

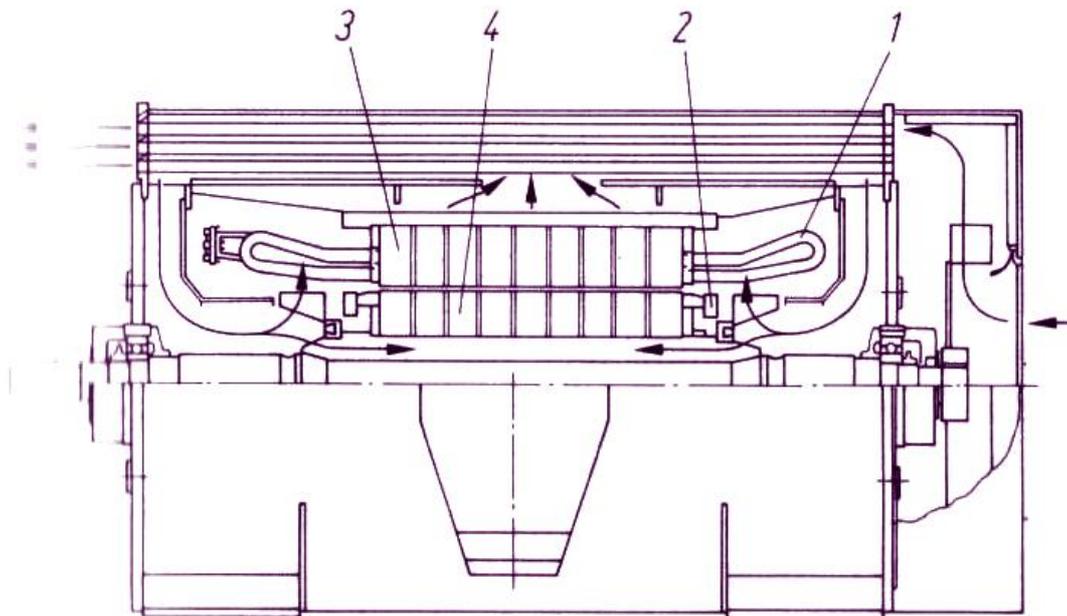
## Praktikum Elektrotechnik 7 Drehstromantrieb

### *Aufbau und Wirkungsweise von Ansynchronmaschinen*

→ Wirkungsweise: elektrische Maschinen wandeln mechanische Energie in elektrische Energie um (Generator) oder umgekehrt (Motor)

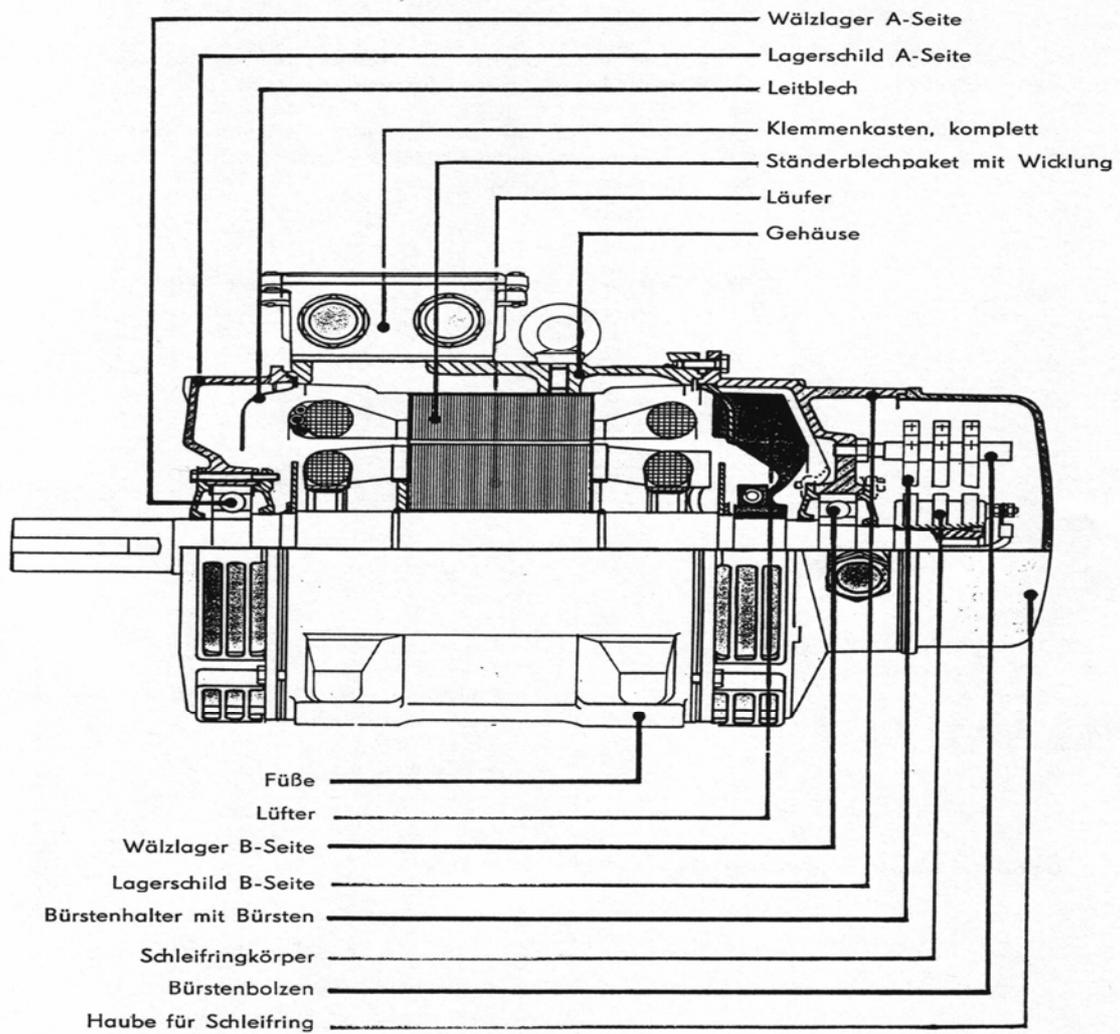
○ jede Maschine weist mindestens einen ruhenden und ein bewegliches Hauptelement auf, bei rotierenden Maschinen sind das Stator und Rotor

- werden auch als Induktionsmotoren bezeichnet
- die Wicklung des Läufers ist in sich kurzgeschlossen
- schon bei stillstehendem Läufer induziert das magnetische Wechselfeld des Ständers eine entsprechende Wechselspannung am Läufer
- die vom induzierten Strom durchflossene Drähte des Rotors werden im vom Ständer erzeugten Feld abgelenkt und ergeben ein Drehmoment im Drehsinn des Drehfeldes
- die im Läufer induzierte Quellspannung wird um so kleiner, je mehr sich die Drehzahl  $n$  des Läufers der Drehzahl  $n_0$  des Drehfeldes nähert



**Bild 1. Asynchronmotor (AEG; Erläuterungen im Text)**

Bild: 1 Drehstromwicklung 2 Kurzschlußwicklung 3 Stator  
(Primärteil) 4 Rotor (Sekundärteil)



→ Erzeugung eines Drehfeldes und Bestimmung der Drehfeldzahl

- die Wirkungsweise aller Drehstrommotoren beruht auf dem von der Ständerwicklung erzeugten magnetischen Drehfeld
  - im Ständer befinden sich im einfachsten Fall drei um je  $120^\circ$  versetzte Spulen
- Spulen
- bei Zuführung eines Dreiphasenstromes erzeugt jede Spule zwei Magnetpole, die mit Netzfrequenz im Kreis umlaufen
  - die Spulen können im Stern oder auch im Dreieck geschaltet sein

Drehfeldzahl:  $n_0 = f/p$

$p$  → Zahl der Pole       $f$  → Netzfrequenz

Herleitung:

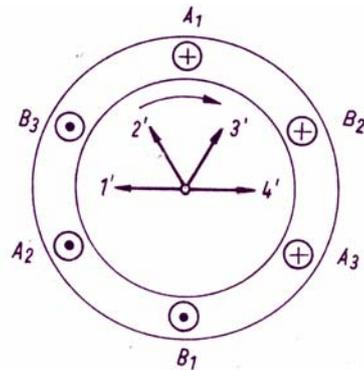


Bild 5.34. Entstehung des Drehfeldes

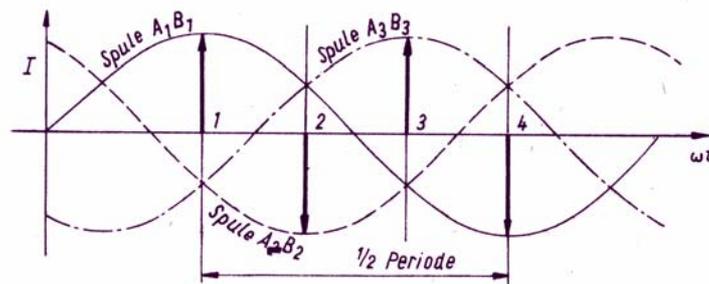


Bild 5.35. Liniendiagramm der Ströme im Drehfeld

Bild 5.34 zeigt 3 um  $120^\circ$  versetzte Spulen, hier entstehen in jeder Spule zeitlich nacheinander je ein Strommaximum und damit zugleich ein Polpaar (zweipolige Wicklung  $p = 1$ )

Zum Zeitpunkt 1 der zugehörigen Stromkurve (Bild 5.35) hat die Spule A1B1 ihr positives Strommaximum und ergibt den Feldpfeil 1'

Die von den beiden anderen Spulen erzeugten Felder sind schwächer und in der Zeichnung nicht dargestellt

Zum Zeitpunkt 2 hat die Spule A2B2 ihr negatives Strommaximum und liefert den Feldpfeil 2'

Zum Zeitpunkt 3 hat die Spule A3B3 ihr positives Maximum → Feldpfeil 3'

Zum Zeitpunkt 4 ergibt die Spule A1B1 wegen der umgedrehten Stromrichtung die zu 1' entgegengesetzte Feldrichtung 4'

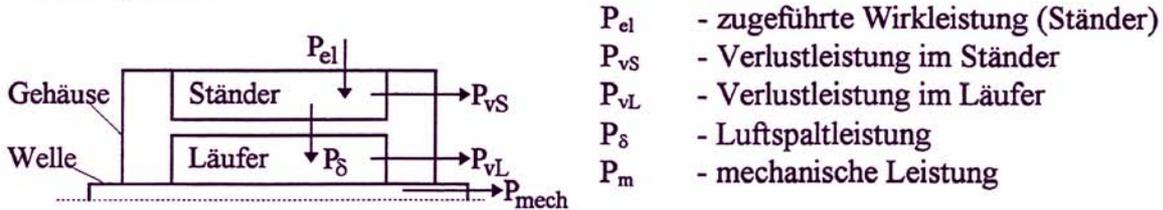
→ Definition des Schlupfes und Zusammenhang mit Drehzahlen

○ die relative Differenz zwischen der Drehzahl des Läufers und der synchronen Drehzahl des Drehfeldes ist der Schlupf  $s$

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0}$$

→ Betriebsverhalten der Drehstrom-Ansynchronmaschine (Drehzahl-Drehmoment-Verhalten, Anlauf und Stillsetzung, Motor-Bremsbetrieb, Betriebskennlinien)

### Leistungsbilanz



- $P_{el}$  - zugeführte Wirkleistung (Ständer)
- $P_{vS}$  - Verlustleistung im Ständer
- $P_{vL}$  - Verlustleistung im Läufer
- $P_{\delta}$  - Luftspaltleistung
- $P_m$  - mechanische Leistung

**1. Annahme:**  $P_{vS} = 0 \rightarrow P_{el} = P_{\delta} = P_{mech} + P_{vL}$        $P_{\delta} = 2\pi N_S M$        $P_{mech} = 2\pi N M$

$\rightarrow M = \frac{P_{vL}}{2\pi \cdot N_S \cdot s}$

**2. Annahme:** Vernachlässigung der Ummagnetisierungsverluste im Läufer

$$P_{vL} = 3 \cdot I_L^2 \cdot R'_L$$

$$I_L^2 = \frac{3 \cdot s^2 \cdot U_s^2}{R'_L{}^2 + (s \cdot X'_{L\sigma})^2}$$

$$P_{vL} = \frac{3 \cdot s^2 \cdot U_s^2 \cdot R'_L}{R'_L{}^2 + (s \cdot X'_{L\sigma})^2}$$

$$M = \frac{3 \cdot U_s^2 \cdot p}{2\pi \cdot f_N} \cdot \frac{R'_L/s}{\left[ (R'_L/s)^2 + X'_{L\sigma}{}^2 \right]}$$

$U_s$  - Strangspannung des Ständers

$G'$  - auf den Ständer bezogene Größe

**Schlupf-Drehmoment-Funktion  $s = f(M)$ :** Die Ermittlung des Maximalmoments durch Auswertung von  $dM / ds = 0$  ergibt als Koordinate des Maximums den Kippschlupf  $s_k$ . Durch Einsetzen in die Momentengleichung erhält man das Kippmoment  $M_k$ .

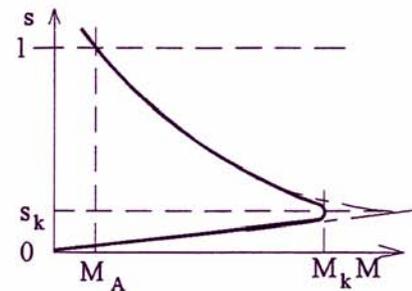
$$s_k = \frac{R'_L}{X'_{L\sigma}} \quad M_k = \frac{3}{2} \cdot \frac{U_s^2 \cdot p}{2\pi \cdot f_N \cdot X'_{L\sigma}}$$

Durch Umformung entsteht die **Kloss'sche Formel:**

$$\frac{M}{M_k} = \frac{2}{\frac{s_k + s}{s} + \frac{s}{s_k}}$$

Verlauf für  $s \ll s_k \Rightarrow M = \frac{2 \cdot M_k}{s_k} \cdot s \rightarrow$  Gerade

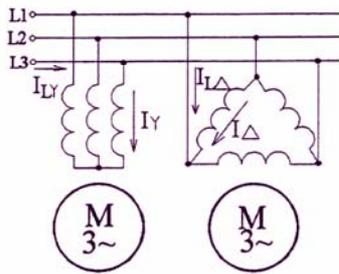
Verlauf für  $s \gg s_k \Rightarrow M = 2 \cdot M_k \cdot s_k \cdot \frac{1}{s} \rightarrow$  Hyperbel



# Drehstromasynchronmaschine - Anlaufverhalten

## Spannungssteuerung

### • Stern-Dreieck-Schaltung



$Z_s$  Wechselstromwiderstand (Impedanz) der Ständerwicklung

- Vorteile:**
- $\cos \varphi$  bei Teillast und Sternschaltung höher
  - Anlaufstrom wesentlich geringer
- Nachteile:**
- Anlaufmoment sehr gering
- Anwendung:**
- Bei ungünstigen Netzverhältnissen ( $I_A$  Begrenzung)
  - Für Sanftanlauf; evtl. bei Teillasthäufigkeit

$$I_{LY} = I_Y = \frac{U_Y}{Z_s} = \frac{U_L}{\sqrt{3} * Z_s}$$

$$I_{L\Delta} = \sqrt{3} * I_{\Delta} = \frac{\sqrt{3} * U_L}{Z_s}$$

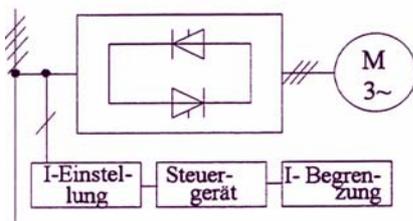
$$\frac{I_{LY}}{I_{L\Delta}} = \frac{1}{3}; \quad \frac{M_Y}{M_{\Delta}} = \left(\frac{U_Y}{U_{\Delta}}\right)^2 = \frac{1}{3}$$

### • Vorschaltgeräte

- Vorschaltrosseln
- Stelltransformator
- Ständervorwiderstände

- Eigenschaften im Prinzip wie bei Sternschaltung
- Anlaufstrom und Anlaufmoment verringern sich mit  $U^2$

### • Sanftanlaufgeräte (Drehstromsteller)



- Vorteile:**
- $M_A, I_A$  einstellbar,
  - Bei Teillast Energieeinsparung, da  $\eta$  und  $\cos \varphi$  ansteigen.
- Nachteil:**
- $M_A$  geringer als bei Direktanlauf

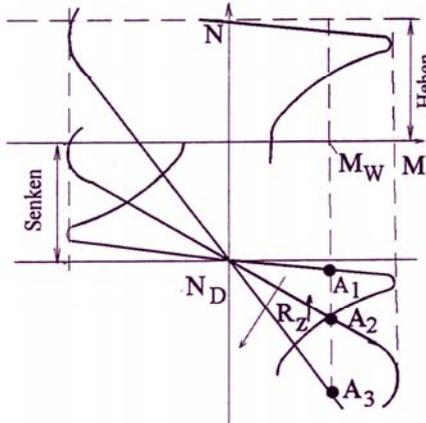
**Anwendung:** s. oben

## Drehstromasynchronmotor - Bremsvorgänge

Arbeitspunkte  $A_v$ , eingetragen für ein Widerstandsmoment  $M_W$

### Übersynchrone Bremsung (generatorischer Bremsbetrieb)

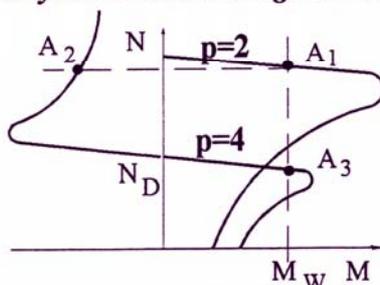
#### Übersynchrone Senkbremsung bei Hebezeugen



#### Maßnahmen und Eigenschaften:

- Umkehr der Drehfeldrichtung durch Vertauschen von zwei Wicklungsanschlüssen.
- Bewegung des Läufers durch die durchziehende Last weiterhin in Drehfeldrichtung.
- Übersynchrone Bremsen bei Überschreiten der Synchrondrehzahl  $N_D$
- Betriebspunkte  $A_1 \dots A_3$ , erreicht durch Erhöhen von  $R_z$
- Maximales Bremsmoment: Kippmoment  $M_k$
- Keine erhöhte thermische Belastung des Motors

#### Übersynchrone Bremsung bei Polumschaltung



- Durch Polumschaltung und damit Veränderung der Polpaarzahl, z. B. von  $p=2$  auf  $p=4$ , Änderung des Betriebspunktes  $A_1$  in  $A_3$ .
- Übersynchrone Bremsbetrieb bis  $N_D$

## Drehzahlkennlinie

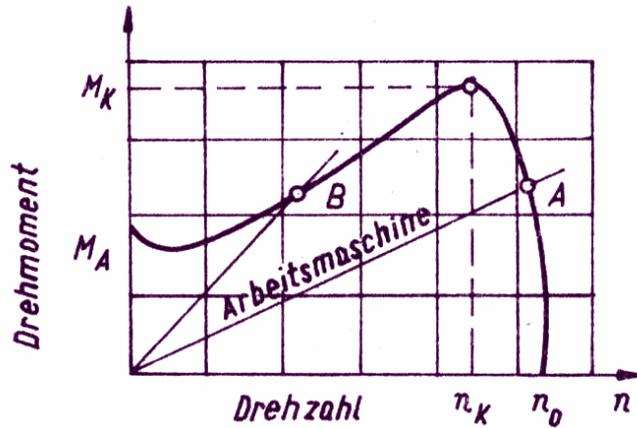


Bild 5.36. Drehmomentkennlinie

Bild 5.36

zeigt, dass das Drehmoment zunächst mit der Drehzahl  $n$  bis zu einem Maximalwert, dem Kippmoment  $M_K$  ansteigt. Das Kippmoment ist das maximale Drehmoment, das der Asynchronmotor abgeben kann. Es liegt etwa bei 85 % der Synchrondrehzahl  $n_0$ . Wird ein höheres Moment benötigt, so bleibt der Motor stehen.

Im Bild 5.36 sieht man, dass es zu jedem Drehmoment zwei unterschiedliche Drehzahlen gibt, ihnen entsprechen zwei Belastungsfälle, je nachdem, ob das Drehmoment der angetriebenen Arbeitsmaschine langsamer oder schneller ansteigt als das des Motor

stabiler Arbeitspunkt:

nach dem Anlaufen schneiden sich die Kennlinien vom Motor und Maschine im Punkt A. Dieser ist stabil, weil z.B.: mit abnehmender Belastung die Drehzahl so lange ansteigt, bis sich das Moment des Motors dem der Maschine wieder angepaßt hat

instabiler Arbeitspunkt:

wenn der Arbeitspunkt B vor dem Kippunkt liegt und die Belastung z.B.: zurückgeht, wandert der Punkt B nach oben. Der Motor beschleunigt sich über den Kippunkt hinaus, bis wieder ein stabiler Punkt auf dem fallenden Ast erreicht ist

Nur bei Drehzahlen oberhalb der Kippdrehzahl  $n_K$  arbeitet der Asynchronmotor stabil

→ Einfluß von Spannungs-, Frequenz- oder Laständerung auf das Betriebsverhalten

**Spannungssteuerung:** Änderung der Spannung durch Stelltransformator oder Drehstromsteller  $\Rightarrow$  Kippmoment  $M_k = k \cdot U_s^2$

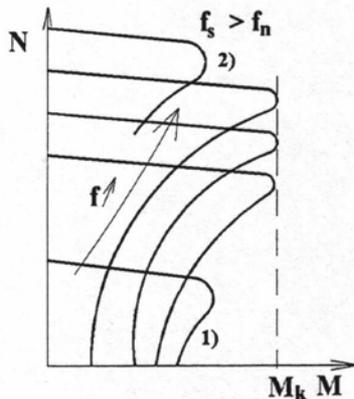
**Vorteile:** Einfache N-Stellung

**Nachteile:** Hohe Verluste

**Anwendung:** Pumpen, Lüfter kleiner Leistung

**Spannungs- und Frequenzsteuerung:** Änderung von Spannung und Frequenz gleichzeitig!

$$M_k = \frac{3 \cdot p \cdot U_s^2}{4\pi \cdot f_s \cdot p \cdot 2\pi \cdot f_s \cdot L'_{L\sigma}} = k \cdot \left[ \frac{U_s}{f_s} \right]^2 \Rightarrow \text{Stellbedingung: } \frac{U}{U_N} = \frac{f}{f_N}$$



- 1) Bei kleinem N wird  $M_k$  durch  $R_s$  beeinflusst
- 2) U - Erhöhung ist begrenzt durch Stellglied und Motorisolation

**Vorteile:**

- Nebenschlußverhalten bleibt erhalten
- N stetig stellbar
- Wirkungsgrad hoch

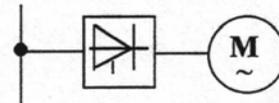
**Nachteile:** - Aufwand und Kosten relativ hoch

**Anwendung:** - Traktionsantriebe

**(stark)** - Schleifspindeln ( $N < 100\,000 \text{ min}^{-1}$ )

**zunehmend)** - Textil-, Holz- und Plastbearbeitungsmaschinen

z.B.: Umrichter mit Gleichspannungs-Zwischenkreis  
U - f - Steuerung:



→ Erwärmungsverhalten elektrischer Maschinen (thermische Zeitkonstante)

für eine Auswahl eines Motor ist in erster Linie die bei Betrieb durch Verluste entstehende Erwärmung entscheidend.

direkte thermische Auslegung: Berechnung der Übertemperatur mittels Wärmequellennetzwerken, Feldberechnungs-Software

indirekte thermische Auslegung: Berechnung eines thermischen Ersatzmomentes als Effektivmoment für ein Lastspiel, welches vergleichbar mit dem Bemessungsmoment des Motors für die entsprechende Betriebsart ist; dazu stückweise Annäherung von  $M(t)$  mit Rechtecken (Trapezen, Dreiecken)

→ Möglichkeiten zur Drehzahlsteuerung mit Vor- und Nachteilen

da die synchrone Drehzahl  $n_0$  festliegt, kann ein größerer Stellbereich nur mit Hilfsmitteln erreicht werden:

Anschluß des Läufer an einen Gleichrichter und Steuerung dieser Spannung durch eine vom Stelltrafo gelieferte Gegenspannung

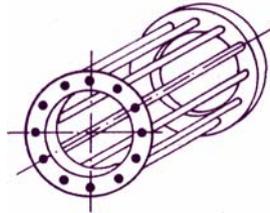
Veränderung der Ständerspannung mittels Stelltrafo oder Stellwiderständen durch Polumschaltung für bestimmte abgestufte Drehzahlen (Fahrstuhl)

Dahlander-Schaltung sind die Stränge der Ständerwicklung in der Mitte angezapft, dadurch können die Stränge parallel oder in Reihe geschaltet werden

→ Einfluß der Läuferausführung auf das Betriebsverhalten

- Kurzschlußläufermotoren

der Läufer kann eine gewöhnliche, kurzgeschlossene Drehstromentwicklung tragen, die allgemein im Stern angeordnet ist, besonders einfach und widerstandsfähig ist der Käfigläufer



eine besondere Rolle spielt die auftretende Stromverdrängung mit abnehmender Drehzahl, d.h. grösser werdender Frequenz des Läuferstroms, wird dieser mehr und mehr zum Luftspalt hin verdrängt

- Schleifringläufermotor

Nachteil: kleines Anlaufmoment bei hoher Stromaufnahme, wird hier halbwegs beseitigt, der Widerstand wird so eingestellt, dass der Anlassstrom etwa 180 % des Nennstromes nicht übersteigt

mit zunehmendem Widerstand im Läuferkreis wird die Kennlinie bedeutend weicher der Anlasswiderstand des Schleifringläufermotors verschiebt das Kippmoment nach niederen Drehzahlen hin und vergrößert das Anlaufmoment

Anschluss von Kurzschlussläufern

- Ständeranlasser

in die drei Phasen der Ständerzuleitung wird ein aus drei ohmschen Widerständen bestehender Anlasser gelegt und stufenweise ausgeschaltet. Ist der Anlasser nicht für Stellzwecke im Dauerbetrieb vorgesehen, so ist nach dem Hochlaufen die Kurzschluss- und Bürstenabhebevorrichtung zu bestätigen und in die Nullstellung zurückzuführen

- Anlasstransformator

sekundärseitig abgestufter Stelltransformator, kann die Ständerspannung gesenkt werden

→ Stern – Dreieckschaltung von Asynchronmaschinen

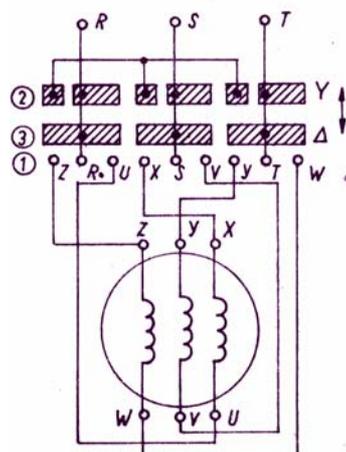


Bild.5.45. Stern-Dreieck-Umschaltung

sind die drei Stränge anfangs im Stern geschaltet so ist  $U_{Str} = U_L/\sqrt{3}$  des Motors

nach dem Hochlaufen erfolgt Umschaltung zum Dreieck mittels besonderen Schalter, womit die höhere Spannung  $U_{str} = U_L$  in der Ständerwicklung vorhanden ist. Die Umschaltung muß sehr rasch erfolgen. Vor dem Umschalten haben Strom und Drehmoment unabhängig vom Schlupf nur 1/3 ihres vollen Wertes bei Dreieckschaltung.

→ Meßschaltungen für Spannungen, Ströme und Leistungen im Drehstromnetz

→ Bewegungsgleichung eines Antriebssystems

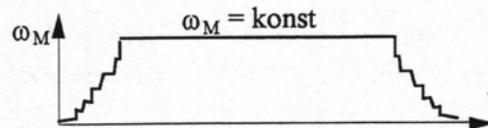
$$\sum M_i = 0 \quad M_M - M_W = J d\omega_M / dt \quad \sum F_i = 0 \quad F_M - F_A = m dv_A / dt$$

$M_W$  = Widerstandsmoment (auf die Motorwelle umgerechnetes Moment der Antriebsstrecke  $M_A$ )

### Bewegungsarten

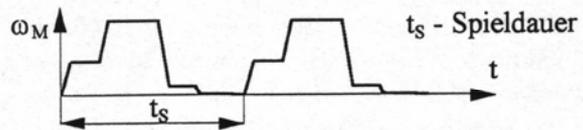
#### Gleichförmige Bewegung:

Anlauf und Stillsetzen unwichtig



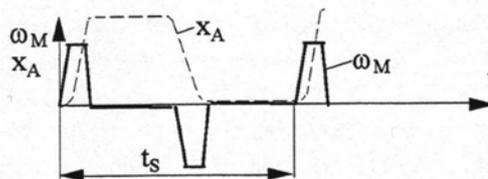
#### Ungleichförmige Bewegung:

periodisches Drehzahlprogramm

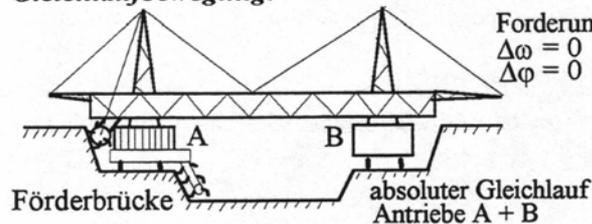


#### Positionierbewegung:

Ruck ( $d^2\omega_M/dt^2$ ) begrenzen  
Beide Drehrichtungen erforderlich

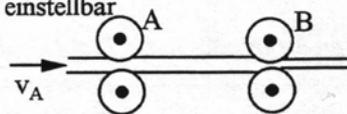


#### Gleichlaufbewegung:



Forderung:  
 $\Delta\omega = 0$   
 $\Delta\phi = 0!$

$\Delta\omega \approx 0$  einstellbar  
 $\Delta\phi \neq 0$



Konti-Walzwerk

relativer Gleichlauf

→ Prinzip des Umrichters mit Gleichspannungs-Zwischenkreis

→ Eigenschaften von Regelantrieben

## Kontrollfragen

Frage 1) Dem Typenschild einer Drehstrom-Asynchronmaschine (DAM) kann die Bemessungsdrehzahl  $N_b$  entnommen werden. Wie können Sie daraus die Drehzahl des Drehfeldes ermitteln?

$N_D$  = Drehzahl des Drehfeldes

$p$  = Polpaarzahl

$f_N$  = Netzfrequenz

$$N_D \geq N_b$$

$$N_D = f_N / p$$

$$p \leq f_N / N_b$$

$p$	$N_D$
1	$3000 \text{ min}^{-1}$
2	$1500 \text{ min}^{-1}$
3	$1000 \text{ min}^{-1}$
4	$750 \text{ min}^{-1}$

Frage 2) Stellen Sie Gleichungen zusammen, mit denen Sie aus den Angaben des Typenschildes ( $P_b$ ,  $U_b$ ,  $I_p$ ,  $N_b$ ,  $\cos\varphi_b$ ,  $\eta_b$ ) folgende Größen berechnen können:

Bemessungsdrehmoment:  $P_b = M_b \cdot 2 \cdot \pi \cdot N_b$        $M_b = \frac{P_b}{2 \cdot \pi \cdot N_b}$

aufgenommene elektrische Leistung:  $P_{el} = P_b / \eta_b$

aufgenommene Scheinleistung:  $S = U_b \cdot I_b = \frac{P_{el}}{\cos\varphi_b}$

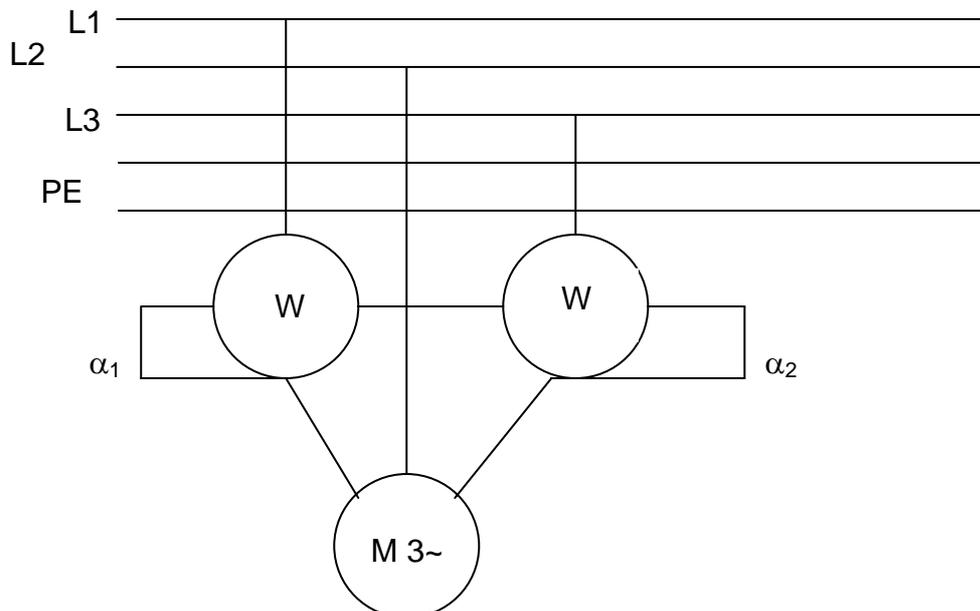
aufgenommene Blindleistung:  $Q = \sqrt{S^2 - P_{el}^2}$

Frage 3) Mit welcher Methode kann zweckmäßigerweise die aufgenommene elektrische Leistung einer DAM gemessen werden.

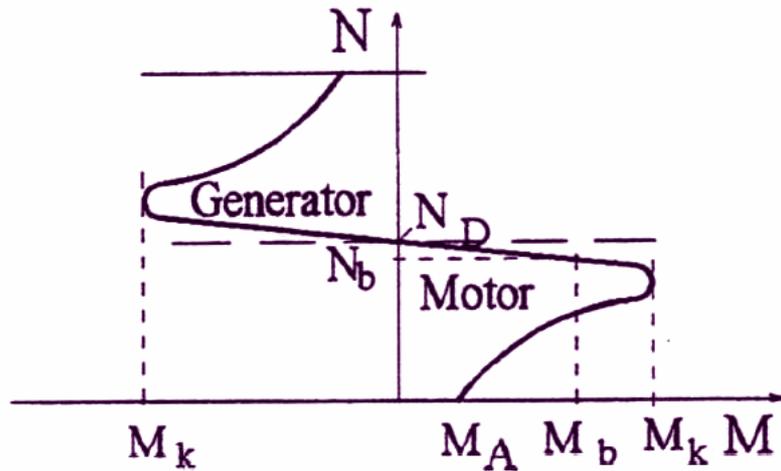
Zweiwattmetermethode:

DAM ist ein symmetrischer Verbraucher, sie benötigt keinen N-Leiter-Anschluß

$$P = \alpha_1 + \alpha_2$$

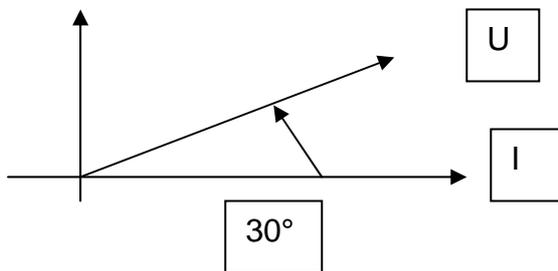


Frage 4) Zeichnen Sie das Drehzahl-Drehmoment-Kennlinienfeld einer DAM in allen 4 Quadranten und teilen Sie die N-Achse auch im Maßstab des Schlupfes.



- $M_A$  = Anzugsmoment
- $M_b$  = Bemessungsmoment
- $N_D$  = Synchrondrehzahl
- $N_b$  = Bemessungsdrehzahl

Frage 5) Skizzieren Sie das qualitative Zeigerbild einer DAM (Spannung, Strom) für den Bemessungspunkt  $\cos\varphi_b = 0,866$ .  
 Warum kann die DAM nicht ohne weiteres als ein passiver Verbraucher aus R und L aufgefaßt werden?  
 Wovon hängt die Phasenverschiebung der Asynchronmaschine ab?

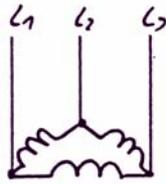


Bei einer DAM wird entweder elektrische in mechanische Energie umgewandelt oder umgekehrt. Damit ist die DAM kein passiver Verbraucher, sondern ein aktiver. Während des Betriebes ändert sich der Leistungsfaktor  $\cos\varphi$ . Die DAM könnte für bestimmte Betriebszustände als passiver Verbraucher aufgefasst werden. Die Phasenverschiebung  $\varphi$  ist vom Drehmoment  $M$  und der zugehörigen Spannung abhängig.

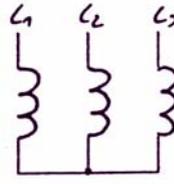
Frage 6) Welche Auswirkung hat der Anschluss einer DAM in Stern- und Dreieckschaltung für die Auswahl ihrer Bemessungsspannung?

$$U_* = \frac{U_{\Delta}}{\sqrt{3}} \quad I_* = I_{\Delta} \cdot \sqrt{3}$$

$$P = U_L \cdot I_L \cdot \cos \phi \cdot \sqrt{3}$$

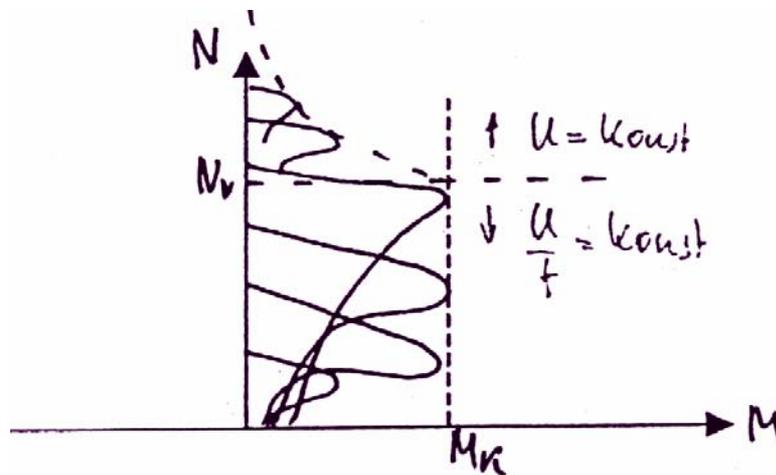


Dreieckschaltung



Sternschaltung

Frage 7) Skizzieren Sie die Auswirkung der Spannungs- und Frequenzsteuerung auf die N-M\_Kennlinien einer DAM, wenn unterhalb von 50 Hz mit  $U/f = \text{konst.}$  und oberhalb von 50 Hz mit  $U = \text{konst.}$  gesteuert wird.

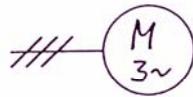


Spannungs- und Frequenzsteuerung

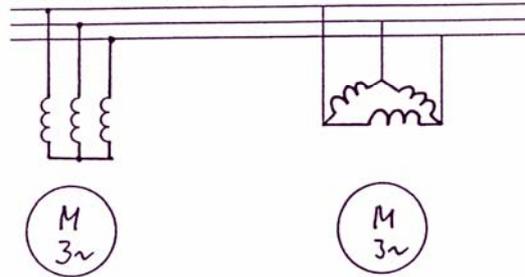
$M_k = k \cdot (U/f)^2$  über  $f_n = 50 \text{ Hz}$  gilt  $U = \text{konst.}$  unter  $f_n = 50 \text{ Hz}$  gilt  $U/f = \text{konst.}$   
Bei besonders kleinen Drehzahlen kann das Moment wegen der Einflüsse der Leiterwiderstände nicht mehr erreicht werden.

Frage 8) Zeichnen Sie ausführlichen und vereinfachten Schaltbilder von DAM

Vereinfachtes Schaltbild:



Ausführliches Schaltbild:



Frage 9) In welchen Antrieben werden vorteilhaft polumschaltbare DAM eingesetzt?

(polumschaltbare Motoren – Änderung der Polzahl des Feldes durch Wicklungsänderung)

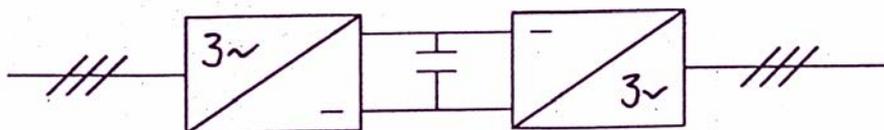
Anwendungen: Kranantriebe  
Hubwerkantriebe  
Gebläse  
Zentrifugen  
Textilmaschinen

Ursache: Forderung eines langsamen Vorlaufes oder schnelleren Rücklaufes bei hohem Anlaufmoment

Vorteile: verlustlose N- Stellung  
Nebenschlußverhalten bleibt erhalten  
Wirkungsgrad hoch

Nachteile: nur bei Kurzschlussläufern anwendbar  
N nur stufig einstellbar  
teuer  
maximal 4 Stufen

Frage 10) Zeichnen Sie ein vereinfachtes Schaltbild für den Drehstrom-Frequenzumrichter mit Gleichspannungs-Zwischenkreis, wie er im Versuch eingesetzt wird.



## Aufgabe 1) **Erwärmungsverhalten**

Meßwerttabelle

t in s	$\theta$ in °C
0	
10	
20	
30	
40	
50	
60	
70	
80	
90	
100	
110	
120	
140	
160	
180	
200	
220	
240	
260	
280	
300	
330	
360	
390	
420	
450	
480	
510	
540	
600	
660	
720	
780	
840	
900	
1020	
1140	
1260	
1380	
1500	
1620	
1800	
2400	





## Eingangstest vom 25.06.99

Frage 1) In welchem Frequenzbereich wird die U/f= konstant Schaltung angewendet?

- unterhalb von 50 Hz

Frage 2) Welche Möglichkeiten gibt es zur Erhöhung des Anzugmomentes?

Frage 3) Welche Auswirkungen hat Spannungsverringern auf Kenngrößen?

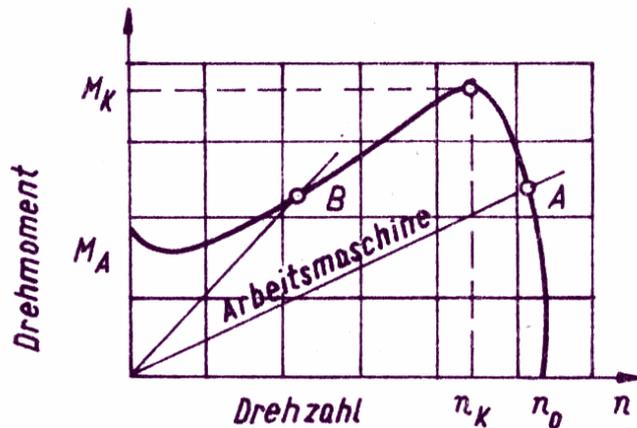


Bild 5.36. Drehmomentkennlinie

- je weniger Spannung, umso weniger Drehmoment

Frage 4) gegeben: U 6,5 V  
I 400 A  
cos 0,85  
p 2  
S 0,0026  
P 3 kW

gesucht: Drehzahl  
Moment  
Aufgenommene Leistung  
Wirkungsgrad

Lösung: