

5 Die Asynchronmaschine

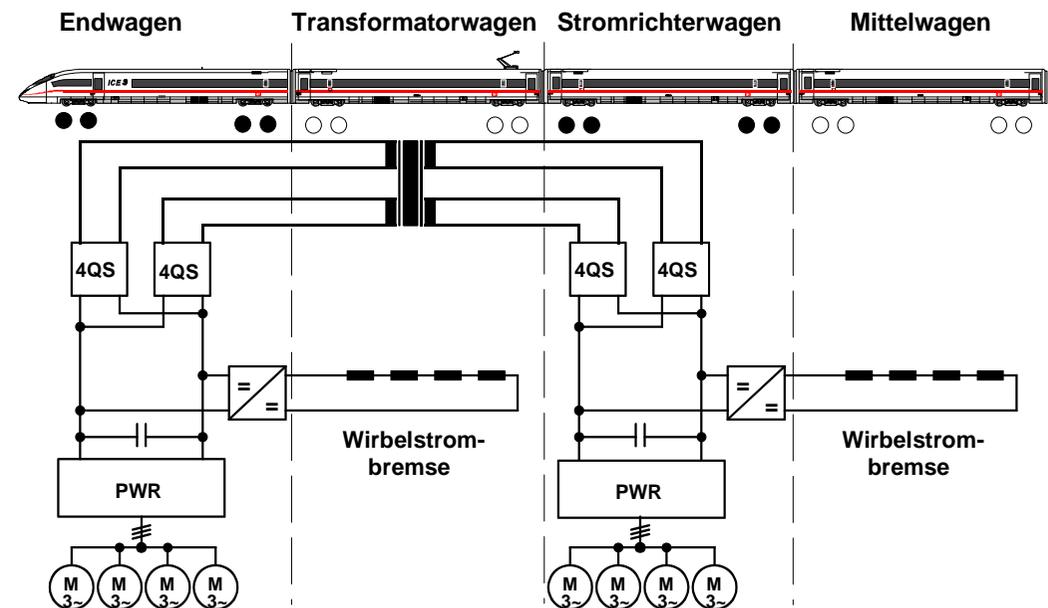
5.1 Einführung

5.1.1 Anwendung und Einsatz

- Einfacher und robuster Aufbau, daher schon immer weit verbreitet bei Standardantrieben mit weitgehend konstanter Drehzahl (Fördertechnik, Lüfter, Pumpen, in Einphasenausführung auch in Haushaltsgeräten)
- Zunehmende Bedeutung auch für anspruchsvolle Anwendungen bei Speisung über Frequenzumrichter und sog. „feldorientierter Drehzahlregelung“ (Elektrolokomotiven, Werkzeugmaschinen, Elektrofahrzeuge, anspruchsvolle Fördertechnik)
- Überwiegend erhältlich als genormte Standardmaschinen im Leistungsbereich von etwa 0,3kW bis 150kW; darüber Sonderbauformen

Beispiel: Fahrmotoren des ICE 3

- Je vier Drehstrom-Asynchronmaschinen im End- und Stromrichterwagen eines Viertelzuges
- Jeweils ein GTO-Pulswechselrichter (PWR) im End- und Stromrichterwagen, gespeist aus je zwei Vierquadrantenstellern (4QS), die vom Loktransformator versorgt werden.



Quelle: Siemens

Bild 5-1

5.1.2 Prinzip

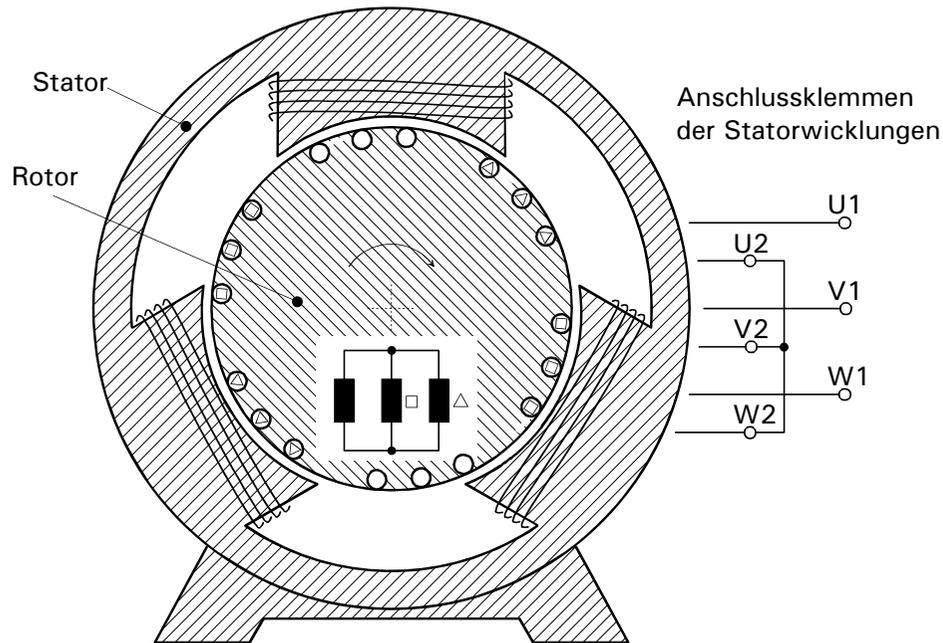


Bild 5-2

- Feststehender **Stator**, üblicherweise mit verteilter Dreiphasenwicklung (hier mit ausgeprägten Polen gezeichnet), in Stern- oder Dreieckschaltung an ein Drehstromnetz angeschlossen
- Rotierender **Rotor** mit **kurzgeschlossener Dreiphasenwicklung**, (alternativ: jeweils ein Ende jeder Rotorwicklung über Schleifringe zugänglich und außerhalb der Maschine über verstellbare Zusatzwiderstände kurzgeschlossen, sog. Schleifringläufer-Asynchronmaschine)

Die **Ständerströme** rufen ein **Ständerdrehfeld** hervor, das sich über den Läufer hinweg bewegt („asynchron“!)



Im **Läufer** werden **Spannungen** induziert, die wiederum **Läuferströme** (sowie ein läuferseitiges magnetisches Feld) hervorrufen



Diese **Läuferströme** im **resultierenden Drehfeld** führen zur **Drehmomentbildung**

→ Der drehmomentbildende Strom (vgl. Ankerstrom bei der Gleichstrommaschine) wird also bei der Asynchronmaschine nicht von außen vorgegeben, sondern muss zunächst durch **Induktion** im Rotor selbst erzeugt werden (daher im Englischen auch „induction machine“!)

5.1.3 Ziel und Vorgehen der Vorlesung

Die vollständige mathematische Beschreibung der idealisierten Asynchronmaschine (Vernachlässigung von Sättigungserscheinungen) erfolgt in mehreren Schritten:

1. Zunächst werden die beiden separaten magnetischen Drehfelder hergeleitet, die von angenommenen Ständerströmen einerseits und Läuferströmen andererseits herrühren und sich in der Maschine zu einem einzigen Drehfeld überlagern (5.2, 5.3 und 5.4).
2. Das resultierende Drehfeld induziert Spannungen in den Ständer- und Läuferwicklungen. Aus den dann bekannten Größen *Ständerstrom*, *Läuferstrom*, *Ständerspannung* und *Läuferspannung* kann ein

Ersatzschaltbild

der Asynchronmaschine abgeleitet werden, welches die Maschine elektrisch vollständig beschreibt. Aus dem Ersatzschaltbild werden wiederum die wichtigen

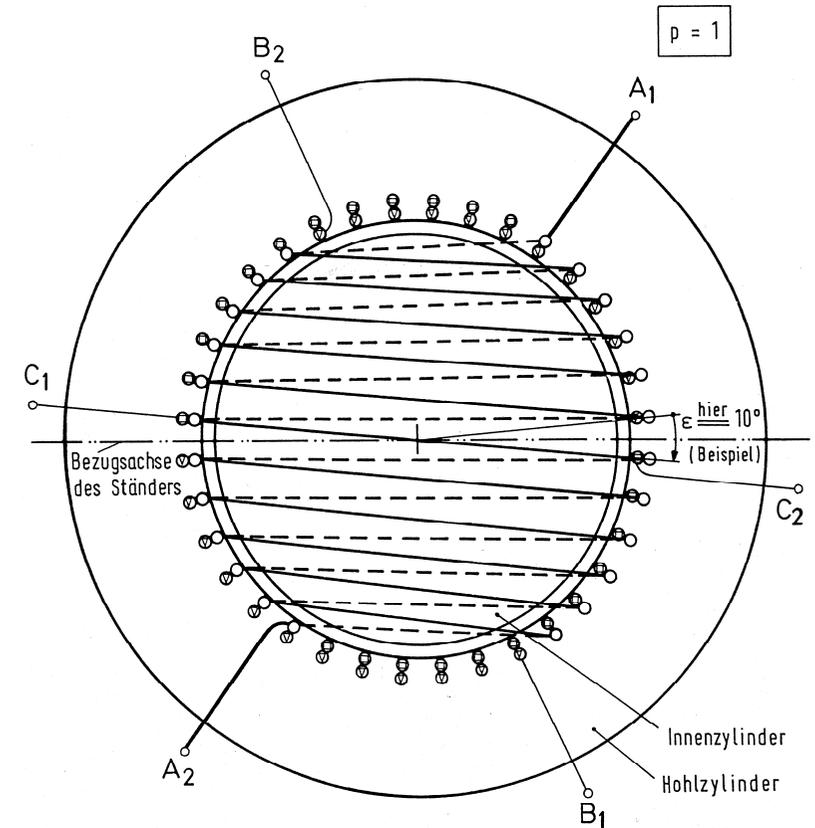
Stromortskurven

abgeleitet (Lage der Ständerstrom- und -spannungszeiger in der komplexen Ebene) (5.4 bis 5.8).

3. Aus einer Leistungsbilanz folgen schließlich das von der Maschine abgegebene Drehmoment und ihre

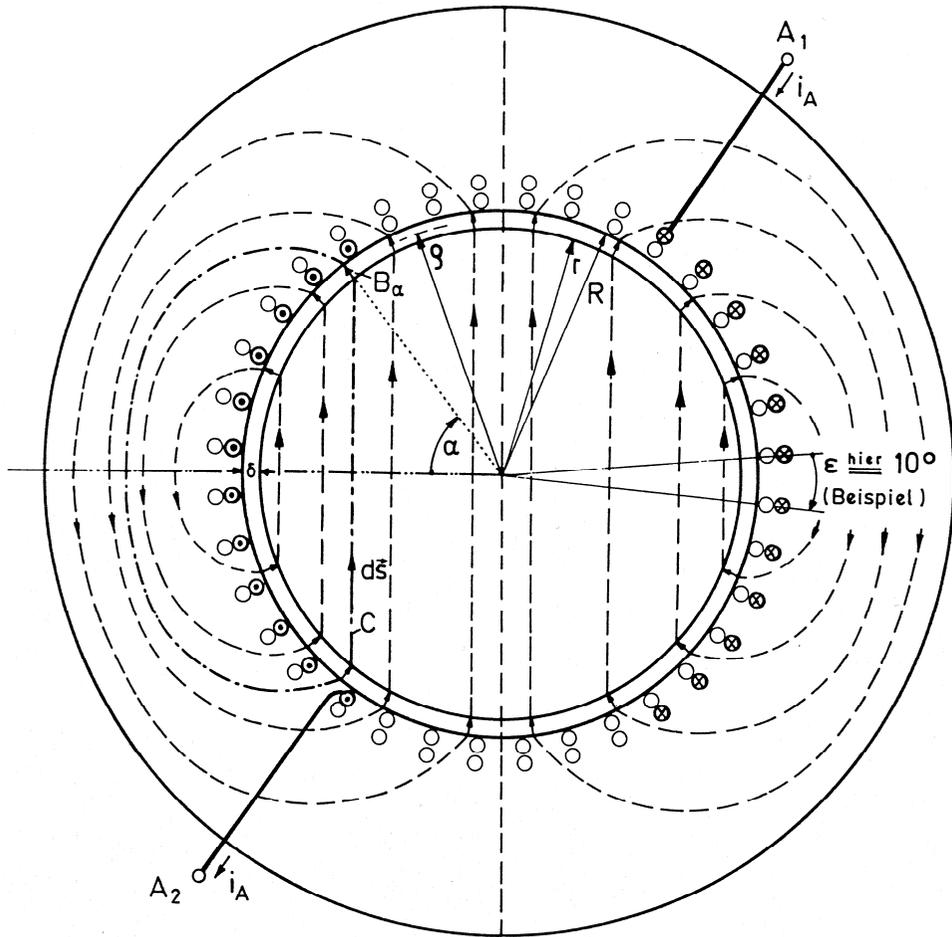
Kennlinie

zu 5.2: Von den Ständerströmen hervorgerufenen Drehfeld



- Spulengruppe A mit Anfang A₁ und Ende A₂
- ⊙ Spulengruppe B mit Anfang B₁ und Ende B₂
- ⊕ Spulengruppe C mit Anfang C₁ und Ende C₂
- vordere Verbindungsleitungen } der Spulengruppe A
- - - hintere Verbindungsleitungen }

Bild 5-3



- Spulengruppe A vom Strom i_A durchflossen (Ströme $i_B, i_C = 0$)
 \Rightarrow Magnetfeld mit $B(\rho, \alpha)$
- Im Luftspalt gilt: - Feldlinien radial (Brechungsgesetz)
 - $\delta \ll r$ bzw. $\delta \ll R, \Rightarrow B(\rho, \alpha) \approx B(\alpha) = B_\alpha$

Bild 5-4

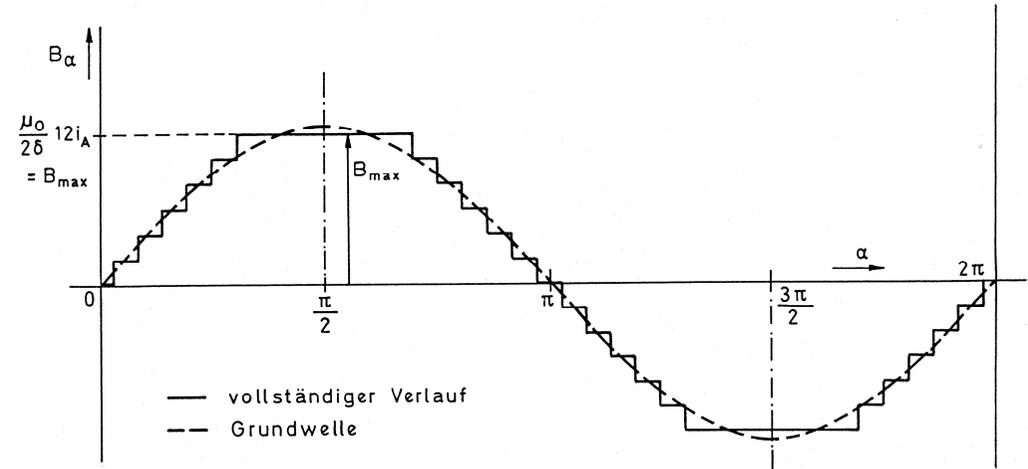


Bild 5-5

Wicklungsfaktor Ξ : Maß für die Geometrie der Spulengruppe

Verteilte Wicklung gemäß Bild 5-4: $\Xi < 1$; geringe Oberwellen

Konzentrierte Wicklung (s.u.): $\Xi = 1$; hohe Oberwellen

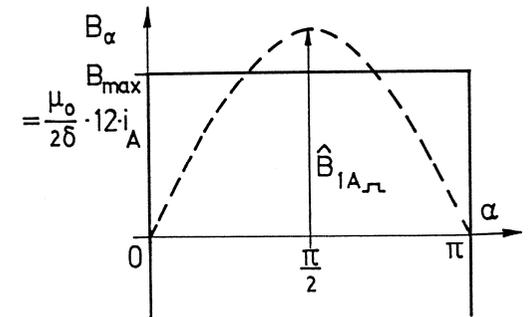
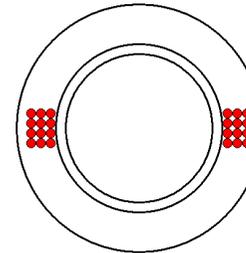


Bild 5-6

zu 5.3: Von den Läuferströmen hervorgerufenenes Drehfeld

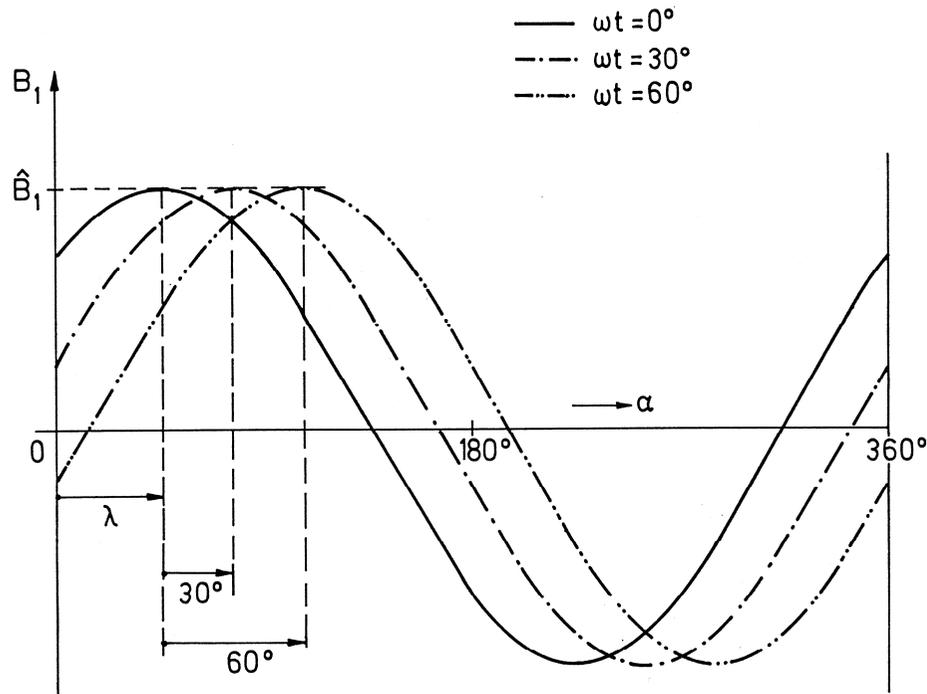


Bild 5-7

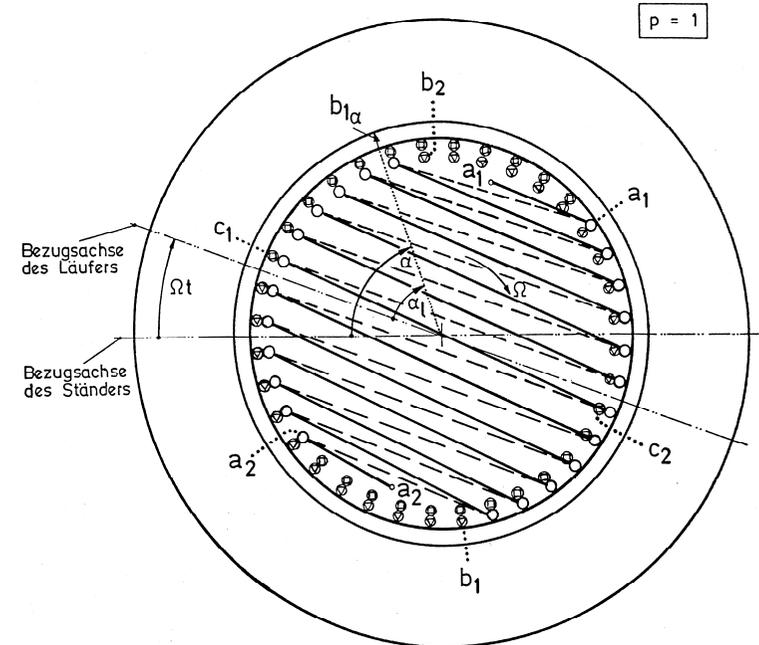


Bild 5-8

Läufer steht still ($\Omega = 0$):

- $\Omega = 0 \Rightarrow$ Bezugsachse des Läufers fällt mit der Bezugsachse des Ständers zusammen $\Rightarrow \alpha = \alpha_\ell$.
- Wicklung des Läufers ist gleich aufgebaut wie die Wicklung des Ständers.
- Magnetischer Kreis (Wege „C“) ist in Ständer und Läufer derselbe.

\Rightarrow **Ergebnis Gl. (5-7) aus 5.2.3 kann mit anderen Bezeichnungen übernommen werden.**

Läufer rotiert mit Ω :

- $\Omega \neq 0 \Rightarrow \alpha = \alpha_\ell + \Omega t \Rightarrow$ Gl. (5-13) beschreibt das Drehfeld relativ zur Bezugsachse des Läufers.
- Relativ zur Bezugsachse des Ständers gilt dann:

$$b_1(\alpha, t) = \frac{4}{\pi} \cdot \xi \cdot w \cdot \frac{\mu_0}{2\delta} \cdot \frac{3}{2} \cdot (-\hat{i}) \cdot \cos(\alpha - \Omega t - s \cdot \omega t - \psi) \quad (5-14)$$

zu 5.4: Resultierendes Drehfeld

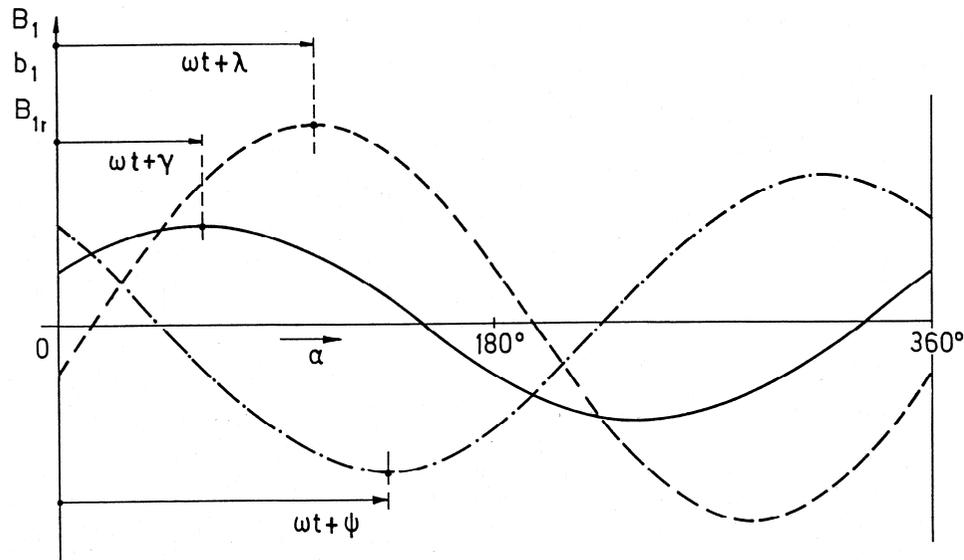


Bild 5-9

Feldverlauf zur normierten Zeit ωt :

$$- - - - B_1(\alpha, t) = \hat{B}_1 \cdot \cos(\alpha - \omega t - \lambda) \quad (\text{ständers. Drehfeld})$$

$$- \cdot - \cdot - b_1(\alpha, t) = -\hat{b}_1 \cdot \cos(\alpha - \omega t - \psi) \quad (\text{läufers. Drehfeld})$$

↓ resultierendes Drehfeld

$$- - - - B_{1r}(\alpha, t) = \frac{4}{\pi} \cdot \Xi \cdot W \cdot \frac{\mu_0}{2\delta} \cdot \frac{3}{2} \cdot \hat{I}_m \cdot \cos(\alpha - \omega t - \gamma) \quad (5-17)$$

$$\text{mit} \quad \hat{I}_m = \sqrt{\left(\hat{I} \cdot \cos\lambda - \frac{w \cdot \xi}{W \cdot \Xi} \cdot \hat{i} \cdot \cos\psi\right)^2 + \left(\hat{I} \cdot \sin\lambda - \frac{w \cdot \xi}{W \cdot \Xi} \cdot \hat{i} \cdot \sin\psi\right)^2} \quad (5-16a)$$

$$\gamma = \arctan \frac{\hat{I} \cdot \sin\lambda - \frac{w \cdot \xi}{W \cdot \Xi} \cdot \hat{i} \cdot \sin\psi}{\hat{I} \cdot \cos\lambda - \frac{w \cdot \xi}{W \cdot \Xi} \cdot \hat{i} \cdot \cos\psi} \quad (5-16b)$$

Interpretation:

Gl. (5-17):

B_{1r} entsteht durch Bestromung des Ständers mit i_A, i_B, i_C gemäß Gl. (5-6)

und

durch Bestromung des Läufers mit i_a, i_b, i_c gemäß Gl. (5-12).

Gl. (5-7):

B_{1r} entsteht durch alleinige Bestromung des Ständers mit

$$i_{Am}(t) = \hat{I}_m \cdot \sin(\omega t + \gamma) \quad (5-18a)$$

$$i_{Bm}(t) = \hat{I}_m \cdot \sin\left(\omega t + \gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (5-18b)$$

$$i_{Cm}(t) = \hat{I}_m \cdot \sin\left(\omega t + \gamma - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (5-18c)$$

„auf die Ständerwicklung bezogenes Magnetisierungsstromsystem“

Ergebnis:

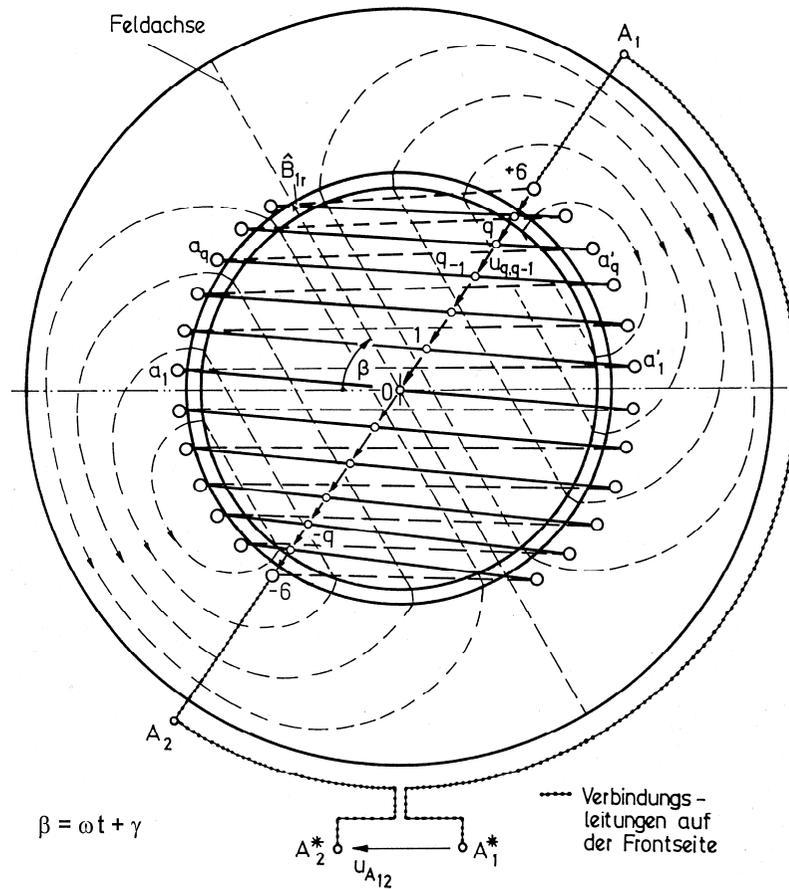
Resultierendes Magnetfeld

- dreht sich mit der Winkelgeschwindigkeit ω ;
- der (örtliche) Maximalwert seiner magnetischen Induktion ist zur normierten Zeit ωt um den Winkel

$$\beta = \omega t + \gamma \quad (5-19)$$

gegenüber der Bezugsachse ausgelenkt.

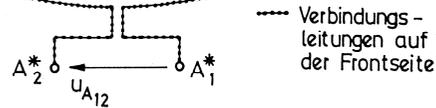
zu 5.5: Vom Hauptfluss induzierte Spannungen



- Leerseite -

Bild 5-10

$$\beta = \omega t + \gamma$$



Das in 5.4 gefundene Magnetfeld induziert in den Spulengruppen des Ständers Spannungen.

Jede Leiterschleife einer Ständerspulengruppe wird von einem zeitlich variablen Magnetfeld durchsetzt. Dabei ändert sich das Magnetfeld periodisch mit ω .

Aus der Anschauung:

$$\hat{U}_{A12} \sim R, \text{ da Fläche der Leiterschleifen} \sim R$$

$$\hat{U}_{A12} \sim \ell, \text{ da Fläche der Leiterschleifen} \sim \ell$$

$$\hat{U}_{A12} \sim \omega, \text{ da } \left. \frac{d\Phi}{dt} \right|_{\max} \sim \omega$$

$$\hat{U}_{A12} \sim W$$

zu 5.6: Einphasige Ersatzschaltbilder der Asynchronmaschine

Zusammenstellung der wichtigen Gleichungen

Beschreibung aller drei Spulengruppen A,B,C im Ständer bzw. a,b,c im Läufer:

Ständerstromsystem A (entsprechend für B und C)

$$i_A = \hat{I} \cdot \sin(\omega t + \lambda) \quad ((5-6a))$$

Läuferstromsystem

$$i_a = -\hat{i} \cdot \sin(s \cdot \omega t + \psi) \quad ((5-12a))$$

Magnetisierungsstromsystem

$$i_{Am} = \hat{I} \cdot \sin(\omega t + \lambda) - \frac{w_2 \cdot \xi_2}{w_1 \cdot \xi_1} \cdot \hat{i} \cdot \sin(\omega t + \psi) = \hat{I}_m \cdot \sin(\omega t + \gamma) \quad ((5-18a))$$

In der Ständerwicklung induziertes Drehspannungssystem

$$u_{A12} = \omega \cdot \Xi^2 \cdot W^2 \cdot c_h \cdot \hat{I}_m \cdot \cos(\omega t + \gamma) \quad ((5-22a))$$

oder
$$u_{A12} = L_H \cdot \frac{di_{Am}}{dt} = \omega \cdot L_H \cdot \hat{I}_m \cdot \cos(\omega t + \gamma) \quad ((5-25a))$$

In der Läuferwicklung induziertes Drehspannungssystem

$$u_{a12} = s \cdot \omega \cdot \xi_2 \cdot w_2 \cdot \Xi \cdot W \cdot c_h \cdot \hat{I}_m \cdot \cos(s \cdot \omega t + \gamma) \quad ((5-27a))$$

Mechanische Winkelgeschwindigkeit des Läufers

$$\Omega = (1 - s) \cdot \omega \quad \text{aus (5-10)}$$

Unter Voraussetzung von Symmetrie genügt die Betrachtung von Spulengruppe A, daher:

Repräsentativbetrachtung von Spulengruppe A und Umbenennung:

Index „1“: Ständergröße

Index „2“: Läufergröße

Ständerstrom

$$i_1 = \hat{I}_1 \cdot \sin(\omega t + \lambda) \quad (5-28)$$

Läuferstrom

$$i_2 = -\hat{I}_2 \cdot \sin(s \cdot \omega t + \psi) \quad (5-29)$$

Magnetisierungsstrom

$$i_{m1} = \hat{I}_1 \cdot \sin(\omega t + \lambda) - \frac{w_2 \cdot \xi_2}{w_1 \cdot \xi_1} \cdot \hat{i}_2 \cdot \sin(\omega t + \psi) = \hat{I}_{m1} \cdot \sin(\omega t + \gamma) \quad (5-30)$$

Aus (5-28) und (5-30):

$$i_1 = \hat{I}_1 \cdot \sin(\omega t + \lambda) = i_{m1} + \frac{w_2 \cdot \xi_2}{w_1 \cdot \xi_1} \cdot \hat{i}_2 \cdot \sin(\omega t + \psi) \quad (5-31)$$

In der Ständerwicklung induzierte Spannung (ständers. Hauptfeldspannung)

$$u_{h1} = \omega \cdot \xi_1^2 \cdot w_1^2 \cdot c_h \cdot \hat{I}_{m1} \cdot \cos(\omega t + \gamma) \quad (5-32)$$

oder
$$u_{h1} = L_{h1} \cdot \frac{di_{m1}}{dt} = \omega \cdot L_{h1} \cdot \hat{I}_{m1} \cdot \cos(\omega t + \gamma) \quad (5-33)$$

In der Läuferwicklung induzierte Spannung

$$u_{h2} = s \cdot \omega \cdot \xi_2 \cdot w_2 \cdot \xi_1 \cdot w_1 \cdot c_h \cdot \hat{I}_{m1} \cdot \cos(s \cdot \omega t + \gamma) \quad (5-34)$$

oder
$$u_{h2} = \hat{u}_{h2} \cdot \cos(s \cdot \omega t + \gamma) \quad (5-35)$$

mit der Abkürzung
$$\hat{u}_{h2} = s \cdot \omega \cdot \xi_2 \cdot w_2 \cdot \xi_1 \cdot w_1 \cdot c_h \cdot \hat{I}_{m1} \quad (5-36)$$

Mech. Winkelgeschwindigkeit unter Berücksichtigung der Polpaarzahl

$$\Omega = (1 - s) \cdot \omega \cdot \frac{1}{p} \quad (5-37)$$

Voraussetzungen:

- Symmetrie: Betrachtung von Strang A im Ständer und Strang a im Läufer genügt; B und C können direkt abgeleitet werden
- keine Ausgleichsvorgänge
- keine Sättigung
- zunächst keine Eisenverluste
- zusätzliche Berücksichtigung von Streuung und ohmschem Wicklungswiderstand (wie Transformator)
- dreiphasiger Läuferzusatzwiderstand R_{ZZ} an die Klemmen der Läuferwicklung angeschlossen (über Schleifringe)

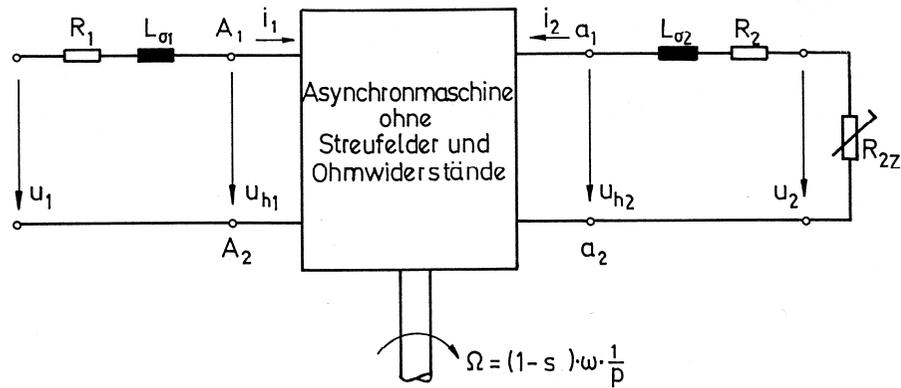
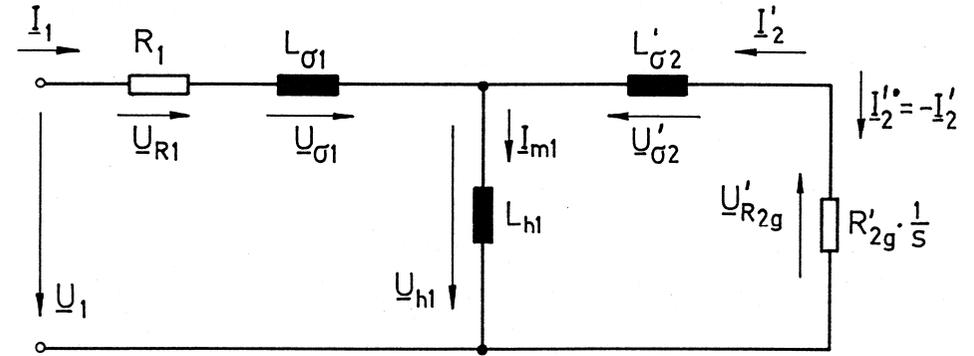


Bild 5-11 Vollständiges Ersatzschaltbild

zu 5.8: Beziffertes Kreisdiagramm



Bisherige Vereinfachungen gelten weiter:

- Keine Sättigung (lineare Verhältnisse)
- Keine Eisenverluste
- Ohmsche Verluste im Ständer vernachlässigbar klein ($R_1 = 0$)

Zusätzliche Randbedingungen:

- Betrieb der ASM an einem starren Netz, d.h. \underline{U}_1 , ω sind fest vorgegeben

Ziel: Beschreibung der Stromaufnahme in Abhängigkeit von s

Weg: Beschreibung des eingeschwungenen Zustands mittels komplexer Rechnung;
Darstellung der Ortskurve $\underline{I}_1(s)$ in der komplexen Ebene

Bild 5-13

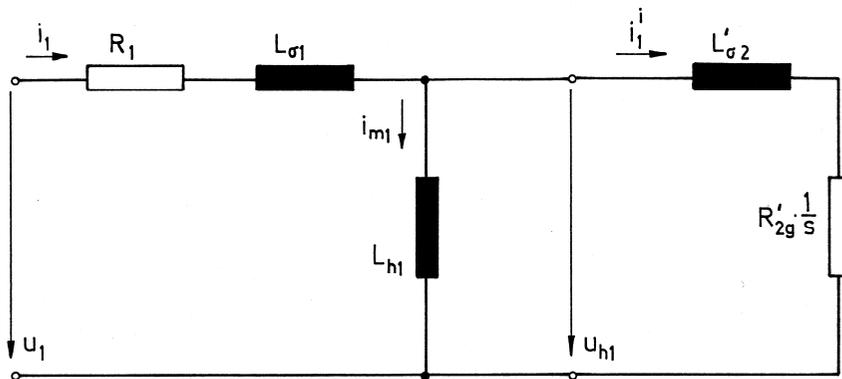


Bild 5-12 Vollständiges, ständerseitiges Ersatzschaltbild

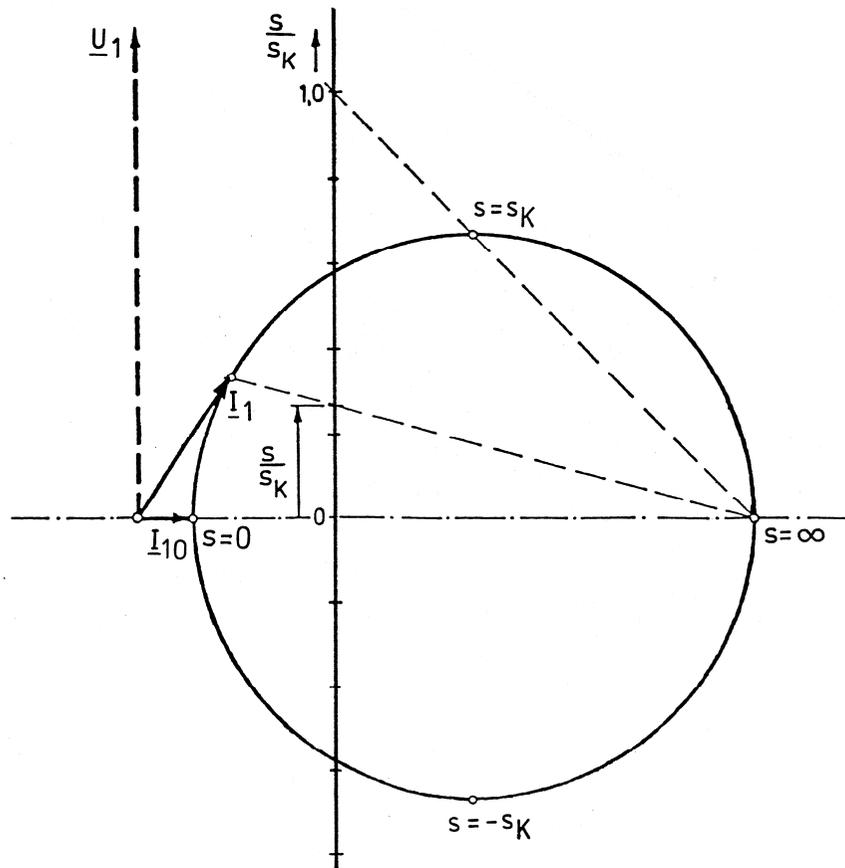


Bild 5-14

Erläuterung zu Bild 5-14:

$s = 0$ (Leerlauf):

$s = 1$ (Stillstand)

$s = s_K$ (Kippschlupf): Maximale aufgenommene elektrische Wirkleistung und maximales Drehmoment

(ohne Herleitung)
$$s_K = \frac{R_{2g}}{\sigma \cdot \omega \cdot (L_{h1} + L_{\sigma 2})} = \frac{R_{2g}}{\sigma \cdot \omega \cdot (L_{h2} + L_{\sigma 2})} \quad (5-52)$$

(Herleitung durch Suche des Maximalwertes des Stator-Wirkstromes aus Gl. (5-48))

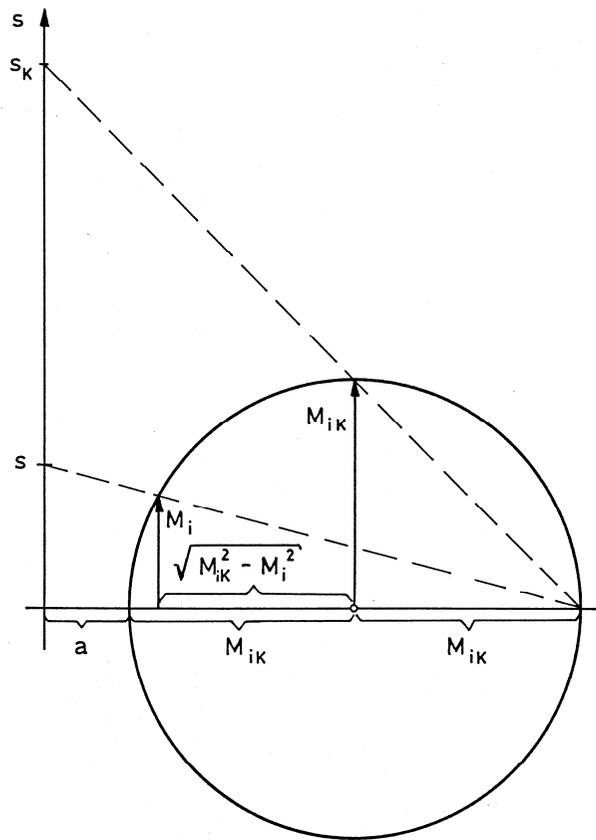
$0 < s < 1 \Rightarrow \Omega_0 > \Omega > 0$: $I_{1W} > 0 \Rightarrow P_1 > 0 \Rightarrow M_i > 0$ Motorbetrieb

$s < 0 \Rightarrow \Omega > \Omega_0$: $I_{1W} < 0 \Rightarrow P_1 < 0 \Rightarrow M_i < 0$ Generatorbetrieb

$s > 1 \Rightarrow \Omega < 0$: $I_{1W} > 0 \Rightarrow P_1 > 0 \Rightarrow M_i > 0$ Gegenstrom-
bremsbetrieb

Ablesen der Werte von $\frac{s}{s_K}$ entlang des Kreises mit Hilfe der „Skalierungsgeraden“ möglich (Anwendung des Strahlensatzes)

zu 5.9: Drehmomentdiagramm und Drehmomentkennlinien



Strahlensatz: $\frac{s_K}{M_{iK}} = \frac{a + 2 \cdot M_{iK}}{M_{iK}}$ (5-53)

$\frac{s}{M_i} = \frac{a + 2 \cdot M_{iK}}{\sqrt{M_{iK}^2 - M_i^2} + M_{iK}}$ (5-54)

Bild 5-15

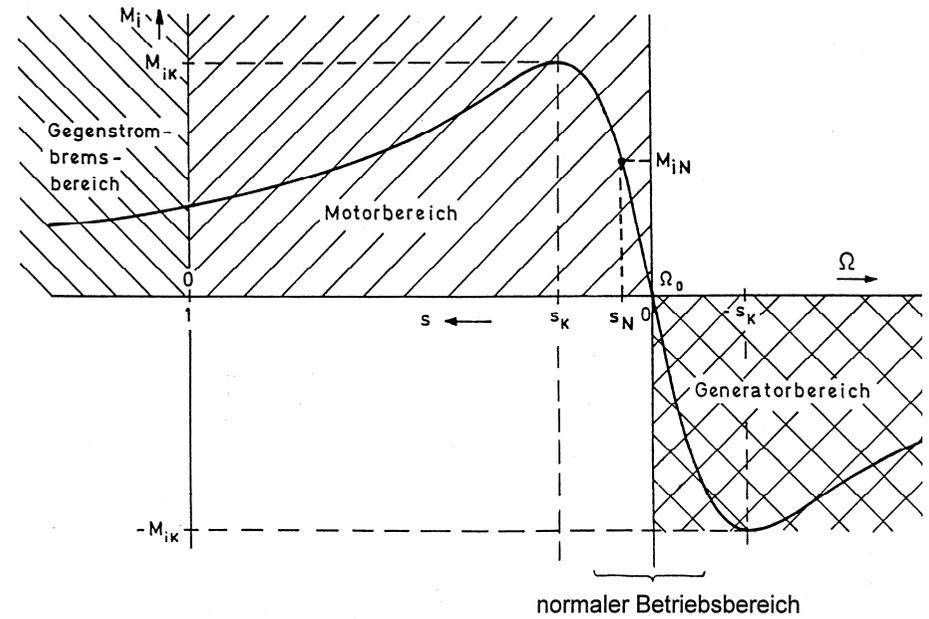


Bild 5-16

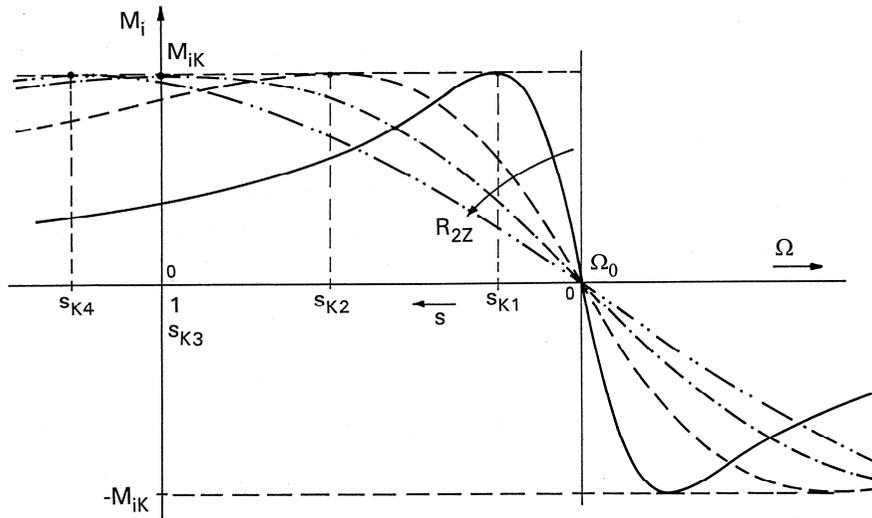
Näherung im „normalen Betriebsbereich“ durch Tangente im Leerlaufpunkt:

$$\frac{M_i}{M_{iK}} = 2 \cdot \frac{s}{s_K} \quad (5-56)$$

Näherung im „normalen Betriebsbereich“ durch Sekante durch Leerlaufpunkt und Nennpunkt:

$$\frac{M_i}{M_{iN}} = \frac{s}{s_N} \quad (5-57)$$

Veränderung der Kennlinie bei Variation von R_{2Z} :



- $R_{2g} = R_2 + R_{2Z}$ ((5-42))
- Ω_0 unverändert
- M_{iK} unverändert
- $s_K \sim R_{2g}$ siehe Gl. (5-52)

Bild 5-17

Veränderung der Kennlinie bei Variation von ω :

Beispiel: Führung der ASM mit konstantem Luftspaltfluss durch gleichsinnige Veränderung von ω und U_1

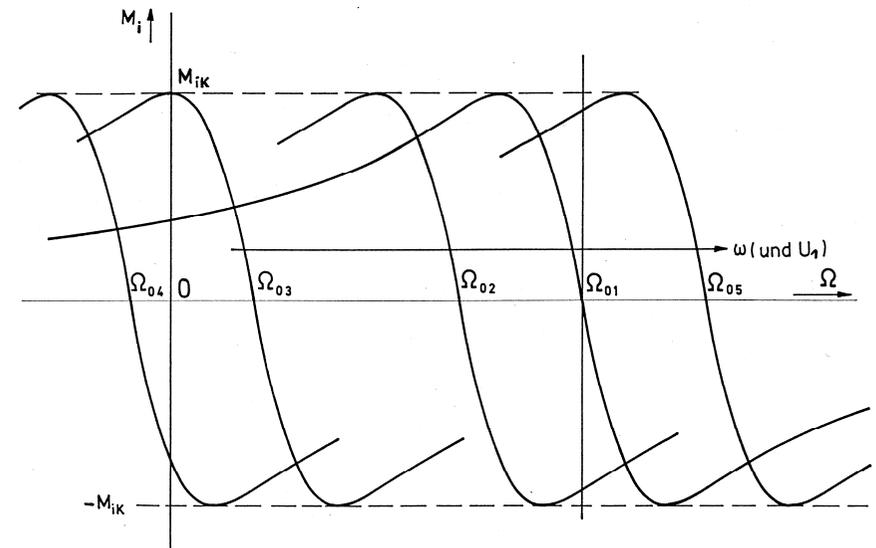


Bild 5-18

5.10 Praktische Ausführung von Asynchronmaschinen

5.10.1 Anzahl der Polpaare p

a) $p = 1 \Rightarrow 1$ Polpaar \Rightarrow 2-polige Maschine

- Spulengruppe A
- - - Spulengruppe B
- ⋯ Spulengruppe C

- - - Feldlinien

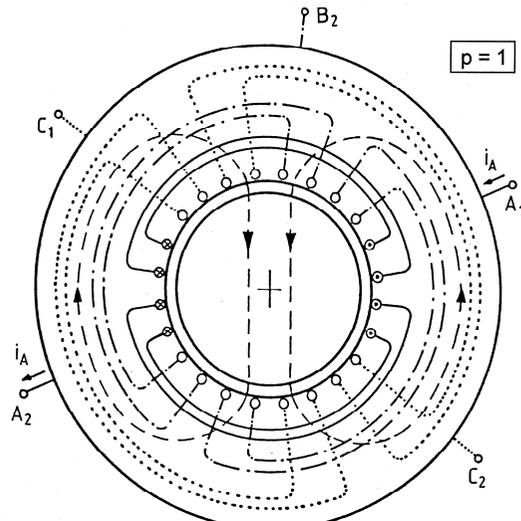


Bild 5-19

b) $p = 2 \Rightarrow 2$ Polpaare \Rightarrow 4-polige Maschine

- Spulengruppe A
- - - Spulengruppe B
- ⋯ Spulengruppe C

- - - Feldlinien

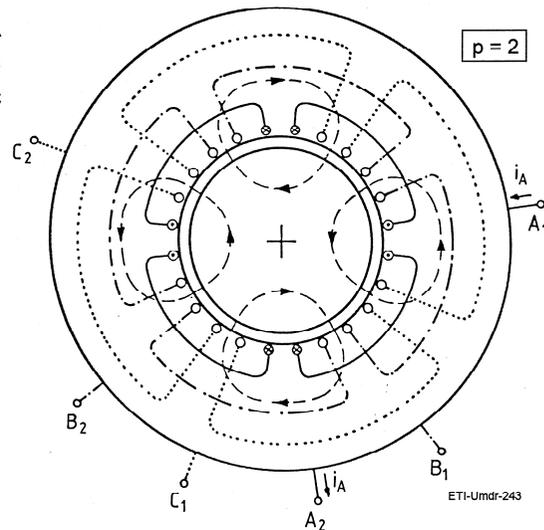


Bild 5-20

Gebräuchliche Polpaarzahlen:

Polpaarzahl	Synchrone Drehzahl am 50Hz-Netz
$p = 1$	$n_0 = 3000 \text{ min}^{-1}$
$p = 2$	$n_0 = 1500 \text{ min}^{-1}$
$p = 3$	$n_0 = 1000 \text{ min}^{-1}$

5.10.2 Nuten

Unterschiedliche Nutzahlen im Ständer und Läufer zur Verringerung des „magnetischen Lärms“:

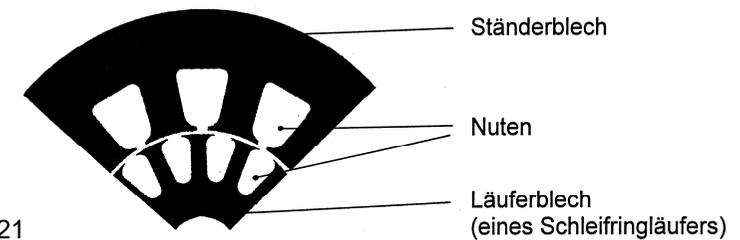


Bild 5-21

Nutschrägung zur Verringerung der Schwankungen des Luftspaltflusses:

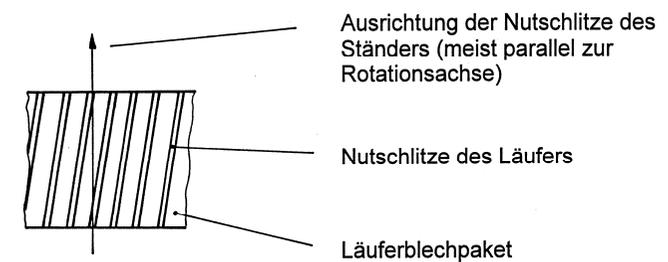


Bild 5-22

5.10.3 Eisenverluste und ihre Berücksichtigung im Ersatzschaltbild

- Wie beim Transformator Eisenverluste im Ständer und Läufer aufgrund der Wechselflüsse
- Eisenverluste im Läufer jedoch wegen der –im normalen Betriebsbereich– geringen elektrischen Läuferkreisfrequenz $s \cdot \omega$ meist vernachlässigbar
- Berücksichtigung der Eisenverluste im Ständer im Ersatzschaltbild durch Ohmwidstand parallel zur Hauptinduktivität:

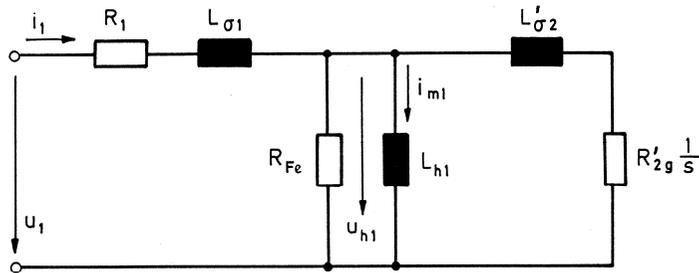


Bild 5-23

5.10.4 Wicklungsaufbau

Bisher betrachtetes Beispiel: *Verteilte Zweischichtwicklung*, d.h. in jeder Nut liegen Windungen zweier Spulengruppen (z.B. der Spulengruppen A und B); dadurch Verkürzung der „Spulenweite“ gegenüber einer Durchmesserspule zur Verbesserung des örtlichen Verlaufs der magnetischen Induktion im Luftspalt und des zeitlichen Verlaufs der induzierten Spannungen („gesehnte Wicklung“)

Ebenfalls möglich: *Einschichtwicklung*, hierdurch jedoch größere Oberwellen der magnetischen Induktion im Luftspalt (vgl. Bild 5-5)

5.10.5 Ausführung der Läuferwicklung

- Schleifringläufer

- Externe Läuferzusatzwiderstände über Schleifringe angeschlossen
- Läuferwicklung als Stab- oder Spulenwicklung aus Kupferdraht

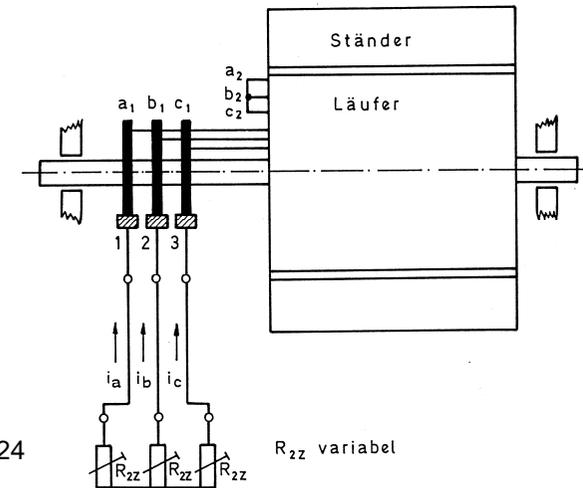


Bild 5-24

- Käfigläufer

- keine Schleifringe
- Stäbe in den Nuten sind vorne und hinten durch Kurzschlussringe direkt verbunden
- Einfache Herstellung der „Wicklung“ im Druckguss-Verfahren

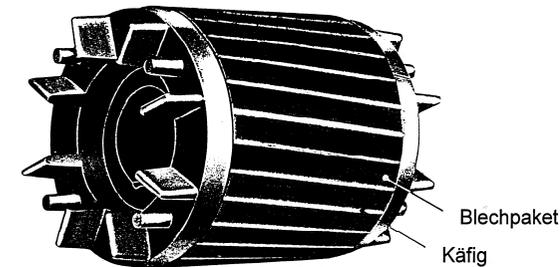


Bild 5-25

- Einfluss der Nutform auf die Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie (Ausnutzung des frequenzabhängigen Stromverdrängungs-Effekts):

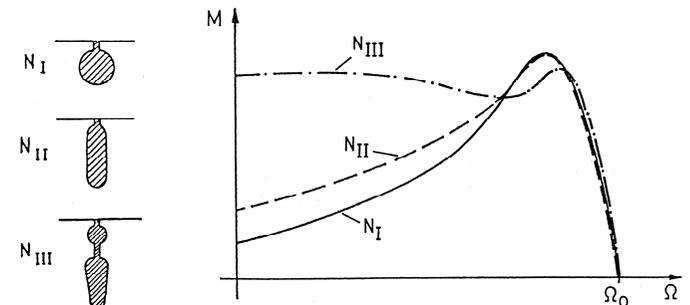


Bild 5-26

5.10.6 Dreiphasen-Asynchronmotor am Einphasen-Netz

Steinmetz-Schaltung:

- „Erzeugung“ der fehlenden Phase mit Hilfe eines Kondensators
- Bei jeder Abweichung vom Abstimmungspunkt stellen sich unsymmetrische Strom- und Spannungsverhältnisse ein

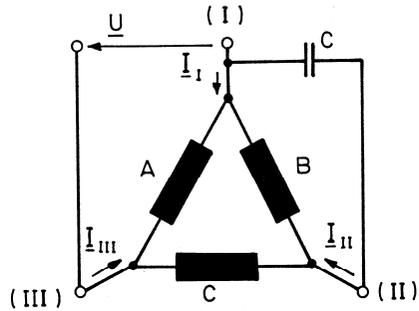


Bild 5-27

5.10.7 Spaltpolmotor (Sonderform der ASM)

Einsatz bei kleinen Leistungen

(z.B. kleine Gebläse, Pumpen in Haushaltsgeräten)

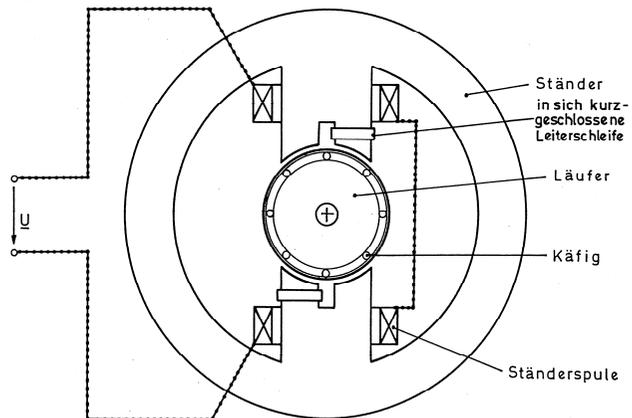


Bild 5-28