



# Praktikum II: Elektrotechnische Experimente

Für Bachelor-Studierende der Studiengänge Elektrotechnik (ET, 3. Semester), Informatik-Ingenieurwesen (IIW, 3. Semester) und Mechatronik (MEC, 5. Semester).

Versuch Nr.: 6

Elektrische Maschinen

Ort:

ES 38, Raum 013

Allgemeine Informationen unter:

<http://www.tet.tu-harburg.de/Praktikum>

Stand der Versuchsbeschreibung: 13.10.11

# Das Wichtigste in Kürze

## Worum geht es?

In den Versuchen sollen unterschiedliche Funktionsweisen und Einsatzmöglichkeiten der Synchron- und Asynchronmaschine vorgestellt und nachvollzogen werden.

## Was wird gemacht?

### Synchronmaschine:

Es werden Versuche zur Synchronisation, zur Polradwinkelmessung und zum Motor- und Generatorbetrieb durchgeführt.

### Asynchronmaschine:

Es werden Versuche zum Anlaufverhalten durchgeführt.

In beiden Versuchen werden Spannungs-, Strom- und Leistungsmessungen durchgeführt.

## Welche Apparaturen und Instrumente werden verwendet?

Jede Drehstrommaschine wird in Kombination mit einer Gleichstrommaschine betrieben. Es werden konventionelle Strom-, Spannungs- und Leistungsmessgeräte sowie ein Synchronoskop und ein Messgerät zur Bestimmung des Polradwinkels eingesetzt.

## Was lernt man dabei?

Ziel ist es, die Unterschiede zwischen den Betriebsarten der einzelnen Drehstrommaschinen kennen zu lernen. Weiterhin soll die Messung von Drehstromparametern vertieft werden.

## Warum ist das wichtig?

Die elektrische Energieversorgung in Deutschland basiert auf dem Drehstromsystem. Um dieses zu verstehen oder bei einem elektrischen Energieversorger arbeiten zu können, sollen mit diesen Versuchen praktische Grundlagen vermittelt werden.

## Was wird von den Studierenden erwartet?

Es wird erwartet, dass die Versuchsunterlagen vollständig durchgelesen und die Kontrollfragen (Teil C) schriftlich bearbeitet wurden, bevor der Versuch stattfindet. Weiterhin wird erwartet, dass die Studenten die Messungen unter Einhaltung der Sicherheitsregeln durchführen. Nach der erfolgreichen Versuchsdurchführung ist ein Protokoll anzufertigen und abzugeben.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Teil A: Zielsetzung und Bedeutung für die Praxis .....</b>	<b>2</b>
<b>Teil B: Erläuterungen und Grundlagenwissen.....</b>	<b>5</b>
<b>1 Grundlagen.....</b>	<b>5</b>
1.1 Bildung eines Drehfeldes aus drei Wechselfeldern .....	5
<b>2 Beschreibung der Synchronmaschine .....</b>	<b>12</b>
2.1 Allgemeines .....	12
2.2 Einzelbetrieb der Synchronmaschine .....	15
2.2.1 Leerlauf .....	15
2.2.2 Belastung .....	16
2.3 Netzbetrieb der Synchronmaschine .....	17
2.3.1 Synchronisation der Maschine mit dem Netz .....	17
2.3.2 Nicht erregte Synchronmaschine am Netz.....	18
2.3.3 Erregte Synchronmaschine am Netz .....	18
2.3.3.1 Drehmoment = 0: Betrieb als Phasenschieber.....	19
2.3.3.2 Drehmoment $M \neq 0$ : Motor- oder Generatorbetrieb .....	19
2.3.4 Mechanisches Ersatzmodell.....	20
<b>3 Beschreibung der Asynchronmaschine.....</b>	<b>21</b>
3.1 Allgemeines .....	21
3.2 Mechanisches Ersatzmodell .....	26
<b>4 Allgemeine Hinweise .....</b>	<b>28</b>
4.1 Sicherheitsregeln .....	28
4.2 Auswertung.....	29
4.3 Messaufbau .....	29
4.4 Nutzung der Versuchsmaschine.....	32
<b>5 Versuchsdurchführung .....</b>	<b>33</b>
5.1 Kennen lernen des Versuchsstandes .....	33
5.2 Besprechung der Theorie.....	34
5.3 Betriebsverhalten der Synchronmaschine .....	35
5.4 Betriebsverhalten der Asynchronmaschine .....	41
<b>Teil C: Literaturverzeichnis .....</b>	<b>46</b>

## Teil A: Zielsetzung des Versuchs und Bedeutung für die Praxis

Der Drehstrom-Asynchronmotor ist in industriellen Anlagen die am häufigsten vorkommende rotierende elektrische Maschine. Durch seinen einfachen und robusten Aufbau ist er einerseits wartungsarm und zum anderen störunempfindlich. Um den Asynchronmotor drehzahlvariabel zu betreiben, kann man ihn über einen Frequenzumrichter an das Stromnetz anschließen.

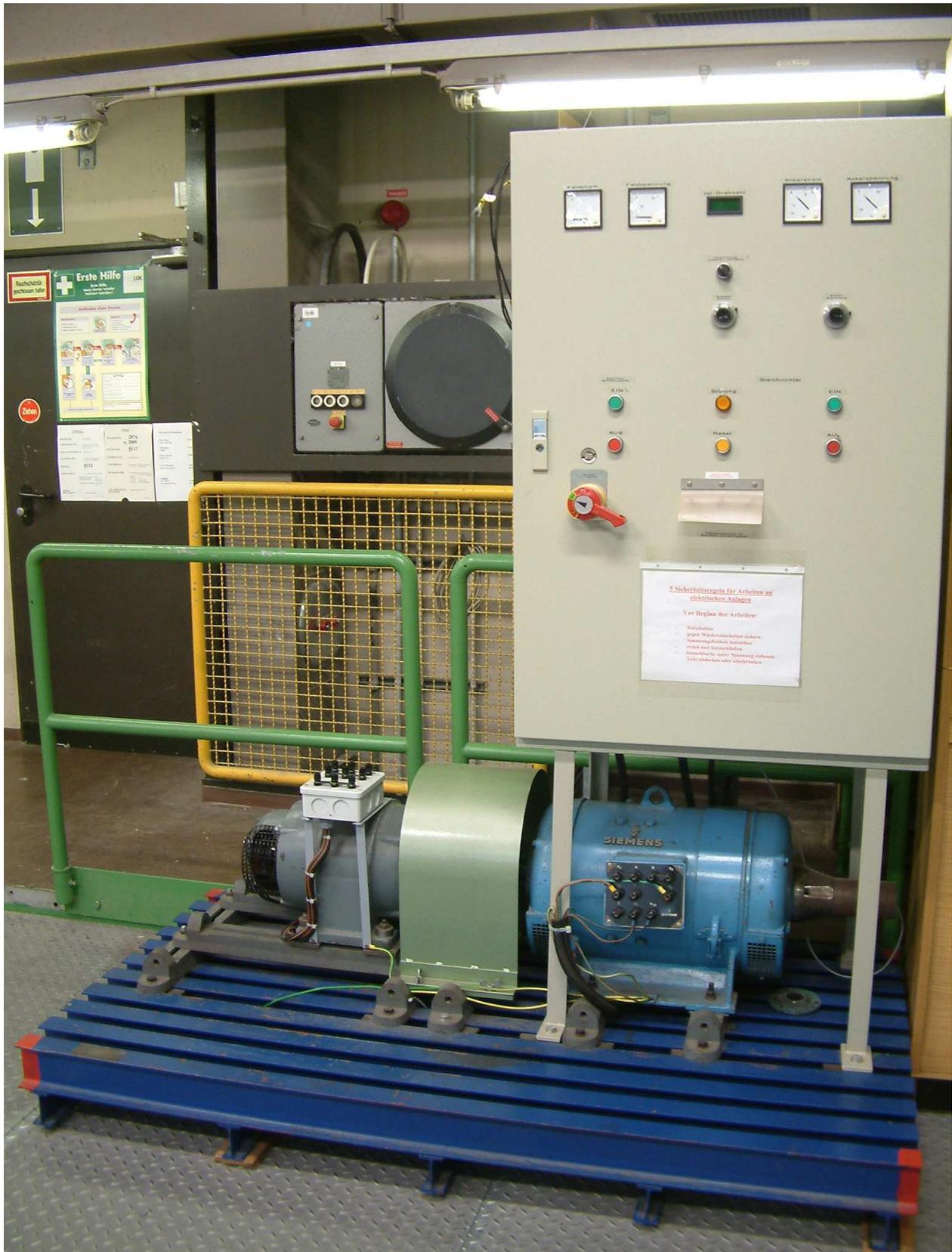
Die Drehstromsynchronmaschine wird überwiegend als Generator eingesetzt. Die Drehzahl der Synchronmaschine und die Frequenz der Spannung sind linear über die Polpaarzahl gekoppelt. Um einen Synchrongenerator an ein Insel- oder Verbundnetz zu betreiben, ist eine Wirk- und Blindleistungsregelung erforderlich. Die Leistungsgrenzen moderner Synchrongeneratoren, die in Kraftwerken zum Einsatz kommen, liegen derzeit<sup>1</sup> in der Größenordnung von 1.300 MW Wirkleistung.

In diesem Versuch wird das Betriebsverhalten der Synchron- und der Asynchronmaschine vorgestellt. Anhand von Experimenten sollen ausgewählte Eigenschaften näher untersucht werden. Dabei werden beide Drehstrommaschinen sowohl als Motor als auch als Generator eingesetzt.

Ziel dieses Versuchs ist es, einen Überblick über diese beiden Maschinentypen zu erhalten. Grundlegende physikalische Zusammenhänge werden vermittelt, um ein besseres Verständnis beider Maschinen zu sicherzustellen. Darüber hinaus ist es Teil des Versuchs, möglichst selbstständig die Maschinen zu bedienen, verschiedene Betriebspunkte anzufahren und Leistungsmessungen vorzunehmen. Übliche Vorgehensweisen wie zum Beispiel das Synchronisieren einer Synchronmaschine an ein Stromnetz oder den Einsatz von externen Rotorwiderständen bei Asynchronmaschinen sollen von den Studierenden selbst ausgeführt werden.

Die Messergebnisse sind aufzunehmen, grafisch darzustellen und zu diskutieren.

Die folgende Abbildung zeigt den Asynchron- Gleichstrommaschinensatz mit der zugehörigen Schalttafel.



Die folgende Abbildung zeigt den Synchron- Gleichstrommaschinensatz mit den zugehörigen Schalttafeln.



<sup>1</sup> Stand 2011

## Teil B: Erläuterungen und Grundlagenwissen

### 1 Grundlagen

Ganz allgemein bestehen elektrische Maschinen immer aus einem feststehenden Teil (Stator) und einem rotierenden Teil (Rotor). Für letzteren gibt es je nach Maschinenart synonyme: Bei Gleichstrommaschinen nennt man den Rotor „Anker“, bei Synchronmaschinen „Polrad“.

Synchronmaschinen und Asynchronmaschinen sind Drehfeldmaschinen. Bei diesen erzeugt der Stator ein magnetisches Drehfeld, das ein Drehmoment auf den Rotor ausübt.

#### 1.1 Bildung eines Drehfeldes aus drei Wechselfeldern

Zur Erzeugung eines magnetischen Drehfeldes werden drei gleichartige Spulen (Stränge) verwendet, deren Achsen in einer Ebene liegen und um  $120^\circ$  räumlich gegeneinander verdreht sind (Abbildung 1).

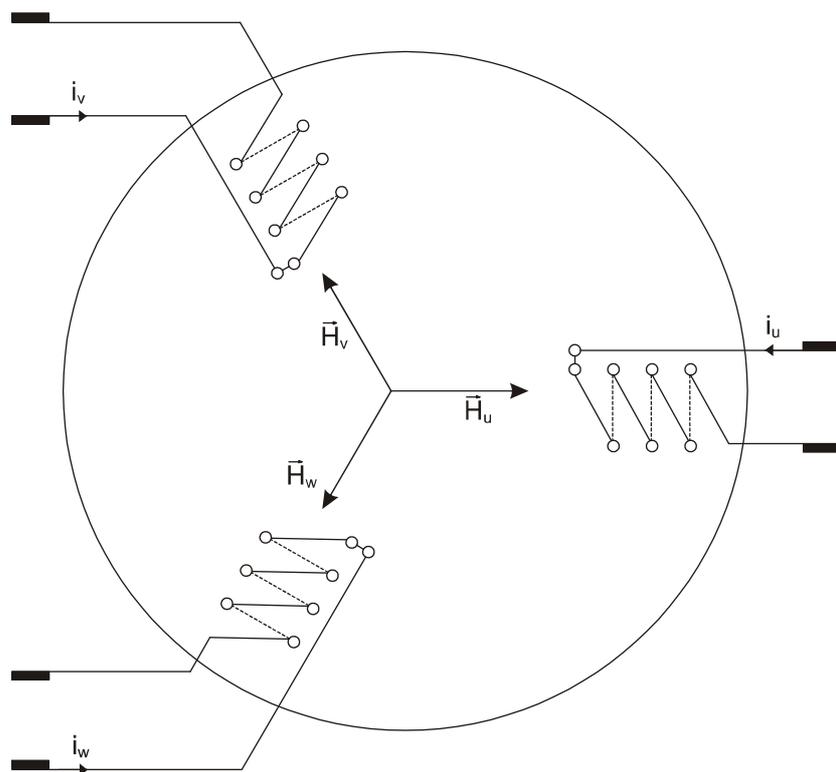


Abbildung 1: Prinzip der Erzeugung eines Drehfeldes

Die drei Spulen werden von den Strömen  $i_U, i_V$  und  $i_W$  durchflossen und erzeugen im Mittelpunkt des Sternes die drei magnetischen Feldstärken  $\vec{H}_U, \vec{H}_V$  und  $\vec{H}_W$ .

Die Gesamtfeldstärke  $\vec{H}$  ist die vektorielle Summe aus ihnen:

$$\vec{H} = \vec{H}_U + \vec{H}_V + \vec{H}_W.$$

Die Größe der magnetischen Feldstärken ist den Strömen proportional:

$$H_U = C \cdot i_U$$

$$H_V = C \cdot i_V$$

$$H_W = C \cdot i_W$$

Die Konstante  $C$  ist von den geometrischen Abmessungen und von der Windungszahl der Spulen abhängig. Den Feldstärkevektor  $\vec{H}$  kann man durch Vorgabe der Ströme  $i_U$ ,  $i_V$  und  $i_W$  in jede Richtung drehen. Eine Rotation von  $\vec{H}$  mit konstanter Winkelgeschwindigkeit bei konstantem Betrag ergibt sich, wenn die drei Ströme Sinusfunktionen der Zeit sind, die gegeneinander um 1/3 Periode ( $\hat{=} 120^\circ = 2\pi/3$ ) verschoben sind.

Dies folgt mit den Additionstheoremen der Winkelfunktionen, wenn man die Komponenten in einem xy-Koordinatensystem aufträgt (Abbildung 2) und die Komponente des Summenvektors bestimmt.

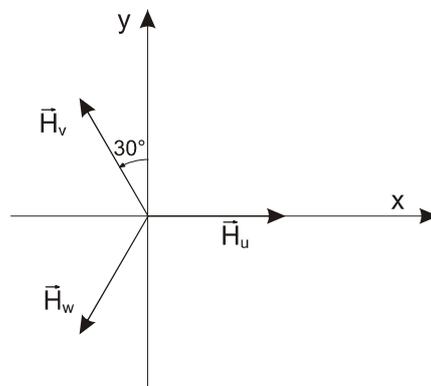


Abbildung 2: Zerlegung der Feldstärkevektoren nach rechtwinkligen Koordinaten

Die geometrische Addition der Feldanteile aller drei Spulen ergibt:

$$H_x = H_U + H_V \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + H_W \cdot \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) = H_U - \frac{1}{2} H_V - \frac{1}{2} H_W$$

$$H_y = H_V \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) + H_W \cdot \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot H_V - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot H_W$$

Die drei Ströme sind:

$$i_U = I \cdot \cos \omega t$$

$$i_V = I \cdot \cos \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$i_W = I \cdot \cos \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right)$$

(Phasenfolge: U – V – W)

Wird dies in der Feldstärkegleichung eingesetzt, ergibt sich:

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} H_x = C \cdot I \left\{ \cos \omega t - \frac{1}{2} \cdot \left[ \cos \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) + \cos \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \right] \right\} \\ H_y = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot C \cdot I \left[ \cos \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) - \cos \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \right] \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} H_x = \frac{3}{2} \cdot C \cdot I \cdot \cos \omega t \\ H_y = \frac{3}{2} \cdot C \cdot I \cdot \sin \omega t \end{array} \right.$$

Lässt man  $\omega t$  von 0 bis  $2\pi$  laufen, beschreibt der Vektor  $\vec{H} = H_x + H_y$  also einen Kreis. Das bedeutet, dass dieser Vektor mit der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  in mathematisch positiver Richtung (gegen den Uhrzeigersinn) rotiert. Sein Betrag ist dabei konstant  $\frac{3}{2} \cdot C \cdot I$ . Dies lässt sich grafisch durch vektorielle Addition verdeutlichen (siehe Abbildung 3) Die Drehrichtung kehrt sich um, wenn zwei der drei Stränge vertauscht werden. Dann wird nämlich einfach die Phasenfolge an den Spulen umgekehrt, z. B. U – W – V.

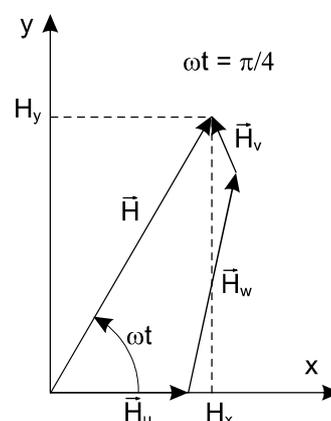


Abbildung 3: Vektorielle Addition zum Zeitpunkt  $\omega t = 4\pi$

Zur Führung des magnetischen Flusses, zur mechanischen Festlegung der Spulen und um die magnetischen Zugspannungen aus dem Luftspalt von innen fernzuhalten, sind die Spulen in Nuten eingebettet. Zur Vermeidung von Wirbelströmen innerhalb des Eisens ist der Stator aus einzelnen, durch Oxid- oder Lackschichten voneinander isolierten Blechen aufgebaut. Die natürliche Oxidschicht allein reicht in vielen Anwendungsfällen schon aus.

In Abbildung 4 ist ein Schnitt des Stators einer Maschine dargestellt. Die Spulen bestehen aus Stäben oder Drahtbündeln, die axial an der Innenseite des Stators angeordnet sind. Diese werden an der Vorder- und Rückseite des Stators radial miteinander verbunden, so dass eine zu Abbildung 1 äquivalente Spulenordnung entsteht.

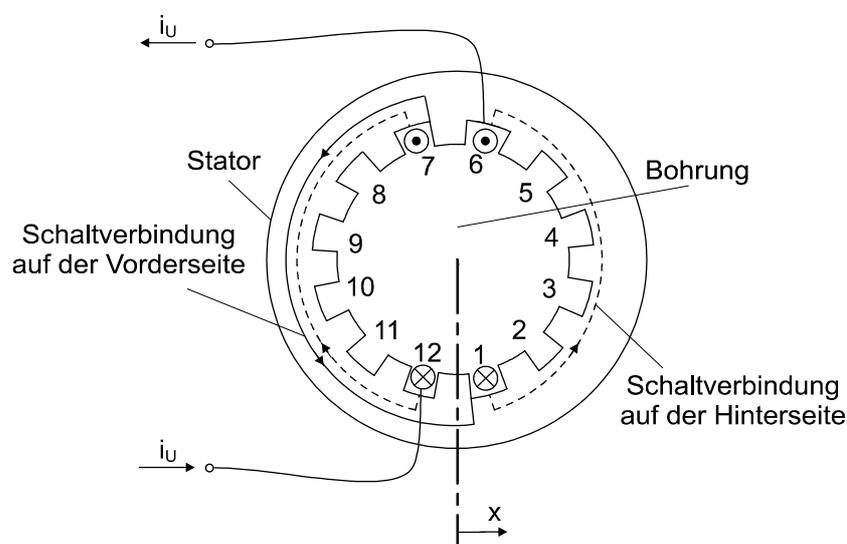


Abbildung 4: Querschnitt durch einen Stator einer Drehfeldmaschine

Den genauen Wicklungsverlauf kann man am besten durch Abwickeln bzw. durch Abrollen des Stators in einer Ebene zeigen (Abbildung 5). Die auf der Vorderseite angeordneten Schaltverbindungen sind im Wicklungsplan im unteren Teil der Abbildung 5 dargestellt; die Stabverbindungen auf der Hinterseite des Stators auf dem oberen. In der Mitte befinden sich die Stäbe oder Drahtbündel in den Nuten. Es sind insgesamt zwölf Stäbe am Umfang unterzubringen, sie werden zu drei Wicklungssträngen zusammengeschaltet.



Die Amplitude dieser Feldkurve ist proportional zu dem Strom  $i_u$ , sie ändert sich also sinusförmig mit der Zeit. Während der negativen Halbwelle sind die Amplituden daher umgekehrt. Das Gesamtfeld im Luftspalt wird durch Überlagerung der Felder aller drei Stränge gebildet. Führt man die Überlagerung für die Zeitpunkte  $\omega t = 0$  und  $\omega t = \pi/2$  aus, so ergeben sich die folgenden Verläufe, die in Abbildung 7 dargestellt werden.

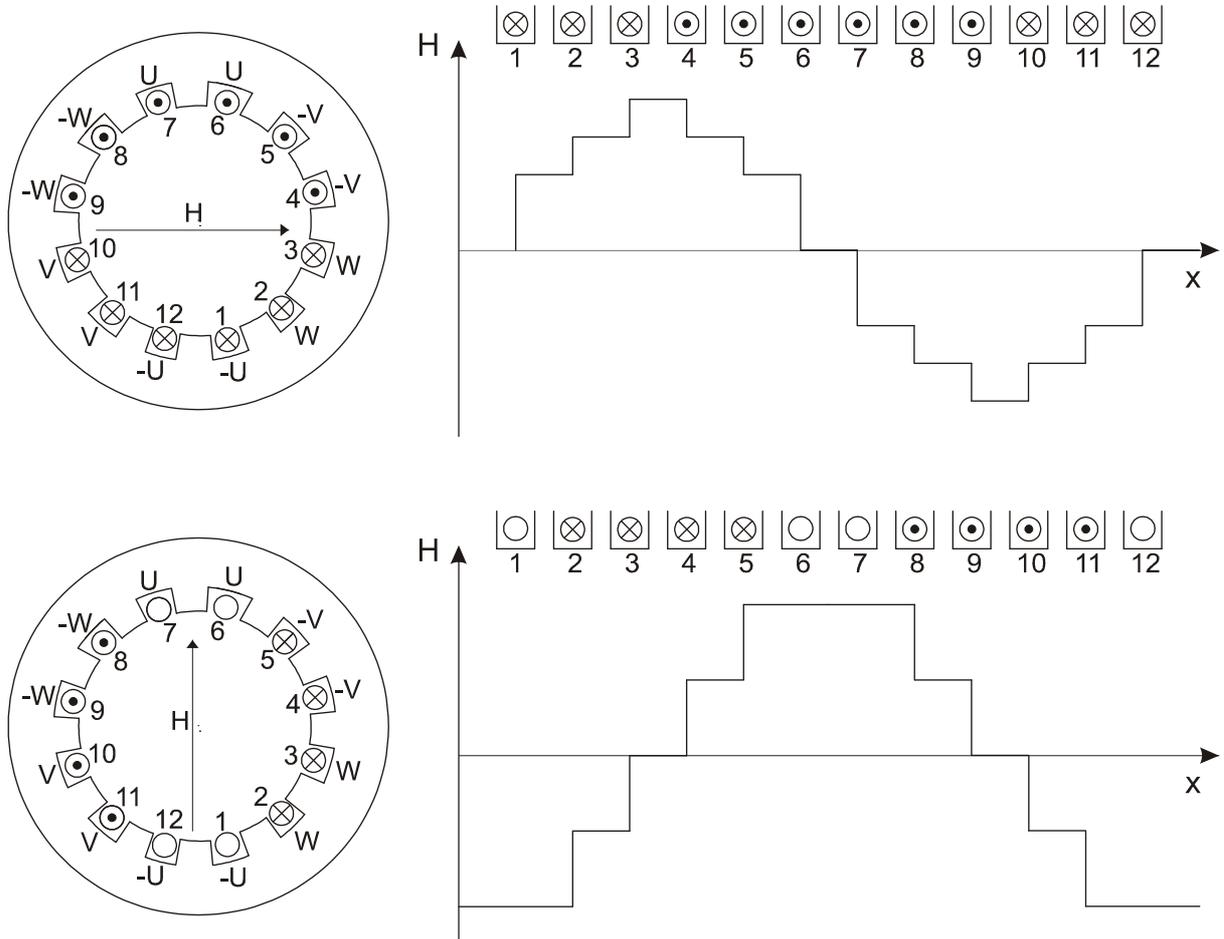


Abbildung 7: Magnetische Feldstärke aller Wicklungsstränge

Diese Kurve kann als eine Oberschwingungshaltige Sinuswelle aufgefasst werden, deren Grundwelle sich mit fortschreitender Zeit nach rechts (in positive x-Richtung) fortbewegt.

Für kompliziertere Wicklungen kann man derartige Feldkurven mittels eines Rechners erstellen. In Abbildung 8 sind die Feldkurven einer Wicklung nach Abbildung 6 für die Speisung mit symmetrischem Drehstrom aufgezeichnet. Die einzelnen Kurven unterscheiden sich um jeweils 1/20 Periode. Man erkennt, dass nach einer halben Periode die Kurve um eine Polteilung nach rechts gewandert ist. Die Polteilung  $\tau_p$  gibt die Bogenlänge zwischen zwei benachbarten Polen an.

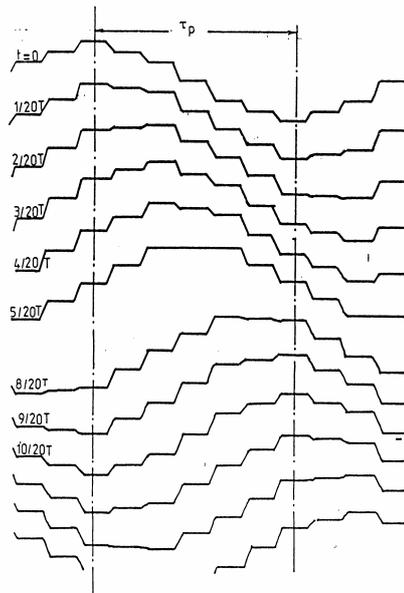


Abbildung 8: Magnetische Feldstärke entlang dem Luftspalt

Der Oberwellengehalt des Luftspaltfeldes kann durch die Aufteilung der Wicklung auf die Nuten beeinflusst werden. Besonders die Sehnung ist hier ein wirksames Mittel. Dabei sind Hin- und Rückleiter einer Spule etwas weniger als eine halbe Polteilung auseinander.

Bei einer so genannten „Zweischichtwicklung“ sind in jeder Nut zwei Leiter oder Leiterbündel untergebracht. Eine Spulenseite jeder Spule liegt in der Unterlage, d. h. weiter vom Luftspalt entfernt, die andere Spulenseite in der Oberlage, d. h. direkt am Luftspalt. Damit ist eine recht freie Wahl der Wicklungsanordnung möglich.

Bisher wurde von drei Spulen mit  $120^\circ$  Versatz ausgegangen. Bringt man nun zwei derartige Spulensätze am Umfang unter, dann ist der räumliche Versatz zwischen zwei Spulen nur  $60^\circ$ . Im Magnetfeld im Luftspalt ergibt sich somit die Folge Nord-Süd-Nord-Südpol, also ein 4-poliges Feld (zum Vergleich Abbildung 7: 2-poliges Feld).

Der Rotor dreht sich nur mit der halben Netzfrequenz.

Die Polpaarzahl  $p$  bestimmt somit zusammen mit der Netzfrequenz die Drehzahl des Drehfeldes.

## 2 Beschreibung der Synchronmaschine

### 2.1 Allgemeines

Synchronmaschinen sind Drehfeldmaschinen, bei denen der Rotor (auch Polrad genannt) mit gleicher Drehzahl rotiert wie das Luftspaltfeld. Dies ist eine unverzichtbare Voraussetzung zum Betrieb der Maschine. Eine Synchronmaschine muss daher von außen auf Synchrondrehzahl gebracht werden und kann nicht selbsttätig aus dem Stillstand anlaufen. In allen zulässigen Betriebspunkten wirkt also ein in Läuferkoordinaten räumlich und zeitlich konstantes Magnetfeld. Das Polrad kann daher aus massivem Eisen gefertigt werden.

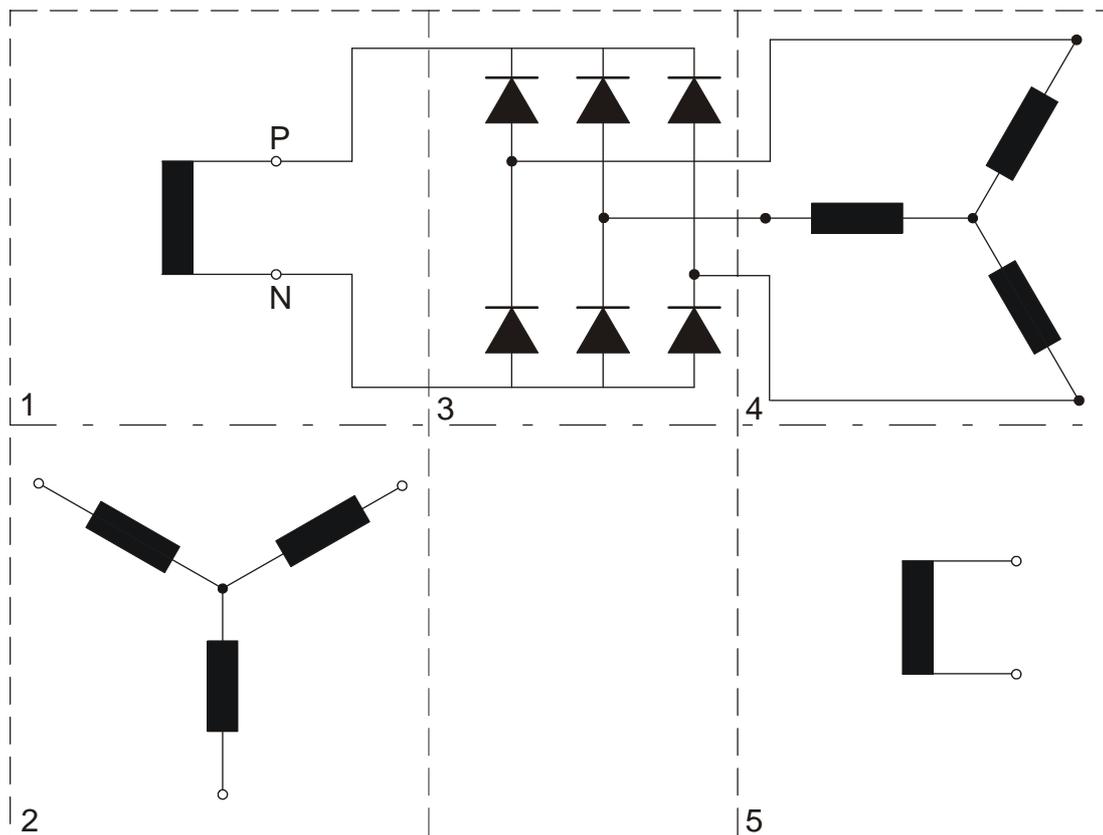
Das Polrad-Magnetfeld kann entweder durch Dauermagnete erzeugt werden (Servomotoren für Werkzeugmaschinen-Vorschubantriebe, Kleinmaschinen wie Uhren-Antriebe und Motorrad-Lichtmaschinen) oder durch Gleichstrom-Wicklungen. Bei letzteren wird im Rotor durch den Gleichstrom, den man als Erregerstrom oder kurz Erregung bezeichnet, ein magnetisches Gleichfeld erzeugt, das dem Magnetfeld eines Dauermagneten entspricht.

Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten, den Erregerstrom dem Polrad zuzuführen:

- Erregerspannung wird von außen über Schleifringe zugeführt
- Selbsterregter Gleichstromgenerator erregt Synchronmaschine
- Bürstenlose Erregung der Synchronmaschine

Die erforderliche Erregerleistung ist klein (1 % - 5 % der Nennleistung), da nur die ohmschen Verluste in der Erregerwicklung gedeckt werden müssen.

In den letzten Jahren hat sich eine wartungsarme, bürstenlose Variante durchgesetzt. Das gilt, wenn Wartungsfreiheit besonders hoch sein muss (Rohrturbinengeneratoren) oder die Umweltbedingungen die Schleifringübertragung erschweren (chemisch aggressive oder explosive Gase, Wasserstoffatmosphäre) und auch bei großen Turbogeneratoren, bei denen für Erregerströme von 4.000 A und mehr die üblichen Schleifringkonstruktionen versagen. Ein schleifringloser Synchrongenerator trägt auf der Generatorwelle eine Erregermaschine, die im Ständer eine Gleichstrom- und im Läufer eine Drehstromwicklung enthält (Außenpol-Synchronmaschine). Die Energiezufuhr zum Polrad der Hauptmaschine erfolgt dann über einen mitrotierenden Drehstrom-Gleichrichter. Die Spannung der Hauptmaschine wird geregelt, indem man den Erregerstrom des Wellengenerators verstellt.



- |   |                                       |
|---|---------------------------------------|
| 1 | Ständer des Synchrongenerators        |
| 2 | Polradwicklung des Synchrongenerators |
| 3 | Gleichrichterbrücke                   |
| 4 | Läufer der Erregermaschine            |
| 5 | Erregerwicklung der Erregermaschine   |

Abbildung 9: Schleifringlose Synchronmaschine

Man unterscheidet bei Synchronmaschinen Schenkelpollläufer, bei denen das Polrad ausgeprägte Pole aufweist (langsam laufende Maschinen) und Vollpolläufer, bei denen die Wicklungen in eingefrästen Nuten eines massiven Zylinders liegen (Schnellläufer mit  $1.500$  oder  $3.000 \text{ min}^{-1}$ , Grenzleistungsmaschinen bis über  $1 \text{ GVA} = 1.000 \text{ MVA}$ ).

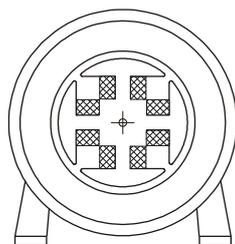
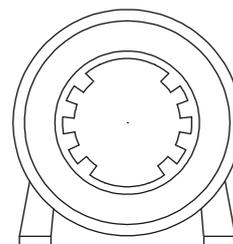
a) Schenkelpollläufer z. B. ( $p = 2$ )b) Vollpolläufer z. B. ( $p = 1$ )

Abbildung 10: Rotorbauformen

Einige Hersteller bauen aus Fertigungsgründen auch kleinere Synchronmaschinen (~ 1.000 kVA) in höherpoliger Ausführung als Trommelläufer mit geblechtem Rotor.

Aufgrund ihres festen Drehzahl-Frequenz-Verhältnisses und durch ihre Fähigkeit, induktive Blindleistung abzugeben (siehe Kapitel 2.2), eignen sich Synchronmaschinen hervorragend als Generatoren.

Da die Magnetisierungsleistung durch den Polrad-Gleichstrom aufgebracht werden kann, können Synchronmaschinen je nach Erregung (Polrad-Strom) induktive Blindleistung aufnehmen oder abgeben und werden zur Verbesserung des Leistungsfaktors ( $\cos\varphi$ ) eingesetzt (so genannte Phasenschieber). Daher finden Synchronmaschinen auch bei großen Antrieben Anwendung, bei denen es darauf ankommt, das Netz vom Blindstrom zu entlasten.

Im Folgenden wird immer eine gleichstromerregte Synchronmaschine betrachtet.

In den Unterkapiteln 2.2 bis 2.3 soll das Verhalten der Synchronmaschinen anhand des Ersatzschaltbildes nach Abbildung 11 schrittweise erklärt werden. Für alle Bilder gilt das Verbraucher-Zählpfeilsystem (Verbraucherzählpfeile: für  $U > 0$ ,  $I > 0$  gilt  $P > 0$ ).

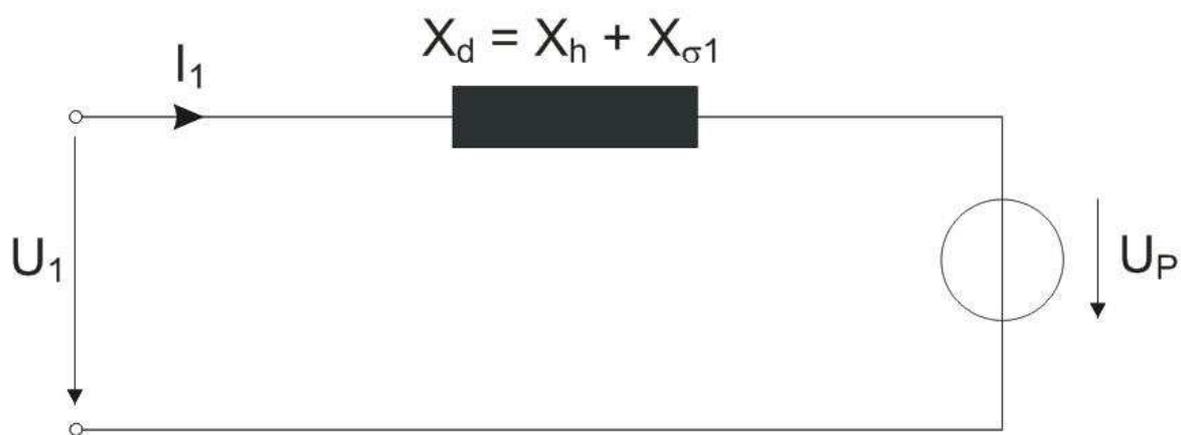


Abbildung 11: Vereinfachtes Ersatzschaltbild der Synchronmaschine

Die ohmschen Widerstände der Statorwicklungen werden hier vernachlässigt, sie können durch ohmsche Widerstände berücksichtigt werden, die den Statorwicklungen vorzuschalten sind.

Da die Synchronmaschine als symmetrisch aufgebaut vorausgesetzt wird, reicht es, ein einphasiges Ersatzschaltbild zu verwenden. Die Eingangsspannung  $U_1$  ist dann die Sternspannung an einer der Maschinenklemmen und der Strom  $I_1$  ist der Strom einer Klemme der Maschine (Statorstrom). Im Rotor wird durch den Erregerstrom  $I_{err}$  ein magnetisches Feld erzeugt. Dieses bewegt sich relativ zum Stator, ist auf diesen bezogen also ein Wechselfeld. Die dadurch im Stator induzierte Spannung wird als die Polradspannung  $U_P$  bezeichnet. Durch die Synchronreaktanzen  $X_d$  (Ankerrückwirkung ( $X_h$ ) und Ständerstreuung ( $X_{\sigma 1}$ )) ist die Ankerreaktion berücksichtigt. Wird die Maschine ohne Erregung ( $U_P = 0$ ), jedoch mit Nenndrehzahl angetrieben, an das Netz geschaltet, so fließt dadurch der Strom  $I_1 = I_m = \frac{U_1}{jX_d}$ . Der Strom  $I_m$  ist der Magnetisierungsstrom, den die Statorinduktivität für eine bestimmte Eingangsspannung ohne Erregung erfordert.

Um die Verhältnisse bei Betrieb der Maschine ohne Drehmoment zu beschreiben, werden außerdem zwei Wechselstromgrößen benutzt, die nicht im Ersatzschaltbild auftreten. In den Zeigerdiagrammen (s. Abb. 14, 15 und 16) findet sich der Erregerstrom  $I_{err}$  wieder, der als Gleichstrom eigentlich nicht komplex darstellbar ist. Da sich der Rotor jedoch relativ zum Stator bewegt, induziert das magnetische Gleichfeld des Rotors im Stator eine Wechselspannung  $U_P$ . Diese Spannung könnte auch durch Beaufschlagung des Stators mit einem Wechselstrom erzeugt werden. Das so erhaltene Abbild des Erregerstromes im Stator ist der Strom  $I_{err}$ , der im Zeigerbild angegeben ist. Er wird aus dem Eingangsstrom  $I_1$  und dem Magnetisierungsstrom  $I_m$  gebildet ( $I_{err} = I_m - I_1$ ).

## 2.2 Einzelbetrieb der Synchronmaschine

Im Einzel- oder Inselbetrieb (z. B. auf Schiffen oder in Flugzeugen) ist die Maschine nicht mit einem Netz konstanter Frequenz verbunden, sondern bestimmt die Frequenz und die Spannung im Netz selbst.

### 2.2.1 Leerlauf

Der Läufer der Synchronmaschine wird mit konstanter Drehzahl angetrieben. Die Statorklemmen sind offen, in der Erregerwicklung fließt ein Gleichstrom. Die Frequenz der im Stator induzierten Wechselspannung  $U_P$  ist:

$$f = p \cdot n$$

$p$  = Polpaarzahl;

$n$  = Drehzahl.

Bei konstanter Drehzahl hängt die Größe der induzierten Spannung entsprechend dem Induktionsgesetz nur noch von der Größe des magnetischen Flusses ab. Die Leerlaufkennlinie  $U_{10} = U_P = f(I_{err})$  bei  $n = const.$  entspricht daher der Magnetisierungskennlinie eines Eisenkreises mit Luftspalt (Abbildung 12).

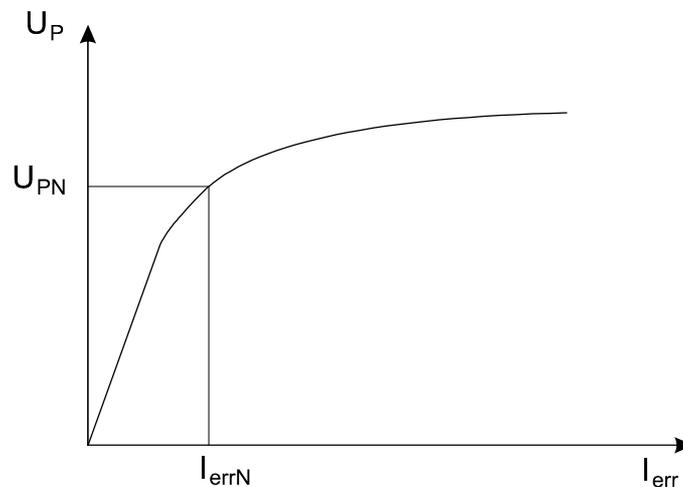


Abbildung 12: Leerlaufspannung in Abhängigkeit vom Erregerstrom

Den im Leerlauf auftretenden magnetischen Fluss kann man sich auch durch einen anderen Betriebsfall hervorgerufen denken. Wenn bei konstanter Drehzahl und offener Erregerwicklung ( $I_{err} = 0$ ) die Ständerwicklung an ein Netz mit der Spannung  $U_{Netz}$  gelegt wird, nimmt die Synchronmaschine einen Magnetisierungsstrom  $I_m$  auf, der in der Maschine den gleichen magnetischen Fluss hervorruft.

Demnach ist es gleichgültig, ob der in der Synchronmaschine herrschende Fluss von der Wechselspannung  $U_{Netz}$  eines festen Drehstromnetzes oder vom Erregergleichstrom  $I_{err}$  in der Läuferwicklung verursacht wird.

### 2.2.2 Belastung

Wird der Synchronmaschine elektrische Leistung entnommen, so fließen in den drei Wicklungssträngen des Ständers Ströme mit dem Effektivwert  $I_1$  und der Frequenz  $f$ , die untereinander um  $120^\circ$  zeitlich phasenverschoben sind. Sie haben ein Drehfeld zur Folge, das mit der gleichen Winkelgeschwindigkeit wie das Polrad im Raum umläuft. Beim Generator macht sich die Überlagerung der beiden Felder in einer Spannungsänderung an den Generatorklemmen bemerkbar. Die Klemmenspannung wird außerdem durch die Spannungsfälle an den ohmschen Verlustwiderständen und am Streublindwiderstand beeinflusst.

## 2.3 Netzbetrieb der Synchronmaschine

### 2.3.1 Synchronisation der Maschine mit dem Netz

Um eine Synchronmaschine auf ein Netz konstanter Frequenz und Spannung schalten zu können, darf zwischen den entsprechenden Klemmen des Netzes und der Maschine keine Spannungsdifferenz bestehen. Die für die stoßstromfreie Verbindung der Maschine mit dem Netz einzuhaltenden Synchronisationsbedingungen sind dann erfüllt, wenn Maschinenspannung und Netzspannung übereinstimmen:

- Betrag (Amplitude),
- Frequenz,
- Phasenfolge und
- Phasenlage

Die Frequenz kann durch die Drehzahl der die Synchronmaschine im Leerlauf antreibenden Maschine variiert werden. Die Spannungshöhe lässt sich durch den Erregerstrom nachstellen. Die Gleichheit der Phasenfolge ist gegebenenfalls durch Vertauschen zweier Stator клемmen oder durch Änderung der Drehrichtung zu erreichen. Die Einstellung der richtigen Phasenlage der Maschinenspannung zur Netzspannung geschieht durch kurzzeitige Variation der Drehzahl der antreibenden Maschine, wobei danach wieder die Synchrondrehzahl eingestellt werden muss.

Zur Kontrolle dieser Bedingungen verwendet man Spannungsmesser (Betrag), evtl. zwei Zungen-Frequenzmesser und Glühlampen in der so genannten Dunkel-Schaltung oder in der Hell-Dunkel-Schaltung. (Hinweis: Für die Schaltung nach Abbildung 13 sind die Lampen für doppelte Strangspannungen zu bemessen, z. B. durch Reihenschaltung zweier gleichartiger Lampen). Solange die Frequenz noch nicht übereinstimmt, sind alle Lampen hell. Zuschalten darf man, sobald alle Lampen dunkel sind (Dunkelschaltung) bzw. wenn bestimmte Lampen hell sind (Hell-Dunkel-Schaltung).

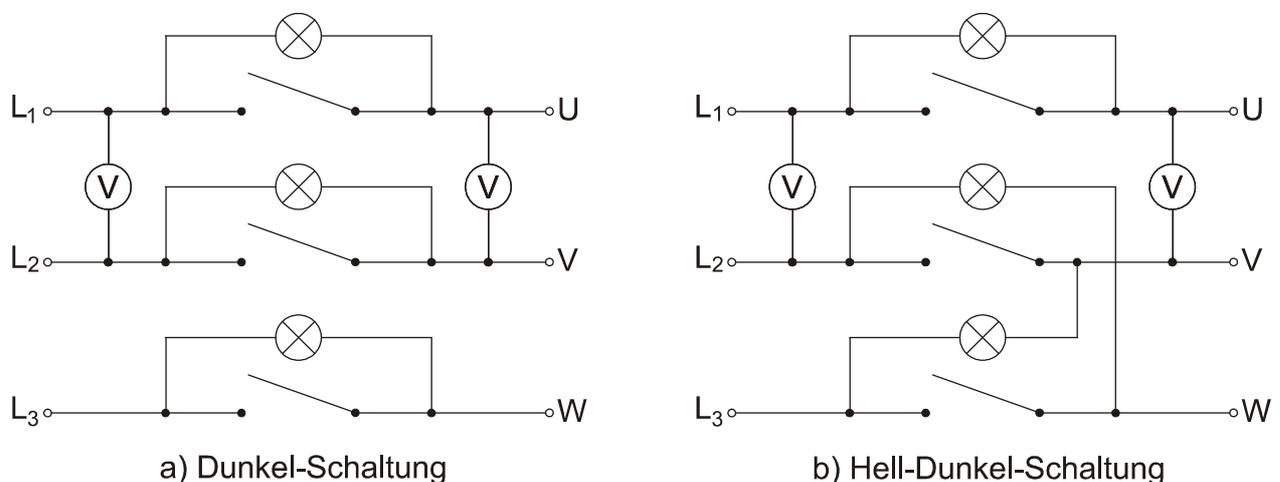


Abbildung 13: Synchronisationsschaltung

### 2.3.2 Nicht erregte Synchronmaschine am Netz

Eine Synchronmaschine, welche ohne Erregung an das Drehstromnetz angeschlossen ist, wirkt wie eine symmetrische dreisträngige Induktivität.

Sie kann kein Drehmoment erzeugen und muss deshalb angetrieben werden. Sie nimmt induktive Blindleistung auf (sie nimmt in geringem Maße auch Wirkleistung auf, um die ohmschen Verluste zu decken). Der Klemmenstrom  $I_1$  ist gleich dem Magnetisierungsstrom  $I_m$  (Abbildung 14).

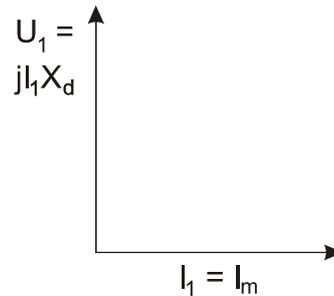


Abbildung 14: Nicht erregte Synchronmaschine am Netz

### 2.3.3 Erregte Synchronmaschine am Netz

Wenn in der Erregerwicklung der Synchronmaschine ein Erregerstrom fließt, überlagern sich der von der Erregerwicklung erzeugte Fluss und der von der Statorwicklung erzeugte Fluss. Der Gesamtfluss entsteht durch Überlagerung des Statorflusses und des Erregerflusses. Insgesamt ist weiterhin der Strom  $I_m$  nötig, um den Fluss aufzubauen. Dieser setzt sich aus dem Erregerstrom  $I_{err}$  und dem Netzstrom  $I_1$  zusammen.

In die Statorwicklung induziert die vom Erregerstrom  $I_{err}$  durchflossene Erregerspule (Polrad) die Polradspannung  $U_P$ . Sie eilt  $I_{err}$  um  $90^\circ$  voraus.

Aus dem Ersatzschaltbild des Stators (Abbildung 11) geht der Spannungsfall an der Hauptinduktivität  $X_d$  der Maschine hervor:

$$U_{X_d} = U_1 - U_P$$

Aufgrund dieses Spannungsfalls fließt ein Strom.

$$I_1 = \frac{U_1 - U_P}{jX_d} = j \cdot \frac{U_P - U_1}{X_d}$$

Für  $U_P = U_1$  ist die induzierte Spannung gleich der Nennspannung und der Statorstrom verschwindet ( $I_1 = 0$ ).

### 2.3.3.1 Drehmoment = 0: Betrieb als Phasenschieber

Damit lässt sich das Verhalten einer unbelasteten Synchronmaschine erklären: Ist  $I_{err}$  klein, so ist die in die Statorwicklung induzierte Spannung  $U_P$  ebenfalls klein. Der Spannungsabfall über der Induktivität  $X_d$  bewirkt einen gegenüber  $U_1$  um  $90^\circ$  nacheilenden Strom  $I_1$ . Die Maschine wirkt wie eine Induktivität ( $I_1$  muss parallel zu  $I_{err}$  liegen, um ihn zu  $I_m$  zu ergänzen).

Wird der Erregerstrom vergrößert, steigt auch  $U_P$ , damit sinkt  $I_1$ . Bei gleicher Größe von  $U_P$  und  $U_1$  verschwindet  $I_1$ , die Maschine ist jetzt richtig, d. h. sie ist mit Nennererregterstrom erregt. Der zum Aufbau des Flusses erforderliche Strom  $I_m$  ist der Erregerstrom. Wird  $I_{err}$  weiter vergrößert, wird  $U_P$  größer als  $U_1$ . Die Spannung über  $X_d$  kehrt ihr Vorzeichen um,  $I_1$  eilt jetzt der Spannung  $U_1$  um  $90^\circ$  vor, da der Strom  $I_{err}$  verringert werden muss, um auf den zur Erzeugung des Flusses nötigen Strom  $I_m$  zu kommen. Die Maschine wirkt wie eine Kapazität. In Abbildung 15 sind diese Zusammenhänge grafisch dargestellt.

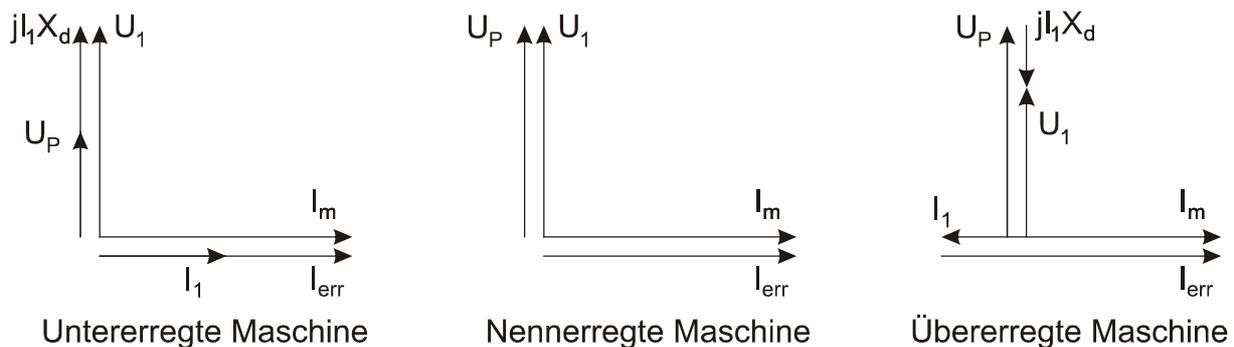


Abbildung 15: Zeigerdiagramme der unbelasteten Synchronmaschine

In allen Fällen ohne Last stellt sich aufgrund der Kraftwirkung des Statorfeldes auf die Erregerspule zwischen Polrad und Ankerfeld ein Winkel von  $0^\circ$  ein. In dieser Betriebsart wird je nach Größe von  $I_e$  entweder Blindleistung aus dem Netz aufgenommen oder an das Netz abgegeben (Blindleistungsmaschine, Phasenschieber).

### 2.3.3.2 Drehmoment $M \neq 0$ : Motor- oder Generatorbetrieb

Wird die Synchronmaschine als Motor belastet, so will das Polrad gegenüber dem Ständerdrehfeld zurückbleiben. Mit dem Polrad dreht sich auch die Polradspannung  $U_P$  um den Winkel  $\vartheta$  aus ihrer ursprünglichen Lage heraus.

Die damit entstehende Differenzspannung bedingt einen Stromfluss  $I_1$  durch die Statorwicklung. Der Winkel zwischen  $U_1$  und  $I_1$  ist jetzt  $\varphi \neq 90^\circ$ , von der Maschine wird Wirkleistung aufgenommen oder abgegeben. Die Wirkleistung beträgt  $P = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi$ . Sie ist gleich der Wirkleistung  $P = U_P \cdot I_1 \cdot \cos(\varphi - \vartheta)$ , die in der Ersatzspannungsquelle  $U_P$  umgesetzt wird.

Die Maschine nimmt gleichzeitig die Blindleistung  $Q = U_1 \cdot I_1 \cdot \sin\varphi = U_p \cdot I_1 \cdot \sin(\varphi - \vartheta)$  aus dem Netz auf (siehe Abbildung 16 a).

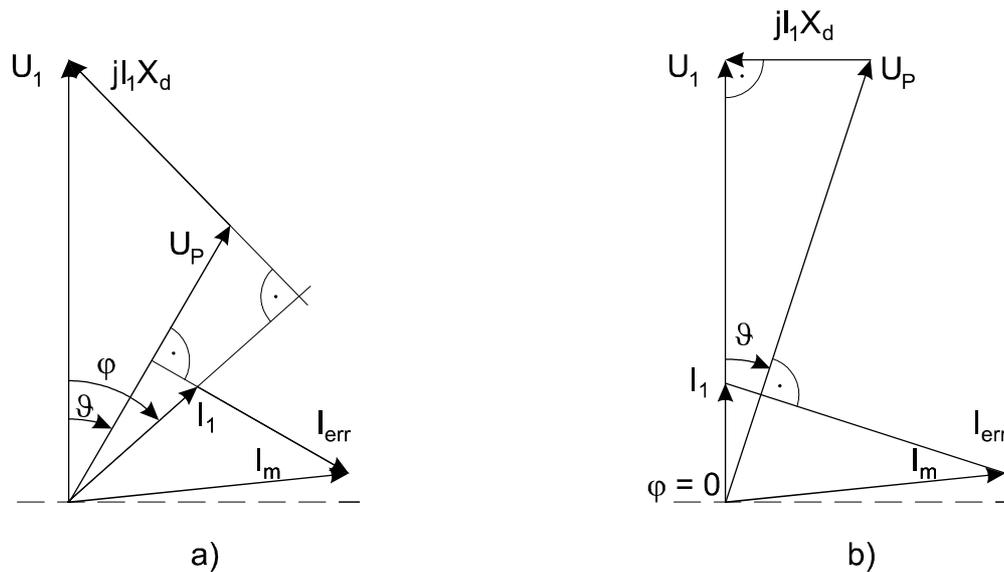


Abbildung 16: Zeigerdiagramme belasteter Synchronmaschinen

Durch Vergrößern des Erregerstromes  $I_{err}$  bei konstantem Drehmoment kann der Winkel  $\varphi$  auf  $0^\circ$  verkleinert werden, die Maschine nimmt jetzt nur noch Wirkleistung auf,  $I_1$  wird betragsmäßig minimal, der Polradwinkel  $\vartheta$  wird kleiner (siehe Abbildung 16 b).

Arbeitet die Synchronmaschine an einem starren Netz ( $f$  und  $U$  konstant) mit konstanter Erregung ( $I_{err} = const.$ ), dann ist  $M$  linear proportional zu  $\sin \vartheta$ .

Durch weiteres Vergrößern des Erregerstromes kann der Polradwinkel  $\vartheta$  noch weiter verringert werden. Dabei wird der Strom  $I_1$  betragsmäßig größer und eilt  $U_1$  vor. Die Maschine ist übererregt und gibt Blindleistung an das Netz ab (verhält sich wie ein Kondensator).

Für den Generatorbetrieb gilt entsprechendes, allerdings ist die Wirkleistung negativ (im Verbraucherzählpeilsystem),  $I_1$  liegt in der unteren Halbebene und  $U_p$  (das Polrad) eilt  $U_1$  voraus.

### 2.3.4 Mechanisches Ersatzmodell

Eine Synchronmaschine ist wegen  $M \sim \sin \vartheta$  bei langsamen Belastungsänderungen mit einer elastischen Welle vergleichbar. Dem Polradwinkel  $\vartheta_p$  entspricht dann die mechanische Verdrehung der Wellenenden gegeneinander. Die Steifigkeit der „Welle“ hängt außer von einigen konstruktionsbedingten Maschinenparametern von der Erregung ab.

Bei zunehmender Belastung der Maschine nimmt der Polradwinkel zu, so wie eine Welle zunehmend tordiert wird. Das maximal mögliche Drehmoment (das Kippmoment) gibt eine Synchronmaschine bei einem Polradwinkel von  $\pi/2$  ab, weil dann Ständer- und Läuferfeld aufeinander senkrecht stehen. Übersteigt das Antriebsmoment das Kippmoment, so beschleunigt der Rotor gegenüber dem Drehfeld. Polrad- und Statorfeld sind dann zeitweise gleichgerichtet und zeitweise antiparallel, was zu hohen Ausgleichsströmen im Netz und Pendelmomenten in der Welle führt. Man sagt, die Maschine „fällt außer Tritt“. Im mechanischen Ersatzmodell entspricht dies der Zerstörung der Welle, bei der Synchronmaschine werden Schäden meist durch ein Ansprechen der elektrischen Schutzorgane vermieden.

### 3 Beschreibung der Asynchronmaschine

#### 3.1 Allgemeines

Wie die Synchronmaschine, ist auch die Asynchronmaschine eine Drehfeldmaschine. Der Stator einer Asynchronmaschine zeigt keine grundsätzlichen Abweichungen zur Synchronmaschine.

Anders als bei der Synchronmaschine erfolgt die Magnetisierung des Rotors bei den Asynchronmaschinen (engl. Induction Machines) durch Induktionswirkung vom Stator. In einer im Läufer angebrachten Drehstromwicklung werden durch das umlaufende Statorfeld Spannungen induziert, welche in den kurzgeschlossenen Wicklungen einen Stromfluss zur Folge haben. Im Zusammenwirken dieser Ströme mit dem Ständer-Drehfeld entsteht das Drehmoment der Asynchronmaschine, die Magnetisierungsleistung wird also gewissermaßen transformatorisch in den Läufer übertragen, daher nimmt die Asynchronmaschine im Gegensatz zur Synchronmaschine immer Blindleistung aus dem Netz auf.

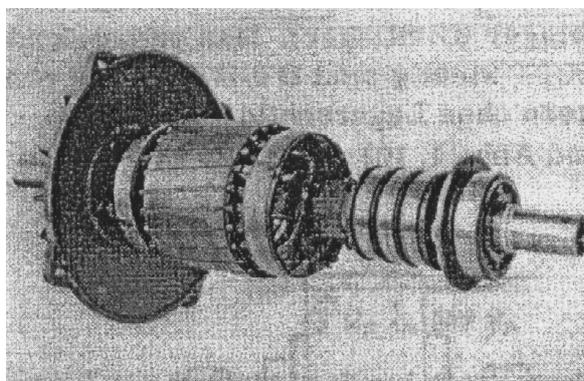


Abbildung 17: Schleifringläufer

Aus diesem Grund kann die Asynchronmaschine nur ein Drehmoment entwickeln, wenn sie sich nicht mit synchroner Drehzahl dreht. Im Synchronismus steht das Drehfeld im Läuferkoordinatensystem still und kann somit keine Spannungen induzieren.

Der Läufer muss wegen des ihn durchsetzenden Wechselfeldes geblecht sein.

Sind die Rotorwicklungen über Schleifringe zugänglich, so kann durch Verändern der Abschlusswiderstände die Drehzahl-Drehmoment-Charakteristik des Motors beeinflusst werden (Abbildung 17). Man spricht dann von einem Asynchronmotor mit Schleifringläufer.

Die Wicklungen im Rotor können auch durch je einen massiven Metallstab pro Nut ersetzt werden. Diese Metallstäbe werden dann an den Stirnseiten mit ebenfalls massiven Kurzschlussringen kontaktiert, so dass sie praktisch alle parallel geschaltet sind (Abbildung 18). Diese Anordnung wird als Käfigläufer bezeichnet. Für das Betriebsverhalten ergibt dies keine Unterschiede zur kurzgeschlossenen Drehstromwicklung. Die Drehmoment-Charakteristik kann jetzt nur noch durch gezielten Einsatz von Stromverdrängung beeinflusst werden. Dabei wird ausgenutzt, dass bei hohen Frequenzen der Strom nur an der Oberfläche des Rotors fließt (entsprechend dem Skineneffekt). Da die Frequenz im Läufer im regulären Arbeitspunkt sehr niedrig ist, können die Käfigstäbe so geformt werden, dass die beim Anlaufen aus dem Stillstand im Rotor auftretende Netzfrequenz  $f$  schon eine „hohe Frequenz“ ist.

Durch geschickte Wahl von Stabmaterial und -form kann so erreicht werden, dass der im Anlauf wirksame Läuferwiderstand wesentlich größer ist, als der im Nennpunkt wirksame Läuferwiderstand.

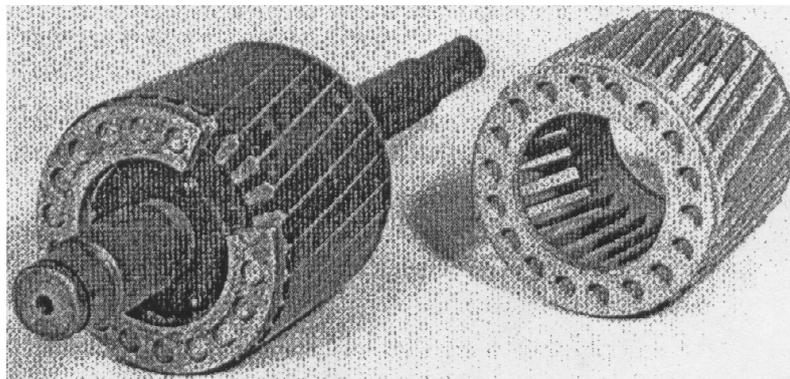


Abbildung 18: Käfigläufer

Bei Normmotoren werden die Rotoren im Allgemeinen mit Aluminiumwicklungen ausgeführt, die Käfigwicklung wird direkt durch Druckguss in die Nuten des Rotorblechpaketes eingebracht und die Kurzschlussringe werden im selben Arbeitsvorgang erzeugt. Die Nutenformen können weitgehend den elektrischen Bedürfnissen angepasst werden, die Drehzahl-Drehmomentkennlinien können dem gewünschten Verlauf gut angenähert werden.

Zur Beschreibung der Asynchronmaschine werden neben den elektrischen Größen auch Drehzahl- und Frequenzgrößen benötigt, da der Rotor je nach Belastung verschieden schnell dreht. Im Allgemeinen werden die Luftspaltdrehzahl  $n_0$  und die Rotordrehzahl  $n$ , sowie die Netzfrequenz  $f_{\text{Netz}}$  und die Rotorstromfrequenz  $f_{\text{Rotor}}$  verwandt. Die

Luftspaltdrehzahl hängt mit der Netzfrequenz und der Polpaarzahl  $p$  zusammen. Sie ist mit der Synchron Drehzahl  $n_o = f_{\text{Netz}}/p$  identisch. Die Rotordrehzahl  $n$  ist die mechanische Drehzahl des Rotors. Es bleibt die Rotorstromfrequenz. Im Rotor wird, da er nicht synchron mit dem Luftspaltfeld umläuft eine Spannung induziert, die in den kurzgeschlossenen Rotorwicklungen einen Strom zur Folge hat. Die Frequenz dieses Wechselstromes ergibt sich aus der Differenz zwischen Luftspalt- und Rotordrehzahl:

$$f_{\text{Rotor}} = p \cdot (n_o - n)$$

Auf dieser Basis wurde zur Beschreibung der Abweichung von der Synchron Drehzahl der Schlupf eingeführt. Dieser ist definiert als:

$$s = \frac{n_o - n}{n_o} = \frac{f_{\text{Rotor}}}{f_{\text{Netz}}}$$

Dabei ist  $f_{\text{Rotor}}$  die Rotorstromfrequenz und nicht die mechanische Drehzahl des Rotors. Es gilt

$$s = 1 \rightarrow n = 0 \rightarrow f_{\text{Rotor}} = f_{\text{Netz}} \rightarrow \text{der Motor steht.}$$

$$s = 0 \rightarrow n = n_o \rightarrow f_{\text{Rotor}} = 0 \rightarrow \text{Synchronismus.}$$

Bei Speisung der Ständerwicklung mit drei phasensymmetrischen Spannungen der Frequenz  $f_{\text{Netz}}$  entsteht damit in der Läuferwicklung bei Drehung des Läufers mit der Drehzahl  $n$  eine Spannung mit der Frequenz  $f_2 = s \cdot f_1$ . Aus dem Induktionsgesetz  $u = d\Phi/dt$  folgt, dass die induzierte Spannung dem Schlupf proportional ist, da der Fluss durch die Spannung im Stator vorgegeben ist.

Der erläuterte Sachverhalt kann durch folgendes einphasiges Ersatzschaltbild beschrieben werden:

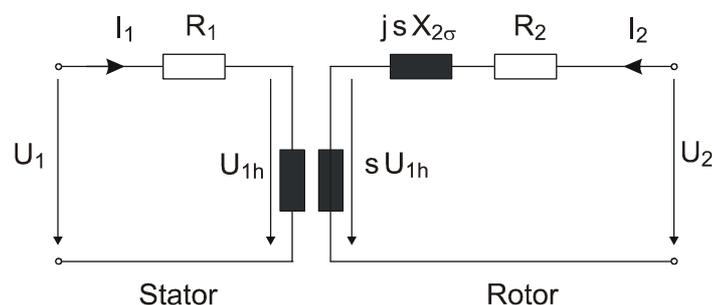


Abbildung 19: Ersatzschaltbild für den Asynchronmotor im stationären Betrieb mit dem Schlupf  $s$

$X_{2\sigma}$  ist die gesamte Streuinduktivität, die hier willkürlich dem Läufer zugerechnet ist. Die primäre Spannung  $U_1$  setzt sich aus der vom Luftspaltdrehfeld induzierten inneren Spannung  $U_{1h}$  sowie dem Spannungsabfall  $R_1 \cdot I_1$  am ohmschen Widerstand der Ständerwicklung zusammen. Durch die transformatorische Kopplung der beiden im Bild vertikal eingezeichneten Reaktanzen kommt der Umstand zum Ausdruck, dass das Luft-

spaltfeld, das in der Primärwicklung die Spannung  $U_{1h}$  induziert, von den Durchflutungen der Ständer- und der Läuferwicklungen gemeinsam erregt wird. Während die magnetische Wirkung der Ströme  $I_1$  und  $I_2$  in diesen Transformatorwicklungen unabhängig von der Drehzahl des Läufers bzw. des Schlupfes  $s$  ist, ist die im Sekundärteil induzierte Spannung nur das  $s$ -fache der primären Luftspaltspannung. Im Sekundärkreis hat der von  $s \cdot U_{1h}$  verursachte Strom  $I_2$  den ohmschen Widerstand  $R_2$  sowie einen der Läuferfrequenz proportionalen Streublindwiderstand, also  $s \cdot X_{2\sigma}$  zu überwinden. Als Gleichung ausgedrückt heißt das

$$I_2 = \frac{s \cdot U_{1h}}{R_2 + js \cdot X_{2\sigma}} = \frac{U_{1h}}{\frac{R_2}{s} + jX_{2\sigma}}$$

Durch die Division von Zähler und Nenner durch den Schlupf  $s$  haben wir erreicht, dass als Ursache von  $I_2$  dieselbe Spannung  $U_{1h}$  in Erscheinung tritt, die auch auf der Primärseite des Transformators wirksam ist. Wir können daher die beiden gekoppelten Wicklungen auch durch eine einzige ersetzen und erhalten so das Ersatzschaltbild nach folgender Abbildung:

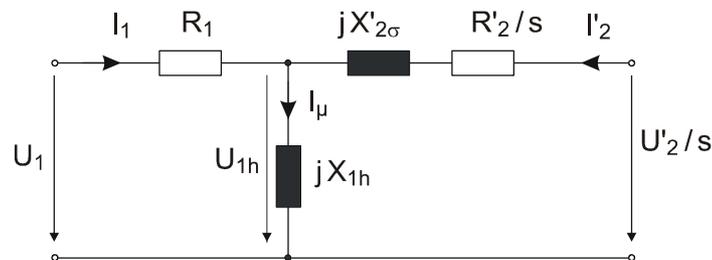


Abbildung 20: Modifiziertes Ersatzschaltbild für den Asynchronmotor im stationären Betrieb

Im Falle des Kurzschlussläufers ist  $\frac{U_2}{s} = 0$ .

Ohne Nachweis seien hier noch die Beziehungen angegeben, mit denen eine Asynchronmaschine in ihrem grundsätzlichen Betriebsverhalten beschrieben werden kann:

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

Ständer-Kupferverluste

$$P_\delta = P_{Netz} - P_{Cu1}$$

Luftspaltleistung

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

mechanisch abgegebene Leistung

$$P_2 = s \cdot P_\delta$$

Verlustleistung im Rotor

$$\underline{U}_1 = (R_1 + jX_{1\sigma}) \cdot \underline{I}_1 + jX_{1h} \cdot \underline{I}_\mu$$

Statorspannung

$$\left( \frac{R_2}{s} + jX_{2\sigma} \right) \cdot \underline{I}_2 + jX_{1h} \cdot \underline{I}_\mu = 0$$

Rotorspannung

Für den vom Ständer aus dem Netz aufgenommenen Strom lässt sich die Abhängigkeit vom Schlupf als Ortskurve in der komplexen Ebene angeben. Für das Ersatzschaltbild (Abbildung 20) mit  $R_1 = 0$  ist dies ein Kreis, der nach einem der Entdecker dieser Beziehung „Heyland-Kreis“ genannt wird (Abbildung 21).

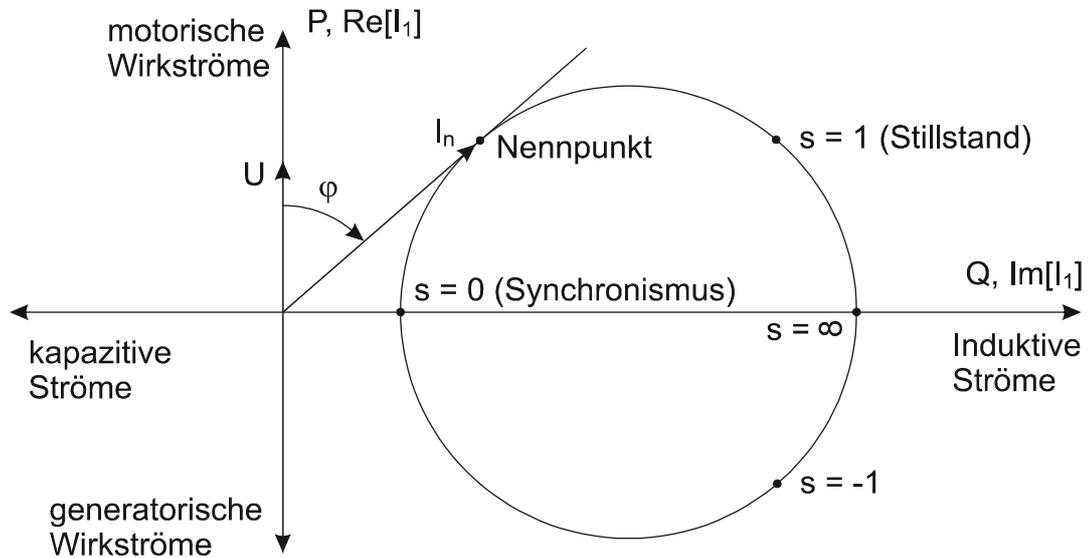


Abbildung 21: Stromortskurve der Asynchronmaschine (Heyland-Kreis)

Dazu ergibt sich folgende Drehzahl-Strom- bzw. Drehzahl-Drehmoment-Charakteristik:

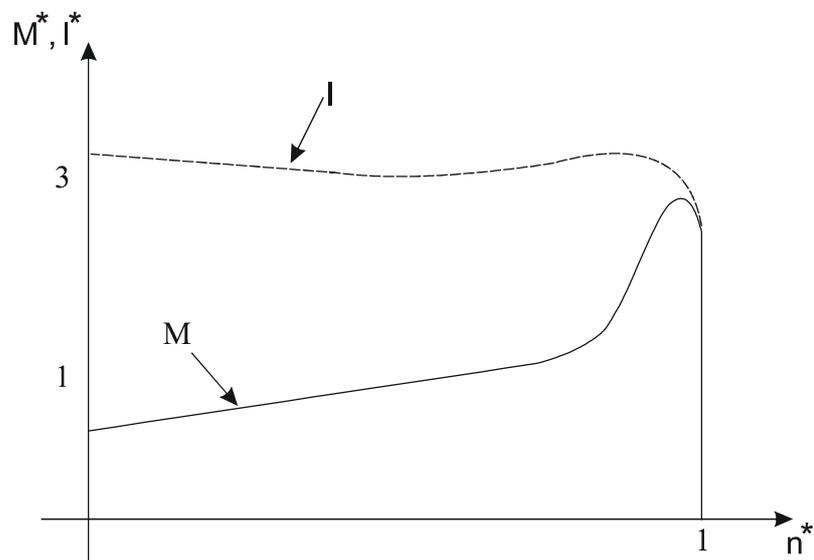


Abbildung 22: Drehzahl-Strom- und Drehzahl-Drehmoment-Charakteristik

### 3.2 Mechanisches Ersatzmodell

Im Luftspalt der Maschine wird ein umlaufendes magnetisches Feld beobachtet, welches von den stillstehenden Statorwicklungen erzeugt wird. Bezüglich des Luftspaltes und des Rotors ist es zulässig, das von den stillstehenden, wechselstromdurchflossenen Statorwicklungen erzeugte Feld durch ein Feld zu ersetzen, welches durch eine rotierende gleichstromdurchflossene Wicklung erzeugt wird. Man kommt damit für langsame Belastungsänderungen zu einem Ersatzschaltbild des Asynchronmotors in Form einer Schlupfkupplung. Diese Kupplung kann bezüglich ihrer Drehmomente und ihrer Eingangsleistung, Ausgangsleistung und Verlustleistung mit einer hydrodynamischen Kupplung (Rutschkupplung) verglichen werden.

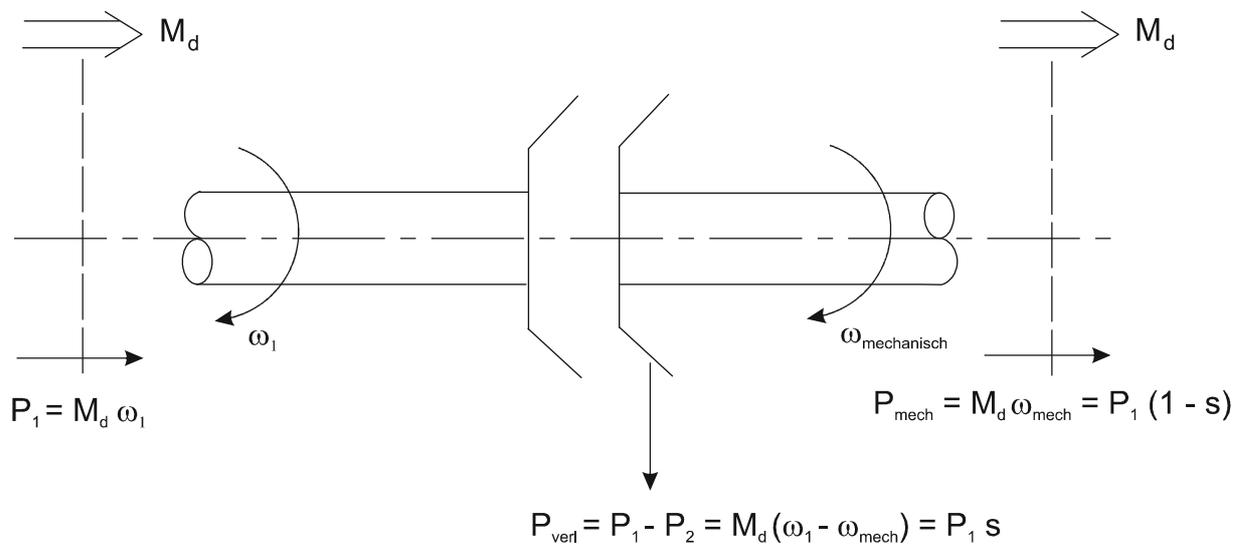


Abbildung 23: Mechanisches Ersatzschaltmodell für die Asynchronmaschine

## Teil C: Kontrollfragen für das Kolloquium

### I Allgemeines

- 1) Was versteht man unter Drehstrom?
- 2) Welche Spannung und welche Frequenz besitzt das Stromnetz in Deutschland?
- 3)
  - a) Was ist der Unterschied zwischen einer Dreieck- und einer Sternschaltung?
  - b) Erläutern Sie die Strom- und Spannungsgrößen in Dreieck- und in Sternschaltung. Geben Sie die charakteristischen Gleichungen an.

### II Asynchronmaschine

- 4) Aus welchen beiden Hauptkomponenten besteht eine Asynchronmaschine.
- 5) Erklären Sie das Funktionsprinzip der Asynchronmaschine. Gehen Sie dabei auf die Ströme und Spannungen im Stator und Rotor ein, sowie auf die Magnetfeldstärke. Welche Rolle spielt der Schlupf und wie ist dieser definiert?

### III Synchronmaschine

- 6) Was versteht man unter Erregerstrom.
- 7) Was versteht man unter Polradwinkel.
- 8)
  - a) Erklären Sie den Vorgang des Synchronisierens.
  - b) Welche vier Bedingungen müssen erfüllt werden?
  - c) Wie wird dies in der Praxis erreicht.
- 9) Nennen Sie Unterschiede zwischen Synchron- und Asynchronmaschine. Gehen Sie dabei auf den Aufbau und die Einsatzmöglichkeiten im Betrieb als Motor sowie Generator ein.

## Teil D: Versuchsdurchführung (Protokoll)

### 4 Allgemeine Hinweise

Dieser Versuch findet im Technikum statt, Eißendorfer Str. 38. Treffpunkt ist der Raum R 0.21 im Erdgeschoss. Ein Taschenrechner ist für diesen Versuch erforderlich.

#### 4.1 Sicherheitsregeln

Die Versuchsaufbauten und die verwendeten Geräte sind so gestaltet, dass eine Gefährdung bei sachgerechter Handhabung ausgeschlossen ist.

**Das Arbeiten mit Netzspannung und rotierenden Maschinen erfordert umsichtiges Handeln!**

Von drehenden Wellen gehen Gefahren aus. Auf zweckmäßige Kleidung und ggf. Schutz langer Haare ist zu achten. Lose Schals u. ä. sind verboten.

Bei allen Arbeiten an Klemmen und rotierenden Teilen ist die gesamte Anlage mit dem Hauptschalter spannungsfrei zu machen. Der Hauptschalter ist als Sicherung gegen Wiedereinschalten in die gesperrte Position zu bringen.

Die Maschinen und die spannungsführenden Klemmen dürfen erst berührt werden, wenn die Wellen zum Stillstand gekommen sind.

Vor dem Einschalten der Spannung ist von Hand zu prüfen, ob die Maschine frei dreht, und es ist die Verdrahtung auf elektrische und mechanische Sicherheit zu prüfen.

Die Anlage darf erst nach Abnahme durch den Versuchsbetreuer eingeschaltet werden.

Ein Verstoß gegen diese Regeln oder Sicherheitsanweisungen des Versuchsbetreibers hat den Ausschluss von der weiteren Versuchsdurchführung zur Folge.

## 4.2 Auswertung

Die Versuchsmaschine ist mit einer Gleichstrommaschine gekoppelt, die sowohl bremsen, als auch antreiben kann. Der Ankerstrom der Gleichstrommaschine darf (ohne Beweis) als proportional zum mechanischen Drehmoment angesehen werden:  $I_A \sim M$ .

Die Messwerte sollen in grafischer Form aufgetragen werden. Dabei sollen normierte Größen verwendet werden, d. h. alle Werte werden auf die jeweiligen Bezugswerte bezogen. Diese normierten Größen werden mit einem  $\gg^* \ll$  markiert, also z. B.  $P^* = \frac{P}{P_B}$ .

Als Bezugswerte gelten die Maschinendaten laut Typenschild, mit folgenden Ausnahmen:

- . Bezugswert für den Erregerstrom für die Gleichstrommaschine ist 10 A.
- Bezugswert für die Drehzahl ist die synchrone Drehzahl.

## 4.3 Messaufbau

Die Leistungsmessung bei den Versuchen erfolgt mit handelsüblichen Wattmetern (Kreuzspul-Messinstrumente), die über einen Strom- und einen Spannungspfad verfügen. Beide Pfade sind gegeneinander isoliert, jedoch darf eine gerätetypische Isolierspannung nicht überschritten werden. In diesen Messinstrumenten wird das Produkt  $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$  auf elektro-mechanischem Weg gebildet. Durch die Massenträgheit des Zeigers wird der arithmetische Mittelwert angezeigt.

Dabei ist  $\varphi$  der Winkel zwischen dem Strom durch den Strompfad und der Spannung am Spannungspfad, wobei es zunächst keine Rolle spielt, worauf die beiden Größen bezogen werden.

In einem Einphasen-System gibt es nur den Leiterstrom und die Leiterspannung, daher ist die Zuordnung eindeutig: die Anzeige ist die Wirkleistung. Das Vorzeichen der Leistung kann durch Umpolen einer der beiden Messgrößen geändert werden.

Im Dreiphasensystem hingegen gibt es sechs Spannungen (drei Dreiecksspannungen und drei Sternspannungen, siehe Abbildung 24) und drei Leiterströme. Das Messergebnis hängt also stark davon ab, welche Spannung und welcher Strom gemessen werden.

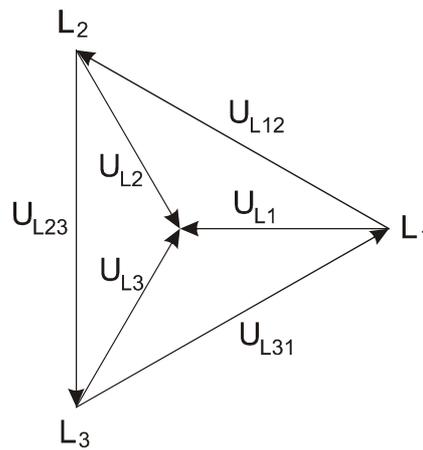


Abbildung 24: Spannungszeiger

Jedes symmetrische Drehstromsystem (alle intakten Dreiphasenmaschinen dürfen als symmetrisch betrachtet werden) kann man sich zusammengesetzt aus drei gleichen, unabhängigen Einphasensystemen zwischen jeweils einem Außenleiter und dem Mittelpunktsteiler denken. Dann wird klar, dass sich als Wirkleistung je Phase der Wert

$$P_{\text{Phase}} = U_{L1} \cdot I_{L1} \cdot \cos \varphi$$

ergibt.

Die Wirkleistung lässt sich also messen, indem man dem Messinstrument die Sternspannung und den Leiterstrom einer Phase (zum Beispiel L<sub>1</sub>) zuführt. Die Leistung des Gesamtsystems ist dann

$$P_{\text{ges}} = 3 \cdot P_{\text{Phase}} \cdot$$

Entsprechend ist die Blindleistung je Phase

$$Q_{\text{Phase}} = U_{L1} \cdot I_{L1} \cdot \sin \varphi$$

und insgesamt

$$Q_{\text{ges}} = 3 \cdot Q_{\text{Phase}}$$

Wenn die Beziehung

$$\sin \varphi = \cos(\varphi + 90^\circ)$$

ausgenutzt wird, kann die Blindleistung mit dem gleichen Messgerät bestimmt werden. Dazu wird an das Messwerk eine um 90° gegenüber der Sternspannung phasenverschobene Spannung angelegt. Diese kann entweder mit einem Kondensator erzeugt

werden (wenig elegant, weil exakt  $90^\circ$  nie erreicht werden) oder nach obigem Zeigerbild zwischen den beiden anderen Außenleitern abgegriffen werden.

Diese Spannung ist jedoch um den Faktor  $\sqrt{3} \approx 1,73$  größer als die Sternspannung. Deshalb ist dann

$$Q_{\text{Phase}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot U_{L_{23}} \cdot I_{L_1} \cdot \cos(\varphi_{U_{L_{23}}I_{L_1}}).$$

Mit

$$Q_{\text{ges}} = 3 \cdot Q_{\text{Phase}}$$

folgt

$$Q_{\text{ges}} = \sqrt{3} \cdot U_{L_{23}} \cdot I_{L_1} \cdot \cos(\varphi_{U_{L_{23}}I_{L_1}}).$$

Mit der unten gezeigten Schaltung ist die Messung von Wirk- und Blindleistung für beide Leistungsrichtungen möglich.

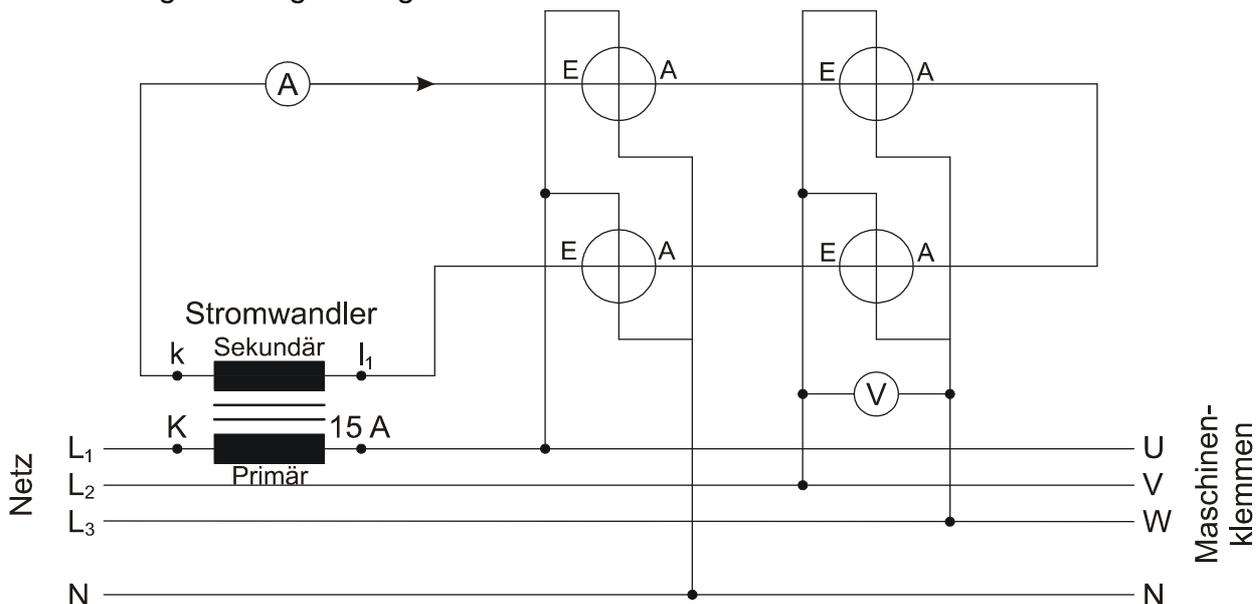


Abbildung 25: Messschaltung für die Messungen an der Synchron- sowie an der Synchronmaschine

Die Verwendung von je zwei Messgeräten für Wirk- und Blindleistung ist erforderlich, weil die Geräte jeweils nur eine Leistungsrichtung anzeigen können. Die Anzeige lässt sich, wie schon erwähnt, durch das Umpolen nur eines der beiden Eingänge ändern. Da die Stromwandlerkreise im Betrieb nicht geöffnet werden dürfen und da am Spannungspfad lebensgefährliche Spannungen liegen, ist die Verwendung von zwei gegenseitig anzeigenden Instrumenten die einzige ungefährliche Möglichkeit, beide Leistungsrichtungen während eines Versuchsteiles abzulesen.

#### 4.4 Nutzung der Versuchsmaschine

In den Versuchen werden eine Synchron- und eine Asynchronmaschine verwendet. Zur Belastung oder als Antrieb ist an diesen Versuchsmaschinen jeweils eine Gleichstrommaschine gekoppelt, dessen Drehzahl und Drehmoment eingestellt werden können.

Als Synchronmaschine kann jede Drehfeldmaschine betrieben werden, deren Rotor mit Gleichstrom gespeist werden kann. Sind im Rotor drei gegeneinander versetzte Wicklungen vorhanden (normaler Drehstrom-Schleifringläufer), gibt es prinzipiell zwei Möglichkeiten, die Wicklungen zu schalten, da der Sternpunkt des Rotors fast nie zugänglich ist (siehe Abbildung 3):

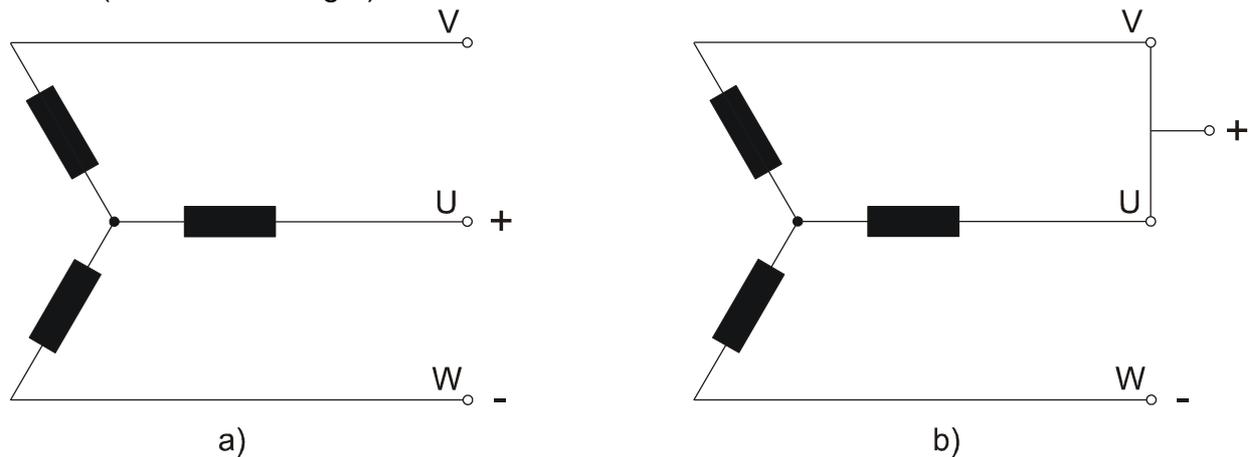


Abbildung 26: Rotorschaltung

Bei gleichem Strom ist das resultierende magnetische Feld beider Schaltungen bis auf gut 10 % gleich, jedoch um 30° verdreht. Die Wärmebelastung des Rotors ( $I_2 \cdot R_{ges}$ ) ist in Schaltung 26 b geringer, außerdem bilden die beiden parallel geschalteten Wicklungen eine kurzgeschlossene Wicklung mit der Achse senkrecht zum Polrad.

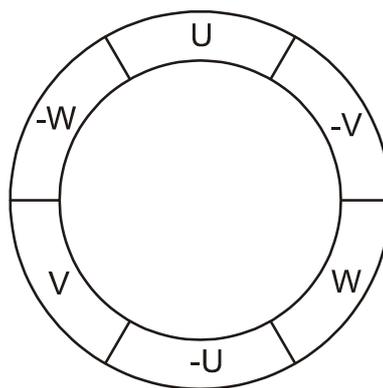
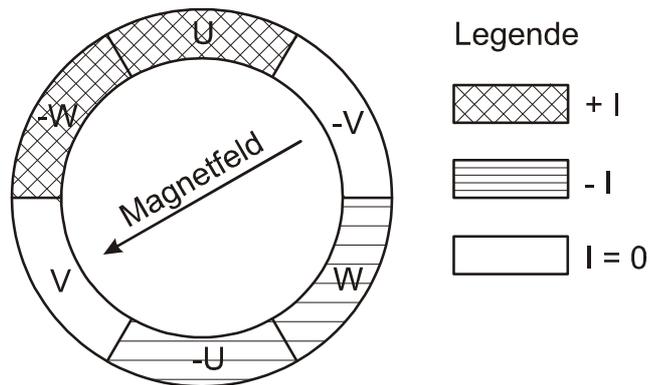


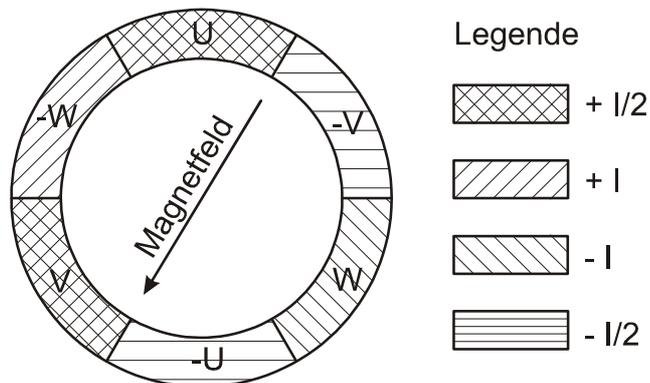
Abbildung 27: Rotorwicklungen

Auf dem Rotor sind die Wicklungen wie in Abbildung 27 dargestellt angeordnet. Die den beiden obigen Schaltungen entsprechenden Durchflutungen sind in Abbildung 28 graphisch dargestellt.

Bei der Asynchronmaschine werden die Rotorwicklungen entweder direkt oder über Widerstände kurzgeschlossen.



a) ohne Brücke



b) mit Brücke

Abbildung 28: Rotordurchflutungen

## 5 Versuchsdurchführung

### 5.1 Kennen lernen des Versuchsstandes

Im folgenden Versuch werden Sie das Betriebsverhalten von Drehstrommaschinen kennen lernen. Dabei sollen einerseits einige Grundkenntnisse über die Theorie elektrischer Maschinen vermittelt werden und andererseits soll die Gelegenheit gegeben werden, selbstständig mit relativ großen elektrischen Maschinen zu arbeiten.

Das Arbeiten mit Netzspannung birgt jedoch gewisse Gefahren. Daher ist es nötig, dass ständig ein Betreuer in der Nähe ist. Dennoch sollen Sie möglichst frei arbeiten und selber die Geschwindigkeit des Fortschreitens bestimmen.

Damit ein eigenständiges Arbeiten möglich ist, sollten Sie zunächst einmal die einzelnen Komponenten der Versuchsstände kennen lernen:

- 1) Identifizieren Sie die einzelnen Anlagenteile des Versuchsstandes, wie zum Beispiel die Drehstrommaschine, die Gleichstrommaschine, die entsprechenden Schalttafeln, den Hauptschalter etc.
- 2) Notieren Sie die Typenschilddaten Ihrer Maschine (Synchron- oder Asynchronmaschine) in das dafür vorbereitete Formular.
- 3) Für diesen Versuchsteil arbeiten Sie gemeinsam mit der anderen Gruppe an dem Versuchsstand der Synchronmaschine.

Schalten Sie die Gleichstrommaschine ein und bringen Sie sie auf Synchrondrehzahl. Die Drehstrommaschine ist als Synchronmaschine angeschlossen. Schalten Sie die Erregung ein und beobachten Sie, wie sich die Spannung mit der Drehzahl der Maschine ändert.

## **5.2 Besprechung der Theorie**

Nach diesem Kennen lernen der Versuchsstände wird nun zunächst über die Theorie elektrischer Maschinen gesprochen.

### 5.3 Betriebsverhalten der Synchronmaschine

- 1) Vor Beginn der eigentlichen Messungen muss die Messschaltung aufgebaut werden. Schließen Sie dazu den sterngeschalteten Stator der Synchronmaschine nach dem gegebenen Schaltplan (s. Bild 2) an die Spannungs-, Strom- und Leistungsmessgeräte an.
- 2) Tragen Sie hier die Typenschilddaten der Synchronmaschine ein:

Nennspannung:

Nennstrom:

Nennleistung:

Leistungsfaktor:

Nennzahl:

- 3) Bestimmen und notieren Sie die für die einzelnen Messgeräte gültigen Umrechnungsfaktoren:

	Skala	Stromwandler	3 Phasen	Gesamtwerte
Wirkleistung				
Blindleistung				
Strom				
Spannung				

Zur Auswertung der folgenden Messungen verwenden Sie die folgenden Bezugswerte:

$$\text{Drehzahl} \quad n_B = n_0 = 1500 \text{ min}^{-1}$$

$$\text{Spannung} \quad U_B = U_{\text{Netz}} = 400 \text{ V}$$

$$\text{Leistung} \quad P_B = P_N = 12 \text{ kW}$$

- 4) Die Maschine wird zunächst im Leerlauf, also ohne Anschluss an das Netz betrieben. Stellen Sie an der Gleichstrommaschine die Synchrondrehzahl ein.

Nehmen Sie die Leerlaufkennlinie der Synchronmaschine auf.

Damit ist die Abhängigkeit der Spannung an den Stator клемmen  $U_{\Delta}^*$  von dem Erregerstrom  $I_{err}^*$  gemeint, wenn der Stator nicht an das Stromnetz angeschlossen ist.

$$U_{\Delta}^* = f(I_{err}^*)$$

Wie lauten die Umrechnungsfaktoren für die abgelesenen Messwerte?

$I_{err}$  :

$U_{\Delta}$  :

Wie sind die folgenden normierten Größen definiert?

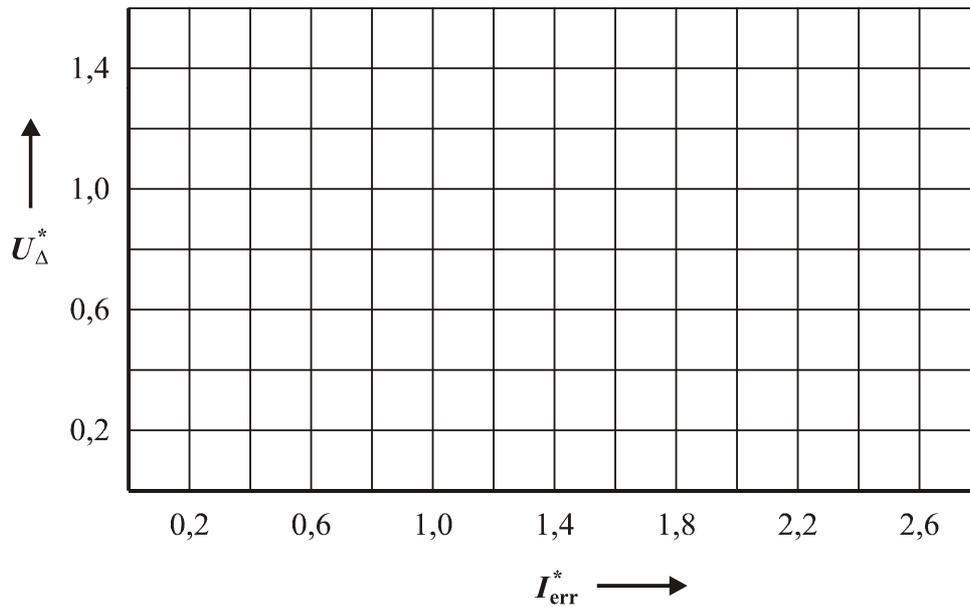
$I_{err}^*$  :

$U_{\Delta}^*$  :

$I_{err}$ in A	$U_{\Delta}$ in SkT	$I_{err}^*$	$U_{\Delta}$ in V	$U_{\Delta}^*$
0				
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				

Anhand der obigen Tabelle können Sie den Nennererregstrom  $I_{err\_N}$  bestimmen.

$$I_{err\_N} = \text{---} \text{ A}$$



5) Notieren Sie die Synchronisierbedingungen und Einflussmöglichkeiten zu deren Einstellung:

Bedingung	Einflussmöglichkeit

6) Die Maschine wird als Phasenschieber betrieben. Synchronisieren Sie die Maschine und stellen Sie sie ans Netz. Anschließend betreiben Sie die Synchronmaschine mit minimaler Last, das bedeutet, dass die Gleichstrommaschine nach dem Synchronisieren von dem Netz getrennt werden soll.

Messen und skizzieren Sie die normierte Wirkleistung  $P^*$  und die normierte Blindleistung  $Q^*$  in Abhängigkeit von dem normierten Erregerstrom  $I_{err}^*$ .

Wie lauten die Umrechnungsfaktoren für die abgelesenen Messwerte?

$I_{err}$  :

$P$  :

$Q$  :

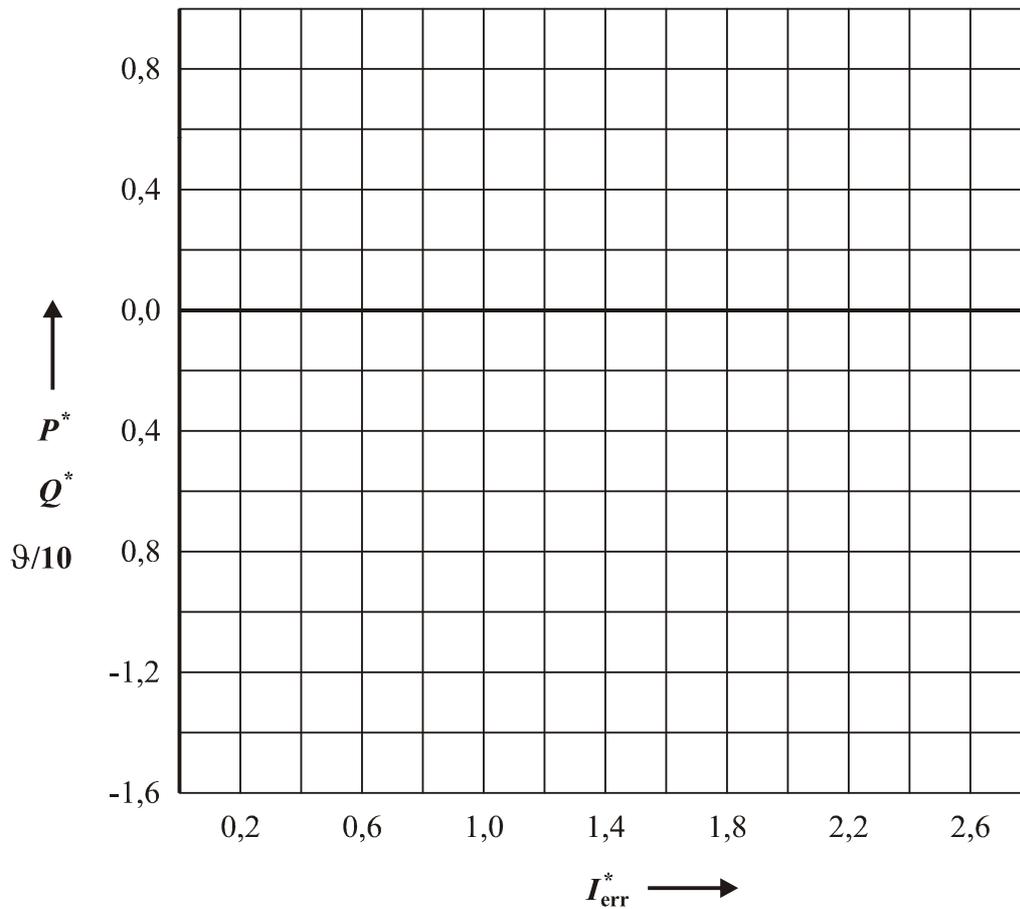
Wie sind die folgenden normierten Größen definiert?

$I_{err}^*$  :

$P^*$  :

$Q^*$  :

$I_{err}$ in A	$\vartheta$	$P$ in SkT	$Q$ in SkT	$I_{err}^*$	$\vartheta/10$	$P$ in W	$P^*$	$Q$ in Var	$Q^*$
8									
7									
6									
5									
4									
3									
2									
1									
0									



- 7) Synchronisieren Sie zunächst die Synchronmaschine und schließen Sie die Maschine an das Netz.

Stellen Sie danach zum einen einen Erregerstrom von  $I_{\text{err}} = 4 \text{ A}$  ein und zum anderen an der Gleichstrommaschine das Drehmoment auf Null und die Söldrehzahl auf den maximalen Wert.

Drehen Sie anschließend das Drehmoment auf, bis sich ein Polradwinkel von  $\vartheta = 20^\circ$  eingestellt hat.

Messen Sie die Leistungen  $P$  und  $Q$  in Abhängigkeit vom Polradwinkel  $\vartheta$ .

Durch Verringern des Moments können die Winkel bis etwa  $-5^\circ$  angefahren werden. Danach müssen Sie die Söldrehrichtung der Gleichstrommaschine umschalten und das Moment wieder erhöhen, um die vorgegebenen negativen Winkel zu erreichen.

Wie lauten die Umrechnungsfaktoren für die abgelesenen Messwerte?

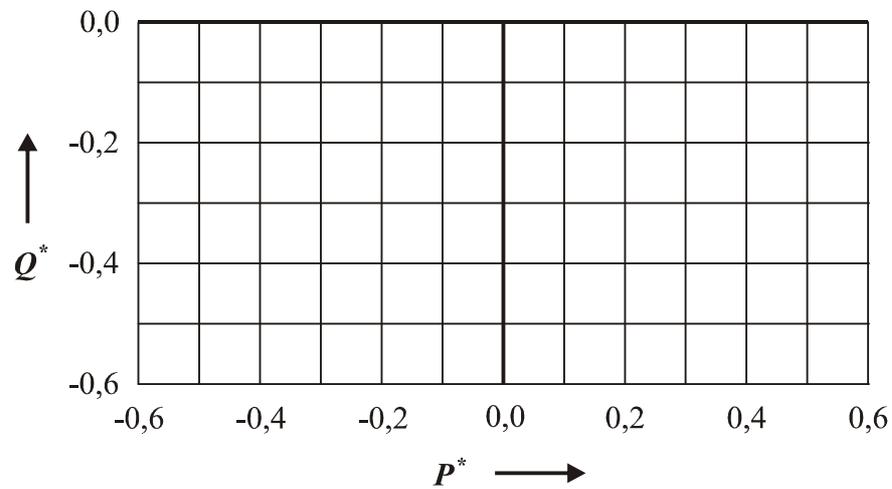
$P$  :  $Q$  :

Wie sind die folgenden normierten Größen definiert?

$P^* =$   $Q^* =$

$\vartheta$	$P$ in SkT	$Q$ in SkT	$P$ in W	$P^*$	$Q$ in Var	$Q^*$
$20^\circ$						
$15^\circ$						
$10^\circ$						
$5^\circ$						
0						
$-5^\circ$						
$-10^\circ$						
$-15^\circ$						
$-20^\circ$						
$-25^\circ$						

- 8) Zeichnen Sie die Ständerstrom-Ortskurve  $Q^*$  in Abhängigkeit von  $P^*$  der Synchronmaschine. Die Grenzen für einen stabilen Betrieb der Synchronmaschine sollen nicht verlassen werden.



## 5.4 Betriebsverhalten der Asynchronmaschine

- 1) Vor Beginn der eigentlichen Messungen muss die Messschaltung aufgebaut werden. Schließen Sie dazu den sterngeschalteten Stator der Synchronmaschine nach dem gegebenen Schaltplan (s. Bild 25) an die Spannungs-, Strom- und Leistungsmessgeräte an.
- 2) Tragen Sie die Typenschilddaten der Asynchronmaschine ein:

Nennspannung:

Nennstrom:

Nennleistung:

Leistungsfaktor:

Nenndrehzahl:

Läuferstillstandsspannung:

- 3) Bestimmen und notieren Sie die für die einzelnen Messgeräte gültigen Umrechnungsfaktoren:

	Skala	Stromwandler	3 Phasen	Gesamtwerte
Wirkleistung				
Blindleistung				
Strom				
Spannung				

Zur Auswertung der folgenden Messungen verwenden Sie die folgenden Bezugswerte:

$$\begin{array}{lclclcl}
 \text{Drehzahl} & n_B & = & n_0 & = & 3000 \text{ min}^{-1} \\
 \text{Spannung} & U_B & = & U_{\text{Netz}} & = & 400 \text{ V} \\
 \text{Leistung} & P_B & = & P_N & = & 5 \text{ kW}
 \end{array}$$

- 4) Die Asynchronmaschine und die Gleichstrommaschine werden im Stillstand betrieben. Dafür sind zum einen die Rotorklemmen der Asynchronmaschine zu öffnen und zum anderen werden an der Gleichstrommaschine die Soll-drehzahl auf Null und die Drehmomentbegrenzung auf den maximalen Wert eingestellt.

Schalten Sie die Gleichstrommaschine und die Asynchronmaschine ans Netz und messen Sie die Läuferstillstandsspannungen, das sind genau die Spannungen zwischen den Rotorklemmen.

$$U_{UV} = \quad \quad \quad U_{UW} = \quad \quad \quad U_{VW} =$$

Welchem Bauteil entspricht die Maschine in diesem Fall?

Lösung: \_\_\_\_\_

- 5) Schließen Sie die Rotorklemmen der Drehstrommaschine kurz. Die Asynchronmaschine wird ohne Last an das Netz geschaltet, das bedeutet, dass die Gleichstrommaschine nicht an das Stromnetz geschaltet wird.

Wie lange braucht die Maschine zum Hochlaufen und welche Drehzahl wird erreicht?

$$t_{\text{Anlaufzeit,5-1}} = \quad \quad \quad n_{\text{stationär,5-1}} =$$

Der Rotor wird nun über die vorhandenen Widerstände kurzgeschlossen. Danach wird die Asynchronmaschine an das Netz geschaltet. Beobachten Sie die Zeit, die die Maschine zum Beschleunigen benötigt und notieren Sie die Enddrehzahl:

$$t_{\text{Anlaufzeit,5-2}} = \quad \quad \quad n_{\text{stationär,5-2}} =$$

- 6) Der Rotor bleibt über die vorhandenen Widerstände kurzgeschlossen. Nehmen Sie anschließend für die Drehzahlen nach folgender Tabelle die Wirk- und Blindleistungen  $P$  und  $Q$  auf.

Wie wird der Schlupf berechnet?

$$s =$$

Wie lauten die Umrechnungsfaktoren für die abgelesenen Messwerte?

$$P :$$

$$Q :$$

Wie sind die folgenden normierten Größen definiert?

$$P^* =$$

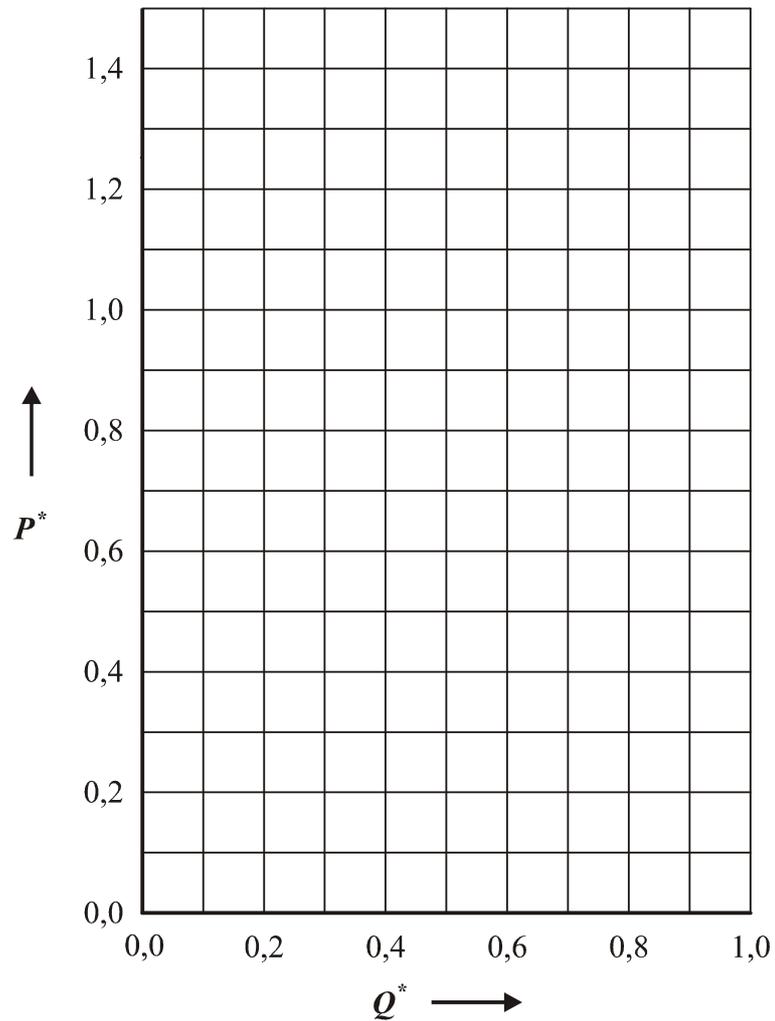
$$Q^* =$$

$n$ in $\text{min}^{-1}$	$P$ in SkT	$Q$ in SkT	$s$	$P$ in W	$P^*$	$Q$ in Var	$Q^*$
2875							
2900							
2925							
2950							
2975							
3000							
3025							
3050							
3075							

- 7) Der Rotor wird direkt kurzgeschlossen. Nehmen Sie anschließend für die bestimmten Drehzahlen nach der folgenden Tabelle die Wirk- und Blindleistungen auf.

$n$ in $\text{min}^{-1}$	$P$ in SkT	$Q$ in SkT	$s$	$P$ in W	$P^*$	$Q$ in Var	$Q^*$
2875							
2900							
2925							
2950							
2975							
3000							
3025							
3050							
3075							

- 8) Zeichnen Sie die Ortskurve  $P^*$  in Abhängigkeit von  $Q^*$  mit dem Schlupf  $s$  als Parameter für beide Fälle (mit und ohne Widerstand) in das folgende Diagramm ein.



## Teil C: Literaturverzeichnis

- [1] Bödefeld T., Sequenz H., „Elektrische Maschinen: eine Einführung in die Grundlagen“, Springer Verlag, Wien, 1971
- [2] Bonfert, „Betriebsverhalten der Synchronmaschine“, Springer-Verlag, Berlin, 1962.
- [3] Fischer R., „Elektrische Maschinen“, Hanser Verlag, München, 1977.
- [4] Jordan H., Klíma V. , Kovács K.P., „Asynchronmaschinen: Funktion, Theorie, Technisches“, Vieweg-Verlag, Braunschweig, 1975