Fachpraktikum **Synchronmaschine**

IEMA/V. Bosch u.a.

Feb.1998

Formelzeichenverzeichnis

$\underline{U}_1$	Klemmenspannung
$\underline{U}_i$	Vom Hauptfluss induzierte Spannung
$\underline{U}_p$	Polradspannung
ϑ	Polradwinkel
$X_d = X_{1,\sigma} + X_h$	Synchrone Reaktanz
X_h	Hauptfeldreaktanz
$X_{1,\sigma}$	Streureaktanz des Ständers
I_1'	Ständerstrom, auf Läuferstrommassstab umgerechnet
g	Umrechnungsfaktor von Ständer- auf Läuferstrommassstab
I_f	Läuferstrom (bzw. Felderregerstrom)
I_f'	Erregerstrom, auf den Ständerstrommassstab umgerechnet
$I_{f,k}$	Erregerstrom bei dem im kurzgeschlossenen Ständer $I_1 = I_N$ fliesst
I_μ	Resultierender Magnetisierungsstrom
$I_{f,0}$	Leerlauferregerstrom bei dem $U_1 = U_N$ ist
I_K	Kurzschlussstrom
I_{K0}	Ständerkurzschlussstrom, wenn Erregerstrom $I_f = I_{f0}$ ist
$k_c = \frac{I_{K0}}{I_N}$	Leerlauf-Kurzschluss-Verhältnis
m	Strangzahl
Φ_h	Hauptfluss
Φ_δ	Luftspaltfluss
φ	Phasenwinkel
R_1	Ohmscher Ständerwicklungswiderstand
Θ	Durchflutung
Ω	Mechanische Kreisfrequenz
ψ	Durchflutungswinkel

Indices

Index	Erklärung	Index	Erklärung
0	Leerlauf	k	Kurzschluss
1	statorseitig	μ	Magnetisierung
2	rotor- bzw. polradseitig	N	Nennwert, Sternpunkt
d, q	Längsachse, Querachse	P	Polrad, Pol, Potier
f	Feld-, Erregung	q, d	Querachse, Längsachse
ges	Gesamt	σ	Streuung, Streufeld
h	Haupt	u, v, w	Phasenbezeichnung
i	induziert	V	Verlust

1 Aufbau der Synchronmaschine

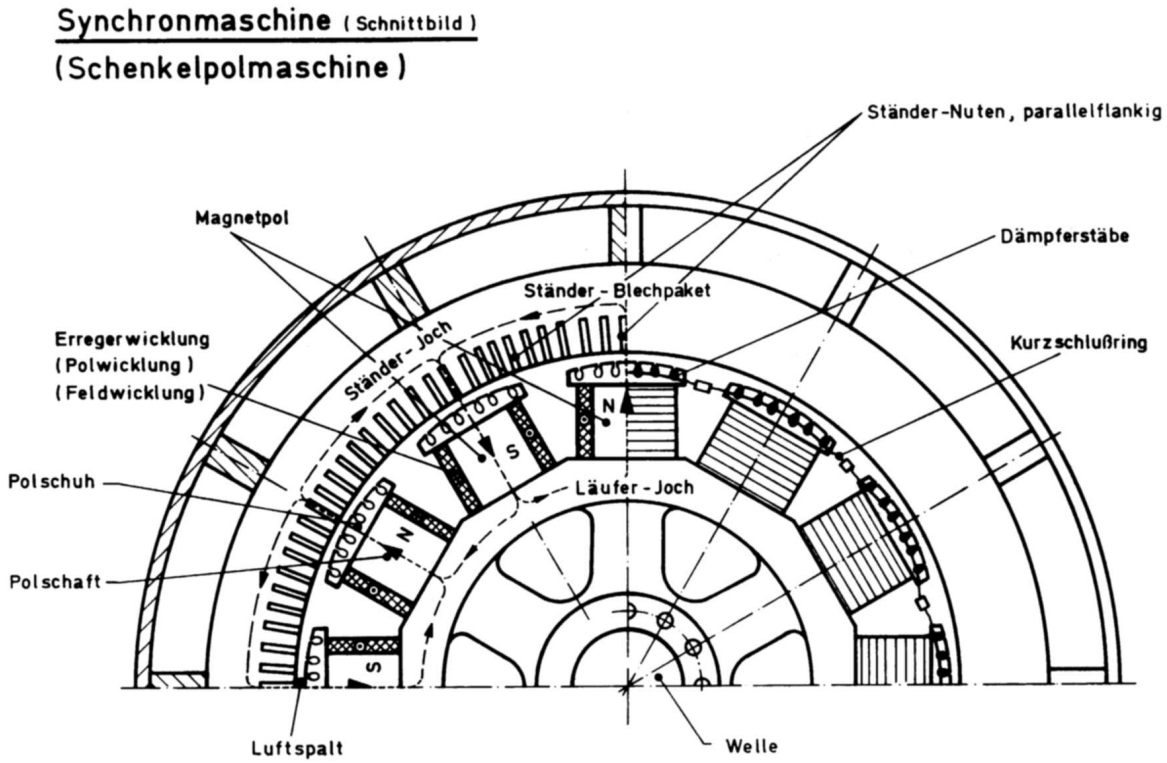

Abbildung 1: Synchronmaschine (Schnittbild), Schenkelpolmaschine

Die Dreiphasen-Synchronmaschine ist eine Drehfeldmaschine, bei der das Drehfeld einerseits durch eine drehstromerregte Wicklung und andererseits durch ein gleichstromerregtes Polsystem aufgebaut wird. Die Maschine arbeitet mit dem Schlupf $s = 0$, d.h. die Drehzahl

des Läufers ist – unabhängig von der Belastung – stets gleich der synchronen Drehzahl n_s. Die Polpaarzahl p ist entsprechend Gleichung (1) zum einen durch die Frequenz des Netzes f festgelegt, mit der die Maschine zusammenarbeiten soll, zum anderen durch die Drehzahl n_s, mit der man die Maschine zu betreiben beabsichtigt.

$$n_s = \frac{f}{p} \tag{1}$$

Im allgemeinen verwendet man Innenpolmaschinen. Der Ständer trägt die dreisträngige Wicklung, die den Energieumsatz mit dem Netz herbeiführt. Der Läufer bildet dann das Polsystem, so dass die Stromzuführung zur Erregerwicklung über Schleifringe erfolgen muss.

Es gibt zwei Ausführungsmöglichkeiten des Polsystems:

- Die Schenkelpolanordnung (Abbildung 1)
- Die Vollpolanordnung

Bei der Schenkelpolmaschine besitzt der Läufer ausgeprägte Pole. Die Sinusförmigkeit des von der Erregerwicklung aufgebauten Luftspaltfelds erreicht man durch entsprechende Formgebung der Polschuhe. Bei mehr als zwei Polpaaren sind diese auf dem sog. Polrad befestigt. Hochpolige Schenkelpolmaschinen werden vor allem in Wasserkraftwerken benötigt, da sie mit niedrigen Drehzahlen laufen.

Im Polschuh der Schenkelpolmaschine, bzw. über der Erregerwicklung der Vollpolmaschine, befindet sich der Dämpferkäfig. Er ist ähnlich aufgebaut wie der Kurzschlusskäfig einer Asynchronmaschine. Im normalen Betrieb, in dem – relativ zum Polsystem – ein konstantes Luftspaltfeld vorliegt, werden in ihm keine Spannungen induziert (wenn man von den Auswirkungen der Nutungsoberwellen absieht). Er hat die Aufgabe Drehfelder zu dämpfen, die bei Ausgleichsvorgängen und Schieflast auftreten und relativ zum Polsystem umlaufen. Außerdem entwickelt der Dämpferkäfig im asynchronen Betrieb ein Drehmoment, welches zum Hochlauf verwendet werden kann.

Die Vollpolmaschine weist einen rotationssymmetrischen Läufer auf, in dessen Nuten eine verteilte Erregerwicklung untergebracht ist. Dadurch wird das von der Erregerwicklung aufgebaute Luftspaltfeld weitgehend sinusförmig, obwohl der magnetisch wirksame Luftspalt konstant ist. Vollpolmaschinen werden vor allem als zweipolige Maschinen – für sehr große Leistungen auch als vierpolige – ausgeführt und mit Dampfturbinen als sogenannter Turbogenerator eingesetzt.

Die 2-Pol-Maschine, bei der der Ständer das Polsystem bildet, muss über Schleifringe gespeist werden. Die gesamte Netzleistung wird dem Läufer zugeführt. Aufgrund der Schleifringe wird sie nur für kleine Leistungen ausgeführt.

2 Wirkungsweise

Im Ständer einer Synchronmaschine sei eine symmetrische, zweipolige und dreisträngige Drehstromwicklung untergebracht. Legt man diese Maschine ans Netz, so bildet sich ein Drehfeld aus, welches eine Spannung induziert, die der Netzspannung das Gleichgewicht hält und mit der Netzfrequenz – der synchronen Geschwindigkeit – umläuft. Bringt man

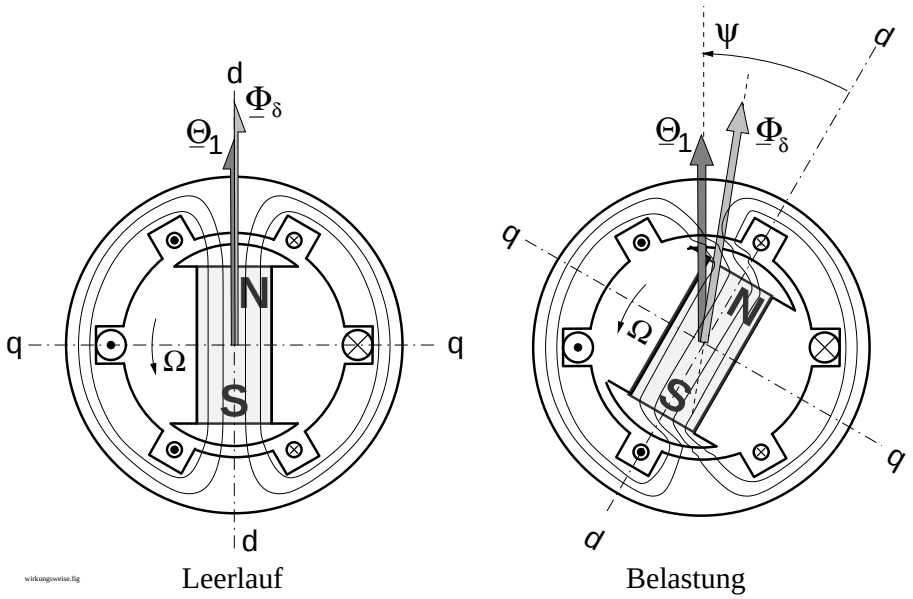

Abbildung 2: Ausrichten eines Stabmagneten in die Achse des vom Stator her eingeprägten magnetischen Felds

einen Stabmagneten in die Bohrung dieser Maschine, so wird er sich – bei Vernachlässigung der Reibung – stets in Richtung der Ständerdurchflutung Θ_1 ausrichten und mit dem synchron umlaufenden Drehfeld ohne Auslenkung aus seiner Vorzugslage mitrotieren.

Versucht man den Stabmagnet abzubremsen, so wird er etwas hinter der angestrebten Lage zurückbleiben, aber seine synchrone Geschwindigkeit beibehalten. Man kann sich diesen Vorgang anschaulich erklären, indem man sich die in Abbildung 2 skizzierten Feldlinien als Gummibänder vorstellt. Ein Drehmoment kann nur aufgebracht werden, wenn diese „Gummibänder“ nicht vollständig radial verlaufen, sondern eine tangentiale Komponente aufweisen. Diese tangentiale Komponente bewirkt dann einen Winkel (in Abbildung 2 mit ψ bezeichnet) zwischen der Polradachse d – d und der Achse der Ständerdurchflutung Θ_1. Dieser Winkel wird Durchflutungswinkel genannt (siehe Zeigerdiagramm Abbildung 5).

Hinweis: In der Literatur kann der Durchflutungswinkel ψ auch zwischen Polradspannung U_p und Läuferlängsachse definiert sein. Die beiden Definitionen unterscheiden sich um einen Winkel von 90°.

Der Polradwinkel ϑ ist aus Abbildung 2 nicht ersichtlich, da der resultierende Luftspaltfluss Φ_δ lediglich die induzierte Spannung U_i bestimmt, der Polradwinkel aber von Polradspannung U_p und Klemmenspannung U_1 (siehe Zeigerdiagramm Abbildung 5) aufgespannt wird.

Die in Abbildung 2 beschriebene Anordnung entspricht einer Synchronmaschine mit Permanentmagneteregung. Diese soll hier aber nicht weiter betrachtet werden. Für Interessierte sei auf die Literatur verwiesen [4], [5].

3 Ersatzschaltbilder und Zeigerdiagramm

3.1 Ersatzschaltbild erster Art

Nimmt man die Anordnung aus Abbildung 2 und ersetzt den Dauermagnet durch einen über Schleifringe gespeisten Elektromagnet, so erhält man eine elektrisch erregte Schenkelpolsynchronmaschine. Trennt man diese nun vom speisenden Netz und treibt den Läufer extern an, so wird man an den Klemmen ein Drehspannungssystem feststellen können. Dieses wird von der rotierenden Durchflutung des Läufers in den Ständerwicklungen induziert.

Die rotierende Durchflutung kann im einsträngigen Ersatzschaltbild durch die Wechselstromquelle I'_f dargestellt werden. Zusammen mit dem Strom I_1 erzeugt sie den Magnetisierungsstrom I_μ, welcher in der Hauptinduktivität die Spannung U_i induziert. Abbildung 3 zeigt das resultierende Ersatzschaltbild erster Art.

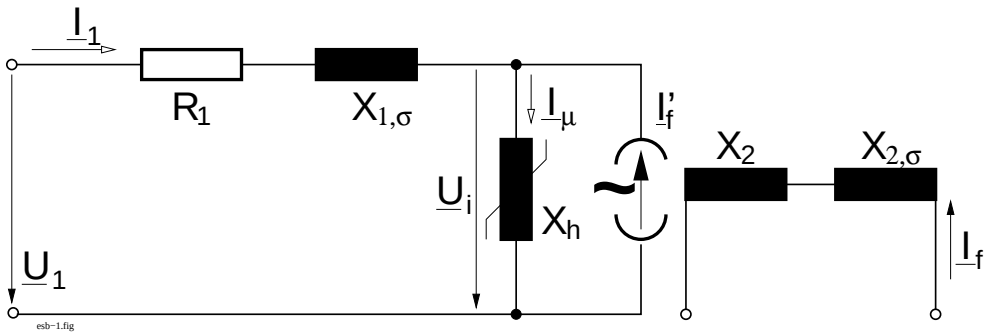

Abbildung 3: Einsträngiges Ersatzschaltbild erster Art der Synchronmaschine

Die induzierte Spannung $\underline{U}_i$ und die Klemmenspannung $\underline{U}_1$ sind aufgrund der Spannungsabfälle am ohmschen Ständerwiderstand R_1 und der Ständerstreureaktanz $X_{1,\sigma}$ nicht identisch. Der Blindwiderstand $X_{1,\sigma}$ erfasst dabei die Wirkung des gesamten Streuflusses, der von der Ständerdurchflutung erzeugt, und nicht mit der Erregerdurchflutung verkettet ist.

Die Hauptfeldreaktanz X_h ist hier zwar als konzentriertes Element eingezeichnet, sie darf jedoch im Normalbetrieb nicht als konstant angenommen werden. Aufgrund der Sättigung der Eisenwege ändert sich die Hauptinduktivität abhängig vom Magnetisierungsstrom. Dieser Zusammenhang wird durch die Magnetisierungskurve ausgedrückt. Die Magnetisierungskurve wird aus der Leerlaufkennlinie (LLK) gemäß Abbildung 14 ermittelt. Die Streuinduktivität hingegen kann als konstant angenommen werden, da der Streufluss im Gegensatz zum Hauptfluss nur zum geringeren Teil im (sättigbaren) Eisen verläuft.

3.2 Ersatzschaltbild zweiter Art für die Vollpolmaschine

Aus dem ersten Ersatzschalbild konnten die folgenden Zusammenhänge gewonnen werden:

$$\underline{I}_\mu = \underline{I}_1 + \underline{I}'_f \tag{2}$$

$$\underline{U}_1 = \underbrace{R_1\underline{I}_1}_{\substack{\text{ohmscher}\\ \text{Spannungs-}\\ \text{abfall}}} + \underbrace{jX_{1,\sigma}\underline{I}_1}_{\substack{\text{Streu-}\\ \text{spannungs-}\\ \text{abfall}}} + \underbrace{jX_h\underline{I}_1}_{\substack{\text{Anker-}\\ \text{rück-}\\ \text{wirkung}}} + \underbrace{jX_h\underline{I}'_f}_{\substack{\text{Polrad-}\\ \text{spannung}}} \tag{3}$$

Bei einer Maschine mit konstantem magnetisch wirksammen Luftspalt, d.h. ohne magnetischer Vorzugsrichtung im Läufer (Vollpolläufer), kann nun die Polradspannung $U_P = jX_h\underline{I}'_f$ als Spannungsquelle angesehen werden, womit sich das Ersatzschaltbild zweiter Art gemäß Abbildung 4 ergibt. Aber auch hier muss die Sättigung der Hauptfeldreaktanz beachtet werden!

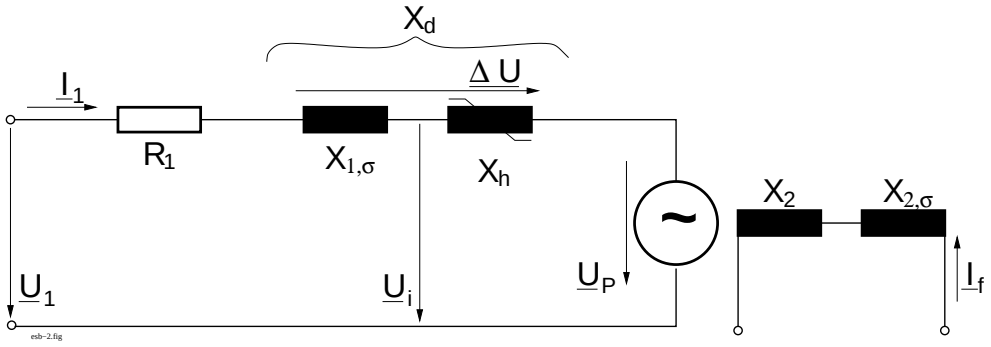

Abbildung 4: Ersatzschaltbild zweiter Art für die Synchronmaschine mit Vollpolläufer

3.3 Polradspannung

Die Polradspannung ist eine fiktive Hilfsgröße. Bei leerlaufender Maschine entspricht sie der Spannung, die von der Erregerwicklung (Polrad) in der Ständerwicklung induziert wird. Sobald ein Ständerstrom I_1 fliesst, überlagert sich dessen Durchflutung mit der Erregerdurchflutung. Beide gemeinsam bilden die Magnetisierungsdurchflutung Θ_μ, welche den Hauptfluss Φ_h erregt. Dieser induziert in der Ständerwicklung die Spannung U_i.

Die Polradspannung soll hier nur erwähnt werden, da sie häufig in der Literatur verwendet wird – vor allem in Verbindung mit dem Polradwinkel. Physikalisch ist sie nur bedingt aussagekräftig, da ihre Verwendung strenggenommen nur bei der ungesättigten Maschine zulässig ist. Bei der gesättigten Maschine muss die induzierte Spannung U_i mittels der Magnetisierungskennlinie aus der resultierenden Durchflutung bestimmt werden. Eine Aufteilung in Polradspannung und Spannungsabfall an der Hauptreaktanz I_1X_h ist bei der gesättigten Synchronmaschine nicht zulässig.

Somit ist die Verwendung des Ersatzschaltbildes zweiter Art gefährlich.

3.3.1 Ankerrückwirkung

Der Begriff Ankerrückwirkung bezeichnet im allgemeinen die Effekte in elektrischen Maschinen, die aus der Überlagerung von Magnetfeldern resultieren. Bei der Gleichstrommaschine ist die Ankerrückwirkung die Überlagerung von Erreger- und Ankerfeld, die aufgrund der partiellen Sättigung von Polschuh und Anker die induzierte Spannung vermindert.

Die Ankerrückwirkung der Synchronmaschine beruht jedoch nicht auf Sättigungserscheinungen. Sie kann folgendermaßen erklärt werden: Wird die Synchronmaschine belastet, so führt die Ständerwicklung den Strom I_1 und baut eine eigene Durchflutung (bzw. ein Drehfeld) auf, die synchron mit dem Läufer und dessen Gleichfeld umläuft. Beide Durchflutungen ergeben – vektoriell addiert – die Magnetisierungsdurchflutung I_μ, welche für den magnetischen Fluss in der Maschine und damit für die Induktion der Spannung U_i in der Ständerwicklung verantwortlich ist. Diese vektorielle Addition ist nur bei Maschinen mit konstantem Luftspalt zulässig, da hier die räumliche Ausbreitung der Ständerdurchflutung unabhängig von der Lage des Läufers ist. Bei Maschinen deren Luftspalt von der Lage des Läufers abhängt (sog. magnetische Achsigkeit bzw. Schenkligkeit) muss die Ständerdurchflutung in eine Komponente in Richtung der Läuferdurchflutung (d-Achse) und in eine Komponente quer dazu (q-Achse) zerlegt werden. Bei der Addition der d- und q-Komponenten müssen die Längs- und Querfeldfaktoren berücksichtigt werden (vgl. Vorlesung und Seminar Elektrische Maschinen II).

3.4 Zeigerdiagramm der Vollpolmaschine

Aus dem Ersatzschaltbild zweiter Art, gemäß Abbildung 4, kann das Zeigerdiagramm der Synchronmaschine mit Vollpolläufer abgeleitet werden. Abbildung 5 zeigt das entsprechende Diagramm bei Generatorbetrieb. Die in der Ständerwicklung induzierte Spannung $\underline{U}_i$ unterscheidet sich um den Spannungsabfall $\underline{I}_1(R_1 + jX_{1,\sigma})$ von der Klemmenspannung $\underline{U}_1$ und benötigt gemäß der Leerlaufkennlinie Abbildung 14 den Magnetisierungsstrom $\underline{I}_\mu$, der der induzierten Spannung $\underline{U}_i$ um 90° nacheilt.

Mit Hilfe des Umrechnungsfaktors g kann der Ständerstrom $\underline{I}_1$ auf die Läuferseite ($\underline{I}'_1$) umgerechnet werden und das Erregerdreieck – gebildet aus $\underline{I}'_1$, $\underline{I}_f$ und $\underline{I}_\mu$ – konstruiert werden (siehe auch Abschnitt 9.2). Senkrecht zu $\underline{I}_f$ erhält man die in Abschnitt 3.2 definierte Polradspannung $\underline{U}_p$. Sie entspricht bei der ungesättigten Maschine der bei dieser Läufererregung im Leerlauf vorhandenen Klemmenspannung.

Bei einer Synchronmaschine mit magnetisch rotationssymmetrischem Läufer, einer sog. Vollpolmaschine, entsteht zwischen den Zeigern $\underline{U}_p$ und $\underline{U}_i$, in der Verlängerung von $jX_{1,\sigma}\underline{I}_1$, die in Abschnitt 3.3.1 definierte Ankerrückwirkung als Spannungsabfall $jX_h\underline{I}_1$.

Die Summe aus Hauptreaktanz und Streureaktanz wird als synchrone Reaktanz $X_d = X_h + X_{1,\sigma}$ bezeichnet.

Fasst man die beiden magnetisierend wirkenden Durchflutungen, bzw. die zugehörigen Ströme $\underline{I}'_1$ und $\underline{I}_f$ zusammen, so erhält man den Magnetisierungsstrom $\underline{I}_\mu$. Der Magneti-

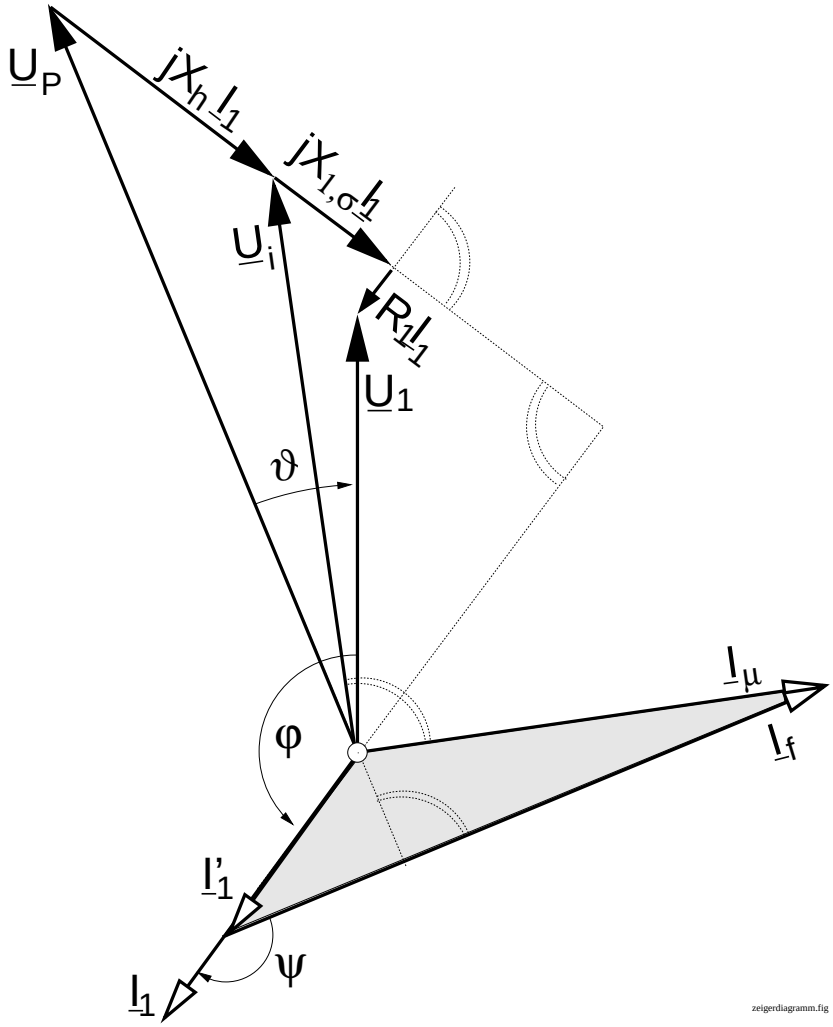

Abbildung 5: Zeigerdiagramm der Synchronmaschine mit Vollpolläufer bei $\cos\varphi = -0,8$, im generatorischen Betrieb, d.h es findet eine Wirkleistungsabgabe an das Netz statt.

sierungsstrom baut in der Maschine den tatsächlich vorhandenen Hauptfluss Φ_h auf. Dieser induziert in der Statorwicklung die Spannung U_i entsprechend der Magnetisierungskurve, welche aus der Leerlaufkennlinie gemäß Abbildung 14 abgeleitet werden kann. Die Magnetisierungskurve muss hier verwendet werden um den Einfluss der Sättigung korrekt zu behandeln!

Über das Zeigerdiagramm lässt sich die Spannungsgleichung der Synchronmaschine mit Vollpolläufer für die Ständerseite angeben:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_p + X_h \underline{I}_1 + (R_1 + X_{1,\sigma})\underline{I}_1 \tag{4}$$

Die Läuferdurchflutung muss dort nicht berücksichtigt werden, da die durch das Läuferdrehfeld ständerseitig hervorgerufene Spannung $\underline{U}_p$ in der Ersatzschaltung als Quellen-

spannung enthalten ist und das Ständerfeld wegen der fehlenden Relativbewegung in der Läuferwicklung ohne Wirkung bleibt.

Vorsicht: Diese vereinfachten Betrachtungen gelten lediglich für magnetisch rotationssymmetrische Läufer, also Vollpolläufer. Bei Maschinen mit einer magnetischen Vorzugsrichtung im Läufer (sog. magnetische Achsigkeit), also bei Schenkelpolmaschinen, sind die hier abgeleiteten Zusammenhänge nicht gegeben, wie in Abschnitt 3.3.1 erläutert.

Wird anstelle der fiktiven Polradspannung U_P in Gleichung (4) die physikalisch tatsächlich vorhandene induzierte Spannung U_i verwendet, so ergibt sich der folgende Zusammenhang:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_i + (R_1 + X_{1,\sigma})\underline{I}_1 \tag{5}$$

Diese Gleichung gilt auch für Schenkelpol-Synchronmaschinen, wenn bei der Bestimmung der Magnetisierungsdurchflutung die magnetische Achsigkeit berücksichtigt wird, wie in Abschnitt 3.3.1 erläutert wurde.

4 Stromortskurve der Vollpolmaschine

Bei vernachlässigtem ohmschen Widerstand R_1 erhält man aus der Ersatzschaltung der Vollpolmaschine gemäß Abbildung 4 die Stromgleichung

$$\underline{I}_1 = \underbrace{\frac{\underline{U}_1}{jX_d}}_{\underline{I}_{K,0}} - \underbrace{\frac{\underline{U}_p}{jX_d}}_{\underline{I}_K} \tag{6}$$

Legt man den Zeiger $\underline{U}_1$ in die reelle Achse, so ergibt sich aus Gleichung (6) als Ortskurve des Ständerstroms ein Kreis mit dem Radius $|\,\underline{U}_p/X_d\,|$, dessen Mittelpunkt die Spitze des Zeigers $-j\underline{U}_1/X_d$ bildet (siehe Abbildung 6). Zwischen den Strömen $\underline{I}_{K,0} = \underline{U}_1/jX_d$ und $\underline{I}_K = \underline{U}_p/jX_d$ tritt – wie zwischen den Spannungen – der Polradwinkel ϑ auf. Verschiedenen Erregerströmen $I_f \sim \underline{U}_p$ entsprechen verschiedene Radien der konzentrischen Kreise.

Für $|\ \vartheta\ | = 90°$ ist die Stabilitätsgrenze erreicht, da hier bei einer bestimmten Erregung höchstmögliche Wirkleistung auftritt. Bei noch höherer Belastung kann die Maschine ihren Synchronlauf nicht aufrechterhalten: sie „kippt“ (Motor) bzw. „geht durch“ (Generator).

5 Drehmoment der Vollpolmaschine

Gemäß der Stromortskurve der Vollpolmaschine gilt für die Wirkkomponente des Ständerstroms bei Vernachlässigung des ohmschen Ständerwiderstandes ($R_1 = 0$) die Beziehung:

$$I_1 \cos\varphi = \frac{U_p}{X_d} \sin\vartheta \tag{7}$$

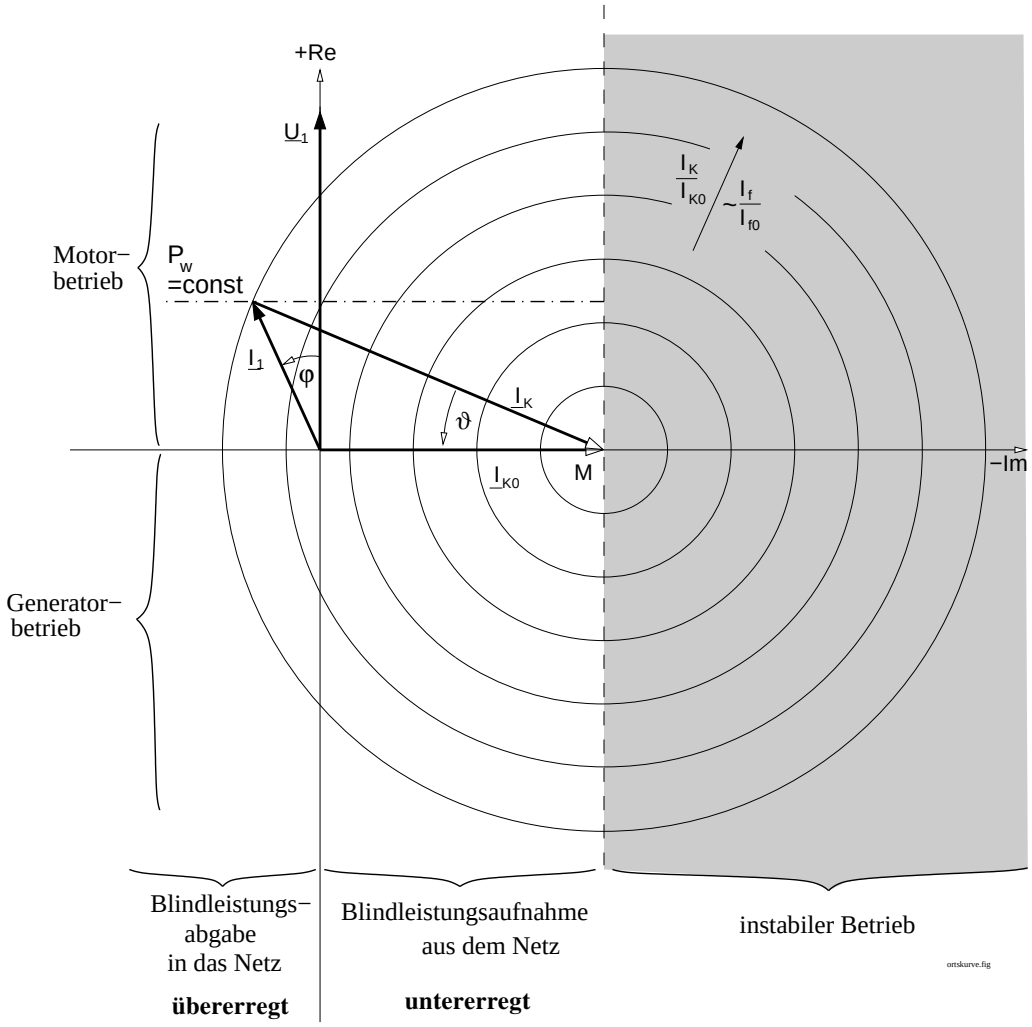

Abbildung 6: Stromortskurve der ungesättigten Synchronmaschine, bei vernachlässigtem Ständerwiderstand ($R_1 = 0$).

Für die Ständerwirkleistung gilt:

$$P = mU_1 I_1 \cos\varphi \tag{8}$$

Mit Gleichung (7) ergibt sich für die Wirkleistung:

$$P = mU_1 \frac{U_p}{X_d} \sin\vartheta \tag{9}$$

bzw. für das Drehmoment:

$$M = \frac{mU_1 U_p}{2\pi n_s X_d} \sin\vartheta \tag{10}$$

Abbildung 7 zeigt das Drehmoment der Vollpolmaschine in Abhängigkeit vom Polradwinkel ϑ.

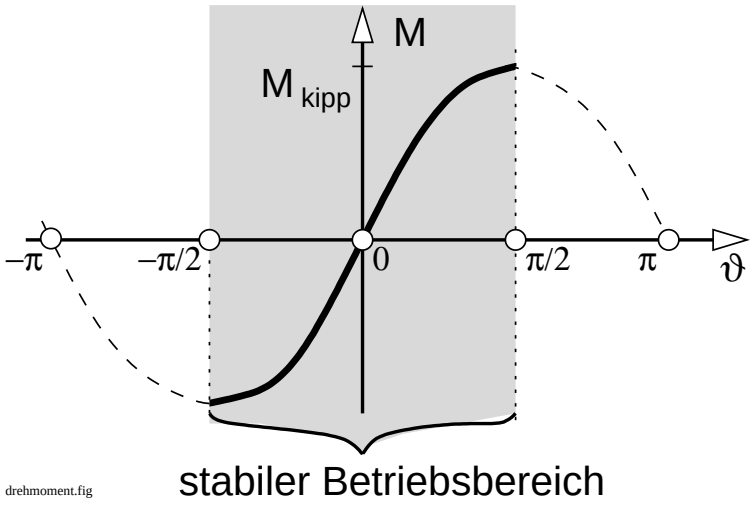

Abbildung 7: Abhängigkeit des Drehmoments der Vollpolmaschine vom Polradwinkel ϑ

6 Synchronisieren und Parallelschalten zum Netz

Die Synchronmaschine und das Netz können parallel geschaltet werden, wenn die folgenden Bedingungen erfüllt sind:

- Frequenz
- Spannung
- Phasenlage
- Phasenfolge

} des Netzes und der Synchronmaschine müssen übereinstimmen.

Die *Frequenz* wird durch die Drehzahl der Synchronmaschine eingestellt, mit einem Doppelfrequenzmesser gemessen und mit der Netzfrequenz verglichen.

Die *Spannung* lässt sich durch die Erregung der Synchronmaschine variieren und mittels eines Voltmeters kontrollieren.

Die *Phasenlage* wird ebenfalls durch die Drehzahl eingestellt und mit Nullspannungsmessern (Glühlampen und Spannungsmesser) überprüft. Die Glühlampen dienen zum einen der optischen Signalisierung, zum anderen beeinflussen sie durch ihr PTC-Verhalten den Ausschlag des Dreheiseninstruments so, dass dieses bereits bei geringen Spannungen einen deutlichen Ausschlag zeigt.

Die richtige *Phasenfolge* erkennt man am synchronen Ausschlag beider Nullspannungsinstrumente. Ist die Phasenfolge vertauscht, so ist der Ausschlag beider Instrumente gegenphasig.

Abbildung 25 im Anhang zeigt den hier verwendeten Messaufbau zur Synchronisierung von Synchronmaschine und Netz.

7 Betriebszustände bei Netzbetrieb

In den meisten Anwendungsfällen ist die Synchronmaschine auf ein Netz geschaltet dessen Spannung und Frequenz konstant gehalten werden und für die einzelnen Maschinen somit fest vorgegeben ist.

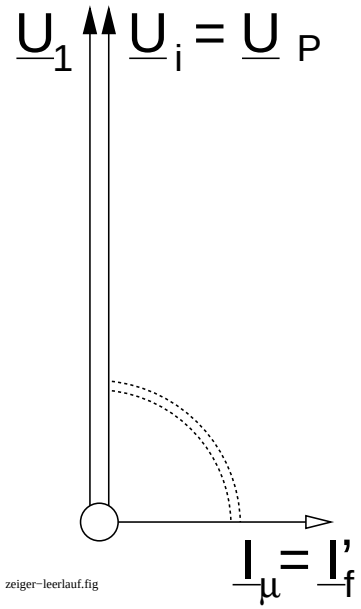

Abbildung 8: Leerlauf der Synchronmaschine am Netz (Weder über- noch untererregt)

Die Spannung ΔU ist die Spannungsdifferenz zwischen der Klemmenspannung U_1 und der Polradspannung U_P. Diese Spannung fällt bei vernachlässigtem ohmschen Ständerwiderstand ($R_1 = 0$) an der synchronen Reaktanz X_d ab (vgl. Ersatzschaltbild in Abbildung 4).

7.1 Generatorbetrieb

Eine am starren Netz betriebene Synchronmaschine kann nur mit der synchronen Drehzahl $n = f/p$ arbeiten. Weder eine Erhöhung noch eine Verminderung des Last- bzw. Antriebsdrehmoments können eine Änderung der Drehzahl bewirken, wenn der Betrag des Moments kleiner als das Kippmoment ist.

Beim generatorischen Betrieb der Maschine bewirkt eine Erhöhung des Antriebsmoments die Auslenkung der Erregerstromachse $\underline{I'_f}$ (bezogen auf die Klemmenspannung $\underline{U_1}$) aus ihrer Leerlaufstellung, wie aus den beiden Zeigerdiagrammen Abbildung 8 und Abbildung 9 ersichtlich ist. Dadurch stellt sich zwischen der (fiktiven) Polradspannung $\underline{U_p}$ und der Klemmenspannung $\underline{U_1}$ ein Polradwinkel ϑ ein (siehe Abbildung 9). Zwischen Klemmen- und Polradspannung entsteht nun die Differenzspannung $\Delta\underline{U}$. Da diese Spannung an der

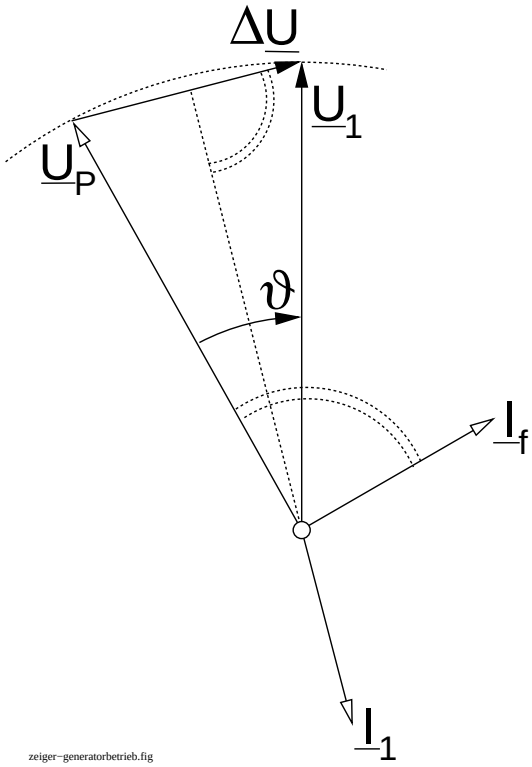

Abbildung 9: Generatorbetrieb der Synchronmaschine am Netz

Reaktanz X_d abfällt (siehe Abbildung 4), ruft sie – bei vernachlässigtem ohmschen Ständerwiderstand – einen ihr um 90° nacheilenden Ständerstrom $\underline{I}_1$ hervor.

Aus dem zugehörigen Zeigerdiagramm Abbildung 9 ist ersichtlich, dass $\underline{I}_1$ ein fast reiner generatorischer Wirkstrom ist. Der Polradwinkel ϑ stellt sich so ein, dass Gleichgewicht zwischen der zugeführten mechanischen Wellenleistung und der elektrisch abgegebenen Netzleistung besteht. Der räumliche Lastwinkel ϑ/p kann mit dem Netz getriggerten Stroboskop im Vergleich zu seiner Lage im Leerlauf ($\vartheta = 0$) beobachtet werden.

7.2 Motorbetrieb

Auch beim motorischen Betrieb behält die Synchronmaschine die durch das speisende Netz vorgegebene Drehzahl bei. Wird die leerlaufende Maschine an der Welle belastet, so ändert sich – wie beim Generatorbetrieb – die Lage der Erregerstromachse $\underline{I'}_f$ im zugehörigen Zeigerdiagramm (vgl. Abbildung 10).

Die Klemmenspannung $\underline{U}_1$ eilt nun der Polradspannung $\underline{U}_P$ um den Polradwinkel ϑ voraus. Die Phasenverschiebung der beiden Spannung hat ebenfalls eine Differenzspannung $\Delta\underline{U}$ zur Folge, nun aber mit umgekehrtem Vorzeichen als beim Generatorbetrieb. Somit ändert auch der Strom in der synchronen Reaktanz sein Vorzeichen. Er ist im Zeigerdiagramm

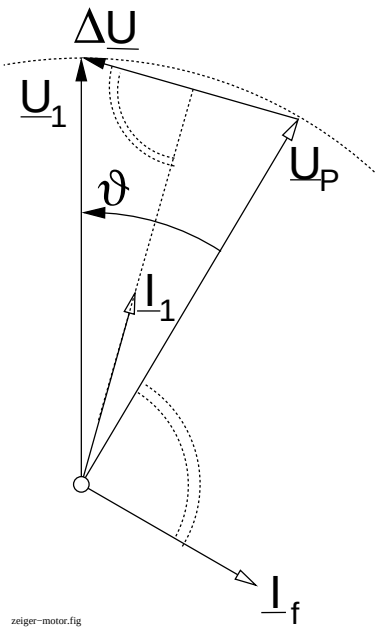

Abbildung 10: Motorbetrieb der Synchronmaschine am Netz

Abbildung 10 nahezu in Phase mit der Klemmenspannung $\underline{U}_1$, d.h. die Maschine nimmt elektrische Energie aus dem Netz auf. Sie entwickelt ein Motormoment, das der geforderten Last das Gleichgewicht hält.

7.3 Über- und Untererregung

In dem dargestellten Generator- wie Motorbetrieb wurde die Leerlauferregung beibehalten und nur durch Antrieb oder Belastung an der Welle eingegriffen. Bleibt die Maschine dagegen mechanisch im Leerlauf und wird der Erregerstrom $\underline{I}_f$ verstellt, so ändert sich die Polradspannung nicht in ihrer Phase, sondern lediglich in ihrer Amplitude.

Bei Übererregung fließt ein kapazitiver Strom, der die Läuferdurchflutung soweit abbaut, wie es zur Erzeugung eines resultierenden, zur Netzspannung passenden magnetischen Flusses erforderlich ist (siehe Abbildung 11). Bei Untererregung verstärkt ein induktiver Blindstrom die zu schwache Läuferdurchflutung (siehe Abbildung 12).

8 Kennlinien

8.1 Leerlaufkennlinie

Im Leerlauf der Synchronmaschine ist ihr Ständerstrom $I_1 = 0$. Zur Aufnahme der Leerlaufkennlinie wird die Synchronmaschine vom Netz getrennt und durch eine zweite Maschine mit der synchronen Drehzahl angetrieben [6]. Aus dem Ersatzschaltbild erster Art gemäß

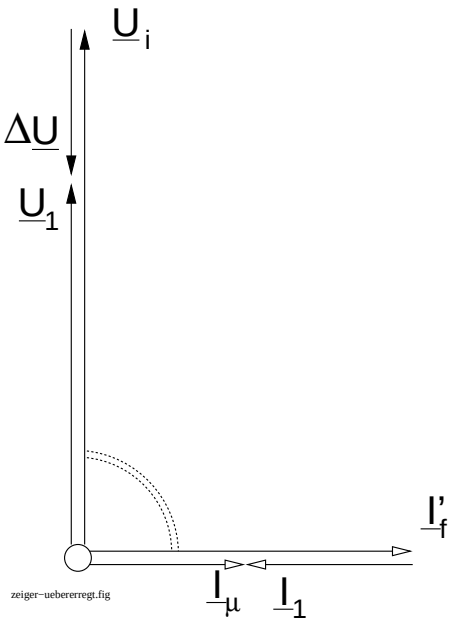

Abbildung 11: Übererregter Leerlauf der Synchronmaschine am Netz

Abbildung 3 ist ersichtlich, dass im Leerlauf der Magnetisierungstrom I_μ gleich dem Erregerstrom I'_f ist. Da an R_1 und $X_{1,\sigma}$ keine Spannung abfällt, ist die Klemmenspannung U_1 gleich der induzierten Spannung U_i. Das Zeigerdiagramm in Abbildung 13 verdeutlicht diesen Zusammenhang.

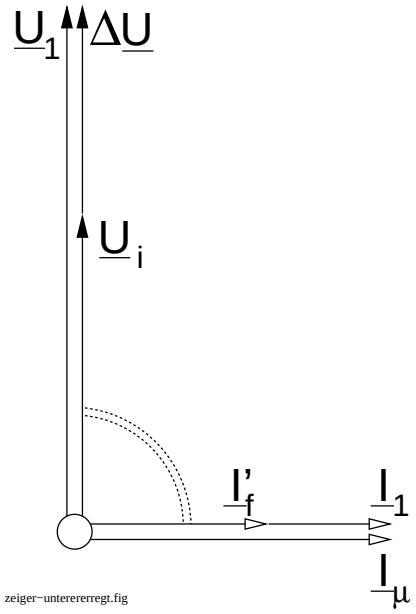

Abbildung 12: Untererregter Leerlauf der Synchronmaschine am Netz

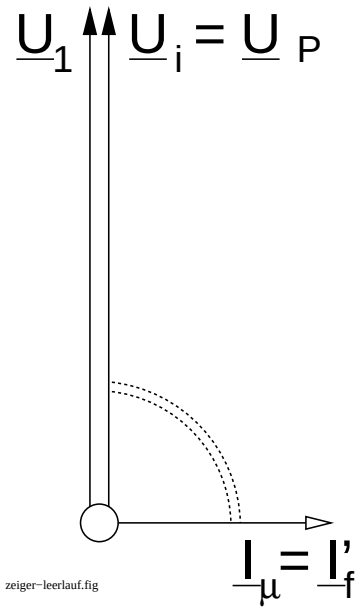

Abbildung 13: Zeigerdiagramm der leerlaufenden Synchronmaschine ($I_1 = 0$)

Die Leerlaufkennlinie (LLK) $U_{1,0} = U_i = f_{(I'_f)}$ zeigt somit den Zusammenhang zwischen der induzierten Spannung U_i und dem Erregerstrom $\underline{I'}_f$.

Da die induzierte Spannung U_i proportional der Grundwelle des Hauptflusses Φ_h ist, entspricht die Leerlaufkennlinie der Magnetisierungskennlinie der Synchronmaschine.

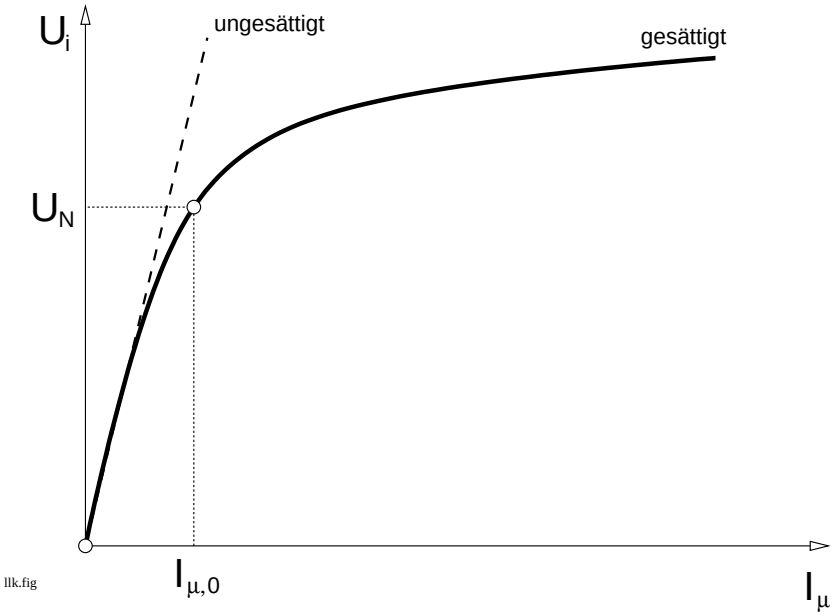

Abbildung 14: Leerlaufkennlinie, bzw. Magnetisierungskurve $U_i = f_{(I_\mu)}$

8.2 Kurzschlusskennlinie

Wird die Synchronmaschine vom Netz getrennt, an den Klemmen (über Amperemeter) kurzgeschlossen und mit ihrer synchronen Drehzahl angetrieben, so kann die Kurzschlusskennlinie (KKL) $I_{1,K} = f_{(I'_f)}$ aufgenommen werden (siehe Abbildung 16).

Vernachlässigt man in dem Ersatzschaltbild erster Art gemäß Abbildung 3 den ohmschen Ständerwiderstand, so erkennt man, dass im Kurzschluss $U_1 = 0$ die induzierte Spannung U_i gleich dem Spannungsabfall $jX_\sigma \underline{I}_{1,K}$ an der Ständerstreureaktanz $X_{1,\sigma}$ sein muss. Der Kurzschlussstrom $I_{1,K}$ und der Erregerstrom I'_f addieren sich zum Magnetisierungsstrom I_μ. Das Zeigerdiagramm in Abbildung 15 verdeutlicht diesen Zusammenhang.

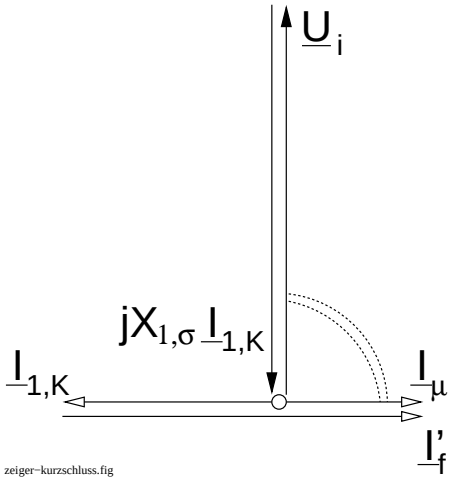

Abbildung 15: Zeigerdiagramm der kurzgeschlossenen Synchronmaschine ($U_1 = 0$) bei vernachlässigtem Ständerwicklungswiderstand ($R_1 = 0$).

Im Kurzschluss wird das Feld des Erregerstroms durch die Ständerströme nahezu vollständig aufgehoben – der Magnetisierungsstrom I_μ ist sehr klein. Das verbleibende Hauptfeld muss lediglich die Streuflussverkettungen der Ständerwicklungsstränge kompensieren, die von den Ständerströmen hervorgerufen werden. Die Kurzschlusskennlinie zeigt also den Zusammenhang zwischen Ständerstrom I_1 und Erregerstrom I_f. Sie wird für die Ermittlung des Umrechnungsfaktors g benötigt.

Im Bereich des Ständernennstroms kommt es deshalb im magnetischen Kreis zu keinerlei Sättigungserscheinungen. Erst bei höheren Strömen, die wesentlich über dem Nennwert liegen, kommt es zur Krümmung der Kurzschlusskennlinie, die auf die beginnende Sättigung der Streuwege zurückzuführen ist [6]. Abbildung 16 zeigt die Kurzschlusskennlinie der Synchronmaschine.

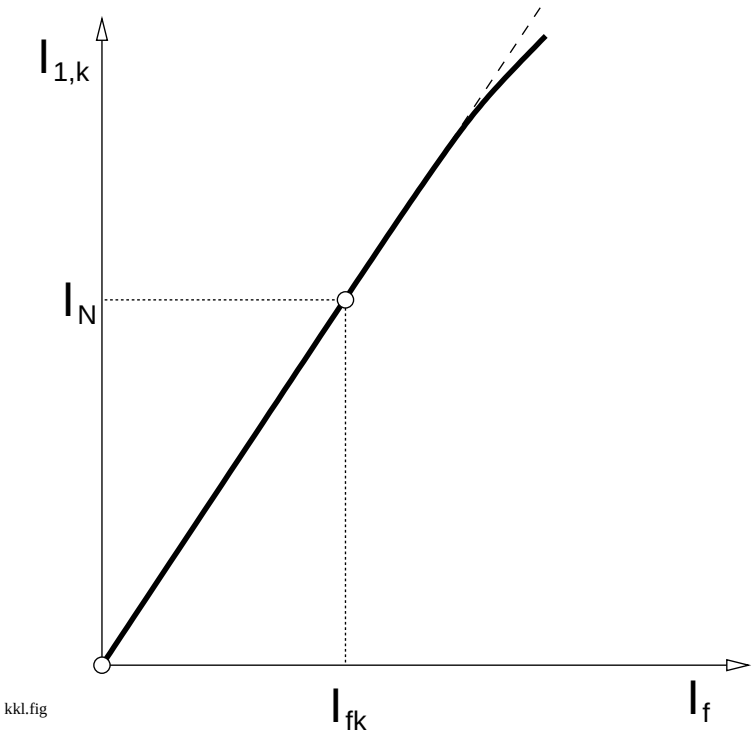

Abbildung 16: Kurzschlusskennlinie $I_{1,K} = f_{(I'_f)}$

8.3 V-Kurven

Die mit Wirkstrom belastete Synchronmaschine kann zusätzlich zum Wirkstrom so viel Blindleistung übernehmen bis der zulässige Nennstrom der Maschine erreicht ist. Trägt man den resultierenden Strom für verschiedene konstante Wirkleistungen über der Erregung auf, so erhält man die – aufgrund ihrer charakteristischen Form – so genannten V-Kurven. Abbildung 17 zeigt den typischen Verlauf der V-Kurven.

In den Minima der V-Kurven (Punkte $P_0 \ldots P_4$ in Abbildung 17) führt die Ständerwicklung nur den der jeweiligen Belastung entsprechenden Wirkstrom, während sich links und rechts davon noch ein induktiver bzw. kapazitiver Blindstrom überlagert (siehe auch [1], Abschnitt 35.5).

9 Bestimmung des Erregerbedarfs

9.1 Das Potierdreieck

Die Kurzschlusskennlinie $I_k = f(I_f)$ stellt den Zusammenhang zwischen Erregerstrom und Ständerstrom dar, wie in Abschnitt 8.2 erläutert. Aus der Leerlaufkennlinie $U_i = f(I_f)$

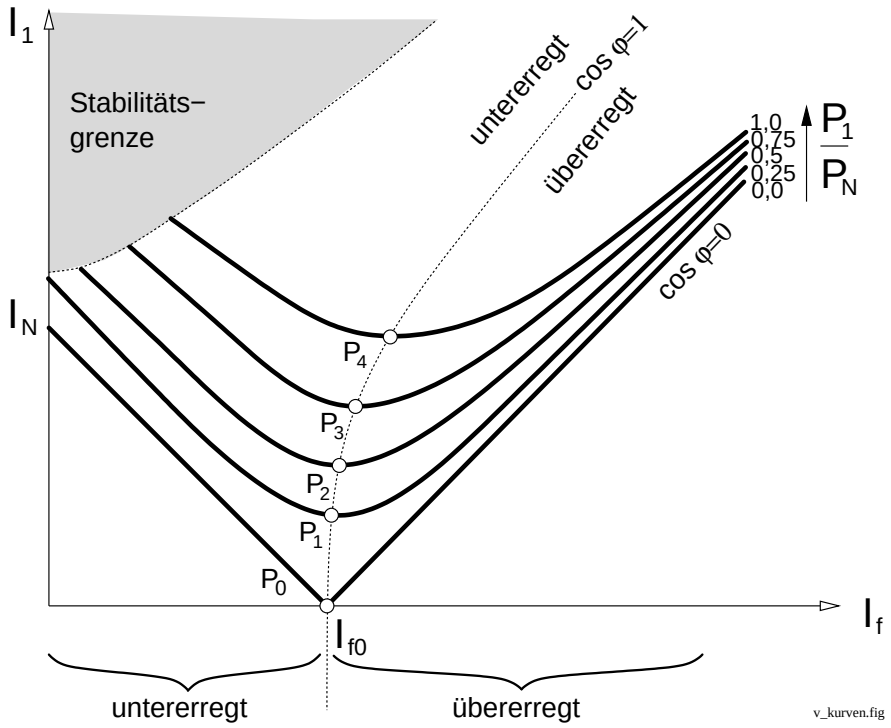

Abbildung 17: V-Kurven für verschiedene konstante Wirkleistungen P_1/P_N

wird der Zusammenhang zwischen Erregerstrom und induzierter Spannung abgelesen (siehe Abschnitt 8.1).

Für den Betrieb der Synchronmaschine ist es wichtig den Anteil des Erregerstroms zu kennen, der benötigt wird um den Streufluss $\Phi_{1,\sigma}$ in der Ständerwicklung zu magnetisieren.

Bei bekannter Ständerstreuinduktivität $X_{1,\sigma}$ wird die Spannung $X_{1,\sigma}I_N$ gemäß Abbildung 18 in die Leerlaufkennlinie eingetragen. Die zugehörige Abszisse stellt den gesuchten Erregerstrom $I_{f,\sigma}$ dar. Aus der Kurzschlusskennlinie kann nun der zum Ständernennstrom I_N gehörende Erregerstrom $I_{f,k}$ entnommen werden.

Man nennt das in Abbildung 18 grau hinterlegte Dreieck Potierdreieck. Da seine Katheten dem Strom I_1 proportional sind, ändert es für verschiedene Ströme I_1 nur seine Größe, nicht aber seine Winkel.

Der Strom $\underline{I'}_{1,k}$ bezeichnet hierbei den auf einen äquivalenten Polradstrom umgerechneten Ständerstrom. Das heißt, ein Polradstrom $I_f = I'_1$ (Gleichstrom in der Erregerwicklung) erzeugt ein Luftspaltfeld gleich großer Amplitude und Grundwelle wie ein aus drei Strömen $\underline{I}_1$ gebildetes Drehstromsystem im Ständer der Maschine.

Meist kennt man die Ständerstreuinduktivität $X_{1,\sigma}$ nicht. Um dennoch das Potierdreieck konstruieren zu können, wird der induktive Volllastpunkt aufgenommen ($I_1 = I_N$, $\cos\varphi = 0$, übererregt). Bei reinem Blindstrombetrieb mit $\cos\varphi = 0$, übererregt, führt die Ständerwicklung einen Strom, der gegenüber der Polradspannung $\underline{U}_P$ um 90° phasenver-

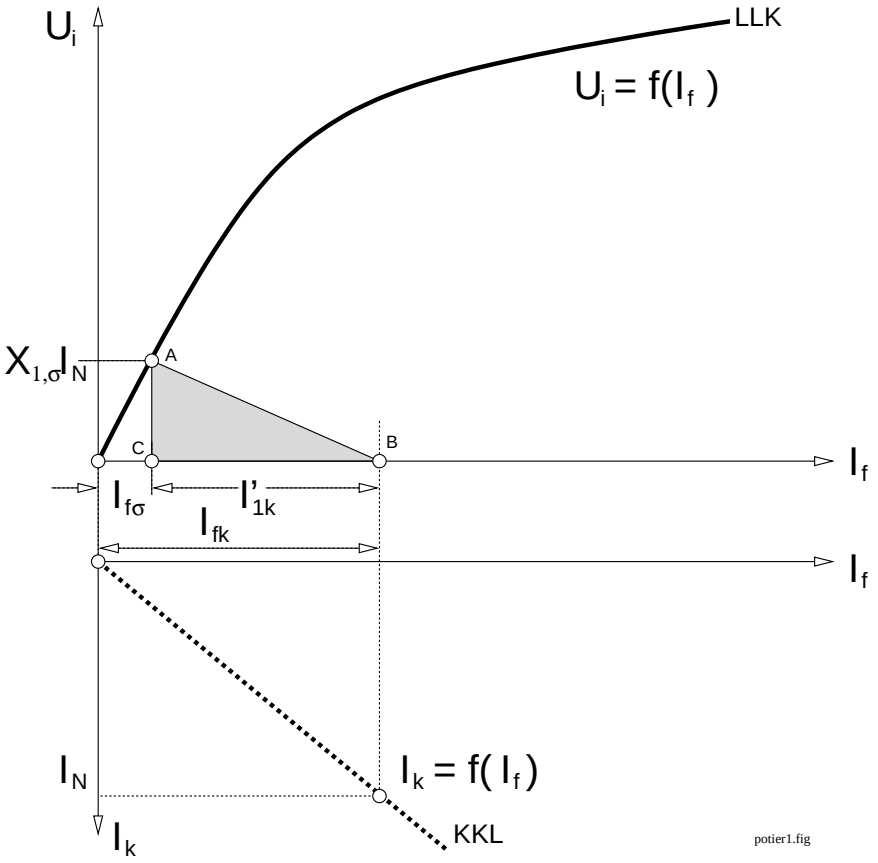

Abbildung 18: Leerlaufkennlinie $U_i = f(I_f)$, Kurzschlusskennlinie $I_k = f(I_f)$ und Potierdreieck (ABC) einer Synchronmaschine

schoben ist. Das bedeutet, dass die resultierenden Durchflutungsrichtungen von Ständerwicklung und Polrad zusammenfallen. Für das von beiden gemeinsam erregte Feld ist deswegen die algebraische Summe von $\underline{I}_f$ und $\underline{I}'_1$ maßgebend, wie das Zeigerdiagramm in Abbildung 19 zeigt.

Trägt man vom induktiven Volllastpunkt Q in Abbildung 20 ausgehend die Strecke $\overline{OK}$ nach links auf ($\overline{O'Q} = I_{fK}$) und zieht von O' eine Parallele zum linearen Teil der Leerlaufkennlinie, so schneidet diese die Leerlaufkennlinie im Punkt P. Das Dreieck Δ(PQR) ist das gesuchte Potierdreieck. Die Strecke $\overline{PR}$ entspricht der so genannten Potierreaktanz X_P.

Die Potierreaktanz ist streng genommen nicht gleich der Ständerstreureaktanz ($X_p \neq X_{1,\sigma}$), da sie auch die Polradstreuung gemäß Abbildung 21 beinhaltet. Sie liefert aber einen guten Anhaltspunkt für den Wert der Ständerstreuung [6], Abschnitt 2.3.9.6.

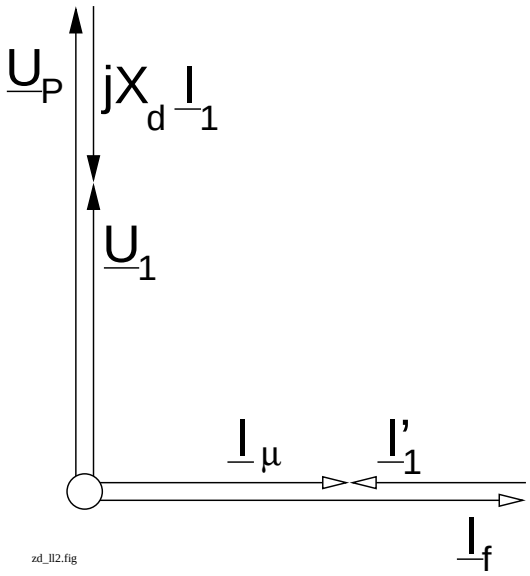

Abbildung 19: Zeigerdiagramm der Synchronmaschine bei Betrieb am Netz der Spannung $\underline{U}_1$, ohne Wirkleistungsumsetzung ($\cos\varphi = 0$), „übererregt“: Maschine gibt induktive Blindleistung ans Netz ab

9.2 Erregerbedarf nach VDE 0530

Wenn die Leerlaufkennlinie und das Potierdreieck für einen bekannten Belastungsstrom bestimmt sind, können daraus der Streublindwiderstand X_p und der Umrechnungsfaktor $g = I'_{fK}/I_{fK} = I'/I$ berechnet werden. Damit kann das Zeigerdiagramm für jeden beliebigen Lastfall gezeichnet und daraus der Erregerstrom bestimmt werden, da die Werte X_p und g belastungsunabhängig sind.

In den VDE–Vorschriften (nach VDE 0530, Teil 4, 33) werden bezogene Größen verwendet. Bezugsgrößen sind die Nennspannung U_N, der Nennstrom I_N und der zur Erregung der Nennspannung erforderliche Nennerregerstrom.

$$u = \frac{U}{U_N} \tag{11}$$

$$i = \frac{I}{I_N} \tag{12}$$

$$i_f = \frac{I_f}{I_{f0}} \tag{13}$$

$$x = \frac{X}{U_N/I_N} = \frac{XI_N}{U_N} \tag{14}$$

Als Beispiel wird die Bestimmung des Erregerstroms bei Nennbedingungen gezeigt.

① $\underline{u}_N = 1$ auf der Ordinate abtragen.

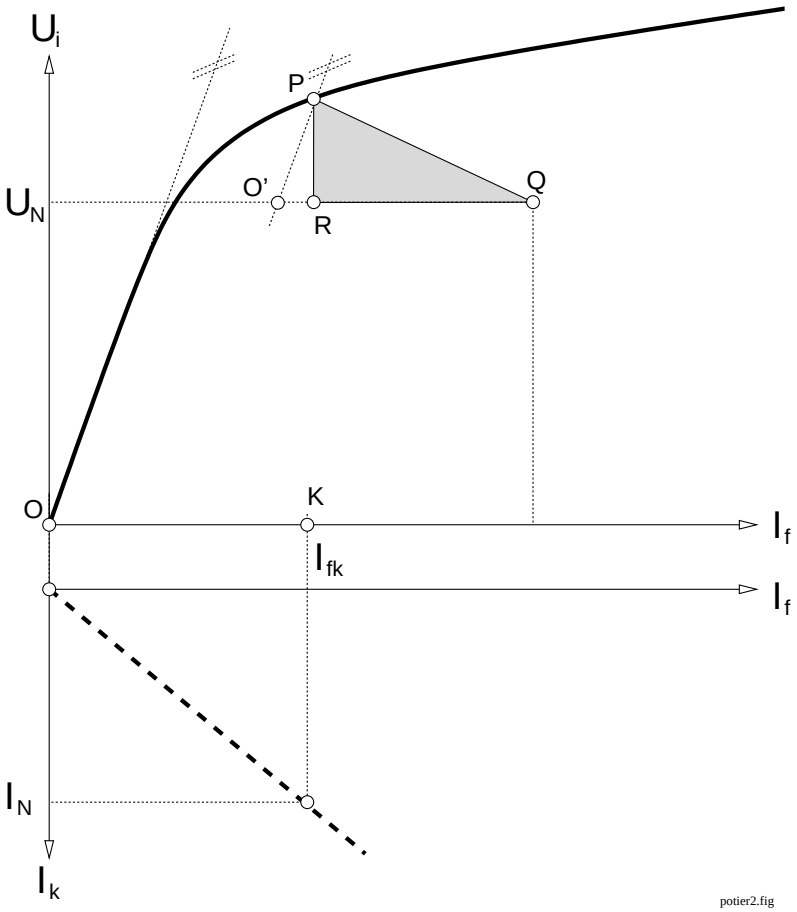

Abbildung 20: Kennlinie für induktive Belastung. Bestimmung der Potierreaktanz durch Messung des „Induktiven Volllastpunkts“ Q

② Den Strangstrom $\underline{i}_N$ mit dem Phasenwinkel φ_N zur Klemmenspannung $\underline{u}_N$ einzeichnen

③ Den Spannungsabfall an der Potierreaktanz $jX_P\underline{i}_N$ an $\underline{u}_N$ anlegen. Es ergibt sich $\underline{u}_i$.

④ $\underline{u}_i$ auf der Ordinate abtragen.

⑤ Aus der Leerlaufkennlinie die zugehörige Leerlauferregung $i_\mu = i_{f,0}$ entnehmen.

⑥ Das Potierdreieck einzeichnen, daraus die Ankerrückwirkung $i_{f,A}$ ablesen.

⑦ Den Magnetisierungsstrom $\underline{i}_\mu$ senkrecht zu $\underline{u}_i$ einzeichnen.

⑧ $\underline{i}_{f,A}$ parallel zu $\underline{i}_N$ an $\underline{i}_\mu$ antragen.

⑨ Aus dem Zeigerdiagramm $\underline{i}_{f,N} = \underline{i}_\mu - \underline{i}_{f,A}$ ablesen.

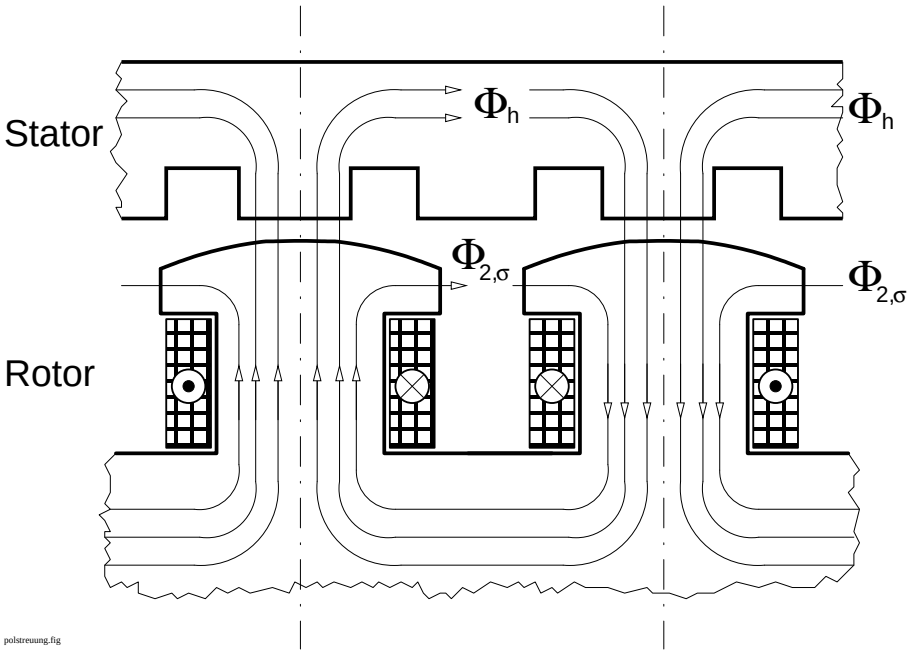

Abbildung 21: Addition des Polstreuflusses $\Phi_{2,\sigma}$ zum Hauptfluss Φ_h in Polschaft und Läuferjoch (am stärksten wirksam bei rein induktiver Blindlast)

Mit dem Erregerstrom kann beim Synchrongenerator am Netz lediglich die Blindleistung verändert werden.

10 Belastungsgrenzen der Synchronmaschine

Ausgehend von der Ortskurve des Ankerstroms, lässt sich der Bereich abgrenzen, in dem der Zeiger $\underline{I}$ des Ankerstroms liegen kann, wenn die Maschine mit konstanter Spannung $\underline{U}_1$ betrieben wird.

Dieser Bereich ist durch die beim maximalen Erregerstrom ① zugelassene Erwärmung der Erregerwicklung und durch die Erwärmung der Ständerwicklung ② bestimmt. Der Bereich ③ kennzeichnet den Sicherheitsabstand vom statischen Kippen, da Betrag des zulässigen Polradwinkels stets kleiner als $\pi/2$ sein soll. Bereich ④ stellt die Grenze des minimalen Polradstroms dar, welcher den Mindestwert für die Kippleistung festlegt (siehe Abbildung 23).

Literatur

[1] Müller, Germar: *Grundlagen elektrischer Maschinen*
Reihe: Elektrische Maschinen, VCG Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1994.

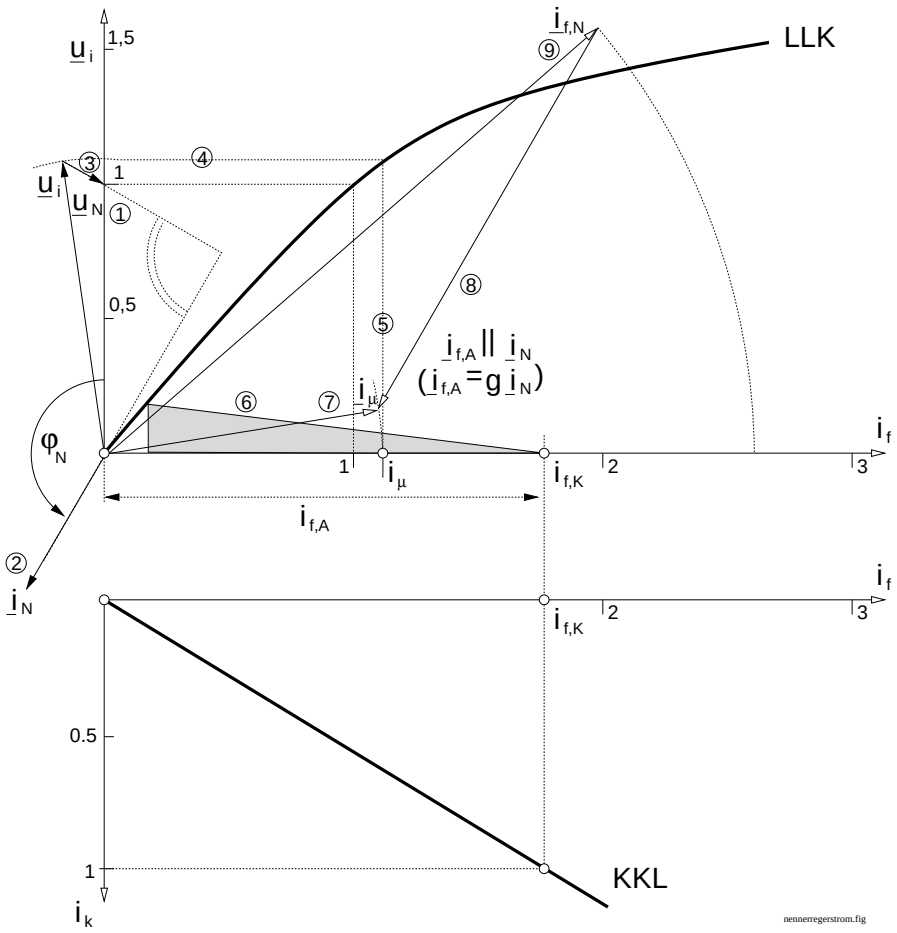

Abbildung 22: Graphische Bestimmung des Nennerregerstroms i_{fN} mit Hilfe der Potierreaktanz X_p. (i_{fN} = Erregerstrom bei Nennspannung U_N, Nennstrom I_N, $\cos\varphi_N$ und Nennfrequenz)

[2] Müller, Germar: *Theorie elektrischer Maschinen*
Reihe: Elektrische Maschinen, VCG Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1995.

[3] Vogt, Karl: *Berechnung elektrischer Maschinen*
Reihe: Elektrische Maschinen, VCG Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1996.

[4] Stölting, Hans-Dieter und Achim Beisse: *Elektrische Kleinmaschinen*
B. G. Teubner Verlag, Stuttgart, 1987.

[5] Fischer, Rolf: *Elektrische Maschinen*
Carl Hanser Verlag, München.

[6] Nürnberg, Werner und Rolf Hanitsch: *Die Prüfung elektrischer Maschinen*
6. Auflage, Springer-Verlag Berlin, 1987.

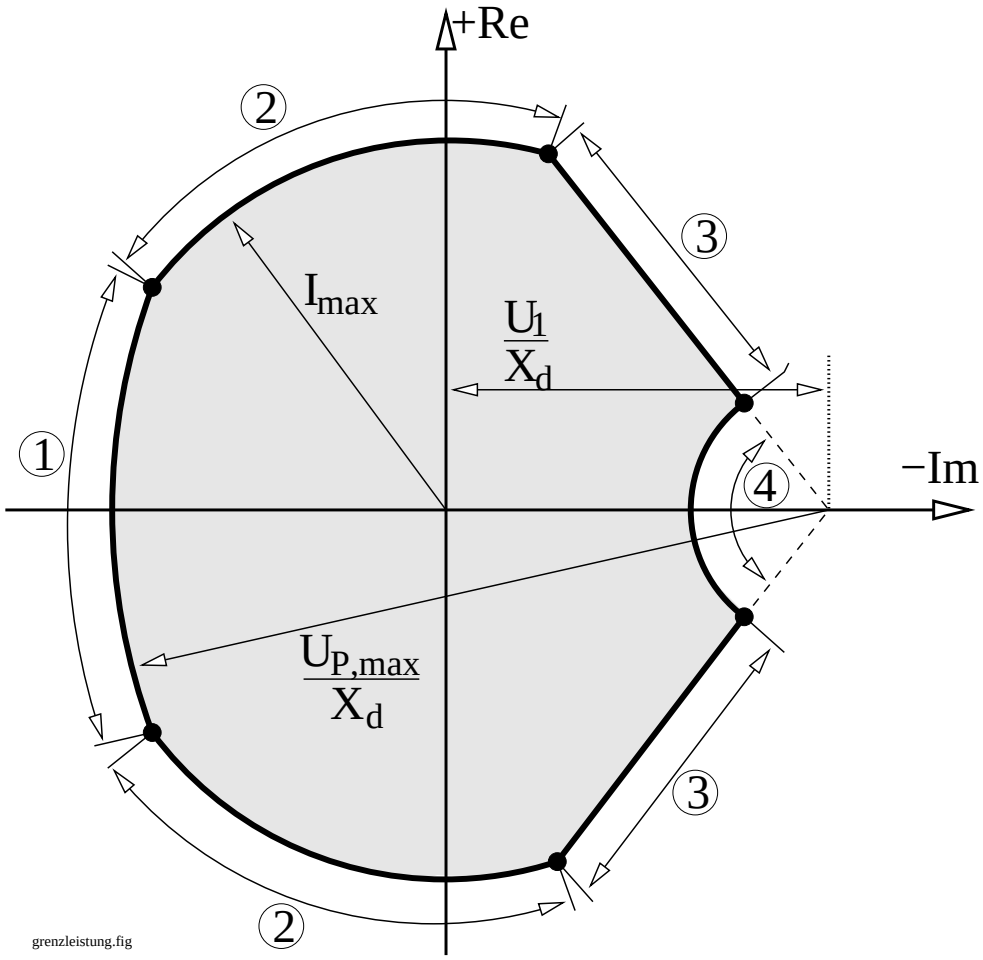

Abbildung 23: Grenzleistungsdiagramm der Vollpolsynchronmaschine

[7] Richter, Rudolf: *Elektrische Maschinen, Band II: Synchronmaschinen und Einankerumformer*
Birkhäuser Verlag, Basel und Stuttgart. *(vergriffen)*

[8] Richter, Rudolf: *Kurzes Lehrbuch der elektrischen Maschinen*
Springer Verlag. *(vergriffen)*

11 Anhang

11.1 Schaltbilder

Maschinensatz

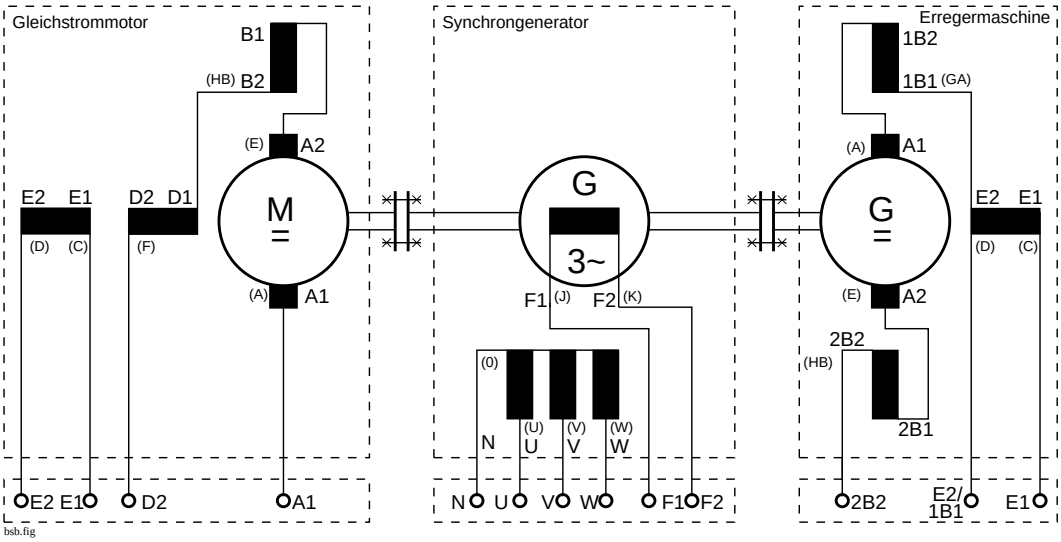

Abbildung 24: Blockschaltbild des Maschinensatzes

Synchronisierungsschaltung

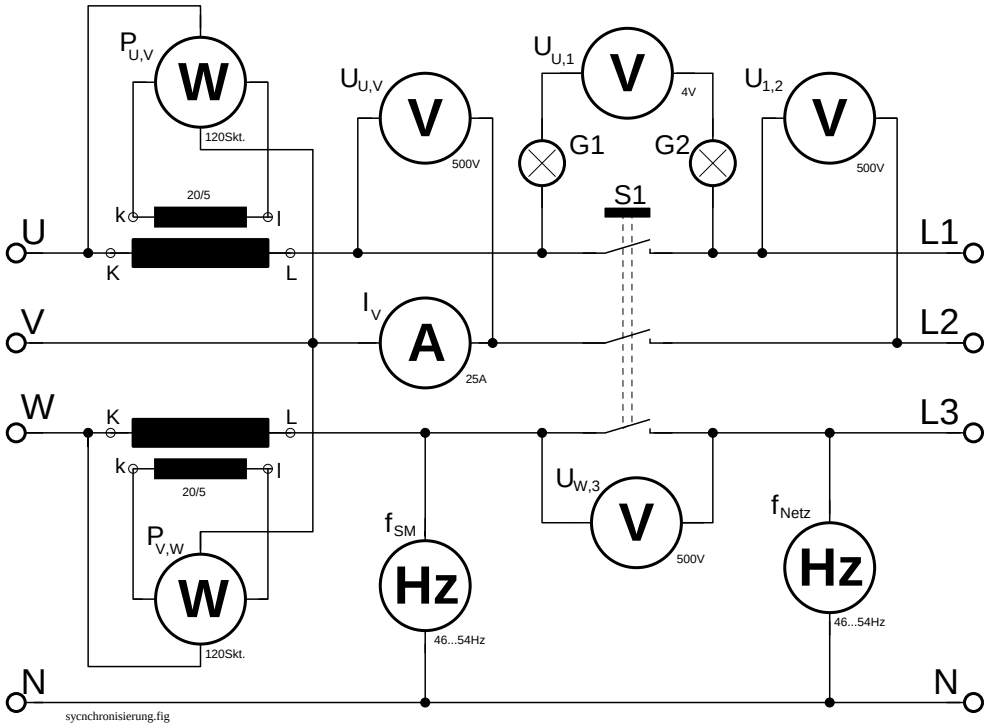

Abbildung 25: Schaltbild der Synchronisierungsschaltung

Ankerstromschutzschaltung

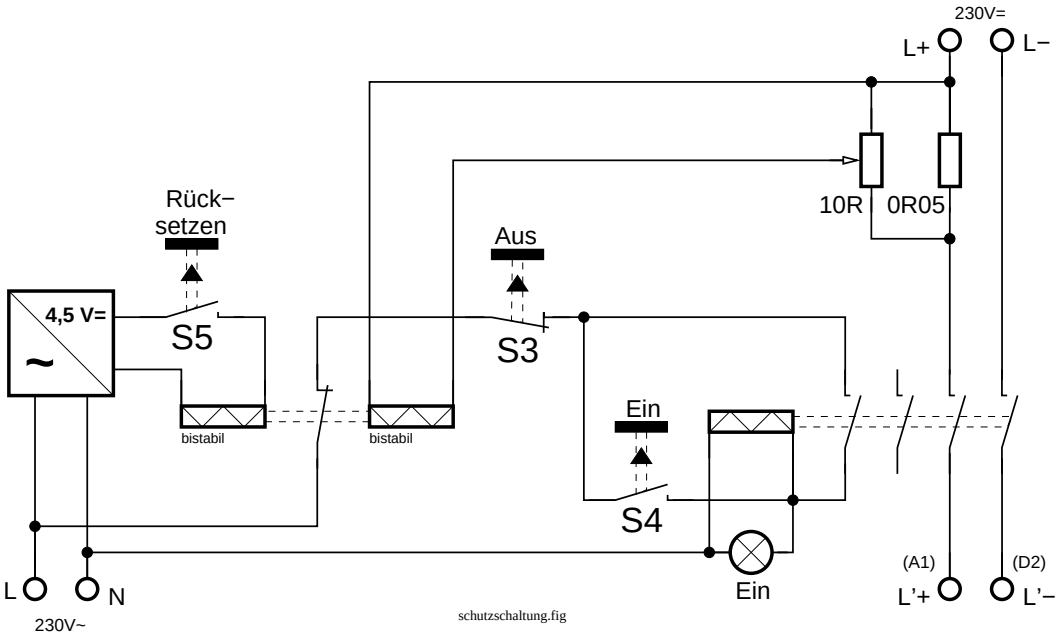

Abbildung 26: Schaltbild der Ankerstromschutzschaltung

11.2 Fragen zur Vorbereitung

1. In welchen Stellungen müssen sich die Erregerwiderstände R_{f1} und R_{f2}, sowie der Anlasswiderstand R_A, **vor** dem Anlassen der Gleichstrommaschine befinden (siehe Verdrahtungsplan in der Heftmitte)?

2. Wie muss die Erregermaschine beschaltet werden, damit sie sich selbst erregt? Tragen Sie die Verbindungsleitungen in den Verdrahtungsplan in der Heftmitte ein. Funktioniert die Erregermaschine in dieser Beschaltung auch bei umgekehrter Drehrichtung – Begründung?

3. Warum darf der Erreger**gleich**strom I_f gemeinsam mit den **Wechsel**größen U_1, I_1, U_i, ... in ein Zeigerdiagramm eingezeichnet werden?

4. Warum zeigt die Kurzschlusskennlinie in Abbildung 16 (beim Erreger-Nennstrom der Maschine) keine Sättigungseffekte – im Gegensatz zur Leerlaufkennlinie aus Abbildung 14?

5. Welchen maßgeblichen Vorteil bringt ein Synchronmotor gegenüber einem einem Asynchronmotor – beispielsweise für einen Industriebetrieb mit zahlreichen induktiven Verbrauchern?

6. Welche Einschränkung ist bei der Leistungsmessung mit der „Zwei-Wattmeter-Methode“ (Aron-Schaltung) gemäß Abbildung 25 zu beachten:

   (a) Der zu vermessende Verbraucher muss das Netz symmetrisch belasten (d.h jeden Strang gleich).

   (b) Der zu vermessende Verbraucher darf den Sternpunkt nicht belasten.

   (c) Keine.

   Begründen Sie Ihre Aussage.

11.3 Versuchsdurchführung

1. Erläutern Sie das Leistungsschild der Gleichstrom– und der Synchronmaschine

2. Nehmen Sie die folgenden Kennlinien und Betriebspunkte auf:

   (a) Leerlaufkennlinie: $\underline{U} = f(\underline{I}_f)$

   (b) Kurzschlusskennlinie

   (c) Die Synchronmaschine ist mit dem Netz zu synchronisieren und der induktive Volllastpunkt ist einzustellen $I = I_N$ und $I_f = I_{f,(\cos\varphi=0)}$

   (d) Aufnahme der V–Kurven für zwei verschiedene Werte von P
   P_1: $\alpha_1 + \alpha_2 = 40$ Skt; P_2: $\alpha_1 + \alpha_2 = 120$ Skt

3. Auswertung

   (a) Konstruktion des Potierdreiecks und Berechnung von $X_{1,\sigma}$

   (b) Konstruktion des Zeigerdiagramms für $\cos\varphi = 0.8$ und $I = I_N$. Bestimmung des Erregerstroms $I_{f,N}$ bei Nennbetrieb unter Verwendung der Größen des Potierdreiecks. Zeichnen der Stromortskurve

   (c) Berechnung des Ankerrückwirkungsfaktors „g“. Maßstäbe für:

   - Leerlauf/Kurzschlusskennlinie U_0: 4 cm $\hat{=}$ 100 V
   - Potierdreieck I_K: 4 cm $\hat{=}$ 10 A
   - Zeigerdiagramm I_f: 2 cm $\hat{=}$ 1 A
   - Regulierkurven I: 1 cm $\hat{=}$ 1 A
   - V–Kurven I_f: 3 cm $\hat{=}$ 1 A