

Gleichstrommaschine (GM):

Einsatzgebiete:

- DC-Netz vorhanden (Tram, U-Bahn)
- **Drehzahl geregelter Betrieb**

Aufbau:

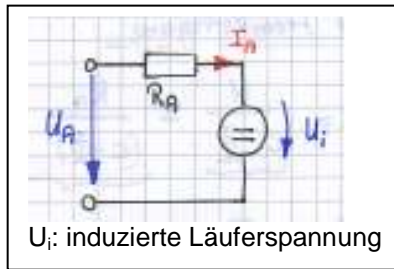
- Ständer (Stator): Magnetfelderzeugung (Fluß Φ über Magnetisierungsstrom I_f)
- Läufer (Rotor, Anker): Drahtwicklung in Nuten zur Erzeugung des Drehmoments
- Kommutator (Kollektor, Stromwender): mechanische Gleichrichtung bzw. Stromwendung. *Generatorbetrieb* -> In den Drähten des Läufers fließt ein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

Leistungsbilanz:

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

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

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



Wirkungsweise, Grundgleichungen:

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

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

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

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

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

Schaltungen von Gleichstrommaschinen:

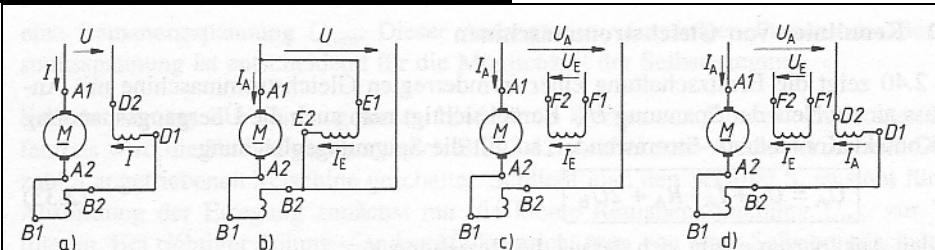


Bild 2.39 Schaltbilder von Gleichstrommotoren (Rechtslauf)

- Reihenschlussmotor
- Nebenschlussmotor
- Fremderregter Motor
- Doppelschlussmotor

Reihenschlussmaschine (Universalmotor):

Erregerwicklung in Reihe zum Anker. Reihenschlussmaschinen haben von allen GM das größte Drehmoment, die Drehzahl ist jedoch stark lastabhängig. **Reihenschlussmaschinen gehen im Leerlauf durch !!!**

Nebenschlussmaschine:

Erregerwicklung parallel zum Anker. Es gibt selbst- und fremderregte Nebenschlussmaschinen. **Nebenschlussmaschinen können bei Unterbrechung des Erregerfeldes durchgehen !!!**

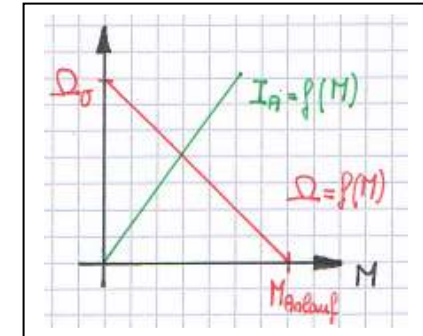
Kennlinien und Betrieb der GNM mit Fremderregung:

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

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

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)
- 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 Läuferspannung 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 variieren von $0 \dots U_N$
 Φ 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, in Reihe zum Anker
Kompensationswicklungen in den Polschuhen verhindern eine Feldverzerrung im Bereich der Hauptpole (in Reihe zum Anker)

Drehfeld:

- **Bei elektrischen Maschinen ist der magnetische Fluß Φ die bestimmende Größe**
- **Rotierende elektrische Maschinen haben einen Luftspalt δ**
- Es gibt 2 Möglichkeiten zur Erzeugung von Drehfeldern:
 - Rotierender Magnet mit **p-Polpaaren**
 - Ruhende Wicklungsanordnung mit Drehstromspeisung

Synchronmaschine:

Einsatzgebiete:

- Generator
- Phasenschieber

Aufbau:

- Ständer mit Drehstromwicklung
- Läufer (Polrad) als Dauer- oder Elektromagnet mit Erregerwicklung (I_E)
 - Schenkelpollläufer (Wasserkraftwerk)
 - Vollpolläufer (Dampfkraftwerk)

Wirkungsweise:

- a) Ständer am Drehstromnetz => Drehfeld $\Omega_s = \frac{\omega}{p} ; n_s = \frac{f}{p}$

- b) Läufer mit Gleichstromspeisung rotiert mit Ω_{mech}

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

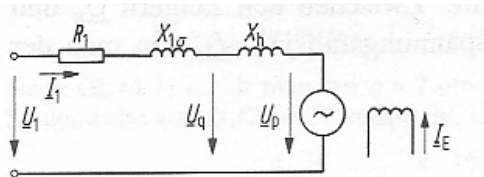
- Maximales Drehmoment (M_K : Kippmoment) bei Polradwinkel $\beta=90^\circ$. Für $M > M_K \Rightarrow$ SM außer Tritt
- Die Polradspannung entspricht der Spannung, die auf dem Wege der Gegeninduktion vom Polrad (Läufer) in den Ständer gelangt

Synchronisationsbedingungen am starren Netz:

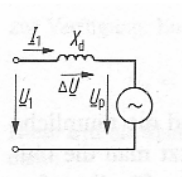
- **Spannungsgleichheit** zwischen Polradspannung und Netzspannung. Messung mit **Voltmeter**. Anpassung durch **Änderung des Erregerstromes**.
- **Frequenzgleichheit**. Messung der **Drehzahl** bzw. Verwendung eines **Zungenfrequenzmessers**. Anpassung durch **Drehzahländerung**.
- **Gleiche Phasenfolge**. 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.



Ersatzschaltbild der Vollpolmaschine



Vereinfachtes Ersatzschaltbild

$$U_1 = U_p + I_1 \cdot (R_1 + j \cdot (X_h + X_{1\sigma})) \quad \text{mit} \quad U_p = \omega \cdot M \cdot \frac{I_E}{\sqrt{2}} \quad \text{mit} \quad M : \text{Gegeninduktivität}$$

$$M \sim \sin \beta ; I_K = \frac{U_p}{X_d}$$

- **Leerlauf:** Die ideale Polradspannung wird nach Größe und Phase gleich der Netzspannung eingestellt, so ist mit $\Delta U=0$ auch $I_1=0$ und die Maschine arbeitet im Leerlauf. Im Zeigerdiagramm eilt der Zeiger I_{E0} der Netzspannung U_1 um 90° nach.

$$I = 0 ; M = 0 ; \beta = v = 0 ; U_1 = U_p ; I_E = I_{E0}$$

- **Generatorbetrieb:** Leitet man der SM an der Welle ein Drehmoment zu, so will der Läufer beschleunigen. Dies beginnt mit einem Herausdrehen der im Bild durch den Zeigers I_E und einen Pol gekennzeichneten Erregerfeldachse aus der Leerlaufstellung um den Polradwinkel $\beta = v$

Es entsteht also eine Phasenverschiebung zwischen U_1 und der um den Polradwinkel β voreilenden Polradspannung U_p . Es bildet sich die Differenzspannung ΔU aus, die einen ihr 90° nacheilenden Ständerstrom I_1 (reiner Generatorwirkstrom) hervorruft. Der Polradwinkel stellt sich dabei so ein, dass Gleichgewicht zwischen der zugeführten mechanischen Wellenleistung und der elektrisch abgegebenen Leistung ans Netz besteht.

$$I \neq 0 ; |M| > 0 ; |\beta| > 0 ; U_1 = U_p \text{ (willkürlich)} ; I_E = I_{E0}$$

- **Motorbetrieb:** Wird die leer laufende SM mechanisch an der Welle belastet, so will der Läufer seine Drehzahl verringern. Sobald jedoch eine nacheilende Winkelabweichung der Polradspannung auftritt, kann infolge der Spannung ΔU wieder ein Ständerstrom I_1 fließen. Dabei nimmt die Maschine elektrische Energie aus dem Netz auf.

$$I \neq 0 ; |M| > 0 ; |\beta| > 0 ; U_1 = U_p ; I_E = I_{E0}$$

- **Über- und Untererregung (Phasenschieberbetrieb):** Bleibt die **Maschine** mechanisch im **Leerlauf** und wird dafür der Erregerstrom I_E verstellt, so ändert sich die Polradspannung nicht in ihrer Phase, sondern der Amplitude. Sowohl bei verminderter wie verstärkter Erregung liegt ΔU in Richtung der Netzspannung, womit ein reiner Blindstrom auftritt.

Bei **Übererregung (SM als Kondensator)** fließt ein kapazitiver Strom, der die Läuferdurchflutung soweit abbaut, wie es zur Erzeugung eines resultierenden der Netzspannung proportionalen Feldes erforderlich ist.

$$I \neq 0 ; |M| = 0 ; |\beta| = 0 ; U_1 < U_p ; I_E > I_{E0}$$

Bei **Untererregung (SM als Spule)** verstärkt ein induktiver Blindstrom die zu schwache Läuferdurchflutung.

$$I \neq 0 ; |M| = 0 ; |\beta| = 0 ; U_1 > U_p ; I_E < I_{E0}$$

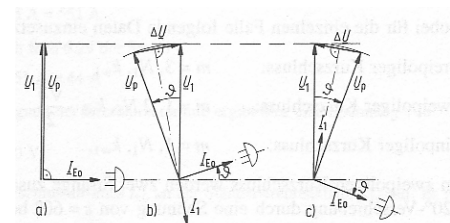


Bild 6.34 Diagramme der Synchronmaschine im Netzbereich
a) Leerlauf b) Generatorbetrieb c) Motorbetrieb

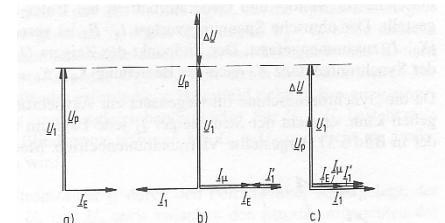


Bild 6.36 Blindlastbetrieb der Synchronmaschine am Netz
a) Übererregung mit Abgabe induktiver Blindleistung
b) Untererregung mit Aufnahme induktiver Blindleistung

Asynchronmaschine:

Einsatzgebiete:

- Universell, jedoch meistens als Motor

Aufbau:

- Ständer mit Drehstromwicklung
- Läufer
 - Kurzschlussläufer, Käfigläufer
 - Schleifringläufer

Wirkungsweise, Grundgleichungen:

- **Läufer nicht magnetisch, nicht von außen gespeist**
- Läuferstrom zur Drehmomenterzeugung muss auf dem Wege der Induktion über den Luftspalt δ 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**

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

- Der Läufer rotiert mit der **mech. Drehzahl** $\Omega_{mech} \neq \Omega_s$ **asynchron**

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

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

Schlupf

$$s = \frac{\Delta\Omega}{\Omega_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} = 1 - \frac{\Omega}{\Omega_s} \leq 1$$

⇒ *Stills tan d*: $s = 1$

⇒ *Leerlauf*: $s = 0$

- **Frequenz der Läufergrößen** U_2, I_2 $f_2 = s \cdot f_1$

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

Ersatzschaltbild:

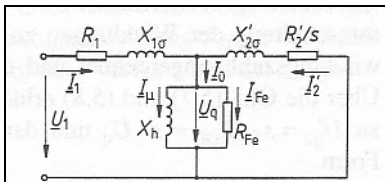


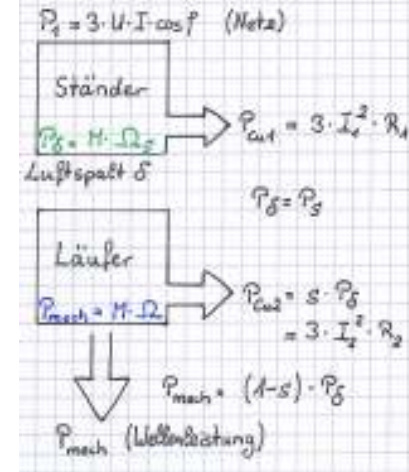
Bild 5.14 Vollständiges Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine

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

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

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

Leistungsbilanz – Sankey-Diagramm:



$$P_1 = P_{el} = 3 \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

$$P_{cut1} = 3 \cdot I_1^2 \cdot R_1$$

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

$$P_{cut2} = 3 \cdot I_2^2 \cdot R_2 = s \cdot P_\delta$$

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

Nur elektrische Wirkleistung wird mechanische Leistung an der Welle

Betriebsverhalten, Kennlinien => Kloss'sche Formel:

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

Stills tan d → $s = 1 \Rightarrow M_A$ (Anlaufmoment)

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

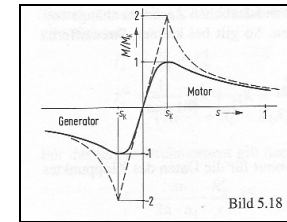
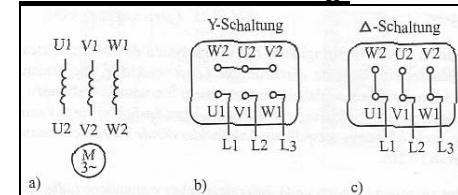


Bild 5.18

Verlauf des Drehmomentes nach der Kloss'schen Formel

Stern- / Dreieckschaltung:



Motortypen-schild	Strangspannung	Brücke bei verschiedenen Netzen		
		230/133 V	400/230 V	690/400 V
400V Δ	400V	—	Δ	Y
Δ/Y 133/230V	133V	Y	—	—
Y 690V	400V	—	Δ	Y
Y 400V	230V	Δ	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

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.

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 $\Phi = \text{konst.} \Rightarrow \frac{U}{f} = \text{konst.} ; n = \frac{f_1}{p} \cdot (1-s)$
- **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_1 verringern**
 - ⇒ **ACHTUNG !!!** $M_K \sim U_1^2 \Rightarrow$ nur für kleine AM
 - ⇒ z.B.: $U_1 = \frac{2}{3} \cdot U_N \Rightarrow M_K = \left(\frac{2}{3}\right)^2 \cdot M_{KN} = 0,45 \cdot M_{KN}$

Drehstrom:

Sternschaltung:

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

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

Dreieckschaltung:

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

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

Leistung des Drehstromes:

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

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

Magnetischer Kreis – Transformator:

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

$$\ddot{u} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} ; \frac{1}{\ddot{u}} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

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

$$KS: P_{Fe} = U_1^2 \cdot R_{Fe} \ll P_{Cu} \rightarrow P_{Fe} \sim U^2 \sim B^2 \sim \Phi^2 \rightarrow P_{Cu} \text{ und } X_\delta$$

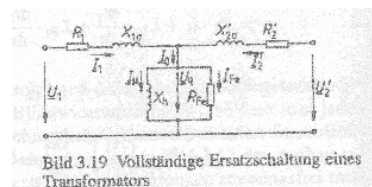
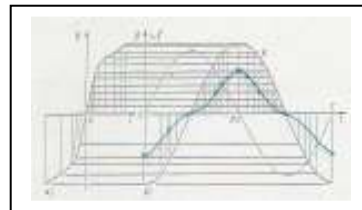


Bild 3.19 Vollständige Ersatzschaltung eines Transformators

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

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

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

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

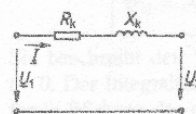


Bild 3.25 Vereinfachte Ersatzschaltung

$$R_k = R_1 + R'_2 ; X_k = X_{\delta 1} + X_{\delta 2}$$

Magnetischer Kreis – Spule:

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

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

$$\text{Durchflutung: } \Theta = \int_A \vec{S} \cdot d\vec{A} = I \cdot N$$

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

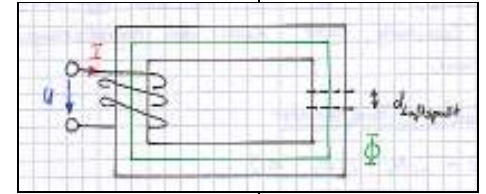
$$\text{Magnetische Spannung: } V_i = H_i \cdot l_i ; [H] = \frac{A}{m} ; \mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$$

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

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

$$\text{Phasenlage: } \varphi_\Phi = \varphi_U - \frac{\pi}{2}$$

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



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-Phi

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

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

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.