

# 9 Drehstromasynchronmaschine

Die Drehstromasynchronmaschine wird hauptsächlich als Motor eingesetzt und spielt eine wichtige Rolle im Bereich der elektrischen Antriebstechnik. Als Generator kommt sie vorwiegend in Windenergieanlagen zum Einsatz.

Weit über die Hälfte aller produzierten Motoren sind Drehstromasynchronmotoren. Sie werden für Niederspannung (Bemessungsspannung z. B. 400 V) und Hochspannung (Bemessungsspannung über 1 000 V) gebaut. Der Leistungsbereich reicht vom Watt- bis in den Megawattbereich.

Die Motoren werden überwiegend in drehzahlstarrten Antrieben eingesetzt, d. h., sie laufen mit einer festen Drehzahl. Durch die Fortschritte im Bereich der Stromrichtertechnik steigt jedoch der Anteil an drehzahlvariablen Antrieben mit Asynchronmotoren ständig. Dazu wird der Drehstromasynchronmotor meistens mit einem Frequenzumrichter zu einem drehzahlvariablen elektrischen Antrieb ergänzt (vgl. Kapitel 14).

Der Drehstromasynchronmotor als wartungsarmer und robuster Motortyp hat in Kombination mit einem Frequenzumrichter drehzahlvariable Gleichstromantriebe (vgl. Kapitel 11) bereits aus vielen Anwendungsbereichen verdrängt.

## 9.1 Aufbau des Drehstromasynchronmotors

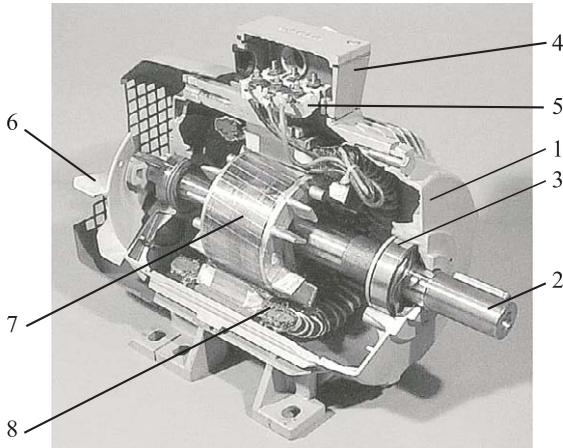
Der Drehstromasynchronmotor ist seinem Aufbau (Bild 9.1) nach eine rotierende Maschine.

Er besteht aus einem stillstehenden **Ständer** (auch **Stator** genannt) und einem rotierenden **Läufer** (auch **Rotor** genannt). Ständer und Läufer sind durch einen kleinen Luftspalt (einige Zehntel Millimeter bei kleinen Motoren bis wenige Millimeter bei großen Motoren) voneinander getrennt. Der **Ständer** besteht aus einem Gussgehäuse (mit Kühlrippen), in das ein Ständerblechpaket aus gestanzten (Bild 9.2), elektrisch isolierten Blechen eingepresst ist.

In die Längsnuten des Ständerblechpakets wird eine Ständerwicklung aus Kupfer eingelegt. Sie wird in der Regel dreiphasig ausgeführt, d. h., es werden drei Stränge U, V und W mit den Anschlusspunkten U1–U2, V1–V2 und W1–W2 gleichmäßig über den Umfang des Ständers verteilt. Ein Wicklungsstrang besteht aus einer oder mehreren Spulen. Bild 9.3 zeigt die prinzipielle Anordnung der drei Spulen

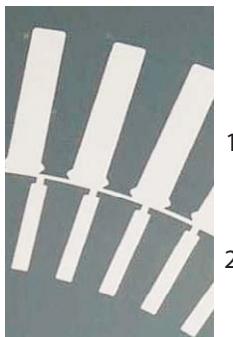
einer (zweipoligen) Ständerwicklung. Man erkennt, dass die Spulen jeweils um  $120^\circ$  räumlich gedreht sind.

Die Anschlusspunkte werden nach außen an die Klemmenplatte im Klemmenkasten geführt, sodass man die Ständerwicklung in Stern- oder Dreieckschaltung an ein Drehstromnetz anschließen kann.

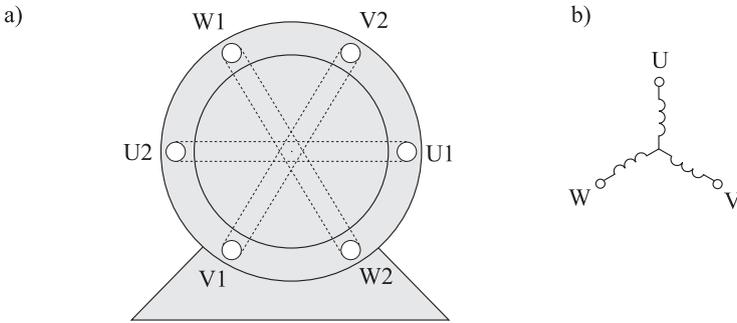


**Bild 9.1** Drehstromasynchronmotor mit Käfigläufer

- 1 Lagerschild, 2 Welle, 3 Lager, 4 Klemmenkasten, 5 Klemmenplatte,
- 6 Lüfter, 7 Läuferblechpaket mit Läuferstäben und Kurzschlussringen,
- 8 Ständerblechpaket mit Ständerwicklung



**Bild 9.2** Ausschnitte aus einem Ständerblech (1) und dem dazugehörigen Läuferblech (2)

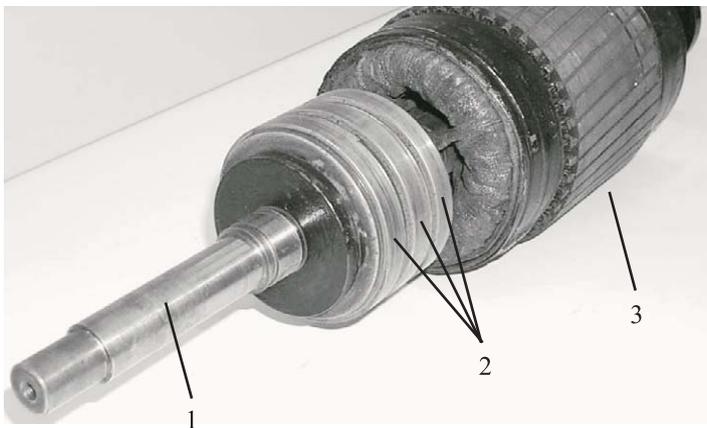


**Bild 9.3** Zweipolige Ständerwicklung: a) Prinzip, b) Wicklungsachsen

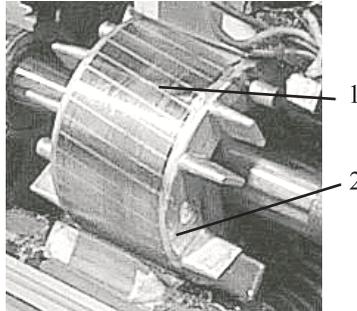
Der Läufer einer Drehstromasynchronmaschine wird gebaut als

- Schleifringläufer oder als
- Kurzschlussläufer (Käfigläufer)

Der **Schleifringläufer** enthält ein auf die Welle gepresstes Läuferblechpaket – einen Ausschnitt aus einem Läuferblech zeigt Bild 9.2 – mit gleichmäßig über den Umfang verteilten Längsnuten, in die eine dreisträngige Wicklung aus Kupferdraht eingelegt wird (Bild 9.4).



**Bild 9.4** Schleifringläufer  
1 Welle, 2 Schleifringe, 3 Blechpaket



**Bild 9.5** Käfigläufer eines kleineren Asynchronmotors  
1 Läuferstab, 2 Kurzschlussring (beide aus Aluminium)

Die Polpaarzahl der Läuferwicklung muss mit der Polpaarzahl der Ständerwicklung übereinstimmen. Die Strangenden der Läuferwicklung sind miteinander galvanisch verbunden. Die Stranganfänge sind über Schleifringe und Bürsten in den Klemmenkasten geführt. Dadurch ist die Drehstromwicklung des Schleifringläufers von außen zugänglich.

Der Kurzschlussläufer (auch Käfigläufer genannt) besteht wie der Schleifringläufer aus einem auf die Welle gepressten Läuferblechpaket mit gleichmäßig über den Umfang verteilten Längsnuten. In die Längsnuten werden bei größeren Maschinen Stäbe aus Kupfer oder Leitbronze eingelegt. Die Stäbe werden an den Enden mittels Hartlötens oder Schweißen durch Kurzschlussringe elektrisch leitend verbunden. Bei kleineren Maschinen wird Aluminium verwendet, das mittels eines Druckgussverfahrens in die Nuten eingebracht wird. Auch die Kurzschlussringe inklusive Lüfterflügeln werden dann gegossen (Bild 9.5).

Die Form der Stäbe (Rundstab, Keilstab usw.) beeinflusst die Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie des Motors. Durch Schrägstellung der Stäbe können unerwünschte Einflüsse von Oberschwingungen auf das Drehmoment (infolge nicht sinusförmiger Ströme und magnetischer Felder) reduziert werden.

Für den Drehstromasynchronmotor in Käfigläufer- und Schleifringläuferausführung werden die Schaltzeichen in Bild 9.6 verwendet.



**Bild 9.6** Schaltzeichen: a) Käfigläufer, b) Schleifringläufer

## 9.2 Funktionsweise

Beim Drehstromasynchronmotor wird ausgenutzt, dass man mithilfe einer dreiphasigen Ständerwicklung, die von Drehstrom durchflossen wird, ein drehendes Magnetfeld erzeugen kann (vgl. Abschnitt 9.2.2).

Beim Einschalten des Motors läuft das Ständerdrehfeld mit der **Synchrondrehzahl**  $n_S$  über die Leiter des Läufers hinweg und induziert in ihnen aufgrund der Flussänderung eine Spannung. Da die Leiter des Läufers geschlossen sind, fließen in ihnen Ströme, die ihrerseits ein Läuferdrehfeld aufbauen, das mit derselben Drehzahl umläuft wie das Ständerdrehfeld. Die Überlagerung der beiden Magnetfelder ergibt das Luftspaltfeld, in dem sich die stromdurchflossenen Leiter des Läufers befinden. Auf sie wird eine Kraft so ausgeübt, dass sich der Läufer mit der Drehzahl  $n$  dreht und dem Ständerdrehfeld naheilt.

(In Wirklichkeit greifen die Kräfte an den Zahnflanken des Läufers an. Die stromdurchflossenen Leiter des Läufers liegen nämlich nicht an der Läuferoberfläche, sondern in Nuten, sodass sie vom Luftspaltfeld weitgehend abgeschirmt sind. Die Kraft auf die Läuferzähne ist aber genauso groß wie die Kraft auf die Leiter, wenn sie an der Läuferoberfläche liegen würden. Man darf also so tun, als ob die Kraft an den Leitern selbst angreift.)

Der Läufer muss **asynchron** zum Ständerdrehfeld drehen ( $n < n_S$ ), wenn er ein Moment entwickeln soll. Aus eigener Kraft kann der Läufer die Drehzahl des Ständerdrehfelds nicht erreichen, da immer Lager- und Luftreibungsmomente überwunden werden müssen.

Beim **Synchronlauf** mit der **Synchrondrehzahl**  $n_S$  wird auf den Läufer kein (inneres) Drehmoment mehr ausgeübt, da er relativ zum Ständerdrehfeld stillsteht. Daher wird auch keine Läuferspannung induziert, es fließt kein Läuferstrom, und der Motor entwickelt kein Drehmoment. Der Läufer kann nur extern, z. B. mithilfe eines zweiten Motors, auf die Synchrondrehzahl gebracht werden. Der Synchronlauf ist daher ein theoretischer Betriebszustand des Motors.

Weil die Ströme im Läufer durch Induktion erzeugt werden, heißt der Asynchronmotor auch **Induktionsmotor**.

### 9.2.1 Schlupf

Der Unterschied zwischen der Drehzahl  $n$  des Läufers und der Drehzahl  $n_S$  des Ständermagnetfelds wird durch den **Schlupf**  $s$  ausgedrückt. Die Differenz  $n_S - n$ , die sogenannte **Schlupfdrehzahl**, wird hierzu auf die Drehzahl  $n_S$  des Ständerdrehfelds bezogen:

$$s = \frac{n_S - n}{n_S} \quad (9.1)$$

Bei Synchronlauf ist  $n = n_S$ , d. h.  $s = 0$ .

Ohne äußere Last läuft der Motor im Leerlauf. Seine Drehzahl  $n = n_0$  liegt dann sehr nahe bei der Synchrondrehzahl ( $n_0 \approx n_S$ ), der Schlupf ist nahezu null ( $s \approx 0$ ).

Wenn der Läufer festgebremst wird ( $n = 0$  bzw.  $s = 1$ ), haben die Spannungen in der Läuferwicklung dieselbe Frequenz wie die Spannungen in der Ständerwicklung:  $f_2 = f_1$ . Beim Schlupf  $s = 1$  verhält sich der Drehstromasynchronmotor daher wie ein Drehstromtransformator. Dieser Betriebszustand heißt **Stillstand**. Er entspricht dem Anlauf des Motors, kurz bevor dieser nach dem Einschalten zu drehen beginnt.

Wenn die Synchrondrehzahl  $n_S$  und der Schlupf  $s$  bekannt sind, lässt sich die Drehzahl  $n$  eines Drehstromasynchronmotors berechnen zu:

$$n = n_S \cdot (1 - s) \quad (9.2)$$

## 9.2.2 Ständerdrehfeld

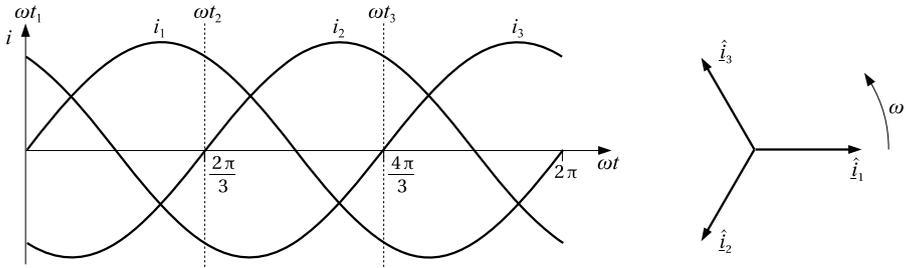
Zur Erläuterung des Ständerdrehfelds wird ein Motor betrachtet, dessen Läuferströme zunächst null sind. Somit gibt es kein Läuferdrehfeld.

Um ein drehendes Ständermagnetfeld zu erzeugen, werden drei räumlich um jeweils  $120^\circ$  gegeneinander versetzte Stränge des Ständers in Stern- oder Dreieckschaltung an ein Drehstromsystem angeschlossen. In der Maschine entsteht dann ein magnetisches Drehfeld mit zeitlich konstanter magnetischer Flussdichte, ein **magnetisches Kreisdrehfeld**.

Je nachdem, wie die Ständerwicklung aufgebaut ist, hat das Ständerdrehfeld die Polpaarzahl  $p = 1$ ,  $p = 2$  usw. Bei der Polpaarzahl  $p = 1$  hat das Drehfeld einen Nord- und einen Südpol, bei der Polpaarzahl  $p = 2$  sind es zwei Nordpole und zwei Südpole. Der Ständer wird konstruktiv so gestaltet, dass sich im Idealfall entlang des Ständerumfangs ein Magnetfeld mit abwechselnden Magnetpolen und sinusförmiger Flussdichte ausbildet.

Das Ständerdrehfeld dreht sich mit einer Drehzahl, die von der Frequenz  $f_1$  des speisenden Netzes und der Polpaarzahl  $p$  des Motors abhängt. Dies soll im Folgenden beispielhaft für  $p = 1$  und  $p = 2$  gezeigt werden.

In den Strängen des Ständers fließe ein symmetrischer Drehstrom (**Bild 9.7**). Der Strangstrom  $i_1(t)$  fließe im Strang U,  $i_2(t)$  fließe im Strang V und  $i_3(t)$  fließe im Strang W.



**Bild 9.7** Ständerströme zur Erzeugung des Ständerdrehfelds

Vereinbarungsgemäß sollen die Ströme vom Stranganfang (z. B. U1) zum Strangende (z. B. U2) fließen, wenn sie positives Vorzeichen haben. Bei negativem Vorzeichen fließen sie vom Strangende zum Stranganfang.

Die Ständerströme erzeugen das Ständermagnetfeld. Um die Drehung des Ständerfelds zu erkennen, werden exemplarisch drei Zeitpunkte betrachtet (siehe Bild 9.7). Die einfachsten Verhältnisse ergeben sich, wenn jeweils ein Strom null ist, also für

$$\omega t_1 = 0, \quad \omega t_2 = \frac{2\pi}{3} \quad \text{und} \quad \omega t_3 = \frac{4\pi}{3}$$

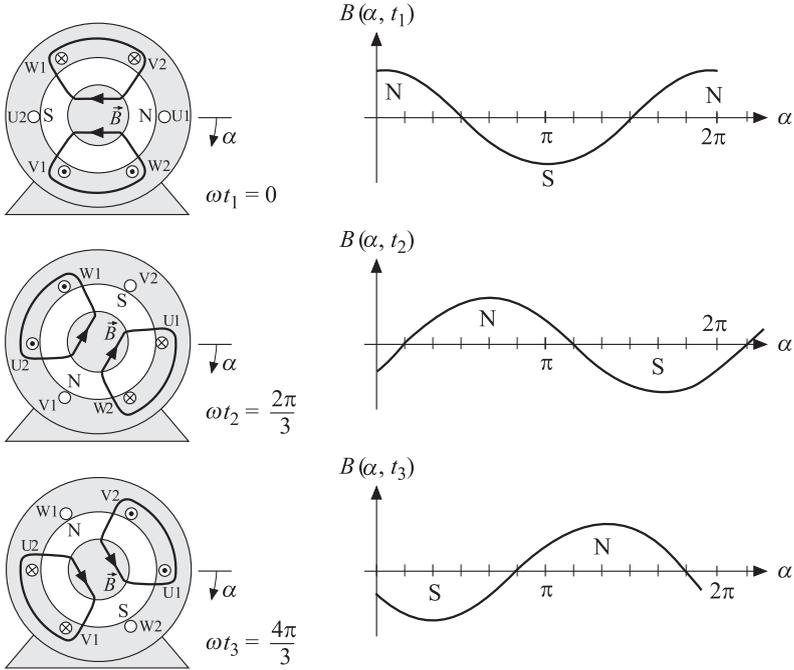
Danach wiederholt sich der Vorgang periodisch.

Die räumliche Lage des Ständerdrehfelds ist für einen Drehstromasynchronmotor mit der Polpaarzahl  $p = 1$  in Bild 9.8 und für einen Drehstromasynchronmotor mit der Polpaarzahl  $p = 2$  in Bild 9.9 dargestellt. In Bild 9.8 und Bild 9.9 sind die tatsächlichen Stromrichtungen eingezeichnet.

Um einen Motor mit der Polpaarzahl  $p = 2$  aufzubauen, muss ein Wicklungsstrang aus zwei in Reihe geschalteten Spulen bestehen. Der Strangstrom  $i_1(t)$  fließt dann im Strang U durch die Spulen U1–U12 und U21–U2,  $i_2(t)$  fließt im Strang V durch die Spulen V1–V12 und V21–V2,  $i_3(t)$  fließt im Strang W durch die Spulen W1–W12 und W21–W2. Die beiden Seiten einer Spule überdecken hierbei statt  $180^\circ$  nur noch  $90^\circ$  des Ständerumfangs (Bild 9.9).

In Bild 9.8 ist zu erkennen, dass sich das Magnetfeld räumlich um denselben Winkel weiterdreht wie die Stromzeiger in Bild 9.7. Die Drehfrequenz des Ständerdrehfelds ist für  $p = 1$  daher gleich der Frequenz des Ständerstroms.

Bei  $p = 2$  ist der räumliche Winkel nur noch halb so groß wie der elektrische, d. h., die Drehfrequenz  $n_s$  des Ständerdrehfelds ist nur noch halb so groß wie die Frequenz des Ständerstroms.



**Bild 9.8** Ständerdrehfeld mit  $p = 1$

Zwischen der Drehfrequenz  $n_s$  des Ständerfelds, der Polpaarzahl  $p$  und der Frequenz  $f_1$  des Ständerstroms existiert offensichtlich der Zusammenhang

$$n_s = \frac{f_1}{p} \tag{9.3}$$

Tabelle 9.1 zeigt die Drehfrequenz (bzw. die Drehzahl)  $n_s$  des Ständerdrehfelds bei üblichen Netzfrequenzen  $f_1$  (z. B.  $f_1 = 50$  Hz in Europa und  $f_1 = 60$  Hz in den USA) und Polpaarzahlen  $p$ .

Die Drehrichtung des Ständerdrehfelds lässt sich dadurch ändern, dass man im Klemmenkasten zwei der drei Außenleiter L1, L2 und L3 vertauscht. Dadurch ändert sich auch die Drehrichtung des Läufers.