

## Gleichstrommaschine (GM):

### Aufbau:

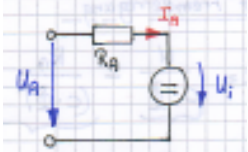
- Ständer (Stator): Magnetfelderzeugung (Fluß  $\Phi$  über Magnetisierungsstrom  $I_A$ )
- Läufer (Rotor, Anker): Drahtwicklung in Nuten zur Erzeugung des Drehmoments
- Kommutator (Kollektor, Stromwender): mechanische Gleichrichtung bzw. Stromwendung. **Generatorbetrieb** -> In den Drähten des Läufers fließt ein nahezu rechteckförmiger Wechselstrom, nach dem Kommutator fließt Gleichstrom in die Zuleitung.

### Leistungsbilanz:

$$P_V = I_A^2 \cdot R_A$$

$$P_{mech} = M \cdot \Omega \quad \text{mit} \quad \Omega = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60}$$

$$P_{elektr} = P_V + P_{mech} = I_A^2 \cdot R_A + M \cdot \Omega$$



$U_i$ : induzierte Läufer Spannung

### Wirkungsweise, Grundgleichungen:

$$U_A = U_i + I_A \cdot R_A \quad (\text{Spannungsgleichung Ankerkreis})$$

$$U_i = (c \cdot \Phi) \cdot \Omega \quad (c: \text{Maschinenkonstante})$$

$$[(c \cdot \Phi)] = V_s \quad (\text{Flußkonstante})$$

$$M = (c \cdot \Phi) \cdot I \quad (\text{Drehmomentgleichung})$$

$\Rightarrow M \sim I \Rightarrow M \sim M_L \Rightarrow$  die GM liefert auf elektrischem Wege das Moment, das von ihr verlangt wird.

Ist es sinnvoll  $I_E$  über den Nennwert zu erhöhen?

Nein, da Eisen in Sättigung und  $I_f$  damit kaum ansteigt (Fluß  $\Phi$  nimmt kaum mehr zu!!!)

**Feldschwächung  $\Rightarrow$  Drehzahl steigt über  $n_N$**

### Schaltungen von Gleichstrommaschinen:

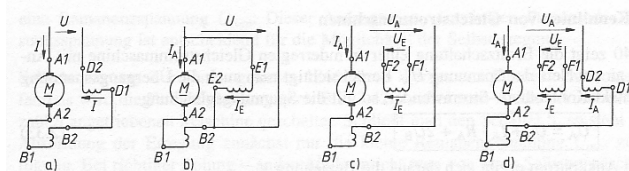


Bild 2.39 Schaltbilder von Gleichstrommotoren (Rechtslauf)

- Reihenschlussmotor
- Nebenschlussmotor
- Fremderregter Motor
- Doppelschlussmotor

Wie bringt man eine GNM in

Generatorbetrieb?

$\Phi$  erhöhen ->  $U_i > U$

Pendelmaschine?

Drehbar gelagerte GM zur Messung von M

### Kennlinien und Betrieb der GNM mit Fremderregung:

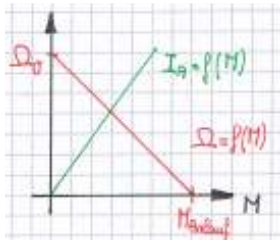
$$I = \frac{M}{c \cdot \Phi} ; \quad \Omega = \Omega_0 - \Delta\Omega = \frac{U}{c \cdot \Phi} - \frac{R_A}{(c \cdot \Phi)^2} \cdot M$$

$$\Omega_0 = \frac{U}{c \cdot \Phi} ; \quad \Delta\Omega = \frac{R_A}{(c \cdot \Phi)^2} \cdot M$$

Leerlauf:  $M=0 \rightarrow I=0 \rightarrow U_i=0$

Anlaufvorgang:  $\Omega=0 \rightarrow U_i=0 \rightarrow I_{Anlauf} = U/R_A$   
 $\rightarrow M_{Anlauf} = I_{Anlauf} \cdot (c \cdot \Phi)$

$$\frac{\Omega}{\Omega_0} = \frac{U}{U_0} \quad \text{für} \quad \Omega = f(M)$$



- **Anlassen:**
  - Erregernennstrom einschalten (Amperemeter) sonst geht GM durch, da nur ein geringes Restremanenzfeld vorhanden ist
  - Kleine Anlassspannung anlegen und diese langsam steigern bis  $U_N$  (z.B.: über Anlasswiderstände in Reihe zum Anker)
  - **Im Betrieb  $U_N, I_N$  und  $n_{max}$  nicht überschreiten !!!**
- **Ausschalten:**
  - Zuerst Läufer Spannung abschalten, Stillstand abwarten, dann erst Erregerfeld abschalten.

### Drehzahlstellmöglichkeiten:

$$\Omega = \frac{U_A}{c \cdot \Phi} - \frac{R_A}{(c \cdot \Phi)^2} \cdot M$$

$U_A$  variiert von  $0 \dots U_N$

$\Phi$  über  $I_f$  mit  $I \leq I_{fN} \Leftrightarrow n \leq n_{max}$

Vorwiderstand  $R_V$  in Reihe zu  $R_A$

Ankerstrom  $\Rightarrow$  Verschiebung der NZ

$\Rightarrow$  Bürstenfeuer

Abhilfe: **Wendepole** zwischen den Hauptpolen (Aufhebung des Ankerquerfeldes), in Reihe zum Anker

Flussschwächung bei Last  $\Rightarrow$  Abhilfe:

**Kompensationswicklungen** in den Polschuhen verhindern eine Feldverzerrung im Bereich der Hauptpole (in Reihe zum Anker)

### Dynamisches Verhalten der Gleichstrommaschine (GM):

Läufer:  $u_{Klemmen} = u_i + i_A \cdot R + L_A \cdot \frac{di_A}{dt}$

Ständer:  $u_E = i_E \cdot R_E + L_E \cdot \frac{di_E}{dt}$

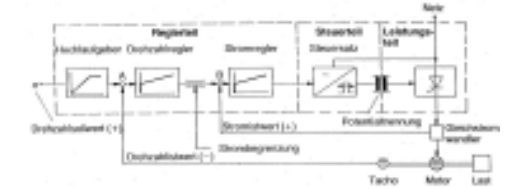
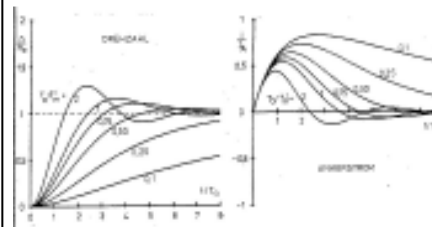
$$T_a \cdot T_m' \cdot \frac{d^2}{dt^2} \left( \frac{\Omega}{\Omega_0} \right) + T_m' \cdot \frac{d}{dt} \left( \frac{\Omega}{\Omega_0} \right) + \left( \frac{\Omega}{\Omega_0} \right) = \frac{u}{u_N} - \frac{M_{gegen}}{M_A}$$

mit  $T_a = \frac{L}{R}$  und  $T_m' = \frac{\Omega_0 \cdot J}{M_A}$

$T_a$  = elektrische Zeitkonstante  $T_m'$  = mechanische Zeitkonstante

Bei einer konkreten Maschine gilt:  $L=1$  und  $T_m=konst.=1$

### Übergangsvorgänge / Schnellhochlauf einer GNM (zeitliche Verläufe):



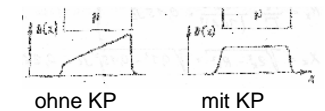
### Ermittlung der Ankerinduktivität einer sich drehenden GM:

Spannungssprung -> I mit Oszilloskop aufnehmen (steigt mit e-Funktion an) -> R messen, T mit Tangente ablesen, Induktivität mit Gleichung  $T=L/R$  bestimmen

### Prinzip des elektronischen Kommutators:

Läufer mit Permanentmagneten, Ständer elektronisch kommutiert (Blockkommutierung mit Transistoren), Lageerkennung des Läufers (Hallsonde, Resolver)

Verlauf des Luftspaltfeldes unter dem Hauptpol einer mit  $M_N$  betriebenen GM ohne und mit Kompensationswicklung:



# Synchronmaschine:

## Einsatzgebiete:

- Generator (**Mehr antreibendes M => Mehr Wirkleistung !!!**)
- Phasenschieber (Übererregung (Kondensator)  $I_E > I_{E0}$ ; Untererregung (Spule)  $I_E < I_{E0}$ )

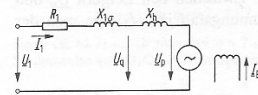
## Aufbau:

- Ständer mit Drehstromwicklung
- Läufer (Polrad) als Dauer- oder Elektromagnet mit Erregerwicklung ( $I_E$ )

## Wirkungsweise:

- a) Ständer am Drehstromnetz => Drehfeld

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p}; \quad n_s = \frac{f}{p}$$



Ersatzschaltbild der Vollpolmaschine

- b) Läufer mit Gleichstromspeisung rotiert mit  $\Omega_{mech}$

$$SM: \Omega_{mech} = \Omega_s$$

- Maximales Drehmoment ( $M_K$ : Kippmoment) bei Polradwinkel  $\beta=90^\circ$ . Für  $M > M_K \Rightarrow$  SM außer Tritt
- Die Polradspannung entspricht der Spannung, die auf dem Wege der Gegeninduktion vom Polrad (Läufer) in den Ständer gelangt

## Synchronisationsbedingungen am starren Netz:

- **Spannungsgleichheit** zwischen Polradspannung und Netzspannung  
Messung mit **Voltmeter**. Anpassung durch **Änderung des Erregerstromes**.
- **Frequenzgleichheit**. Messung der **Drehzahl** bzw. Verwendung eines **Zungenfrequenzmessers**. Anpassung durch **Drehzahländerung**.
- **Gleiche Phasenfolge**. Überprüfung durch **Drehrichtungsanzeiger**. Anpassung durch den **Tausch zweier Phasen**.
- **Gleiche Phasenlage**. Überprüfung mit einem **Zweistrahloszilloskop** oder **Dunkelschaltung**. Anpassung durch **kurzzeitige Drehzahländerung**.

## Betriebsverhalten, Kennlinien für den Netzbetrieb:

- Wird eine SM auf das Verbundnetz geschaltet, so sind Klemmenspannung und Frequenz fest vorgegeben.

**Xd kann durch KS- und LL-Versuch bestimmt werden.**

$$U_1 = U_p + \underline{I} \cdot (R_1 + j \cdot (X_d + X_{1d})) \quad \text{mit} \quad U_p = \omega \cdot M \cdot \frac{I_p}{\sqrt{2}} \quad \text{mit} \quad M: \text{Gegeninduktivität}$$



Vereinfachtes Ersatzschaltbild

$$M \sim I_K \cdot \sin \beta; \quad I_K = \frac{U}{X_d} \Rightarrow \text{Kippmoment durch Erregerstrom beeinflussbar}$$

# Magnetischer Kreis – Transformator:

$$\Theta = i_1 N_1 + i_2 \cdot N_2 = 0$$

$$\dot{u} = \frac{N_1}{N_2} \cdot \frac{U_1}{U_2}; \quad \dot{i} = \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{I_1}{I_2}$$

**Leerlauf:**  $P_{Cu} \sim I^2 \ll P_{Fe} \rightarrow P_{Fe} \text{ und } X_h$

$$R_{Fe} = \frac{U^2}{P_0}; \quad P_{blind0} = \sqrt{(U \cdot I_0)^2 - P_0^2} \rightarrow X_h = \frac{U^2}{P_{blind0}}$$

**Kurzschluss:**  $P_{Fe} = U_1^2 \cdot R_{Fe} \ll P_{Cu} \rightarrow P_{Cu} \sim U^2 \sim B^2 \sim \Phi^2 \rightarrow P_{Cu} \text{ und } X_d$

$$R_K = \frac{P_K}{I_{1K}^2} = R_1 + R_2; \quad P_{blindK} = \sqrt{(U \cdot I_{1K})^2 - P_K^2} \rightarrow X_K = \frac{P_{blindK}}{I_{1K}^2} = X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}$$

$$Z_K = \frac{U_K}{I_{1K}} \rightarrow Z_K = \sqrt{R_K^2 + X_K^2}$$

## relative Kurzschlußnennspannung

$$u_K = \frac{U_{KN}}{U_N}; \quad U_K = \sqrt{U_{XK}^2 + U_{RK}^2}$$

Bild 3.19 Vollständige Ersatzschaltung eines Transformators

$$U'_2 = \dot{u} \cdot U_2$$

$$I'_2 = \frac{1}{\dot{u}} \cdot I_2$$

$$R'_2 = \dot{u}^2 \cdot R_2$$

$$X'_{2\sigma} = \dot{u}^2 \cdot X'_{2\sigma}$$

( $\dot{u} = 1$ )

Bild 3.25 Vereinfachte Ersatzschaltung

$$R_K = R_1 + R_2'; \quad X_K = X_{\delta 1} + X_{\delta 2}'$$

**Kupferverluste:**  $P_{Cu1/Cu2} = I_{1/2}^2 \cdot \frac{l_{1/2}}{\kappa_{1/2} \cdot A_{1/2}}$

**Eisenverluste:**  $P_{Fe} = m_{Fe} \cdot P_{10} \cdot \left( \frac{\hat{B}}{1 \frac{Vs}{m^2}} \right)^2$  mit der Verlustziffer  $P_{10}$  in  $\left[ \frac{W}{kg} \right]$

**Wirkungsgrad:**  $\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - P_{Fe} - P_{Cu}}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{Cu} + P_{Fe}}$  NUR Wirkleistungen !!!  $\eta_{max}$  bei  $P_{Fe} = P_{Cu}$  und  $\cos \varphi = 1$

## Parallelschalten: (gilt für Trafos deren Nennleistungen sich nicht mehr um 1:3 unterscheiden)

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{u_{K2} \cdot S_{1N}}{u_{K1} \cdot S_{2N}} \quad \text{wenn} \quad u_{K1} = u_{K2} \quad \text{dann} \quad \frac{S_1}{S_2} = \frac{S_{1N}}{S_{2N}}$$

## Spannungsänderung bei Belastung



## Parallelschalten von Transformatoren:

- Bei unbelastetem sekundären Netz müssen die Sekundärwicklungen stromlos sein -> Trafos verschaltet, dass die Hauptfeldspannungen die gleiche Phasenlage haben und die Übersetzungsverhältnisse gleich sind.
- Eine Belastung des sekundären Netzes soll sich im Verhältnis der Nennleistungen aufteilen (Formeln s. S. 3)

## 3 Einphasentrafos werden zu einem 3-Trafo verschaltet. Am Netz ist dann der Leerlaufstrom viel zu hoch. Fehler?

Sättigung, da Trafo in Dreieck anstatt in Stern geschaltet (U um 1,73 zu hoch) -> Sättigung => I steigt sehr stark an **Einfluß der Streufelder?**

Begrenzung des KS-Stromes ( $X_K$ ), Spannungsschwankungen bei Belastung

## Messtechnische Bestimmung der Haupt-induktivität eines Trafos?

Amperemeter, Wattmeter, Voltmeter an Primärseite, Sekundärseite unbelastet

## Ursache der magn. Erscheinung ist die Durchflutung. Zusammenhang zwischen Magnetfeld und Durchflutung über Durchflutungsgesetz.

**Luftspalt:** Die magn. Spannung im Eisen kann gegenüber der magn. Spannung im Luftspalt vernachlässigt werden !!!

$$\Theta = H_{Fe} \cdot l_{Fe} + H_{Luft} \cdot l_{Luft} \rightarrow 0$$

## Gleichstromspeisung: Der Strom I, d.h. der Magnetisierungsstrom bestimmt den magn. Fluß !!!

$$\text{Luftspalt einbringen bei } I = \text{konst.} \Rightarrow \Theta = \text{konst.} \rightarrow V_{Ges} = \text{konst.}$$

$$\rightarrow H_{Fe} < H_{Luft} \rightarrow B_{Fe} \downarrow \rightarrow \Phi \downarrow \rightarrow L \downarrow$$

## Wechselstromspeisung: Der magn. Fluß wird allein durch die Spannung U und nicht durch den Magnetisierungsstrom bestimmt !!! **U-Φ**

$$\text{Luftspalt einbringen bei Trafo LL} \Rightarrow U \sim \Phi = \text{konst.} \rightarrow B = \text{konst.}$$

$$\rightarrow H_{Fe} < H_{Luft} \rightarrow \Theta \uparrow \rightarrow V_{Ges} \uparrow \rightarrow I_{\mu} \uparrow \rightarrow P_{Fe} = \text{konst.}$$

## Blindleistung:

**Kondensator -> Abgabe von induktiver Blindleistung**

**Spule -> Aufnahme von induktiver Blindleistung**

## Sättigung:

In der Sättigung steigt der Strom bei einer kleinen Änderung von U stark an, da B nahezu konstant ist.

# Magnetischer Kreis – Spule:

Magnetischer Fluß:  $\Phi = B \cdot A$ ;  $[\Phi] = \frac{Vs}{m^2} \cdot m^2 = T \cdot m^2 = Vs = Wb$

Magnetische Flußdichte:  $B = \mu \cdot H = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$

Durchflutung:  $\Theta = \int_S \vec{s} \cdot d\vec{A} = I \cdot N$

Durchflutungsgesetz:  $\Theta = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_{i=1}^n V_i$

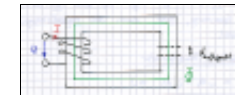
Magnetische Spannung:  $V_i = H_i \cdot l_i$ ;  $[H] = \frac{A}{m}$ ;  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$

Induktivität:  $L = N \cdot \frac{d\Phi}{di} = N \cdot \frac{\Phi}{I}$ ;  $X_L = \omega \cdot L$ ;  $[L] = \frac{Vs}{A} = H$

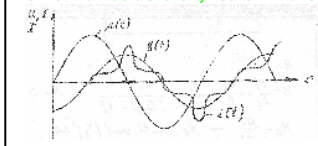
Induktionsgesetz:  $\hat{U} = N \cdot \omega \cdot \hat{\Phi} \Rightarrow U \sim \Phi$

Phasenlage:  $\varphi_u = \varphi_i - \frac{\pi}{2}$

$A_{kreis} = r^2 \cdot \pi$ ;  $U_{kreis} = 2 \cdot \pi \cdot r$



## Zeitlicher Verlauf von Spannung, Strom und magn. Flußdichte bei einem unbelasteten, realen Trafo



# Asynchronmaschine:

## Wirkungsweise, Grundgleichungen:

- **Läufer nicht magnetisch, nicht von außen gespeist**
- Läuferstrom zur Drehmomenterzeugung muss auf dem Wege der Induktion über den Luftspalt  $\delta$  übertragen werden (Induktionsmotor) => wie beim Trafo 2 galvanisch von einander getrennte Wicklungen, eine davon kurzgeschlossen, magnetisch gekoppelt
- AM liegt mit dem Ständer am Drehstromnetz => Ständerströme => Drehfeld =>

### Synchrondrehzahl

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p} \text{ synchron}$$

- Der Läufer rotiert mit der **mech. Drehzahl**

$$\Omega_{mech} \neq \Omega_s \text{ asynchron}$$

- **Drehzahldifferenz**  $\Delta\Omega = \Omega_s - \Omega$

- Läuferwicklung von Wechselfluss durchsetzt ->  $U_1$  wird induziert -> Läuferwicklung kurzgeschlossen -> Läuferstrom -> Drehmoment

### Schlupf

$$\text{Frequenz der Läufergrößen } U_2, I_2 \quad f_2 = s \cdot f_1$$

$$s = \frac{\Delta\Omega}{\Omega_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} = 1 - \frac{\Omega}{\Omega_s} \leq 1 \Rightarrow \Omega = (1-s) \cdot \Omega_s$$

$$\Rightarrow \text{Stillstand: } s = 1$$

$$\Rightarrow \text{Leerlauf: } s = 0$$

**Das Läuferdrehfeld läuft unabhängig von der mechanischen Drehzahl ebenso wie das Ständerdrehfeld synchron um !!!**

p	n
1	3000
2	1500
3	1000
4	750
5	600

## Ersatzschaltbild:

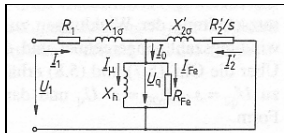


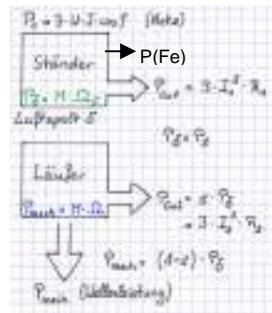
Bild 5.14 Vollständiges Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine

$$U_1 = R_1 \cdot I_1 + j \cdot X_1 \cdot I_1 + j \cdot X_{12} \cdot I_2$$

$$0 = \frac{R_2}{s} \cdot I_2 + j \cdot X_2 \cdot I_2 + j \cdot X_{21} \cdot I_1$$

$$M = M_L = \frac{P_{mech}}{\Omega}$$

## Leistungsbilanz – Sankey-Diagramm:



$$P_1 = P_{el} = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi$$

$$P_{Cu1} = 3 \cdot I_1^2 \cdot R_1$$

$$P_\delta = P_s = M \cdot \Omega_s$$

$$P_{Cu2} = 3 \cdot I_2^2 \cdot R_2 = s \cdot P_\delta$$

$$P_{mech} = M \cdot \Omega = (1-s) \cdot P_\delta$$

**AM bremsen?** Generatorbetrieb (Nutzbremsung), Gegenlauf  
**AM als Generator?** P(mech.) zuführen, Netz muss Q liefern

## Betriebsverhalten, Kennlinien => Kloss'sche Formel:

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

Stillstand  $d \rightarrow s = 1 \Rightarrow M_A$  (Anlaufmoment)

$$\frac{M_A}{M_K} = \frac{2}{s_K + 1} \approx 2 \cdot s_K$$

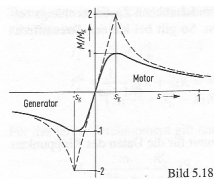


Bild 5.18

Verlauf des Drehmomentes nach der Kloss'schen Formel

## Drehzahlstellmöglichkeiten:

- **Polpaarzahl p verändern**
  - ⇒ AM mit 2 (evtl. 3) verschiedenen Polpaarzahlen die umgeschaltet werden können (z.B.: Dahlanderschaltung)
  - ⇒ Nachteile: stufig, Kompromissauslegung, teurer Schalter, nur für Käfigläufer

## Frequenzumrichter

$$U = N \cdot \Phi \cdot \omega = N \cdot \Phi \cdot 2 \cdot \pi \cdot f$$

wenn  $\Phi = konst. \Rightarrow \frac{U}{f} = konst. ; n = \frac{f_1}{p} \cdot (1-s)$

## Schlupf verändern

⇒ Vorwiderstände im Läuferkreis (nur SL) vergrößern den Schlupf und verkleinern damit die Betriebsdrehzahl

⇒ Vorteil:  $M_A, I_A$  steigen

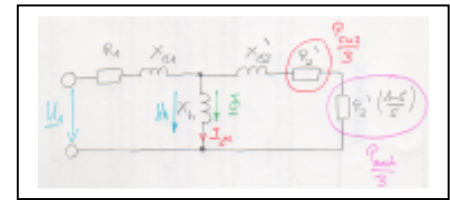
⇒ Nachteil: SL, Wirkungsgrad sinkt

## U<sub>1</sub> verringern

⇒ **ACHTUNG !!!**  $M_K \sim U_1^2$

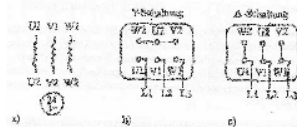
⇒ **=> nur für kleine AM**

$$\text{z.B.: } U_1 = \frac{2}{3} \cdot U_N \Rightarrow M_K = \left(\frac{2}{3}\right)^2 \cdot M_{KN} = 0,45 \cdot M_{KN}$$



Motor-typen-schild	Strangspannung	Brücke bei verschiedenen Netzen		
		230/133V	400/230V	690/400V
400V Δ	400V	—	Δ	Y
Δ/Y 133/230V	133V	Y	—	—
Y 690V	400V	—	Δ	Y
Y 400V	230V	—	Y	—
Δ 230V	230V	Δ	Y	—
400/690V Δ/Y	400V	—	Δ	Y
690V Δ	690V	—	—	Δ
230V Y	133V	Y	—	—
Δ 133V	133V	Y	—	—
230/400V	230V	Δ	Y	—
133V Y	76,8V	—	—	—
400/690V	400V	—	Δ	Y

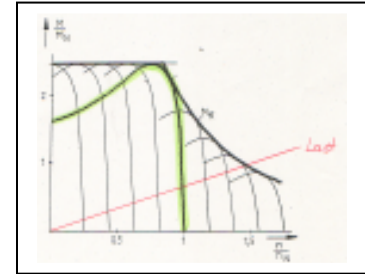
## Stern- / Dreieckschaltung:



AM als Generator:

- Netz muss Blindleistung liefern
  - Zuführung mech. Leistung an die Welle
- Der **Leerlaufstrom** der AM ist größer als der eines vgl. Trafos, da die AM einen Luftspalt im Eisenkreis hat.

**Anlaufstrom begrenzen?** KUSA-Schaltung, Vorwiderstände im Läuferkreis (nur SL), Anlasstrafo, Stern Dreieck Anlauf



## Asynchronmaschine am Frequenzumrichter:

**Grundprinzip:**  $n = f / p (1-s)$

Speisefrequenz prinzipiell frei wählbar, **AM während des Hochlaufes nur mit kleinem Schlupf da variable Frequenz** (Netz: Großer Schlupf, da im Stillstand  $s=1$ )

## Anlaufstrom, Anlaufmoment:

$$I_A = \frac{U}{Z_A} ; M \sim P_{Cu2}$$

**Umrichter (einstellbar) begrenzt den Anlaufstrom** (Netz: Wird durch die Spannung und die Wirk- und Blindwiderstände bei  $s=1$  (Stillstand) bestimmt, eine künstliche Erhöhung der Läuferstreuung reduziert den Anlaufstrom), Motor kann durch **Frequenzsteuerung mit Kippmoment anlaufen**

## Speisespannung, Kippmoment:

**Variable Speisespannung (Maximalwert hängt vom Gleichrichter ab), ist U/f nicht mehr einzuhalten wird in den Feldschwächebereich übergegangen  $M_K \sim U^2$ , keine zusätzliche Erhöhung der Streuung notwendig** (Netz: Kippmoment wird bei konst. Spannung i.w. von der Streuung bestimmt -> Streuung evtl. künstlich vergrößern => Anlaufstrom sinkt =>  $M_K$  sinkt)

- **Keine spezielle Konstruktion notwendig, allerdings Leistung um 20% reduzieren.**
- **Die Stromverdrängung (Spezielle Nutformen für besseres Anlaufmoment) wird nicht ausgenutzt.**
- **Erhöhte Kupfer- und Eisenverluste (Oberschwingungen! / Eisenverluste wachsen mit der Frequenz an!).**
- **Erhöhte Geräuschkentwicklung.**
- **Fremdbelüftung kann notwendig werden.**

## Drehstrom:

### Sternschaltung:

$$\text{Leiterstrom} = \text{Strangstrom} \Rightarrow \sum_{i=1}^3 I_i = 0$$

$$\text{Leiterspannung} = \text{Strangspannung} \cdot \sqrt{3} \Rightarrow U_L = U_{Str} \cdot \sqrt{3}$$

### Leistung des Drehstromes:

$$P = 3 \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad \text{mit } U, I \text{ Stranggrößen}$$

$$P = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi \quad \text{mit } U_L, I_L \text{ Außenleitergrößen}$$

### Dreieckschaltung:

$$\text{Leiterspannung} = \text{Strangspannung} \Rightarrow U_L = U_{Str}$$

$$\text{Leiterstrom} = \text{Strangstrom} \cdot \sqrt{3} \Rightarrow I_L = I_{Str} \cdot \sqrt{3}$$

## Pumpen:

$$P_w = \frac{1}{\eta} \cdot Q \cdot p \quad \text{mit } Q = \text{Förderstrom in } \left[\frac{m^3}{s}\right] \quad p = \text{Gesamtdruck in } \left[\frac{N}{m^2}\right] \quad 1 \text{ bar} = 10^5 \frac{N}{m^2}$$

$$p = H_N \cdot \rho \cdot g + \rho \cdot \frac{v^2}{2} + \lambda \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \frac{l}{d} \quad \text{mit } H_N = H_{Saug} + H_{Druck} \quad \text{Nutzförderhöhe, } l/d = \text{Rohrabmessungen}$$

$$\rho = \text{Dichte in } \left[\frac{kg}{m^3}\right] \quad \text{für Wasser gilt } \rho_{H_2O} = 1000 \frac{kg}{m^3}, \quad \lambda = \text{Rohrwiderstandsziffer}$$

UMRECHNUNG von Druckwerten in die Förderhöhe:

$$\Delta p = \Delta H \cdot \rho \cdot g \Rightarrow \Delta H = \frac{\Delta p}{\rho \cdot g}$$

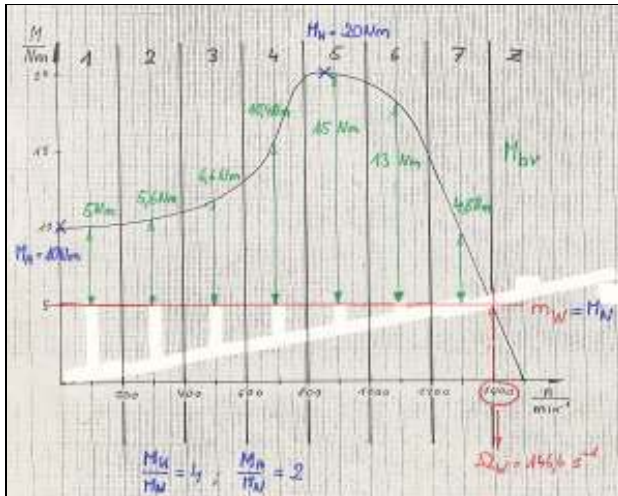
$$v = \frac{Q}{A} \quad \text{mit } v = \text{Strömungsgeschwindigkeit und } A = r^2 \cdot \pi \text{ (Rohrquerschnittsfläche)}$$

## Hochlaufzeit, Effektives Moment:

$$\Delta t_v = \frac{J \cdot \Omega_w}{Z} \cdot \frac{1}{M_{bv}} \quad \text{und} \quad t_A = \sum_v \Delta t_v$$

$$M_{eff} = \sqrt{\frac{M_{b1}^2 \cdot t_1 + M_{b2}^2 \cdot t_2 + \dots}{t_{sp}}} \quad \text{mit } t_{sp} = \text{Spielzeit (Periodendauer)}$$

$$P_{eff} = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + \dots}{t_{sp}}} \quad ; \quad t = \frac{J \cdot \omega}{M}$$



$$\Delta t_3 = \frac{0,05 kgm^2 \cdot 146,6 s^{-1}}{7} \cdot \frac{1}{6,6 Nm} = 0,16 s$$

$$t_A = t_1 + \dots + t_7$$

## Kreisdiagramm der AM:

$$\text{Leistungsmaßstab: } m_p = \sqrt{3} \cdot U \cdot m_i$$

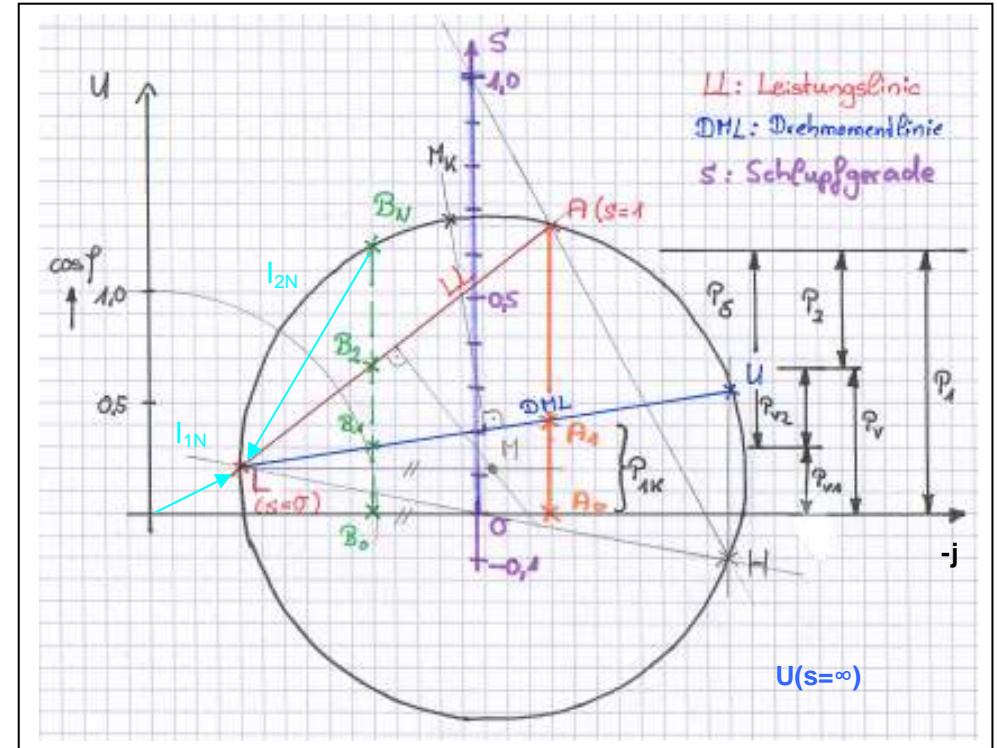
$$\text{Momentenmaßstab: } m_D = \frac{m_p}{\Omega_S}$$

$$\text{Stranggrößen (} m_i \text{): } m_p = 3 \cdot U \cdot m_i$$

$$\text{Leerlaufversuch [L(s=0)]: } I_0, P_0 (P_{Cu1}, P_{Fe}, P_{Rbg}) \text{ messen } \cos \varphi = \frac{P_0 - P_{Rbg}}{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_{10}}$$

$$\text{Kurzschlussversuch [A(s=1)]: } I_{1K}, P_{1K} \text{ messen } \cos \varphi = \frac{P_{1K}}{\sqrt{3} \cdot U_K \cdot I_{1K}}$$

$$P_{1K} = 3 \cdot I_{1K}^2 \cdot R_i \text{ (Stranggrößen!)} \quad ; \quad I_{KN} \text{ linear umrechnen } \Rightarrow I_{KN} = I_K \cdot \frac{U_N}{U_K}$$



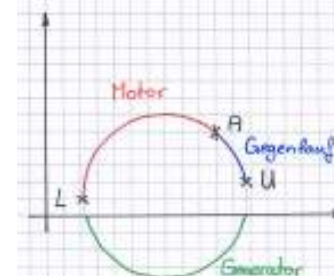
$$P_{1K} = P_{Cu1K} + P_{Fe} = 3 \cdot I_K^2 \cdot R_K \quad \text{Stillstandsständerverluste} \quad ; \quad P_S \quad \text{Luftspalteleistung} \quad ;$$

$$P_1 \quad \text{Wirkleistungsaufnahme} \quad ; \quad P_2 \quad \text{Leistungsabgabe} \quad ; \quad \eta = \frac{P_2}{P_1}$$

$$P_V \quad \text{Gesamtverlustleistung} \quad ; \quad P_{V1} = P_{Cu1} + P_{Fe} \quad \text{Ständerverluste} \quad ; \quad P_{V2} = P_{Cu2} \quad \text{Läuferverluste}$$

**Vertauschen von 2 Außenleitern im laufenden Betrieb => s=2**

## Betriebsbereiche der AM:



## Vereinfachungen:

$$L: R_1 \sim 0 \quad ; \quad X_{\sigma 1} \sim 0 \quad ; \quad I_{Fe} = \frac{U}{R_{Fe}} = I_w \quad ; \quad I_u = \frac{U}{X_k} = I_B$$

$$A: X_k \sim \infty \quad ; \quad R_{Fe} \sim \infty \quad ; \quad I_A = \frac{U}{Z_k} = \frac{U}{\sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2})^2}} \quad ; \quad \cos \varphi_A = \frac{R_k}{Z_k}$$

$$U: R_2 \sim 0 (s = \infty) \quad ; \quad I_w = \frac{U}{Z_w} = \frac{U}{\sqrt{R_1^2 + (X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2})^2}} \quad ; \quad \cos \varphi_w = \frac{R_1}{Z_w}$$

P(Fe), P(Cu) und P(Rbg.) vernachlässigbar => U liegt auf der Horizontalen zu L

$$AM: P_{ab} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_{1N} \cdot \cos \varphi \cdot \eta = P_1 \cdot \eta$$