

## 7. Synchronmaschinen

Synchronmaschinen wurden zunächst als Einphasengeneratoren gebaut, die etwa ab der Mitte des 19. Jahrhunderts zur Versorgung von Beleuchtungsanlagen Anwendung fanden. Den ersten dreiphasigen Synchrongenerator entwickelten 1887 unabhängig voneinander Bradley und Haselwander. In der Folgezeit bildeten sich mit der Schenkelpolmaschine und dem Turbogenerator die typischen Bauformen aus. Die weitere Entwicklung der Synchronmaschine ist eng mit dem Ausbau der elektrischen Energieversorgung zu immer größeren Generator-Einheitsleistungen verbunden.

Synchronmotoren wurden schon immer als Industrieantriebe eingesetzt, wenn man eine konstante Antriebsdrehzahl benötigte oder wenn man die Möglichkeit des Phasenschieberbetriebs nutzen wollte.

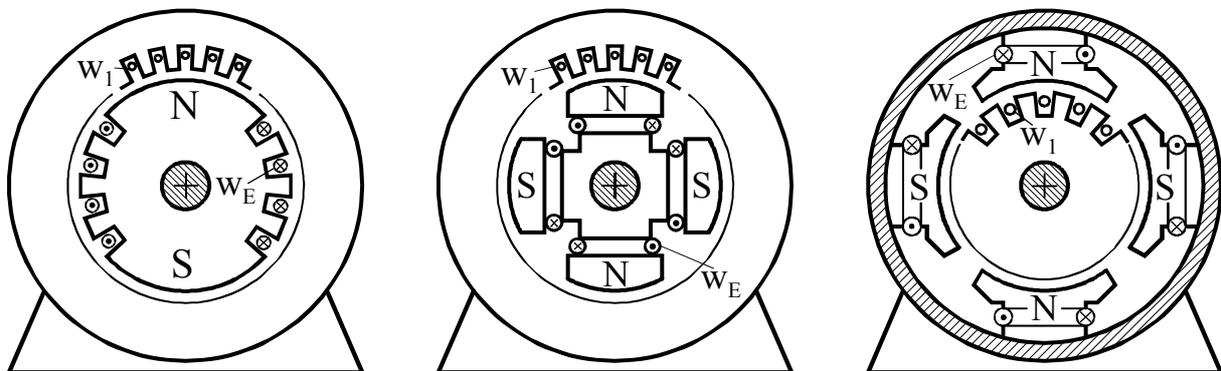
Drehstrom-Synchrongeneratoren besitzen die größten Einheitsleistungen elektrischer Maschinen. Als Turbogeneratoren für Wärmekraftwerke werden derzeit zweipolige Generatoren mit Leistungen von rd. 1200 MVA bei 50 Hz und 21 kV Nennspannung gefertigt. Bei vierpoligen Maschinen liegen die Daten sogar bei rd. 1700 MVA und 27 kV. Die größten Schenkelpolmaschinen für Wasserkraftwerke erreichen über 800 MVA mit bis zu 80 Einzelpolen.

Als Industrieantrieb hat die Synchronmaschine durch die Entwicklung der Frequenzumrichter stark an Bedeutung gewonnen. Sie steht dadurch als drehzahlregelbarer Antrieb vom Bereich des Servomotors mit permanenter Erregung durch Dauermagnete bis zu den größten Leistungen (30 MW) zur Verfügung.

### 7.1 Aufbau und Wirkungsweise

Die wesentlichen Unterschiede im Aufbau gleichstromerregter Synchronmaschinen bestehen in der Konstruktion zur Erzeugung des Erregergleichfeldes.

Der Läufer der Vollpolmaschine besteht aus einer massiven Stahlwalze, in der radial über 2/3 der Polteilung Nuten eingefräst sind. Diese nehmen die Erregerwicklung  $w_E$  auf, die auf mehrere konzentrisch zur Polachse liegende Spulen verteilt ist. In dieser Bauform werden 2- und 4polige Maschinen ausgeführt.



Vollpolmaschine  
(Turbogenerator)

Innenpol-  
Schenkelpolmaschine

Außenpol-  
Schenkelpolmaschine

### Bauformen der Synchronmaschine

Innenpol-Schenkelpolmaschinen besitzen den gleichen Ständeraufbau wie Vollpolmaschinen, im Läufer dagegen ausgeprägte Einzelpole zur Erzeugung des Gleichfeldes. Wie bei Gleichstrommaschinen liegt um jeden Polkern eine Erregerwicklung  $w_E$ , während zum Luftspalt hin durch den Polschuh eine möglichst sinusförmige Feldform angestrebt wird.

Die Außenpol-Schenkelpolmaschine ist ähnlich einer Gleichstrommaschine aufgebaut, nur trägt der Läufer eine Drehstromwicklung  $w_1$ , deren Anschlüsse über Schleifringe zugänglich sind.

Der Ständer der Synchronmaschine besteht wie bei der Asynchronmaschine aus einer geschweißten Tragkonstruktion zur Aufnahme des geschichteten Blechpaketes. Die meist offenen Nuten entlang der Ständerbohrung nehmen die Drehstromwicklung auf, die bei größeren Leistungen als Hochspannungswicklung ausgeführt ist.

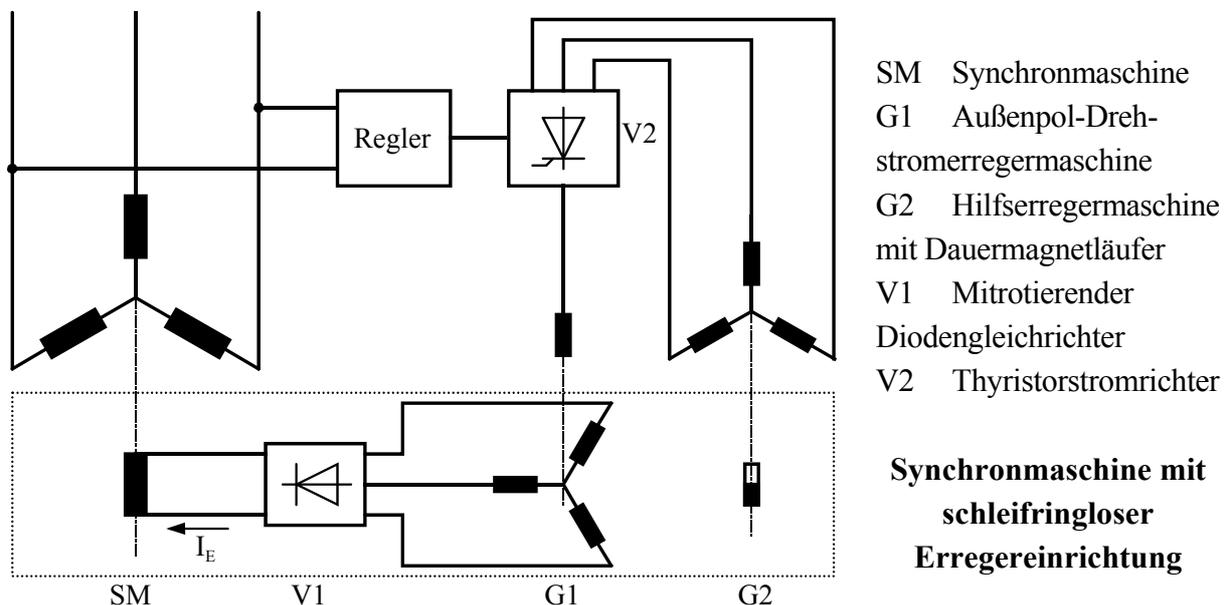
Mit Rücksicht auf einen guten Wirkungsgrad verwendet man bei Generatoren Dynamobleche mit niedrigen Verlustziffern bis hinab zu  $v_{10} = 1 \text{ W/kg}$ . Auch kornorientierte Bleche werden bereits eingesetzt.

Für den Betrieb einer elektrisch erregten Synchronmaschine und speziell im Einsatz als Drehstromgenerator benötigt man für die Läuferwicklung einen einstellbaren Gleichstrom. Dieser wird durch das Erregersystem geliefert, dessen Regeleinrichtungen vor allem die Spannungshaltung und die Blindlaststeuerung im stationären und dynamischen Betrieb (Laststöße) übernehmen.

Die erforderlichen Erregerleistungen erstrecken sich für zweipolige Turbogeneratoren von rd. 3 kW bei 100 kW bis 4 MW bei einer 1000-MVA-Maschine.

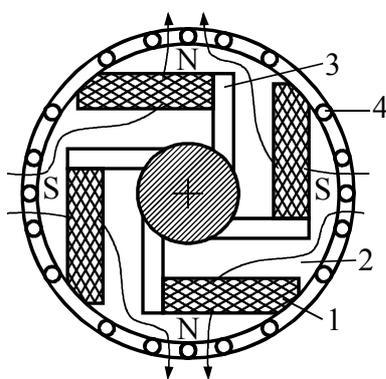
Je nach Leistung der Synchronmaschine, haben sich für das Erregersystem verschiedene Techniken herausgebildet. Die früher allgemein angewandte Erregertechnik, eine direkt angekuppelte Gleichstromhaupt- mit Hilferregermaschine, läßt sich mit Rücksicht auf die mechanische und elektrische Belastung des Ankers nur bis zu Einheitsleistungen der Synchronmaschine von rd. 150 MVA ausführen. Dem Spannungsregler steht die konstante Ankerspannung des Hilfsgenerators, der selbsterregt ist, hierbei zur Verfügung.

Modernere Erregersysteme basieren auf Schaltungen der Leistungselektronik und stehen bis zu den höchsten Leistungen zur Verfügung. Heute wird vorwiegend in allen Leistungsbereichen der schleifringlose Außenpol-Drehstromerregergenerator mit rotierendem Diodengleichrichter eingesetzt.



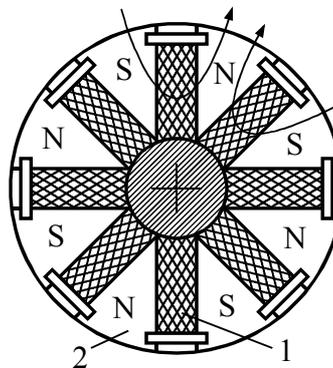
Der Synchrongenerator kann sich auch selbst erregen, wenn man seine Klemmenspannung über Gleichrichter zur Erzeugung des Erregerstromes heranzieht. Darüberhinaus kann auch die zur Spannungshaltung erforderliche verstärkte Erregung bei Belastung selbsttätig durch eine Kompoundierung bereitgestellt werden. Synchronmaschinen mit einem derartigen Erregersystem werden als "Konstantspannungsgeneratoren" bezeichnet und beispielsweise zur Versorgung von Schiffsbordnetzen eingesetzt.

Die Fortschritte in der Dauermagnettechnik haben die Entwicklung dauermagneterregter Synchronmotoren gefördert. In Verbindung mit Zwischenkreisumrichtern werden sie als Einzel- und Gruppenantriebe im unteren Leistungsbereich (bis 100 kW) sowie zu Positionieraufgaben eingesetzt. Verschiedene Läuferkonstruktionen mit Ferrit- oder auch Seltenerd-Kobaltmagneten sind bereits realisiert worden. Dauermagneterregte Synchronmaschinen mit kleinem Trägheitsmoment werden bei Antrieben mit kurzen Stellzeiten (Servoantrieben) eingesetzt.



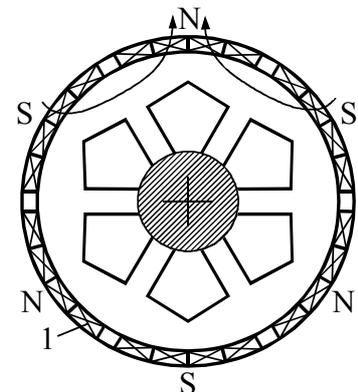
Vierpoliger Läufer mit Dämpferkäfig

- 1 Rechteckmagnete, 2 Weicheisen
- 3 Luftspalt, 4 Dämpferkäfig



Achtpoliger Läufer

- 1 Rechteckmagnete
- 2 Weicheisenpole



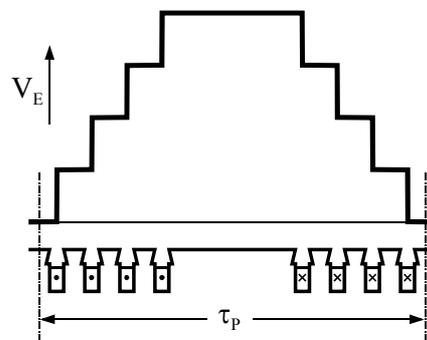
Sechspoliger Läufer mit geringem Trägheitsmoment

- 1 Seltenerd-Kobaltmagnete

### Konstruktion dauermagneterregter Läufer von Synchronmotoren

## 7.2 Betriebsverhalten der Synchronmaschine

Da die Erregerwicklung beim Vollpoläufer auf eine Anzahl Nuten verteilt ist, erhält die Durchflutung, und wegen des konstanten Luftspaltes auch die Feldkurve, einen treppenförmigen Verlauf.



Felderregerkurve  $V_E$  eines Vollpolläufers

Durch entsprechende Auslegung der Ständerwicklung können die Wicklungsfaktoren für die Oberschwingungen klein gehalten werden, so daß nahezu eine sinusförmige Spannungskurve erreicht wird.

Der Effektivwert der induzierten Spannung ist durch die zeitlich sinusförmige Verkettung des Hauptfeldes mit dem Wicklungsstrang gegeben. Es gilt entsprechend Gl. (5.18):

$$U_q = 4,44 \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot \xi_1 \cdot \Phi_h \quad (7.1)$$

Wird die Synchronmaschine belastet, so führt die Ständerwicklung Strom und baut im Zusammenwirken der drei Wicklungsstränge eine eigene Drehdurchflutung auf. Diese rotiert mit  $n_1 = f_1/p$  und daher synchron mit dem Läufer und dessen Durchflutung. Beide Anteile können infolgedessen zu einem resultierenden Wert zusammengefaßt werden. Es gilt:

$$\Theta_\mu = \Theta_E + \Theta_1 \quad (7.2)$$

Man bezeichnet die Beeinflussung des Luftspaltfeldes durch den Belastungsstrom wie bei der Gleichstrommaschine als Ankerrückwirkung.

Anstelle der Addition der Drehdurchflutungen kann man auch direkt die Stromzeiger zusammensetzen, wenn man den Ständerstrom  $\underline{I}_1$  in einen äquivalenten Erregerstrom  $\underline{I}'_1$  umformt. Für die Ständerdrehdurchflutung gilt nach (5.13):

$$\Theta_1 = \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot m \cdot \frac{w_1 \cdot \xi_1}{p} \cdot I_1 \quad (7.3)$$

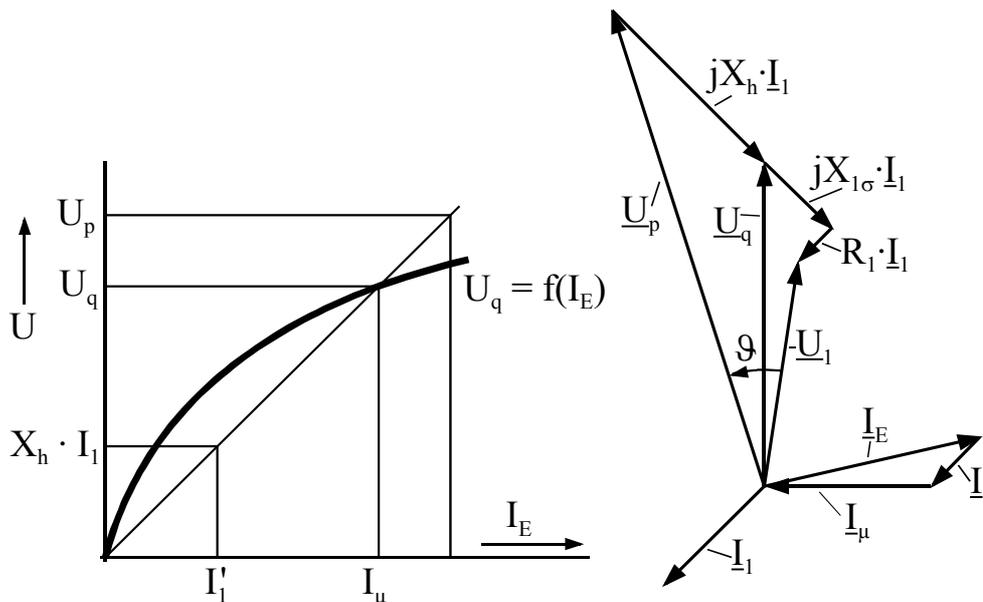
Für die Grundwelle der Treppendurchflutung der Erregerwicklung erhält man:

$$\Theta_E = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{w_E \cdot \xi_E}{p} I_E \quad (7.4)$$

Damit erhält man den Magnetisierungsstrom  $\underline{I}'_\mu$ :

$$\underline{I}'_\mu = \underline{I}_E + \underline{I}'_1 = \underline{I}_E + \frac{m \cdot w_1 \cdot \xi_1}{\sqrt{2} \cdot w_E \cdot \xi_E} \cdot \underline{I}_1 \quad (7.5)$$

Unter Berücksichtigung des ohmschen Wicklungswiderstandes  $R_1$ , des Streublindwiderstandes  $X_{1\sigma}$  und der Hauptreaktanz  $X_h$  läßt sich das komplette Zeigerdiagramm mit der sogenannten ideellen Polradspannung  $\underline{U}'_p$ , der induzierten Spannung  $\underline{U}_q$  und der Klemmenspannung  $\underline{U}_1$  angeben.



Im Betriebspunkt linearisierte Kennlinie

Vollständiges Zeigerdiagramm des

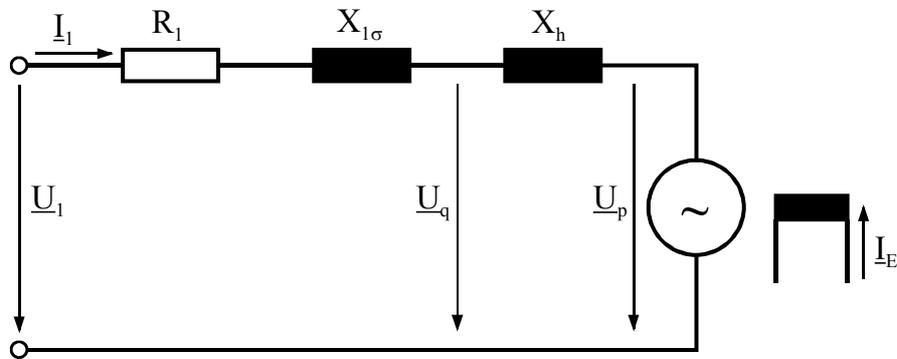
Synchrongenerators bei ohmsch-induktiver Last

Über das Zeigerdiagramm läßt sich die Spannungsgleichung der Synchronmaschine angeben.

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_p + \underline{I}_1 \cdot [R_1 + j \cdot (X_h + X_{1\sigma})] \quad (7.6)$$

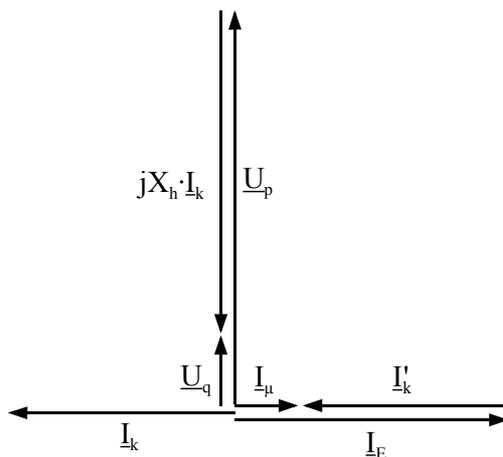
Hauptreaktanz und Streureaktanz werden zur Synchronreaktanz zusammengefaßt.

$$X_d = X_h + X_{1\sigma} \quad (7.7)$$



### Ersatzschaltbild der Synchronmaschine

Die Belastungskennlinie  $U_1 = f\{I_1\}$  läßt sich über das Ersatzschaltbild des Generators berechnen, wobei man üblicherweise bei größeren Maschinen den relativ sehr kleinen Ständerwiderstand  $R_1$  vernachlässigt.



Wird eine Synchronmaschine im Inselbetrieb erregt und ständerseitig dreipolig kurzgeschlossen, so wird der Generator mit der Quellenspannung  $\underline{U}_p$  durch den Blindwiderstand  $X_d$  belastet.

### Zeigerdiagramm für Dauerkurzschluß

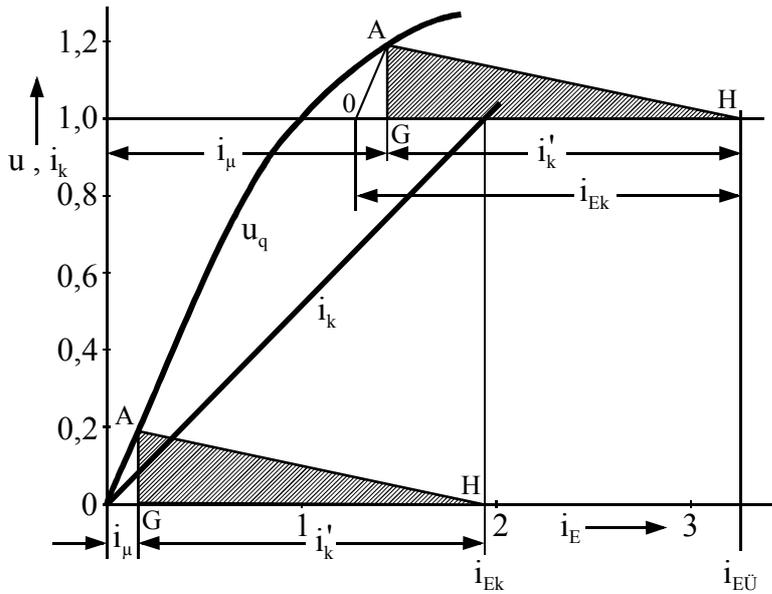
Die Kennlinien des Generator für Leerlauf und Kurzschluß lassen sich in einem Diagramm zusammenfassen. Dabei arbeitet man im allgemeinen mit relativen Werten und definiert:

$$u_q = \frac{U_q}{U_N} \quad i_k = \frac{I_k}{I_N} \quad i_E = \frac{I_E}{I_{E0}} \quad (7.8)$$

Wird der Generator aus dem Leerlauf heraus bei Nennspannung kurzgeschlossen, so fließt nach dem Ausgleichsvorgang der Kurzschlußstrom  $I_{k0}$ . Bezieht man diesen Wert auf den Nennstrom so erhält man das Leerlauf-Kurzschlußverhältnis ( $X_{dges}$ -gesättigter Wert).

$$K_C = \frac{I_{k0}}{I_N} = \frac{U_N / X_{dges}}{U_N / Z_N} = \frac{Z_N}{X_{dges}} = \frac{1}{x_{dges}} \quad (7.9)$$

Das Leerlaufkurzschlußverhältnis  $K_C$  liegt bei Turbogeneratoren im Bereich 0,4 bis 0,65. Beim Kurzschluß eines mit Nennspannung leerlaufenden Synchrongenerators erreicht der Dauerkurzschlußstrom  $I_{k0}$  im Ständer somit nicht einmal den Wert des Nennstromes  $I_N$ .



### Bestimmung des Potier-Dreiecks

Im allgemeinen ist die Synchronmaschine auf ein Netz geschaltet, dessen Spannung und Frequenz konstant gehalten werden und für die einzelne Maschine damit fest vorgegeben ist.

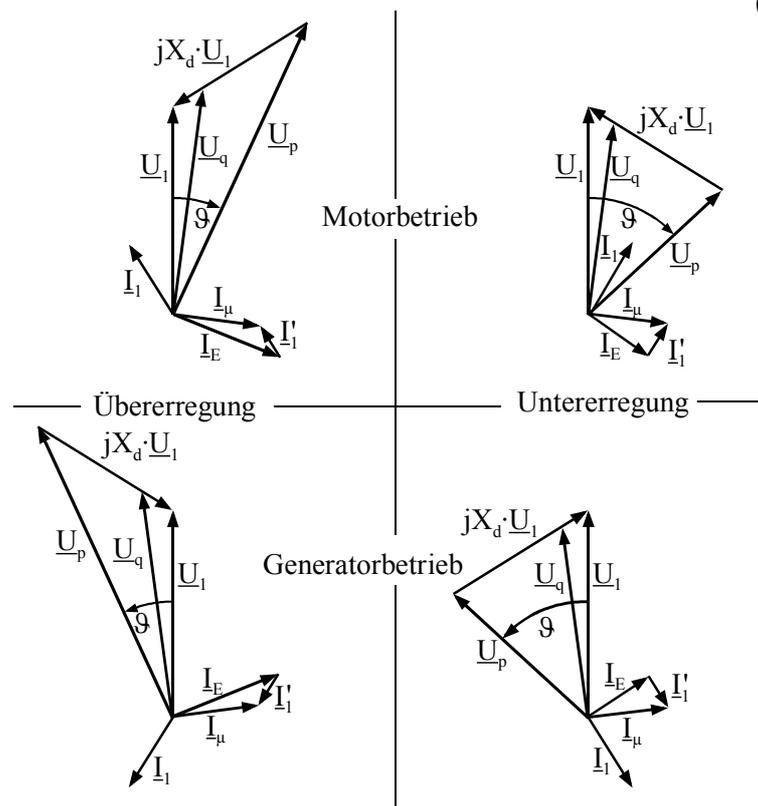
Eine leerlaufende Synchronmaschine geht in den Generatorbetrieb über, wenn man ihrer Welle ein erhöhtes Antriebsmoment zuführt. Wird sie dagegen mechanisch belastet, so bezieht sie als Motor eine entsprechende Energie aus dem Netz.

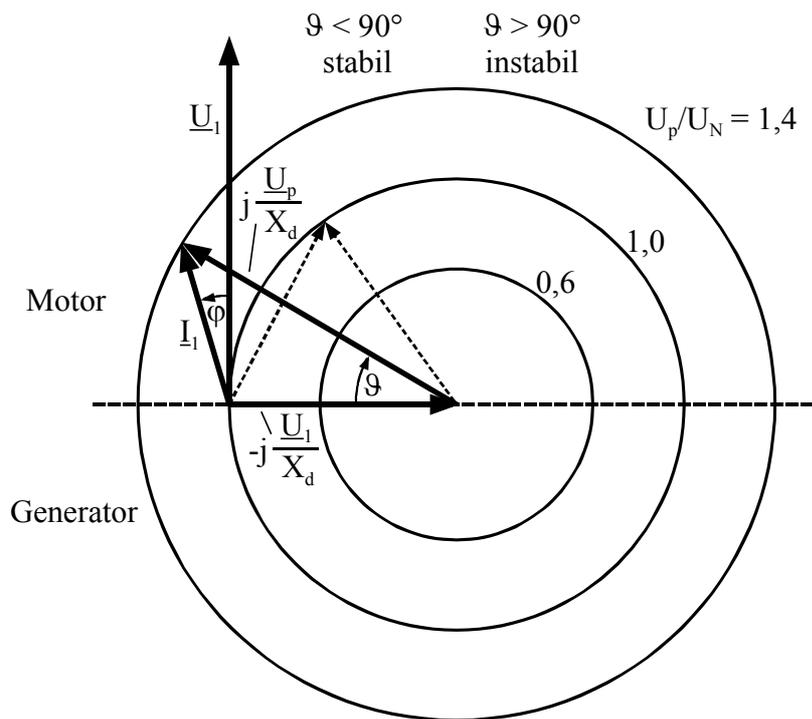
Mit der Erregung läßt sich die Blindleistungsbilanz beeinflussen; bei Übererregung gibt sie induktiven Blindstrom ab und bei Untererregung nimmt sie induktiven Blindstrom auf.

Bei der Erstellung der Betriebsdiagramme der Synchronmaschine wird im allgemeinen der ohmsche Spannungsverlust vernachlässigt. Aus Gl. (7.6) und (7.7) läßt sich der Strom der Maschine angeben.

$$\underline{I}_1 = -j \cdot \frac{U_1}{X_d} + j \cdot \frac{U_p}{X_d} \quad (7.10)$$

### Vierquadrantenbetrieb der Synchronmaschine am Netz





Legt man den Zeiger  $\underline{U}_1$  in die reelle senkrechte Achse, so erhält man mit Gl. (7.10) als Ortskurve des Ständerstromes einen Kreis des Radius  $\underline{U}_p/X_d$  um die Spitze des Zeigers  $-j\underline{U}_1/X_d$ .

### Stromortskurve der Vollpolmaschine bei $R_1 = 0$

Nach der Stromortskurve gilt für die Wirkkomponente des Ständerstromes:

$$I_1 \cdot \cos\varphi_1 = -\frac{U_p}{X_d} \cdot \sin\vartheta \quad (7.11)$$

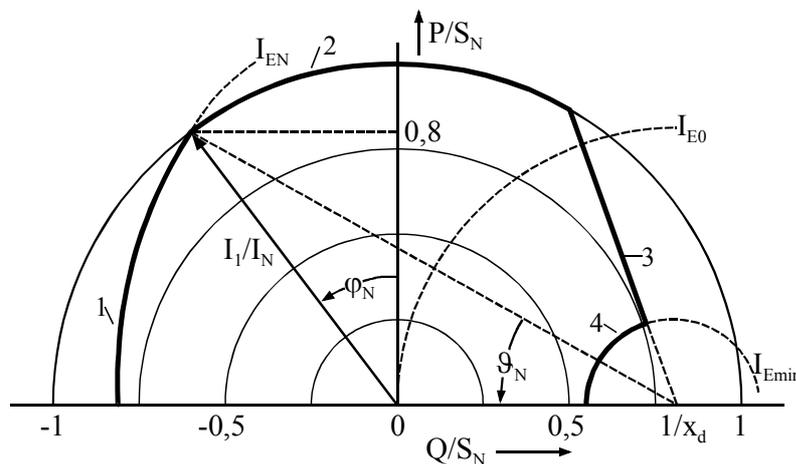
Für die Ständerwirkleistung folgt:

$$P_1 = m \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1 = -m \cdot U_1 \cdot \frac{U_p}{X_d} \cdot \sin\vartheta \quad (7.12)$$

Das innere Drehmoment  $M_i$  der Synchronmaschine verläuft als Funktion des Polradwinkels  $\vartheta$  sinusförmig (7.13).

$$M_i = -\frac{m \cdot U_1 \cdot U_p}{2\pi \cdot n_1 \cdot X_d} \cdot \sin\vartheta \quad (7.13)$$

Im Nennbetrieb erreichen Turbogeneratoren etwa einen Polradwinkel bis  $30^\circ$  und Schenkelpolmaschinen einem Winkel von  $20$  bis  $25^\circ$ . Das Kippmoment beträgt damit rd. das 2fache Nennmoment. Das Leistungsdiagramm ergibt sich aus der Stromortskurve, wenn man diese mit dem Faktor  $m \cdot U_1$  multipliziert.



$$x_d = 1,23 \quad \cos\varphi_N = 0,8$$

Grenzl意思 für Dauerbetrieb

- 1 maximaler Erregerstrom
- 2 maximaler Ständerstrom
- 3 maximaler Polradwinkel
- 4 minimaler Erregerstrom

### Leistungsdiagramm der Synchronmaschine

### 7.3 Sonderbauarten von Synchronmaschinen

#### Reluktanzmotoren

Die Schenkelpolmaschine entwickelt ohne Gleichstromerregung das Reaktionsmoment  $M_R$  mit der sie als Motor belastet werden kann.

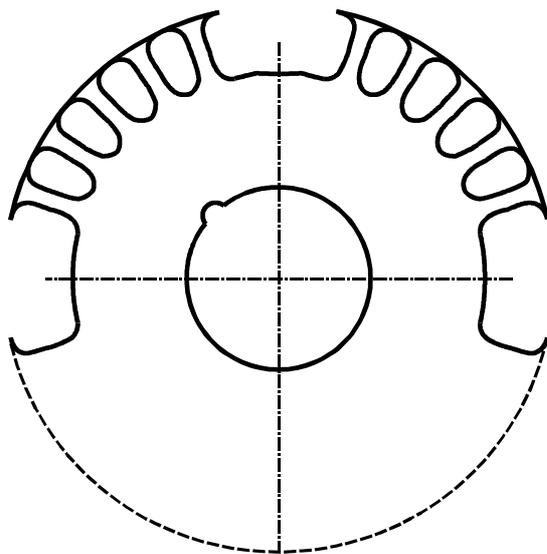
$$M_R = -\frac{m \cdot U_1^2}{4\pi \cdot n_1} \cdot \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin 2\vartheta \quad (7.14)$$

Diese Erscheinung wird zum Bau von Reluktanzmotoren ausgenutzt, die man aus normalen Asynchronmaschinen mit Kurzschlußläufern entwickelt hat.

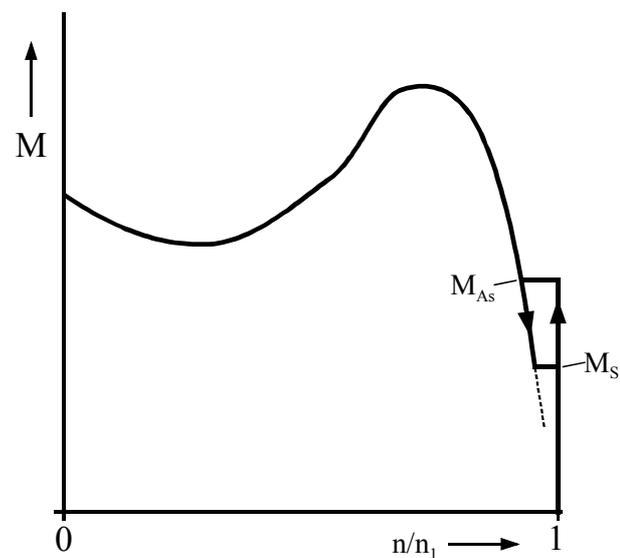
Durch Aussparungen im Läuferisen erhält der magnetische Widerstand (Reluktanz) längs des Umfangs verschiedene Werte, so daß je eine Achse maximalen und minimalen Leitwertes und damit zwei Ständerreaktanzen  $X_d$  und  $X_q < X_d$  entstehen.

Der Anlauf des Reluktanzmotors erfolgt wie der eines normalen Kurzschlußläufermotors über die Käfigwicklung. In der Nähe der Synchrondrehzahl fällt der Läufer bei einem Eintrittfallmoment  $M_S$  in Tritt (er synchronisiert) und kann danach bis zu einem Außertrittfallmoment  $M_{As} > M_S$  bei synchroner Drehzahl belastet werden.

Die abgegebene Leistung des Reluktanzmotors, der bis 10 kW gebaut wird, erreicht rd. 50 % der Typenleistung der entsprechenden Asynchronmaschine. Der Leistungsfaktor  $\lambda = 0,5$  und der Wirkungsgrad  $\eta = 0,6$  sind relativ niedrig.



**Läuferblechschnitt  
eines Reluktanzmotors**



**Momentenkennlinie  
eines Reluktanzmotors**

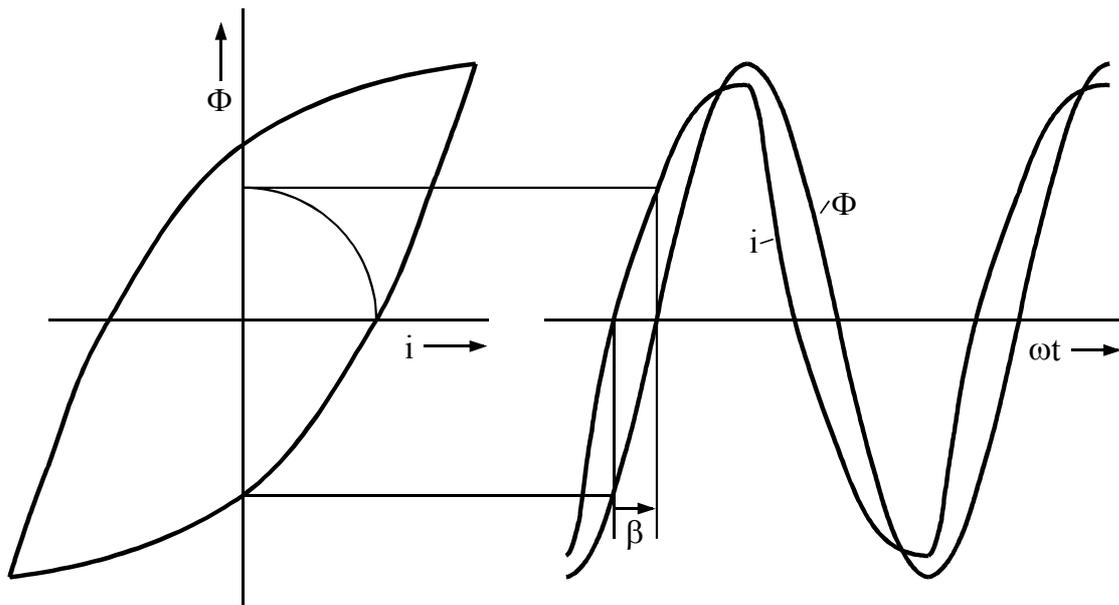
#### Hysteresemotoren

Der Hysteresemotor ist eine Synchronmaschine mit Dauermagneterregung und günstigem asynchronen Anlaufeigenschaften. Der Ständer wird bei Kleinstmotoren meist im Spaltpolprinzip mit ausgeprägten Polen ausgeführt. Der Läufer besitzt keine Wicklung, sondern besteht aus einem Zylinder aus hartmagnetischem Werkstoff.

Im asynchronen Betrieb entwickelt der Motor entsprechend Gl. (5.24) ein Drehmoment:

$$M = c \cdot \Phi_h \cdot I_1 \cdot \sin \beta \quad (7.15)$$

Zur Erzielung hoher Drehmomente ist also eine breite Hystereseschleife mit  $\sin\beta \rightarrow 1$  günstig.

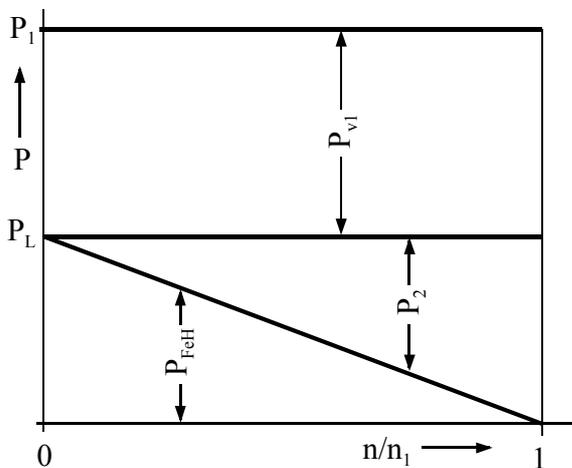


Magnetisierungskennlinie  $\Phi = f\{i\}$

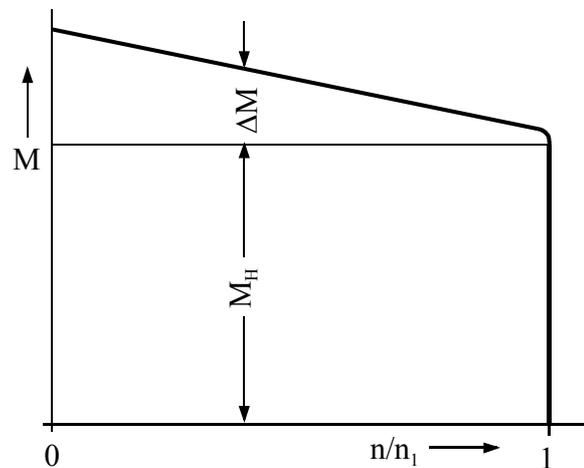
Diagramme von Feld  $\Phi$  und Erregerstrom  $i$

### Magnetisierung eines hartmagnetischen Werkstoffes

Im synchronen Lauf entwickelt der Hysteresemotor sein Drehmoment wie eine gewöhnliche dauermagneterregte Synchronmaschine. Hysteresemotoren werden bei Leistungen unter 100 W für Kleinantriebe, die mit synchroner Drehzahl laufen müssen, eingesetzt.



Leistungsbilanz eines Hysteresemotors



Momentenkennlinie eines Hysteresemotors

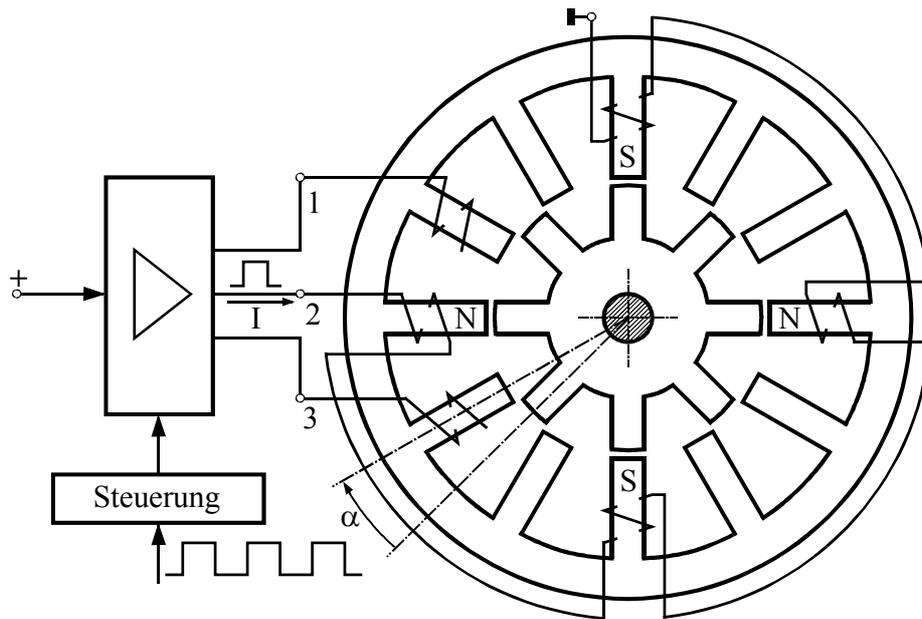
### Schrittmotoren

Schrittmotoren sind eine Sonderbauform der Synchronmaschine mit ausgeprägten Ständerpolen, deren Wicklungen durch Stromimpulse zyklisch angesteuert werden.

Dem sprungförmig umlaufendem Magnetfeld folgt der Läufer jeweils mit einem Schritt um den Winkel  $\alpha$ .

Einer Reihe von  $n$  Steuerimpulsen entspricht daher eine Drehung der Welle um den Drehwinkel  $\varphi = n \cdot \alpha$ , was eine Positionierung ohne Rückmeldung erlaubt.

Zu einem Motor gehört immer ein dem Motor zugeordnetes Ansteuergerät.



**Schaltung eines dreisträngigen Reluktanzschrittmotors mit einem Schrittwinkel  $\alpha = 15^\circ$**

Das Prinzip der Schrittmortertechnik kann am Beispiel eines dreisträngigen Motors mit Reluktanzläufer gezeigt werden. Durch die Stromimpulse werden die Wicklungsstränge 1 bis 3 nacheinander erregt und damit eine sprungförmige Winkeländerung der Ständerfeldlage erreicht. Der Läufer stellt sich jeweils so in dieses Ständerfeld ein, daß vier seiner Zähne mit den gerade erregten Ständerpolen deckungsgleich sind, was der Stellung kleinsten magnetischen Widerstandes (Reluktanz) entspricht. Im Beispiel ergibt jeder Impuls einen Winkelschritt von  $\alpha = 15^\circ$ .

In der Praxis werden häufig im Vollschrittbetrieb mit einem Winkelschritt von  $\alpha$  immer alle  $m$  Wicklungen mit unterschiedlicher Polarität bestromt (möglichst großer Wirkungsgrad). Im Halbschrittbetrieb mit einem Winkelschritt von  $\alpha/2$  werden dann abwechselnd  $m$  Wicklungen und  $m-1$  Wicklungen bestromt.

Schrittmotoren werden als permanentenerregte Motoren, als Reluktanzmotoren mit weichmagnetischem Läuferzahnrad oder als Hybridmotoren mit  $m = 2$  bis  $m = 5$  Wicklungssträngen ausgeführt.