

 <p>TECHNISCHE FAKULTÄT DER CHRISTIAN-ALBRECHTS-UNIVERSITÄT ZU KIEL</p>	Gemeinsames <b>Grundpraktikum</b>
<b>Asynchronmotor</b>	Versuch-Nr.: <b>E403</b>

**Ziel:** Kennenlernen des Anlauf- und Betriebsverhaltens der Asynchronmaschine mit Kurzschlussläufer und Schleifringläufer im Motorbetrieb.

Für diesen Versuch ist die Arbeitsgruppe

Leistungselektronik  
Prof. Dr. Marco Liserre

verantwortlich. Sollten Sie Erweiterungs- oder Verbesserungsvorschläge für diesen Versuch haben, so melden Sie sich bitte bei dieser Arbeitsgruppe.

Einige Versuchsteile sollen vor der Versuchsdurchführung – d.h. während der Versuchsvorbereitung – durchgeführt werden. Solche Versuchsteile sind durch eine Markierung, wie sie rechts dargestellt ist, gekennzeichnet.

**Hinweis:**  
*Vorbereitungsaufgabe*

Zu diesem Versuch ist ein Mitschrift-Protokoll zu erstellen. Mit dem Mitschrift-Protokoll sind die in Abschnitt 3.3 des Protokolls erstellten Kennlinien abzugeben.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>4</b>
2.1	Einphasiges Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine . . . . .	5
2.2	Die Ortskurve des Ständerstromes (Der Heylandkreis) . . . . .	8
2.3	Leistung und Drehmoment der Asynchronmaschine . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Versuchsdurchführung</b>	<b>15</b>
3.1	Verwendete Geräte . . . . .	15
3.2	Versuchsablauf . . . . .	15
3.3	Versuchsauswertung . . . . .	20
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>24</b>

# 1 Einleitung

Die Asynchronmaschine ist die am häufigsten eingesetzte elektrische Maschine. Sie ist wegen ihres einfachen Aufbaus robust, betriebssicher und wirtschaftlich. Kleine Asynchronmotoren unter 1 kW Leistung werden heute in sehr großer Stückzahl als Einphasenmotoren für Haushalt und Gewerbe gebaut. Etwa 80% aller elektrischen Maschinen über 1 kW sind Asynchronmotoren. Im Bereich kleiner und mittlerer Leistungen herrscht der Käfigläufer (Kurzschlussläufer) für 230-V-/400-V-Drehspannung vor. Asynchronmaschinen können auch mit einem Schleifringläufer ausgestattet sein. Jedoch wird diese Ausführung relativ selten genutzt. Sehr leistungsstarke Asynchronmotoren dienen z. B. zum Antrieb von Kesselspeisewasserpumpen in Kraftwerken und erreichen Leistungen bis ca. 20 MW. Aber auch im generatorischen Betrieb wird die Asynchronmaschine verwendet, wie beispielsweise in Windenergieanlagen, welche eine Leistung von bisher max. 10 MW aufweisen. Anhand von Messungen elektrischer und nichtelektrischer Größen und der Aufnahme von charakteristischen Kennlinien soll das Betriebsverhalten der Asynchronmaschine im motorischen Betrieb während dieses Versuchs verdeutlicht werden.

## 2 Grundlagen

Hauptbestandteile der Asynchronmaschine sind der Ständer (Stator) und der innenliegende, durch einen Luftspalt vom Stator getrennte, zylinderförmige Läufer (Rotor). Der Luftspalt wird so klein wie möglich gewählt, um den Amperewindungsbedarf für die Luftspaltinduktion der Maschine möglichst gering zu halten. Er liegt bis zu mittleren Leistungen bei einigen Zehntel Millimetern. Sowohl Stator als auch Rotor sind aus Blechen geschichtet, die gegeneinander durch eine dünne Silicat-Phosphatschicht isoliert sind, um Wirbelströme zu vermeiden. Entsprechend der Polpaarzahl  $p$  der Maschine sind über den Ständerumfang  $p$  Dreiphasenwicklungen in eingestanzten Nuten verteilt. Der Läufer trägt entweder auch eine Dreiphasenwicklung, die über Schleifringe an externe Belastungswiderstände angeschlossen ist (Schleifringläufer), oder der Läufer ist als „Käfig“ ausgebildet. Dieser Käfigläufer bzw. Kurzschlussläufer besteht im Allgemeinen aus nahe dem Luftspalt angeordneten Stäben, die verschiedene Querschnitte haben können und an ihren Stirnseiten durch Kurzschlussringe miteinander verbunden sind. Asynchronmaschinen mit Käfigläufer kommen, wie schon erwähnt, aufgrund von Kostenvorteilen und ihrer Robustheit in der Praxis sehr viel häufiger vor als Schleifringläufermaschinen.

Werden die um  $\frac{120^\circ}{p}$  räumlich versetzten Wicklungen im Ständer mit zeitlich um  $120^\circ$  phasenverschobenen sinusförmigen Strömen der Frequenz  $f_1$  gespeist, so bildet sich im Luftspalt ein magnetisches Feld - das sogenannte Drehfeld - aus, das mit der synchronen Drehzahl  $n_{syn} = \frac{f_1}{p}$  umläuft. Dieses Feld durchsetzt Luftspalt und Läuferwicklung. In der zunächst offenen Läuferwicklung werden Spannungen induziert. Wird der Läuferstromkreis geschlossen, so fließen Ströme, die durch die Wirk- und Blindwiderstände des Läufers bestimmt sind. Drehfeld und Läuferströme bilden ein Drehmoment, dessen Größe von der Komponente der Läuferströme abhängt, die mit der induzierten Spannung in Phase liegt.

Würde der Läufer die gleiche Drehgeschwindigkeit  $n = n_{syn}$  wie das Ständerdrehfeld annehmen, d. h. synchron mit dem Drehfeld umlaufen, so bliebe der mit der Läuferwicklung verkettete Fluss  $\Psi$  zeitlich konstant. Induzierte Spannung  $U_{ind}$ , Läuferstrom  $I_1$  und Drehmoment  $M$  wären damit gleich Null.

Durch die mechanische Belastung des Läufers wird dieser auf eine solche Winkelgeschwindigkeit abgebremst, dass die Relativgeschwindigkeit zwischen Drehfeld und Läufer gerade ausreicht, um über den Läuferstrom und dem umlaufenden magnetischen Feld der Maschine ein Drehmoment zu erzeugen, das der mechanischen Belastung des Läufers das Gleichgewicht hält. Der Umstand, dass der Läufer mit der asynchronen Drehzahl  $n \neq n_{syn}$  umläuft, ist charakteristisch für die Funktion der Asynchronmaschine.

Folgende Aufstellung gibt den Zusammenhang zwischen den Frequenzen der elektrischen Größen und Drehzahlen in Ständer und Läufer wieder:

Größe	Bedeutung
$f_1$	Frequenz des die Ständerwicklung speisenden Drehstroms
$n_{syn} = \frac{f_1}{p}$	Drehzahl des Ständerdrehfeldes
$n$	Drehzahl des Läufers
$n_2 = n_{syn} - n$	Drehzahl der Relativbewegung des Ständerdrehfeldes gegenüber der Läuferbewegung
$f_2 = n_2 \cdot p$	Frequenz der im Läufer induzierten Spannungen und Ströme

Die Relativgeschwindigkeit zwischen Drehfeld und Läufer wird als Schlupf  $s$  bezeichnet und ist eine charakteristische Betriebskenngröße der Asynchronmaschine:

$$s = \frac{f_2}{f_1} = \frac{n_2}{n_{syn}} = \frac{n_{syn} - n}{n_{syn}} = 1 - \frac{n}{n_{syn}}. \quad (2.1)$$

## 2.1 Einphasiges Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine

Die Asynchronmaschine besitzt Merkmale eines Drehstromtransformators. Wie dieser hat sie zwei Drehstromwicklungen und wird einseitig gespeist. Bei stillstehendem Läufer ( $n = 0$ ) ist die Asynchronmaschine daher formal als Drehstromtransformator zu betrachten. Die elektrischen Größen der Sekundärseite (Läufer) haben dann die gleiche Frequenz wie die elektrischen Größen der Primärseite (Ständer). Es kann in Analogie zum Drehstromtransformator ein Ersatzschaltbild verwendet werden, in dem Primär- und Sekundärseite elektrisch über die Hauptinduktivität miteinander gekoppelt sind.

Bei rotierendem Läufer ist  $f_2 \neq f_1$ . Die unterschiedlichen Frequenzen im Ständer und Läufer müssen deshalb zunächst in einer galvanischen Entkopplung der Ständer- und Läuferseite im Ersatzschaltbild berücksichtigt werden.

Im einphasigen Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine (siehe Abb. 2.1) mit Kurzschlussläufer sind neben den Hauptinduktivitäten  $X_{1h}$  und  $X_{2h}$  der Ständer- und Läuferwicklungen deren ohmsche Widerstände ( $R_1$ ,  $R_2$ ) und die Streuinduktivitäten ( $X_{1\sigma}$ ,  $X_{2\sigma}$ ) zu berücksichtigen. Bei einer Asynchronmaschine mit Schleifringläufer kommen zusätzlich externe Läuferwiderstände hinzu. Werden diese in  $R_2$  berücksichtigt, ergeben sich für beide Maschinen gleiche Ersatzschaltbilder.

In Zeigerdarstellung lassen sich für die Primär- und Sekundärseite folgende Maschengleichungen aufstellen:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= R_1 \cdot \underline{I}_1 + jX_{1\sigma} \cdot \underline{I}_1 + \underline{U}_{1h} \\ 0 &= R_2 \cdot \underline{I}_2 + s \cdot jX_{2\sigma} \cdot \underline{I}_2 + \underline{U}_{2h} \end{aligned} \quad (2.3)$$

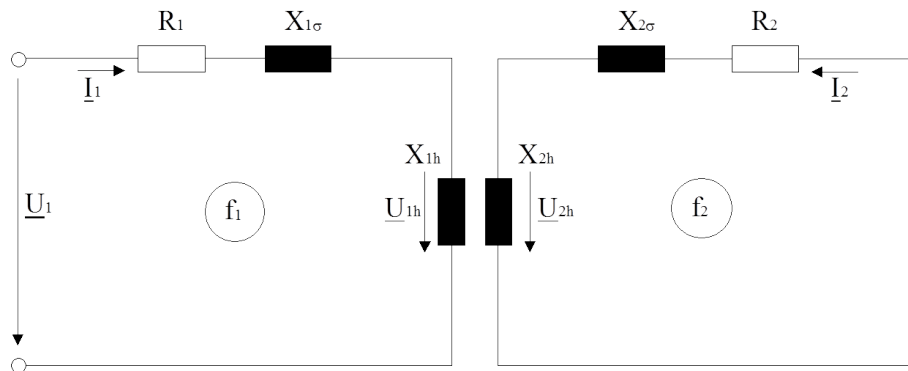


Abbildung 2.1: Einphasiges Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine.

Hierbei wird der für den Stillstand berechnete Wert  $X_{2\sigma} = 2\pi \cdot f_1 \cdot L_{2\sigma}$  mit dem Schlupf  $s$  multipliziert, da ja auf Läuferseite  $f_2 = s \cdot f_1$  gilt.

Bei der Herleitung eines auf die Ständerseite bezogenen Ersatzschaltbildes (siehe Abb. 2.2) mit gekoppelter Primär- und Sekundärseite wird ein ruhender Läufer angenommen, wobei die in der Läuferwicklung fließenden Ströme im Luftspalt der Maschine die gleiche Durchflutung erzeugen müssen wie beim tatsächlich rotierenden Läufer. Mit der Einführung des Übertragungsfaktors  $\ddot{u} = \frac{w_1}{w_2}$ , der das Windungszahlenverhältnis der Spulen von Primär- zu Sekundärseite darstellt, ergeben sich folgende auf die Primärseite bezogene Größen:

$$\begin{aligned} \underline{I}_2' &= \frac{1}{\ddot{u}} \cdot \underline{I}_2 \\ R_2' &= \ddot{u}^2 \cdot R_2 \\ X_{2\sigma}' &= \ddot{u}^2 \cdot X_{2\sigma} \end{aligned} \tag{2.5}$$

Mit diesen bezogenen Größen lassen sich die Maschengleichungen schreiben zu:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= R_1 \cdot \underline{I}_1 + jX_{2\sigma} \cdot \underline{I}_1 + \underline{U}_{1h} \\ 0 &= \frac{R_2'}{s} \cdot \underline{I}_2' + jX_{2\sigma}' \cdot \underline{I}_2' + jX_{1h} (\underline{I}_1 + \underline{I}_2') \quad \text{mit} \quad \underline{U}_{1h} = jX_{1h} (\underline{I}_1 + \underline{I}_2') \end{aligned} \tag{2.7}$$

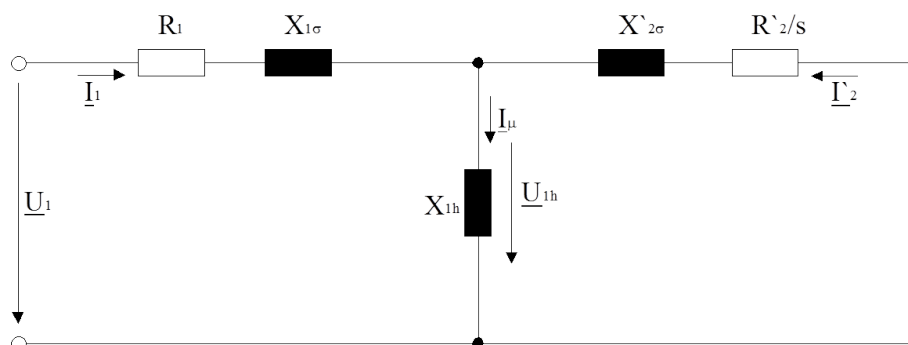


Abbildung 2.2: Einphasiges, auf die Primärseite bezogenes Ersatzschaltbild.

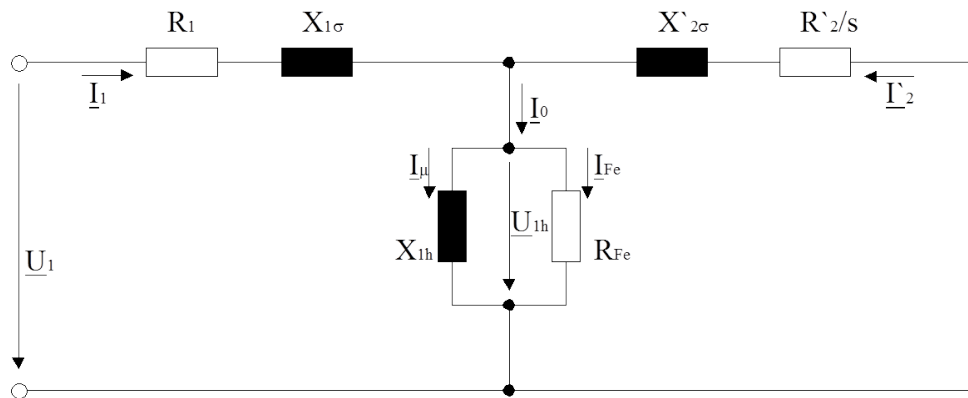


Abbildung 2.3: Vollständiges Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine.

An der jetzt für Ständer- und Läuferwicklung gemeinsamen Hauptspannung  $\underline{U}_{1h}$  bewirken  $\frac{R'_2}{s}$  und  $X'_{2\sigma}$  in einem als ruhend angenommenen Läuferkreis gerade einen solchen bezogenen Strom  $\underline{I}'_2$ , dass im Luftspalt das Originalfeld der rotierenden Maschine entsteht.

Wie beim Transformator lassen sich auch die Eisenverluste in der Ersatzschaltung erfassen. Wird der Verlustanteil der Streuflüsse vernachlässigt, so wird die Eisenwärme des Hauptfeldes durch einen Widerstand  $R_{Fe}$  parallel zur Hauptreaktanz  $X_{1h}$  berücksichtigt. Damit wird die vollständige Ersatzschaltung der Asynchronmaschine gemäß Abb. 2.3 erzeugt.

In Abb. 2.4 ist das zur Asynchronmaschine gehörige Zeigerdiagramm dargestellt. Darin werden die Zusammenhänge zwischen den auftretenden Strömen und Spannungen der Asynchronmaschine veranschaulicht.

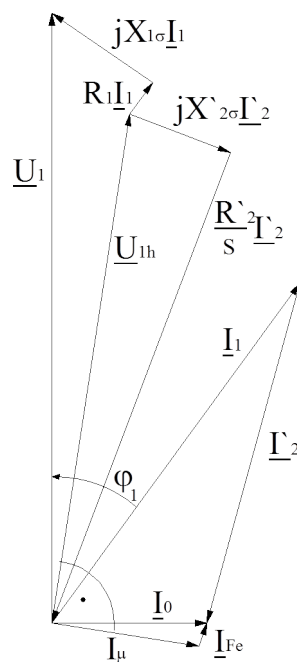


Abbildung 2.4: Vollständiges Zeigerdiagramm der Asynchronmaschine.

## 2.2 Die Ortskurve des Ständerstromes (Der Heylandkreis)

Unter Vernachlässigung des Eisenverlustwiderstandes  $R_{Fe}$  ergibt sich nach Abb. 2.2 für das bezogene Ersatzschaltbild folgende Spannungsgleichung:

$$\underline{U}_1 = \underline{Z}_1 \cdot \underline{I}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jX_{1\sigma} \underline{I}_1 + \frac{jX_{1h} \left( jX'_{2\sigma} + \frac{R'_2}{s} \right)}{jX_{1h} + jX'_{2\sigma} + \frac{R'_2}{s}} \cdot \underline{I}_1. \quad (2.8)$$

Wird diese nach dem Ständerstrom  $\underline{I}_1$  aufgelöst, so wird die vom Schlupf  $s$  abhängige Gleichung erhalten.

$$\underline{I}_1 = \frac{R'_2 + jsX'_2}{R_1 R'_2 + jR'_2 X_1 + s(X_{1h}^2 - X_1 X'_2 + jR_1 X'_2)} \cdot \underline{U}_1, \quad (2.9)$$

wobei für die gesamten Blindwiderstände von Ständer- und Läuferwicklung

$$X_1 = X_{1h} + X_{1\sigma} \quad \text{und} \quad X'_2 = X_{1h} + X'_{2\sigma}$$

definiert werden.

Zur Konstruktion der Ortskurve des Ständerstromes werden drei charakteristische Kreispunkte benötigt: Leerlauf  $P_{10}$ , Anlauf  $P_{1k}$  und Kurzschluss  $P_{1\infty}$ . Diese Punkte sind durch den konstanten (d. h. von  $s$  unabhängigen) Leerlaufstrom  $\underline{I}_{10}$ , den Kurzschlussstrom  $\underline{I}_{1k}$  und den ideellen Kurzschlussstrom  $\underline{I}_{1\infty}$  gegeben. Unter Berücksichtigung von  $R_1$  ergeben sich für die gesuchten Grenzwerte des Ständerstromes folgende Gleichungen:

$$I_{10} = \frac{U_1}{\sqrt{R_1^2 + X_1^2}} \quad \text{bei } n = n_{syn} \text{ und } s = 0 \quad (2.10)$$

$$I_{1k} \approx \frac{U_1}{\sqrt{R_K^2 + X_K^2}} \quad \text{bei } n = 0, f_2 = f_1 \text{ und } s = 1 \quad (2.11)$$

$$\text{mit } R_K = \frac{R'_2}{(1 + \sigma_2)} \approx R_1 + R'_2 \quad \text{und} \quad X_K = \sigma \cdot X_1 \approx X_{\sigma 1} + X'_{2\sigma}$$

$$I_{1\infty} = \frac{U_1}{\sqrt{R_1^2 + X_K^2}} \quad \text{bei } s \rightarrow \infty, \frac{R'_2}{s} \rightarrow 0 \text{ und } n \rightarrow \infty. \quad (2.12)$$

Durch die drei Punkte ist ein Kreis eindeutig festgelegt, auf dem der Ständerstrom in Abhängigkeit von  $s$  verläuft und dessen Mittelpunkt sich im Schnittpunkt der Mittelsenkrechten der



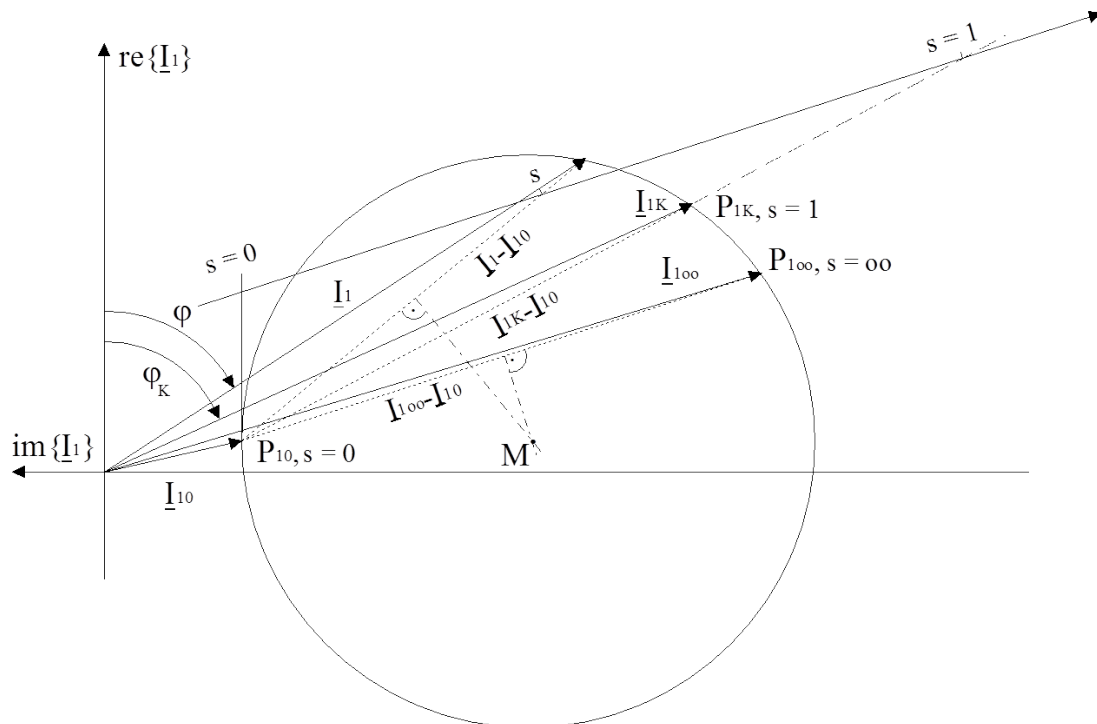
Verbindungslinien beliebiger Kreispunkte befindet. Der Ständerstrom liegt unter dem Winkel  $\varphi$  an der Ortskurve an, welcher vom Leistungsfaktor  $\cos \varphi$  gegeben ist:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1} \quad (2.13)$$

Zur Parametrierung der Ortskurve für veränderliche Werte des Schlupfes  $s$  wird der Punkt  $P_{10}$ , der den Endpunkt des Zeigers  $\underline{I}_{10}$  darstellt, als Bezugspunkt gewählt. Die Schlupfgerade verläuft in einem beliebigen (aber sinnvollen) Abstand parallel zur Verbindungslinie zwischen Bezugspunkt und dem Punkt  $P_{1\infty}$ , also bei der Wahl von  $P_{10}$  als Bezugspunkt parallel zur Linie  $P_{10} - P_{1\infty}$ . In dem Schnittpunkt der Geraden durch  $P_{10}$  und  $P_{1K}$  mit der Schlupfgeraden ist  $s = 1$ . Im Bezugspunkt (hier  $P_{10}$ ) wird die Tangente an den Kreis eingezeichnet, welche die Schlupfgerade in  $s = 0$  schneidet. Mit den eingezeichneten Werten  $s = 0$  und  $s = 1$  kann die Schlupfgerade linear unterteilt werden. Da in diesem Versuch die Maschine nur im motorischen Betrieb betrachtet wird, bewegen sich die Messwerte zwischen  $s = 0$  und  $s = 1$ . Es ergibt sich die in Abb. 2.5 gezeigte Ortskurve.

Den Schlupf für einen beliebigen Ständerstrom  $\underline{I}_1$  kann ermittelt werden, indem die Strecke zwischen dem Bezugspunkt (hier  $P_{10}$ ) und dem Endpunkt des Zeigers  $\underline{I}_1$  auf dem Kreis bis zum Schnittpunkt mit der Schlupfgeraden verlängert und  $s$  abgelesen wird.

Umgekehrt lassen sich für beliebige Werte von  $s$  auch die entsprechenden Werte des Ständerstromes  $\underline{I}_1$  ablesen.



**Abbildung 2.5:** Ortskurve des Ständerstromes unter Berücksichtigung von  $R_1$  für  $-\infty \leq s < \infty$ .

Wird neben  $R_{Fe}$  ebenfalls  $R_1$  vernachlässigt, welches außer bei kleinen Maschinen eine gute Näherung darstellt, so ergeben sich für die gesuchten Grenzwerte des Ständerstromes folgende Gleichungen:

$$\underline{I}_{10} = \frac{U_1}{jX_1} \quad (2.14)$$

$$\underline{I}_{1k} = \frac{R'_2 + jX'_2}{R'_2 + j\sigma X'_2} \cdot \frac{1}{jX_1} \cdot U_1 \quad (2.15)$$

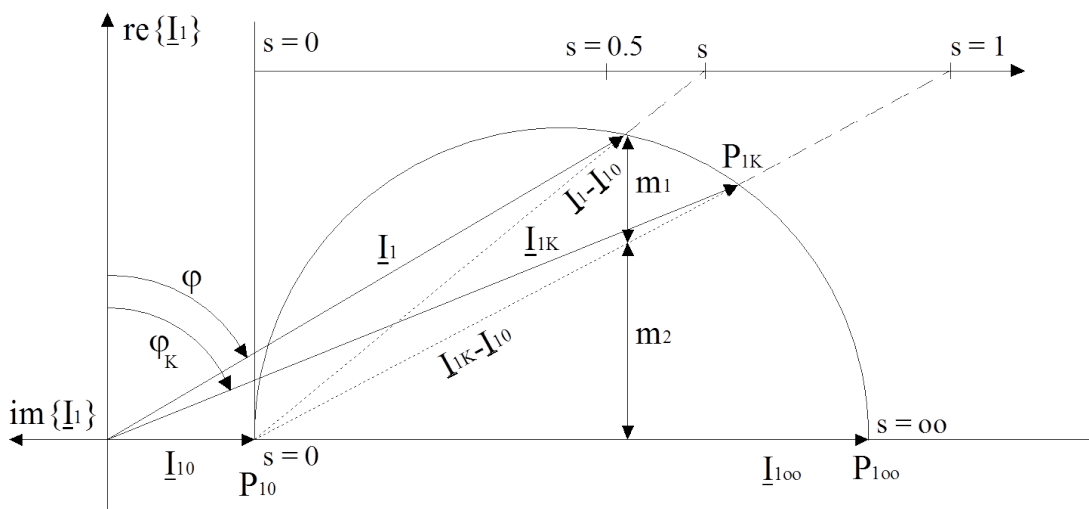
$$\underline{I}_{1\infty} = \frac{X_1 X'_2}{-X_{1h}^2 + X_1 X'_2} \cdot \frac{-j}{X_1} \cdot U_1 = \frac{1}{j\sigma X_1} \cdot U_1 = \frac{1}{\sigma} \cdot \underline{I}_{10} \quad (2.17)$$

mit der Streuziffer  $\sigma = \frac{X_1 X'_2 - X_{1h}^2}{X_1 X'_2}$

Hierdurch ergibt sich ein anderer Verlauf der Ortskurve, da  $\underline{I}_{10}$  und  $\underline{I}_{1\infty}$  nun rein imaginär sind. Der Mittelpunkt der Ortskurve verschiebt sich auf die imaginäre Achse (siehe Ab. 2.6).

Wie in Abschnitt 2.3 nachfolgend noch beschrieben, befindet sich die Asynchronmaschine für  $0 \leq s$  im motorischen Betrieb bzw. im Betrieb als Bremse, wodurch der in diesem Versuch betrachtete Teil der Ortskurve einen Halbkreis darstellt.

Wird  $P_{10}$  wiederum als Bezugspunkt gewählt, so verläuft die Verbindungslinie  $P_{10} - P_{1\infty}$  auf der imaginären Achse. Zu dieser parallel wird die Schlupfgerade in einem beliebigen (aber sinnvollen) Abstand gezeichnet. Da die Tangente an den (gesamten) Ortskreis in  $P_{10}$  senkrecht auf der imaginären Achse steht, befindet sich  $s = 0$  für jede Schlupfgerade über (oder unter)  $P_{10}$ . Die Verlängerung der Geraden  $P_{10} - P_{1K}$  schneidet die Schlupfgerade im Punkt  $s = 1$ . Die Strecke zwischen  $s = 0$  und  $s = 1$  wird für den Schlupf linear geteilt.



**Abbildung 2.6:** Ortskurve des Ständerstromes ohne Berücksichtigung von  $R_1$  für  $-\infty \leq s < \infty$ .

Den Schlupf für einen beliebigen Ständerstrom  $I_1$  kann ermittelt werden, indem die Strecke zwischen  $P_{10}$  und dem Endpunkt des Zeigers  $I_1$  auf dem Halbkreis bis zum Schnittpunkt mit der Schlupfgeraden verlängert und  $s$  abgelesen wird.

Umgekehrt lassen sich für beliebige Werte von  $s$  auch die entsprechenden Werte des Ständerstromes  $I_1$  einzeichnen und ablesen.

## 2.3 Leistung und Drehmoment der Asynchronmaschine

Die insgesamt aufgenommene Ständerwirkleistung  $P_1$  wird nicht vollständig an den Läufer weitergegeben, da zwei elektrische Verlustleistungen, ohmsche Verluste in den Ständerwicklungen  $P_{cu1}$  und Wirbelstrom- und Hystereseverluste im Eisen  $P_{Fe1}$ , existieren.

Die vom Läufer aufgenommene Drehfeldleistung  $P_D = P_1 - (P_{cu1} + P_{Fe})$  teilt sich in die mechanisch an der Welle abgegebene Nutzleistung  $P_{mech}$ , in die elektrische Verlustleistung  $P_{2V}$  des Läufers, den ohmschen Verlusten in der Drehstromwicklung, und in die mechanische Verlustleistung auf. Die Eisenverluste im Läufer sind i. A. nicht zu berücksichtigen. Bei der Asynchronmaschine mit Schleifringläufer wirken zusätzlich noch die ohmschen Verluste in den Belastungsvorwiderständen  $P_R$ . Die mechanische Verlustleistung teilt sich in Reibungs- und Lüfterverluste auf und wird im Folgenden vernachlässigt.

Im Allgemeinen sind die elektrischen Verlustleistungen des Ständers für große Maschinen zu vernachlässigen, wodurch angenommen werden kann, dass die vom Ständer aufgenommene Drehfeldleistung nahezu vollständig an den Läufer weitergegeben wird. Dies ist bei kleinen Maschinen jedoch nicht der Fall. Da in diesem Versuch eine kleine Maschine verwendet wird, können diese Verluste nicht vernachlässigt werden.

Bei der Strangzahl 3 gilt für die Ständerverluste:

$$P_{cu1} = 3 \cdot I_1^2 \cdot R_1. \quad (2.18)$$

Die Eisenverluste im Ständer  $P_{Fe1}$  werden hier für den normalen Betriebsbereich vernachlässigt.

$$P_{Fe} = 3 \cdot \frac{U_1^2}{R_{Fe}} \quad (2.19)$$

Die auf der Sekundärseite der Ersatzschaltung übertragene Drehfeldleistung  $P_D = P_1 - (P_{cu1} + P_{Fe})$  wird in dem Widerstand  $\frac{R'_2}{s}$  umgesetzt. Es ist damit:

$$P_D = m \cdot I_2'^2 \cdot \frac{R'_2}{s} \quad (2.20)$$

wobei  $m$  das in dem Betriebspunkt angenommene Moment ist und worin die Stromwärmeverluste der Läuferwicklung mit

$$P_{cu2} = 3 \cdot I_1'^2 \cdot R'_2 \quad (2.21)$$

enthalten sind. Werden die mechanischen Reibungs- und Ventilationsverluste  $P_R$  vernachlässigt, so kann aus den Gleichungen (2.19) und (2.20) Gleichung (2.22)

$$P_{mech} = P_D - P_{cu2} = 3 \cdot I_2'^2 \cdot \frac{R_2'}{s} \cdot (1 - s) \quad (2.22)$$

und die Aufteilung

$$P_{mech} = P_D \cdot (1 - s) \quad (2.23)$$

$$P_{cu2} = P_D \cdot s = P_{2V} \quad (2.24)$$

ermittelt werden.

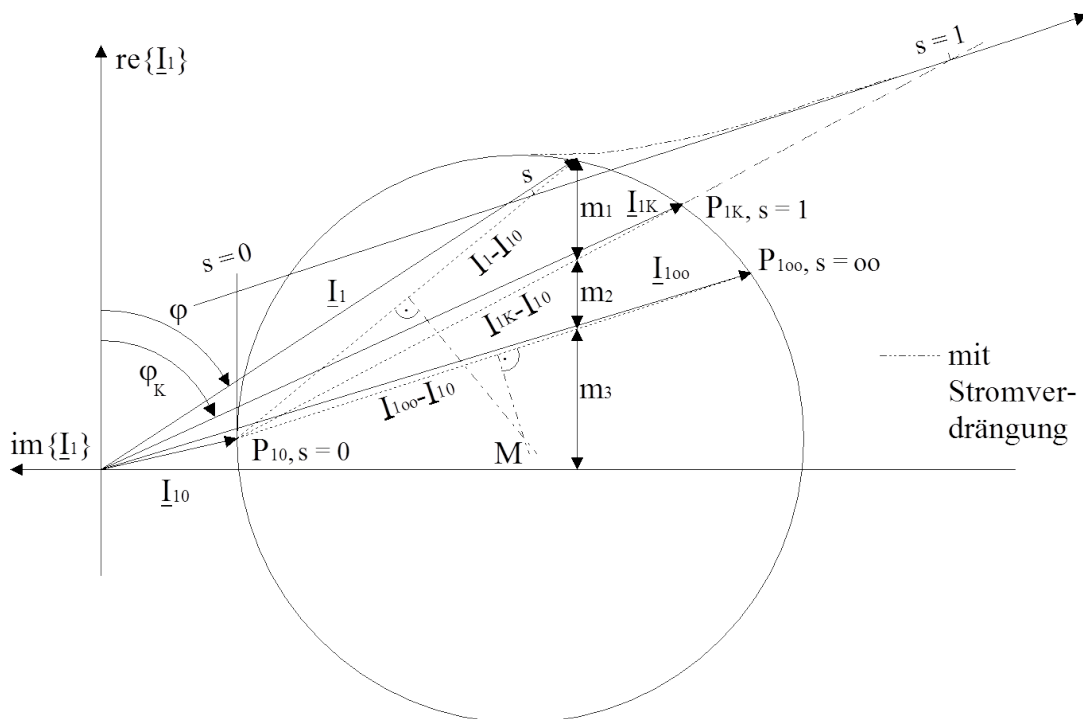
Eine Leistungsbilanz ergibt nach obigen Ausführungen, also mit  $P_{V,Fe} = 0$ :

$$P_1 = P_{cu1} + P_D = P_{cu1} + P_{mech} + P_{cu2}. \quad (2.25)$$

Für den Wirkungsgrad des Asynchronmotors gilt:

$$\eta = \frac{P_{mech}}{P_1} = \frac{2\pi \cdot n \cdot M}{P_1}. \quad (2.26)$$

Das an der Motorwelle abgegebene Moment  $M$  ist dem Wirkanteil des Ständerstroms bei konstanter Speisespannung  $\underline{U}_1$  proportional. In der Ortskurve des Ständerstroms in Abb. 2.7 entspricht der Wirkanteil des Stromes der Strecke  $m = m_1 + m_2 + m_3$ .



**Abbildung 2.7:** Ortskurve des Ständerstromes mit „Gerade der mechanischen Leistung“.

Das maximal mögliche Motormoment ist das Kippmoment  $M_{Kipp}$ . Wird dieses Moment vom Belastungsmoment überschritten, so „kippt“ der Asynchronmotor und kommt zum Stillstand. Eine Extremwertbetrachtung für das Kippmoment  $M_{Kipp}$  ergibt für den entsprechenden „Kipp-schlupf“:

$$\begin{aligned} s_{Kipp} &= \frac{R'_2}{\sigma \cdot X'_2} \\ \sigma &= \frac{1 - X_{1h}^2}{X_1 \cdot X'_2} \end{aligned} \quad (2.28)$$

Wird das Motormoment  $M$  auf das Kippmoment  $M_{Kipp}$  bezogen, so ergibt sich die Kloß'sche Formel:

$$\frac{M}{M_{Kipp}} = \frac{2}{\frac{s}{s_{Kipp}} + \frac{s_{Kipp}}{s}}. \quad (2.29)$$

Mit Hilfe der Ortskurve des Ständerstromes lässt sich eine Aufspaltung der Drehfeldleistung  $P_D$  in die mechanisch abgegebene Leistung  $P_{mech}$  und die elektrische Verlustleistung  $P_V$  vornehmen. Aus den bisherigen Ausführungen, wenn zusätzlich  $P_R$  vernachlässigt wird, lässt sich ersehen, dass  $P_{mech} = P_D \cdot (1 - s)$  und  $P_V = P_D \cdot s$  ist.

Aufgrund geometrischer Beziehungen gilt für einen beliebigen Betriebspunkt

$$\frac{m_1}{m_1 + m_2 + m_3} = 1 - s \quad \text{und} \quad \frac{m_2 + m_3}{m_1 + m_2 + m_3} = s.$$

Es ist also

- $m_1$  der mechanisch abgegebenen Leistung  $P_{mech}$ ,
- $(m_2 + m_3)$  der elektrischen Verlustleistung  $P_V$

proportional, wobei  $m_2$  der elektrischen Verlustleistung des Läufers und  $m_3$  der elektrischen Verlustleistung des Ständers proportional ist.

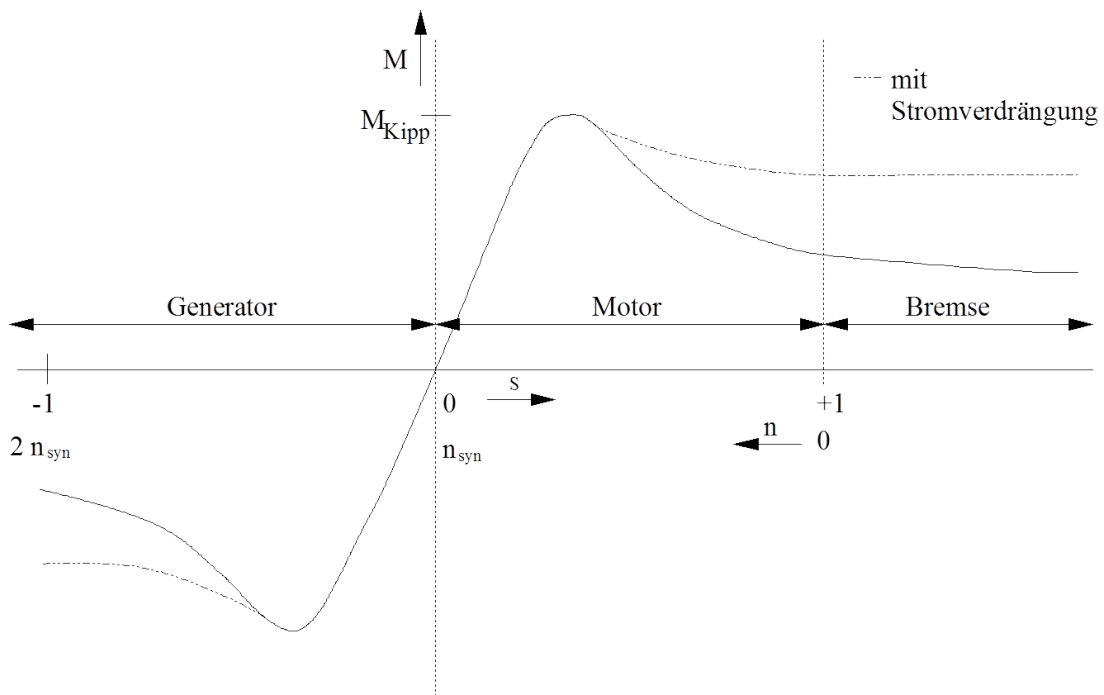
Die Verbindungslinie zwischen den Punkten  $P_{10}$  und  $P_{1K}$  wird auch als Gerade der mechanischen Leistung bezeichnet.

Unter Vernachlässigung der elektrischen Verluste des Ständers wäre  $m_3 = 0$  (siehe Abb. 2.6).

Durch einen Kurzschlussläufer mit Stromverdrängung kommt es zu einer Stromanhebung bei höherem Schlupf und einer Verformung des Heylandkreises.

Aus der Kloß'schen Formel lässt sich eine Drehmoment-/Schlupfkennlinie (siehe Abb. 2.8) konstruieren, wobei sich anhand des Schlupfes  $s$  die verschiedenen Betriebszustände der Asynchronmaschine charakterisieren lassen:

- i)  $s < 0$ : Die Asynchronmaschine arbeitet als Generator
- ii)  $0 < s < 1$ : Die Asynchronmaschine arbeitet als Motor
- iii)  $s > 1$ : Wird die Maschine gegen das Drehfeld angetrieben, so wirkt sie als Bremse



**Abbildung 2.8:** Drehmoment-/Schlupfkennlinie.

Durch Einsatz eines Kurzschlussläufers mit Stromverdrängung durch Läuferkäfig mit Doppelstäben oder Keilstäben kann das Moment im Anfahrbereich erheblich angehoben werden. Die Versuchsmaschine mit Schleifringläufer und gewickelter Läuferwicklung weist nur eine geringe Stromverdrängung auf, die in diesem Versuch nicht beachtet werden muss.

# 3 Versuchsdurchführung

## 3.1 Verwendete Geräte

- regelbarer Drehstromtransformator
- Wirkleistungsmessgerät „Wattavi k“ von Elima
- zwei Universalmeßgeräte
- Schleifringläufermotor 200 W (mechanische Bemessungsleistung):  
Polpaarzahl  $p = 2$ ,  $U_N = 230 \text{ V}/400 \text{ V}$  (Stern/Dreieck),  $f_N = 50 \text{ Hz}$ ,  $n_N = 1320 \text{ min}^{-1}$ ,  
 $I_N = 0,95 \text{ A}/0,55 \text{ A}$  (Stern/Dreieck),  $\cos \varphi_N = 0,63$
- Kompaktbremseinrichtung mit Magnetpulverbremse 200 W,  
integrierte Drehzahl- und Drehmomentmessung und -anzeige
- Anlassersteller mit Läuferwiderständen:  
 $R_{2V} = 0 \text{ } \Omega; 1,5 \text{ } \Omega; 4,8 \text{ } \Omega; 8,1 \text{ } \Omega$

## 3.2 Versuchsablauf

Bauen Sie die Motorschaltung nach Abb. 3.1 auf, und schalten Sie die Ständerwicklung des Motors in Sternschaltung. Das Wirkleistungsmessgerät kann eine Ein- oder Dreiphasenmessung durchführen. Schließen Sie es zur Dreiphasenmessung an.

**Wichtig:** Nehmen Sie den Motor erst in Betrieb, nachdem die Betreuerin oder der Betreuer des Versuchs die richtige Verschaltung des Versuchsaufbaus überprüft hat! Für die einzelnen Aufgabenteile ist kein Umbau der Schaltung notwendig. Fahren Sie den Motor immer mit **voll eingeschalteten Vorwiderständen** an und stellen Sie diese dann auf den geforderten Wert ein.

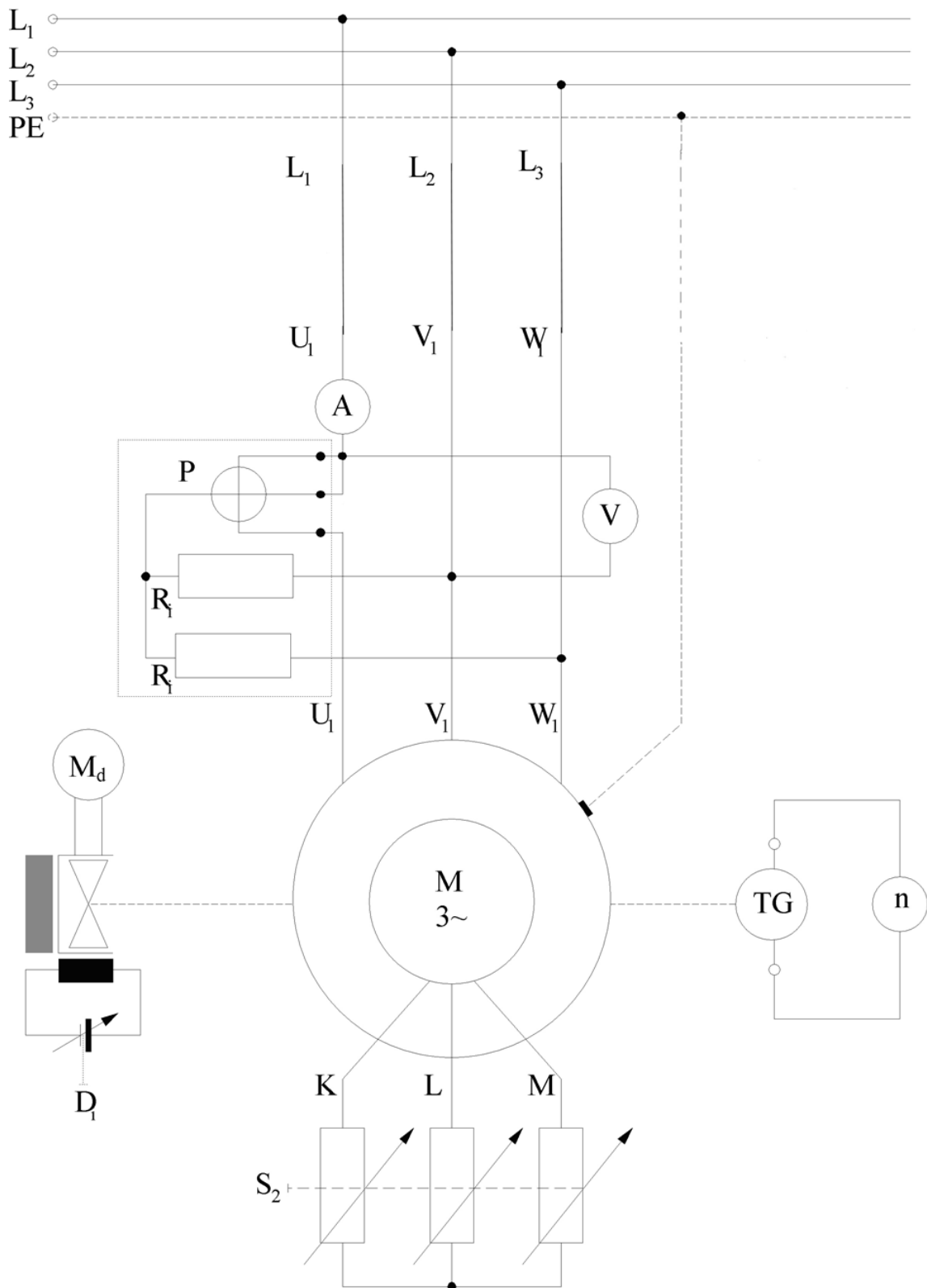


Abbildung 3.1: Schaltkizze des Versuchsaufbaus.



a) **Kurzschlussversuch zur Bestimmung des Anfahrverhaltens**

Bestimmen Sie für kurzgeschlossenen Läuferwiderstand (Betrieb wie eine Asynchronmaschine mit Kurzschlussläufer) und zum Vergleich für die anderen einstellbaren Läuferwiderstände das Anfahrmoment. Fahren Sie hierzu für jeden einzustellenden Wert der Läuferwiderstände den mechanisch unbelasteten Motor an, und bremsen Sie den Motor nach dem Hochlauf aus dem Leerlauf bis zum Stillstand ab; nehmen Sie das Anfahrmoment für  $n = 0$  in der nachfolgenden Tabelle 3.1 auf. Da bei  $n = 0$  nach Herleitung  $s = 1$  gilt, entspricht der hier gemessene Betriebspunkt dem Kurzschlusspunkt.

Wichtig: Führen Sie Ihre Messungen zügig durch, da der Motor im festgebremsten Zustand stark überlastet wird.

$R_{2V}/\Omega$	0	1,5	4,8	8,1
$M_A/\text{Nm}$				

**Tabelle 3.1:** Messwerte des Kurzschlussversuchs, d.h.  $n = 0$ ;  $s = 1$ .

Interpretieren Sie Ihre Messergebnisse.

Ergebnisse und Antworten

b) **Betriebsverhalten des Motors im Bemessungspunkt als Kurzschlussläufermotor**

Entnehmen Sie die Daten der Asynchronmaschine dem Abschnitt 3.1. Bestimmen Sie für die hier verwendete Sternschaltung das Bemessungsmoment  $M_B$ .

Ergebnisse und Antworten
$M_B =$

Fahren Sie den mechanisch unbelasteten Motor in Sternschaltung über eine manuelle Regelung der Läuferwiderstände bis zu deren Kurzschluss an, und belasten Sie die Motorwelle für  $R_{2V} = 0$  über die Magnetpulverbremse mit dem Bemessungsmoment  $M_B$ , das Sie zuvor berechnet haben. Nehmen Sie hierbei die Bemessungsdaten  $n_B$ ,  $I_{1B}$  und  $P_{1B}$  auf.

Ergebnisse und Antworten

$n_B =$

$I_{1B} =$

$P_{1B} =$

Interpretieren Sie Ihre Messwerte und vergleichen Sie sie mit den Bemessungswerten:

Ergebnisse und Antworten

c) **Betriebsverhalten der Asynchronmaschine bei Betrieb mit Kurzschlussläufer ( $R_{2V} = 0$ ) und bei unterschiedlichen Läuferwiderständen**

Fahren Sie den zunächst mechanisch unbelasteten Motor an, und bremsen Sie die Maschine über die Magnetpulverbremse stufenweise ab bis zum Stillstand. Nehmen Sie dabei in den nachfolgenden Tabellen die folgenden Messreihen auf:

i)  $I_1 = f(n)$ ,  $P_1 = f(n)$  und  $M = f(n)$  für  $R_{2V} = 0$  (Tabelle 3.2)

ii)  $M = f(n)$  für  $R_{2V} = 1,5 \Omega; 4,8 \Omega; 8,1 \Omega$  (Tabelle 3.3)

Wichtig: Führen Sie die Messungen zügig durch, da bei Belastung der Motorbemessungsstrom überschritten wird, und somit der Motor zeitweise stark überlastet wird, was zu einem Abbruch des Bremsvorganges führen kann.

Berechnen Sie für  $R_{2V} = 0 \Omega$  den Leistungsfaktor  $\cos \varphi$ , den Wirkungsgrad  $\eta$  und den Schlupf  $s$  für alle betrachteten Drehzahlen  $n$  und tragen Sie Ihre Ergebnisse in Tabelle 3.4 ein.

$n / \text{min}^{-1}$ (Sollwert)	1470	1400	1300	1200	1000	800	600	400	200	100
$n / \text{min}^{-1}$ (Istwert)										
$I_1 / \text{A}$										
$P_1 / \text{W}$										
$M / \text{Nm}$										

**Tabelle 3.2:** Messwerte für den Kurzschlussläufer.

$R_{2V}$	$n / \text{min}^{-1}$ (Soll)	1470	1400	1300	1200	1000	800	600	400	200	100
$1,5 \Omega$	$n / \text{min}^{-1}$ (Ist)										
	$M / \text{Nm}$										
$4,8 \Omega$	$n / \text{min}^{-1}$ (Ist)										
	$M / \text{Nm}$										
$8,1 \Omega$	$n / \text{min}^{-1}$ (Ist)										
	$M / \text{Nm}$										

**Tabelle 3.3:** Messwerte für den Schleifringläufer mit Läuferwiderständen.

$n / \text{min}^{-1}$ (Sollwert)	1470	1400	1300	1200	1000	800	600	400	200	100
$\cos \varphi$										
$\eta$										
$s / \%$										

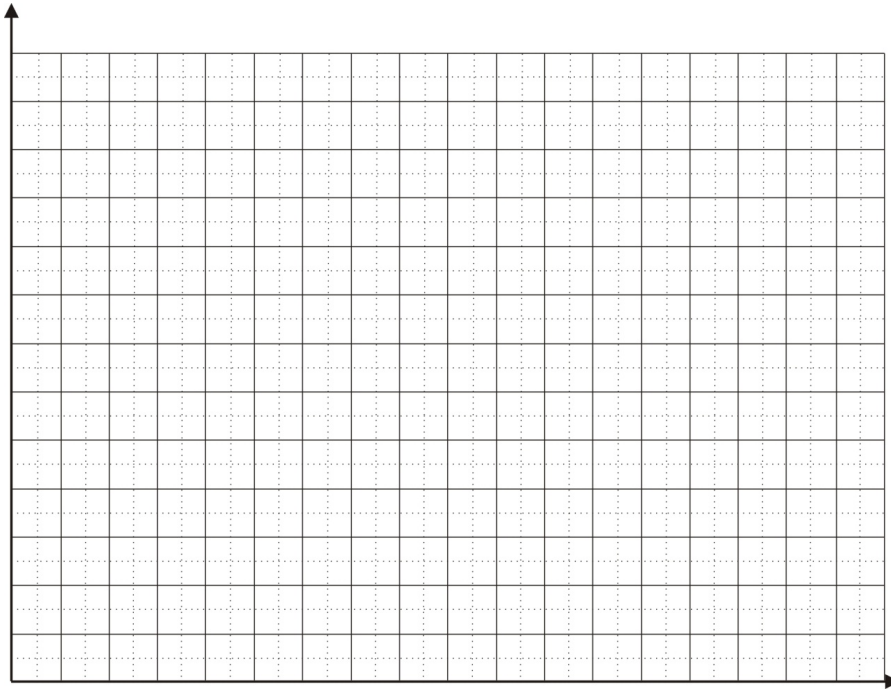
**Tabelle 3.4:** Rechenergebnisse für den Kurzschlussläufer.

### 3.3 Versuchsauswertung

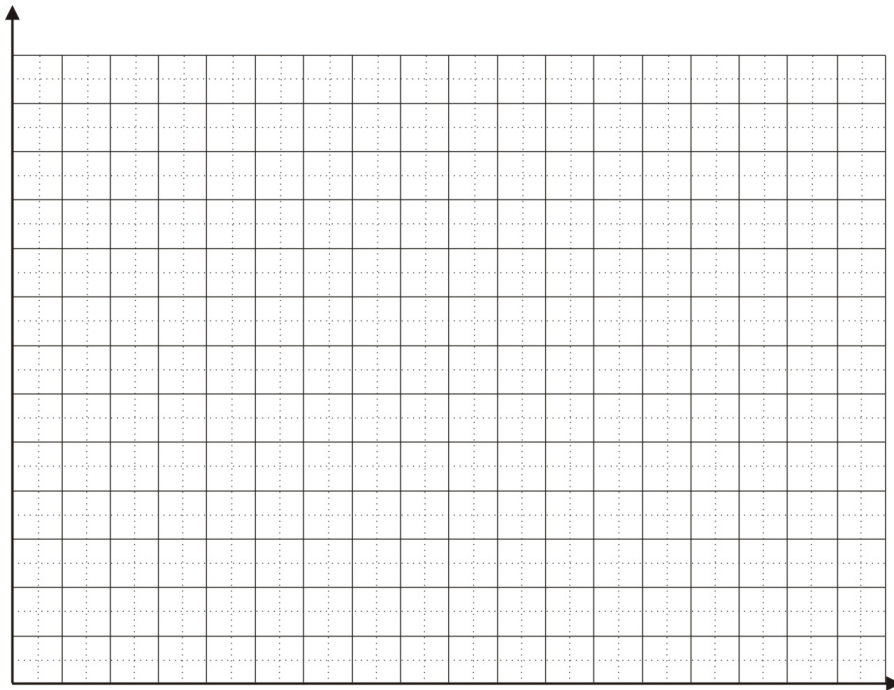
Konstruieren Sie für den kurzgeschlossenen Läufer ( $R_{2V} = 0$ ) die Ortskurve des Ständerstromes (Heylandkreis) mit der Schlupfgeraden (Abb. 3.2).

Zeichnen Sie außerdem die folgenden Kennlinien und interpretieren Sie deren Verläufe:

- i)  $I_1 = f(M)$  für  $R_{2V} = 0$  (Abb. 3.3)
- ii)  $M = f(n)$  für  $R_{2V} = 0\Omega; 1,5\Omega; 4,8\Omega; 8,1\Omega$  (Abb. 3.4)
- iii)  $\eta = f(M)$  für  $R_{2V} = 0$  (Abb. 3.5)
- iv)  $\cos\varphi = f(M)$  für  $R_{2V} = 0$  (Abb. 3.6)

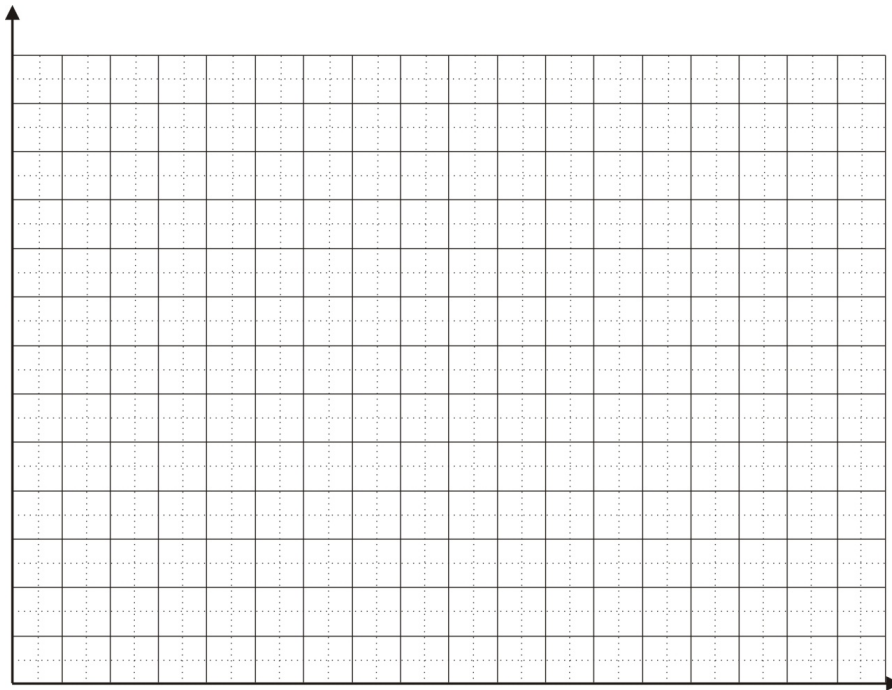


*Abbildung 3.2: Heylandkreis.*



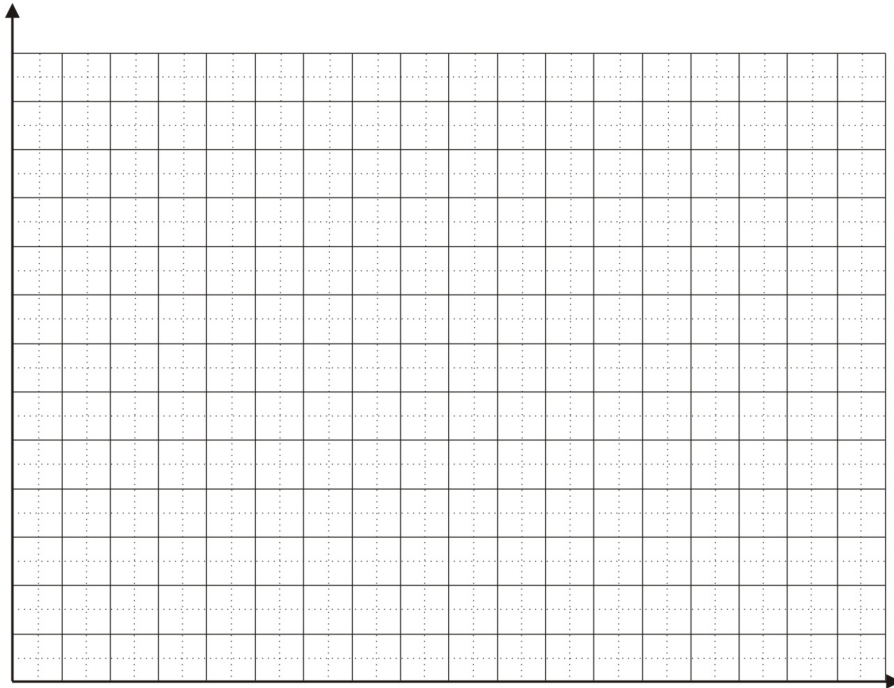
*Abbildung 3.3: Strom-Drehmomentkennlinie.*

Ergebnisse und Antworten



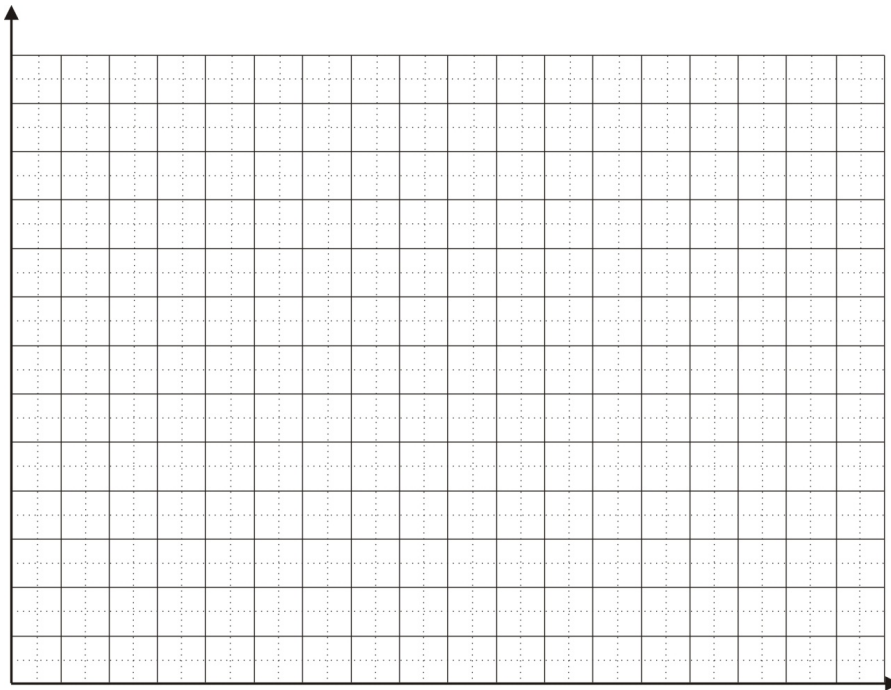
*Abbildung 3.4: Drehmoment-Drehzahlkennlinie.*

Ergebnisse und Antworten



*Abbildung 3.5: Wirkungsgrad-Drehmomentkennlinie.*

Ergebnisse und Antworten



*Abbildung 3.6: Leistungsfaktor-Drehmomentkennlinie.*

Ergebnisse und Antworten



# Literaturverzeichnis

- [1] Möller, K.: Grundgebiete der Elektrotechnik III: nach einer Vorlesung, Verlag der Augustinus-Buchhandlung, Aachen
- [2] Peier, D.: Einführung in die elektrische Energietechnik, Hüthig Verlag, Heidelberg
- [3] Seinsch, H. O.: Grundlagen elektrischer Maschinen und Antriebe, B.G. Teubner Verlag, Stuttgart
- [4] Fischer, R.: Elektrische Maschinen, Carl Hanser Verlag, München Wien