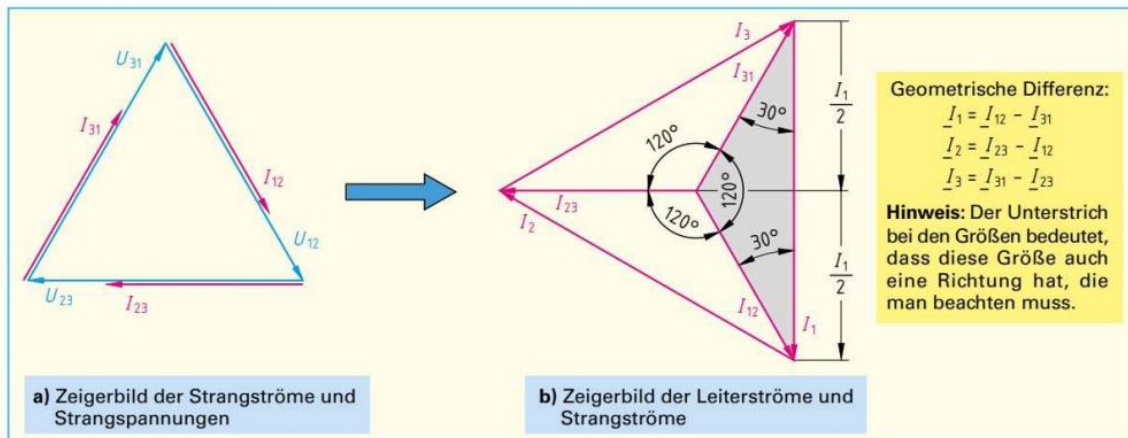


Bild 2: Zeigerbilder bei Dreieckschaltung

Spannungen und Ströme bei Dreieckschaltung

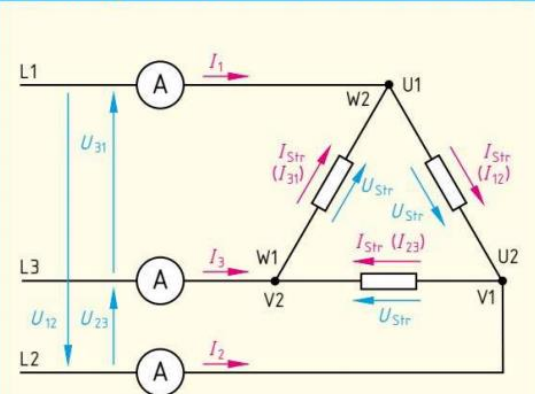


Bild 1

$U = U_{\text{Str}}$	$I = \sqrt{3} \cdot I_{\text{Str}}$
U Leiterspannung	I Leiterstrom
U_{Str} Strangspannung	I_{Str} Strangstrom
	$\sqrt{3}$ Verkettungsfaktor

Ströme bei unsymmetrischer Belastung

Versuch 7: Wiederholen Sie Versuch 6 mit drei Wirkwiderständen, jedoch mit unterschiedlichen Widerstandswerten (Bild 1a). Messen Sie die Strangspannungen, die Strangströme und die Leiterströme. Vergleichen Sie die Spannungen, die Strangströme und die Leiterströme.

Die Strangspannungen sind gleich groß. Die Leiterströme sind verschieden, ebenso die Strangströme. Leiterströme und Strangströme stehen nicht mehr im Verhältnis $\sqrt{3}$ zueinander.

Die unterschiedlichen Widerstände bewirken, dass bei gleichen Strangspannungen verschieden große Ströme fließen (Bild 1b). Sind die Widerstände wie im Versuch 7 Wirkwiderstände, haben die Strangströme I_{12} , I_{31} und I_{23} die gleiche Phasenlage wie die zugehörigen Strangspannungen U_{12} , U_{31} und U_{23} (Bild 1b). Zur Ermittlung der Leiterströme werden die Zeiger der Strangströme parallel verschoben (Bild 1c). Es ergibt sich für die Strangströme I_{12} , I_{31} und I_{23} ein unsymmetrisches Zeigerbild. Die Verbindungslinien zwischen den Zeigern für die Strangströme entsprechen den Leiterströmen I_1 , I_2 und I_3 .

i Bei einer unsymmetrisch belasteten Dreieckschaltung sind die Phasenverschiebungen zwischen den Leiterströmen ungleich 120° .

7.9.5 Leiterfehler in Drehstromsystemen

Fällt in einem Drehstromsystem ein Leiter aus (Tabelle), entsteht ein Wechselstromsystem.

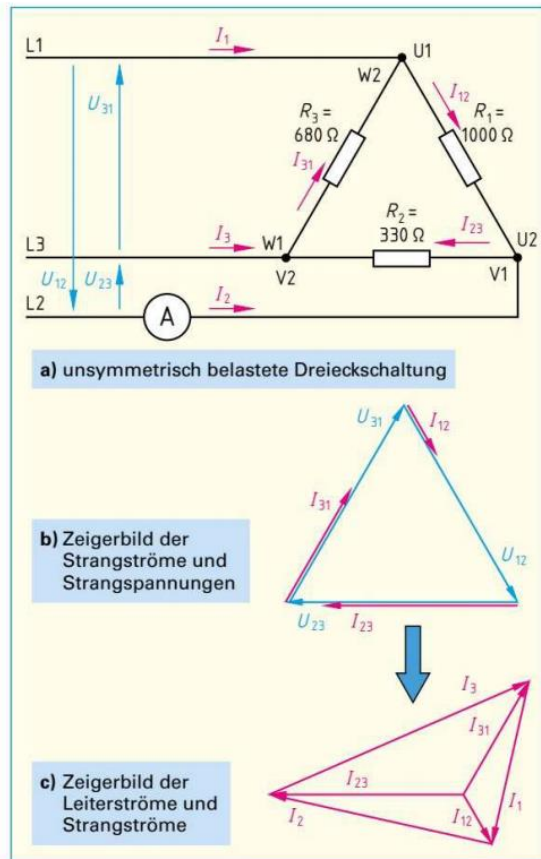


Bild 1: Schaltung und Zeigerbilder bei unsymmetrisch belasteter Dreieckschaltung

Tabelle: Leiterfehler in Drehstromsystemen (Beispiele für Ausfall des Außenleiters L3)

Sternschaltung mit Neutralleiter		
		$I_1 = \frac{U_{1N}}{R_1} \quad I_2 = \frac{U_{2N}}{R_2}$ $P_1 = U_{1N} \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1$ $P_2 = U_{2N} \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2$ $P = P_1 + P_2$
Sternschaltung ohne Neutralleiter		
		$I_1 = I_2 = \frac{U_{12}}{R_1 + R_2}$ $P = U_{12} \cdot I_1 \cdot \cos \varphi$ $P = U_{12} \cdot I_2 \cdot \cos \varphi$
Dreieckschaltung		
		$I_1 = I_2 = \frac{U_{12}}{R_1 \cdot (R_2 + R_3) / (R_1 + R_2 + R_3)}$ $P = U_{12} \cdot I_1 \cdot \cos \varphi$ $P = U_{12} \cdot I_2 \cdot \cos \varphi$
I_1, I_2 Leiterströme U_{12} Leiterspannung	R_1, R_2, R_3 Lastwiderstände U_{1N}, U_{2N} Strangspannungen	P Leistung $\cos \varphi$ Wirkfaktor

7.9.6 Leistungen in Drehstromsystemen

Die Leistung eines Gerätes bei Anschluss an Drehstrom lässt sich über die Einzelleistungen der drei Stränge ermitteln. Jeder der drei Stränge des Verbrauchers liegt sowohl bei Sternschaltung als auch bei Dreieckschaltung an der jeweiligen Strangspannung U_{Str} und führt den Strangstrom I_{Str} . Die Scheinleistung S eines Stranges ist daher $S_{Str} = U_{Str} \cdot I_{Str}$. Damit ist bei symmetrischer Belastung die Gesamtscheinleistung $S = 3 \cdot U_{Str} \cdot I_{Str}$.

Drehstromleistungen bei symmetrischer Belastung	
Sternschaltung	Dreieckschaltung
$I_{Str} = I \quad U_{Str} = \frac{U}{\sqrt{3}}$	$U_{Str} = U \quad I_{Str} = \frac{I}{\sqrt{3}}$
$S = 3 \cdot I_{Str} \cdot U_{Str} = 3 \cdot I \cdot \frac{U}{\sqrt{3}}$ $S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$	$S = 3 \cdot U_{Str} \cdot I_{Str} = 3 \cdot U \cdot \frac{I}{\sqrt{3}}$ $S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$

Da man die Leiterwerte für Strom und Spannung meist leichter messen kann als die Strangwerte, erfolgt die Leistungsberechnung bei Drehstrom mit den Werten von Leiterstrom und Leiter-spannung (**Formelkasten** rechts).

Zur Leistungsberechnung werden bei Stern- und Dreieckschaltung die gleichen Formeln verwendet.

Beispiel:

Ein Drehstrommotor nimmt an einer Leiterspannung von 400 V bei $\cos \varphi = 0,83$ eine Stromstärke von 8,7 A auf. Berechnen Sie a) die aufgenommene Scheinleistung S , b) die Wirkleistung P und c) die induktive Blindleistung Q_L .

Lösung:

- a) $S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 8,7 \text{ A} = 6,03 \text{ kVA}$
- b) $P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 8,7 \text{ A} \cdot 0,83 = 5 \text{ kW}$
- c) $Q_L = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 8,7 \text{ A} \cdot 0,56 = 3,38 \text{ kvar}$

Vergleich der Leistungsaufnahme eines Verbrauchers in Sternschaltung und Dreieckschaltung

Versuch 8: Schalten Sie drei 1000-Ω-Widerstände a) in Sternschaltung, b) in Dreieckschaltung an das 400-V-Drehstromnetz (**Bild**). Verwenden Sie aus Sicherheitsgründen eine RCD mit $I_{\Delta N} = 30 \text{ mA}$. Messen Sie in beiden Schaltungen den Leiterstrom und berechnen Sie die jeweils aufgenommene Leistung. Setzen Sie die Leistung bei Dreieckschaltung zur Leistung in Sternschaltung ins Verhältnis.

Sternschaltung Y	Dreieckschaltung Δ
$I = 0,23 \text{ A}$	$I = 0,69 \text{ A}$
$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$	$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$
$P = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 0,23 \text{ A} \cdot 1$	$P = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 0,69 \text{ A} \cdot 1$
$P = 159 \text{ W}$	$P = 478 \text{ W}$
$\frac{P_{\Delta}}{P_Y} = \frac{478 \text{ W}}{159 \text{ W}} = 3$	

Bei gleicher Netzspannung nimmt ein Verbraucher in Dreieckschaltung die dreifache Leistung wie in Sternschaltung auf.

Leistungen bei symmetrischer Last

$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$

$[S] = V \cdot A = VA = W$

$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$

$[P] = W$

$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi$

$[Q] = \text{var} = W$

- S Scheinleistung
- U Leiterspannung
- I Leiterstrom
- P Wirkleistung
- Q Blindleistung
- $\cos \varphi$ Wirkfaktor
- $\sin \varphi$ Blindfaktor
- φ Phasenverschiebungswinkel

Leistung und Strom bei Dreieck- und Sternschaltung

$P_{\Delta} = 3 \cdot P_Y$

$I_{\Delta} = 3 \cdot I_Y$

- P_{Δ} Leistungsaufnahme in Dreieckschaltung
- P_Y Leistungsaufnahme in Sternschaltung
- I_{Δ} Strom in Dreieckschaltung
- I_Y Strom in Sternschaltung

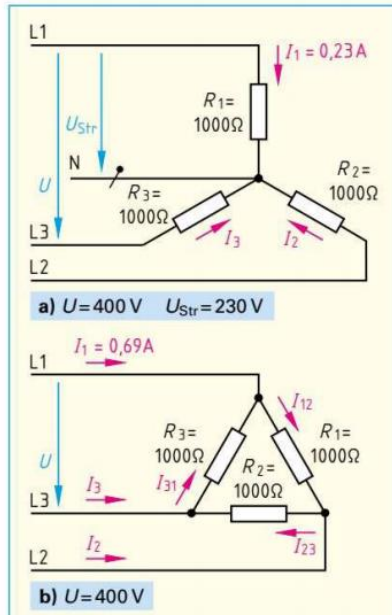


Bild: Schaltung von Wirkwiderständen a) in Sternschaltung b) in Dreieckschaltung

7.9.7 Leistungsmessung in Drehstromsystemen

Für die Leistungsmessung sind nach DIN 43807 bestimmte Messschaltungen vorgeschrieben.

Vierleiter-Drehstromnetz: Bei symmetrischer Last genügt zur Messung der Drehstromleistung ein Leistungsmesser (**Einwattmeter-Schaltung**). Dabei ist es gleichgültig, in welchen der drei Außenleiter der Leistungsmesser geschaltet wird (**Bild 1**). Der abgelesene Wert muss mit dem Faktor 3 multipliziert werden, um die gesamte aufgenommene Leistung in den drei stromführenden Leitern zu ermitteln. Die Skala eines Leistungsmessers für Einwattmeter-Schaltung ist häufig für Drehstromleistung geeicht.

Dreileiter-Drehstromnetz: Im Dreileiter-Drehstromnetz ist kein Sternpunkt und daher auch kein Neutralleiter vorhanden. Man bildet deshalb aus drei Widerständen, nämlich aus dem Widerstand des Spannungspfad und zwei zusätzlichen gleich großen Widerständen, einen künstlichen Sternpunkt (**Bild 2**). Auch bei dieser Schaltung wird die Leistung in nur einem Leiter gemessen und mit dem Faktor 3 multipliziert.

Unsymmetrische Last im Dreileiter-Drehstromnetz kann man mit der Dreiwattmeter-Methode oder nur mit zwei Leistungsmessern in der sogenannten **Aronschaltung** messen (**Bild 3**). Meist wirken die Messsysteme auf eine gemeinsame Achse, sodass das Messgerät die Gesamtleistung anzeigt. Sonst werden die Anzeigen der beiden Messgeräte addiert. Die Schaltung dient auch zur Messung der Leistung in Hochspannungsanlagen.

Wenn bei der Messung höhere Werte für Strom und Spannung zu erwarten sind als es der Messbereich des Leistungsmessers zulässt, verwendet man Strom- und Spannungswandler (**Bild 2**).

Leistungsmessumformer

Leistungsmessumformer (LMU) ermöglichen die Messung von Wirk-, Blind- und Scheinleistung, Leistungsfaktor, Energie und Oberschwingungen (**Seite 308**).

Der Leistungsmessumformer (**Bild 4**) erfasst in der Abtasteinheit die Augenblickswerte der Spannungen und Ströme. Während einer Wechselspannungsperiode wird jeder Messwert mehrfach, z. B. 32-mal, erfasst. Die Werte werden von einem Analog-Digital-Wandler digitalisiert. In einem Mikrocontroller erfolgen die Auswertungen der Ströme und Spannungen und die Berechnung von Leistung, Leistungsfaktor, Energie, je nach Messgerät auch Oberschwingungen (**Seite 308**).

Die berechneten Werte werden am Display digital angezeigt und stehen über die seriellen Schnittstellen zur weiteren Verarbeitung, z. B. im PC, zur Verfügung. In der Analogausgabeeinheit formen ein Digital-Analog-Umsetzer (**Seite 243**) und ein nachgeschalteter Verstärker die berechneten Werte in Analogwerte um, z. B. 0 bis 10 V oder 0 bis 20 mA. Diese können von analogen Messgeräten angezeigt werden.

Mittels der Bedieneinheit wird ausgewählt, welche Messgrößen an den analogen Ausgängen und am Display angezeigt werden.

Im Gegensatz zu elektrodynamischen Messgeräten sind Leistungsmessumformer unabhängig von der Gebrauchslage, unempfindlich gegen Erschütterungen und gut zur Messwertfernübertragung geeignet.

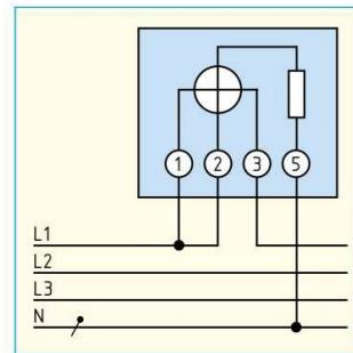


Bild 1: Einwattmeter-Schaltung im Vierleiter-Drehstromnetz

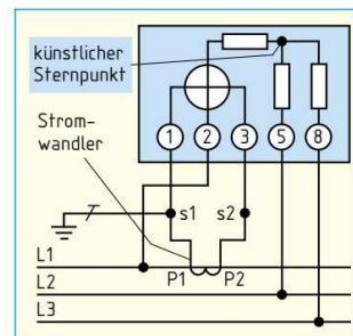


Bild 2: Einwattmeter-Schaltung mit künstlichem Sternpunkt

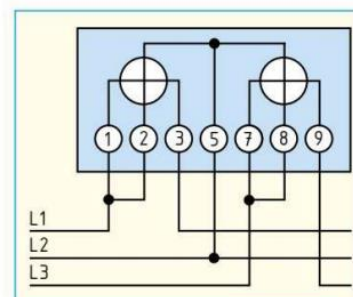


Bild 3: Zweiwattmeter-Schaltung (Aronschaltung)

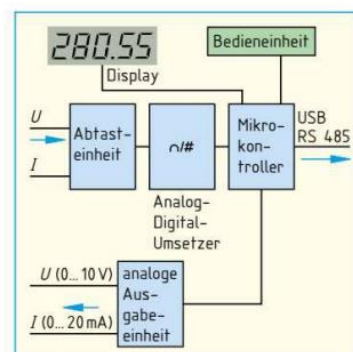


Bild 4: Blockschaubild eines Leistungsmessumformers

13.2 Rotierende elektrische Maschinen

13.2.1 Grundlagen

13.2.1.1 Leistung und Drehmoment

Motoren wandeln die aus dem Versorgungsnetz aufgenommene elektrische Energie in mechanische Arbeit um, Generatoren die mechanische Antriebsarbeit in elektrische Energie.

Die Leistungsabgabe P_2 eines Motors wird durch die Messung von Drehmoment und Drehzahl ermittelt. Die aufgenommene Leistung P_1 ist die dem Netz entnommene Wirkleistung.

In der Maschine entstehen dabei Verluste in Form von Wärme. Die durch Wirbelströme und Umagnetisierung im magnetischen Material verursachten Verluste nennt man **Eisenverluste**. Verluste, die der fließende Strom in den Wicklungswiderständen verursacht, werden als **Wicklungsverluste** bezeichnet. Ferner treten Lüfterverluste sowie Reibungsverluste in den Lagern und an Bürsten auf. Ein Maß für die Gesamtverluste (**Bild 1**) ist der **Wirkungsgrad**.

Der Wirkungsgrad η gibt das Verhältnis der abgegebenen zur aufgenommenen Wirkleistung an.

Bei Motoren wird das Drehmoment M durch das Zusammenwirken von Ständermagnetfeld Φ_E und Läuferstrom I_2 gebildet (**Seite 90**). Der durch den Läuferstab fließende Strom erzeugt um sich ein Magnetfeld. Es entsteht am Läuferstab eine Kraft F (**Bild 2a**). Die Summe dieser Kräfte auf die einzelnen Läuferstäbe bewirkt das Drehmoment M (Motorprinzip).

Durch Messen der Kraft F am Umfang der Antriebscheibe des Motors und der Drehzahl wird die abgegebene Leistung bestimmt (**Bild 2b**).

Moderne Verfahren der Drehmomentmessung benutzen frequenzumrichter-gesteuerte Servomaschinen (**Seite 518**) als Last. Sie sind über Schnittstellen mit dem PC verbunden (**Bild 3**). Diese Technik ermöglicht die Aufnahme der Motorkenngrößen wie Drehmoment, Drehzahl und Strom sowie die Untersuchung des Einschalt- und Lastverhaltens des Motors bei verschiedenartiger Last, z. B. Pumpen- oder Hubantrieb.

Bei Bemessungsleistung mit Bemessungsdrehzahl gibt ein Motor sein Bemessungsmoment ab.

* Nach DIN EN 60027-4 auch: P_{in} für P_1 und P_{out} für P_2

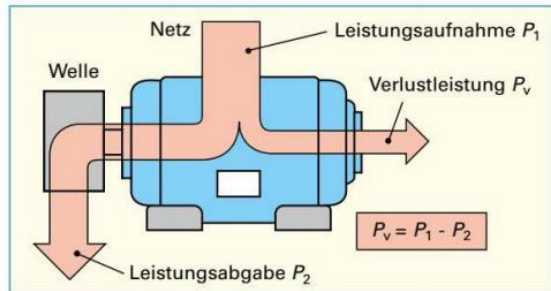


Bild 1: Einteilung der Betriebsarten

Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

η Wirkungsgrad
 P_1^* Leistungsaufnahme
 P_2^* Leistungsabgabe

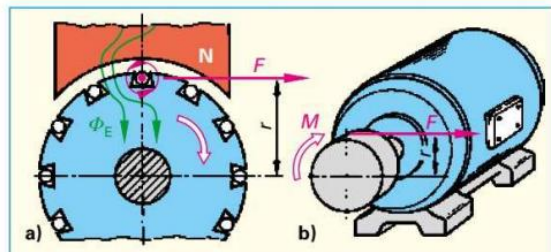


Bild 2: Entstehung der Drehmomente am Läuferstab und an der Antriebscheibe des Motors

Drehmoment und Leistung

$$M = F \cdot r \quad P_2 = \omega \cdot M \quad \omega = 2 \cdot \pi \cdot n$$

$$[M] = \text{Nm} \quad [P] = \text{W} \quad [\omega] = \text{s}^{-1}$$

M Drehmoment
 F Kraft
 r Radius
 P_2 Leistungsabgabe
 ω Winkelgeschwindigkeit
 n Drehzahl in s^{-1}

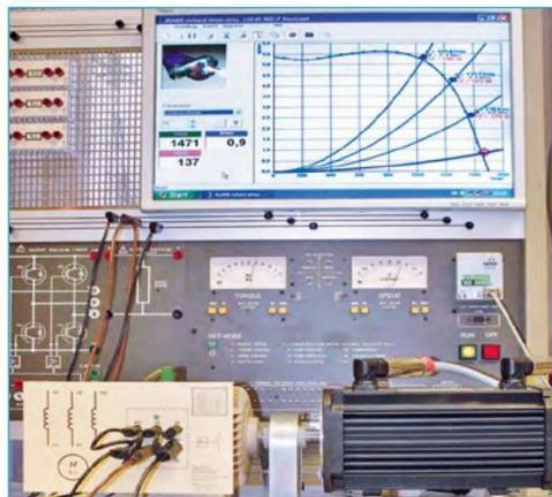


Bild 3: Computergestützter Motormessplatz mit Servomaschine 300 W als Last

13.2.1.2 Aufbau umlaufender Maschinen

Die elektrisch aktiven Teile (**Bild 1**) umlaufender elektrischer Maschinen sind der Ständer (Stator) und der Läufer (Rotor).

Der Ständer besteht aus dem Blechpaket, der Ständerwicklung, die entweder in Nuten am Ständerumfang eingelegt ist oder auf ausgeprägten Polen sitzt, und dem Gehäuse mit Klemmenkasten. An den Wicklungsanschlüssen am Klemmbrett erfolgt der Anschluss der Netzzuleitung (**Bild 1**).

Der Läufer besteht aus der Welle, den Lagern, dem Läuferblechpaket mit eingebrachten Wicklungen und dem Lüfter.

13.2.1.3 Leistungsschild

Die wichtigsten Kennwerte einer Maschine sind auf ihrem Leistungsschild angegeben (**Bild 2**). Dazu gehören die Angabe des Herstellers, die Maschinenart sowie die Bemessungswerte, z. B. von Spannung U_N und Strom I_N sowie der abgegebenen Leistung P_{2N} für die angegebene Betriebsart. Ist keine Betriebsart angegeben, ist die Maschine für Dauerbetrieb (S1, **Seite 483**) bemessen.

Die Bemessungsleistung P_{2N} eines Motors ist die an der Welle verfügbare mechanische Leistung bei Bemessungsdrehzahl n_N .

Weitere Angaben sind z. B. die Thermische Klasse Th. Cl.¹ (Wärmeklasse) und die Schutzart (**Seite 349**). Bei Drehstromasynchronmotoren ist die Wirkungsgradklasse IE² (**Seite 489**) anzugeben.

Beispiel:

Ermitteln Sie für den Motor mit dem Leistungsschild (**Bild 2**) a) Leistungsaufnahme P_1 und b) Drehmoment M bei der Bemessungsleistung P_{2N} (50 Hz).

Lösung:

$P_2 = 5,5 \text{ kW}$ (Leistungsschildangabe)

$$\text{a) } P_1 = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 10,4 \text{ A} \cdot 0,85 = \mathbf{6,12 \text{ kW}}$$

$$\text{b) } M = \frac{P_{2N}}{\omega} = \frac{P_{2N}}{2 \cdot \pi \cdot n} = \frac{5500 \text{ W}}{2 \cdot \pi \cdot 1450 \cdot 1/60 \text{ s}} = \mathbf{36,2 \text{ Nm}}$$

13.2.1.4 Drehsinn

Der Drehsinn ist die Drehrichtung einer Maschine mit Blick auf das Wellenende der Antriebsseite (**Bild 3**).

Drehrichtung im Uhrzeigersinn gilt als Rechtslauf, Drehrichtung gegen den Uhrzeigersinn als Linkslauf.

Bei zwei ausgeführten Wellenenden ermittelt man die Drehrichtung durch Betrachtung der Hauptwelle (D-Seite³). Hauptwelle ist die Welle mit dem dickeren Wellenende. Bei Wellen gleicher Dicke gilt als Hauptwelle die Welle, die sich gegenüber Lüfter, Kollektor oder Schleifringen (N-Seite⁴) befindet.

Die Drehrichtung eines Motors wird durch Schaltung seiner Wicklungen und dem Netzanschluss am Klemmbrett festgelegt.

Drehstrommotoren haben Rechtslauf, wenn die Außenleiter L1, L2 und L3 auf die Klemmen U1, V1 und W1 des Klemmbrettes geführt werden (Drehrichtungsumkehr von Drehstrommotoren: **Seite 494**).

¹ Th. Cl., Abk. für: Thermal Class (engl.) = Thermische Klasse

² IE, Abk. für: International Efficiency (engl.) = Internationale Wirkungsgradklasse

³ drive end (engl.) = Antriebsseite

⁴ non-drive end (engl.) = Nichtantriebsseite



Bild 1: Aufbau eines Drehstrommotors

Hersteller		3-Mot.	IE3	CE
Made in Germany	62	kg	IM B3	132S
50 Hz	400 V Δ	60 Hz	460 V Δ	Th.Cl. 155
5,5 kW	10,4 A	6,3 kW	10,2 A	
cos φ	0,85	1450 1/min	PF	0,85 1740 RPM
IE 3 – 89,6%		IE 3 – 91,7%		
IEC/EN 60034				

Bild 2: Leistungsschild eines Drehstrommotors für 50 Hz und 60 Hz

Leistungen bei Drehstrommotoren

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

$$P_2 = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot \eta$$

P_1	Leistungsaufnahme
P_2	Leistungsabgabe
U	Leiterspannung
I	Leiterstrom
$\cos \varphi$	Wirkfaktor
η	Wirkungsgrad

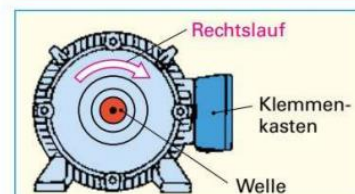


Bild 3: Bestimmung der Drehrichtung mit Blick auf die Antriebsseite

- Prüfen der Drehfeldrichtung: **Seite 375**
- Drehrichtung von Gleichstrommotoren: **Seite 512**

13.2.15 Betriebsarten elektrischer Maschinen

Elektromotoren dürfen im Betrieb thermisch nicht überlastet werden, d.h. nicht zu heiß werden. Bei der Auswahl von Elektromotoren spielt daher die Betriebsart eine wichtige Rolle. DIN EN 60034-1 (VDE 0530-1) unterscheidet die Betriebsarten S1 bis S10 (Bild 1 und Tabelle).

Die Betriebsart eines Motors ist auf seinem Leistungsschild angegeben, wobei die Angabe der Betriebsart S1 entfallen kann.

Betriebsart S1. Dauerbetrieb ist ein zeitlich nicht begrenzter Betrieb mit konstanter Belastung. Bei Erreichen des thermischen Beharrungszustandes besteht ein Gleichgewicht zwischen entstehender Verlustwärme und Wärmeabfuhr.

Bei kurzzeitigem Betrieb erwärmt sich ein Motor weniger als bei Dauerbetrieb. Das heißt, Motoren für Kurzzeitbetrieb werden überlastet, wenn sie im Dauerbetrieb eingesetzt werden.

Beispiel:

Mit welcher Leistung darf ein Motor der Betriebsart S3 40 % mit einer Bemessungsleistung von 5,5 kW belastet werden, wenn er im Dauerbetrieb eingesetzt wird?

Lösung:

$$P_2 = P_1 \cdot \sqrt{\frac{ED_1}{ED_2}} = 5,5 \text{ kW} \cdot \sqrt{\frac{40 \%}{100 \%}}$$

$P_2 = 3,48 \text{ kW}$

Der Motor darf im Dauerbetrieb nur noch mit 3,48 kW belastet werden.

Kurzzeitbetrieb S2. Die **Betriebsdauer mit konstanter Belastung** ist so kurz, dass die Beharrungstemperatur nicht erreicht wird. In der anschließenden Pause kühlt die Maschine wieder auf die Kühlmitteltemperatur (z.B. Umgebungslufttemperatur) ab. DIN EN 60034-1 unterscheidet bei Kurzzeitbetrieb 10 min, 30 min, 60 min oder 90 min **Betriebszeit Δt_p** . Sie wird auf dem Leistungsschild angegeben, z.B. S2 10 min.

Periodischen Aussetzbetrieb S3, S4, S5. Betriebsdauer und Pausen sind kurz. In den Pausen mit stromloser Wicklung erfolgt keine Abkühlung der Maschine auf die Kühlmitteltemperatur. Die **Spieldauer T_c** beträgt normalerweise 10 min.

Die **Einschaltdauer ED** ist die **Betriebszeit Δt_p** während der Spieldauer T_c . Sie kann 15 %, 25 %, 40 % oder 60 % betragen und ist auf dem Leistungsschild angegeben, z.B. S3 25 %.

Weitere Betriebsarten sind S6 bis S10, bei denen der Dauerbetrieb mit Last- und Drehzahländerungen verbunden ist.

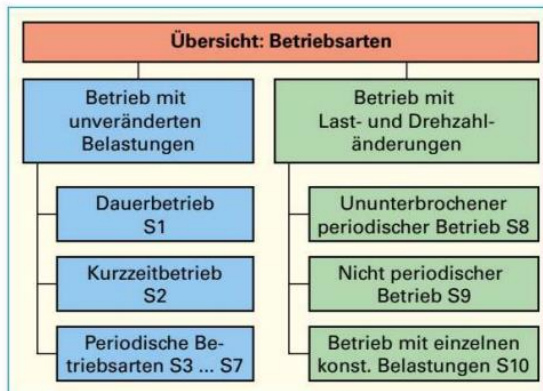


Bild 1: Einteilung der Betriebsarten

Tabelle: Betriebsarten von Motoren nach DIN EN 60034-1 (Beispiele)	
Betriebsart	Anwendungen
<p>Dauerbetrieb S1</p>	Umwälzpumpen, Rolltreppenantriebe, Ventilatoren
<p>Kurzzeitbetrieb S2</p>	Kühlschranksmotoren, Garagentorantriebe, Kaffeemühlen
<p>Aussetzbetrieb S3</p>	Kompressorantriebe, Hebezeugmotoren, Werkzeugmaschinen
<p>Ununterbrochener periodischer Betrieb S6</p>	Antrieb von Werkzeugmaschinen
<p>P Belastung ϑ Betriebstemperatur ϑ_{max} maximale Betriebstemperatur T_c Spieldauer Δt_p Betriebszeit mit konstanter Belastung Δt_v Leerlaufzeit</p>	
<p>Umrechnung zwischen Betriebsarten unterschiedlicher Einschaltdauer im Aussetzbetrieb</p> $ED = \frac{\Delta t_p}{T_c} \cdot 100 \% \qquad P_2 = P_1 \cdot \sqrt{\frac{ED_1}{ED_2}}$ <p>ED_1 alte Einschaltdauer P_1 Leistung alt ED_2 neue Einschaltdauer P_2 Leistung neu</p>	

13.2.1.6 Kühlung elektrischer Maschinen

In den Wicklungen elektrischer Maschinen entstehen Wärmeverluste. Durch gute Kühlung ist es möglich, Maschinen bei gleicher Leistung kleiner zu bauen oder ihre Leistung bei gleicher Baugröße zu erhöhen.

Die Bemessungsleistungen von Elektromotoren sind meist für eine Kühlmitteltemperatur bzw. eine Umgebungstemperatur von 40 °C ausgelegt.

Erhöht sich die Temperatur des Kühlmittels z. B. von 40 °C auf 60 °C, muss die Leistungsabgabe auf etwa 80 % reduziert werden, um ein Überschreiten der zulässigen Grenzübertemperatur (**Seite 485**) zu vermeiden.

Die Kühlungsarten (**Bild 1**) werden nach der Kühlmittelbewegung und ihrer Wirkungsweise (Kühlmittelführung) unterschieden (DIN EN 60034).

Selbstkühlung haben Maschinen ohne Lüfter. Die Verlustwärme wird durch Abstrahlung und Luftbewegung abgeführt. Kleinmotoren haben meist Selbstkühlung, z. B. Universalmotoren oder Spaltmotoren für Haushaltsgeräte. Durch den offenen Einbau des Motors im Gerät verursacht die Läuferdrehung eine ausreichende Luftbewegung.

Eigenkühlung haben Motoren, deren Lüfter am Läufer angebracht sind oder durch diesen angetrieben werden. Anwendung findet sie bei Motoren für Dauerbetrieb. Die Kühlmittelführung kann als Innenkühlung oder als Oberflächenkühlung erfolgen (**Bild 2**). Bei **Innenkühlung** wird die Wärme im Motor an die durchströmende Luft abgegeben. Bei der **Oberflächenkühlung** befindet sich das Lüfterrad außerhalb des Motorraumes und bläst die Kühlluft über die mit Kühlrippen versehene Gehäuseoberfläche. Die meisten Drehstromasynchronmotoren sind geschlossene Maschinen mit Oberflächenkühlung, z. B. in Schutzart IP 54.

Fremdkühlung haben Motoren mit einem von der Läuferdrehzahl unabhängigen Antrieb für die Kühlmittelbewegung, z. B. einen Lüftermotor bei Luft- oder Gaskühlung, z. B. Wasserstoff.

Drehzahlgesteuerte Motoren, die bei Vollast mit kleinen Drehzahlen betrieben werden, eine hohe Schalthäufigkeit haben (Betriebsart S3 und höher) oder z. B. die Kühlluft nicht der Umgebung entnehmen können, benötigen Fremdkühlung. Bei **Kreislaufkühlung** kann die Wärme über ein Zwischenkühlmittel abgeführt werden, z. B. über einen Wasserkühlkreis.

Zur vorbeugenden Instandhaltung kann die Erwärmung von Motoren mittels Thermografieverfahren analysiert werden (**Bild 3**).

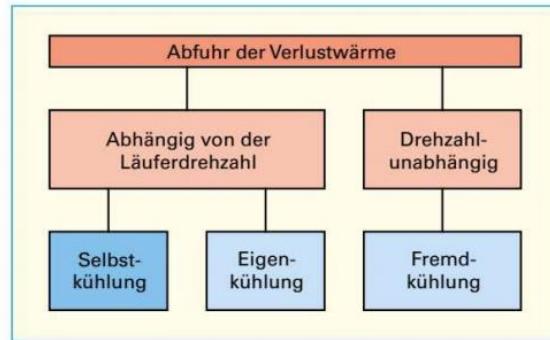


Bild 1: Arten der Kühlung bei Motoren

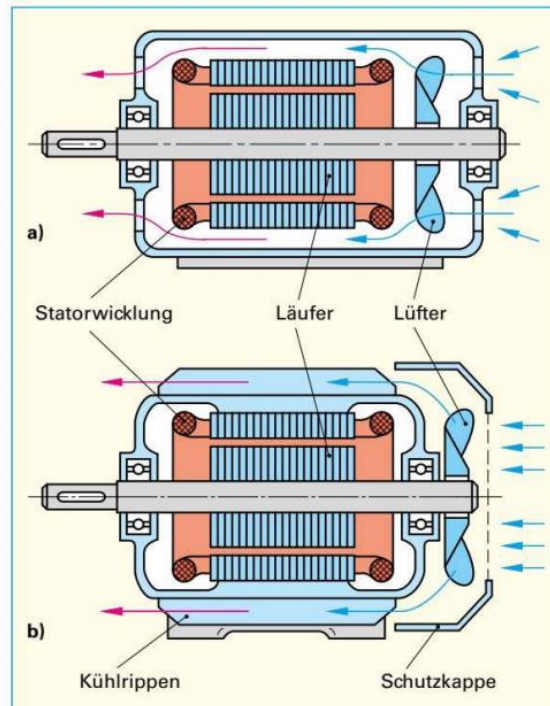


Bild 2: Eigenkühlung durch a) Innenkühlung, b) Oberflächenkühlung



Bild 3: Infrarot-Thermografie zeigt auffälligen Elektromotor (Bildmitte)

13.2.1.7 Bauformen und Baugrößen von drehenden elektrischen Maschinen

Für die verschiedenen Anwendungen von Motoren sind unterschiedliche **Bauformen** und **Baugrößen** erforderlich. Die Bauformen und Baugrößen von Motoren sind genormt nach DIN EN 60034-7 (DIN VDE 530-7). Man bezeichnet solche Motoren als **Normmotoren**.

Bei den Bauformen (**Tabelle 1**) unterscheidet man Motoren mit Fuß- oder/und Flanschbefestigung. Sie haben als Kurzzeichen nach IM¹ einen Buchstaben mit anschließender Ziffer, z. B. IM B3 (Code I) oder vier Ziffern, z. B. IM 1001 (Code II) für einen Motor mit Fußbefestigung.

Die Bauform bestimmt die Befestigung, die Lageranordnung und die Wellenausführung drehender elektrischer Maschinen.

Maßgeblich für die Abmessungen der Motoren ist die Baugröße. Die Baugröße kennzeichnet die **Baulänge** und die **Achshöhe**. Die Bezeichnungen S (short), M (middle) oder L (large) beziehen sich auf die Länge der Motoren. Die in der Baugröße angegebenen Ziffern geben die Achshöhe an (**Bild**). Dies ist das Maß von der Aufspannebene (bei Fußmotoren) bis zur Wellenmitte in mm. Die Normreihe umfasst die Baugrößen 56 bis 450.

Motoren gleicher Bauform haben gleiche Abmessungen und gleiche Bemessungswerte. Durch die Verwendung von Normmotoren ist für einen bestimmten Anwendungsfall sichergestellt, dass man Motoren verschiedener Hersteller verwenden kann.

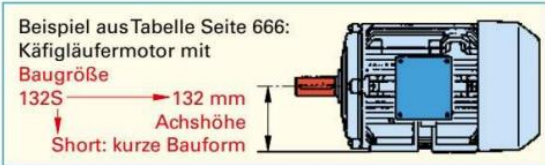


Bild 1: Achshöhe eines Motors mit Fußbefestigung

Tabelle 1: Bauformen elektrischer Maschinen (Auswahl nach DIN EN 60034-7)

IEC Code I Code II	Bauform	Merkmale
IM B3 IM 1001		Zwei Schildlager, ein freies Wellenende, Befestigungsfüße für stehende Befestigung.
IM V1 IM 3011		Zwei Schildlager, Befestigungsflansch, Flansch und freie Welle unten.

Tabelle 2: Thermische Klassifikation von Isoliermaterialien (Auswahl nach DIN EN 60085 [DIN VDE 0301, Teil 1-1]:2008-08)

Thermische Klasse °C	Buchstabenbezeichnung*	Isolierstoffe Beispiele
120	E	Hartpapier, Hartgewebe, ausgehärtete Pressmassen
130	B	Glasfaserprodukte, Silikat-Fiber, Glimmer mit Bindemitteln
155	F	Glasfaser, Glimmer mit Kunstharz getränkt
180	H	Silikone, Glimmer, Glas

* Falls gewünscht, kann die Buchstabenbezeichnung in Klammern hinzugefügt werden, z. B. 180 (H).

13.2.1.8 Elektrische Isolierung

Die beim Betrieb auftretenden Verluste führen zur Erwärmung der elektrischen Maschine. Zu hohe Erwärmung zerstört die Isolation und macht die Maschine unbrauchbar.

Thermische Klassifikation (Isolierstoffklassen). Im Betrieb erhöht sich die Temperatur in Wicklungen und anderen Maschinenteilen, bis ein Gleichgewicht zwischen Verlustwärme und abgeführter Wärme entsteht. Dabei darf die höchstens zulässige Gebrauchstemperatur, für die das Isoliermaterial geeignet ist, nicht überschritten werden (**Tabelle 2**).

Die zulässige Temperaturzunahme wird als **Grenzübertemperatur** bezeichnet. Sie wird als Übertemperatur über der Temperatur des Kühlmittels, bei Luftkühlung einer Raumtemperatur von 40 °C abzüglich eines Sicherheitsabstandes von 10 K angegeben. Bei elektrischen Maschinen sind für eine maximale Umgebungstemperatur von 40 °C bei den meisten Wicklungen Grenzübertemperaturen von 75 K bis 100 K zulässig. Glimmer, Silikat-Fiber und Glaserzeugnisse, ebenso Silikone, lassen z. T. eine Grenzübertemperatur von 125 K zu.

Auswahl eines Elektromotors:
Seiten 496 und 497

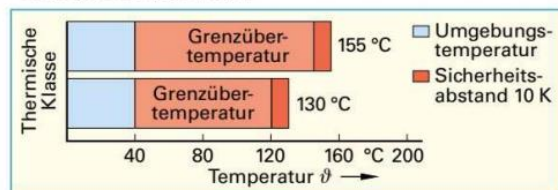


Bild 2: Grenzübertemperatur (Auswahl)

¹ IM, Abk. für: International Mounting (engl.) = internationale Montage

13.2.2 Drehstromasynchronmotoren

Asynchronmotoren sind die meist verwendeten Drehstrommotoren. Die Asynchronmotoren unterscheiden sich im Läuferaufbau. Asynchronmotoren werden mit Kurzschlussläufer (Seite 487) und mit Schleifringläufer (Seite 492) hergestellt. Das Drehfeld bildet die Basis für die Arbeitsweise dieser Motoren.

13.2.2.1 Entstehung des Drehfeldes

Ein Drehfeld ist ein drehendes magnetisches Feld, das durch einen konstanten Betrag und konstante Drehzahl gekennzeichnet ist. Es wird erzeugt, indem ein Dauermagnet oder ein von Gleichstrom erregter Elektromagnet um seinen Mittelpunkt rotiert. Ein Drehfeld entsteht auch, wenn ein Dreiphasen-Wechselstrom drei um 120° räumlich versetzt angeordnete Spulen (Bild 1a) durchfließt. Daher rührt auch die Bezeichnung **Drehstrom**. Praktisch üblich ist die Unterbringung der Spulen in den Nuten des Ständerblechpaketes als verteilte Drehstromwicklung (Bild 1b).

Jede der Spulen erzeugt ein magnetisches Wechselfeld. Diese Magnetfelder überlagern sich zu einem **resultierenden Feld**, dessen Lage von den Momentanwerten der um 120° phasenverschobenen Ströme abhängt (Bild 2). Bei drei Spulen entsteht ein zweipoliges Drehfeld (Bild 2a), bei sechs um jeweils 60° versetzten Spulen ein vierpoliges Drehfeld (Bild 2b). Bei einer zweipoligen Wicklung macht das Drehfeld während einer Periode eine Umdrehung, bei einer vierpoligen Wicklung nur eine halbe Umdrehung.

Die Drehfeldfrequenz n_s wird bestimmt durch die Netzfrequenz f und die Polpaarzahl p .

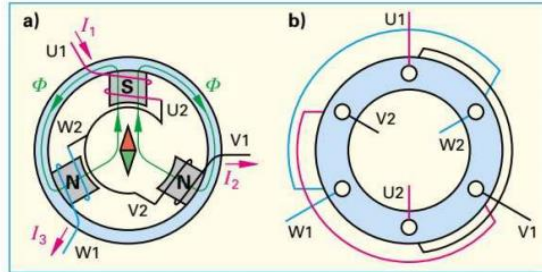


Bild 1: Ständeraufbau für ein zweipoliges Drehfeld
 a) mit drei um 120° versetzten Spulen
 b) mit im Ständerblechpaket untergebrachter, verteilter Drehstromwicklung

Drehfeldfrequenz			
$n_s = \frac{f}{p}$		$[n_s] = \frac{1}{s}$	
n_s	Drehfeldfrequenz (Umdrehungsfrequenz)		
f	Netzfrequenz		
p	Polpaarzahl		
Drehzahlen des Drehfeldes bei $f = 50 \text{ Hz}$			
p	n_s in 1/min	p	n_s in 1/min
1	3000	3	1000
2	1500	4	750

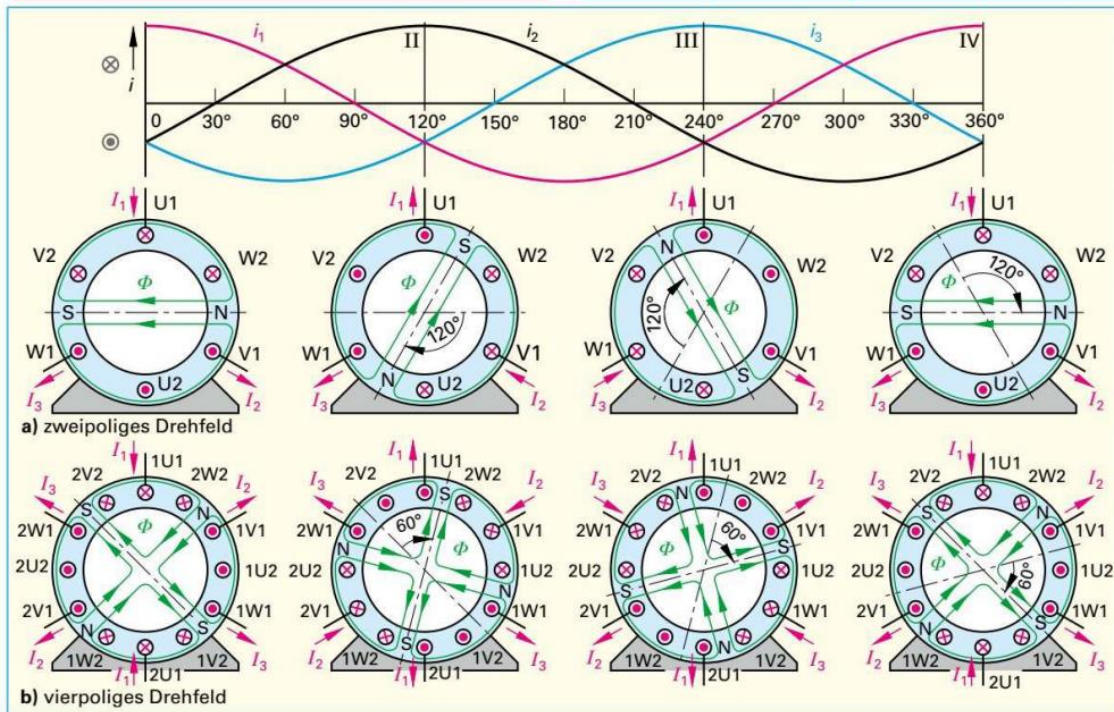


Bild 2: Entstehung des Drehfeldes

13.2.2.2 Kurzschlussläufermotor

Aufbau. Der Ständer besteht aus dem Gehäuse, dem Ständerblechpaket und der Ständerwicklung, die in den Nuten des Ständerblechpaketes eingelegt ist. Die Ständerwicklung ist eine Drehstromwicklung, deren Wicklungsanfänge und -enden an das Klemmbrett geführt sind.

Nuten am Umfang des Läuferblechpaketes nehmen die aus Läuferstäben bestehende Läuferwicklung auf. Die Läuferstäbe sind an den Stirnseiten des Blechpaketes durch Kurzschlussringe verbunden. Daher die Bezeichnung Kurzschlussläufer. Da die Wicklung die Form eines Käfigs hat, bezeichnet man diese auch als **Käfigwicklung** (Bild 1, Seite 489).

Zur Verminderung der Wirbelstromverluste sind Ständer und Läufer aus isolierten Elektroblechen, die zu Paketen geschichtet sind, aufgebaut.

i Kurzschlussläufermotoren werden für Leistungen von 0,06 kW bis 630 kW hergestellt.

Wirkungsweise. Der Kurzschlussläufermotor entspricht im Einschaltmoment einem kurzgeschlossenen Transformator. Die Käfigwicklung kann als Wicklung einfachster Form angesehen werden. Das Drehfeld der Ständerwicklung bewirkt eine Flussänderung in den Leiterschleifen des zunächst stillstehenden Läufers und induziert eine Spannung. Die induzierte Spannung lässt Strom in der Käfigwicklung fließen (Bild 2).

Asynchronmotoren sind Induktionsmotoren. Der Läuferstrom kommt durch Induktion zu Stande.

Nach der lenzschen Regel bewirkt das erzeugte Magnetfeld ein Drehmoment, das den Läufer in Drehrichtung des Ständerdrehfeldes dreht.

Mit steigender Läuferdrehzahl n nimmt die Flussänderungsgeschwindigkeit ab. Folglich sinkt auch die Induktionsspannung im Läufer. Würde der Läufer die Drehfelddrehzahl n_s erreichen, wäre die Flussänderungsgeschwindigkeit null. Der Strom in der Käfigwicklung wäre null und damit das Drehmoment, das die Drehung bewirkt. Die Läuferdrehzahl n ist daher stets kleiner als die Drehfelddrehzahl n_s (asynchron). Die Differenz ist die **Schlupfdrehzahl** Δn . Im Leerlauf erzeugt der Motor ein Drehmoment zur Deckung der Lager- und Luftreibung.

Asynchronmotoren benötigen einen Schlupf s zum Induzieren des Läuferstromes.

Der Schlupf s wird meist in Prozent, bezogen auf die Drehzahl des Drehfeldes, angegeben. Er beträgt bei Motoren bis 5,5 kW etwa 3,5 % bis 6 %, bei Motoren größerer Leistung verringert er sich bis etwa 2,5 %.

- <https://new.siemens.com/global/de/produkte/antriebstechnik/elektromotoren/niederspannungsmotoren/simotics-gp.html>
- www.kueenle.de/produkte-dienstleistungen.html
- <https://www.lenze.com/de-de/produkte/motoren/drehstrommotoren-netzbetrieb/>

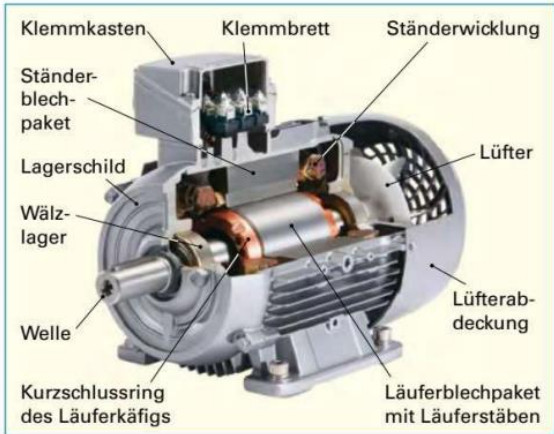


Bild 1: Drehstrom-Kurzschlussläufermotor (IE3-Motor)

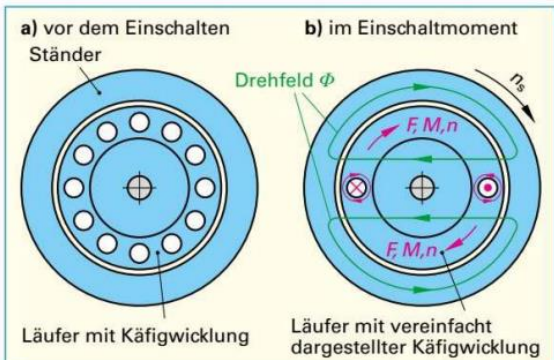


Bild 2: Induktionswirkung und Drehmomentbildung beim Käfigläufer

Schlupf bei Asynchronmotoren

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 \%$$

$$\Delta n = n_s - n$$

- Δn Schlupfdrehzahl
- n Läuferdrehzahl
- n_s Drehfelddrehzahl
- s Schlupf in %

Beispiel:

Ein vierpoliger Drehstrommotor für 50 Hz hat eine Läuferdrehzahl von 1440 1/min. Wie groß ist sein Schlupf?

Lösung:

$$n_s = \frac{f}{p} = \frac{50 \text{ Hz}}{2} = 25 \text{ 1/s} = 1500 \text{ 1/min}$$

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 \%$$

$$= \frac{(1500 - 1440) \text{ 1/min}}{1500 \text{ 1/min}} \cdot 100 \% = 4 \%$$

Betriebsverhalten. Kurzschlussläufer werden als **Rundstabläufer** oder als **Stromverdrängungsläufer** (Bild 2, Seite 489) hergestellt.

Das prinzipielle Betriebsverhalten soll am Rundstabläufer erklärt werden. Sein Käfig besteht aus nahezu runden Stabquerschnitten. Ihr ohmscher Widerstand R_L ist sehr klein. Im Verhältnis dazu ist der induktive Blindwiderstand X_L der Läuferwicklung im Einschaltmoment viel größer (Bild 1a). Ursache ist die Frequenz der Läufer Spannung, die wie die Läufer Spannung im Einschaltmoment maximal ist. Der hohe Anlaufstrom ist überwiegend Blindstrom, der nicht zur Drehmomentbildung beiträgt.

Rundstabläufer besitzen trotz hoher Anlaufströme nur ein geringes Anlaufmoment, da der Wirkfaktor $\cos \varphi$ des Stromes sehr klein ist.

Die **Hochlaufkennlinie** (Bild 2) zeigt die Drehmomentbildung des Motors beim Hochlauf. Das **Sattelmoment** M_S ist das kleinste Motormoment nach dem Anlauf. Durch unterschiedliche Nutzzahlen in Ständer und Läufer, spezielle Wicklungsausführung und durch schräg oder gestaffelt angeordnete Läuferstäbe (Bild 1, Seite 489) kann eine Sattelmomentbildung vermieden werden.

Mit steigender Drehzahl verringern sich Betrag und Frequenz der induzierten Läufer Spannung. Damit sinkt auch der induktive Blindwiderstand des Läufers X_L , der Wirkwiderstand R_L bleibt jedoch gleich. Folglich steigt der Wirkfaktor $\cos \varphi_L$ im Läuferstromkreis (Bild 1b). Daher kann das Drehmoment trotz kleiner werdenden Läuferstromes seinen größten Wert, das **Kippmoment** M_K , erreichen. Anschließend wirkt sich der Rückgang des Läuferstromes verstärkt aus und verringert das Motormoment. Beim **Bemessungsmoment** M_N (Bemessungslast) hat der Motor die **Bemessungsdrehzahl** n_N (Bild 2). Im Leerlauf erreicht er die Leerlaufdrehzahl n_0 .

Die **Belastungskennlinie** (Bild 3) zeigt die Abhängigkeit der Motordrehzahl vom Motordrehmoment. Eine große Laständerung ΔM im Arbeitsbereich bewirkt nur eine geringfügige Änderung der Läuferdrehzahl Δn (hartes Betriebsverhalten).

Beispiel:

Bestimmen Sie mithilfe der Motorbetriebsdaten auf Seite 666 alle Drehzahl- und Drehmomentwerte für den zweipoligen Motor mit der Baugröße 132S.

Lösung:

Drehfeldfrequenz:

Zweipolig \rightarrow Polpaarzahl $p = 1: n_s = 3000 \text{ }^1/\text{min}$

Bemessungsdrehzahl: $n_N = 2950 \text{ }^1/\text{min}$

Bemessungsmoment: $M_N = 17,8 \text{ Nm}$

Alaufmoment: $M_A/M_N = 2,4 \rightarrow M_A = 2,4 \cdot M_N = 2,4 \cdot 17,8 \text{ Nm}$
 $M_A = 42,7 \text{ Nm}$

¹ Formelzeichen nach DIN EN 60027: T (Abk. für: torque [engl.] = Drehmoment) anstelle M

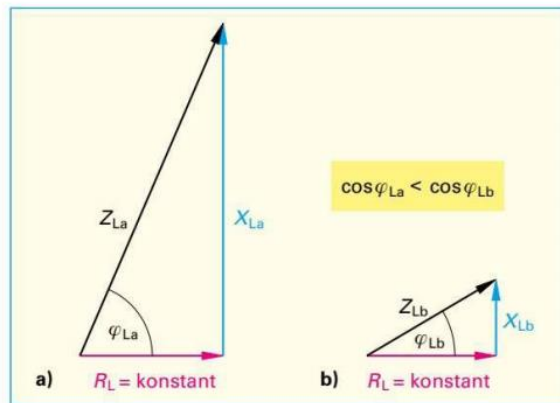


Bild 1: Zeigerbilder der Läuferwiderstände (Prinzip) für a) Anlauf und b) Bemessungslast

Benennungen der Drehmomente¹:

M_A Anlaufmoment	M_N Bemessungsmoment
M_S Sattelmoment	M_0 Leerlaufmoment
M_K Kippmoment	

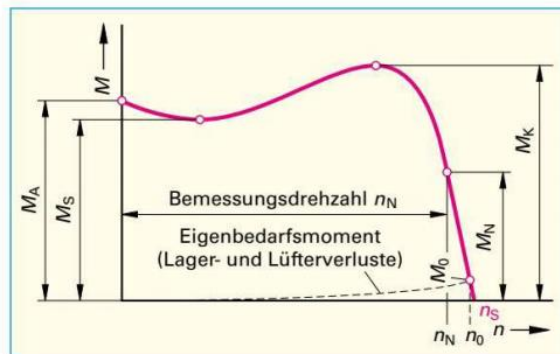


Bild 2: Hochlaufkennlinie eines Kurzschlussläufermotors $M = f(n)$

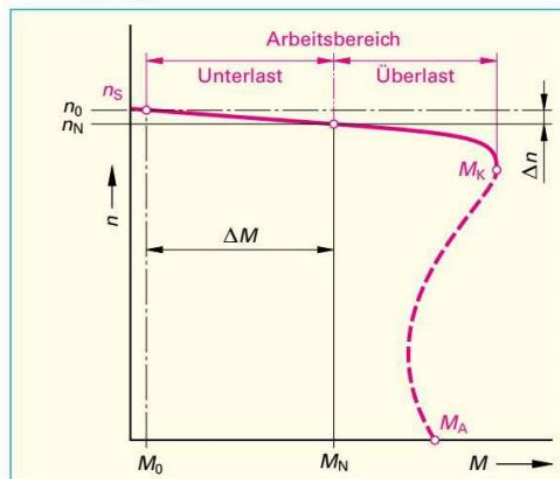


Bild 3: Belastungskennlinie eines Kurzschlussläufermotors $n = f(M)$

Anschließen eines Drehstromasynchronmotors: **Praxistipp Seite 494.**

Stromverdrängungsläufer

Um ein höheres Anlaufmoment bei zugleich kleinerem Anlaufstrom zu erreichen, verwendet man gegenüber dem einfachen Käfigläufer (Bild 1) Stromverdrängungsläufer mit unterschiedlichen Nutformen (Bild 2a).

Der Stromverdrängungseffekt soll am Doppelkäfigläufer erklärt werden. Er beruht darauf, dass der Läuferstrom um jeden Läuferstab ein magnetisches Streufeld erzeugt (Bild 2b). Beide Streufelder induzieren in den Läuferstäben Spannungen. Diese Spannungen versuchen, die sie verursachenden Wechselströme zu verringern (lensche Regel). Der magnetische Streufluss um den unteren Läuferstab ist stärker, da er von beiden Läuferstäben erzeugt wird und sich die Feldlinien dort im Eisenpaket schließen können. Hier ist die stromverringere Wirkung deshalb größer als im oberen Stab. Der Strom wird dadurch in Richtung Luftspalt, also zum Läuferaußenrand „verdrängt“. Der nun höhere Läuferwiderstand verringert gleichzeitig die Phasenverschiebung, sodass trotz des kleineren Anlaufstromes der Wirkleistungsanteil steigt. Ergebnis ist ein höheres Anlaufmoment bei gleichzeitig geringerem Anlaufstrom (Bild 3).

Mit steigender Drehzahl verringert sich dieser Effekt, weil die Frequenz der Läufer Spannung und damit die Streuung abnehmen. Bei Bemessungsdrehzahl steht dem Strom der ganze Nutquerschnitt zur Verfügung. Wegen des besseren Anlaufverhaltens haben Kurzschlussläufermotoren meist Stromverdrängungsläufer.

Stromverdrängungsläufer haben ein großes Anlaufmoment bei kleinem Anlaufstrom.

Anwendung. Kurzschlussläufermotoren dienen als Antriebsmaschine von z. B. Sägen, Hebezeugen, Gebläsen und Werkzeugmaschinen.

Kurzschlussläufermotoren sind preisgünstig in der Herstellung, wartungsarm und funktstörungsfrei.

Der Betrieb mit Bemessungslast ist am wirtschaftlichsten. Der Motor arbeitet dann mit hohem Wirkungsgrad und großem Wirkfaktor (Bild 4).

Energiesparmotoren (Tabelle) benötigen bei gleicher Leistung weniger Energie als herkömmliche Motoren. Durch Kupferstäbe im Läufer anstelle von Aluminium erreichen sie einen höheren Wirkungsgrad. Trotz höherer Anschaffungskosten sind Energiesparmotoren oft die wirtschaftlichere Antriebslösung, denn über 90 % der Lebenszykluskosten eines Motors sind Energiekosten.

¹ ab 01/2015 mindestens IE3 für Motoren von 0,75 kW bis 375 kW oder IE2 mit Frequenzumrichter

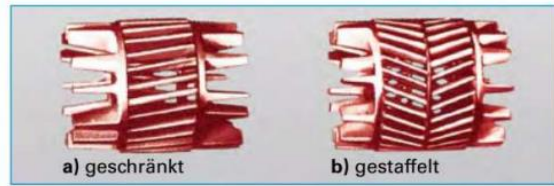


Bild 1: Ausführungen von Käfigläufern (ohne Blechpaket)

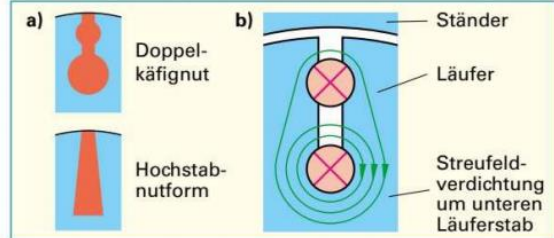


Bild 2: Nutformen von Käfigläufermotoren und Stromverdrängung (Doppelkäfigläufer)

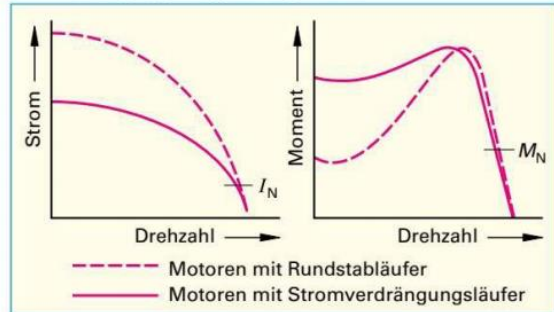


Bild 3: Stromaufnahme und Drehmoment

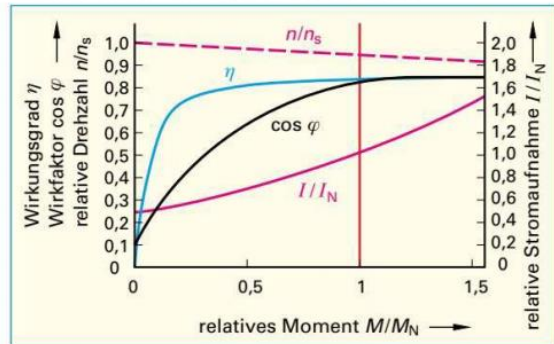


Bild 4: Typische Kennlinien für Kurzschlussläufermotoren mit Leistungen von 2 kW bis 5 kW

Tabelle: Energiesparmotoren¹, Klassifizierung nach DIN EN 60034-30:2014 für Leistungsbereich von 0,12 kW bis 1000 kW, 50 Hz und 60 Hz

Wirkungsgrad Motoren	IEC-Bezeichnung	Beispiel: Motor 5,5 kW, 2-polig
Super-Premium	IE4*	90,9 %
Premium	IE3	89,2 %
Hoch	IE2	87,0 %
Standard	IE1	84,7 %

* IE, Abk. für: International Efficiency (engl.) = Internationale Wirkungsgradklasse

13.2.2.3 Anlassen von Kurzschlussläufermotoren

Ständeranlassverfahren. Kurzschlussläufermotoren verursachen Anlassprobleme (Tabelle 1). Um Beeinträchtigungen im Netz zu vermeiden, sind die technischen Anschlussbedingungen für Motoren (Tabelle 2) der Netzbetreiber zu beachten.

Bei Drehstrommotoren mit Anlaufströmen¹ über 60 A sind Anlassverfahren erforderlich.

Beispiel:

Beurteilen Sie mithilfe der Tabelle, Seite 666, ob für den Drehstrom-Käfigläufermotor 5,5 kW mit der Baugröße 132S und der Drehfeldrehzahl $n_s = 3000 \text{ min}^{-1}$ ein Anlassverfahren erforderlich ist.

Lösung:

Aus Tabelle, Seite 666: $I_A/I_N = 7,3$; $I_N = 9,9 \text{ A}$;

$I_A = 7,3 \cdot I_N = 7,3 \cdot 9,9 \text{ A}$

$I_A = 72,3 \text{ A} > 60 \text{ A} \rightarrow$ Anlassverfahren ist erforderlich

Häufige Ständeranlassverfahren sind:

- Stern-Dreieck-Anlassverfahren (Bild 1a),
- elektronische Sanftanlaufgeräte (Softstarter) (Bild 1b),
- Frequenzumrichter (Bild 1c und Seite 270).

Bei Antriebsaufgaben ist ein sicherer Anlauf nur möglich, wenn das Motordrehmoment größer ist als das Widerstandsmoment M_W der Arbeitsmaschine (Seite 496).

Die Anlassverfahren setzen die Ständerspannung am Motor herab. Dabei verringert sich der Anlaufstrom I_A proportional zur Spannung, das Anlaufmoment M_A jedoch quadratisch. Deshalb entwickelt der Motor bei halber Bemessungsspannung nur noch ein Viertel seines Drehmomentes. Ist das Anlaufmoment dann kleiner als das Widerstandsmoment, ist ein Anlauf des Motors nicht mehr möglich (Bild 2).

Ständeranlassverfahren verringern das Anlaufmoment sehr stark.

Stern-Dreieck-Anlassverfahren

Motoren, deren zulässige Strangspannung der Leiter-spannung des Netzes entspricht, werden in Dreieckschaltung betrieben. Erfolgt der Anlauf in Sternschaltung, so wird die Strangspannung um den Faktor $1/\sqrt{3}$ verringert. Nach den Gesetzmäßigkeiten der Drehstromverketzung sinkt damit der Strom in der Zuleitung auf ein Drittel, aber auch das Drehmoment und die Motorleistung.

Das Verfahren eignet sich daher für Antriebe mit geringem Anlaufmoment wie z. B. für Pumpen oder Sägen. Am öffentlichen Netz ist es anwendbar für Motoren mit Leistungen bis 11 kW.

¹ auch Anzugsstrom oder Anlassstrom

² Technische Anschlussbedingungen des Netzbetreibers

Tabelle 1: Anlassprobleme bei Drehstrommotoren

Elektrische	Mechanische
Netzurückwirkung: Hoher Anlaufstrom bewirkt Spannungsabsenkung im Netz	Stoßbelastungen: durch hohes Anlaufmoment von z. B. Getrieben

Tabelle 2: Direktes Einschalten nach TAB² für Motoren im öffentlichen Niederspannungsnetz (400 V)

Einphasenwechselstrommotoren	Scheinleistung $\leq 1,7 \text{ kVA}$
Drehstrommotoren	Anlaufstrom $\leq 60 \text{ A}$ oder Scheinleistung $\leq 5,2 \text{ kVA}$

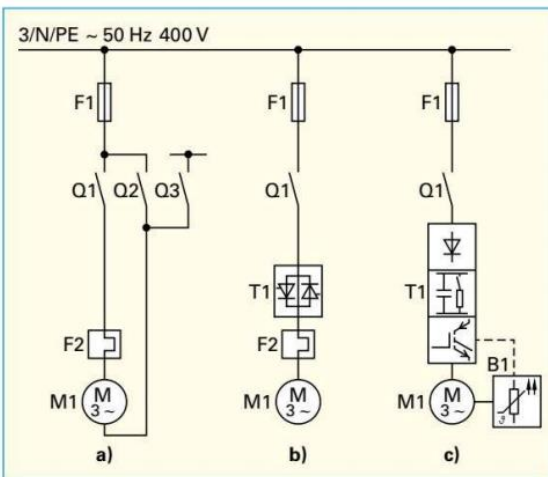


Bild 1: Ständeranlassverfahren

i Auswahl eines Elektromotors:
Praxistipp Seiten 496 und 497

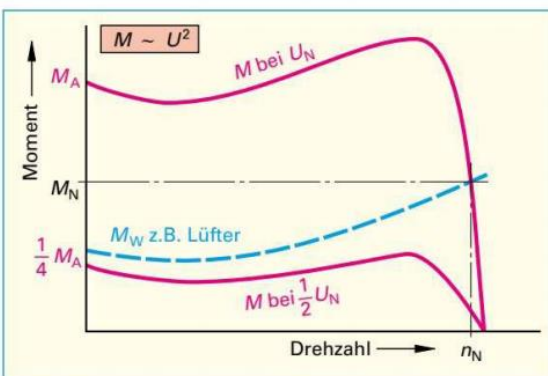


Bild 2: Drehmomentverläufe eines Kurzschlussläufermotors bei voller und halber Bemessungsspannung

o Stern-Dreieck-Anlassverfahren mit Schützen: Seite 116 bis 125

Sanftanlaufgeräte (Softstarter)

Sanftanlaufgeräte ermöglichen die stufenlose Änderung der Ständerspannung durch den Einsatz von Drehstromstellern, die nach dem Phasenanschnittsverfahren (Seite 260) arbeiten.

Die Spannung der Außenleiter wird über je zwei antiparallel geschaltete Thyristoren verändert.

Sie steigt in einer frei wählbaren Rampenzeit, z. B. 10 s, stufenlos bis zur Netzspannung an (Bild 4).

Am Ende der Hochlaufzeit des Motors werden die Thyristoren durch parallel liegende Kontakte (Bypasskontakte) automatisch überbrückt. Je nach Leistung des Sanftanlaufgerätes werden interne Bypasskontakte oder externe Bypassschütze eingesetzt. Diese Maßnahme vermindert Verluste, die durch die Erwärmung der Thyristoren entstehen würden. Kompaktgeräte für kleine Motorleistungen sind meist zweiphasig gesteuerte Softstarter. Sie haben kleine Abmessungen (Bild 1) und können platzsparend in Schaltschränke eingebaut werden.

Vorteile gegenüber anderen Anlassverfahren:

- Kontinuierlicher und stoßfreier Drehmomentanstieg (vermindert die Stoßbelastung, z. B. bei Getrieben und Pumpensystemen),
- Anlaufdrehmoment ist anpassbar an die Antriebslast (Beispiel, Seite 492),
- kombinierbar mit elektronischen Bremsgeräten,
- preisgünstig.

Durch den Einsatz von Sanftanlaufgeräten lassen sich sowohl elektrische als auch mechanische Anlassprobleme verringern.

Ausführungsvarianten von Sanftanlaufgeräten:

- Kompakte Softstarter für einfache Aufgaben (bis etwa 15 kW) erlauben eine unbegrenzte Anzahl von Motorstarts.
- Geräte für mittlere und hohe Leistungen (110 kW bis ca. 630 kW) mit erweiterten START-, STOPP- und Motorschutzfunktionen sowie Drehrichtungsüberwachung.

Anschluss von Sanftanlaufgeräten:

- Direktanschluss (Bild 2) in die Motorzuleitungen (geringerer Verdrahtungsaufwand, nur 4-adrige Zuleitung mit PE erforderlich gegenüber 7 Adern bei der Y-Δ-Schützschaltung).
- Anschluss in $\sqrt{3}$ -Schaltung (Bild 3), wenn der Softstarter in unmittelbarer Nähe zum Motor installiert wird (höherer Verdrahtungsaufwand, aber Kostenvorteil durch Einsatz preisgünstigerer Softstarter kleinerer Leistung, da die Thyristoren vom kleineren Strangstrom $I_{Str} = I/\sqrt{3}$ durchflossen werden).

Zur Anpassung des Anlaufs und/oder Auslaufs des Motors (Bild 4) bieten Softstarter verschiedene Einstellmöglichkeiten (Beispiel, Seite 492).

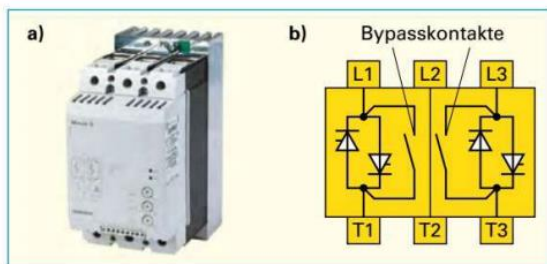


Bild 1: a) Softstarter für kleine Leistungen und b) Anschlussbild

www.eaton.de/EatonDE/ProdukteundLoesungen/Electrical/ProdukteDienstleistungen/Automatisieren/Steuern/MotorschaltenSchuetzenAntreiben/SoftStarter/index.htm

www.rs-steiner.com/softstarter.html

https://www.danfoss.com/de-de/products/ac-drives/?sort=default_sort

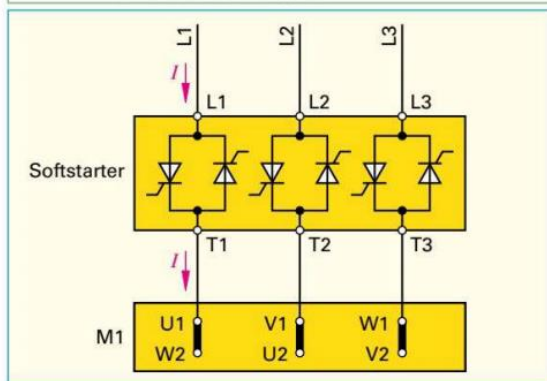


Bild 2: Direktanschluss von Softstarter und Motor

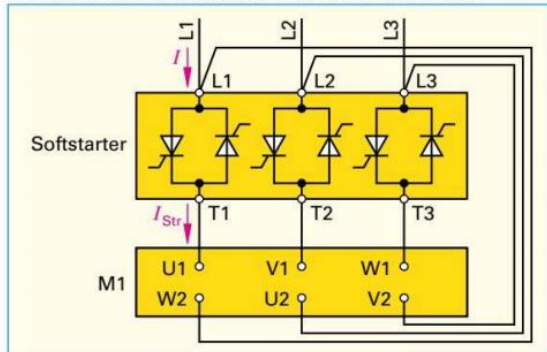


Bild 3: Anschluss in $\sqrt{3}$ -Schaltung von Softstarter und Motor

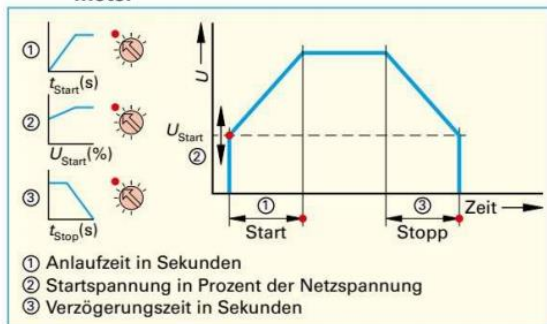


Bild 4: Einstellmöglichkeiten am Softstarter

Beispiel:

Der Antriebsmotor eines Förderbandes soll mittels Softstarter angelassen werden. Bei Anlauf beträgt das Widerstandsmoment des Förderbandes $M_{AW} = 34,5 \text{ Nm}$.

Der Käfigläufermotor ist in Dreieckschaltung an 400 V angeschlossen: $P_N = 5,5 \text{ kW}$, $M_A = 99,7 \text{ Nm}$, $I_A = 86,1 \text{ A}$.

- a) Auf welchen Wert ist die Startspannung des Softstarters mindestens einzustellen?
- b) Prüfen Sie, ob der Anlaufstrom des Motors die Anlaufbedingung nach TAB einhält.

Lösung:

a) Berechnung Startspannung mit $M_{A \text{ Start}} = M_{AW}$

$$U_{\text{Start}} = U_N \cdot \sqrt{\frac{M_{A \text{ Start}}}{M_A}} = 400 \text{ V} \cdot \sqrt{\frac{34,5 \text{ Nm}}{99,7 \text{ Nm}}} = 235 \text{ V}$$

b) Berechnung des Anlaufstromes bei Startspannung

$$I_{A \text{ Start}} = I_A \cdot \frac{U_{\text{Start}}}{U_N} = 86,1 \text{ A} \cdot \frac{235 \text{ V}}{400 \text{ V}} = 50,6 \text{ A}$$

$I_{A \text{ Start}} < 60 \text{ A} \rightarrow$ Anlaufbedingung nach TAB erfüllt

13.2.2.4 Schleifringläufermotor

Aufbau. Der Ständer des Schleifringläufermotors ist genau wie der des Kurzschlussläufermotors aufgebaut. Die Welle trägt das Läuferblechpaket mit der in Nuten untergebrachten Drehstromwicklung und die **Schleifringe (Bild 1)**.

Die in Stern geschaltete, dreisträngige Läuferwicklung ist an drei Schleifringe angeschlossen. Über Kohlebürsten ist sie mit den **Klemmen K, L und M** des Klemmenbrettes verbunden. An diese Klemmen können Wirkwiderstände zum Anlassen in den Läuferkreis geschaltet werden. Eine Anlassschaltung mit Schützen zeigt **Bild 2**.

Betriebsverhalten. Durch Zuschalten der Widerstände in den Läuferkreis wird der Läuferstrom verringert, gleichzeitig jedoch sein Wirkanteil überproportional erhöht. Folge ist ein stark erhöhtes Drehmoment trotz Anlaufstrombegrenzung. Durch gezielte Auswahl der Anlasswiderstände kann der Motor mit seinem Kippmoment anlaufen (**Bild 3**). Nach dem Hochlaufen werden die Anlasswiderstände abgeschaltet, indem die Schleifringe durch Stifte kurzgeschlossen werden. Mit kurzgeschlossener Läuferwicklung wirken Schleifringmotoren wie Kurzschlussläufermotoren. Bei Motoren über 20 kW werden die Bürsten gleichzeitig abgehoben, um den Verschleiß zu verringern.

Das beim Schleifringläufermotor verwendete **Läuferanlassverfahren** gestattet den Schweranlauf mit dem Kippmoment des Motors.

Anwendung. Schleifringläufermotoren haben Bemessungsleistungen von etwa 5 kW bis 10 MW (Beispiel **Bild 4**). Sie werden als Antrieb bei Volllast- und Schweranlauf verwendet, z.B. Wasserwerkspumpen und Hebezeuge.

Wegen Brandgefahr dürfen Schleifringläufermotoren z.B. in landwirtschaftlichen Betriebsstätten nicht verwendet werden.

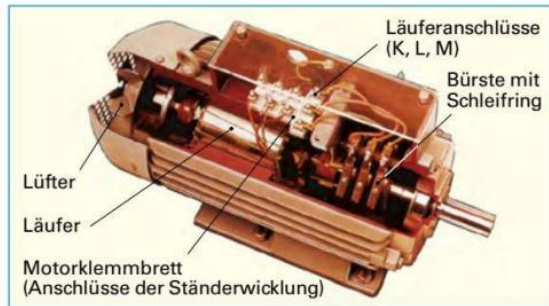


Bild 1: Schleifringläufermotor

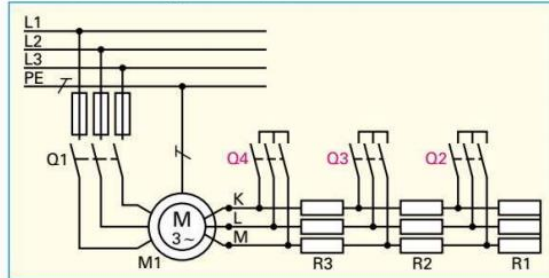


Bild 2: Schleifringläufermotor mit 3-stufigem Anlasser

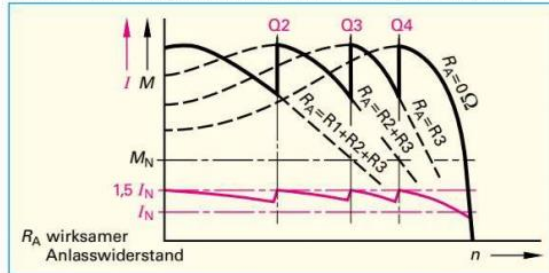


Bild 3: Drehmoment und Anlaufstrom zu Bild 2

Hersteller			
Typ DA 80	Nr. 7660		
D - Motor	V	178	A
Δ 400	cos φ 0,89		
100 kW S3	1460 / min	50	Hz
Läufer	Y	245 V*	248 A
Th.Cl.155 (F)	IP 44	1,1	t
* Läuferstillstandspannung		DIN VDE 0530	EN 60034

Bild 4: Leistungsschild

13.2.2.5 Polumschaltbare Motoren

Wird bei Kurzschlussläufermotoren die Polzahl der Ständerwicklung geändert, so ändert sich die Drehfeldfrequenz und mit ihr die Läuferfrequenz.

Motor mit getrennten Ständerwicklungen

Zwei getrennte Ständerwicklungen mit verschiedenen Polzahlen (Bild 1) ermöglichen zwei Drehzahlen, die in einem beliebigen ganzzahligen Verhältnis zueinander stehen können, z. B. 3 : 4.

Das Drehmoment ist bei beiden Drehzahlen etwa gleich, die Leistungen des Motors verhalten sich etwa wie die Drehzahlen.

Motoren mit getrennten Wicklungen erfordern einen erhöhten Aufwand an Wicklungen und Elektroblech. Sie werden daher nur dort angewandt, wo das Drehzahlverhältnis 1 : 2 nicht genutzt werden kann. An das Klemmbrett werden in der Regel nur die Anfänge der Wicklungen geführt (Bild 1).

Motor mit unterteilten Ständerwicklungen (Dahlanderschaltung)

Aufbau. Bei der Dahlanderschaltung ist jeder Strang der Ständerwicklung in zwei Wicklungsteile unterteilt. Durch Umschaltung dieser Spulengruppen aus der Reihenschaltung in die Parallelschaltung wird die entstehende Polzahl halbiert, dadurch verdoppelt sich die Drehfeldfrequenz (Bild 2).

Die gebräuchlichste Dahlanderschaltung ist die **Dreieck-Doppelstern-Schaltung (Bild 3)**. Eine Reihenschaltung der Wicklungsteile bedeutet Dreieckverkettung der Stränge, bei Parallelschaltung erfolgt Sternverkettung, um durch Spannungsherabsetzung eine zu hohe Induktion im Nutbereich des Stators zu vermeiden. Dadurch erhöht sich trotz doppelter Drehzahl die Motorleistung nur um etwa den 1,5-fachen Wert.

Motoren mit Dahlanderschaltung werden in verschiedenen Wicklungsausführungen für spezielle Anwendungen hergestellt (Tabelle).

Die Dahlanderschaltung erlaubt durch Halbieren der Polzahl eine Drehzahlverdoppelung.

Das Klemmbrett von Motoren mit Dahlanderschaltung hat für jede Polzahl drei Klemmen, weil die Wicklungsteile meist bereits in der Ständerwicklung zusammengeschaltet sind (Bild 3). Die Netzspannung ist für beide Drehzahlen gleich. Die Klemmen für die niedere Drehzahl sind mit 1U, 1V, 1W bezeichnet, die für die hohe Drehzahl mit 2U, 2V, 2W. Um bei beiden Drehzahlen den Drehsinn zu erhalten, hat der Hersteller bereits die Klemmenbezeichnungen 1U und 1W getauscht.

Motoren mit zwei getrennt ausgeführten Dahlanderwicklungen haben vier Drehzahlen.

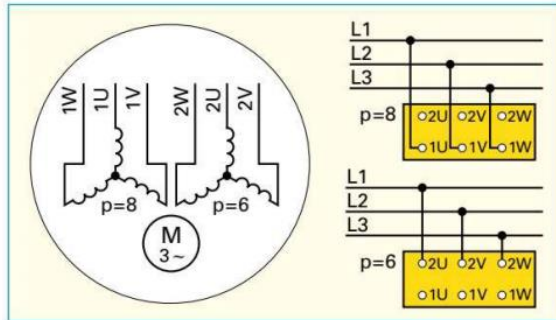


Bild 1: Polumschaltbarer Motor mit zwei getrennten Ständerwicklungen (6- und 8-polig)

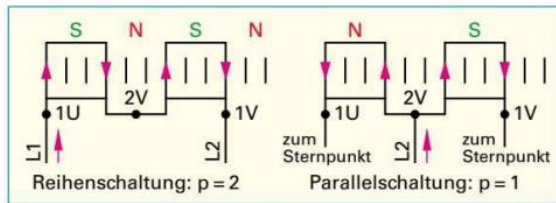


Bild 2: Prinzip der Dahlanderschaltung (nur ein Strang gezeichnet)

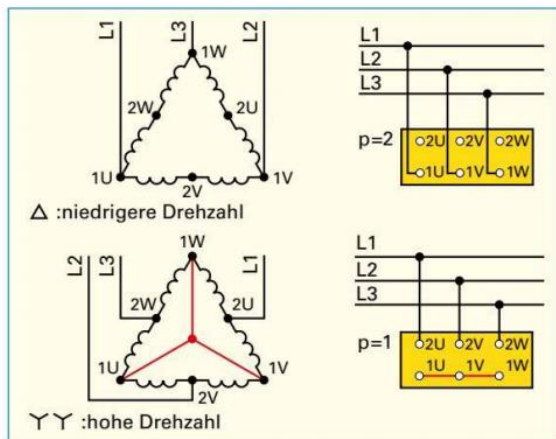


Bild 3: Polumschaltbarer Motor mit Dahlanderwicklung (Dreieck-Doppelstern-Schaltung)

Dahlandersteuerung mit Schützen:
Seite 119

Tabelle: Schaltungsvarianten von Dahlandermotoren und ihre Anwendungen

Ausführung der Wicklung	Leistungsverhältnis	Anwendung
Δ/YY	$P_{\Delta}/P_{YY} = 1/1,5$	konstantes Drehmoment, z. B. für Werkzeugmaschinen
YY/Δ	$P_{YY}/P_{\Delta} = 1/1$	konstante Leistung, z. B. für Hebezeuge
Y/YY	$P_Y/P_{YY} = 1/4$	quadratisches Drehmomentverhalten, z. B. für Pumpen- und Lüfterantriebe

Situationsbeschreibung:

Der Drehstrommotor (**Bild 1**) mit dem Leistungsschild in **Bild 2** soll an einem 400/230-V-50-Hz-Drehstromnetz betrieben werden. Welche Vorgaben sind zu beachten und wie ist der Drehstrommotor bei Rechtslauf anzuschließen?

Der Anschluss des Motors ergibt sich aus:

- Leiterspannung des Drehstromnetzes und
- zulässiger Strangspannung der Ständerwicklung des Motors.

Die Ständerwicklung kann geschaltet werden in:

- Sternschaltung (Symbol: Y) oder
- Dreieckschaltung (Symbol: Δ).

Die Spannungsangaben auf dem Leistungsschild, mit oder ohne Y/Δ-Symbolen, legen die zulässige Strangspannung und die Schaltung der Ständerwicklung fest (**Tabelle**). Dabei gilt:

- Beim Betrieb in Stern- oder Dreieckschaltung muss die **zulässige Strangspannung** der Ständerwicklung eingehalten werden.
- Bei zwei Spannungsangaben, z.B. 230/400 V, ist die kleinere Spannungsangabe, hier also 230 V, die zulässige Strangspannung der Ständerwicklung.

Die Spannungs- und Schaltungsangaben auf dem Leistungsschild in **Bild 2** und **Tabelle**, grün markiert, bedeuten: Die zulässige Strangspannung beträgt 400 V. Der Motor ist in Dreieckschaltung an 400-V-Leiterspannung oder in Sternschaltung an 690-V-Leiterspannung anzuschließen.

⇒ Der Anschluss an das 400/230 V Drehstromnetz erfolgt somit in Dreieckschaltung (**Bild 4**).

Dreiphasenwechselstrom: **Seite 156**

Die Strangwicklungen eines Motors werden, unabhängig von der Schaltung der Ständerwicklung, vom Hersteller bereits fest an den sechs Klemmbolzen des Klemmbrettes angeschlossen (**Bild 3** und **Bild 4**). Der Motor wird im Klemmenkasten folgendermaßen an das Drehstromnetz angeschlossen:

- Verbinden der Außenleiter L1, L2 und L3 mit den Klemmen U1, V1 und W1. Dieser Anschluss bedeutet Rechtslauf des Motors.

Linkslauf des Motors wird durch Vertauschen zweier Außenleiter am Klemmbrett erreicht.

- Befestigen der Brücken:
 - Für die Sternschaltung zwischen W2, U2 und V2 (**Bild 3**) oder
 - für die Dreieckschaltung zwischen U1 und W2, V1 und U2, W1 und V2 (**Bild 4**).
- Verbinden des Schutzleiters mit der PE-Klemme.



Bild 1: Drehstrommotor

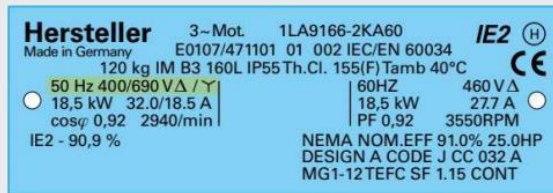


Bild 2: Leistungsschild

Tabelle: Spannungsangabe/Wicklungsschaltung

Angabe auf dem Leistungsschild des Motors (Beispiele)	Zulässige Strangspannung der Ständerwicklung	Schaltung bei 400-V-Leiterspannung
Y400 V	230 V	Y
230/400 V	230 V	Y
400/690 V Δ/Y	400 V	Δ
230 V Δ/400 VY	230 V	Y

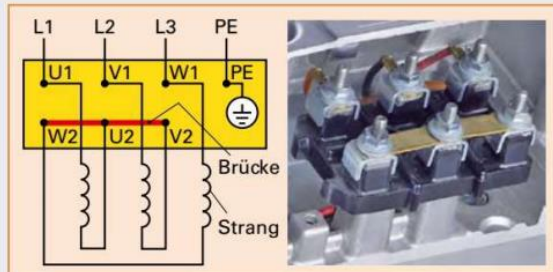


Bild 3: Sternschaltung (Y), Anschluss und Klemmbrett

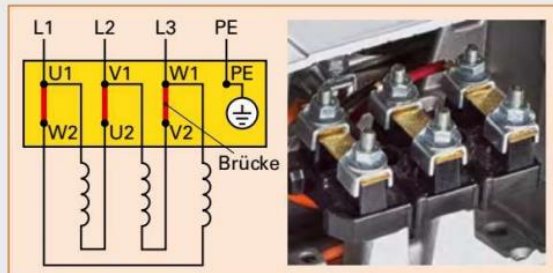
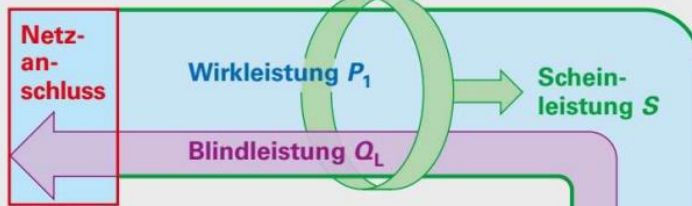


Bild 4: Dreieckschaltung (Δ), Anschluss und Klemmbrett

Für Drehstrommotoren mit einer Scheinleistung > 5,2 kVA oder einem Anlaufstrom > 60 A ist ein Anlassverfahren erforderlich (**Seite 490**).



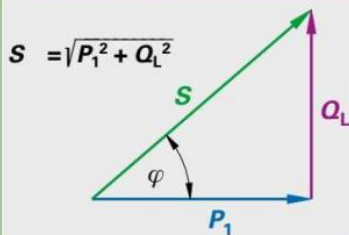
elektrische Leistungen:

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

$$Q_L = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$$

Leistungsdreieck:



Wirkfaktor:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S}$$

Wirkungsgrad η :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}; \quad \eta = \frac{P_2}{P_2 + P_V}$$

Drehfelddrehzahl n_s :

$$n_s = \frac{f}{p}$$

Schlupf s :

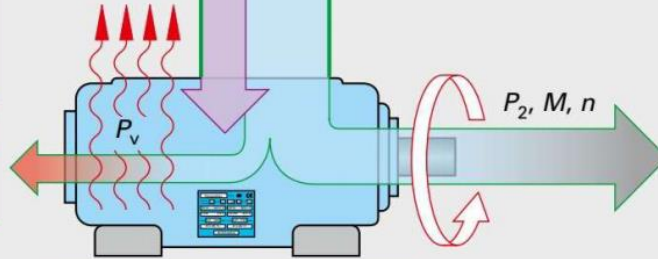
$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100\%$$

$$s = \left(1 - \frac{n}{n_s}\right) \cdot 100\%$$

Läuferdrehzahl:

$$n = n_s - \frac{s \cdot n_s}{100\%}$$

$$n = n_s \left(1 - \frac{s}{100\%}\right)$$



nicht nutzbare Verlustleistung P_V :

- Stromwärmeverluste in den Wicklungen
- Ummagnetisierungs- und Wirbelstromverluste im Ständer- und Läuferblechpaket
- Reibung in den Lagern und am Ventilator

$$P_V = P_1 - P_2$$

Hersteller	3-Mot.	IE2	CE
Made in Germany	30 kg IM B3	112M IP 56	Th.Cl. 155
50 Hz	400 V Δ	60 Hz	460 V Δ
4 kW	8,5 A	4,6 kW	8,51 A
cos φ	0,8 1445 1/min	cos φ	0,81 1735 1/min
IE 2-85,1%		IE 2-86,1%	
IEC/EN 60034			

abgegebene mechanische Leistung:

$$P_2 = \omega \cdot M = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M$$

P_2 Leistung in W
mit $[n] = 1/s$ und $[M] = Nm$

$$P_2 = \frac{M \cdot n}{9549}$$

P_2 Leistung in kW
mit $[n] = 1/min$ und $[M] = Nm$

Beispiele: Für eine Werkzeugmaschine wurde ein Ersatzmotor mit obigem Leistungsschild ausgewählt.

Beispiel 1: Berechnen Sie für den Bemessungsbetrieb des Motors die elektrischen Leistungen, die Verlustleistung, das Bemessungsdrehmoment und den Schlupf.

Alle Bemessungsgrößen erhalten den Index „N“

$$S_N = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 8,5 \text{ A} = 5,89 \text{ kVA}$$

$$P_{1N} = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N \cdot \cos \varphi_N = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 8,5 \text{ A} \cdot 0,8 = 4,71 \text{ kW}$$

$$Q_{LN} = \sqrt{S_N^2 - P_{1N}^2} = \sqrt{(5,89 \text{ kVA})^2 - (4,71 \text{ kW})^2} = 3,53 \text{ kvar}$$

$$P_{VN} = P_{1N} - P_{2N} = 4,71 \text{ kW} - 4 \text{ kW} = 0,71 \text{ kW}$$

$$M_N = \frac{P_{2N}}{2 \cdot \pi \cdot n} = \frac{4 \text{ kW}}{2 \cdot \pi \cdot 1445 \cdot 1/60 \text{ s}} = 26,4 \text{ Nm}$$

$$s_N = \frac{n_s - n_N}{n_s} \cdot 100\% = \frac{(1500 - 1445) \cdot 1/min}{1500 \cdot 1/min} \cdot 100\% = 3,67\%$$

Beispiel 2: Nach Motoreinbau ergaben sich folgende Messwerte: $P_1 = 4,06 \text{ kW}$ bei 1447 1/min , $I = 7,42 \text{ A}$, $U = 400 \text{ V}$ und $M_2 = 23 \text{ Nm}$. Berechnen Sie folgende, weitere Betriebswerte: Abgegebene Leistung, Wirkungsgrad, Verlustleistung, Schein- und Blindleistung sowie den Wirkfaktor.

$$P_2 = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M = 2 \cdot \pi \cdot 1447 \cdot 1/60 \text{ s} \cdot 23 \text{ Nm} = 3,49 \text{ kW}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{3,49 \text{ kW}}{4,06 \text{ kW}} = 0,86 \approx 86\%$$

$$P_V = P_1 - P_2 = 4,06 \text{ kW} - 3,49 \text{ kW} = 0,57 \text{ kW}$$

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 7,42 \text{ A} = 5,14 \text{ kVA}$$

$$Q_L = \sqrt{S^2 - P_1^2} = \sqrt{(5,14 \text{ kVA})^2 - (4,06 \text{ kW})^2} = 3,15 \text{ kvar}$$

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S} = \frac{4,06 \text{ kW}}{5,14 \text{ kVA}} = 0,79$$

Situationsbeschreibung:

Die Auswahl eines geeigneten Motors wird durch die Anforderungen der angetriebenen Arbeitsmaschine bestimmt, z.B. von Leistungsbedarf, Drehmoment, Drehzahl und der Betriebsart (**Bild 1**).

Der Motor muss zum Anschluss an das vorhandene Netz, z.B. das 400-V-Drehstromnetz, geeignet sein (**Seite 494**). Unzulässige Belastungen, etwa ein zu hoher Anzugsstrom, sind durch geeignete Anlassverfahren (**Seite 490**) zu vermeiden.

Widerstandsmoment. Treibt ein Motor eine Arbeitsmaschine an, so wird er durch diese belastet. Dem Drehmoment des Motors wirkt das Last- bzw. Widerstandsmoment M_w der Arbeitsmaschine entgegen. Um einen sicheren Anlauf und Betrieb zu gewährleisten, ist das Widerstandsmoment der Arbeitsmaschine in Abhängigkeit von der Drehzahl zu berücksichtigen. Typische Drehmomentkennlinien von Arbeitsmaschinen zeigt **Bild 2**. Das erforderliche höhere **Anzugsmoment** der Last beim Start wird durch die Haftreibung der Lager im Stillstand verursacht.

Anlauf. Ein Motor läuft nur an, wenn das Motormoment größer als das Widerstandsmoment ist. Diese Drehmomentdifferenz wird Beschleunigungsmoment M_B genannt. Die Beschleunigung dauert solange, bis das Motormoment gleich dem Widerstandsmoment der Last ist. Ist diese Bedingung durchgängig während des Hochlaufs erfüllt, wird der Arbeitspunkt erreicht (**Bild 3**). Anderenfalls läuft der Motor nicht an (M_{W1} in **Bild 4**) oder erreicht nur die Schleichdrehzahl (M_{W2} in **Bild 4**).

Zum sicheren Motoranlauf ist ein Beschleunigungsmoment M_B erforderlich ($M_B = M_M - M_w$).

Ein zu geringes Beschleunigungsmoment verlängert die Anlaufzeit und der Motor kann thermisch überlastet werden.

i Wichtig bei der Motorauswahl: Gegenüber Direktanlauf verringern Anlassverfahren die Anlaufmomente (**Bild 2, Seite 490**).

Betrieb. Im Schnittpunkt der Kennlinien von Motormoment und Widerstandsmoment ergibt sich der Arbeitspunkt des Antriebs (stationärer Betrieb). Der Arbeitspunkt ist möglichst so zu wählen, dass der Motor sein Bemessungsmoment M_N abgibt (**Bild 3**). Verringert sich das Widerstandsmoment, so steigt die Drehzahl. Eine Erhöhung des Widerstandsmomentes bewirkt ein Abbremsen des Motors.

Beim Bemessungsmoment M_N arbeitet der Motor mit Bemessungsleistung P_N und mit Bemessungsdrehzahl n_N .

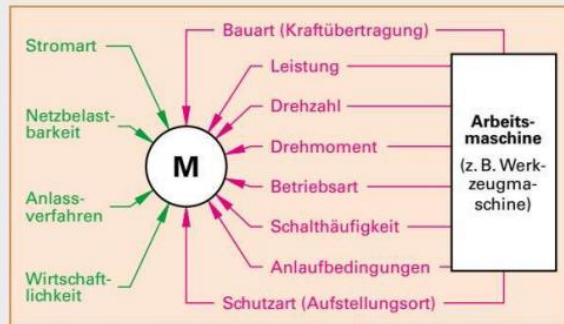


Bild 1: Auswahlkriterien (Beispiele)

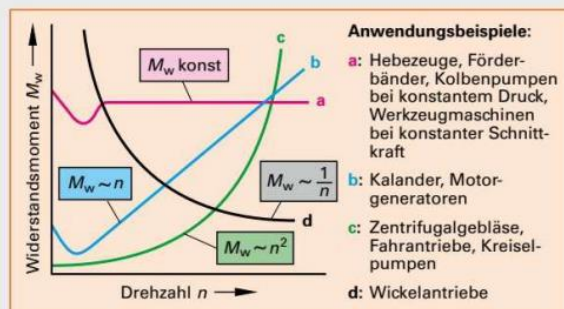


Bild 2: Widerstandsmomente M_w , abhängig von der Drehzahl n

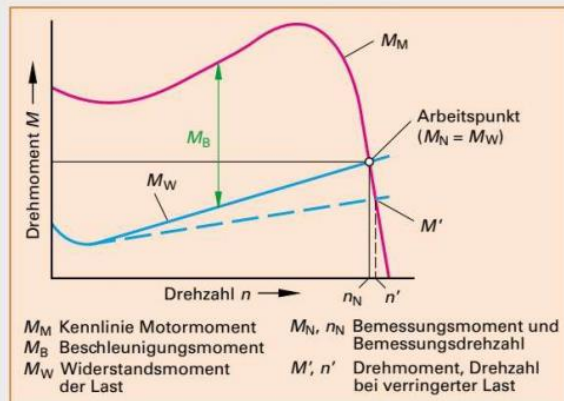


Bild 3: Beschleunigungsmoment bei Asynchronmotoren

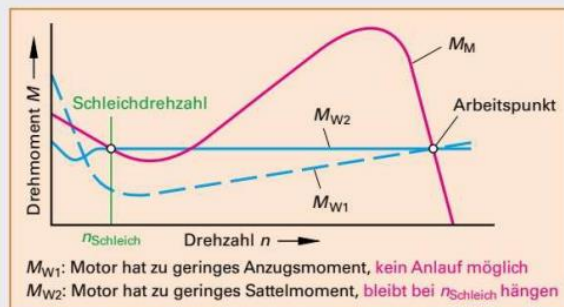


Bild 4: Motormoment kleiner als Widerstandsmoment der Last (Beispiele)

Motorauswahl. Motoren werden nach der erforderlichen Leistung, Drehzahl und der Eignung für einen sicheren Anlauf ausgewählt. Bauform, Baugröße und Schutzart des Motors werden von Montageart und -ort bestimmt. Ein Motor mit zu kleiner Leistung wird überlastet. Motoren mit unnötig großer Leistung sind teuer in der Anschaffung und arbeiten mit schlechtem Wirkungsgrad. Zudem kann ein unzulässig großes Beschleunigungsmoment auftreten, welches Maschine und Kraftübertragungseinrichtung, z. B. ein Zahnradgetriebe beschädigen.

Auswahl eines Drehstrom-Kurzschlussläufermotors	
Arbeitsschritte	Beispiel
<p>① Erfordernisse der Arbeitsmaschine</p> <ul style="list-style-type: none"> • Betriebsart • Drehmoment • Drehzahl • Anlaufverhalten 	<p>Antrieb eines Generators</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dauerbetrieb S1 • $M_N = 20 \text{ Nm}$ • $n_N \approx 1400 \text{ }^1/\text{min}$ • $M_A \approx 0,4 M_N$, $M_{WV} \sim n$ (Kennlinie b, Bild 2, Seite 496)
<p>② Aufstellungsort und Aufstellungsart</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bauform • Schutzart • Verbindung mit Arbeitsmaschine 	<ul style="list-style-type: none"> • Motorbefestigung stehend auf Befestigungsfüßen: IM B3 • Schutz gegen Staubablagerung und Spritzwasser: IP 54 • Verbindung direkt mit Kupplung ohne Getriebe
<p>③ Berechnung der Motorleistung</p> $P_{2N} = 2 \cdot \pi \cdot n_N \cdot M_N$	$P_{2N} = 2 \cdot \pi \cdot 1400 \cdot \frac{1}{60} \text{ s} \cdot 20 \text{ Nm}$ $P_{2N} = 2,93 \text{ kW}$
<p>④ Bestimmung der Motordaten</p> <p>(z. B. Datenblatt, Seite 666)</p>	<p>Normmotor 3 ~ 400 V/50 Hz</p> <p>$P_N = 3 \text{ kW}$, $n_N = 1460 \text{ }^1/\text{min}$, IP 54, IM B3 (Baugröße 100L)</p>

Eine große Schalthäufigkeit und z. B. Brems- und Reversiervorgänge¹ bewirken höhere Wicklungstemperaturen als reiner Dauerbetrieb. Um die von der thermischen Klasse (Wärmeklasse) des Isolierstoffes abhängige zulässige Wicklungstemperatur nicht zu überschreiten, muss bei der Motorauswahl die gegebene Betriebsart berücksichtigt werden. Daher soll bei den Betriebsarten ab S2 die Auswahl des geeigneten Motors gemeinsam mit dem Hersteller oder Lieferanten erfolgen.

Normmotoren gleicher Bauart und Baugröße können unabhängig vom Fabrikat gegeneinander ausgetauscht werden. Dadurch sind im Fehlerfall lange Stillstandszeiten vermeidbar. Bei Ersatz durch Energiesparmotoren ist die Baugröße zu überprüfen, da diese in Abmessung und Gewicht von den Standardmotoren abweichen. Bemessungsdrehzahlen und -drehmomente weisen nahezu gleiche Werte auf. Anlauf- und Kippmomente sind jedoch meist größer, sodass sich Anlassvorgänge günstiger gestalten.

Motoren mit hoher Drehzahl haben bei gleicher Leistung kleinere Abmessungen und Massen als solche mit kleiner Drehzahl, da sie für kleinere Drehmomente ausgelegt sind (**Bild**). Der Einsatz schnell laufender Motoren ist daher oft kostengünstiger, auch dann, wenn zur Anpassung von Drehzahl und Drehmoment an die Arbeitsmaschine ein Getriebe erforderlich ist.

¹ Reversieren von revertere (lat.) = umkehren, umwandeln

i Motorauswahl

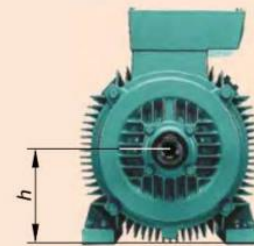
- Betriebsarten: **Seite 483**
- Bauformen: **Seite 485**
- Schutzarten: **Seite 349**
- Thermische Klassifikation: **Seite 485**
- Baugrößen: Tabellenbuch Elektrotechnik
- Betriebsdaten: **Seite 666**

Nach DIN EN 60034:

Die Verantwortung dafür, dass der Betrieb des Motors so genau wie möglich angegeben wird, trägt der Käufer.

Die Baugröße gibt die Achshöhe h in mm an.

Beispiel: Baugröße 100L
Achshöhe $h = 100 \text{ mm}$,
lange Form (Paketlänge)



Motor 3,0 kW, $n_N = 1460 \text{ }^1/\text{min}$:
 $h = 100 \text{ mm}$, Baugröße 100L
 $m = 30 \text{ kg}$

Motor 3,0 kW, $n_N = 2920 \text{ }^1/\text{min}$:
 $h = 100 \text{ mm}$, Baugröße 100L
 $m = 26 \text{ kg}$

Motorform:

L = lang, M = mittelkurz, S = kurz

Bild: Baugrößen und Massen m von Drehstrom-Normmotoren 3,0 kW bei unterschiedlichen Drehzahlen