

## Inhaltsverzeichnis

2. Synchrongeneratoren .....	2
2.1 Spannungsbildung im Drehstromgenerator .....	2
2.2 Aufbau von Synchrongeneratoren.....	8
2.3 Betriebsverhalten von Synchrongeneratoren .....	11
2.3.1 Leerlaufkennlinie .....	11
2.3.2 Drehfeldbildung .....	12
2.3.3 Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm .....	15
2.3.4 Berechnung des Drehmoments.....	19
2.3.5 Spezielle Betriebsbedingungen .....	22
2.3.6 Beeinflussung des Betriebszustands.....	23
2.3.7 Kreisdiagramm .....	25
2.3.8 Stabilität und Pendelungen .....	26
2.4 Kurzschlussvorgänge bei Synchrongeneratoren .....	28
2.4.1 Dauerkurzschluss .....	28
2.4.2 Stoßkurzschluss.....	30
2.5 Synchronmotoren.....	35

## 2. Synchrongeneratoren

### 2.1 Spannungsbildung im Drehstromgenerator

Bild 2-1 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Synchrongenerators

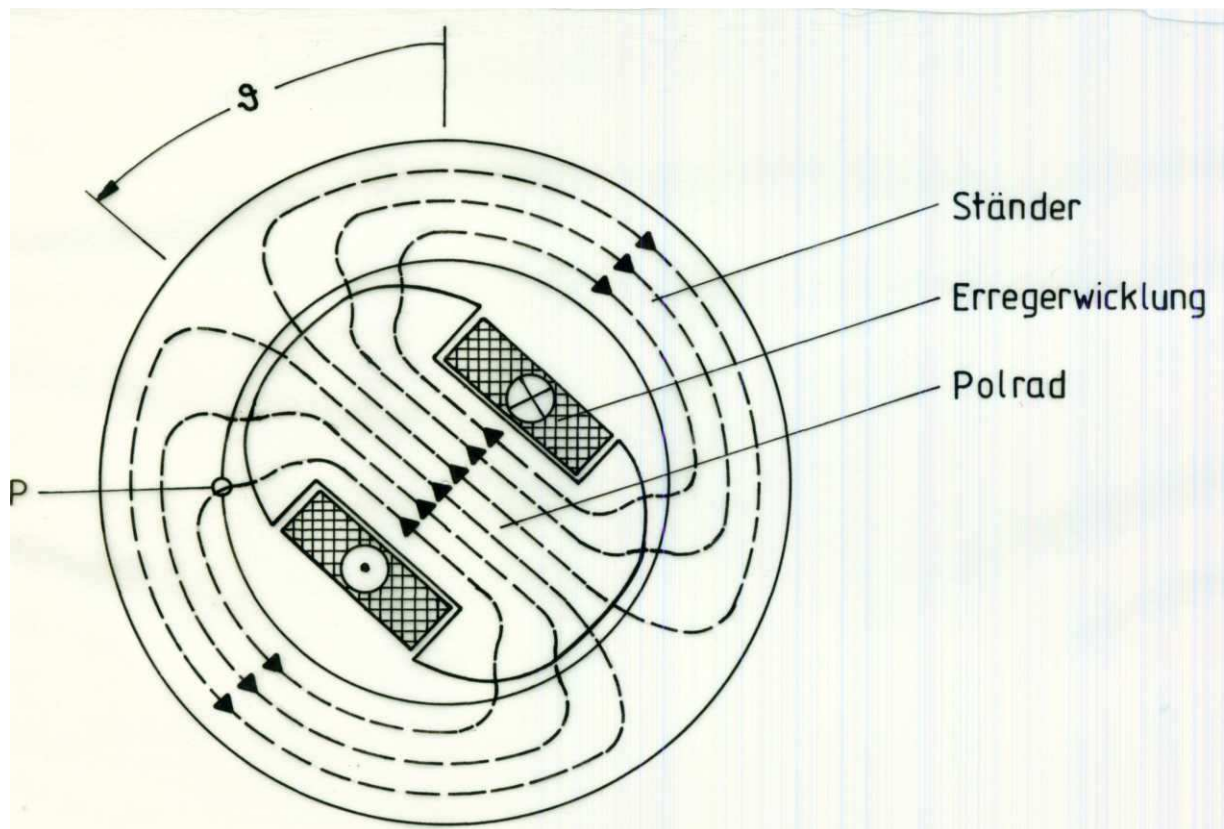


Bild 2-1: Prinzipieller Aufbau eines Synchrongenerators

Der feststehende Teil (Ständer) besteht aus kreisringförmigen, hintereinander geschichteten Blechen. In der zylindrischen Bohrung dieses Blechpaketes dreht sich der Läufer, Polrad genannt. Das Polrad trägt eine konzentrierte Erregerwicklung (Feldwicklung), die über Schleifringe mit Gleichstrom gespeist wird. Der von dieser Wicklung erzeugte magnetische Fluss tritt durch den Luftspalt und schließt sich über den Ständer. Bei geeigneter Formung der Polschuhe ergibt sich ein räumlich sinusförmiger Verlauf der Flussdichte im Luftspalt (Bild 2-2).

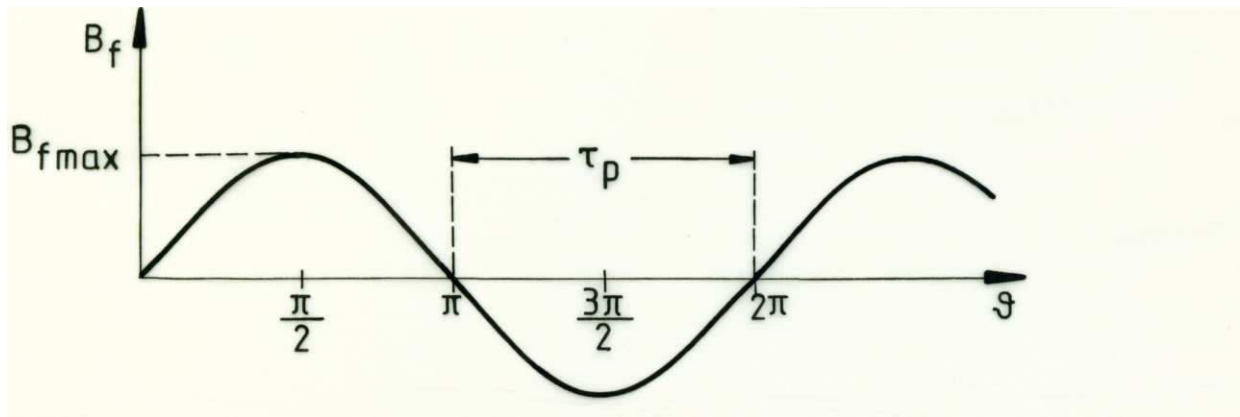


Bild 2-2: Magnetische Induktion im Punkt P des Ständerumfangs in Abhängigkeit von der Polradstellung

Bei der Drehung des Polrades bewegt sich das Maximum der Induktion über den Ständerumfang: es entsteht ein Drehfeld.

In einem Leiter, der sich in einer Nut am Ständerumfang befindet, wird durch die zeitliche Änderung der Induktion eine Spannung erzeugt. Die in einem Leiter der Länge  $l$  induzierte Spannung ist

$$e = l \cdot B \cdot v \quad (2.1)$$

Hierbei ist  $v$  die Geschwindigkeit, mit der sich das Maximum des Drehfelds über den Ständerumfang bewegt. Geht man von einer räumlich sinusförmigen Feldverteilung aus

$$B_f(\vartheta) = B_{fmax} \sin\vartheta, \quad (2.2)$$

wie sie in Bild 2-2 dargestellt ist, und nimmt man an, dass sich das Polrad mit der konstanten Drehzahl  $n$  dreht, so gilt

$$e = l \cdot B_{fmax} \sin\vartheta \cdot 2 \pi r n \quad (2.3)$$

mit  $v = 2 \pi r n$  und  $\vartheta = 2 \pi n t$ .

Befindet sich an der gegenüberliegenden Stelle des Ständers ein zweiter Leiter, der über eine Stirnverbindung mit dem ersten in Reihe geschaltet ist, dann ist die in dieser Windung induzierte Spannung

$$e = 2l B_{f_{max}} (2\pi rn) \sin(2\pi nt) \quad (2.4)$$

Um zu höheren Spannungen zu kommen und die Maschine besser auszunutzen, bringt man eine Vielzahl von in Reihe geschalteten Windungen am Umfang unter. Da die Leiter eines Wicklungsstranges aus Platzgründen über einen gewissen Bereich des Ständerumfangs verteilt werden müssen, sind die in den einzelnen Windungen induzierten Spannungen phasenverschoben. Die (zeitliche) Phasenverschiebung der einzelnen Windungsspannungen entspricht dabei dem räumlichen Versatz der Windungen. Um die Summenspannung eines Wicklungsstranges zu erhalten, müssen die Zeitzeiger  $\underline{e}$  der Windungsspannungen geometrisch addiert werden.

Bild 2-3 zeigt, wie die Summenspannung einer aus 3 um den Winkel  $\vartheta_0$  gegeneinander verschobenen Windungen aufgebauten Wicklung ermittelt werden kann. Es gilt

$$\underline{e} = \underline{e}_1 + \underline{e}_2 + \underline{e}_3 = 2l B_{f_{max}} 2\pi rn [\sin(\omega t - \vartheta_0) + \sin\omega t + \sin(\omega t + \vartheta_0)]$$

mit  $\omega = 2\pi n = 2\pi f$ .

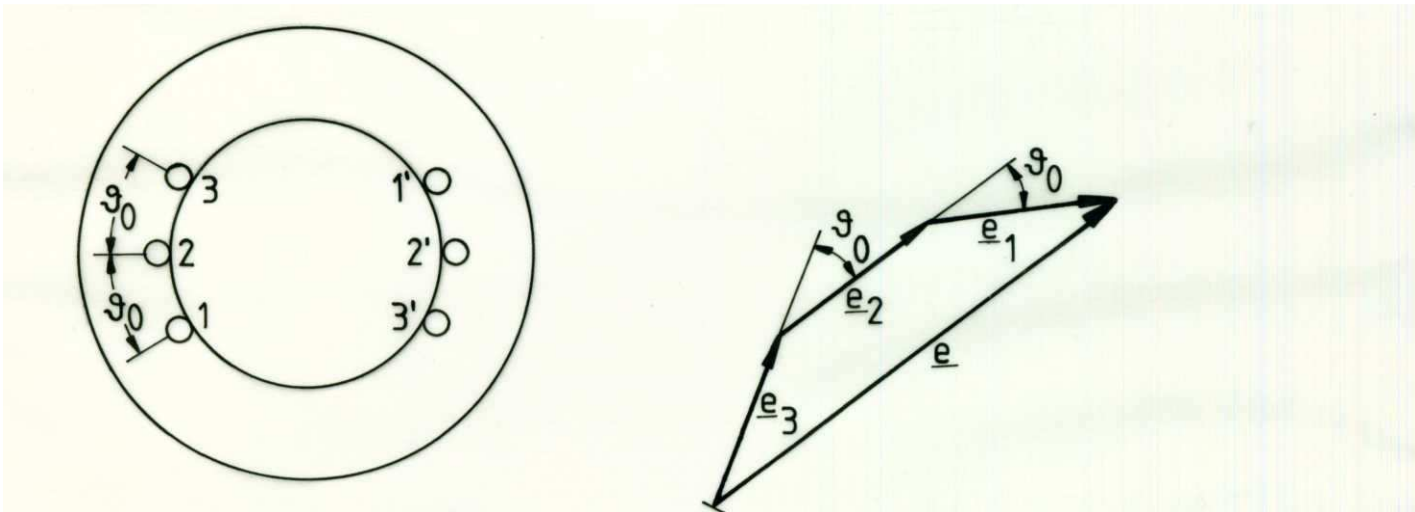


Bild 2-3: Zur geometrischen Addition der Windungsspannungen

Besteht der Wicklungsstrang aus  $w$  Windungen, die räumlich über einen bestimmten Bereich des Ständerumfangs verteilt sind, so wird in ihm die Spannung

$$e = 2w l B_{f_{max}} 2\pi rn \xi \sin\omega t \quad (2.5)$$

induziert.  $\xi$  ist dabei der Wickelfaktor, der berücksichtigt, dass die geometrische Summe der Windungsspannungen kleiner ist als die algebraische.  $\xi$  ist definiert als

$$\xi = \frac{\text{geometrische Summe der Windungsspannungen}}{\text{algebraische Summe der Windungsspannungen}}$$

Bild 2-4 zeigt die prinzipielle Wicklungsanordnung eines zweipoligen Drehstromgenerators

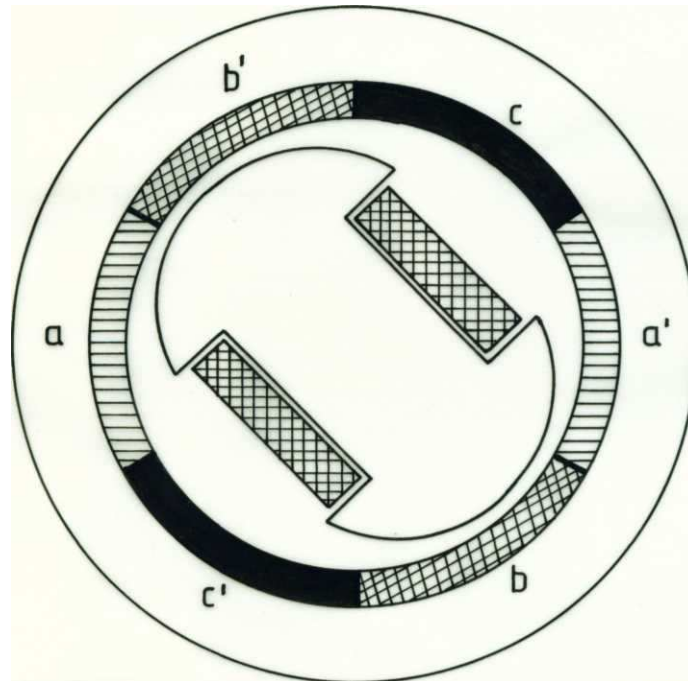


Bild 2-4: Prinzipielle Wicklungsanordnung eines zweipoligen Drehstromgenerators

Der Ständer (bei der Synchronmaschine auch als Anker bezeichnet) trägt eine gleichmäßig in Nuten verteilte dreiphasige Wicklung (Drehstromwicklung). Diese besteht aus drei einzelnen räumlich um je  $120^\circ$  am Ankerumfang gegeneinander versetzten Wicklungssträngen ( $a-a'$ ,  $b-b'$ ,  $c-c'$ ). Für die Spannungen dieser Wicklungsstränge gilt

$$e_a = 2w l 2\pi r n B_{f_{max}} \xi \sin\omega t = E_{max} \sin\omega t \quad (2.6a)$$

$$e_b = E_{max} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.6b)$$

$$e_c = E_{max} \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.6c)$$

mit  $w =$  *Windungszahl* und  $\xi =$  *Wickelfaktor*

Bild 2-5 zeigt eine vereinfachte, schematische Darstellung der Wicklungsstränge eines zweipoligen Synchrongenerators.

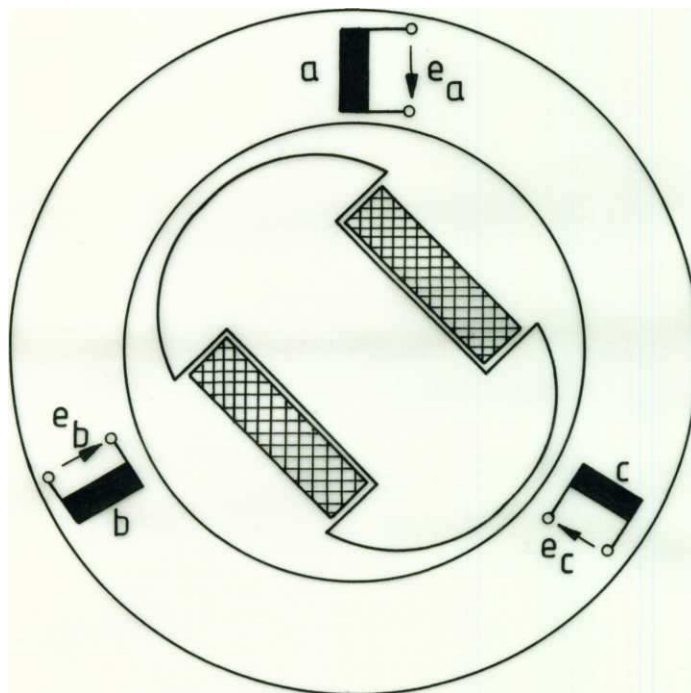


Bild 2-5: Schematische Darstellung der Ständerwicklung durch konzentrierte Spulen

Die in Wirklichkeit räumlich verteilten Wicklungen erscheinen als konzentrierte in den Wicklungsachsen liegende Spulen.

Die drei induzierten Spannungen bilden ein Drehspannungssystem, d.h. sie besitzen gleiche Amplituden und eine Phasenverschiebung um  $\frac{2\pi}{3} \triangleq 120^\circ$ . Die Amplitude ist abhängig von der Höhe der Erregung und der Drehzahl. Die Frequenz entspricht der Drehzahl des Polrades.

Bei Synchrongeneratoren werden die drei Wicklungsstränge meist im Stern geschaltet. Dadurch erhält man die größtmögliche Klemmenspannung, wenn die Maschine spannungsmäßig bis an die Grenze ihrer zulässigen Isolationsbeanspruchung ausgenutzt wird. Die Spannungen  $e_a$ ,  $e_b$ ,  $e_c$  sind dann die Strangspannungen oder auch Phasenspannungen des Systems. Die verketteten Spannungen liegen zwischen je zwei Außenleitern des Generators an. Ihre Effektivwerte sind um den Faktor  $\sqrt{3}$  größer als die

Strangspannungen. Die Nennspannung  $U_N$ , der Maschine bezeichnet immer eine verkettete Spannung.

## 2.2 Aufbau von Synchrongeneratoren

Den bisherigen Betrachtungen wurde ein Synchrongenerator in zweipoliger Ausführung zugrunde gelegt (ein Polpaar, d.h. Polpaarzahl  $p = 1$ ). Solche Maschinen werden wegen der hohen Fliehkraftbeanspruchung des Läufers nicht mit einem Polrad, sondern mit einem Vollpolläufer (Turboläufer) ausgeführt.

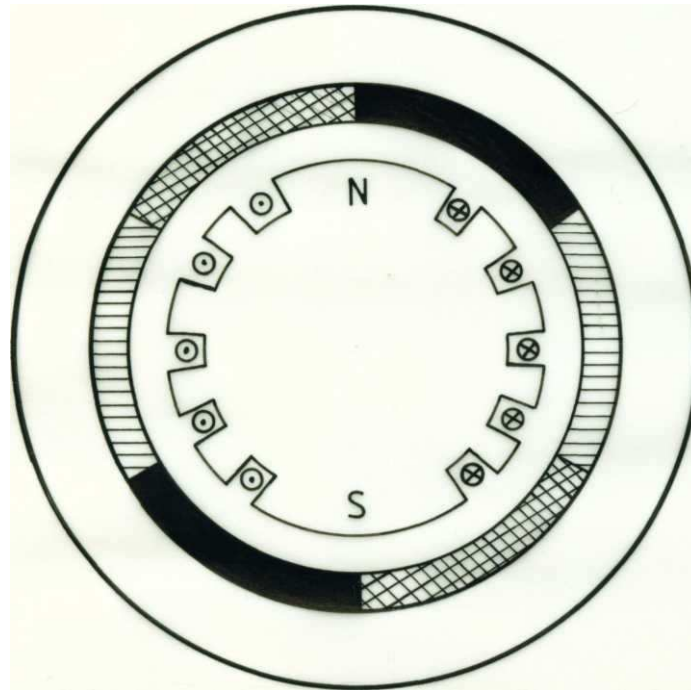


Bild 2-6: Synchrongenerator mit Vollpolläufer

Der Vollpolläufer besteht aus einem massiven, zylindrischen Läuferkörper aus Stahl, in den in axialer Richtung Nuten zur Aufnahme der Erregerwicklung eingefräst sind.

Eine Ausbildung des Läufers als Polrad wird speziell bei höherpoligen, langsamer laufenden Maschinen angewendet (Bild 2-7). Bei solchen höherpoligen Generatoren wird der elektrische Aufbau einer zweipoligen Maschine auf einen Bruchteil des Ständerumfangs zusammengedrängt und entsprechend der Polpaarzahl der Maschine wiederholt. Dementsprechend kleiner ist dann der Winkelausschnitt, den man einem Pol des Polrades zuordnen kann. Man bezeichnet diesen Ausschnitt als Polteilung  $\tau_p$ . Für  $\tau_p$  gilt:

$$\tau_p = \frac{\pi}{p} \quad (2.7)$$



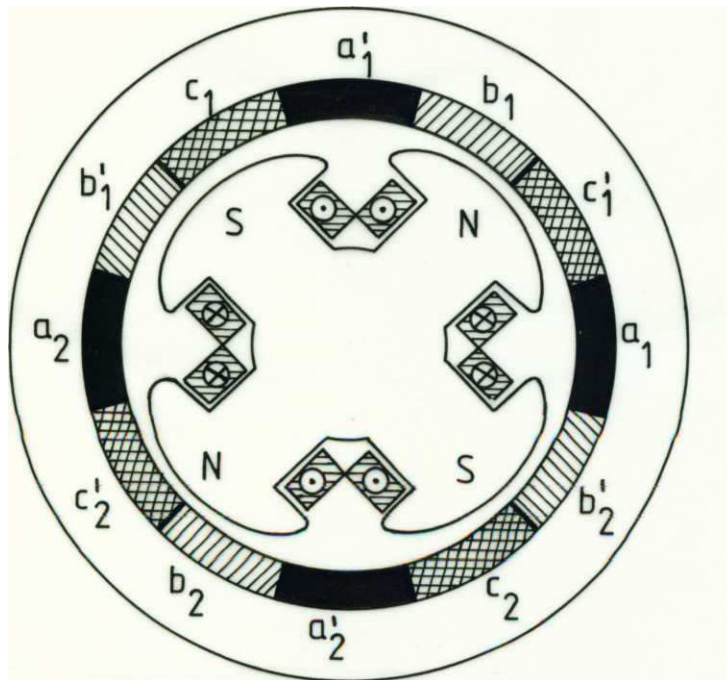


Bild 2-7: Schnitt durch einen vierpoligen Synchrongenerator

Der für zweipolige Generatoren erläuterte Zusammenhang zwischen dem zeitlichen Verlauf der induzierten Spannung und der räumlichen Stellung des Polrads (Gl. 2.3) bleibt auch bei höherpoligen Maschinen erhalten, wenn man den Lauferstellungswinkel  $\vartheta$  durch den elektrischen Winkel  $\vartheta_{el}$  ersetzt.  $\vartheta_{el}$  hängt mit dem räumlichen Winkel  $\vartheta$  gemäß der Beziehung

$$\vartheta_{el} = \vartheta \cdot p \quad (2.8)$$

zusammen, sodass einer Polteilung der Maschine immer ein elektrischer Winkel  $\pi$  entspricht.

Der Zusammenhang zwischen der Frequenz der induzierten Spannung und der Drehzahl hängt ebenfalls von der Polpaarzahl der Maschine ab. Aus der Beziehung

$$f = p \cdot n \quad \text{bzw.} \quad n = \frac{f}{p}$$

kann man entnehmen, dass bei einer vorgegebenen Netzfrequenz  $f$  Generatoren mit unterschiedlicher Polpaarzahl mit verschiedener Drehzahl betrieben werden müssen.

Außer der Erregerwicklung befindet sich noch die sog. Dämpferwicklung auf dem Läufer eines Synchrongenerators. Sie besteht meist aus Rundstäben, die in Nuten der Polschuhe liegen und an den Stirnseiten durch Ringe zu einer Art Käfig kurzgeschlossen werden ("Dämpferkäfig").

Beim Betrieb eines Synchrongenerators fallen in der Maschine Verluste an. Sie setzen sich zusammen aus

- Stromwärmeverlusten (Kupferverluste), infolge der ohmschen Widerstände der Wicklungen;
- Eisenverlusten, infolge der Ummagnetisierung des Ständereisens durch das Drehfeld;
- Reibungsverlusten, infolge der mechanischen Lagerreibung und der Luftreibung.

Die gesamte in der Maschine anfallende Verlustleistung liegt bei Nennbetrieb im Bereich weniger Prozente der Nennleistung. Die Verluste führen zu einer Erwärmung der Maschine, die den Leistungsbereich einschränkt. Um die Maschinen höher ausnutzen zu können, wird daher oft die Verlustleistung durch eine aktive Kühlung abgeführt (Kühlmedien: Luft, Wasserstoff, Wasser). Während bei Maschinen kleinerer Leistung prozentual höhere Verluste akzeptabel sind, müssen große Kraftwerksgeneratoren im 1000 MW-Bereich mit einem Wirkungsgrad von ca. 99 % ausgeführt werden.

## 2.3 Betriebsverhalten von Synchrongeneratoren

Betrachtet wird im folgenden ein Synchrongenerator mit Vollpoläufer, der mit konstanter Nenndrehzahl  $n_N$  angetrieben wird.

### 2.3.1 Leerlaufkennlinie

Der Generator sei zunächst unbelastet, d.h. es fließe kein Strom in den Ständerwicklungen. Die Höhe der in den drei Strangwicklungen induzierten Spannungen hängt von der Erregung ab. Trägt man die Strangspannung der Maschine als Funktion des Erregerstromes  $I_f$  in ein Diagramm ein, so erhält man die Leerlaufkennlinie (Bild 2-8). Diese verläuft im unteren Bereich linear, flacht sich aber bei größeren Erregerströmen ab, wenn das wachsende Feld das Eisen der Maschine in die Sättigung bringt. Beim Leerläufererregestrom  $I_{f0}$  steht zwischen zwei Klemmen des Generators gerade Nennspannung an.

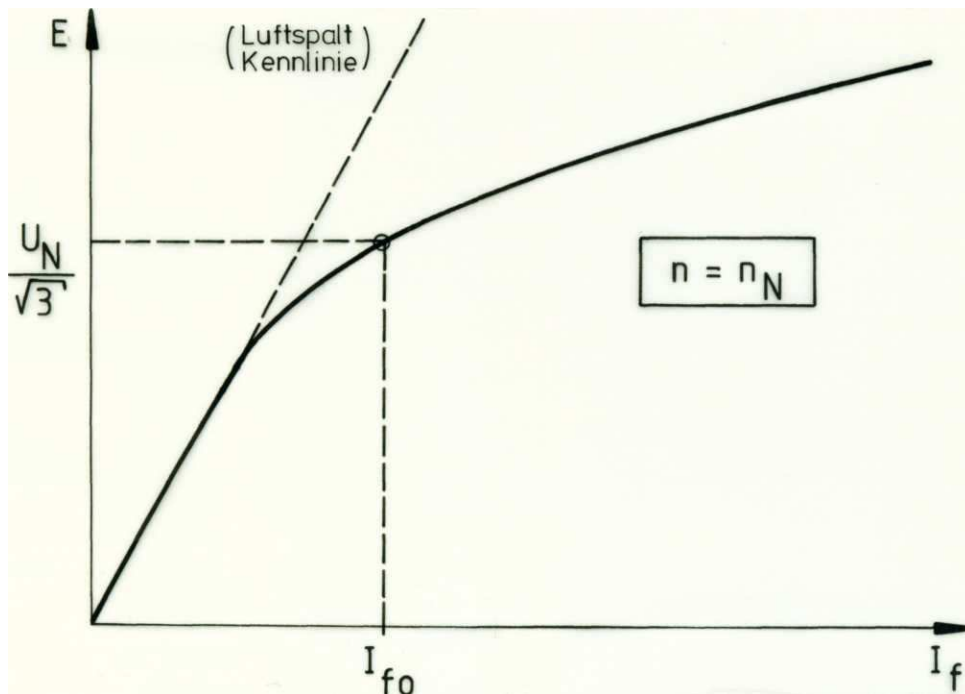


Bild 2-8: Leerlaufkennlinie

### 2.3.2 Drehfeldbildung

Wird die auf eine bestimmte Spannung erregte Maschine durch einen Verbraucher belastet, so kommen in den Strangwicklungen Ströme zum fließen. Aufgrund der Strangströme  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$  entstehen räumliche Wechselfelder.

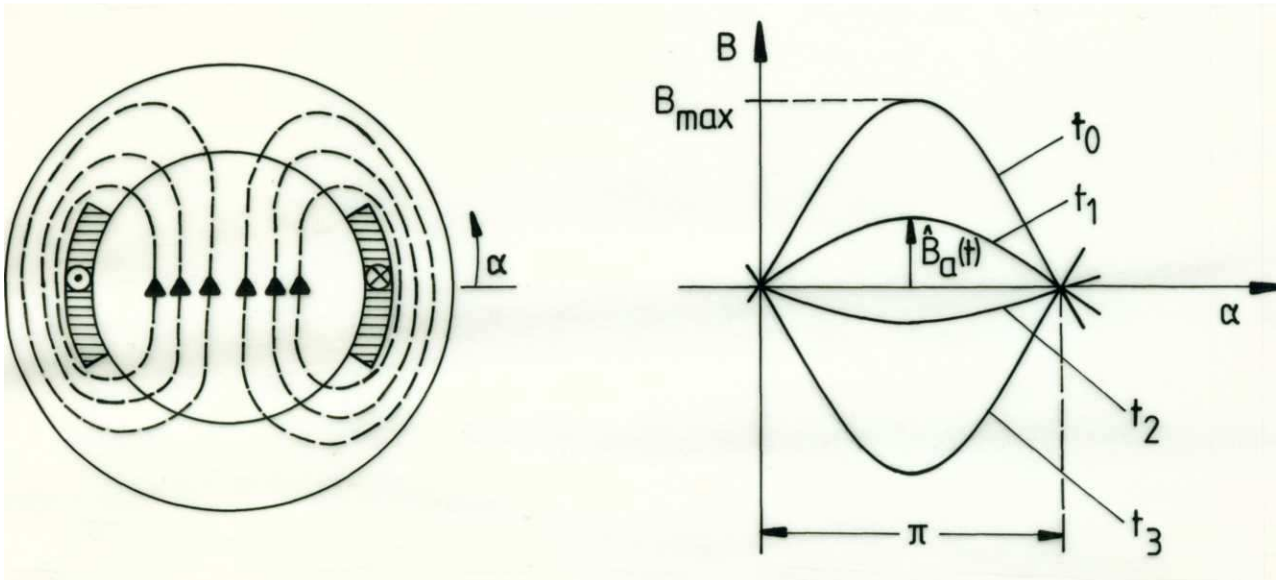


Bild 2-9: Grundwelle der von der Wicklung a erzeugten Induktion im Bereich einer Polteilung

Während ein Teil dieser Feldlinien durch den Luftspalt tritt (Luftspaltfeld) und sich über den Läufer schließt, bleibt ein kleinerer Teil der Feldlinien nur mit der Ständerwicklung alleine verkettet (Ständerstrefelder).

Das Betriebsverhalten der Synchronmaschine wird durch das Luftspaltfeld bestimmt. Dieses soll im folgenden näher betrachtet werden, wobei nur die Grundwelle berücksichtigt wird. Für die Amplituden der von den Strangströmen erzeugten Wechselfelder gilt:

$$\hat{B}_a(t) = B_{max} \cos \omega t \quad (2.9a)$$

$$\hat{B}_b(t) = B_{max} \cos(\omega t - 2\pi/3) \quad (2.9b)$$

$$\hat{B}_c(t) = B_{max} \cos(\omega t + 2\pi/3) \quad (2.9c)$$

Die drei Felder überlagern sich im Luftspalt der Maschine zu einem resultierenden Feld. Zur Beschreibung dieses Vorganges wendet man ebenfalls komplexe Zeigergrößen an. Da der

Zeiger der Darstellung der räumlichen Feldverteilung dient, wird er als Raumzeiger bezeichnet. Im Unterschied zum Zeiger in der komplexen Wechselstromrechnung, dessen Winkel eine Phasenlage angibt und der im stationären Fall stillsteht, dreht sich der Raumzeiger. Eine Periode des elektrischen Systems entspricht dabei bei einer Polpaarzahl von 1 einer Drehung um  $2\pi$ .

Zunächst wird ein komplexes Koordinatensystem so in die Maschinenschnittebene gelegt, dass die reelle Achse mit der Achse der Wicklung  $a$  zusammenfällt. Das von der Wicklung  $a$  verursachte Wechselfeld lässt sich dann durch einen Raumzeiger darstellen, der in der reellen Achse liegt und dessen Länge der zeitabhängigen Amplitude  $\hat{B}_a(t)$  des Wechselfelds entspricht

$$\underline{B}_a = \hat{B}_a(t) = B_{max} \cos \omega t \quad (2.10a)$$

Die beiden übrigen Raumzeiger liegen in den Achsen der Wicklungen  $b$  und  $c$ . Ihre Länge entspricht den Amplituden der Wechselfelder  $\hat{B}_b(t)$  und  $\hat{B}_c(t)$

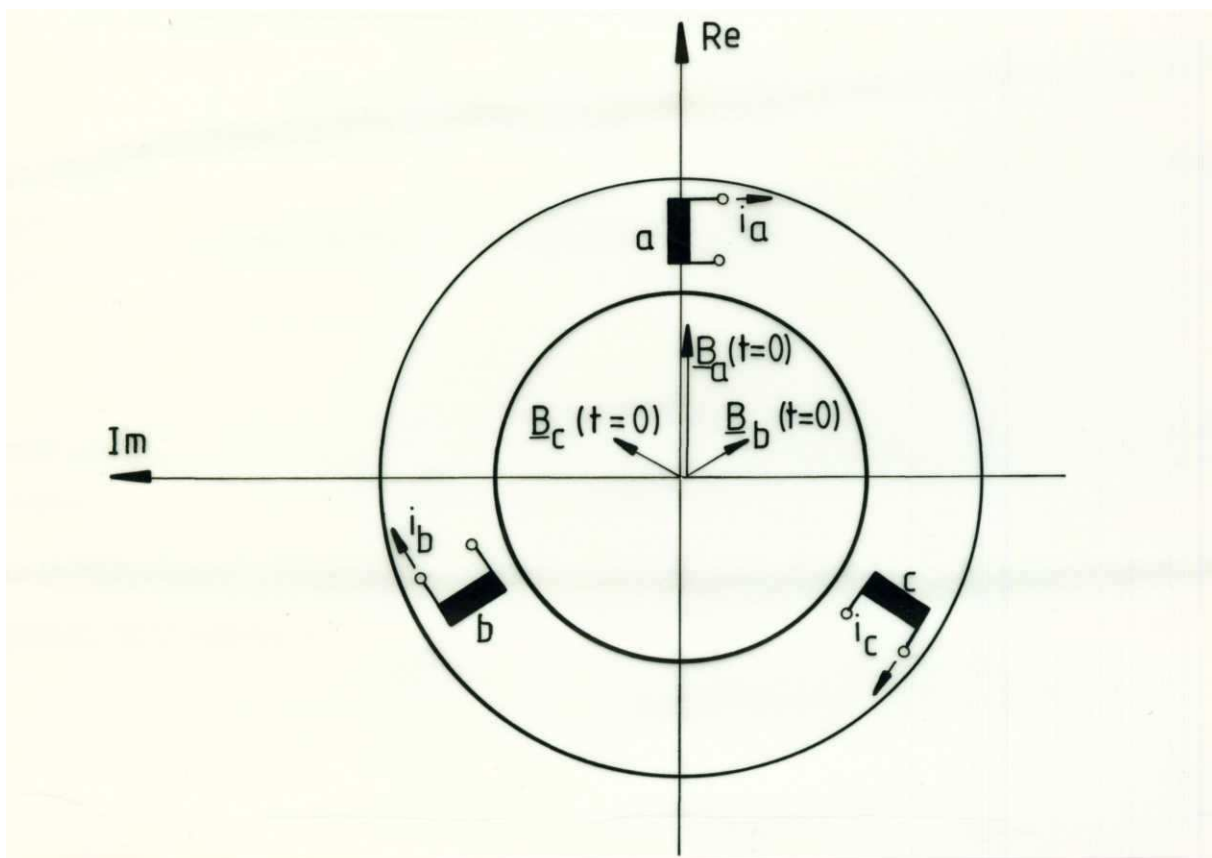


Bild 2-10: Zur Darstellung der Induktionsverteilung durch Raumzeiger

$$\underline{B}_b = \hat{B}_b(t)e^{j\frac{2\pi}{3}} = B_{max}\cos(\omega t - \frac{2\pi}{3})e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad (2.10b)$$

$$\underline{B}_c = \hat{B}_c(t)e^{-j\frac{2\pi}{3}} = B_{max}\cos(\omega t + \frac{2\pi}{3})e^{-j\frac{2\pi}{3}} \quad (2.10c)$$

Die Überlagerung dieser drei Felder ergibt den resultierenden Ständerfeldzeiger  $\underline{B}$

$$\underline{B} = \underline{B}_a + \underline{B}_b + \underline{B}_c = \frac{2}{3}B_{max}e^{j\omega t} \quad (2.11)$$

Dieser Zeiger  $\underline{B}$  beschreibt die Lage des Maximums der Flussdichte des Ständerfelds in der Maschine in Abhängigkeit von der Zeit. Er rotiert bei der hier betrachteten zweipoligen Ausführung des Synchrongenerators mit der Winkelgeschwindigkeit  $\omega = 2\pi f$ .  $B$  beschreibt also ein Drehfeld, das synchron mit dem Läufer umläuft.

Das resultierende Feld in der Maschine setzt sich schließlich zusammen aus dem Erregerfeld, das vom Polrad aus aufgebaut wird und im Leerlauf alleine vorhanden ist, und aus dem Ständerfeld  $\underline{B}$ . Je nach Phasenlage der Ständerströme (Belastung) kann das Ständerfeld das Erregerfeld stärken oder schwächen, was bei der geometrischen Addition der beiden Feldzeiger deutlich wird (Ankerrückwirkung).

### 2.3.3 Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm

Zur Untersuchung der Strom- und Spannungsverhältnisse eines Synchrongenerators im stationären Betrieb verwendet man dessen Ersatzschaltbild. Dabei genügt die Darstellung eines Stranges, da im stationären symmetrischen Betrieb die Vorgänge in allen drei Strängen gleich sind und nur mit einer Phasenverschiebung von  $\pm \frac{2\pi}{3}$  ablaufen.

Geht man davon aus, dass die Klemmenspannung  $U$  der Maschine festgelegt ist, so stellt sich ein Ständerstrom  $I$  ein, dessen Betrag und Phasenlage ( $\cos\varphi$ ) durch die angeschlossene Last bestimmt ist. Dieser Ständerstrom verursacht außer dem Spannungsabfall am Wicklungswiderstand  $R_1$  ein Feld in der Maschine. Der Zusammenhang zwischen Feld und Strom kann durch eine Reaktanz (synchrone Reaktanz  $X_d$ ) beschrieben werden. Entsprechend der Aufteilung des Ständerfelds in ein Streufeld und einen Teil, der durch den Luftspalt tritt, teilt man auch die Reaktanz häufig auf in die Streureaktanz  $X_{1\sigma}$  und die Hauptreaktanz  $X_h$ .

$$X_d = X_h + X_{1\sigma} \quad (2.12)$$

Damit sind aber die stationären Zusammenhänge zwischen Strom und Spannung in einem Synchrongenerator noch nicht vollständig beschrieben, denn auch das vom Polrad aufgebaute Erregerfeld induziert eine Wechselspannung in der betrachteten Strangwicklung. Diese Spannung ist nicht vom Ständerstrom abhängig und kann somit auch nicht in Form einer Reaktanz im Ersatzschaltbild erscheinen. Vielmehr muss sie als Quellenspannung  $E_p$  (Polradspannung) berücksichtigt werden. Die Amplitude der Polradspannung hängt vom Erregerstrom  $I_f$  ab, die Phasenlage kann aus dem Winkel zwischen Ständerfeld und Erregerfeld abgeleitet werden.

Als einphasiges Ersatzschaltbild des Synchrongenerators im stationären Betrieb ergibt sich also die in Bild 2-11 dargestellte Anordnung.

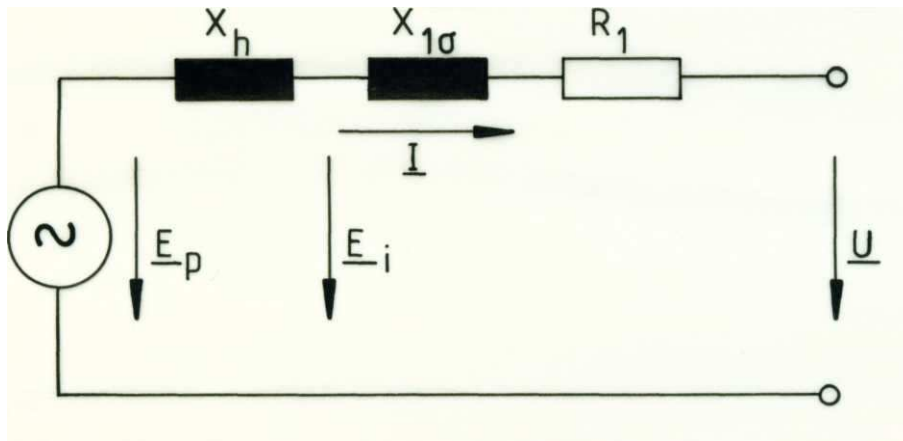


Bild 2-11: Ersatzschaltbild eines Stranges eines Synchrongenerators mit Vollpoläufer

Eine weitergehende Verdeutlichung der Zusammenhänge ist mit Hilfe des Zeigerdiagramms (*Bild 2-12*) möglich. Dort werden die in einem Strang auftretenden Spannungen und Ströme als komplexe Wechselstromzeiger (keine Raumzeiger!) dargestellt. Als Länge der Zeiger wählt man die Effektivwerte von Strömen und Spannungen, da dann die interessierenden Größen leicht aus dem Zeigerdiagramm abgelesen werden können.

Zunächst legt man den Zeiger der Klemmenspannung  $\underline{U}$  in die reelle Achse. Bei bekannter Belastung des Generators ist auch der Ständerstromzeiger  $\underline{I}$  nach Betrag und Phase festgelegt. Addiert man zur Klemmenspannung  $\underline{U}$  den Spannungsabfall, den der Strom  $\underline{I}$  am Wicklungswiderstand  $R_1$  und an der Ständerstreureaktanz  $X_{1\sigma}$  verursacht, so gelangt man zur Spannung  $\underline{E}_i$ , die vom resultierenden Luftspaltfeld in der Wicklung des betrachteten Stranges induziert wird.

Entsprechend der Vorstellung, dass sich das resultierende Drehfeld in der Maschine aus dem Ständerfeld und dem Erregerfeld zusammensetzt, kann man sich auch die in der untersuchten Strangachse auftretende Wechselfeldkomponente in zwei Anteile zerlegt denken. Anstelle der Felder trägt man im Zeigerdiagramm die erzeugenden Ströme ein. Dem Erregerfeld entspricht dann ein Stromzeiger  $\underline{I}_f$ , der sich ergibt, wenn man den räumlich rotierenden Erregerstromzeiger in die Strangachse projiziert und die entstehende Wechselgröße als Zeitzeiger darstellt. Dem Ständerfeld entspricht unmittelbar der zeitliche Ständerstromzeiger  $\underline{I}$ .



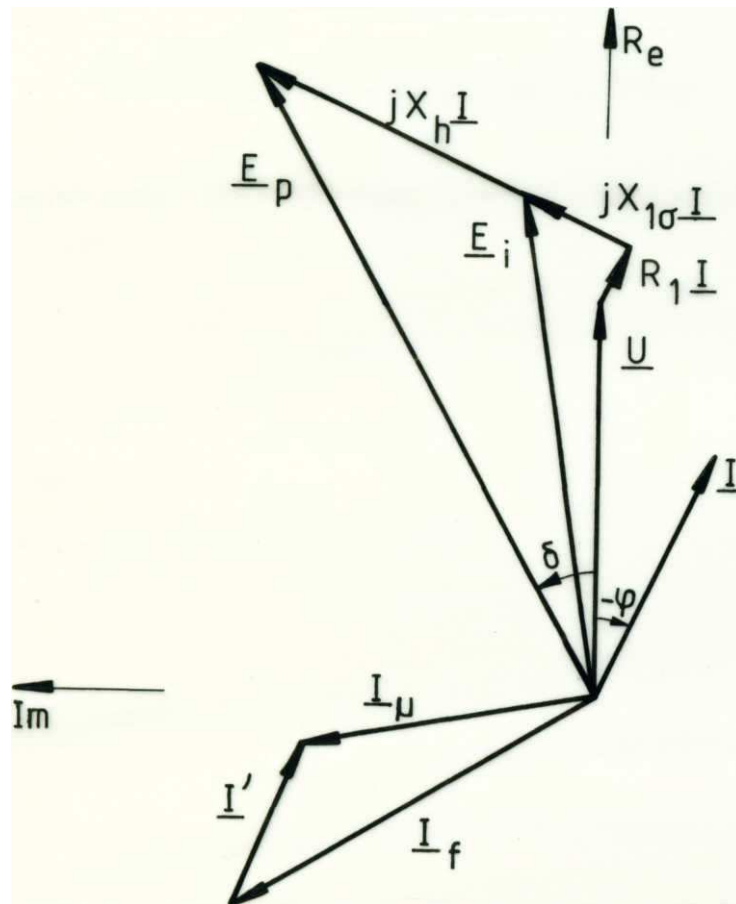


Bild 2-12: Zeigerdiagramm eines Vollpolsynchrongenerators mit ohmsch induktiver Last.

Da das Ständerfeld je nach Phasenlage des Stromes  $\underline{I}$  eine unterschiedliche Lage zum Erregerfeld einnimmt, müssen auch die beiden Stromzeiger geometrisch addiert werden. Um diese geometrische Addition im Zeigerdiagramm durchführen zu können, werden alle Ströme auf die Läuferseite umgerechnet. Der in der Ständerwicklung fließende Strom  $\underline{I}$  ergibt einen äquivalenten Strom  $\underline{I}'$  auf der Läuferseite

$$\underline{I}' = g \cdot \underline{I} \quad (2.13)$$

Die Summe aus  $\underline{I}_f$  und  $\underline{I}'$  ergibt den resultierenden Magnetisierungsstrom  $\underline{I}_\mu$ , der dem resultierenden Feld entspricht.  $\underline{I}_\mu$  eilt der Spannung  $\underline{E}_i$  um  $\pi/2$  (zeitlich) voraus. Den Zusammenhang zwischen  $|\underline{E}_i|$  und  $|\underline{I}_\mu|$  liefert näherungsweise die Luftspaltkennlinie (Bild 2-8).

Ebenso wie die Felder bzw. Ströme kann man auch die von ihnen induzierten Spannungen zusammensetzen. Dabei entspricht die fiktive Polradspannung  $\underline{E}_p$  dem Erregerstrom  $\underline{I}_f$ , die innere Spannung  $\underline{E}_i$  dem Magnetisierungsstrom  $\underline{I}_\mu$ . Die vom Ständerfeld des Stromes  $\underline{I}$  in der Ständerwicklung induzierte Spannung entspricht dem Spannungsabfall des Stromes  $\underline{I}$  an der Reaktanz  $X_h$ . Der Winkel  $\delta$ , der von den Zeigern  $\underline{U}$  und  $\underline{E}_p$  aufgespannt wird heißt Lastwinkel.

### 2.3.4 Berechnung des Drehmoments

Es gibt zwei grundsätzlich verschiedene Wege, das Drehmoment eines Synchrongenerators zu ermitteln. Zum einen ist es möglich, die Kräfte zu berechnen, die auf die stromdurchflossenen Leiter unter dem Einfluss des Magnetfeldes ausgeübt werden, und die Kräfte anschließend aufzusummieren. Eine einfachere Möglichkeit besteht darin, das Drehmoment aus einer Leistungsbilanz abzuleiten. Dieser Weg soll hier verfolgt werden.

Die vom Generator an den Klemmen abgegebene Wirkleistung ist

$$P = \operatorname{Re}\{3 \cdot \underline{U} \underline{I}^*\} \quad (2.14)$$

Ersetzt man die Strangspannung  $\underline{U}$  durch die Beziehung

$$\underline{U} = \underline{E}_p - R_1 \underline{I} - jX_d \underline{I} \quad (2.15)$$

so erhält man

$$P = 3\operatorname{Re}\{\underline{E}_p \underline{I}^*\} - 3\operatorname{Re}\{R_1 \underline{I} \underline{I}^*\} - 3\operatorname{Re}\{jX_d \underline{I} \underline{I}^*\}$$

und mit  $\underline{I} \underline{I}^* = |\underline{I}|^2$

$$P = 3\operatorname{Re}\{\underline{E}_p \underline{I}^*\} - 3R_1 |\underline{I}|^2 = P_\delta - P_v \quad (2.16)$$

In dieser Beziehung gibt  $P_v = 3R_1 |\underline{I}|^2$  die ohm'schen Verluste in der Ständerwicklung an und  $P_\delta$  die sogenannte "Drehfeldleistung".  $P_\delta$  wird über den Luftspalt der Maschine zugeführt und ist maßgebend für das entwickelte Drehmoment. Die Eisenverluste treten in dieser Beziehung nicht auf, da sie bereits bei der Herleitung der Spannungsgleichung (2.15) vernachlässigt wurden. Die Verluste in der Läuferwicklung gehen ebenfalls nicht in die Leistungsbilanz ein, da sie aus einem getrennten Netz gedeckt werden.

Vernachlässigt man für die weiteren Überlegungen den Ständerwiderstand  $R_1$ , der bei großen Maschinen ohnehin sehr kleine Werte annimmt, so ergibt sich der Ständerstrom zu:

$$\underline{I} = j \frac{U}{X_d} - j \frac{E_p}{X_d} \quad (2.17)$$

und die Drehfeldleistung wird

$$P_\delta = 3 \operatorname{Re}\{\underline{E}_p(-j \frac{U}{X_d} + j \frac{E_p^*}{X_d})\} \quad (2.18)$$

Einsetzen von  $\underline{E}_p = E_p e^{j\delta}$  und Realteilbildung liefert

$$P_\delta = 3 \frac{UE_p}{X_d} \sin\delta \quad (2.19)$$

Das Drehmoment ist damit

$$D_M = \frac{P_\delta p}{\omega} = \frac{3pUE_p}{\omega X_d} \sin\delta \quad (2.20)$$

In Bild 2-13 ist die sinusförmige Abhängigkeit des Drehmoments  $D_M$  vom Lastwinkel  $\delta$  veranschaulicht

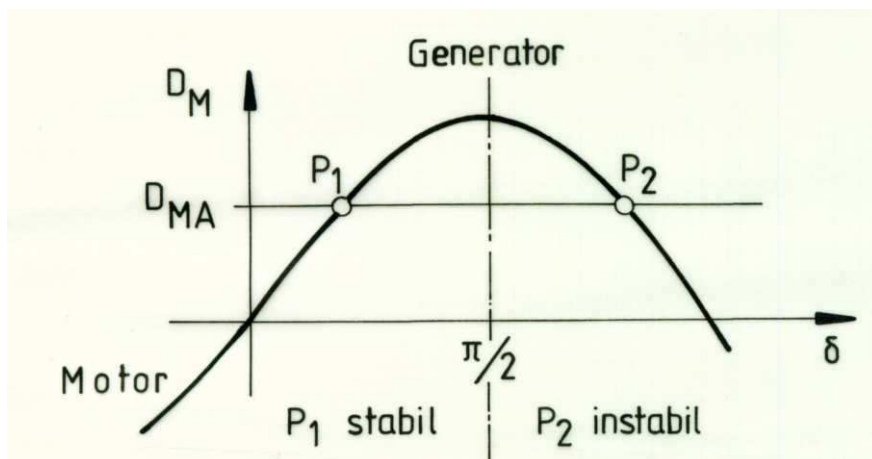


Bild 2-13: Drehmomentkennlinie des Synchrongenerators

Das maximale Drehmoment  $D_{MK}$  (Kippmoment) ergibt sich bei einem Lastwinkel  $\delta = \frac{\pi}{2}$ . Es hat den Wert

$$D_M = \frac{3pUE_p}{\omega X_d} \sin\delta$$

Es hängt also ab von den Maschinenparametern  $p$  und  $X_d$ , von der Frequenz  $\omega$ , der Klemmenspannung  $U$  und dem Betrag der Polradspannung  $|\underline{E}_p|$

### 2.3.5 Spezielle Betriebsbedingungen

Inselbetrieb:

Befinden sich in einem Netz außer einem Synchrongenerator nur passive Verbraucher, dann spricht man von einem "Inselnetz" bzw. von "Inselbetrieb" des Synchrongenerators. Spannung und Frequenz dieses Netzes werden allein von der Synchronmaschine bestimmt (Spannung über Spannungsregelung, Frequenz über Drehzahlregelung der Turbine).

Verbundbetrieb:

Im Gegensatz zum Inselbetrieb arbeitet hier eine große Zahl von Generatoren zusammen und speist die angeschlossenen Verbraucher. Frequenz und Spannung werden durch die Vielzahl der im Netz befindlichen Maschinen festgelegt. Der Einfluss der einzelnen Maschine ist gering. Ein theoretischer Grenzfall, dem der Verbundbetrieb sehr nahe kommt, ist der

"Betrieb am starren Netz":

Spannung  $U$ , Phasenlage und Frequenz des Netzes sind fest vorgegeben, d.h. die einzelne Maschine hat darauf keinen Einfluss.

Synchronisieren:

Beim Zuschalten eines auf Spannung erregten, von der Turbine angetriebenen Synchrongenerators auf ein Netz sind folgende Synchronisierbedingungen einzuhalten:

1. Richtiger Drehsinn bzw. richtige Phasenfolge der Spannungssysteme von Netz und Generator.
2. Die Spannungen müssen gleiche Frequenz, Amplitude und Phasenlage besitzen. Bei Fehlsynchronisation entstehen eventuell schwerwiegende Folgen durch hohe Ausgleichsströme oder mechanische Beschädigungen.

### 2.3.6 Beeinflussung des Betriebszustands

Betrieibt man einen Synchrongenerator an einem starren Netz, so ist eine Beeinflussung seines Betriebszustands auf zwei Wegen möglich:

- 1) Eingriff über die Erregung, d.h. Änderung der Polradspannung bei konstantem Drehmoment.

Geht man vom idealen Leerlauf des Generators aus ( $\underline{I} = 0; \underline{U} = \underline{E}_p$ ) und vernachlässigt man den Ständerwiderstand ( $R_1 = 0$ ), dann bleiben bei einer Verstellung des Erregerstroms  $I_f$  die Spannungszeiger  $\underline{U}$  und  $\underline{E}_p$  weiterhin in Phase (*Bild 2-14*). Aufgrund der Betragsdifferenz der beiden Spannungen kommt ein Strom zum fließen, der bei  $|\underline{E}_p| > |\underline{U}|$  der Spannung um  $90^\circ$  nacheilt, bzw. bei  $|\underline{E}_p| < |\underline{U}|$  der Spannung um  $90^\circ$  vorausseilt. Während der Generator also im einen Fall ( $|\underline{E}_p| > |\underline{U}|$ ) induktive Blindleistung ans Netz abgibt, speist er im anderen Fall ( $|\underline{E}_p| < |\underline{U}|$ ) kapazitive Blindleistung ins Netz ein. In beiden Fällen kommt aber ein reiner Blindleistungsaustausch mit dem Netz zustande.

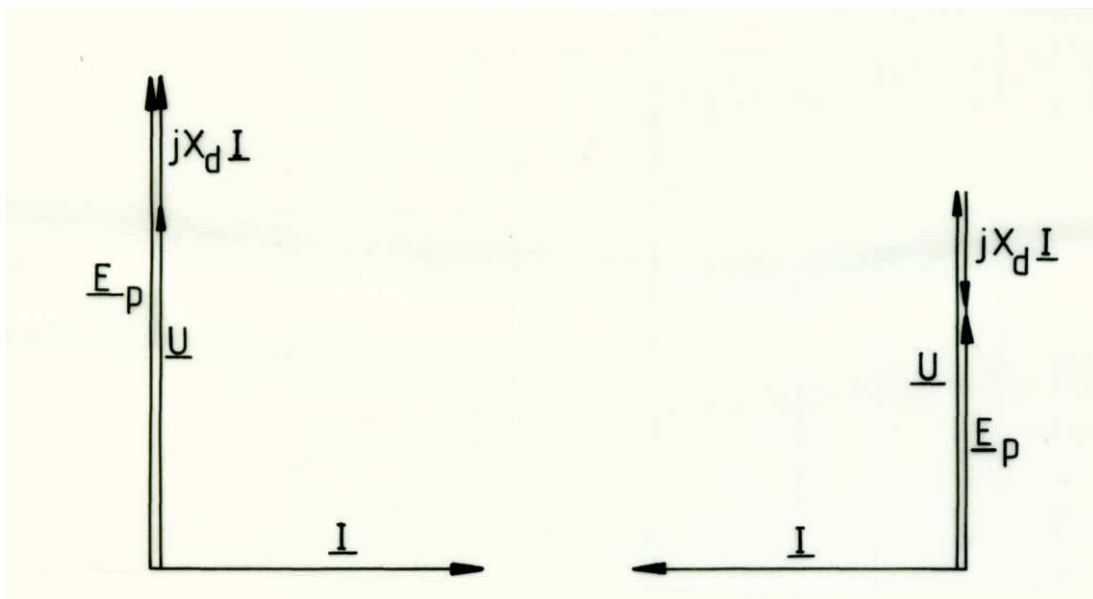


Bild 2-14: Zeigerdiagramme des Synchrongenerators im Leerlauf bei unterschiedlichen Erregerströmen

- 2) Eingriff über die Welle, d.h. Änderung des antreibenden Drehmoments bei konstantem Erregerstrom

Da der Betrag der Polradspannung  $E_p$  in diesem Fall konstant bleibt, kann der Synchrongenerator auf eine Änderung des antreibenden Drehmoments nur mit einer Phasenverschiebung zwischen den Spannungszeigern  $\underline{U}$  und  $\underline{E}_p$  reagieren.

Geht man vom mechanisch unbelasteten Zustand ( $D_M = 0$ ) bei übererregtem Betrieb des Generators aus, so wird ein positiver Lastwinkel  $\delta$  auftreten, wenn die Maschine an der Welle angetrieben wird. Die Phasenverschiebung zwischen  $\underline{U}$  und  $\underline{E}_p$  hat zur Folge, dass der Ständerstrom, der im Leerlauf ein reiner Blindstrom war, bei weitgehend unverändertem Imaginärteil eine reelle Komponente erhält.

Allgemein kann man sagen, dass eine Änderung des an der Welle angreifenden Drehmoments in erster Linie den Wirkleistungsaustausch des Synchrongenerators mit dem Netz beeinflusst.

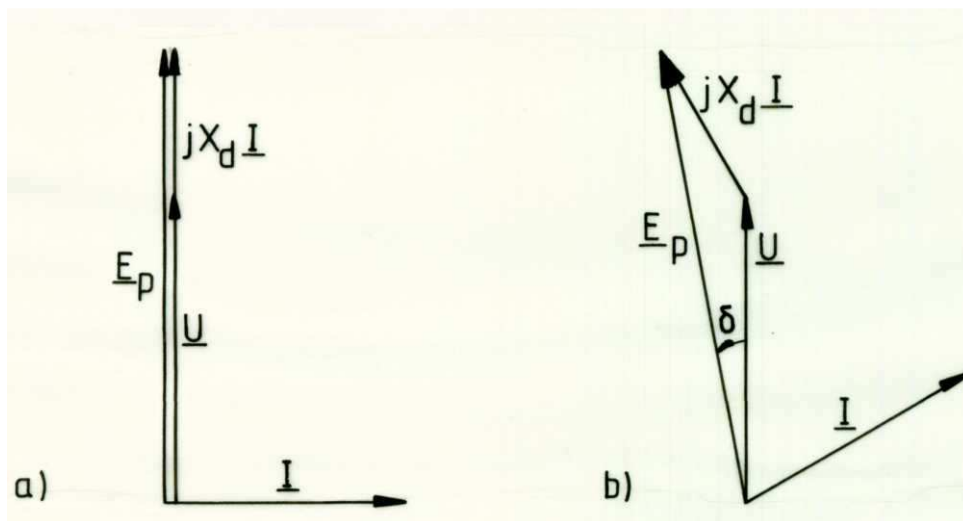


Bild 2-15: Zeigerdiagramme des Synchrongenerators für

a)  $D_M = 0$  und b)  $D_M > 0$



### 2.3.7 Kreisdiagramm

Vernachlässigt man in der Spannungsgleichung (Gl. 2.15) des Synchrongenerators den Ständerwiderstand und löst nach dem Ständerstrom auf, so erhält man

$$\underline{I} = j \frac{U}{X_d} - j \frac{E_p}{X_d} e^{j\delta} \quad (2.21)$$

Dies ist die Gleichung für die Ortskurven des Ständerstroms mit  $E_p$  und  $\delta$  als Parameter. Der Zeiger  $j \frac{U}{X_d}$  legt den Mittelpunkt einer Schar von Kreisen fest, deren Radius  $|\frac{E_p}{X_d}|$  von der Erregung des Generators abhängt. Durch den Lastwinkel  $\delta$  wird bei bekannter Erregung ein Betriebspunkt und der dazugehörige Ständerstrom eindeutig festgelegt.

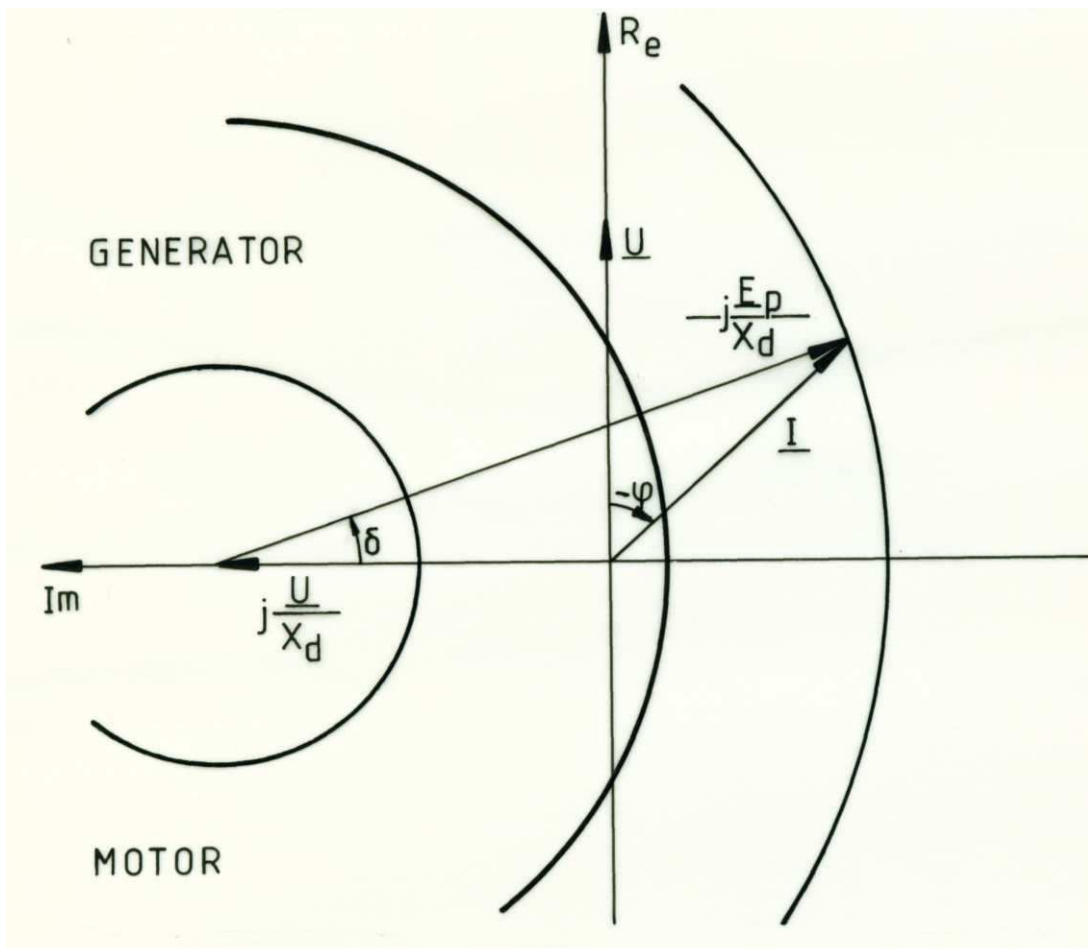


Bild 2-16: Kreisdiagramm des Vollpolsynchrongenerators

### 2.3.8 Stabilität und Pendelungen

Für eine konstant erregte Synchronmaschine am starren Netz ergibt sich eine eindeutige Drehmomentkennlinie (Bild 2-13), bei der zwei Betriebsbereiche, der generatorische ( $D_M > 0$ ) und der motorische ( $D_M < 0$ ) unterschieden werden. Diese sind gekennzeichnet durch  $\delta > 0$  bzw.  $\delta < 0$ .

Stabilität: Anhand der  $D_M/\delta$ -Kennlinie lässt sich der Lastwinkel  $\delta$  ermitteln, der sich bei einem bestimmten Drehmoment einstellt. Zwar ergeben sich aus der Bedingung für stationären Betrieb  $D_{MA} = D_M$  (das antreibende Drehmoment der Turbine ist gleich dem elektrischen Drehmoment des Generators) zwei Schnittpunkte mit der  $D_M/\delta$ -Kennlinie, von diesen ist aber nur der Punkt  $P1$  ( $|\delta| < \pi/2$ ) stabil.

Dies wird plausibel, wenn man kleine Auslenkungen aus den Betriebspunkten  $P1$  und  $P2$  betrachtet. Erfolgt eine Auslenkung aus  $P1$  zu größeren  $\delta$ -Werten hin, so nimmt das elektrische Drehmoment  $D_M$  des Generators zu. Die resultierende Differenz  $D_{MA} - D_M < 0$  wirkt bremsend auf die Generatorwelle, was wieder zu einer Verkleinerung des Lastwinkels führt. Umgekehrt hat eine Auslenkung aus  $P1$  zu kleineren Winkeln  $\delta$  hin eine Abnahme des elektrischen Drehmoments zur Folge. Das Übergewicht des mechanisch antreibenden Drehmoments ( $D_{MA} - D_M > 0$ ) beschleunigt dann die Motorwelle, und führt zu einer Vergrößerung des Winkels  $\delta$  und damit zu einer Rückkehr in den stabilen Arbeitspunkt  $P1$ . Entsprechende Überlegungen zeigen dass bei einer Auslenkung aus  $P2$  der Generator nicht in diesen Betriebspunkt zurückkehrt.

Generell gilt, dass bei Synchrongeneratoren mit Vollpoläufer stabiler Betrieb nur bei Lastwinkeln im Bereich  $|\delta| < \frac{\pi}{2}$  möglich ist.

Pendelungen: Probleme beim Betrieb von Synchrongeneratoren am Netz können sich aus der Tatsache ergeben, dass die Maschine dazu neigt, bei plötzlichen Laständerungen Pendelschwingungen um die synchrone Drehzahl auszuführen.

Zur Beschreibung dieser Schwingungen geht man von der Dgl. (2.22) aus, die das Zusammenwirken von Turbine und Generator beschreibt.

$$dM_A - dM = 2 \pi \theta \frac{dn}{dt} \quad (2.22)$$

Nimmt man an, dass die Drehzahl nur kleine Abweichungen von der synchronen Drehzahl  $n_s$  erfährt, so gilt

$$n(t) = n_s + \frac{d}{dt} \left( \frac{\delta}{2 \pi p} \right) = n_s + \frac{1}{2 \pi p} \dot{\delta} \quad (2.23)$$

Diese Gleichung besagt, dass eine Änderung des Lastwinkels, wie sie bei Übergangsvorgängen auftritt, zu Abweichungen zwischen mechanischer und synchroner Drehzahl führt.

Setzt man in Gl. (2.22) die Drehmomentgleichung (2.20) und die nach der Zeit differenzierte Beziehung (2.23) ein, so erhält man Gleichung (2.24)

$$\frac{\theta}{p} \ddot{\delta} + \frac{3p}{\omega} \cdot \frac{E_p U}{X_p} \sin \delta = dM_A \quad (2.24)$$

Dies ist die Dgl. eines ungedämpft schwingenden Systems.

Bei realen Maschinen muss auf der linken Seite in Gl. (2.24) noch ein Term  $K_D \cdot \dot{\delta}$  berücksichtigt werden, der ein dämpfendes Moment beschreibt, das von den stets vorhandenen Dämpferwicklungen hervorgerufen wird. Außerdem gilt die verwendete Drehmomentbeziehung (Gl. 2.20) streng genommen nur für stationären Betrieb. Trotzdem zeigt Gleichung (2.24), dass die Maschine durch Änderungen des Antriebsdrehmoments oder durch Netzstörungen zu Pendelungen angeregt werden kann.

## 2.4 Kurzschlussvorgänge bei Synchrongeneratoren

Beim Kurzschluss eines auf Spannung erregten Generators spielt sich ein Übergangsvorgang ab, der in einen stationären Vorgang übergeht.

Unterscheidung zwischen dem eigentlichen Übergangsvorgang, Stoßkurzschluss genannt, und dem Dauerkurzschluss.

### 2.4.1 Dauerkurzschluss

Zustand nach Abklingen aller Übergangsvorgänge. Bild 2-17 zeigt das Ersatzschaltbild und das Zeigerdiagramm für dreipoligen Kurzschluss ( $R_1$  vernachlässigt).

Das Zeigerdiagramm macht deutlich, dass im Kurzschluss die innere Spannung  $E_i$  nur die Streureaktanz zu überwinden hat, d.h. das resultierende Feld ist infolge der starken Ankerrückwirkung (Spannungsabfall  $jX_h I_K$ ) relativ gering.

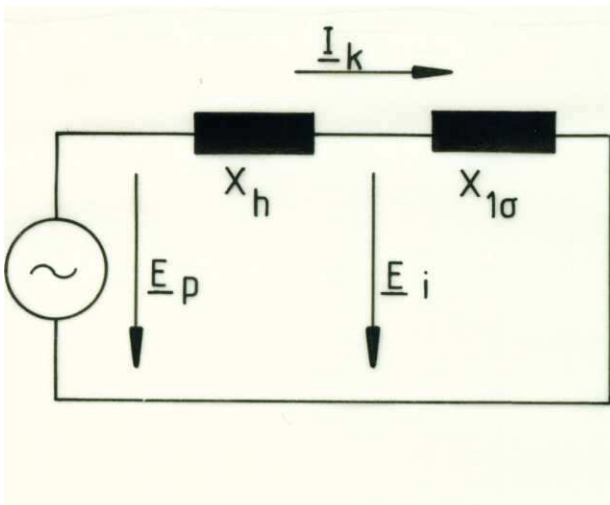


Bild 2-17a

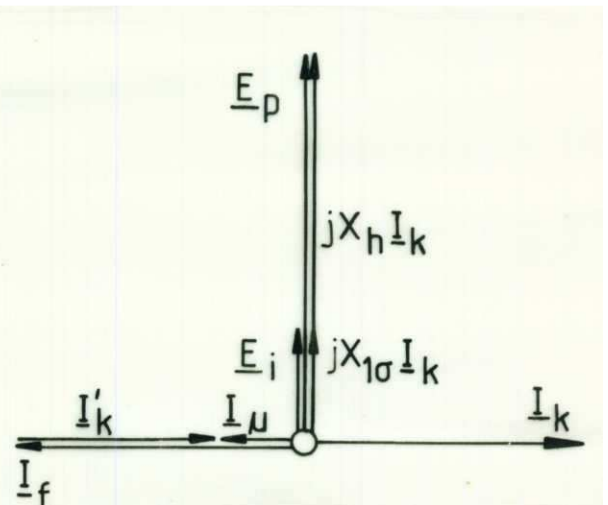


Bild 2-17b

Man bewegt sich daher beim Kurzschluss auch bei größeren Strömen nur im linearen Teil der Leerlaufkennlinie. Der Zusammenhang zwischen dem Kurzschlussstrom und dem dafür erforderlichen Erregerstrom ist deswegen eine Gerade, die Kurzschlusskennlinie.

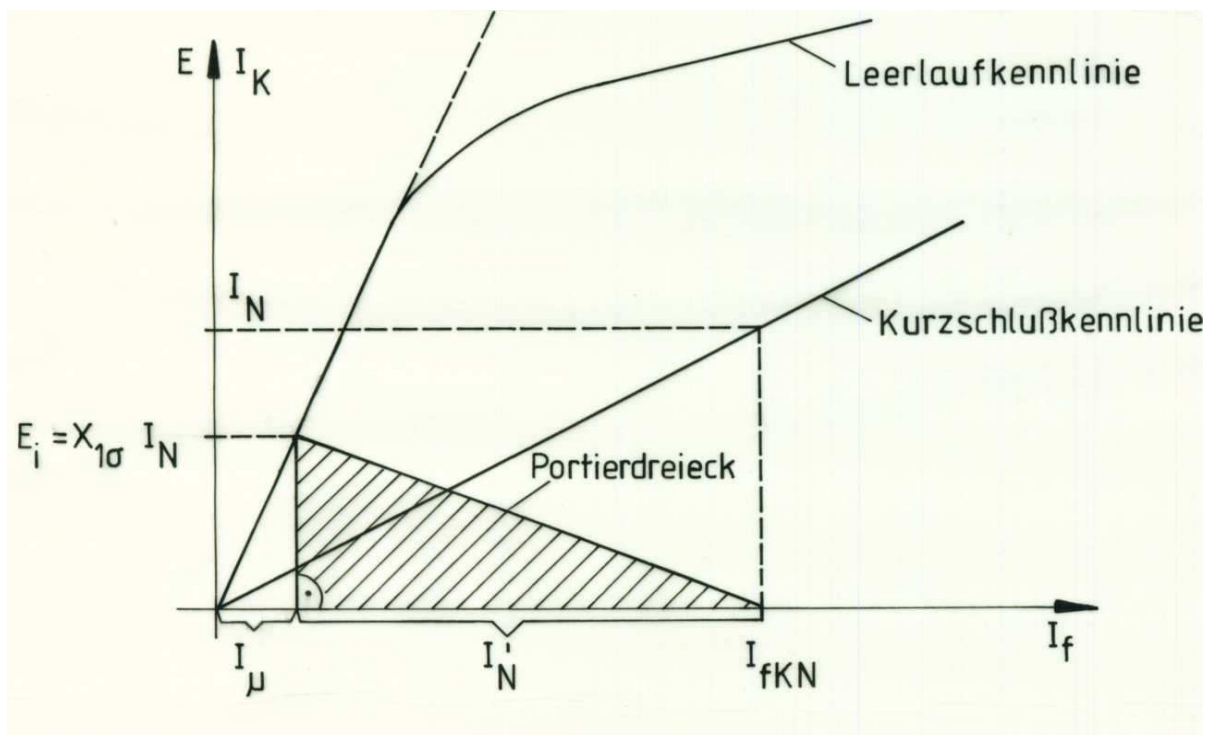


Bild 2-18: Leerlauf- und Kurzschlusskennlinie

Kurzschlussdreieck (Potierdreieck):

In das Diagramm 2-18 lässt sich das sog. Potierdreieck eintragen. Man erhält es, wenn man ausgehend von dem Erregerstrom  $I_{fKN}$  den auf die Läuferseite umgerechneten Ständerstrom  $I'_N$  abträgt. Da der Generator im Kurzschluss rein induktiv "belastet" wird, liegen  $I_{fKN}$  und  $I'_N$  in Phase. Die Differenz zwischen  $I_{fKN}$  und  $I'_N$  entspricht also dem resultierenden Magnetisierungsstrom  $I_\mu$  und damit dem resultierenden Feld in der Maschine. Über  $I_\mu$  kann man mit Hilfe der Leerlaufkennlinie die Spannung  $\underline{E}_i$  ermitteln, die im Kurzschluss gerade dem Spannungsabfall an der Ständerstreureaktanz entspricht.

Das Potierdreieck ist ein rechtwinkliges Dreieck, dessen Seitenlängen dem Ständerstrom proportional sind. Es kann zur Ermittlung der Ständerstreureaktanz und zur Ermittlung des Erregerbedarfs verwendet werden.

### 2.4.2 Stoßkurzschluss

Man versteht darunter den transienten Ausgleichsvorgang beim Kurzschließen eines auf Spannung erregten Generators, der im Schalt Augenblick beginnt und mit dem Übergang in den Dauerkurzschluss endet. Durch kurzzeitig auftretende hohe Stromspitzen ist eine dynamische Gefährdung gegeben (Stromkräfte auf Wickelköpfe, Drehmomentstöße auf Welle, Kupplung, Fundamente).

Die Vorgänge lassen sich anhand einer leerlaufenden Maschine physikalisch erklären. Für eine kurzgeschlossene Ständerwicklung gilt

$$\frac{d\psi_1}{dt} + R_1 i_1 = 0 \quad (2.25)$$

Wegen  $R_1 \approx 0$

$$\frac{d\psi_1}{dt} = 0$$

d.h. die kurzgeschlossene Wicklung versucht, den mit ihr verketteten Fluss konstant zu halten ("Prinzip der konstanten Flussverkettung"). Sie muss dazu entsprechende Ausgleichsströme führen.

Bild 2-19a zeigt die Flussverkettung der Maschine, wenn der Kurzschluss im Nulldurchgang der StänderSpannung eintritt, d.h. die Ständerwicklung ist mit dem maximal möglichen Fluss, der von der Feldwicklung erregt wird, verkettet. Während sich die Maschine weiterdreht, versuchen sowohl Ständer als auch Läuferwicklung diesen Fluss zu halten. Nach Drehung um  $180^\circ$  ergibt sich die Flussverteilung nach Bild 2-19b.

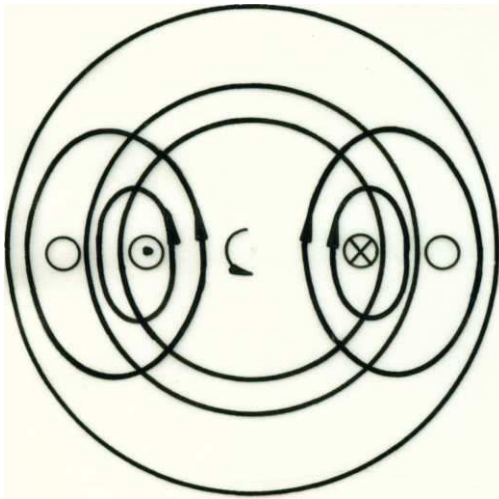


Bild 2-19a

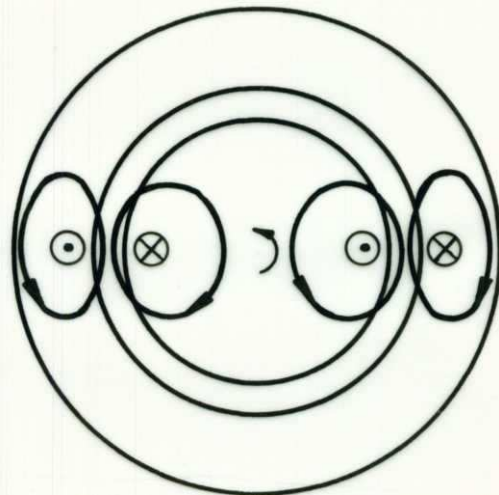


Bild 2-19b

Beide Wicklungen müssen ihre Flüsse über Streuwege entwickeln und führen wegen der höheren magnetischen Widerstände entsprechende Ausgleichströme. Bild 2-20 zeigt den Verlauf des Kurzschlussstromes für diesen Kurzschlussfall.

Der Kurzschlussstrom enthält ein Gleichstromglied, das zum Halten des Anfangsflusses notwendig ist, und ein Wechselstromglied. Beide Anteile klingen wegen der vorhandenen ohmschen Widerstände ab.

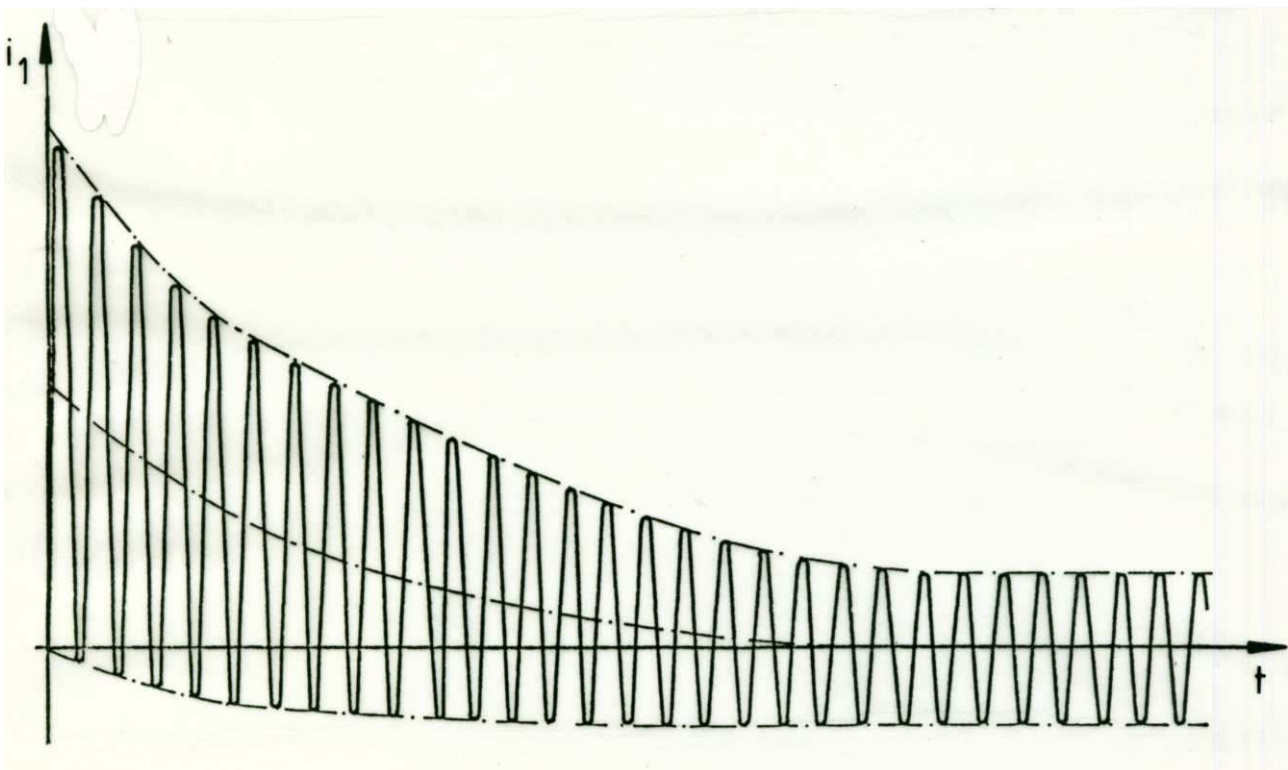


Bild 2-20

Tritt der Kurzschluss im Spannungsmaximum, d.h. im Nulldurchgang des Flusses, ein, so ist kein Anfangsfluss vorhanden und das Gleichstromglied entfällt (Bild 2-21).

Der Verlauf und die Höhe des Kurzschlussstromes sind also vom Zeitpunkt des Kurzschlusseintritts abhängig.

Anteile des Stoßkurzschlussstromes

1. Gleichstromglied:

Die Gleichstromkomponente des Kurzschlussstromes wird erzwungen, um den Anfangsfluss der Ständerwicklung zu halten. Das größte Gleichstromglied tritt bei Kurzschluss im Spannungsnulldurchgang auf.

2. Wechselstromglieder:

Man unterscheidet je nach Zeitintervall verschiedene Anteile des Wechselstromgliedes.

2.1 Dauerkurzschlussstrom:

Anteil, der sich nach Abklingen aller Ausgleichsvorgänge einstellt:

$$I_K = \frac{E_p}{X_d} \quad (2.26)$$



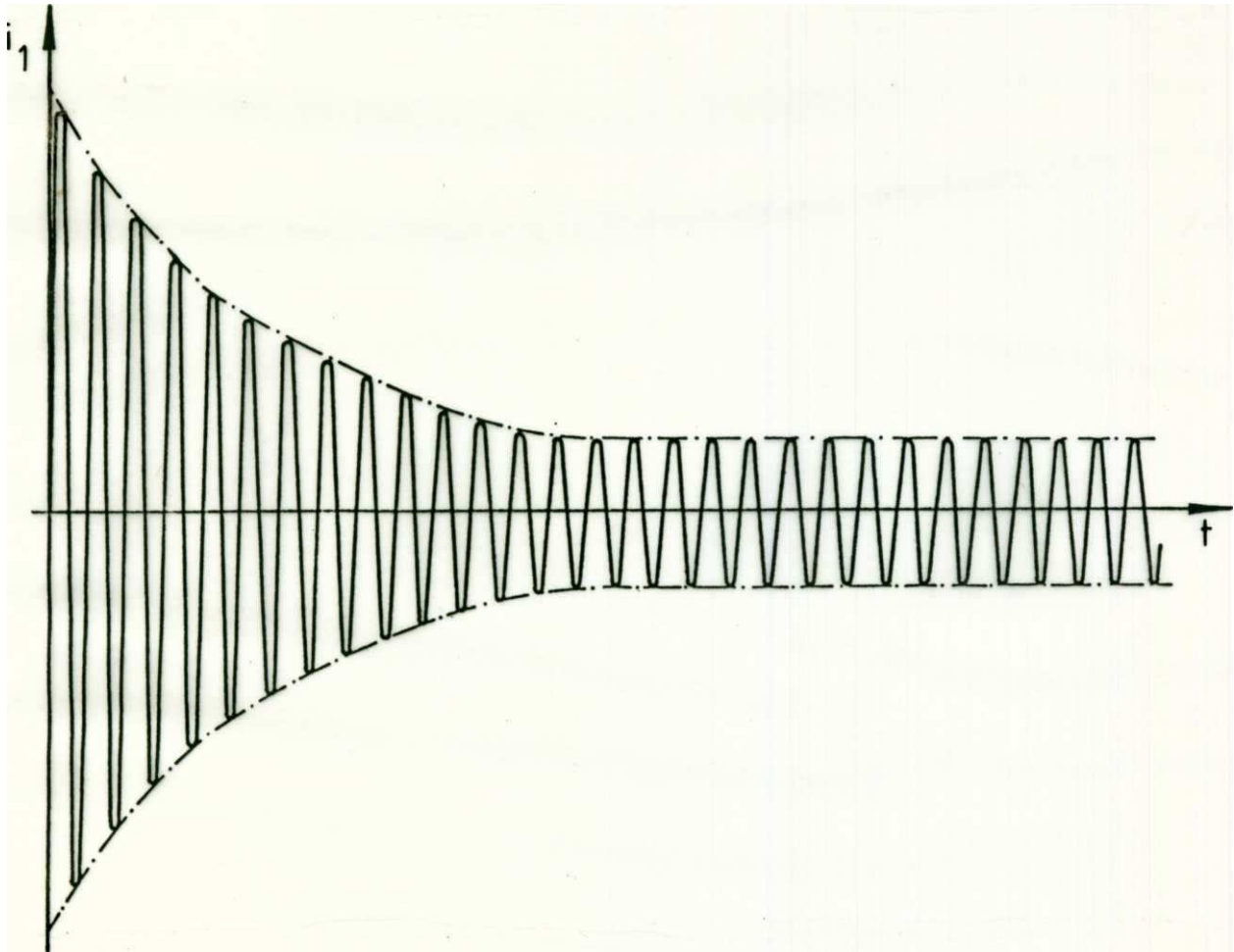


Bild 2-21

## 2.2 Transiente Komponente:

Langsamer abklingende Komponente des Kurzschlusswechselstromes

$$I'_{K} = \frac{E_p}{X'_d} \quad (2.27)$$

## 2.3 Subtransiente Komponente:

Unmittelbar nach Kurzschlusseintritt auftretender, rasch abklingender Anteil des Kurzschlusswechselstromes. Berücksichtigt den Einfluss der Dämpferwicklung und des Massiveisens des Läufers

$$I''_{K} = \frac{E_p}{X''_d} \quad (2.28)$$

Gleichung für zeitlichen Verlauf

$$i_k(t) = -\sqrt{2}\{(I''_K - I'_K)e^{-\frac{t}{T''_d}} + (I'_K - I_K)e^{-\frac{t}{T'_d}} + I_K\} \cdot \cos(\omega t + \beta) - I''_K e^{-\frac{t}{T_d}} \cos\beta\} \quad (2.29)$$

Höchster Augenblickswert des Kurzschlussstromes

theoretisch:

$$\hat{I}_p = 2\sqrt{2} \frac{E_p}{X''_d} \quad (2.30a)$$

praktisch:

$$\hat{I}_p \approx 1,8\sqrt{2} \frac{E_p}{X''_d} \quad (2.30b)$$

## 2.5 Synchronmotoren

In Abschnitt 2.3 wurde bereits das Betriebsverhalten der Synchronmaschine als Generator am starren Netz behandelt.

Aus der Drehmomentkennlinie der Vollpolsynchronmaschine (Bild 2-13) ist ersichtlich, dass die Maschine in den Motorbetrieb übergeht, wenn das an der Welle angreifende Drehmoment seine Richtung ändert. Das Betriebsverhalten der Maschine im Motorbetrieb lässt sich durch das Stromdiagramm (Bild 2-16) beschreiben. Der Betriebspunkt, auf den der Zeiger des Ständer Stromes  $\underline{I}$  zeigt, liegt dann in der unteren Halbebene. Dies bedeutet, dass der Wirkstromanteil des Ständerstromes sein Vorzeichen umgekehrt hat. Die Maschine nimmt jetzt Wirkleistung auf.

Im Motorbetrieb wird das Polrad vom dem, durch das Statorstromsystem erzeugten, Drehfeld sozusagen mitgezogen, wobei zwischen beiden ein von der Größe der Last abhängiger Winkel auftritt. Wird dieser Winkel  $\delta > 90^\circ$ , so reißt die Verbindung ab, der Synchronmotor wird abgebremst, er fällt "außer Tritt".

Die Drehzahl des Synchronmotors ist fest an die Drehfelddrehzahl gebunden. Diese wiederum hängt ab von der Speisefrequenz und der Polpaarzahl:

$$n = \frac{f_1}{p}$$