

# ASYNCHRONMASCHINE

## 1. Aufbau

Der feststehende Teil der Maschine wird als Stator oder Ständer, der bewegliche Teil als Rotor oder Läufer bezeichnet. Nach dem Aufbau des Rotors unterscheidet man zwischen Käfig- und Schleifringläufer.

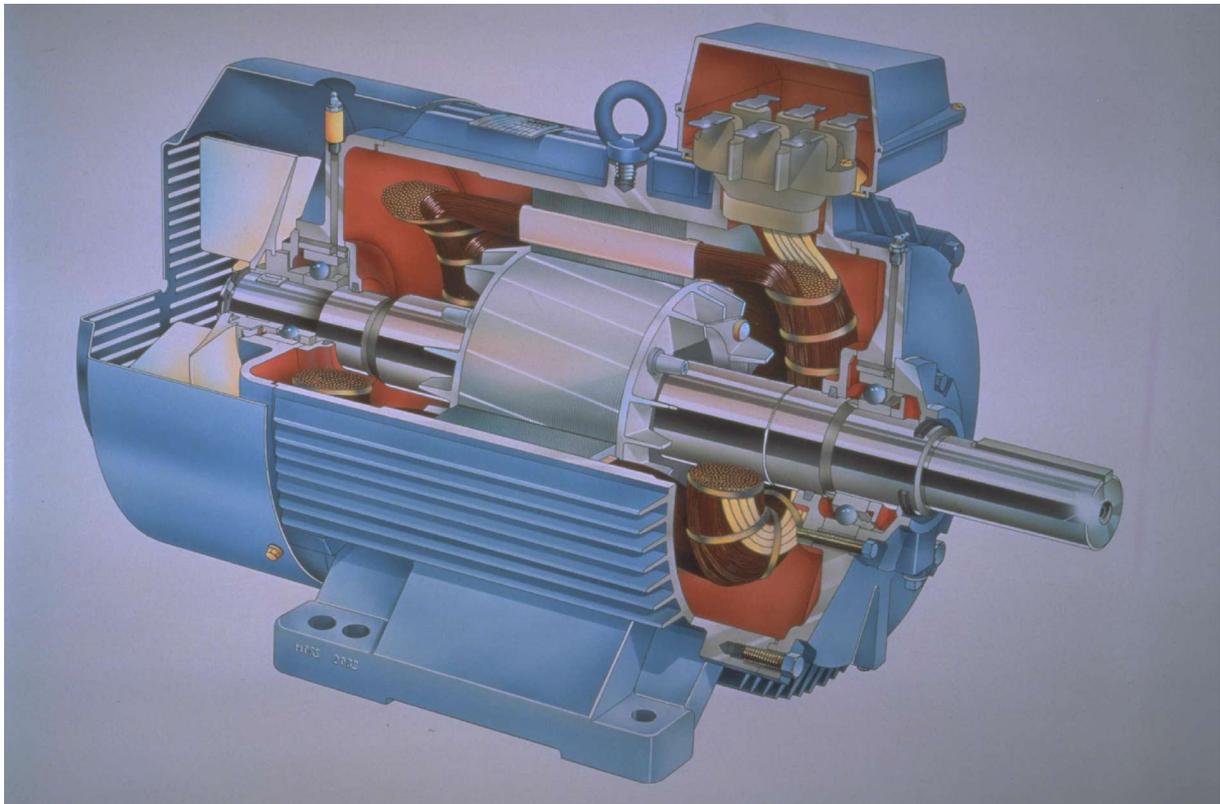


Abb. 1 Prinzipieller Aufbau eines Käfigläufermotors

### 1.1. Stator

Der Stator besteht im aktiven Teil aus gegeneinander isolierten Dynamoblechen. Längs der Bohrung enthält das Blechpaket Nuten zur Aufnahme der meist dreiphasigen Wicklung. In einer Nut liegen dabei mehrere lackisolierte Drähte. Im einfachsten Fall werden in den Statornuten die Wicklungen der drei Phasen so aufgeteilt, dass räumliche alle  $60^\circ$  Stäbe einer anderen Phase liegen. Die elektrischen Ströme in den einzelnen Stäben sind ebenfalls um  $60^\circ$  verschoben. Man spricht dann von einer Polpaarzahl  $p=1$ . Der Aufbau der Wicklung wird durch das Wickelschema angegeben. Dazu zeichnet man die Abwicklung des Umfanges mit den Nuten auf.

Beispiel:

$p = 1$	.... Polpaarzahl
$N = 18$	.... gesamte Zahl der Statornuten
$m = 3$	.... Strangzahl (Dreiphasennetz)
$z = 1$	.... Anzahl der Leiter in einer Nut

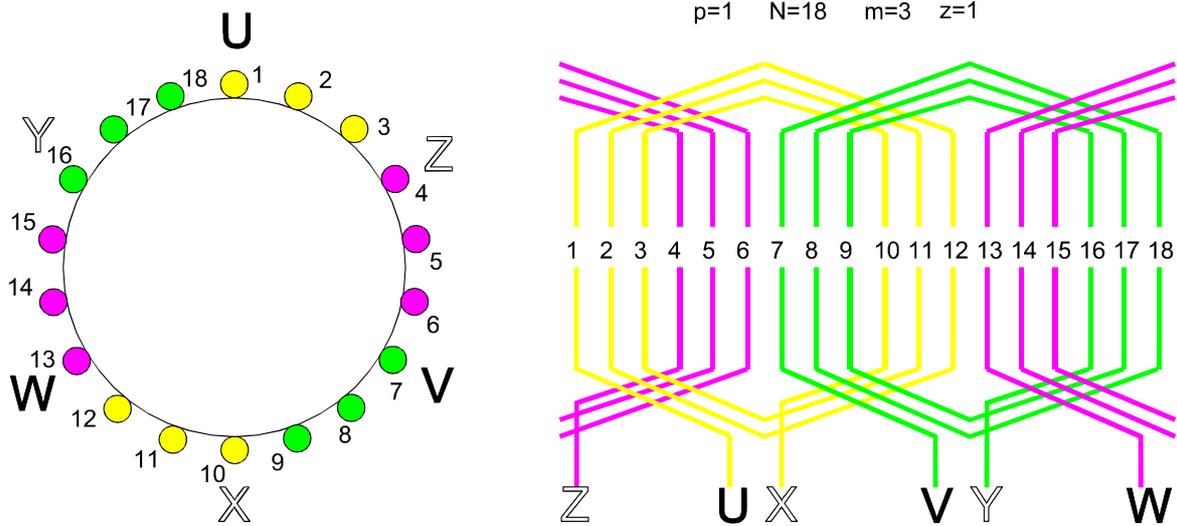


Abb. 2 Wickelschema einer zweipoligen ( $p=1$ ) Drehstromwicklung

Wenn man jedoch für jede Phase nicht nur eine Spule einlegt, sondern zwei Spulen, dann ergibt sich ein mechanischer Winkel von  $30^\circ$  mit dem sich die Spulenzugehörigkeit in den Nuten ändert. Die Wicklung wird gedanklich auf den halben Umfang zusammengesoben und zweimal eingebaut.

Beispiel:

- $p = 2$  .... Polpaarzahl
- $N = 24$  .... gesamte Ständernutzzahl
- $m = 3$  .... Strangzahl (Dreiphasennetz)
- $z = 10$  .... Anzahl der Leiter in einer Nut

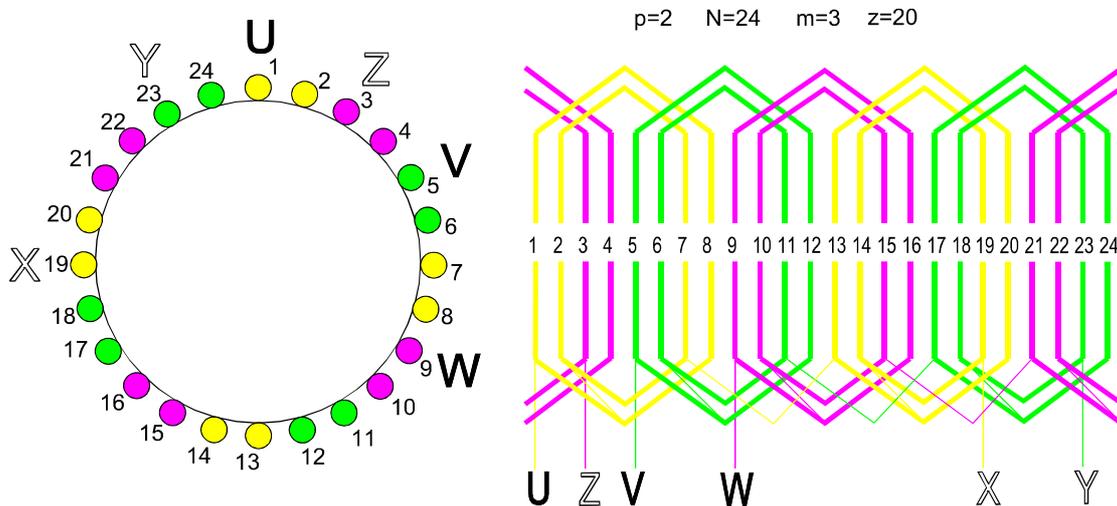


Abb. 3 Wickelschema einer vierpoligen ( $p=2$ ) Drehstromwicklung

Der elektrische Winkel zwischen den Spulenströmen bleibt jedoch  $60^\circ$ .

- $\alpha_{el} = p \alpha_m$
- $\alpha_{el}$  ... elektrischer Winkel
- $p$  ... Polpaarzahl
- $\alpha_m$  ... mechanischer Winkel

Der mechanische Winkel kann über die Polpaarzahl verändert werden. Je höher die Anzahl der Polpaare ist, umso langsamer dreht sich der Läufer.

Polpaarzahl $p$	Drehfelddrehzahl bei 50Hz $n_{Sy}$
1	3000 U/min
2	1500 U/min
3	1000 U/min
4	750 U/min
:	:

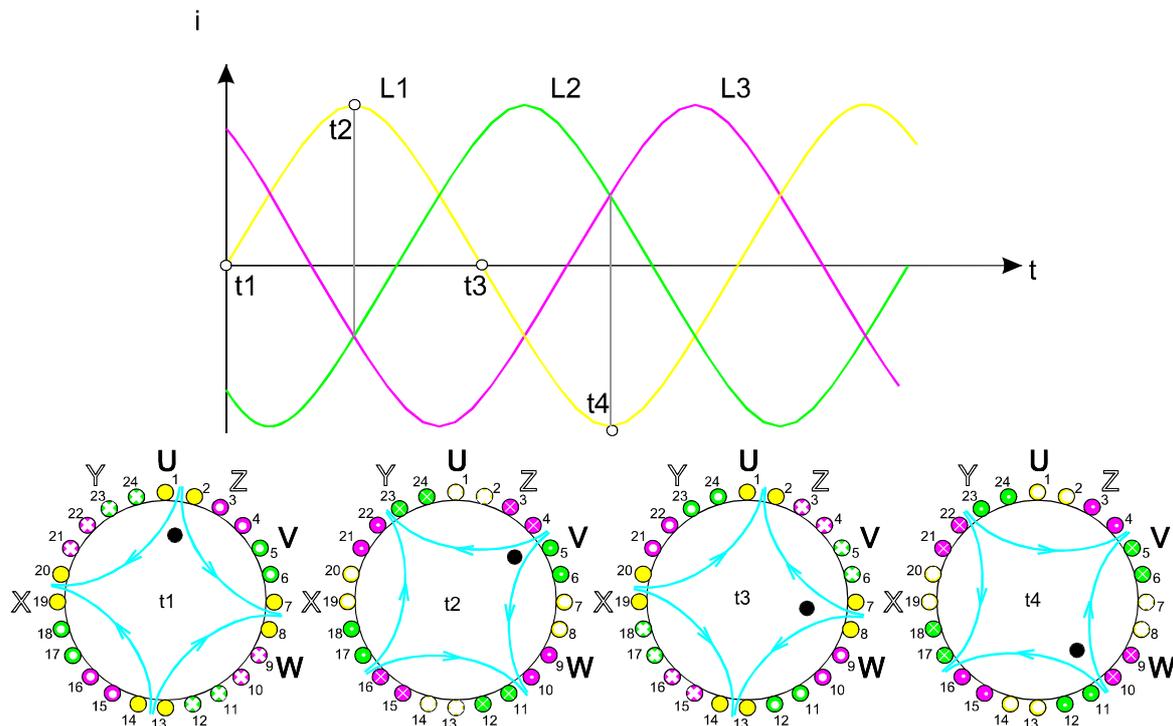


Abb. 4 Konstruktion des Drehfeldes bei einer vierpoligen Maschine

Das Feld läuft in der vierpoligen Maschine nur noch mit der halben Geschwindigkeit der zweipoligen Maschine um. Erst nach zwei vollen elektrischen Schwingungen ist ein mechanischer Umlauf beendet.

## 1.2. Rotor

Der Rotor ist wie der Stator aus Dynamoblechen aufgebaut und besitzt ebenfalls entlang der Achse eine Nutung. Der Luftspalt zwischen Stator und Rotor wird so gering gehalten, wie es konstruktiv möglich ist (wenige Zehntel Millimeter). Nach dem Aufbau des Rotors unterscheidet man:

- **Schleifringläufer** (heute nahezu ohne Bedeutung)  
Er besitzt eine Drehstromwicklung, deren Enden kurzgeschlossen sind und deren Anfänge über drei Schleifringe und Bürsten auf das Klemmbrett geführt sind. Die Polpaarzahl von Rotor und Stator muss gleich sein.

➤ **Käfigläufer**

Er besitzt keine von außen zugängliche Wicklung. Die Nuten sind mit Profilstäben aus Kupfer, Bronze oder Aluminium ausgefüllt. An beiden Stirnseiten sind die Stäbe über Ringe elektrisch verbunden (Kurzschluss).

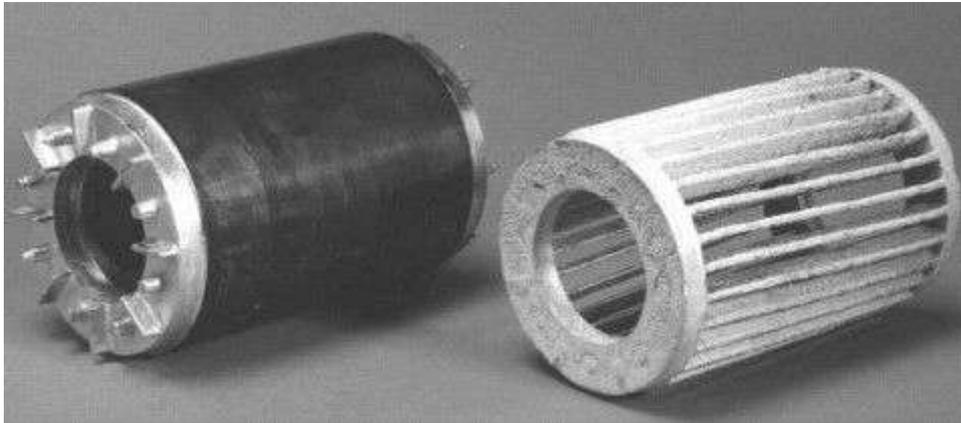


Abb. 5 Aufbau eines Käfigläufers

## 2. Wirkungsweise

Die Statorwicklung baut ein Drehfeld auf, das mit der Synchrondrehzahl  $n_{Sy}$  umläuft.

$$n_{Sy} = \frac{f_1}{p}$$

$n_{Sy}$	...	Synchrondrehzahl [U/s]
$f_1$	...	Netzfrequenz [Hz]
$p$	...	Polpaarzahl

Das vom Stator erzeugte Drehfeld induziert in der Rotorwicklung eine Spannung. Die Frequenz  $f_2$  der induzierten Spannung entspricht im Stillstand der Netzfrequenz  $f_1$ . Da die Stäbe im Käfig stirnseitig alle kurzgeschlossen sind, kommt es zu einem Strom im Rotor. Der Strom wird vom ohmschen Wicklungswiderstand und der Reaktanz der Läuferwicklung abhängen. Die stromdurchflossenen Läuferleitungen erfahren nun im Drehfeld eine Kraftwirkung.

$$F = I \cdot (\ell \times B)$$

$F$	...	Kraft auf einen Leiter
$I$	...	Strom durch den Leiter
$\ell$	...	Länge des Leiters

Durch diese Kraft wird der Leiter in Bewegung gesetzt. Er versucht dem Drehfeld nachzueilen. Mit zunehmender Drehzahl wird die Relativgeschwindigkeit zwischen Drehfeld und Läufer abnehmen. Somit reduziert sich auch die im Läufer induzierte Spannung.

$$U_2 \text{ prop. } (n_{Sy} - n_{\text{Rotor}})$$

Bei synchroner Drehzahl wird die induzierte Spannung Null. Ohne Spannung kann kein Strom fließen; die Beschleunigungskraft geht verloren

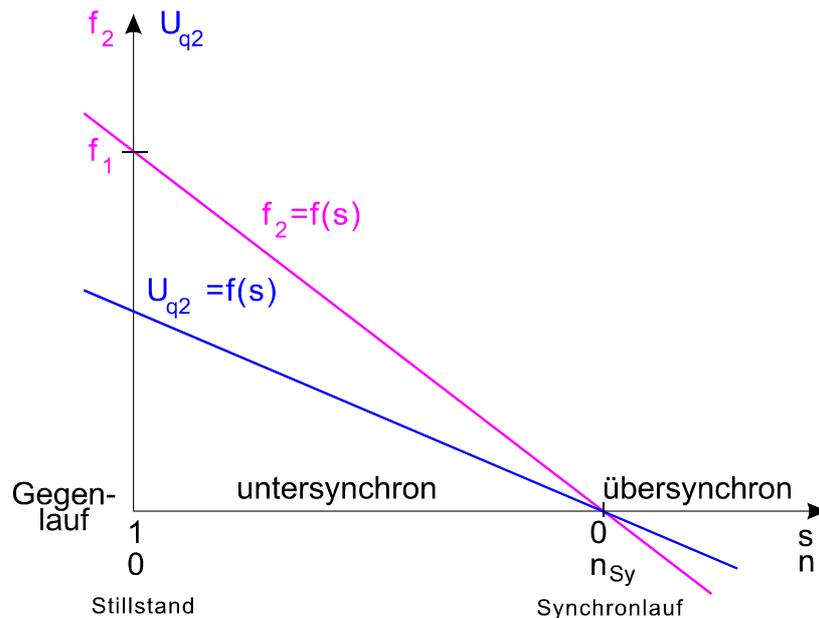


Abb. 6 Läuferfrequenz und -spannung in Abhängigkeit der Drehzahl

Wegen der mechanischen Reibungsverluste kann der Motor auch im Leerlauf nie die Synchrondrehzahl erreichen. Der Läufer hängt immer etwas hinter dem Drehfeld her, er dreht sich asynchron zum Drehfeld. Die Abweichung der Läuferdrehzahl von der Synchrondrehzahl wird durch den Schlupf  $s$  beschrieben.

$$s = \frac{n_{\text{Sy}} - n}{n_{\text{Sy}}}$$

$n_{\text{Sy}}$	... Synchrondrehzahl [U/s]
$n$	... Rotordrehzahl [U/s]
$s$	... Schlupf

$$n = n_{\text{Sy}} (1 - s)$$

Der Stillstand der Maschine entspricht dem Schlupf  $s=1$ , die Synchrondrehzahl dem Schlupf  $s=0$ . Die Einführung des Schlupfs bietet den Vorteil, dass Motoren mit unterschiedlichen Polpaarzahlen verglichen werden können.

### Überlegungen zur Drehmomentenkennlinie der Asynchronmaschine:

**1** Je näher die Rotordrehzahl der Drehzahl des Drehfeldes kommt, umso geringer wird die induzierte Spannung und somit das Drehmoment.

**2** Für geringe Rotordrehzahlen steigt die induzierte Spannung zwar an, aber die Induktivität des Läuferkreises führt zu einer zeitlichen Verschiebung des Läuferstroms gegenüber dem Fluss. Immer wenn der Fluss sein Maximum erreicht fließt ein kleiner Strom im Leiter. Immer wenn der Strom im Leiter sein Maximum erreicht, ist fast kein Feld mehr vorhanden. Erst mit steigender Drehzahl (sinkender Läuferfrequenz) verliert die Induktivität an Einfluss auf die Phasenverschiebung zwischen magnetischem Fluss und Läuferstrom.

**3** Die Überlagerung der beiden Effekte führt zur typischen Drehmomentenkennlinie der Asynchronmaschine.

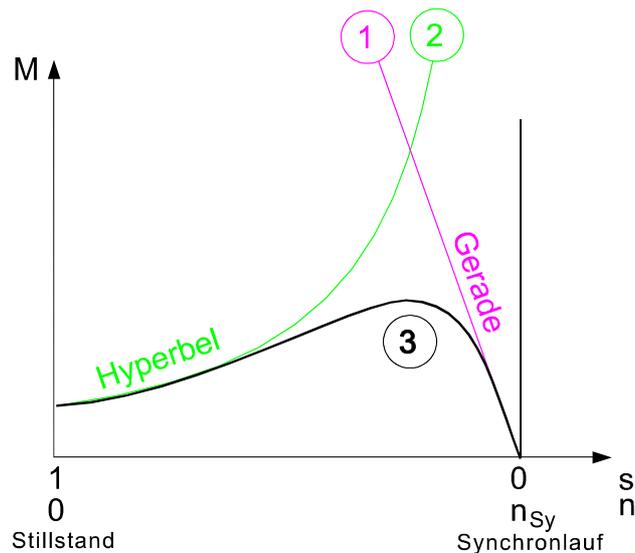


Abb. 7 Theoretische Überlegungen zum Momentenverlauf

### 3. Ersatzschaltbild

Die Asynchronmaschine verhält sich wie ein Transformator. Im Stillstand ergibt sich der Kurzschluss, bei Synchrondrehzahl der Leerlauf. Die beiden Maschengleichungen für einen kurzgeschlossenen Transformator lauten:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= R_1 \underline{I}_1 + jX_{1\sigma} \underline{I}_1 + \underline{U}_{q1} & R_1 & \dots \text{Widerstand der Statorwicklung} \\ 0 &= R_2' \underline{I}_2' + jX_{2\sigma}' \underline{I}_2' + \underline{U}_{q2}' & X_{1\sigma} & \dots \text{Streufluss im Stator} \\ & & U_1 & \dots \text{Statorspannung} \\ & & U_{q1} & \dots \text{Quellenspg. Stator} \\ & & I_1 & \dots \text{Strom im Stator} \\ & & R_2' & \dots \text{Widerstand der Rotorwicklung} \\ & & X_{2\sigma}' & \dots \text{Streufluss im Rotor} \\ & & U_{q2}' & \dots \text{Quellenspannung im Rotor} \\ & & I_2' & \dots \text{Strom im Rotor} \end{aligned}$$

Für den Stillstand ergibt sich die Quellenspannung  $U_{q2}$  direkt aus dem Windungsverhältnis (Stator/Rotor), den Wicklungsfaktoren und aus der Quellenspannung  $U_{q1}$ . Mit zunehmender Rotordrehzahl verringert sich die Frequenz  $f_2$  im Läufer und die Quellenspannung  $U_{q2}$  sinkt.

$$\begin{aligned} U_{q2}' &= s U_{q20}' & s & \dots \text{Schlupf} \\ X_{2\sigma}' &= s X_{2\sigma 0}' & U_{q20}' & \dots \text{Quellenspannung im Stillstand} \\ & & X_{2\sigma 0}' & \dots \text{Streuinduktivität im Stillstand} \end{aligned}$$

Für eine beliebige Drehzahl bzw. Schlupf lautet somit die zweite Gleichung:

$$\begin{aligned} 0 &= R_2' \underline{I}_2' + s jX_{2\sigma}' \underline{I}_2' + s \underline{U}_{q20}' \\ 0 &= (R_2'/s) \underline{I}_2' + jX_{2\sigma}' \underline{I}_2' + \underline{U}_{q20}' \end{aligned}$$

Das Ergebnis ist eine Ersatzschaltung, die derjenigen des Transformators im Kurzschluss entspricht. Die Größe des ohmschen Läuferwiderstandes ist jedoch von der Drehzahl (vom Schlupf) abhängig.

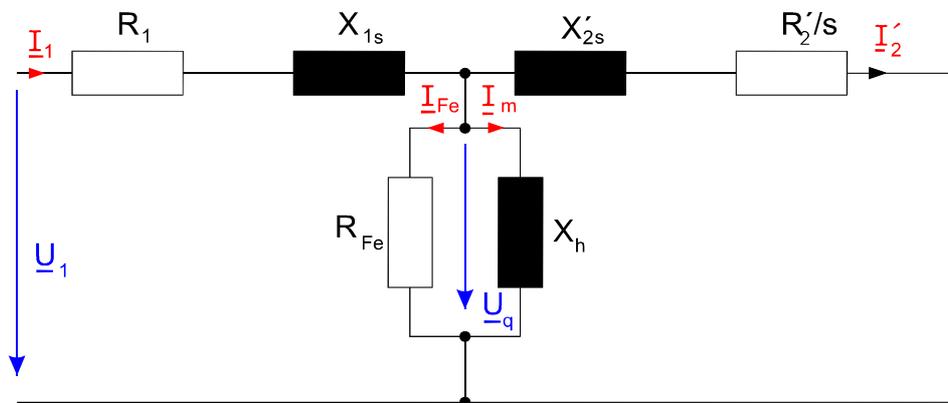


Abb. 8 Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine

Für den aufgenommenen Motorstrom ergibt sich in Abhängigkeit der Drehzahl (des Schlupfs) eine kreisförmige Ortskurve. Das Kreisdiagramm wurde um 1900 von Heyland und Osanna entwickelt und trägt daher auch die Bezeichnungen Osanna-Kreis oder Heylandkreis.

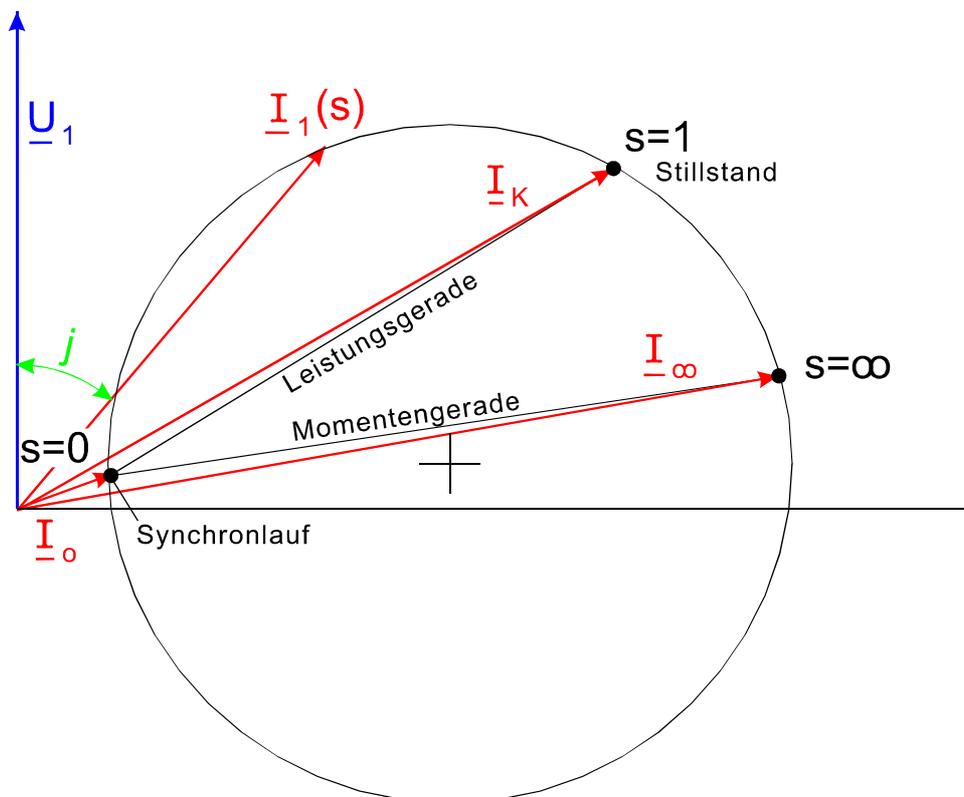


Abb. 9 Ortskurve des Stromes in Abhängigkeit der Drehzahl

## 4. Leistungsbilanz

Von der aufgenommenen Leistung  $P_1$  werden im Stator die Kupferverluste der Wicklung  $P_{Cu1}$  und die Eisenverluste  $P_{Fe}$  in Wärme umgesetzt. Auf den Rotor wird die Luftspaltleistung  $P_L$  übertragen. Im Rotor entstehen dann noch Stromwärmeverluste  $P_{Cu2}$ . Die restliche Leistung  $P_{2i}$  wird in mechanische Leistung umgesetzt.

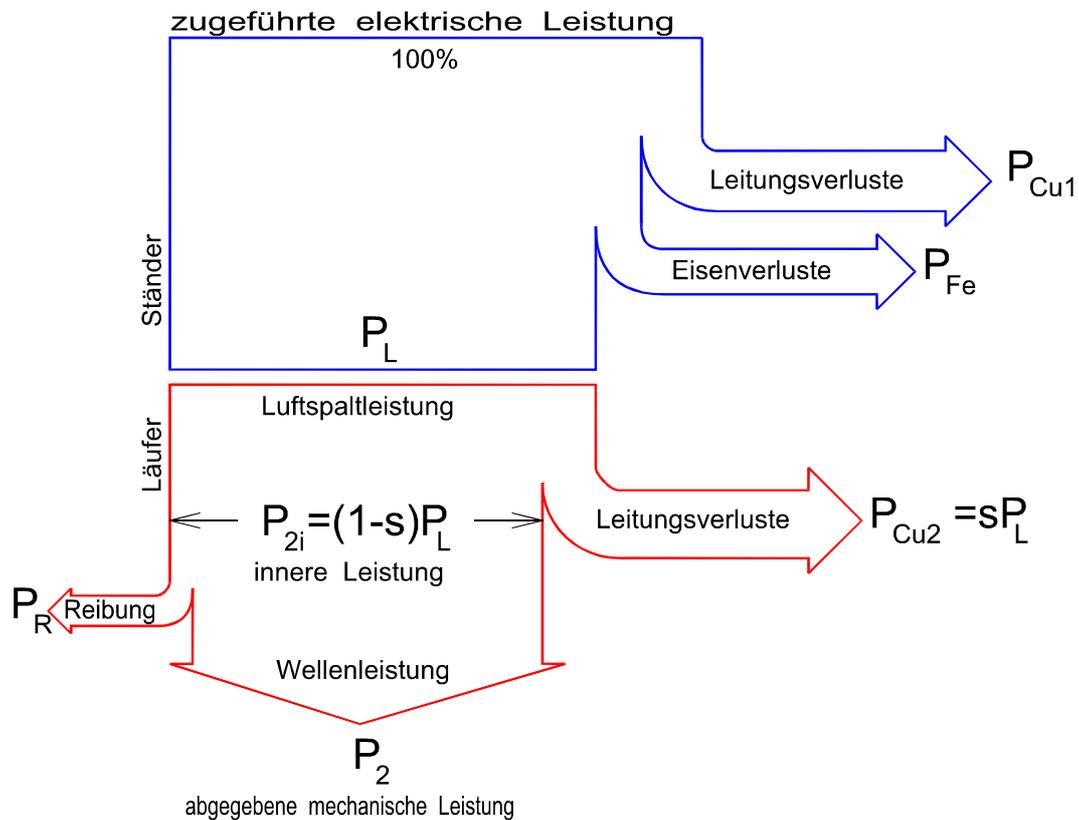


Abb. 10 Leistungsfluss des Asynchronmotors

$\frac{R_2'}{s} = R_2' + R_2' \frac{1-s}{s}$	$m$	... Anzahl der Phasen
$P_{Cu1} = m I_1^2 R_1$	$I_1$	... Strom in einer Statorwicklung
$P_{Fe} = m \cdot \frac{U_q^2}{R_{Fe}}$	$I_2'$	... Rotorstrom auf den Stator bezogen
$P_L = m \cdot I_2'^2 \cdot \frac{R_2'}{s}$	$R_{Fe}$	... Widerstand für die Eisenverluste
$P_{Cu2} = m I_2'^2 R_2' = s P_L$	$R_1$	... Widerstand für die Kupferverluste
$P_{2i} = P_L - P_{Cu2}$	$R_2'$	... Rotorwiderstand auf Stator bezogen
$P_{2i} = m \cdot I_2'^2 \cdot R_2' \cdot \frac{1-s}{s}$	$P_L$	... Luftspaltleistung
$P_{2i} = P_L (1-s)$	$P_{Cu1}$	... Kupferverluste im Stator
$P_2 = P_{2i} - P_R$	$P_{Cu2}$	... Leitungsverluste im Rotor
	$P_{2i}$	... innere mechanische Leistung
	$P_2$	... Leistung an der Welle
	$P_{Fe}$	... Eisenverluste
	$P_R$	... Reibungsverluste
	$U_q$	... Quellenspannung
	$s$	... Schlupf

Die Eisenverluste im Läufer sind durch die geringe Frequenz  $f_2$  zu vernachlässigen. Auf der mechanischen Seite müssen dann noch die Reibungs- und Lüftungsverluste  $P_R$  berücksichtigt werden, um zur Wellenleistung  $P_2$  zu kommen.

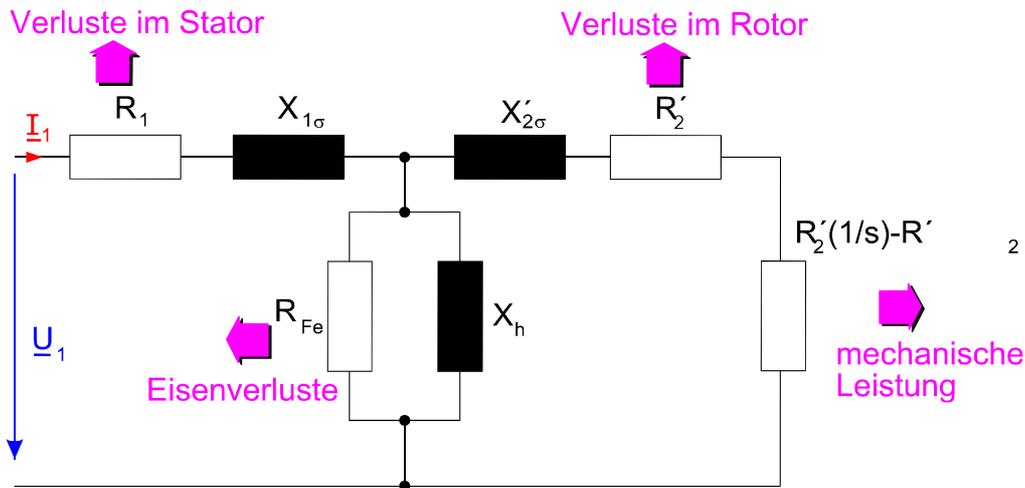


Abb. 11 Leistungsaufteilung im Asynchronmotor

Die Leistung, die an der Welle abgegeben wird, hängt nur vom Schlupf und der Luftspaltleistung ab. Bei einem blockierten Motor ( $n=0$   $s=1$ ) wird an der Welle keine Leistung abgegeben. Die gesamte Luftspaltleistung wird im Rotor in Wärme umgesetzt. Während des Hochlaufs besitzt der Asynchronmotor einen sehr schlechten Wirkungsgrad. Um eine thermische Überlastung zu vermeiden, sollte die Hochlaufzeit möglichst kurz sein.

## 5. Drehmoment

$P_{2i} = 2\pi n M_{2i}$	$P_2$ ... Leistung an der Welle (in W)
$M_{2i} = \frac{P_{2i}}{2\pi \cdot n}$	$M_2$ ... Drehmoment an der Welle (in Nm)
$M_{2i} = \frac{P_L(1-s)}{2\pi \cdot n_{Sy}(1-s)}$	$n$ ... Drehzahl (in U/s)
$M_{2i} = \frac{P_L}{2\pi \cdot n_{Sy}}$	$M_{2i}$ ... inneres Drehmoment
$M_2 = M_{2i} - M_R$	$M_R$ ... Reibungsmoment

Das innere Moment  $M_{2i}$  wird alleine durch die Luftspaltleistung bestimmt. Die Synchrondrehzahl kann als feste Größe angesehen werden.

$$P_L \text{ prop. } M \quad P_L = m \cdot I_2'^2 \cdot \frac{R_2'}{s}$$

Die Luftspaltleistung bei der Drehzahl  $n=0$  ( $s=1$ ) wird durch den Leitungswiderstand der Läuferwicklung bestimmt. Der Strom  $I_2'$  kann wegen der hohen Streureaktanz  $X_{2\sigma}'$  als nahezu konstant angesehen werden. Je besser die Stäbe im Läufer leiten, umso geringer wird das Anfahrmoment des Motors. Für ein hohes Anfahrmoment muss der Widerstand  $R_2$  möglichst groß sein. Bei Nennbetrieb der Maschine ist ein großer

Läuferwiderstand unerwünscht, da er zu einem größeren Schlupf und damit größeren Rotorverlusten führt. Beim Käfigläufer verwendet man Aluminium an Stelle von Kupfer um einen höheren Widerstand zu erzielen.

Der gesamte Verlauf der Momentenkennlinie lässt sich aus dem Leistungsfluss und dem Ersatzschaltbild ermitteln. Kennzeichnend ist, dass das Moment mit der Drehzahl ansteigt und ein Maximum erreicht (Kippmoment). Danach fällt das Moment mit der Drehzahl fast linear ab, bei der Synchrondrehzahl kann die Maschine kein Moment mehr erzeugen.

Das Kippmoment und der Kippschlupf können näherungsweise über folgende Beziehung berechnet werden:

$$M_K = \frac{m \cdot U_1^2}{2\pi \cdot n_{Sy}} \cdot \frac{1}{2 \cdot (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')}$$

$$s_K = \frac{R_2'}{X_{1\sigma} + X_{2\sigma}'}$$

$M_K$	... Kippmoment
$U_1$	... Statorspannung
$m$	... Phasenzahl
$n_{Sy}$	... Synchrondrehzahl
$X_{1\sigma}$	... Streureaktanz Stator
$X_{2\sigma}'$	... Streureaktanz Rotor
$R_2'$	... Widerstand Rotor
$s_K$	... Kippschlupf

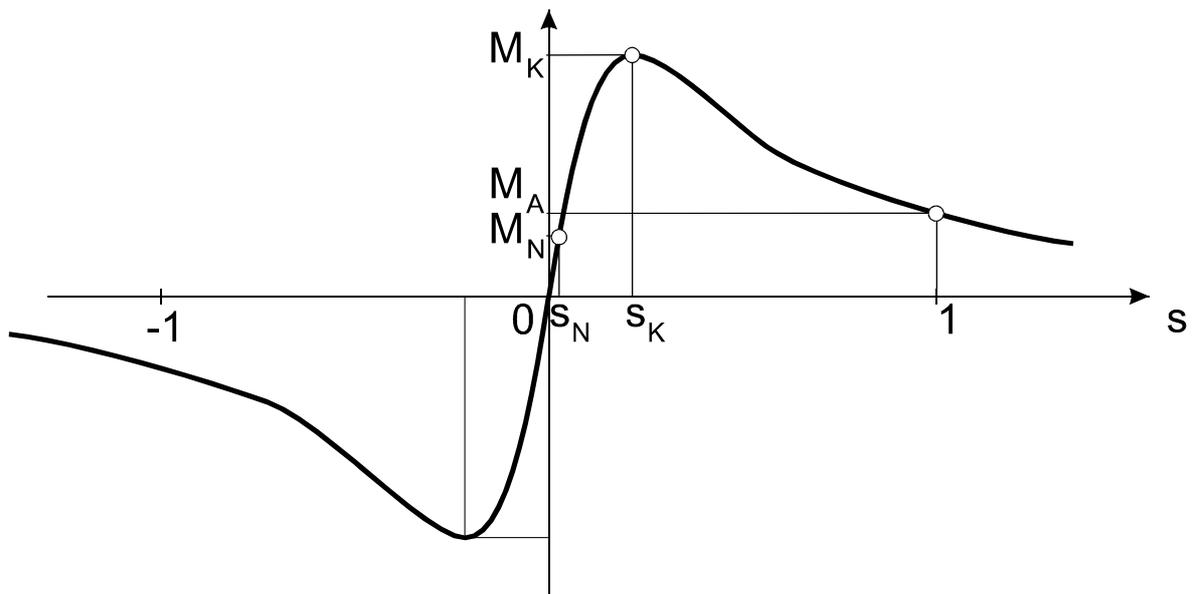


Abb. 12 Momentenkennlinie der Asynchronmaschine

Wenn man die Gleichung der Momentenkennlinie auf das Kippmoment der Maschine bezieht, ergibt sich der Zusammenhang  $M=f(s)$  über die "Kloßsche Gleichung".

$$\frac{M}{M_K} = \frac{2}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}}$$

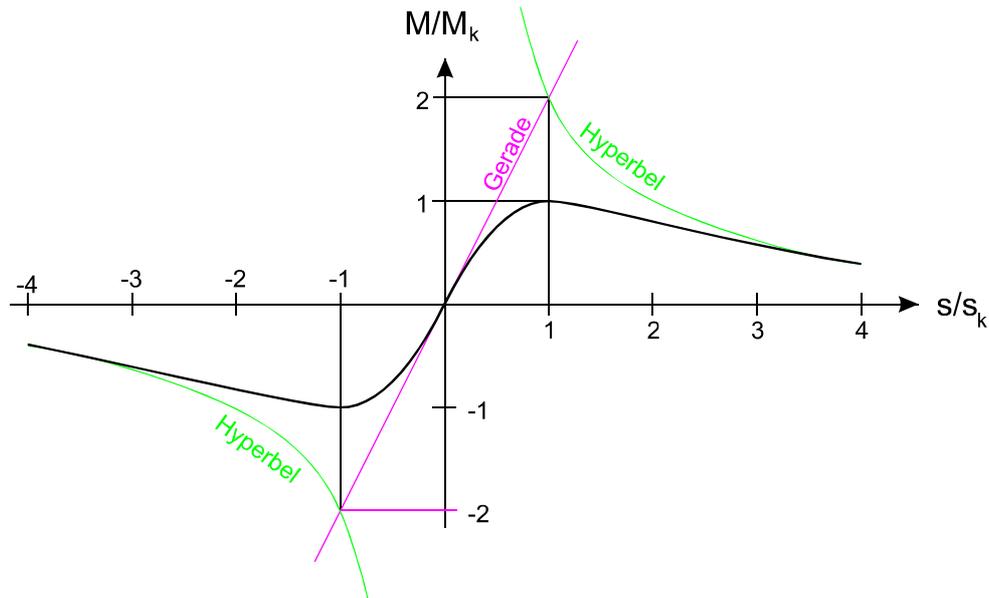


Abb. 13 Konstruktion der Momentenkennlinie aus der Kloßschen Gleichung

kleine Drehzahlen (große Schlupf):  $\frac{s}{s_K} \gg \frac{s_K}{s} \quad \frac{M}{M_K} = 2 \cdot \frac{s_K}{s} \quad (\text{Hyperbel})$

große Drehzahlen (kleiner Schlupf):  $\frac{s}{s_K} \ll \frac{s_K}{s} \quad \frac{M}{M_K} = 2 \cdot \frac{s}{s_K} \quad (\text{Gerade})$

## 6. Betriebsverhalten

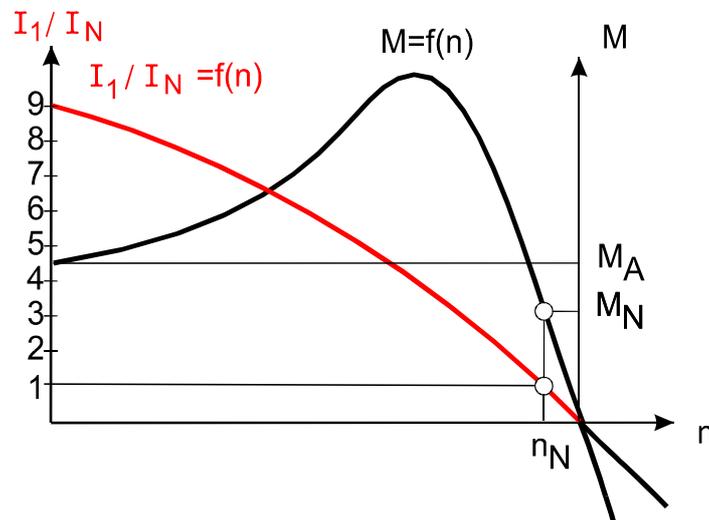


Abb. 14 Momenten- und Stromkennlinie der Asynchronmaschine

Der Asynchronmotor hat beim Anfahren nur ein geringes Moment. Der Einschaltstrom liegt um ein vielfaches über dem Nennstrom des Motors. Es ergeben sich daraus zwei Probleme:

- Das geringe Anfahrmoment lässt unter Umständen keinen Lastanlauf zu.
- Der Einschaltstrom führt zu unerwünschten Spannungseinbrüchen im Netz.

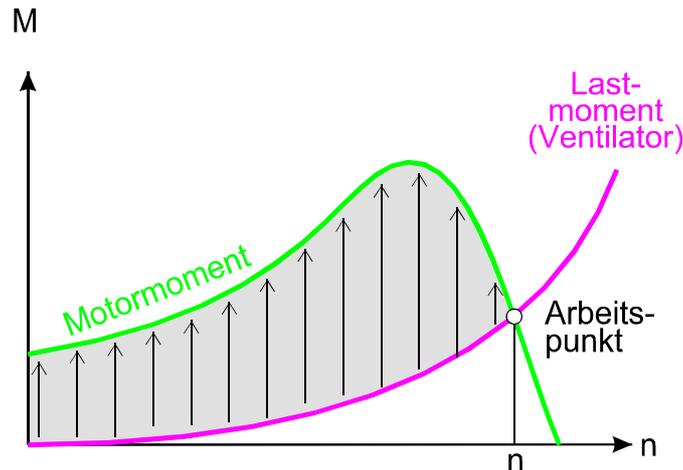


Abb. 15 Arbeitspunkt des Motors

Wird die Maschine von Beginn an belastet, so kann nur die Differenz zwischen Motormoment und Lastmoment zu einer Beschleunigung führen. Die Arbeitsdrehzahl ist in jenem Punkt erreicht, wo Last- und Motormoment gleich groß sind.

### Stabilitätsbetrachtungen

Diese Betrachtungen gelten für alle Antriebsmaschinen (Asynchronmotor, Gleichstrommotor, Verbrennungskraftmotoren,...). Nach der Art, wie sich die Last- und Motormomentenkenlinie schneiden, kann ein stabiler oder ein instabiler Arbeitspunkt der Antriebsmaschine entstehen.

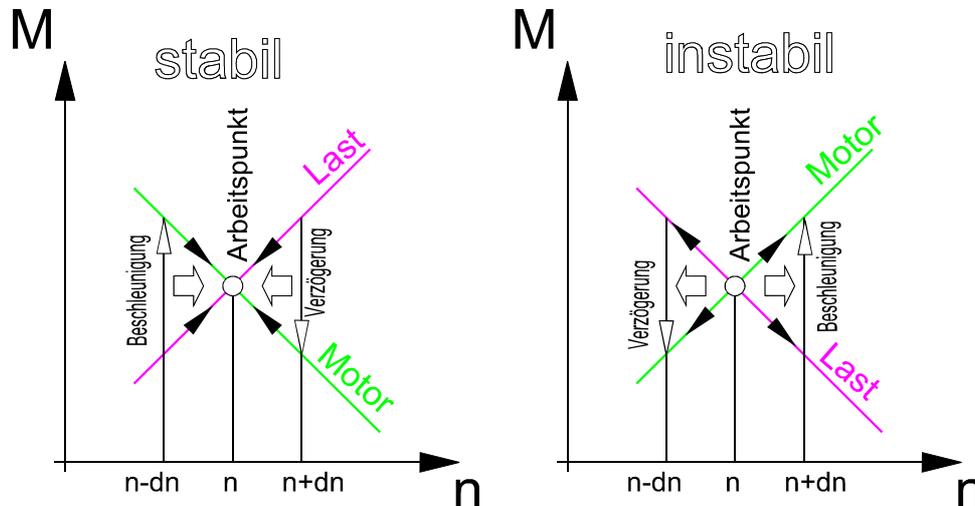


Abb. 16 Stabiler und instabiler Arbeitspunkt einer Antriebsmaschine

- **stabiler Arbeitspunkt**  
Wenn sich die Drehzahl etwas erhöht, wird das Motormoment kleiner, als das Lastmoment und der Motor wird gebremst. Wenn die Drehzahl etwas absinkt, führt der Momentenüberschuss des Motors dazu, dass die Drehzahl wieder ansteigt.
- **instabiler Arbeitspunkt**  
Wenn sich die Drehzahl kurz erhöht, führt die Momentendifferenz zu einer weiteren Beschleunigung des Motors. Im umgekehrten Fall kann der Motor bei leichter Absenkung der Drehzahl kein beschleunigendes Moment aufbauen. Im Gegenteil, das höhere Lastmoment führt dazu, dass die Maschine weiter an Drehzahl verliert.

## 7. Generatorbetrieb

Bei allen elektrischen Maschinen ist die Umkehr Generator - Motor bzw. Motor - Generator möglich. Wenn man die Asynchronmaschine übersynchron antreibt, ergeben sich negative Schlupfwerte. Der Ersatzwiderstand im Läuferkreis ( $R_2'/s$ ) wird negativ, aus der Last wird eine Quelle.

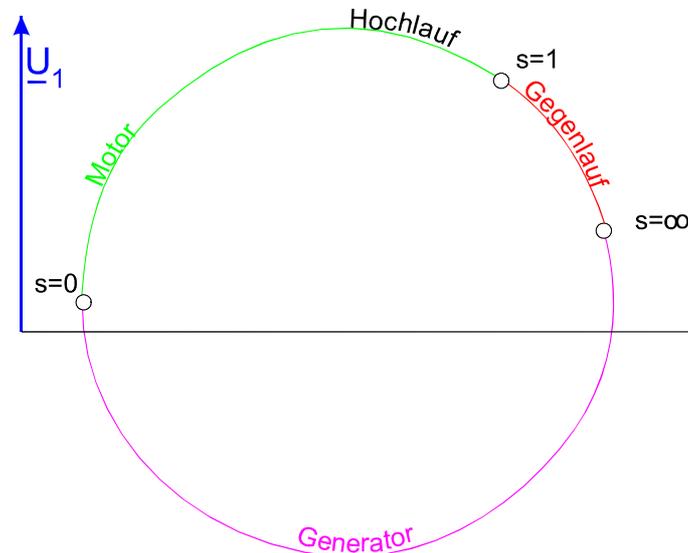


Abb. 17 Betriebsbereiche im Osannakreis

Im Osannakreis liegt der Generatorbetrieb im unteren Halbkreis. Der Eingangsstrom ist gegenüber der angelegten Spannung um über  $90^\circ$  verschoben. Der Wirkleistungsanteil ist negativ, die Maschine gibt Energie an das Netz ab. Die Maschine benötigt jedoch wie im motorischen Betrieb induktive Blindenergie. Solange die Maschine an einem Netz hängt, das in der Lage ist Blindenergie zu liefern ist ein generatorischer Betrieb immer möglich.

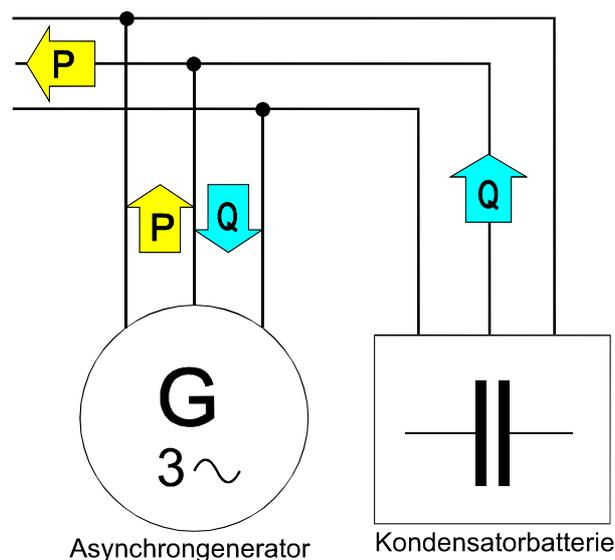


Abb. 18 Asynchrongenerator mit einer Kondensatorbatterie zur Blindleistungserzeugung

Soll die Maschine im Inselbetrieb Energie erzeugen, ist eine Kondensatorbatterie zur Blindenergielieferung notwendig. Die sättigungsabhängige Hauptreaktanz der Maschine und die Kondensatorbatterie bilden einen Schwingkreis, der bei angetriebenem Rotor über den Restmagnetismus zum Anklingen kommt. Die Frequenz der Klemmenspannung steigt mit der Drehzahl an. Die Spannungshöhe wird von der Kapazität bestimmt. Selbsterregte Asynchrongeneratoren werden als Notstromaggregate und für kleine wartungsfreie Kraftanlagen eingesetzt.

## 8. Steuerung von Asynchronmaschinen

### 8.1. Drehzahlsteuerung

$$n = \frac{f_1}{p} \cdot (1 - s)$$

$n$	... Motordrehzahl [U/s]
$f_1$	... Netzfrequenz
$p$	... Polpaarzahl
$s$	... Schlupf

Es besteht also die Möglichkeit über die Polpaarzahl, die Frequenz und den Schlupf die Drehzahl zu verändern.

#### 8.1.1. Änderung der Polpaarzahl

Die Änderung der Polzahl des Motors bewirkt eine stufenweise Drehzahlverstellung. Im Stator können maximal drei getrennte Wicklungen unterschiedlicher Polpaarzahl eingebaut werden. Diese Art der Drehzahlsteuerung ist sehr aufwendig und teuer. Eine praktische Anwendung sind die Antriebe von einfachen Waschmaschinen. Für das normale Drehen der Trommel fährt der Motor 12polig, zum Schleudern wird er 2polig betrieben.

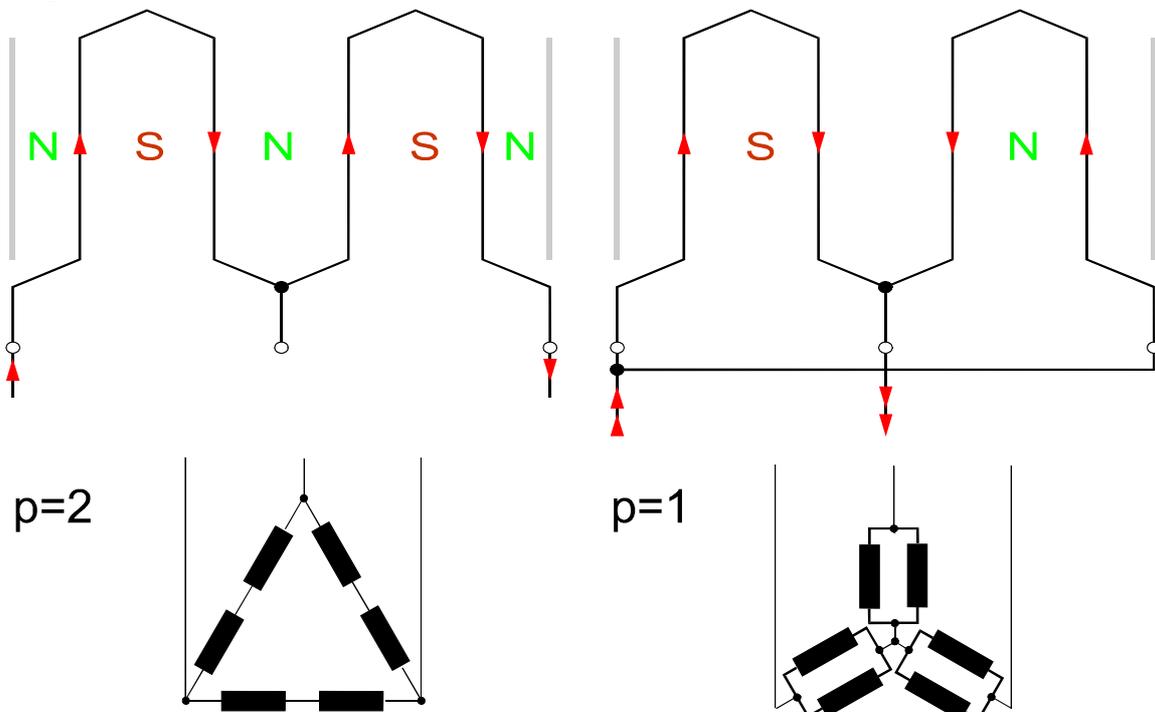


Abb. 19 Dahlanderschaltung für eine 2polige/4polige Maschine

Eine andere Möglichkeit bietet die polumschaltbare Wicklung in Form der Dahlander-schaltung. Sie gestattet eine Änderung der Drehzahl im Verhältnis 2:1. Beim Übergang auf die kleinere Polzahl erfolgt eine Umschaltung der zwei Spulengruppen von Reihen- auf Parallelschaltung.

Weitere praktische Anwendung für polumschaltbare Maschinen liegen im Werkzeugmaschinenbau, bei Aufzügen, Pumpen und Gebläsen.

### 8.1.2. Änderung der Netzfrequenz

Wird die Frequenz der Klemmenspannung geändert, so gilt dies in demselben Maße auch für die Synchrondrehzahl. Damit sich der magnetische Fluss im Eisen nicht ändert, muss folgende Beziehung eingehalten werden:

$$U_q \text{ prop. } f_1 \Phi \quad \Phi = \text{konst.} \Rightarrow \frac{U_q}{f_1} = \text{konst.}$$

Wenn die Frequenz reduziert wird, muss auch die Maschinenspannung dazu proportional verringert werden.

$$M_K = \frac{m \cdot U_1^2}{2\pi \cdot n_{Sy}} \cdot \frac{1}{2 \cdot (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}') } = \frac{m \cdot U_1^2 \cdot p}{2\pi \cdot f_1} \cdot \frac{1}{2 \cdot 2\pi \cdot f_1 \cdot (L_{1\sigma} + L_{2\sigma}') }$$

$$M_K \text{ prop. } \frac{U_1^2}{f_1^2} \quad U_q \approx U_1 \quad \frac{U_q}{f_1} = \text{konst.} \Rightarrow M_K = \text{konst.}$$

$$s_K = \frac{R_2'}{X_{1\sigma} + X_{2\sigma}'} = \frac{R_2'}{2\pi \cdot f_1 \cdot (L_{1\sigma} + L_{2\sigma}') } = \frac{R_2'}{2\pi \cdot n_{Sy} \cdot p \cdot (L_{1\sigma} + L_{2\sigma}') }$$

$$\Delta n_K = s_K \cdot n_{Sy} = \frac{R_2'}{2\pi \cdot p \cdot (L_{1\sigma} + L_{2\sigma}') } = \text{konst.}$$

$$n_K = n_{Sy} - \Delta n_K$$

- $\Delta n_K$  ... Drehzahldifferenz zwischen Kippunkt und Synchrondrehzahl
- $n_K$  ... Drehzahl bei der das Kippmoment ist
- $n_{Sy}$  ... Synchrondrehzahl

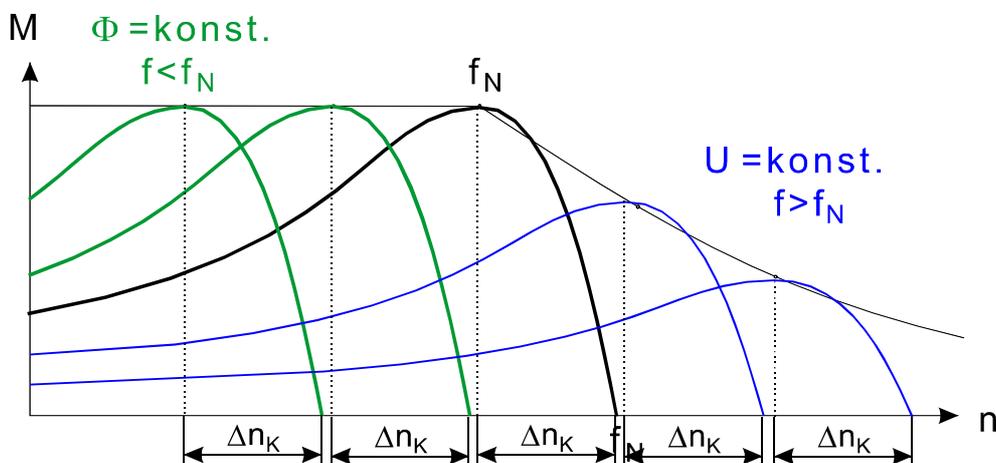


Abb. 20 Momentenkennlinien bei verschiedenen Frequenzen

Durch die Änderung der Frequenz werden die Momentenkennlinien parallel verschoben. Die Höhe des Kippmoments bleibt unbeeinflusst, solange mit der Netzfrequenz auch die Spannung reduziert wird. Bei Frequenzen über der Nennfrequenz ist aus isolationstechnischen Gründen keine Spannungsanhebung zulässig. Der Fluss im Eisen und somit das Drehmoment geht zurück (Feldschwächung).

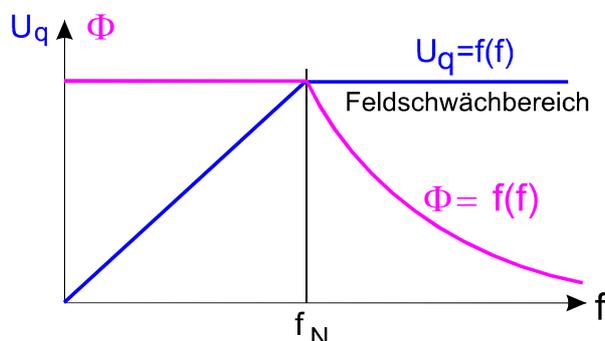


Abb. 21 Quellenspannung und magnetischer Fluss in Abhängigkeit der Netzfrequenz

Man muss jedoch beachten, dass die Quellenspannung und nicht die Klemmenspannung mit der Frequenz verändert werden sollte. Ändert man die Klemmenspannung proportional zur Frequenz, sinkt bei niedrigen Frequenzen das Kippmoment stark ab. Der Grund dafür liegt im Einfluss des Statorwiderstands  $R_1$ , der bei Belastung einen starken Spannungseinbruch der Quellenspannung und somit des Flusses bewirkt. Für kleine Frequenzen darf die Klemmenspannung daher angehoben werden.

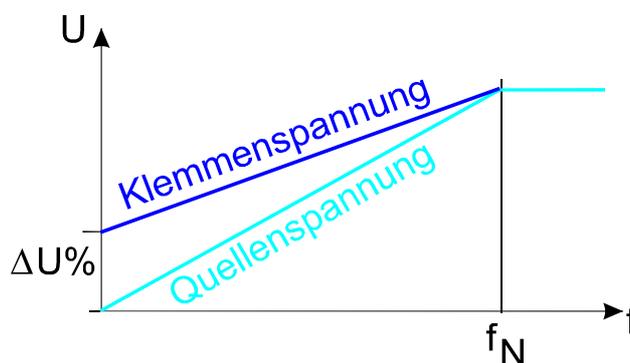


Abb. 22 Spannungsanhebung für niedere Frequenzen

Vorteile der Drehzahlsteuerung über Frequenzumrichter:

- Stufenlose Drehzahleinstellung
- hohe Grunddrehzahlen sind möglich ( $n > 3000$  U/min)
- Anfahren mit großen Momenten ist möglich

Nachteile der Drehzahlsteuerung über Frequenzumrichter:

- Oberwellen im Netz
- Die Motorverluste steigen durch Oberwellen etwas an
- Für große Motorleistungen teuer

### 8.1.3. Änderung des Schlupfs über die Motorspannung

Wenn der Schlupf der Maschine größer wird, also die Drehzahl kleiner, erhöhen sich immer die Verluste im Läufer. Wenn man von einer konstanten Last ausgeht, entspricht die Höhe des Drehmoments der Luftspaltleistung ( $P_{Cu2} = s P_L$ ). Mit sinkender Drehzahl steigen die Verluste im Rotor. Eine begrenzte Beeinflussung des Schlupfs ist durch die Maschinenspannung möglich. Die Momentenkennlinie hängt quadratisch von der Netzspannung ab.

$$M_k \text{ prop. } \frac{U_1^2}{f_1^2}$$

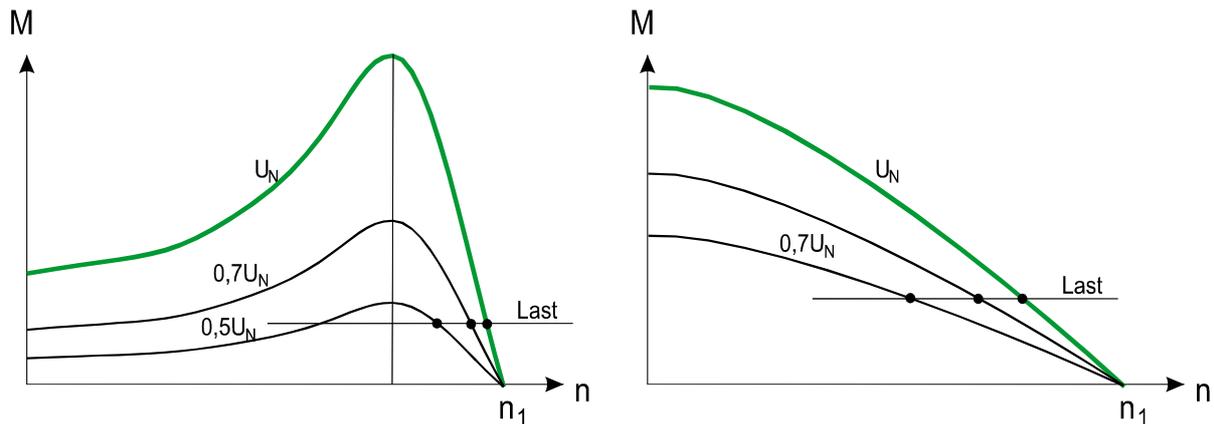


Abb. 23 Momentenkennlinien bei unterschiedlichen Motorspannungen - Widerstandsläufer

Eine Drehzahleinstellung über die Maschinenspannung bringt aber in den meisten Fällen auch große Stabilitätsprobleme, da das Kippmoment sinkt. Für die praktische Anwendung im Kleinmotorenbereich wurden Widerstandsläufer entwickelt, die eine weiche Momentenkennlinie besitzen.

Beispiel:

Ein Drehstrommotor mit dem Anlaufmoment  $M_{AN}$  hat die Widerstandsdaten  $R_1=R_2'=0,25\Omega$ ,  $X_{1\sigma}+X_{2\sigma}'=1,0\Omega$ . Wie verändert sich das Anzugsmoment, wenn man dem Motor einen Widerstand mit der Höhe des Primärwiderstand  $R_1$  vorschaltet? Es ist das Verhältnis  $M_A/M_{AN}$  unter Vernachlässigung des Querzweiges im Ersatzschaltbild anzugeben.

$$\underline{U}_1^* = \underline{U}_1 \frac{(R_1+R_2') + j(X_{1\sigma}+X_{2\sigma}')}{(2R_1+R_2') + j(X_{1\sigma}+X_{2\sigma}')}$$

$$|\underline{U}_1^* / \underline{U}_1|^2 = \frac{(R_1+R_2')^2 + (X_{1\sigma}+X_{2\sigma}')^2}{(2R_1+R_2')^2 + (X_{1\sigma}+X_{2\sigma}')^2} = \frac{0,50^2 + 1,0^2}{0,75^2 + 1,0^2} = 0,80$$

Das Drehmoment hängt quadratisch von der Spannung ab:

$$M_A / M_{AN} = 0,80$$

## 8.2. Anlassen der Asynchronmaschine

Wird die stillstehende Asynchronmaschine auf die Betriebsspannung geschaltet, so fließt im ersten Moment ein vielfaches des Nennstroms. Dieser hohe Strom klingt erst mit dem Hochfahren des Motors ab. Es kann zu störenden Spannungseinbrüchen im Netz und thermischen Überlastungen der Wicklungen kommen. Es dürfen daher nur Motoren bis zu 2,2kW direkt an das Netz geschaltet werden. Für größere Maschinen muss man spezielle Anlaufverfahren anwenden. Die ideale Anlaufhilfe liegt im Einsatz eines Frequenzumrichters, der die Motorspannung abhängig vom Motorstrom regelt.

### 8.2.1. Stern-Dreieck-Anlauf

In der Regel ist die Statorwicklung der Drehstrommaschine in Dreieck geschaltet. Wenn man die Wicklungen in Stern schaltet, erhält man einen um  $\sqrt{3}$  geringeren Fluss, da jede Wicklung nur an der Spannung  $U_{12}/\sqrt{3}$  liegt. Das Motormoment geht auf ein Drittel zurück ( $M \propto U^2$ ). Der Strom in der Zuleitung sinkt ebenfalls auf  $1/3$  des Wertes bei Dreieckschaltung. Die Umschaltung von Stern auf Dreieck erfolgt in der Regel durch eine fest eingestellte Zeitverzögerung oder durch einen zweistufigen Schalter von Hand.

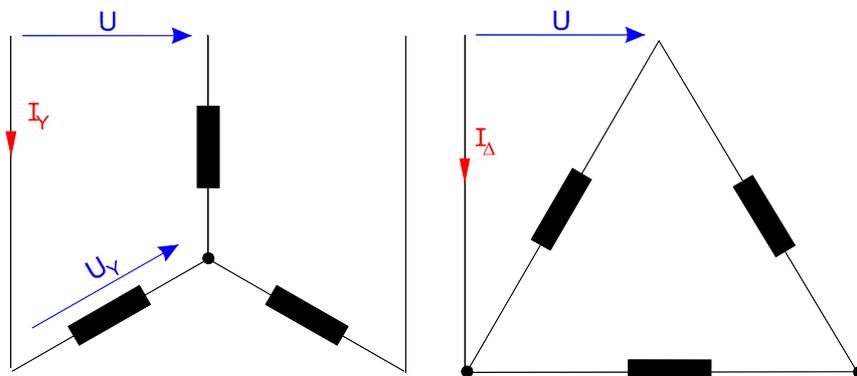
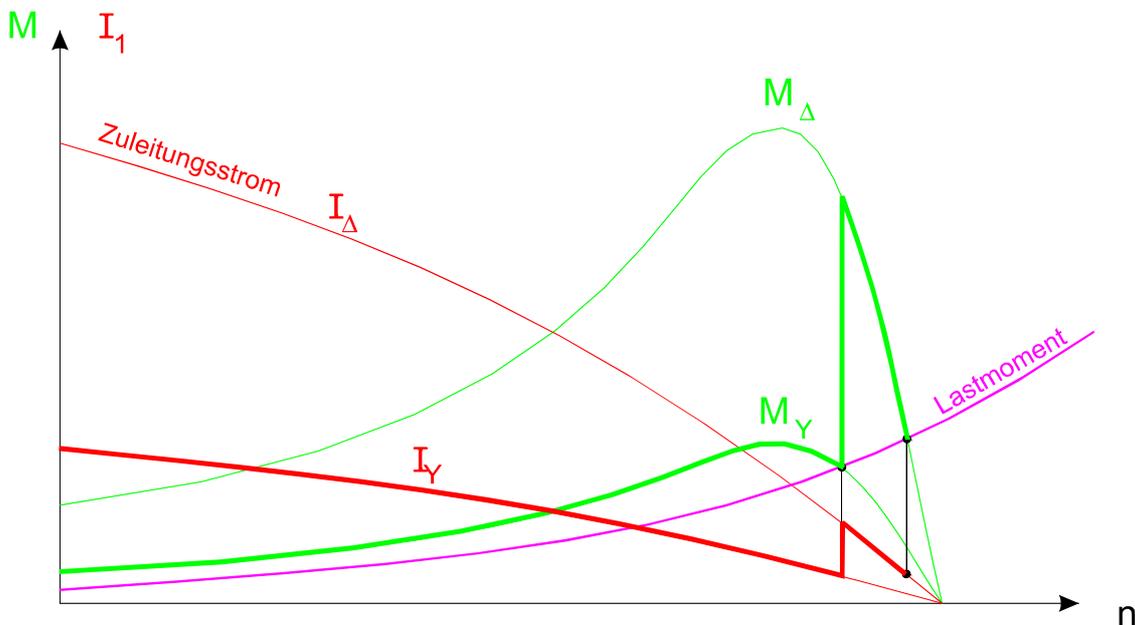


Abb. 24 Stern - Dreieck - Anlauf

Wenn der Motor vom Stern nicht auf Dreieck umgeschaltet wird, fährt er mit dem 3fachen Schlupf. Bei Nennlast nimmt der Motor den Nennstrom auf, die Leitungs-

verluste im Läufer sind jedoch dreimal so groß wie bei der Dreieckschaltung. Der Motor überhitzt.

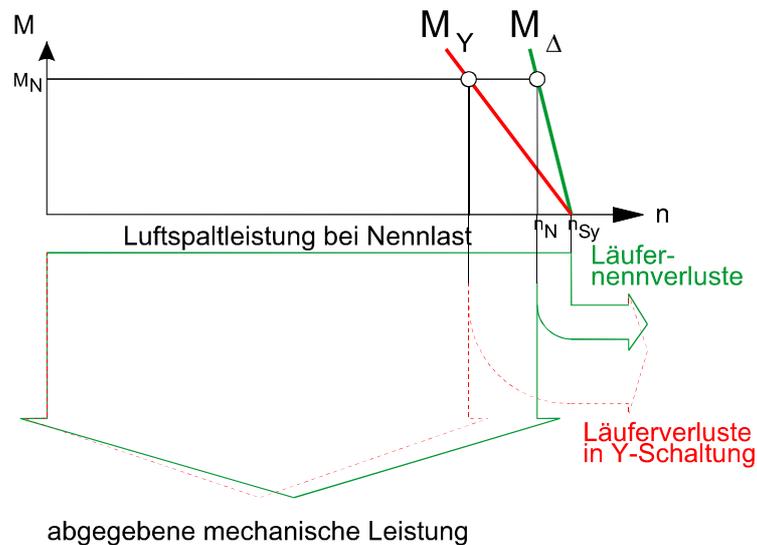


Abb. 25 Leistungsbilanz, wenn der Motor nicht umgeschaltet wird

### 8.2.2. Anlasstransformatoren

Der Anlaufstrom und das Moment sinken mit dem Quadrat der Spannung.

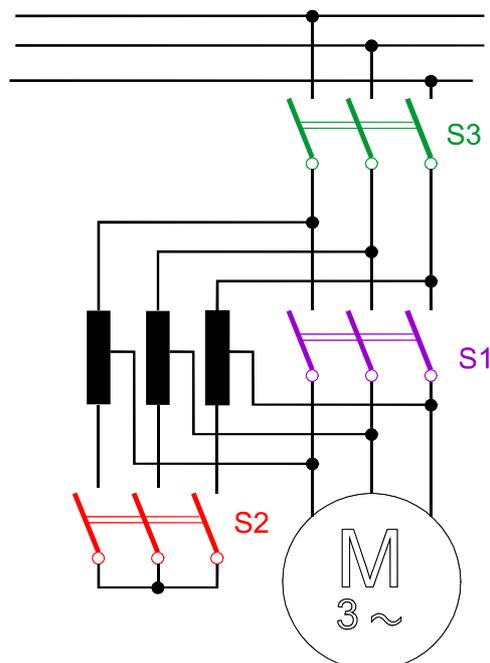


Abb. 26 Anlasstransformator

Zunächst werden die Schalter S2 und S3 geschlossen. Der Spartransformator teilt die Netzspannung etwa auf die Hälfte herunter. Der Motor liegt an der halben Spannung und nimmt somit nur den halben Strom auf. Er erzeugt nur  $1/4$  des Moments da ja das Moment mit dem Quadrat der Spannung zusammenhängt. Nach dem Anlauf wird der Schalter S2 geöffnet. Damit wirkt nur noch der obere Teil der Wicklung des Spartrafos als Vorschaltinduktivität (Drossel). Der Motor liegt jetzt an

etwa 80% der Nennspannung. Danach legt man den Motor über S1 an die volle Netzspannung. Die Umschaltung auf die nächste Stufe erfolgt immer erst dann, wenn ein stabiler Arbeitspunkt erreicht ist. Ein Lastanlauf ist mit dieser Schaltung nicht möglich.

### 8.2.3. Elektronischer Sanftanlauf

Es werden auch elektronische Sanftanlaufgeräte für Asynchronmotoren angeboten. Sie arbeiten nach dem selben Prinzip. Über eine Elektronik wird die Motorspannung langsam hochgefahren.

### 8.2.4. KUSA-Schaltung

Um beim **K**urzschlussläufer einen **S**anftanlauf zu ermöglichen, kann man in die Zuleitung einen Widerstand oder eine Drosselspule schalten. Die Zuschaltung kann nur in einer Phase oder aber auch in allen Phasen erfolgen. Durch den zugeschalteten Widerstand reduziert sich der Anlaufstrom, aber auch das Anlaufmoment der Maschine.

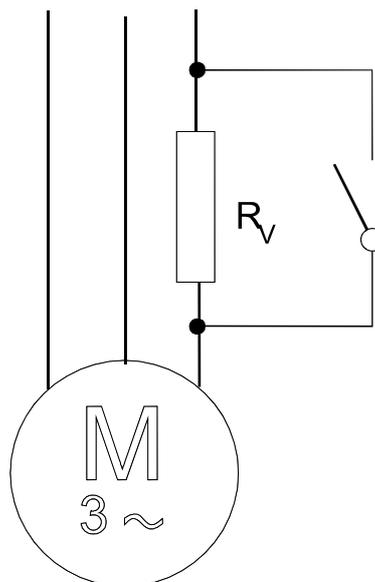


Abb. 27 Kusa-Schaltung

## 8.3. Bremsen der Asynchronmaschine

Bei allen Maschinen unterscheidet man zwischen zwei Arten der Bremsung.

- **Verlustbremsung** (Energie wird in Wärme umgewandelt)
- **Nutzbremung** (Energie wird ins Netz zurückgespeist)

### 8.3.1. Generatorbremsung

Sobald der Motor über seine Synchrondrehzahl angetrieben wird, bauen sich im Läufer Kräfte auf, die versuchen den Motor wieder auf die Synchrondrehzahl zu bremsen. Der Stromfluss in der Statorwicklung dreht sich dabei um. Der Schlupf wird negativ.

Je höher die aufgezwungene Drehzahl über der Synchrondrehzahl liegt, um so größer wird das Gegenmoment, das von der Maschine aufgebaut wird. Es ergibt sich eine ähnliche Momentenkennlinie wie im Motorbetrieb. Es entsteht wieder ein Kippmoment, d.h. wenn man den Motor zu weit über die Synchrondrehzahl antreibt, sinkt das Bremsmoment wieder ab.

Mit dieser Art der Bremsung kann der Motor nur auf die Synchrondrehzahl heruntergebremst werden. Praktische Anwendungen: Senken von Lasten, Talfahrten bei Elektroautos usw.

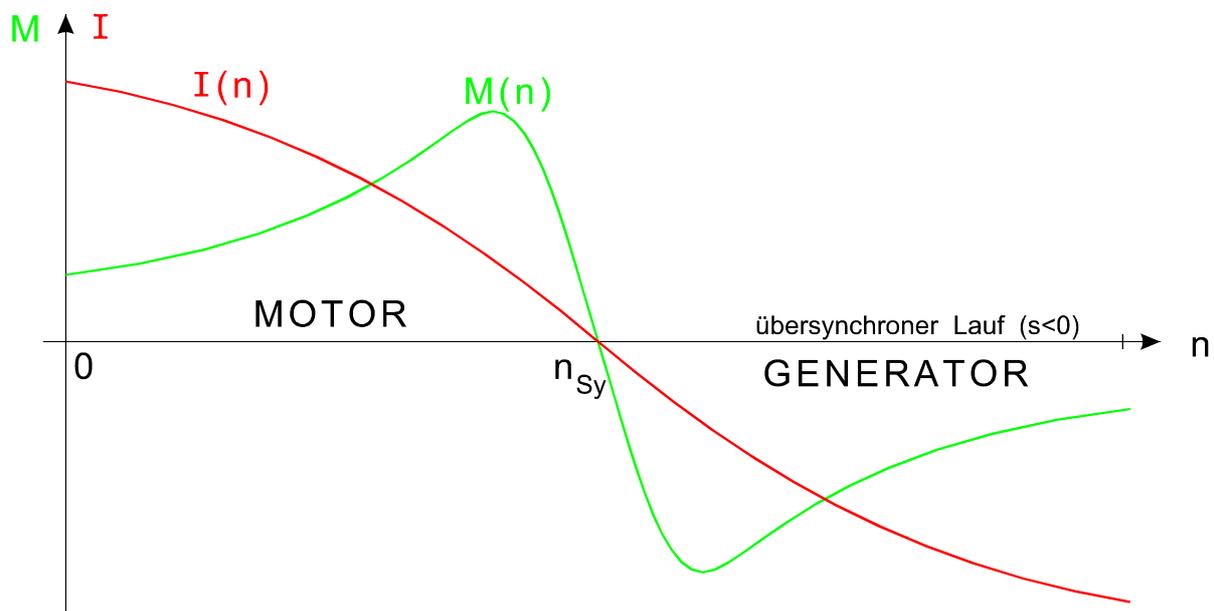


Abb. 28 Strom- und Momentenkennlinie beim übersynchronen Betrieb der Maschine

### 8.3.2. Gleichstrombremsung

Wenn die Statorwicklung der Maschine mit Gleichspannung gespeist wird, baut sich ein konstantes Magnetfeld auf. Der Rotor versucht wieder den Synchronlauf zum Statorfeld herzustellen; er versucht auch stehen zu bleiben.

Die Höhe des Bremsmomentes hängt von der Drehzahl, den Streureaktanzen und den Widerstandswerten ab. Die Anordnung entspricht dem Aufbau einer Wirbelstrombremse. Je geringer die Drehzahl wird, um so kleiner wird die Bremswirkung. Es ergibt sich eine gespiegelte Momentenkennlinie. Wegen des fehlenden Bremsmomentes bei kleinen Drehzahlen ist keine Stillstandsbremsung möglich.

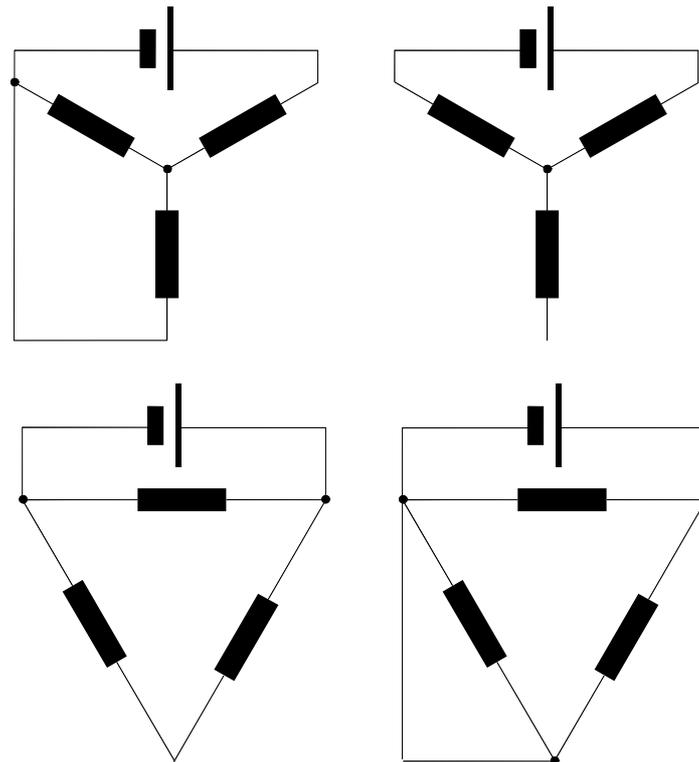


Abb. 29 Schaltungsmöglichkeiten im Stator bei Gleichstrombremsen

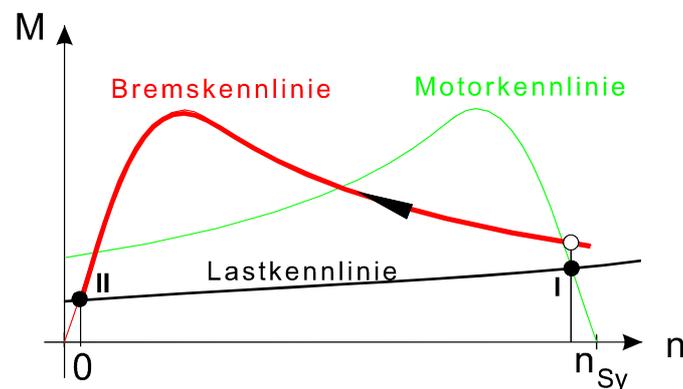


Abb. 30 Drehmomentenkennlinie bei der Gleichstrombremse

### 8.3.3. Gegenstrombremse

Die Drehrichtung einer dreiphasigen Maschine kehrt sich um, wenn zwei Phasen vertauscht werden. Schaltet man bei einer, sich mit Nenndrehzahl drehenden Maschine, die Drehrichtung um, springt der Schlupf vom Wert  $s_N$  auf den Wert  $2-s_N$ . Die Maschine nimmt einen sehr hohen Strom auf. Der Rotor wird gebremst und in die Gegenrichtung bis zur Nenndrehzahl beschleunigt. Mit dieser Bremsung ist eine Stillstandsbremsung möglich.

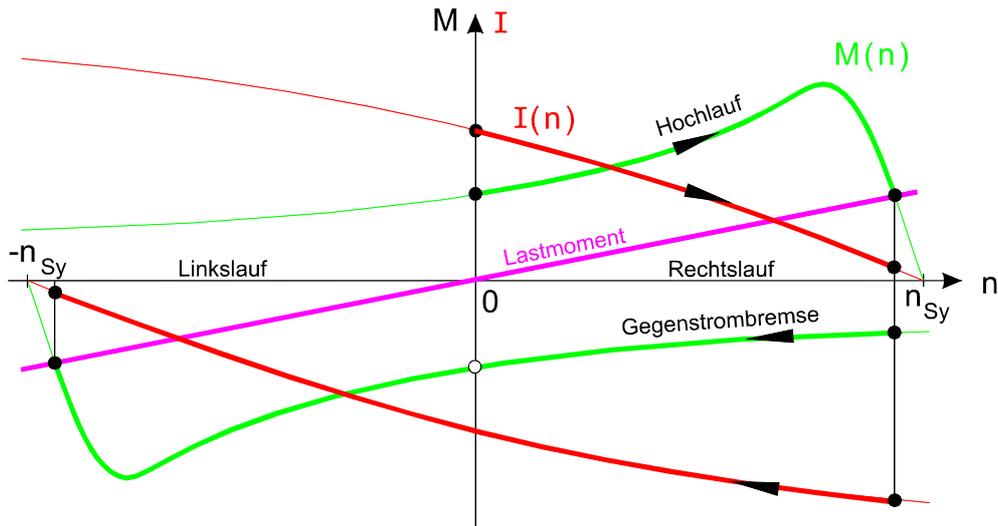


Abb. 31 Strom- und Momentenverlauf bei der Gegenstrombremsung

## 9. Einphasenasynchronmotoren

Die Motoren, die in Haushaltsgeräten und Werkzeugmaschinen eingebaut sind, werden nur mit einer Phase versorgt. Neben dem Universalmotor (Gleichstromreihenschlussmaschine) kann für diese Anwendungen auch ein Asynchronmotor verwendet werden. Der Asynchronmotor kommt dabei dort zum Einsatz, wo keine kontinuierliche Drehzahlregelung notwendig ist und ein wartungsfreier Antrieb angestrebt wird.

### 9.1. Motoren ohne Hilfswicklung

Mit nur einer Wicklung im Stator kann nur ein Wechselfeld und kein Drehfeld aufgebaut werden. Man kann sich jedoch ein Wechselfeld als Addition von zwei gegenläufigen Drehfeldern vorstellen.

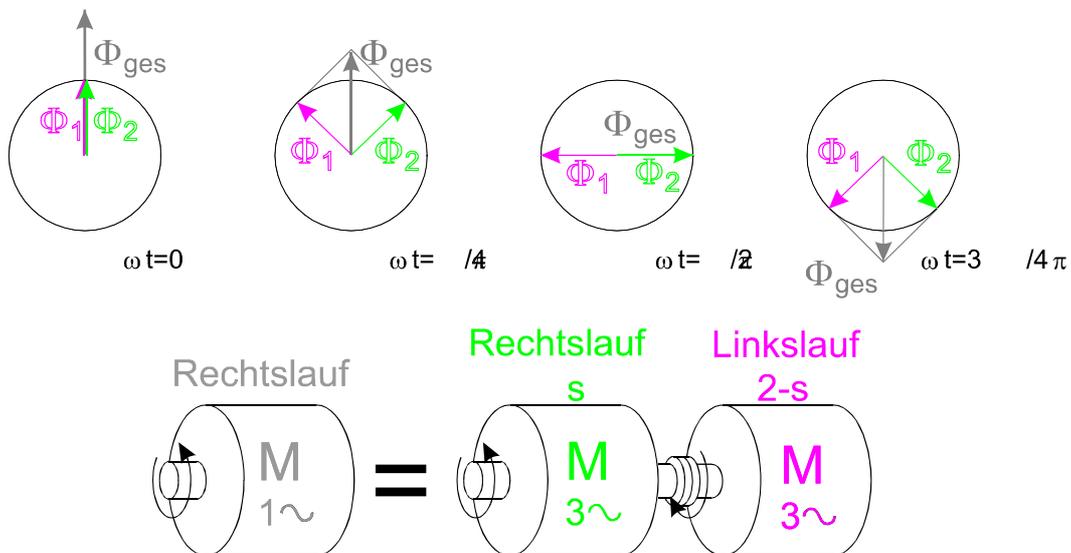


Abb. 32 Ein Wechselfeld entsteht aus der Addition von zwei gegenläufigen Drehfeldern

Das Drehfeld in der Motordrehrichtung (Mitfeld) verursacht im Läufer Ströme mit der Frequenz:

$$f_{2m} = s f_{Sy}$$

$f_{2m}$	... Läuferfrequenz des mitlaufenden Drehfeldes
$s$	... Schlupf
$f_{Sy}$	... Netzfrequenz

Das Drehfeld entgegen der Motordrehrichtung (Gegenfeld) verursacht im Läufer Ströme mit der Frequenz:

$$f_{2g} = (2-s) f_{Sy}$$

$f_{2g}$	... Läuferfrequenz des gegenlaufenden Feldes
$s$	... Schlupf
$f_{Sy}$	... Netzfrequenz

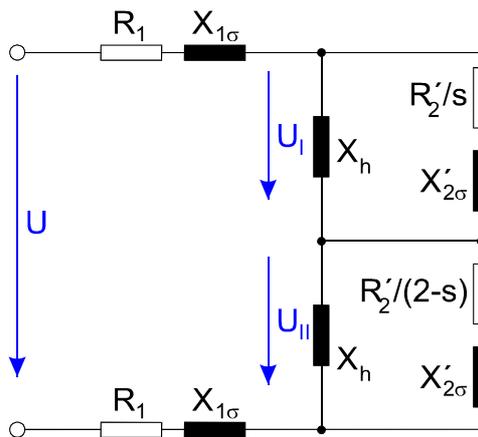


Abb. 33 Ersatzschaltbild des Einphasenmotors

Die Drehmomente der beiden Drehfelder addieren sich. Die Höhe des Moments hängt von der Spannung  $U_I$  bzw.  $U_{II}$  ab.

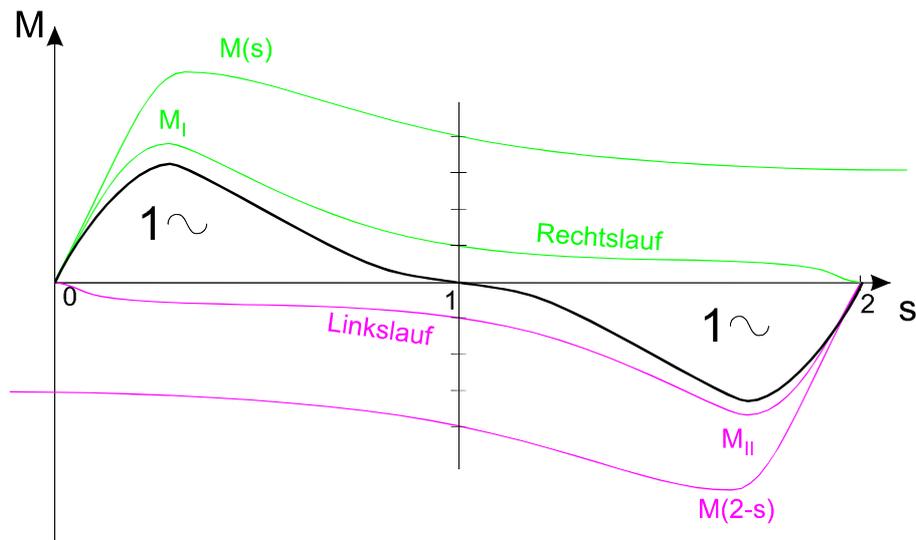


Abb. 34 Drehmomentenkennlinie des Einphasenasynchronmotors ohne Hilfswicklung

Für die Bestimmung der Momentenkennlinie muss berücksichtigt werden:

$$\begin{array}{lll}
 s \approx 0 & \Rightarrow & U_I \approx U \quad U_{II} \approx 0 \\
 s \approx 1 & \Rightarrow & U_I \approx U/2 \quad U_{II} \approx U/2 \\
 s \approx 2 & \Rightarrow & U_I \approx 0 \quad U_{II} \approx U
 \end{array}$$

Die Momentenkennlinie für das Mit- bzw. Gegenfeld weicht daher im Bereich  $s=0$  und  $s=2$  von den bekannten Kennlinie mit Drehfeldern deutlich ab.

$$M = M_I + M_{II} = M(s) \cdot \frac{U_I^2}{U^2} + M(2-s) \cdot \frac{U_{II}^2}{U^2}$$

Im Stillstand sind Mit- und Gegenmoment umgekehrt gleich groß. Die Maschine kann nicht selbst anlaufen. Sobald der Rotor in eine Richtung angestoßen wird, überwiegt das Mitmoment der gewählten Drehrichtung, der Motor fährt hoch und kann belastet werden.

## 9.2. Motoren mit Kondensatorhilfswicklung

In den meisten Fällen sollte der Motor selbst in eine bestimmte Richtung anlaufen können. Hierzu ist zumindest im Stillstand anstelle des Wechselfeldes ein umlaufendes Feld notwendig. Dazu wird eine zweite Wicklung eingebaut, die räumlich um  $90^\circ$  (bei  $p=1$ ) versetzt angebracht ist und von einem zeitlich versetzten Strom durchflossen ist. Ein kreisrundes Drehfeld erhält man nur, wenn der Strom in der Hilfswicklung exakt um  $90^\circ$  zeitlich verschoben ist.

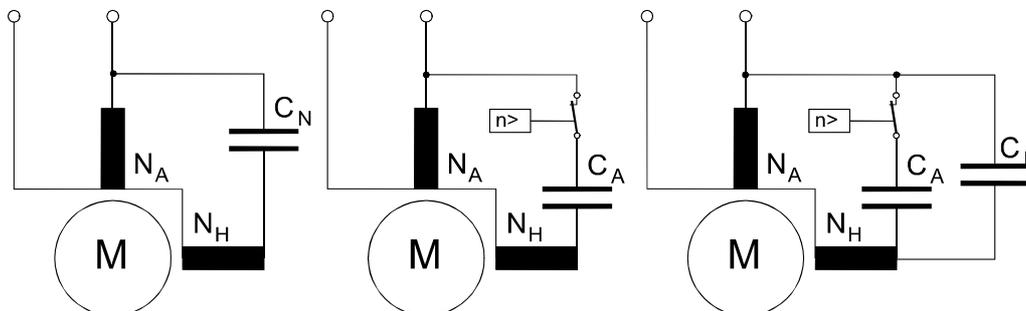


Abb. 35 Betriebskondensatormotor - Anlaufkondensatormotor - Doppelkondensatormotor

Der Kondensator kann nach zwei Gesichtspunkten dimensioniert werden:

- hohes Anfahrmoment (große Kapazität)
- im Nennpunkt symmetrische Drehfeldverhältnisse (kleine Kapazität)

**Betriebskondensatormotor:**

Die Hilfswicklung bleibt auch im Betrieb zugeschaltet. Der Kondensator ist so ausgelegt, dass ein gutes Anfahrmoment zur Verfügung steht.

**Anlaufkondensatormotor:**

Der Kondensator hilft nur beim Anlauf der Maschine. Die Hilfswicklung wird nach dem Hochlauf durch einen eingebauten Fliehkraftschalter oder durch einen Thermoschalter weggeschaltet.

**Doppelkondensatormotor:**

Ein Teil des Kondensators wird nach dem Hochlauf weggeschaltet. Es ergeben sich ein hohes Anlaufmoment und symmetrische Verhältnisse im Arbeitspunkt.

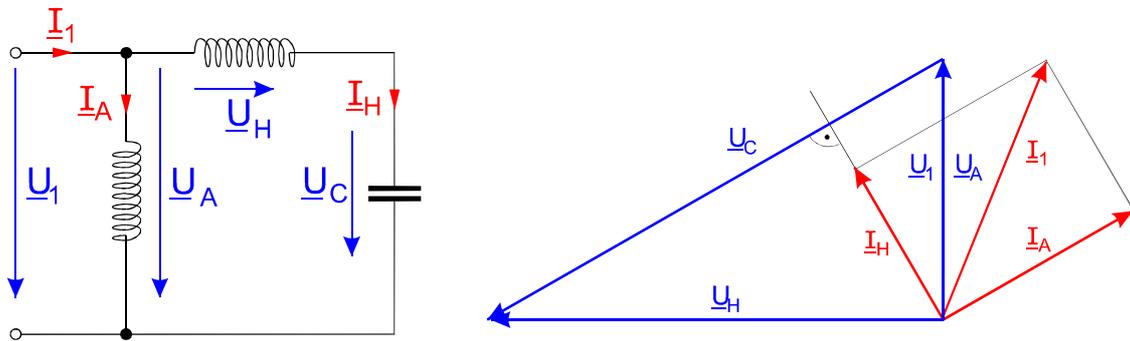


Abb. 36 Zeigerdiagramm bei zugeschaltetem Kondensatorhilfskreis

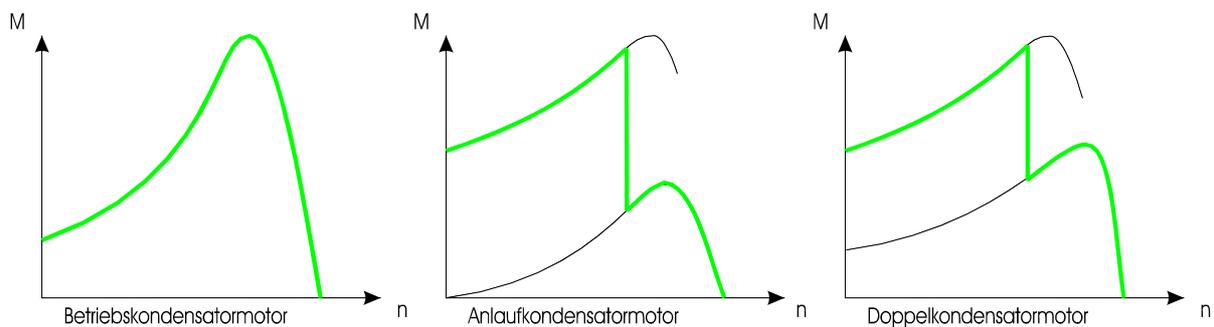


Abb. 37 Momentenkennlinie bei Motoren mit Kondensatorhilfswicklungen

### 9.3. Motoren mit Widerstandshilfswicklung

Die zeitliche Verschiebung der Ströme in Haupt- und Hilfswicklung wird durch einen erhöhten ohmschen Widerstand in der Hilfswicklung erzielt. Dazu wird für die Hilfswicklung ein dünnerer Draht verwendet oder ein Teil der Wicklung bifilar ausgeführt, was zu einem höheren ohmschen Widerstand führt. Die Hilfswicklung kann durch ein vom hohen Anlaufstrom betätigtes thermisches (Bimetall) oder elektromagnetisches Relais eingeschaltet werden. Im Betrieb läuft der Motor meist ohne Hilfswicklung.

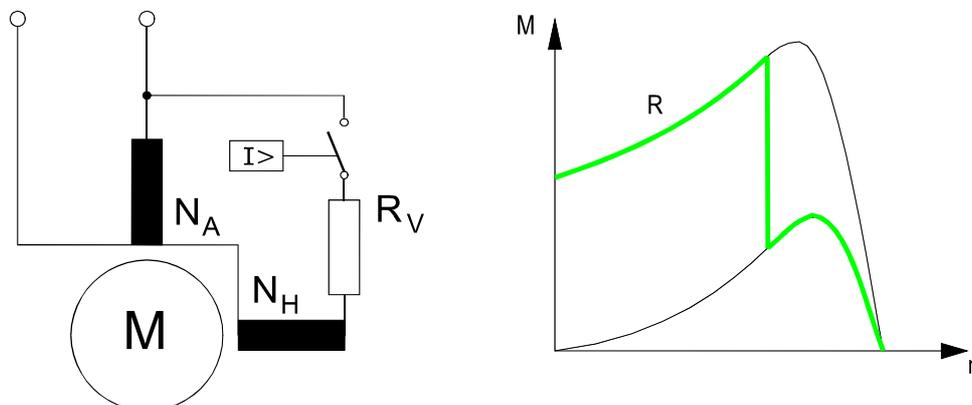


Abb. 38 Einphasenmotors mit Widerstandshilfswicklung

## 9.4. Spaltpolmotoren

Ein Drehfeld entsteht, wenn zwei Wechselfelder vorhanden sind, die zeitlich und räumlich zueinander versetzt sind. Der Polbogen wird in einen Hauptpol und einen Spaltpol unterteilt. Der Spaltpol wird von einem kräftigen Kurzschlussring umgeben. Der Läufer enthält eine Käfigwicklung.

Der magnetische Fluss induziert im Kurzschlussring eine Spannung. Die Spannung ist kurzgeschlossen und führt zu einem großen Strom. Der Strom baut ein magnetisches Feld auf, das der Feldänderung entgegen wirkt (Lenz'sche Regel). Der Fluss im Spaltpol eilt dem Hauptfluss um  $90^\circ$  nach. Es entsteht ein Wanderfeld unter dem Pol, bzw. ein Drehfeld entlang des Umfanges.

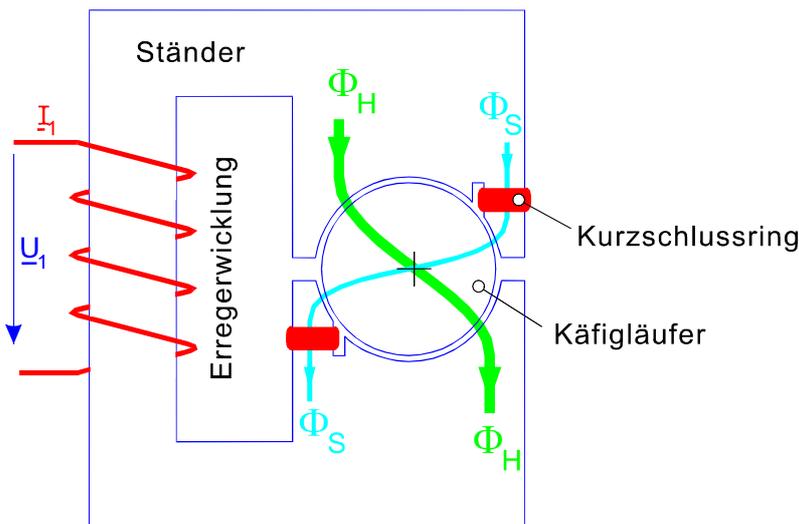


Abb. 39 Aufbau eines Spaltpolmotors

Der Spaltpolmotor besitzen einen sehr schlechten Wirkungsgrad (nur etwa 40%) und wird daher nur bis zu Maximalleistungen von 150W gebaut. Beispiele: Heizlüfter, Pumpen in Waschmaschinen, Plattenspielerantriebe,...

## 10. Übungsbeispiele

- 1) Ein Motor ist für einen Stern-Dreieck-Anlauf ausgelegt. Die Umschaltung auf Dreieck erfolgt nicht. Mit welchem Motormoment darf die Maschine höchstens belastet werden, damit es zu keiner Überhitzung im Rotor kommt? Mit welchem Schlupf läuft die Maschine? (Lösung:  $M_{max}/M_N=1/\sqrt{3}$   $s/s_N=\sqrt{3}$ )
- 2) Ein Asynchronmotor besitzt ein Anlaufmoment, das 50% des Kippmoments beträgt. Bekannt sind die Widerstände:  $X_{1\sigma}=0,7\Omega$ ,  $X_{2\sigma}'=0,7\Omega$ . Berechnen Sie den Widerstand  $R_2'$  der Käfigwicklung. (Lösung:  $R_2'=0,375\Omega$ )
- 3) Eine vierpolige Asynchronmaschine (Käfigläufer)  $s_N=5\%$   $M_K/M_N=3$  wird über einen Frequenzrichter angesteuert. Welche Drehzahl hat der Motor bei halber Last und a) Nennfrequenz? b)  $2/3$ Nennfrequenz ( $\Phi=\text{konstant}$ )? c)  $4/3$  Nennfrequenz ( $U=\text{konstant}$ )?  
(Lösung a)  $s_K=29,14\%$   $n=1463,3 \text{ U/min}$  b)  $n=963,3 \text{ U/min}$  c)  $M_K/M_N=1,6875$   $n=1933,7 \text{ U/min}$ )
- 4) Ein polumschaltbarer 12polig/2polig Waschmaschinenmotor besitzt einen Nennschlupf von 3%. Bestimmen Sie die beiden Nenndrehzahlen.  
(Lösung  $n_1=2910 \text{ U/min}$   $n_2=485 \text{ U/min}$ )
- 5) Ein 6poliger Käfigläufer besitzt folgende Kenndaten:  $U=380\text{V}$ ;  $P=5\text{kW}$ ;  $n_N=960\text{min}^{-1}$ ;  $f_1=50\text{Hz}$ . Er wird über einen Frequenzrichter angeschlossen. Bei konstantem Lastmoment soll die Drehzahl von  $750\text{min}^{-1}$  bis  $1250\text{min}^{-1}$  gesteuert werden. Die Momentenkennlinie kann als linear angesehen werden. Berechnen Sie den notwendigen Frequenzbereich. Berücksichtigen Sie, dass die obere Drehzahl im Feldschwächbereich liegt. (Lösung  $f_U=39,5 \text{ Hz}$   $f_O=65,98 \text{ Hz}$ )
- 6) Ein 8poliger Asynchronmotor läuft am 50Hz-Netz. An der Welle wird eine Leistung von 10kW abgegeben. In den Widerständen des Läuferkreises werden 400W in Wärme umgesetzt. Die mechanischen Verluste betragen 100W. Welche Drehzahl stellt sich ein? (Lösung  $n=721,5 \text{ U/min}$ )
- 7) Ein Asynchronmotor (Kurzschlussläufer) entwickelt bei direktem Zuschalten ans Netz (3x380V) ein Anfahrmoment  $M_A=1,8 M_N$ . Dabei wird vom Motor ein Anlaufstrom  $I_A=4 I_N$  aufgenommen. Der Anlauf soll jetzt über einen Anlasstransformator erfolgen. Der Abgriff befindet sich genau bei der Hälfte der Wicklung. Berechnen Sie den Anlaufstrom auf der Motorseite, den Anlaufstrom auf der Netzseite und das relative Anlaufmoment des Motors.  
(Lösung  $I_{Motor}=2 I_N$   $I_{Netz}=I_N$   $M_A=0,45 M_N$ )
- 8) Eine 4polige Asynchronmaschine erreicht am 50Hz-Netz eine Drehzahl von  $1450\text{min}^{-1}$ . Die Nennleistung beträgt  $P_{2N}=80\text{kW}$ , der Wirkungsgrad 89%. Die Reibungsverluste sind mit  $P_R=1,2\text{kW}$  bekannt. Bestimmen Sie die Luftspaltleistung, die Läuferkupferverluste und die Verluste im Stator.  
(Lösung  $P_L=84\text{kW}$   $P_{Cu2}=2,8\text{kW}$   $P_{Cu1}=5,88\text{kW}$ )
- 9) Eine vierpolige Asynchronmaschine hängt in Dreieckschaltung am Netz (3x380V). Der Motor wird mit einer konstanten Last von 200Nm beaufschlagt. Für die

Ersatzschaltung des Motors wurden folgende Werte ermittelt:  $R_1=0,2\Omega$ ,  $R_2'=0,35\Omega$ ,  $X_{2\sigma}'=1,0\Omega$  und  $X_{1\sigma}=1,0\Omega$ . Bestimmen Sie das Kippmoment, das Anfahrmoment und die Lastdrehzahl der Maschine.

(Lösung  $M_K=689,5Nm$   $M_A=234,15Nm$   $n=1461U/min$ )

- 10) Der sekundäre Anlaufstrom eines Kurzschlussläufers ist das sechsfache des Wertes bei Nennbetrieb ( $s_N=0,03$ ). Es ist das Verhältnis Anlauf- zu Nennmoment anzugeben.  
(Lösung  $M_A/M_N=1,08$ )
- 11) Für einen Asynchronmotor stehen bei gegebener Schaltung der Ständerwicklung zwei Netzspannungen zur Verfügung. Die erreichbaren Anfahrmomente stehen dabei im Verhältnis 2:1. In welchem Verhältnis stehen die Spannungen und die Anfahrströme?  
(Lösung  $U_1/U_2=\sqrt{2}$   $I_1/I_2=\sqrt{2}$ )
- 12) Eine 4polige Asynchronmaschine (3x380V) besitzt die Kennwerte  $R_2'=0,2\Omega$  und  $X_{1\sigma}+X_{2\sigma}'=0,8\Omega$ . Mit welcher Drehfeldfrequenz muss der Motor gestartet werden, damit er mit 90% vom Kippmoment losfährt?  
(Lösung  $f_1=7,835Hz$  bzw.  $f_2=19,94Hz$ )
- 13) Eine 4polige Asynchronmaschine (3x380V) besitzt ein Kippmoment von 12Nm bei einem Kippschlupf von 10%. Das Nennmoment beträgt 4Nm. Bestimmen Sie die Nenndrehzahl der Maschine am 50Hz-Netz.  
(Lösung  $n=1474 U/min$ )
- 14) Der Kondensator eines Einphasenasynchronmotors soll dimensioniert werden. Die Hauptwicklung besitzt einen Widerstand von  $R_1=65\Omega$  und eine Induktivität von  $L_1=0,4H$ ; die Hilfswicklung besitzt einen Widerstand von  $R_2=65\Omega$  und eine Induktivität von  $L_2=0,2H$ . Die Netzspannung beträgt 230V bei 50 Hz Netzfrequenz. Welche Kapazität muss der Kondensator besitzen und für welche Spannung muss er ausgelegt sein, wenn die Ströme in den Wicklungen exakt senkrecht zueinander stehen sollen? Wie hoch ist der Anfahrstrom des Motors?  
(Lösung  $C=33\mu F$   $U_c=303V$   $I_{ges}=3,54A$ )
- 15) Das Drehfeld eines Einphasenasynchronmotors mit Widerstandshilfswicklung soll bestimmt werden. 1.Wicklung:  $R_1=45\Omega$  und eine Induktivität von  $L_1=0,3H$ ; die 2.Wicklung besitzt einen Widerstand von  $R_2=120\Omega$  und eine Induktivität von  $L_2=0,1H$ . Der Motor hängt an einem 230V/50Hz-Netz.  
(Lösung  $I_1=2,2A /-64^\circ$   $I_2=1,85A /-14,7^\circ$   $\Phi_{max}/\Phi_{min}=3,7/1,7$ )
- 16) Der Anfahrstrom eines Asynchronmotors (Sternschaltung) soll über einen Vorwiderstand in jeder Phase auf 6A begrenzt werden. Motor肯daten:  $R_1=12\Omega$   $X_{1\sigma}=8\Omega$   $R_2'=8\Omega$   $X_{2\sigma}'=16\Omega$  Netz: 3x400V/50Hz. Wie groß muss der Widerstand in jeder Phase sein? Um wieviel Prozent sinkt das Anfahrmoment des Motors?  
(Lösung  $R_V=10,09\Omega$  Anlaufmoment sinkt um 34,1%)
- 17) Der Anfahrstrom eines Asynchronmotors (Dreieck) soll über eine Vorschalt-drossel (reine Induktivität) in jeder Phase reduziert werden. Das Anfahrmoment darf jedoch höchstens um 20% absinken. Motor肯daten:  $R_1=10\Omega$   $X_{1\sigma}=10\Omega$   $R_2'=8\Omega$

$X_{2\sigma}' = 15\Omega$  Netz:  $3 \times 400\text{V}/50\text{Hz}$ . Wie groß darf die Drossel in jeder Phase sein? Um wieviel Prozent sinkt der Anfahrstrom in der Zuleitung?  
(Lösung  $L_V = 13,9\text{mH}$  Anlaufmoment sinkt um 10,6% von 22,48A auf 20,11A)

- 18) Ein Einphasenmotor für das amerikanische Netz (115V / 60Hz) wird über eine Hilfswicklung mit Kondensator angefahren: Motordaten: 1. Wicklung:  $R_1 = 20\Omega$  und eine Induktivität von  $L_1 = 53\text{mH}$ ; die 2. Wicklung besitzt auch einen Widerstand von  $R_2 = 20\Omega$  und eine Induktivität von  $L_2 = 53\text{mH}$ ; der Kondensator hat  $66,3\mu\text{F}$ . Rechnen Sie nach, dass sich im amerikanischen Netz damit symmetrische Verhältnisse ergeben. Wie sehen die Strom- und Spannungsverhältnisse aus, wenn der Motor an 115V/50Hz betrieben wird?

(Lösung  $I_1: 4,417\text{A}/4,066\text{A}$   $I_2: 3,093\text{A}/4,066\text{A}$   $I_{\text{ges}}: 5,06\text{A}/5,75\text{A}$   $U_c: 148,5\text{V}/162,6\text{V}$ )