

■ Magnetisches Feld

→ basics Mechatronik

■ Magnetischer Fluss Φ

→ basics Mechatronik

4.2 Elektromotoren

Elektromotoren beruhen auf der technischen Anwendung des **Elektromagnetismus**. Zwei Magnetfelder wirken aufeinander ein.

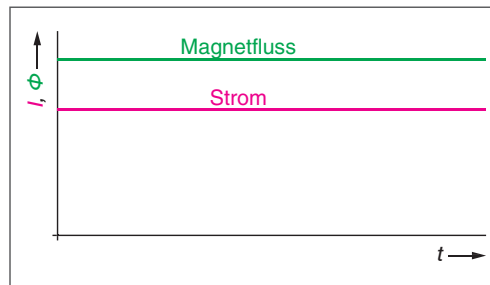
Zur Erzeugung der Magnetfelder dienen i. Allg. **Spulen** in Verbindung mit Eisen.

Eisen verstärkt die magnetische Wirkung ganz wesentlich.

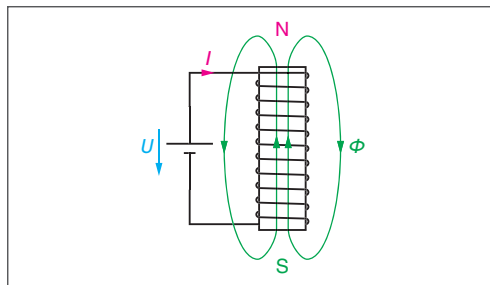
Die Spulen werden entweder mit **Gleichstrom** oder mit **Wechselstrom** gespeist und erzeugen entsprechende Magnetfelder.

Speisung mit **Gleichstrom** → **magnetisches Gleichfeld** (wie beim Dauermagneten).

Die **magnetische Polarität** ändert sich *nicht*. Ein magnetisches *Gleichfeld* bleibt *zeitlich konstant*.



28 Gleichstrom und magnetisches Gleichfeld



29 Magnetisches Gleichfeld (siehe Bild 28)

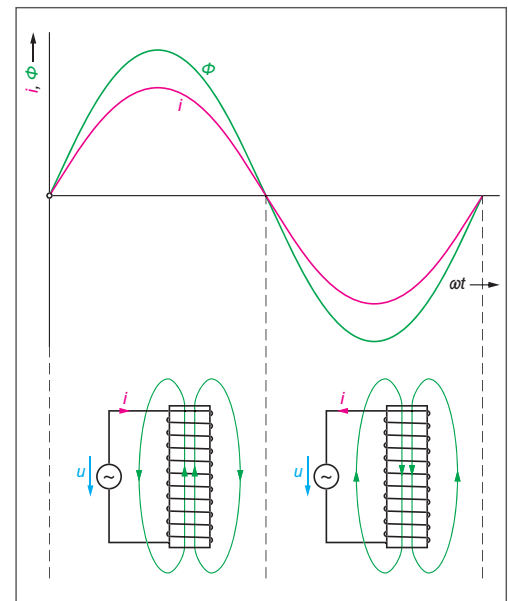
Speisung mit **Wechselstrom** → **magnetisches Wechselfeld**

Ändert *periodisch Betrag und Richtung*, wichtig zur technischen Anwendung der **Induktion**.

Ein **magnetisches Wechselfeld** entsteht, wenn eine *ruhende* Spule von *Wechselstrom* durchflossen wird.

Das Magnetfeld ändert sich in gleicher Weise wie der Wechselstrom.

Strom und Magnetfluss sind in Phase. Auch der Magnetfluss hat einen sinusförmigen Verlauf.



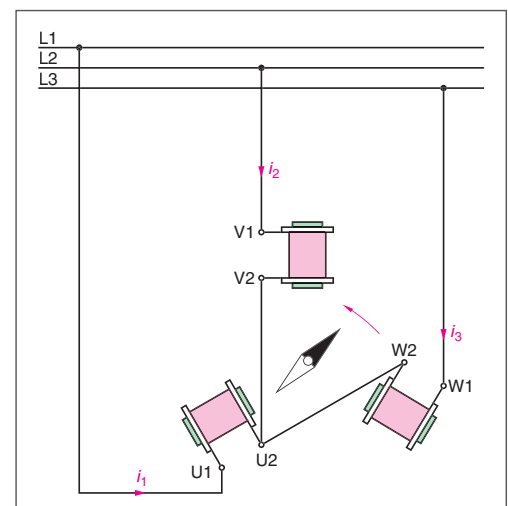
30 Magnetisches Wechselfeld

Man spricht von einem **magnetischen Wechselfeld**. Die magnetische **Polarität** ändert sich *periodisch*.

Magnetisches Drehfeld

Drei Spulen mit Eisenkern werden *um 120° versetzt* angeordnet und in *Sternschaltung* an ein Drehstromnetz angeschlossen. In Spulenmitte wird eine *Magnetnadel* eingebracht.

Wird die Magnetnadel in angegebener Richtung angestoßen, dreht sie sich mit hoher Drehzahl.



31 Magnetisches Drehfeld

In jedem Strang ruft der Strom ein magnetisches Wechselfeld hervor. Die Strangflüsse haben den gleichen zeitlichen Verlauf wie die erzeugenden Strangströme.



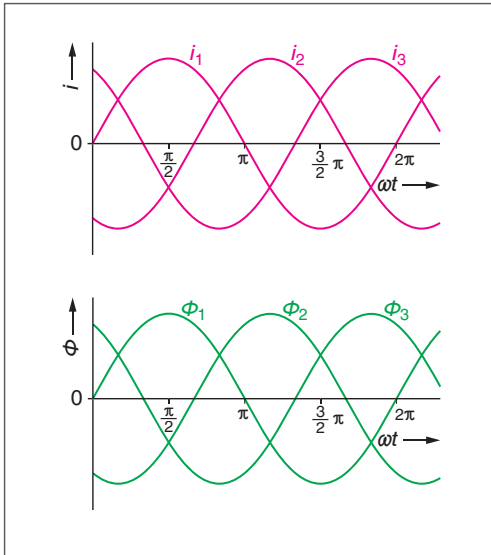
Gleichfeld
constant field

Wechselfeld
alternating field

Drehfeld
rotating field

Strang
phase winding

Polarität
polarity

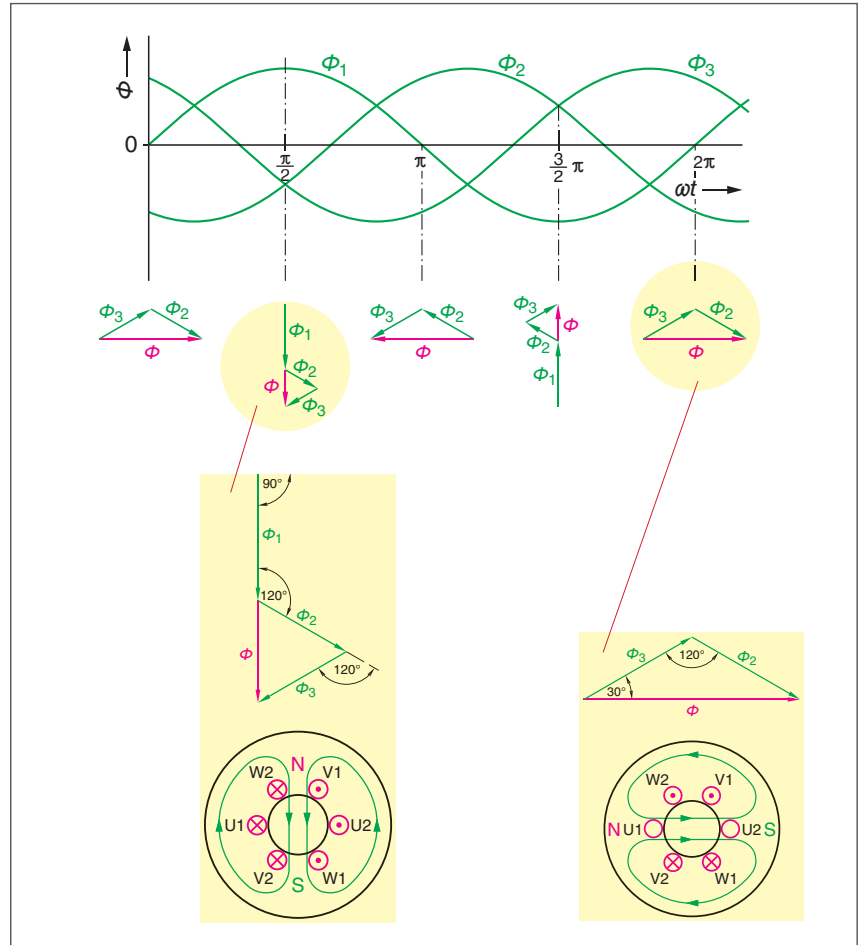


32 Strom und Magnetfluss beim Drehfeld

Die Strangstromen sind jeweils um 120° phasenverschoben (Bild 32).

Die drei magnetischen Wechselfelder rufen ein **magnetisches Drehfeld** hervor (Bilder 32, 33).

Der **Betrag** (die Zeigerlänge) des magnetischen Flusses bleibt gleich. Dargestellt ist ein **Rechtsdrehfeld** (Uhrzeigersinn).



33 Magnetisches Drehfeld, Entstehung

Drehfelddrehzahl

Die Drehfelddrehzahl hängt von der **Frequenz** und der **Polpaarzahl** ab.

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

n Drehfelddrehzahl in $\frac{1}{s}$

f Frequenz in Hz

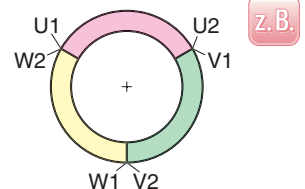
p Polpaarzahl



Prüfung

1. Wie kann ein magnetisches Gleichfeld erzeugt werden?
2. Wie kann ein magnetisches Wechselfeld erzeugt werden?
3. Wie kann ein magnetisches Drehfeld erzeugt werden?
4. Wicklung $p = 4$, Frequenz $f = 50$ Hz. Berechnen Sie die Drehfelddrehzahl.
5. Von welchen Größen ist die Drehfelddrehzahl abhängig?

Alle Strangwicklungen haben die Polpaarzahl $p = 1$. Die Frequenz der Dreiphasen-Wechselspannung beträgt $f = 50$ Hz. Wie groß ist die Drehfelddrehzahl n ?



Die Drehzahl ergibt sich in der Einheit $\frac{1}{s}$. Wenn die Einheit $\frac{1}{\text{min}}$ gewünscht wird, muss mit dem Faktor 60 multipliziert werden.

$$1 \text{ min} = 60 \text{ s}$$

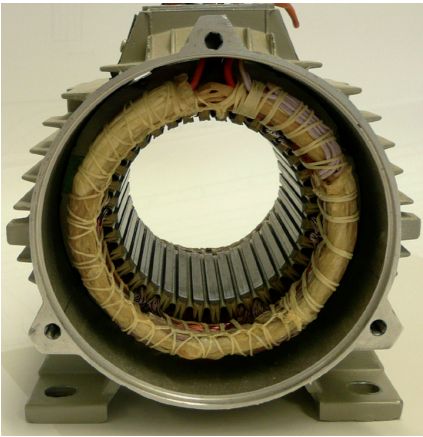
$$\begin{aligned} n &= \frac{f}{p} \\ n &= \frac{50 \text{ Hz}}{1} = 50 \frac{1}{s} \\ n &= \frac{f \cdot 60}{p} = \frac{50 \text{ Hz} \cdot 60}{1} \\ n &= 3000 \frac{1}{\text{min}} \end{aligned}$$

6. Welchen Einfluss hat es auf die Drehfelddrehzahl, wenn die Frequenz um 25 % abnimmt?

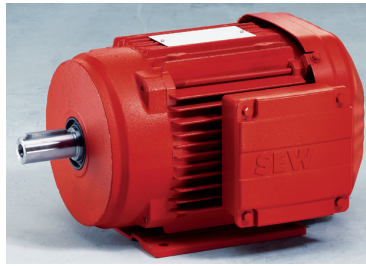
7. Wieso hat der Magnetfluss den gleichen zeitlicher Verlauf wie der Strom?

Polpaarzahl p

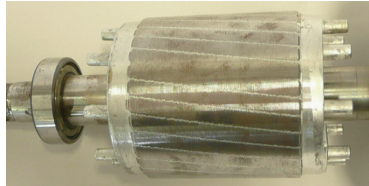
Ein magnetisches Feld hat immer 2 Pole (= 1 Polpaar).



Ständer eines
Drehstrommotors



Käfigläufer



34 Kurzschlussläufermotor; Ausführungsbeispiel und Aufbau



Polzahl
pole pair

Polpaarzahl
pair of poles

Kurzschlussläufermotor
squirrel cage rotor motor

Läufer
rotor

Ständer
stator

Drehmoment
torque, moment of couple

■ Drehmomentbildung

Zur Drehmomentbildung sind immer zwei Magnetfelder notwendig, die in geeigneter Weise aufeinander einwirken.

@ Interessante Links

• christiani-berufskolleg.de

Kurzschlussläufermotor

Ständer

Feststehendes Teil des Motors. In den **Nuten** des **Ständerblechpakets** ist die **Drehstromwicklung** untergebracht.

Das **Eisen** ist **geblättert**, um die **Wirbelstromverluste** möglichst gering zu halten.

Unterschiedliche **Polpaarzahlen** der Ständerwicklung sind möglich. Sie bestimmen die Drehzahl des Motors.

Läufer

In den Nuten des **Läuferblechpakets** (geblättert) befinden sich **Leiterstäbe**, die an den Stirnseiten durch **Kurzschlussringe** verbunden sind.

Da die Leiterstäbe mit den Kurzschlussringen einem **Käfig** ähneln, spricht man von einem **Kurzschlussläufer** oder auch **Käfigläufer**.

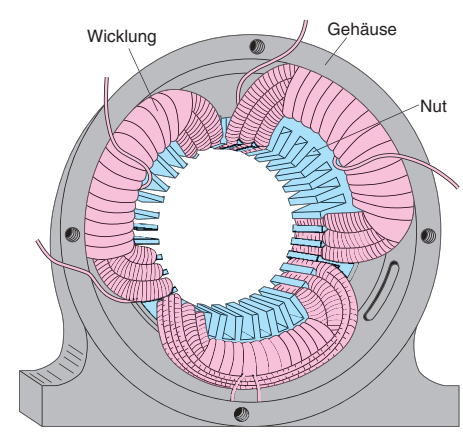
Der Motor hat einen einfachen Aufbau und ist entsprechend robust.

Wirkungsweise

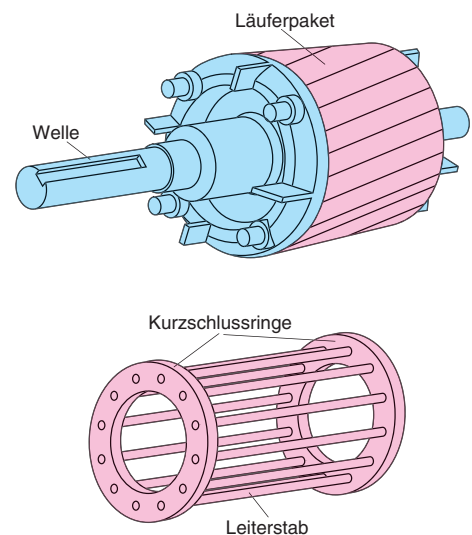
In der **Ständerwicklung** erzeugt der Drehstrom ein **magnetisches Drehfeld**. Die Feldlinien dieses Drehfelds schneiden die Leiterstäbe des Läufers.

In den Leiterstäben wird eine Spannung induziert. Die induzierte Spannung ruft einen **Läuferstrom** hervor. Der Läuferstrom bewirkt ein **Magnetfeld** (Läuferfeld).

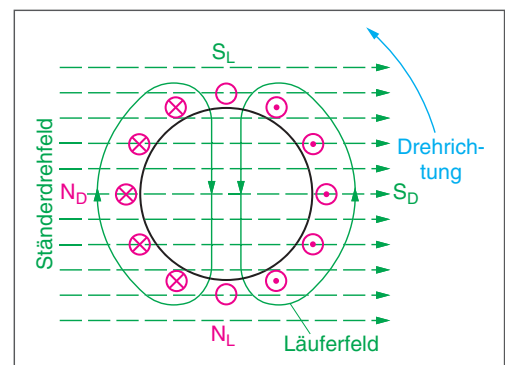
Drehfeld und Läuferfeld verursachen ein **Drehmoment**. Der Läufer bewegt sich im **gleichen Drehsinn** wie das **Drehfeld** des Ständers (Bild 37).



35 Ständer eines Kurzschlussläufermotors



36 Läufer eines Kurzschlussläufermotors



37 Drehmomentbildung, zwei Magnetfelder



Prüfung

1. Beschreiben Sie den Aufbau eines Kurzschlussläufermotors.

- **Motor eingeschaltet, Drehzahl noch null**
Die Leiterstäbe werden von den meisten Feldlinien geschnitten (Bild 38).

$$n_1 = 3000 \frac{1}{\text{min}}, n_2 = 0$$

→ Wirksam für die Induktionsspannung im Läufer: $n_1 - n_2 = 3000 \frac{1}{\text{min}}$.

Flussänderungsgeschwindigkeit $\Delta\Phi/\Delta t$ und Induktionsspannung sind maximal.

Die hohe Induktionsspannung bewirkt einen hohen Läuferstrom. Dadurch wird der Ständerstrom steigen → hoher Einschaltstrom. Der hohe Läuferstrom bewirkt ein starkes Läuferfeld. Daher entwickelt der Motor ein kräftiges Anzugsmoment.

- **Motor hat Bemessungsdrehzahl erreicht**
Die Leiterstäbe werden nur noch von relativ wenigen Feldlinien geschnitten (Bild 38).

$$n_1 = 3000 \frac{1}{\text{min}}, n_2 = 2940 \frac{1}{\text{min}}$$

→ Wirksam für die Induktionsspannung im Läufer: $n_1 - n_2 = 60 \frac{1}{\text{min}}$.

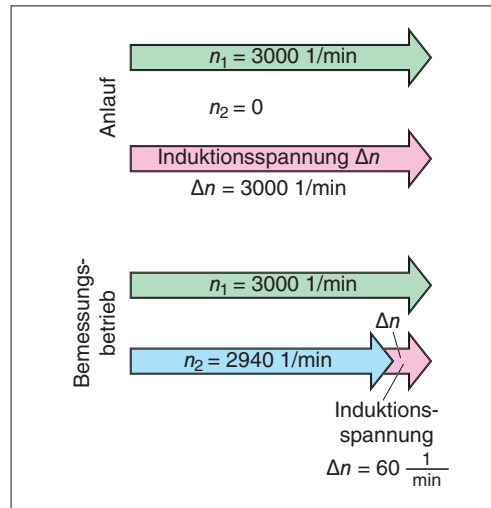
Flussänderungsgeschwindigkeit $\Delta\Phi/\Delta t$ und Induktionsspannung sind relativ gering.

Zu beachten ist, dass hierbei die Bemessungsdaten des Leistungsschildes erreicht werden.

Die **Läuferdrehzahl** n_2 kann niemals die Drehfeldfrequenz n_1 erreichen:
Keine Feldlinien schneiden die Läuferstäbe → keine Induktionsspannung im Läufer → kein Läuferstrom → kein Magnetfeld → kein Drehmoment.

Der Läufer kann aus eigener Kraft niemals die Drehfeldfrequenz erreichen. Der Läufer läuft **asynchron**.

Die Differenz zwischen Drehfeldfrequenz n_1 und Läuferdrehzahl n_2 nennt man **Schlupfdrehzahl** n_s .



38 Hochlaufen des Motors

Schlupfdrehzahl

$$n_s = n_1 - n_2$$

Sinnvoll wird die Schlupfdrehzahl n_s auf die Drehfeldfrequenz n_1 bezogen und in Prozent angegeben. Dies nennt man den **Schlupf** s des *Asynchronmotors*.

$$s = \frac{n_s}{n_1} \cdot 100 \% = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100 \%$$

s Schlupf in %

n_s Schlupfdrehzahl in $\frac{1}{\text{min}}$

n_1 Drehfeldfrequenz in $\frac{1}{\text{min}}$

n_2 Läuferdrehzahl in $\frac{1}{\text{min}}$

Im *Leerlauf* ist der Schlupf gering. Er wird mit zunehmender Motorbelastung größer.

Frequenz der Läuferfrequenz

(Netzfrequenz $f_1 = 50 \text{ Hz}$)

Motor eingeschaltet (Läufer steht noch):

Frequenz $f_2 = 50 \text{ Hz}$.

Der Motor verhält sich praktisch wie ein Transformator. Läuferfrequenz und *Läuferfrequenz* sind jetzt am größten.



Schlupf
slip, slippage

Schlupfdrehzahl
asynchronous speed

Leistungsschild
rating plate

Anzugsmoment
initial torque, starting torque, locked-rotor torque

Sattelmoment
cogging torque

Kippmoment
break-down torque, pull-out torque

■ Asynchronmotoren

sind Induktionsmotoren. Der Strom im Läufer wird durch Induktion bewirkt. Zum Betrieb benötigen diese Motoren einen Schlupf.

Ein 1,5-kW Drehstrommotor hat eine Drehzahl von $1390 \frac{1}{\text{min}}$.
Wie groß sind Schlupfdrehzahl und Schlupf?

Leistungsschildangabe: $1390 \frac{1}{\text{min}}$.

Es handelt sich um einen Motor mit 2 Polpaaren/Strang ($p = 2$).

Die Drehfeldfrequenz an 50 Hz ist also $1500 \frac{1}{\text{min}}$.

z.B.

$$n_s = n_1 - n_2$$

$$n_s = 1500 \frac{1}{\text{min}} - 1390 \frac{1}{\text{min}} = 110 \frac{1}{\text{min}}$$

$$s = \frac{n_s}{n_1} \cdot 100 \% = \frac{110 \frac{1}{\text{min}}}{1500 \frac{1}{\text{min}}} \cdot 100 \%$$

$$s = 7,33 \%$$

Zunehmende Läuferdrehzahl

Läuferspannung und Läuferfrequenz nehmen ab, da die *Drehzahldifferenz* zwischen n_1 und n_2 geringer wird. Die Läuferstäbe werden dann weniger oft vom Ständerdrehfeld überholt und geschnitten.

$$f_2 = s \cdot f_1$$

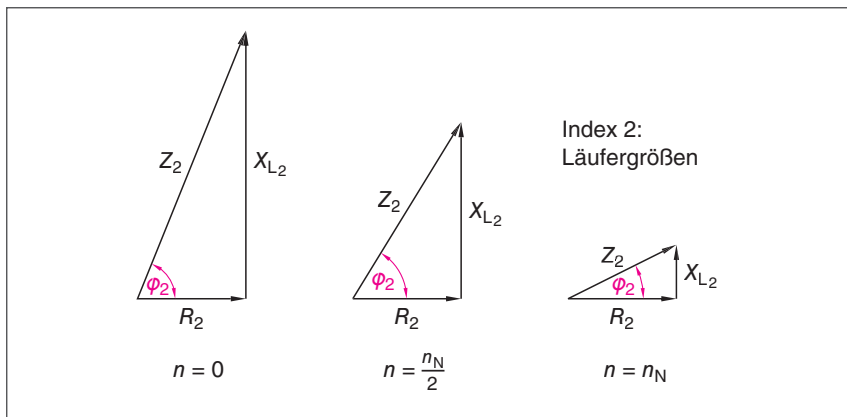
f_2 Läuferfrequenz in Hz

f_1 Ständerfrequenz in Hz

s Schlupf

Mit zunehmender Läuferdrehzahl nehmen *Be-
trag* und *Frequenz* der induzierten Läuferspannung stark ab.

Bei *Bemessungsdrehzahl* liegt die **Läuferfre-
quenz** je nach Motor zwischen 2 und 5 Hz.



39 Hochlauf des Kurzschlussläufermotors

Betriebsverhalten Rundstabläufer

Rundstabläufer: Läuferkäfig aus nahezu runden Stäben (Kreisquerschnitt) aufgebaut.

- **Ohmscher Widerstand** sehr gering.
- **Beim Einschalten ist der induktive Widerstand** ($X_L = 2\pi \cdot f \cdot L$) relativ groß (Frequenz mit 50 Hz maximal).
- **Somit ist der Anlaufstrom überwiegend ein Blindstrom**, der nicht drehmomentbildend wirkt.
- **Rundstabläufer entwickeln bei hohem Anzugsstrom nur ein geringes Anzugsmoment.**

Drehmomentkennlinie

Unterschieden wird zwischen folgenden Drehmomenten (Bild 41, Seite 161):

M_A Anlaufmoment

M_S Sattelmoment

M_N Bemessungsmoment

M_K Kippmoment

M_0 Leerlaufmoment

Sattelmoment

Kleinstes Drehmoment nach dem Anlauf.

Durch schräg oder gestaffelt angeordnete Läuferstäbe, unterschiedliche *Nutzahlen* in Ständer und Läufer, optimierte Wicklungsausführung kann es praktisch vermieden werden.

Kippmoment

Maximales Drehmoment, das der Motor an der Welle abgeben kann.

Mit zunehmender Drehzahl nimmt die Frequenz der induzierten Läuferspannung ab.

■ Drehstromberechnung

Beachten Sie:

n in $\frac{1}{s}$

P in W

einsetzen.

1 Nm = 1 Ws

Motor nach Beispiel auf Seite 159.

Wie groß ist die Frequenz der Läuferspannung bei Bemessungsdrehzahl?

z.B.

Schlupf $s = 7,33 \%$

$$s = \frac{7,33 \%}{100 \%} = 0,0733$$

$$f_2 = s \cdot f_1$$

$$f_2 = 0,0733 \cdot 50 \text{ Hz}$$

$$f_2 = 3,67 \text{ Hz}$$

Welches Drehmoment (Bemessungsmoment M_N) entwickelt der 1,5-kW-Motor an der Welle? $n_N = 1390 \frac{1}{\text{min}}$

z.B.

Bemessungsleistung in Watt (W) und Drehzahl in $\frac{1}{s}$ einsetzen.

$P_N = 1500 \text{ W}$ (Wellenleistung)

$$n_N = \frac{1390 \frac{1}{\text{min}}}{60 \frac{s}{\text{min}}} = 23,16 \frac{1}{s}$$

$$M_N = \frac{P_N}{2\pi \cdot n_N}$$

$$M_N = \frac{1500 \text{ W}}{2\pi \cdot 23,16 \frac{1}{s}}$$

$$M_N = 10,3 \text{ Nm}$$

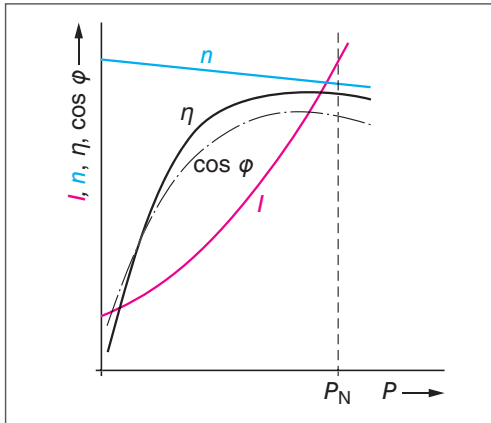
Somit wird X_{L2} geringer, während R_2 unverändert bleibt. Der Leistungsfaktor $\cos \varphi_2$ nimmt zu, die Wirkleistung steigt (Bild 39, Seite 160). Danach wirkt sich das Absinken des Läuferstroms deutlich aus und verringert das Drehmoment des Motors.

Bemessungsmoment

Bei seinen *Bemessungsdaten* (Leistungsschildangaben) gibt der Motor sein Bemessungsmoment ab. Er läuft dann mit der **Bemessungsdrehzahl**.

Nebenschlussverhalten

Eine erhebliche Änderung der Belastung ΔM bewirkt nur eine relativ geringe Änderung der Drehzahl Δn . Man spricht von einem *harten Betriebsverhalten* des Motors.



40 Betriebskennlinien

Stromverdrängungsläufer

Technische Daten eines Motors.

$n_1 = 1500$ 1/min, $U_N = 400$ V, $f_N = 50$ Hz

P_N kW	n_N 1/min	I_N A	$\frac{I_A}{I_N}$	M_N Nm	$\frac{M_A}{M_N}$	$\frac{M_K}{M_N}$	$\cos \varphi$	η %
4	1410	8,7	5,8	27,1	2,3	2,5	0,81	82

P_N : Abgegebene Wellenleistung (*mechanische Leistung*). Die aufgenommene *elektrische Leistung* P_{el} ist größer.

• Aufgenommene Leistung ermitteln

1. Möglichkeit (*Leistungsschildangaben*)

$U_N = 400$ V, $I_N = 8,7$ A, $\cos \varphi = 0,81$

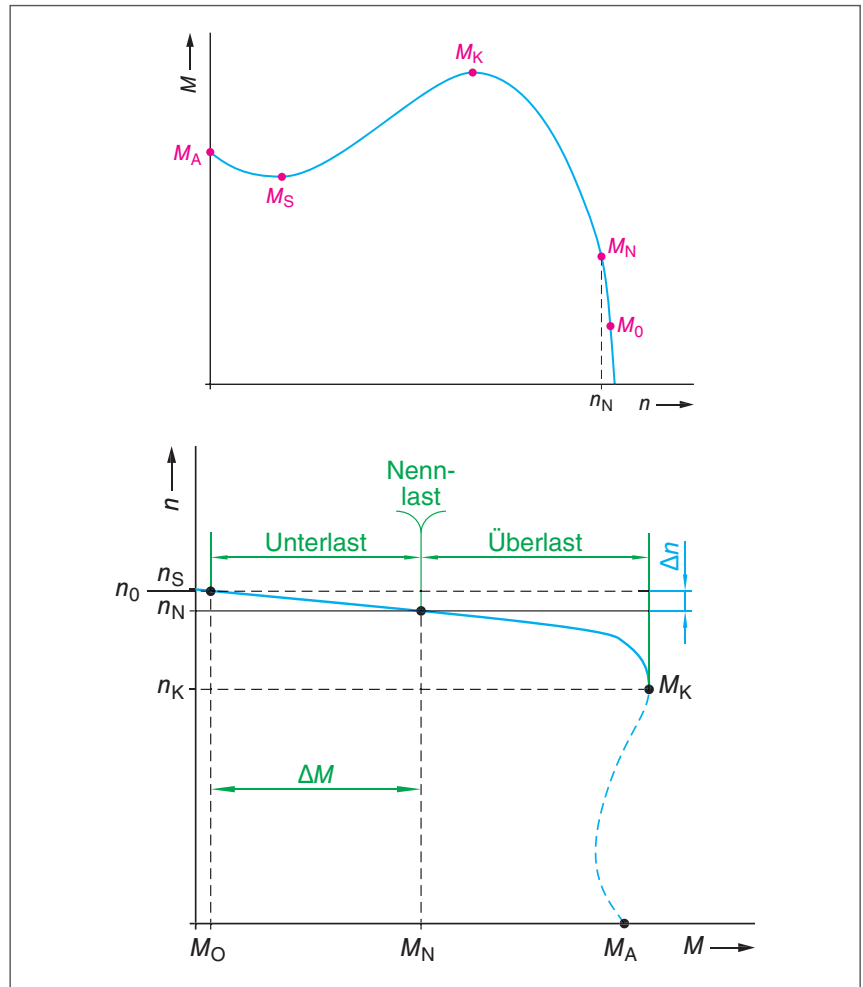
$P_{el} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$

$P_{el} = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 8,7 \text{ A} \cdot 0,81 \approx 4,9 \text{ kW}$

2. Möglichkeit (*Wirkungsgrad*)

$P = 4 \text{ kW}$, $\eta = 0,82$

$\eta = \frac{P}{P_{el}} \rightarrow P_{el} = \frac{P}{\eta} = \frac{4 \text{ kW}}{0,82} = 4,9 \text{ kW}$



41 Drehmomentkennlinie des Kurzschlussläufermotors

Anzugsstrom des Motors

$$\frac{I_A}{I_N} = 5,8 \rightarrow I_A = 5,8 \cdot I_N = 5,8 \cdot 8,7 \text{ A} = 50,5 \text{ A}$$

• Anzugsmoment des Motors

$$\frac{M_A}{M_N} = 2,3 \rightarrow M_A = 2,3 \cdot M_N$$

$$= 2,3 \cdot 27,1 \text{ Nm} = 62,3 \text{ Nm}$$

Beim *Anlauf* kann der Motor ein *kräftiges Anzugsmoment* entwickeln.

Die Angabe $M_A/M_N = 2,3$ besagt, dass der Motor (kurzzeitig) um 230 % über *Bemessungsmoment* belastbar ist.

Wie ist dieses kräftige Anzugsmoment zu erklären?

Der Läufer des Motors müsste *zwei getrennte Wicklungen* haben:

1. Für den *Einschaltmoment* eine Kurzschlusswicklung mit *möglichst hohem ohmschen Widerstand*. Wegen der *geringen Phasenverschiebung* (dem guten Leistungsfaktor) könnte der Motor ein *kräftiges Anzugsmoment* entwickeln.

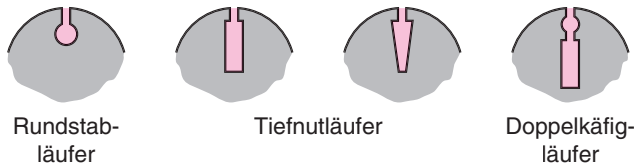
Motor, technische Daten



Idealfall beim Anlauf

Läuferwicklung hat einen

- hohen ohmschen Widerstand.
- einen geringen induktiven Widerstand.



42 Stromverdrängungsläufer, Beispiele für Läuferformen

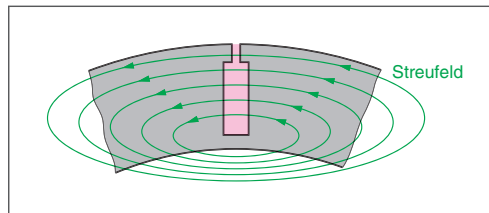
■ Stromverdrängungsläufer

Ziel: Hohes Anzeigemoment bei geringem Anzugsstrom.

2. Im Betriebszustand eine Kurzschlusswicklung mit geringem ohmschen Widerstand (geringe Verluste).

Das Ergebnis dieser Überlegungen sind **Stromverdrängungsläufer**. Dabei werden verschiedene Läuferformen verwendet (Bild 42).

Um den Läuferstab herum ruft der Läuferstrom ein **magnetisches Streufeld** hervor. Zum **Leitermittelpunkt** hin nimmt die Streufeldstärke zu.



43 Magnetisches Streufeld

Wenn die Nut in die Tiefe verlängert wird, nutzt der Läuferstrom wegen des **Skineffekts** den Teil des Stabquerschnitts, der zur Nutöffnung hinliegt.

Durch den geringen genutzten Leiterquerschnitt wird der **Leiterwiderstand** größer.

Skineffekt

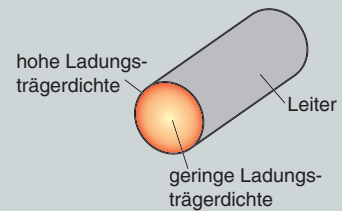
Ursache jedes Magnetfelds ist der bewegte Ladungsträger.

Somit ruft ein bewegter Ladungsträger (durch Induktion hervorgerufen) ebenfalls ein Magnetfeld hervor.

Beide Magnetfelder wirken auf den Ladungsträger ein und drängen ihn an die Leiteroberfläche (Skineffekt).

Dadurch nimmt der wirksame Leiterquerschnitt ab und der Widerstand des Leiters wird größer.

Dieser **Skineffekt** nimmt mit steigender Frequenz zu.



Beim **Hochlaufen** des Motors nimmt das Magnetfeld des Läufers ab, somit wird auch das **Streufeld** geringer. Der **genutzte Leiterquerschnitt** nimmt zu und der **Leiterwiderstand** sinkt.

Genutzt wird dabei die Tatsache, dass die Frequenz der Läuferstromspannung beim Hochlaufen von 50 Hz auf etwa 2 – 5 Hz sinkt.

Die **Ausführung der Läuferstäbe** hat Einfluss auf die **Hochlaufkennlinien** des Motors. Dies gilt für den Verlauf von **Drehmoment** und **Stromaufnahme** (Bild 44).

Die **Optimierung des Käfigläufers** hat die Betriebseigenschaften des Motors im Laufe der Zeit wesentlich verbessert.

Betriebskennlinie

Die Drehzahl n fällt bei Belastung nur geringfügig ab. Der Motor hat **Nebenschlussverhalten**.

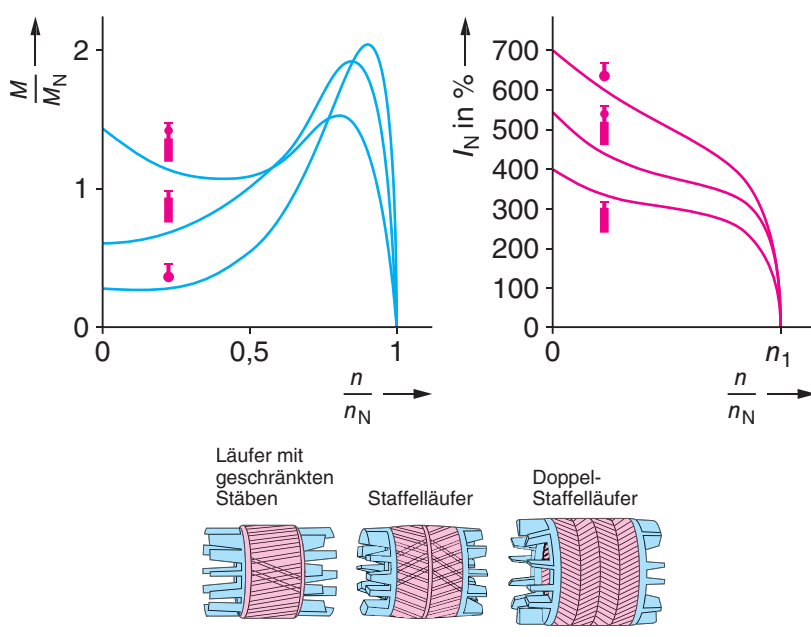
Wirkungsgrad η und **Leistungsfaktor $\cos \varphi$** sind stark belastungsabhängig.

Der Motor ist so ausgelegt, dass bei **Bemessungsbetrieb** das Produkt von η und $\cos \varphi$ möglichst groß wird.

Folgerung: Die Bemessungsleistung des Antriebsmotors sollte dem Leistungsbedarf der Arbeitsmaschine möglichst genau angepasst werden.

Beispiel für Idealfall

- Leistungsbedarf Arbeitsmaschine:
 $M_L = 11 \text{ kW}$
- Bemessungsleistung Antriebsmotor:
 $M_N = 11 \text{ kW}$



44 Stromverdrängungsläufer, Drehmoment und Stromaufnahme