
M3: Die Asynchronmaschine



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Institut für
Elektrische
Energiewandlung

Energetechnisches Praktikum



Bild des Versuchstands

Inhaltsverzeichnis

1. VORBEREITUNGSAUFGABE	1
2. AUFBAU	1
3. WIRKUNGSWEISE	3
4. SPANNUNGSGLEICHUNGEN UND ERSATZSCHALTBILD	3
5. DREHMOMENT – DREHZAHL – KENNLINIE	5
6. ZUSÄTZLICHE LÄUFERWIDERSTÄNDE	6
7. LEISTUNGSFLUSS	8
8. KREISDIAGRAMM UND OBERWELLENEINFLÜSSE	9
8.1. DEFINITION UND NUTZEN DES KREISDIAGRAMMS	9
8.2. HERLEITUNG DES KREISDIAGRAMMS IN ALLGEMEINER LAGE (<i>OSSANNA</i> -KREIS): SIEHE ANHANG	10
8.3. HERLEITUNG VON DREHMOMENT- UND LEISTUNGSGERADE IM <i>OSSANNA</i> -KREIS	10
8.4. <i>HEYLAND</i> - KREISDIAGRAMM (KREISDIAGRAMM BEI $R_s = 0$)	10
8.5. PRAKTISCHE AUSFÜHRUNG DES KREISDIAGRAMMS	11
ANHANG A1: EINFLUSS DER FELDOBERWELLEN AUF DIE DREHMOMENT-DREHZAHL-KENNLINIE	14
ANHANG A2: HERLEITUNG DES KREISDIAGRAMMS IN ALLGEMEINER LAGE (<i>OSSANNA</i> -KREIS)	17
ANHANG A3: HERLEITUNG VON DREHMOMENT- UND LEISTUNGSGERADE IM <i>OSSANNA</i> -KREIS	22
9. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	27
9.1. ZUORDNUNG DER WATTMETER UND VORZEICHENBESTIMMUNG	29
9.2. STROM- UND SPANNUNGSMESSUNG.....	31
9.3. LEERLAUFVERSUCH	31
9.4. KURZSCHLUSSVERSUCH.....	32
9.5. BEMESSUNGSPUNKTE IM MOTOR- UND GENERATORBETRIEB	32
9.6. BELASTUNGSVERSUCH BEI VERMINDERTER SPANNUNG.....	34
9.7. BELASTUNGSVERSUCH MIT ZUSÄTZLICHEM LÄUFERWIDERSTAND.....	35
10. AUSARBEITUNG (10 PUNKTE)	36
10.1. ZEICHNEN DER KENNLINIEN AUS MESSPUNKTE	FEHLER! TEXTMARKE NICHT DEFINIERT.
10.2. ERMITTLUNG DER REIBUNGS- UND UMMAGNETISIERUNGSVERLUSTE AUS DEM LEERLAUFVERSUCH.....	36
10.3. KONSTRUKTION DES KREISDIAGRAMMS	37
10.4. EINTRAGEN DER BEMESSUNGSPUNKTE.....	37
10.5. EINTRAGEN DER KIPP-PUNKTE	38
10.6. KREISDIAGRAMM FÜR VERMINDERTE SPANNUNG.....	38
10.7. FORM DER AUSARBEITUNG	38
11. VERSTÄNDNISFRAGEN	39
12. WEITERFÜHRENDE LITERATUR („KLASSIKER ZUR ASYNCHRONMASCHINE“):	40

1. Vorbereitungsaufgabe

Das vorliegende Skript ist in Vorbereitung auf das Praktikum vollständig (auch Versuchsdurchführung und Ausarbeitung) durchzuarbeiten. Voraussetzung für die Teilnahme am Praktikum ist neben dem Nachweis ausreichender Kenntnisse zur Asynchronmaschine auch die **Vorbereitung der grau hinterlegten Spalten der Messwerttabellen** (Abschnitt Versuchsdurchführung).

2. Aufbau

Den Aufbau einer Asynchronmaschine mit Schleifringläufer zeigt Bild 1:

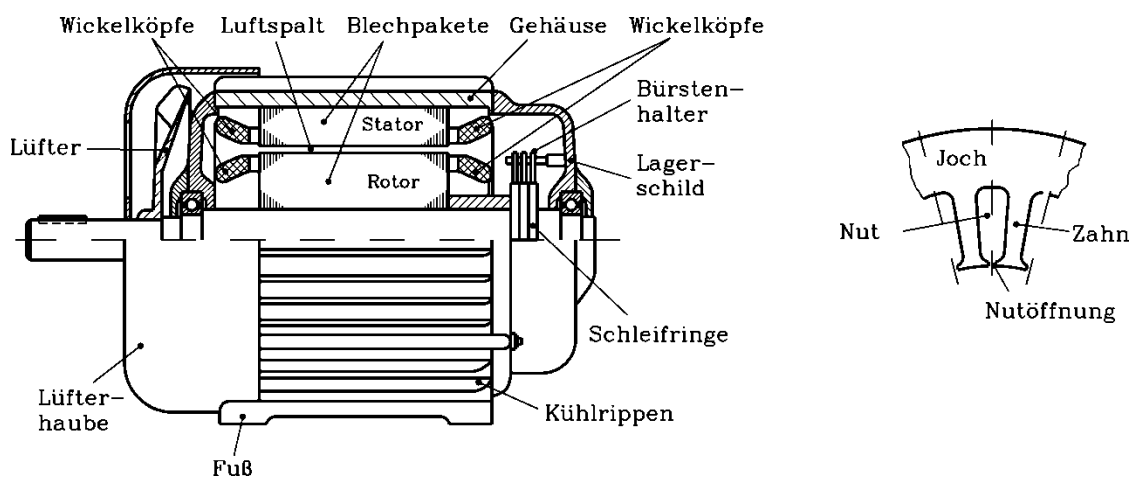


Bild 1: Längsschnitt durch einen oberflächengekühlten Schleifringläufer-Asynchronmotor und Detailansicht des Ständerblechschnitts mit einer Nut für die Wicklung

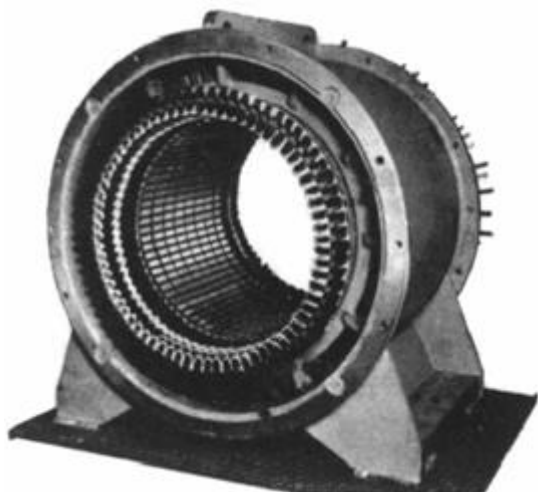


Bild 2: Ständer einer Asynchronmaschine

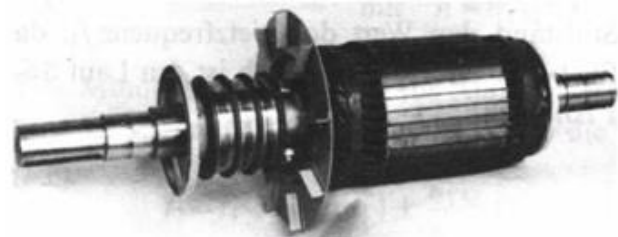


Bild 3: Schleifringläufer

Die Asynchronmaschine besteht in ihren elektrisch aktiven Teilen aus dem Ständer (Bild 2) und dem Läufer (Bild 3). Ständer (Stator) und Läufer (Rotor) bestehen aus aufeinandergeschichteten Eisenblechen, die mit Nuten zur Aufnahme der Wicklungen versehen sind. Die Bleche werden aus 0,35 - 0,5 mm dickem Elektroblech gestanz. Wünschenswert sind eine hohe Magnetisierbarkeit und kleine Hysteres- und Wirbelstromverluste. Die Bleche sind gegeneinander durch eine dünne Lack- oder Oxidschicht isoliert. Um eine gute magnetische Kopplung zwischen Ständer und Läufer bei geringem Magnetisierungsstrom zu erreichen, wählt man den Luftspalt so gering wie möglich. Bei

Maschinen im mittleren Leistungsbereich (bis ca. 500 kW) beträgt er nur einige zehntel Millimeter. Das Ständergehäuse, das sowohl eine Schweißkonstruktion als auch gegossen sein kann, nimmt den aktiven Teil, das Ständerblechpaket auf. Die Nuten sind bei Maschinen kleiner bis mittlerer Leistung meist halb geschlossen (Bild 1), so dass die mit Lack isolierten Wicklungsdrähte in die Nuten eingeträufelt (ingelegt) werden müssen. Bei großen Leistungen (MW-Bereich) und höheren Spannungen ($> 1 \text{ kV}$) verwendet man offene parallelflankige Nuten und fertig isolierte Formspulen.

Beim *Schleifringläufer* (Bild 3) sind die Ständer- und Läuferwicklung grundsätzlich gleich ausgeführt. Sie besitzen eine in Nuten verteilte Drehstromwicklung. Die drei offenen Enden der im Stern geschalteten Läuferwicklung sind über Schleifringe und Kohlebürsten an den Klemmkasten der Maschine geführt. Da im Normalbetrieb die Läuferwicklung über die Schleifringe ohnehin kurzgeschlossen wird, kann in den meisten Fällen der Läufer als *Kurzschlussläufer* oder *Käfigläufer* ausgeführt werden. Statt einer Wicklung aus isolierten Leitern befinden sich dann in den Läufernuten massive, meist nicht isolierte Stäbe, deren Enden durch *Kurzschlussringe* miteinander verbunden werden. Die Läuferstäbe bestehen beispielsweise aus Kupfer, Aluminium- oder Kupferlegierungen. Das Betriebsverhalten eines Käfigläufers ist dem des kurzgeschlossenen Schleifringläufers ähnlich. Im Folgenden wird daher nur die Maschine mit Schleifringläufer betrachtet. Die elektrische Schaltung sowie die genormten Klemmenbezeichnungen sind aus der schematischen Darstellung in Bild 4 zu ersehen.

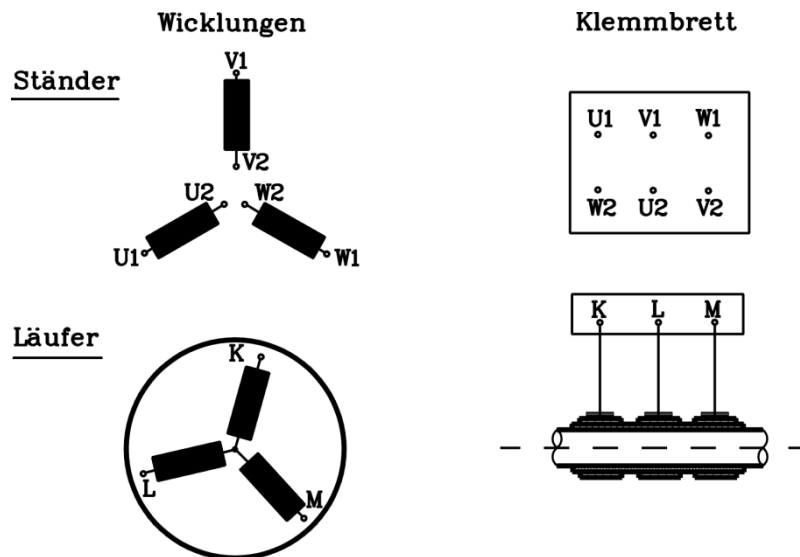


Bild 4: Schematische Darstellung der Wicklungen und Klemmen

Die Ständerwicklungsstränge des Asynchronmotors können in Stern- (Y) oder Dreieckschaltung (Δ) an das Drehstromnetz angeschlossen werden. Die Verdrahtung am Klemmbrett ist für beide Betriebsarten im Bild 5 dargestellt.



Bild 5: Verdrahtung am Klemmbrett

3. Wirkungsweise

Die Ständerwicklung wird vom Drehstromnetz mit der Statorkreisfrequenz ω_s gespeist und erzeugt ein Drehfeld konstanter Amplitude. Dieses Drehfeld läuft mit der synchronen Drehzahl n_{syn} um.

$$n_{\text{syn}} = \frac{f_s}{p}, \quad (1a)$$

$$\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot f_s \quad \text{mit: } f_s = \text{Netzfrequenz}, p = \text{Polpaarzahl}. \quad (1b)$$

Hat der Läufer die Drehzahl n , entsprechend einem *Schlupf*

$$s = \frac{n_{\text{syn}} - n}{n_{\text{syn}}}, \quad (2)$$

so wird die Relativedrehzahl zwischen Drehfeld und Läufer, die Schlupfdrehzahl:

$$s \cdot n_{\text{syn}} = n_{\text{syn}} - n. \quad (3)$$

Das umlaufende Drehfeld induziert in der Läuferwicklung eine dem Schlupf proportionale Spannung mit der Rotorfrequenz f_r bzw. Kreisfrequenz ω_r

$$f_r = f_s \cdot s \quad (4a)$$

$$\omega_r = 2 \cdot \pi \cdot f_r \quad (4b)$$

Der durch diese Spannung getriebene Läuferstrom wird in der kurzgeschlossenen Läuferwicklung von einem konstanten *ohmschen* Läuferwicklungswiderstand R_r und einem frequenzabhängigen Blindwiderstand X_r begrenzt. Die Wirkkomponente des Stroms bildet mit dem Drehfeld das Drehmoment. Obwohl der Läuferstrom mit steigendem Schlupf monoton anwächst, kann die drehmomentbildende Wirkkomponente dabei kleiner werden, weil der Blindwiderstand ebenfalls frequenzabhängig ist. Aus diesem Grund fällt das Moment der Maschine nach Erreichen des maximalen *Kippmoments* M_b bei weiter zunehmendem Schlupf wieder ab. Diese Zusammenhänge sollen in den folgenden Abschnitten anhand einer formalistischen Betrachtung aufgezeigt werden.

4. Spannungsgleichungen und Ersatzschaltbild

Für die Entwicklung der Spannungsgleichungen und des Ersatzschaltbildes der Asynchronmaschine ist es aus Symmetriegründen ausreichend, nur je einen Strang der Ständer- und Läuferwicklung zu betrachten. Spannungsgleichungen und Ersatzschaltbild sind in den Skripten „Energietechnik“ und „Elektrische Maschinen und Antriebe“ angegeben und werden hier wiederholt.

Es werden eingeführt:

\underline{U}_s	Ständer – Strangspannung (Netzspannung)
\underline{U}_r	Läufer – Strangspannung
\underline{I}_s	Ständer – Strangstrom
\underline{I}_r	Läufer – Strangstrom
R_s	<i>ohmscher</i> Widerstand eines Ständerstrangs
R_r	<i>ohmscher</i> Widerstand eines Läuferstrangs
L_s	gesamte Induktivität eines Ständerstrangs
L_r	gesamte Induktivität eines Läuferstrangs
L_h	Hauptinduktivität
$L_{s\sigma}$	Streuinduktivität eines Ständerstrangs
$L_{r\sigma}$	Streuinduktivität eines Läuferstrangs
M	Gegeninduktivität zwischen Ständer- und Läuferwicklung

\ddot{u}	Übersetzungsverhältnis
N_s	Windungszahl eines Ständerstrangs
N_r	Windungszahl eines Läuferstrangs

Die mit dem Übersetzungsverhältnis \ddot{u} auf die Ständerseite umgerechneten Größen werden besonders gekennzeichnet:

A' : eine auf die Ständerseite umgerechnete Größe A . So ist z. B. R_r der wirklich messbare ohmsche Wicklungswiderstand eines Läuferstrangs, aber R_r' der auf die Ständerseite umgerechnete Läuferwiderstand. Mit Vernachlässigung der Ummagnetisierungsverluste P_{Fe} im Eisen und der Sättigungseffekte ergeben sich die Spannungsgleichungen:

$$\text{Ständer: } \underline{U}_s = (R_s + j\omega_s L_s) \underline{I}_s + j\omega_s M \underline{I}_r \quad (5)$$

$$\text{Läufer: } \underline{U}_r = (R_r + j\omega_r L_r) \underline{I}_r + j\omega_r M \underline{I}_s$$

Durch Einführung des Übersetzungsverhältnisses \ddot{u}

$$\ddot{u} = \frac{N_s \cdot k_{w,s}}{N_r \cdot k_{w,r}} \quad (6)$$

folgt:

$$\underline{U}_s = (R_s + j\omega_s L_s) \underline{I}_s + j \cdot \omega_s \cdot \ddot{u} \cdot M \cdot \frac{\underline{I}_r}{\ddot{u}} \quad (7)$$

$$\ddot{u} \cdot \underline{U}_r = (\ddot{u}^2 R_r + j \cdot s \cdot \omega_s \cdot \ddot{u}^2 \cdot L_r) \frac{\underline{I}_r}{\ddot{u}} + j \cdot s \cdot \omega_s \cdot \ddot{u} \cdot M \cdot \underline{I}_s$$

Mit den auf die Ständerseite umgerechneten Läufergrößen

$$\underline{U}_r' = \ddot{u} \cdot \underline{U}_r, \quad \underline{I}_r' = \frac{1}{\ddot{u}} \cdot \underline{I}_r \quad (8)$$

$$R_r' = \ddot{u}^2 \cdot R_r, \quad L_r' = \ddot{u}^2 \cdot L_r$$

und der Hauptinduktivität

$$L_h = \ddot{u} \cdot M \quad (9)$$

folgt nach Division der Läufer Spannungsgleichung durch den Schlupf s

$$\underline{U}_s = (R_s + j\omega_s L_s) \underline{I}_s + j\omega_s L_h \underline{I}_r' \quad (10)$$

$$\frac{\underline{U}_r'}{s} = \left(\frac{R_r'}{s} + j\omega_s L_r' \right) \underline{I}_r' + j\omega_s L_h \underline{I}_s$$

Es werden Reaktanzen

$$X_s = \omega_s L_s, \quad X_r' = \omega_s L_r', \quad X_h = \omega_s L_h \quad (11)$$

eingeführt und die Aufspaltung von X_s und X_r' in Haupt- und Streureaktanz

$$X_s = X_{s\sigma} + X_h \quad (12)$$

$$X_r' = X_{r\sigma} + X_h$$

vorgenommenen. Wenn die Läuferwicklung kurzgeschlossen ist, ist $U_r = 0$. Daraus folgen die Spannungsgleichungen in der endgültigen Form (13) und das zugehörige Ersatzschaltbild Bild 6.

$$\begin{aligned} \underline{U}_s &= (R_s + jX_{s\sigma})\underline{I}_s + jX_h(\underline{I}_s + \underline{I}'_r) \\ 0 &= \left(\frac{R'_r}{s} + jX'_{r\sigma}\right)\underline{I}'_r + jX_h(\underline{I}_s + \underline{I}'_r) \end{aligned} \quad (13)$$

Diesen Spannungsgleichungen entspricht das Betriebs-Ersatzschaltbild pro Strang (Bild 6).

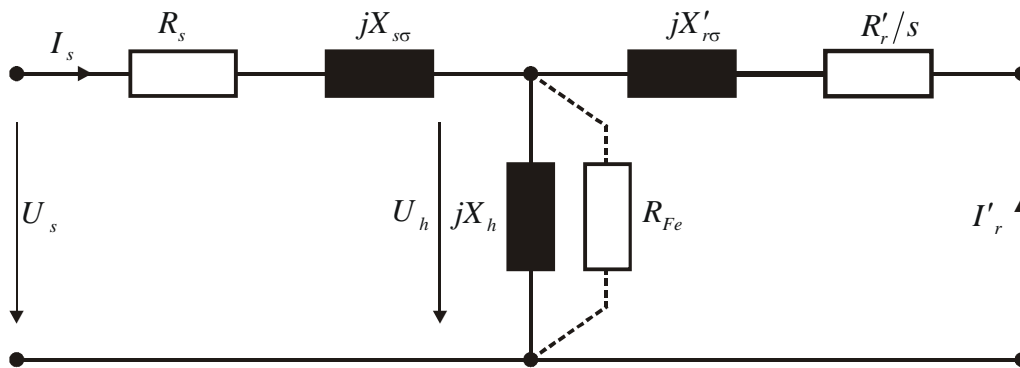


Bild 6: Betriebs-Ersatzschaltbild mit kurzgeschlossenem Läuferkreis. Die Ummagnetisierungsverluste P_{Fe} in dem Ständerblechpaket (bei kleinem Schlupf) werden durch den Ersatzwiderstand R_{Fe} berücksichtigt.

Das Luftspaltfeld induziert nicht nur im Läufer, sondern auch im Ständereisen elektrische Spannungen, die Wirbelströme im Eisen treiben. Diese Wirbelstromverluste bilden gemeinsam mit den Hystereseverlusten die Ummagnetisierungsverluste P_{Fe} . Sie werden näherungsweise durch einen zum Läuferkreis parallelen Eisenersatzwiderstand R_{Fe} berücksichtigt.

$$P_{Fe} = 3 \frac{U_h^2}{R_{Fe}} \quad (14)$$

Die im Läufer umgesetzte Leistung P_r

$$P_r = 3 \frac{R'_r}{s} I_r'^2 = 3 \frac{R_r}{s} I_r^2 \quad (15)$$

setzt sich zusammen aus den Stromwärmeverlusten in der Läuferwicklung $P_{Cu,r}$

$$P_{Cu,r} = 3 \cdot R_r \cdot I_r^2 \quad (16)$$

und den in mechanische Leistung P_m umgesetzten Anteil

$$P_m = P_r - P_{Cu,r} = 3 \cdot \left(\frac{1}{s} - 1\right) \cdot R_r \cdot I_r^2 \quad (17)$$

Daraus kann das von der Asynchronmaschine entwickelte elektromagnetische Drehmoment M_e mit der Läuferdrehzahl n bestimmt werden

5. Drehmoment – Drehzahl – Kennlinie

Die Drehmoment - Drehzahl - Kennlinie $M_e = f(n)$ kann im zulässigen Betriebsbereich direkt gemessen werden. Es ergibt sich der im Bild 7 dargestellte Verlauf. Bei realen Maschinen wird allerdings der Verlauf durch Oberwellenmomente infolge der durch die Nutung bedingten treppenförmigen Durchflutung „verformt“ (siehe Anhang A1).

Normalerweise liegt Motorbetrieb mit $0 < s \leq 1$ vor. Das Anlaufmoment M_1 sollte wenigstens gleich dem Bemessungsmoment M_N sein, damit die Maschine stets sicher anläuft. Durch Antreiben über die Synchrondrehzahl n_{syn} hinaus geht die Maschine in den Generatorbetrieb ($s < 0$) über. Bei dieser *Nutzbremmung* wird Leistung ins Netz geliefert, sobald die mechanisch aufgenommene Leistung die Maschinenverluste übersteigt. Im Dauerbetrieb kann mit Rücksicht auf die Erwärmung nur der Bereich zwischen M_{NM} (Bemessungspunkt im Motorbetrieb) und M_{NG} (Bemessungspunkt im Generatorbetrieb) genutzt werden. In diesem Bereich zeigt die Maschine ein ausgeprägtes „Nebenschlussverhalten“. Das heißt, die Drehzahl ist nur wenig vom Moment abhängig. Auch bei kurzzeitiger Überlastung darf der Schlupf s den Kippschlupf s_{bM} bzw. s_{bG} nicht überschreiten, weil

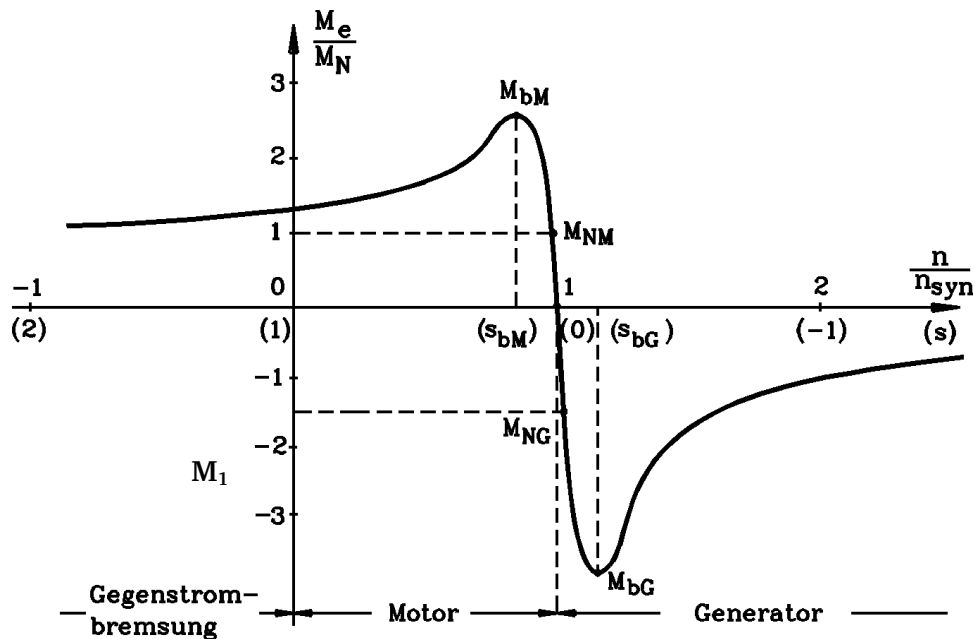


Bild 7: Drehmoment - Drehzahl-Kennlinie

nur dann bei konstantem äußeren Moment (z. B. Werkzeugmaschine, Aufzug...) die Maschine stabil arbeitet. Bei Überschreitung des Maximalmoments (Kippmoment M_{bM}) wird die Maschine auf Drehzahl $n = 0$ abgebremst. Man sagt, sie „kippt“.

Wenn die Maschine gegen das Drehfeld angetrieben wird ($s > 1$), spricht man von „Gegenstrombremsung“. Dabei wird keine Leistung ins Netz geliefert, sondern noch zusätzlich Leistung aus dem Netz aufgenommen, die zusammen mit der mechanisch aufgenommenen Leistung in der Maschine in Wärme umgesetzt wird. Folglich ist dieser Betrieb nur kurzzeitig zulässig. Ein weiterer Nachteil ist, dass im gesamten Gegenstrombereich das Moment mit zunehmend größer werdender (negativer) Drehzahl abnimmt, wodurch bei konstantem äußeren Moment kein stabiler Betrieb möglich ist (Maschine kippt!).

6. Zusätzliche Läuferwiderstände

Im Gegensatz zum Kurzschlussläufer ist beim Schleifringläufer die Läuferwicklung über die Schleifringe zugänglich. Mit

$$n = (1 - s) \cdot n_{\text{syn}} \tag{19}$$

folgt aus (17), (18) die Gleichung (20)

$$M_e = \frac{P_m}{2 \cdot \pi \cdot n} = \frac{P_m}{2 \cdot \pi \cdot (1 - s) \cdot n_{\text{syn}}} = \frac{P_{\text{Cu,r}}}{s} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot n_{\text{syn}}} \tag{20}$$

Fazit: Die Stromwärmeverluste im Läufer $P_{Cu,r}$ sind direkt proportional zum Drehmoment M_e . Durch Einschalten von zusätzlichen ohmschen Widerständen R_v lassen sich daher Strom und Drehmoment beim Anlauf und Hochlauf variieren.

Wenn man die Spannungsgleichungen (13) nach \underline{I}_s auflöst:

$$\underline{I}_s = \frac{\underline{U}_s}{R_s + jX_s + \frac{X_h^2}{\frac{R_r}{s} + jX_r'}} \stackrel{(8)}{=} \frac{\underline{U}_s}{R_s + jX_s + \frac{X_h^2}{\dot{u}^2 \left(\frac{R_r}{s} + jX_r \right)}} \quad (21)$$

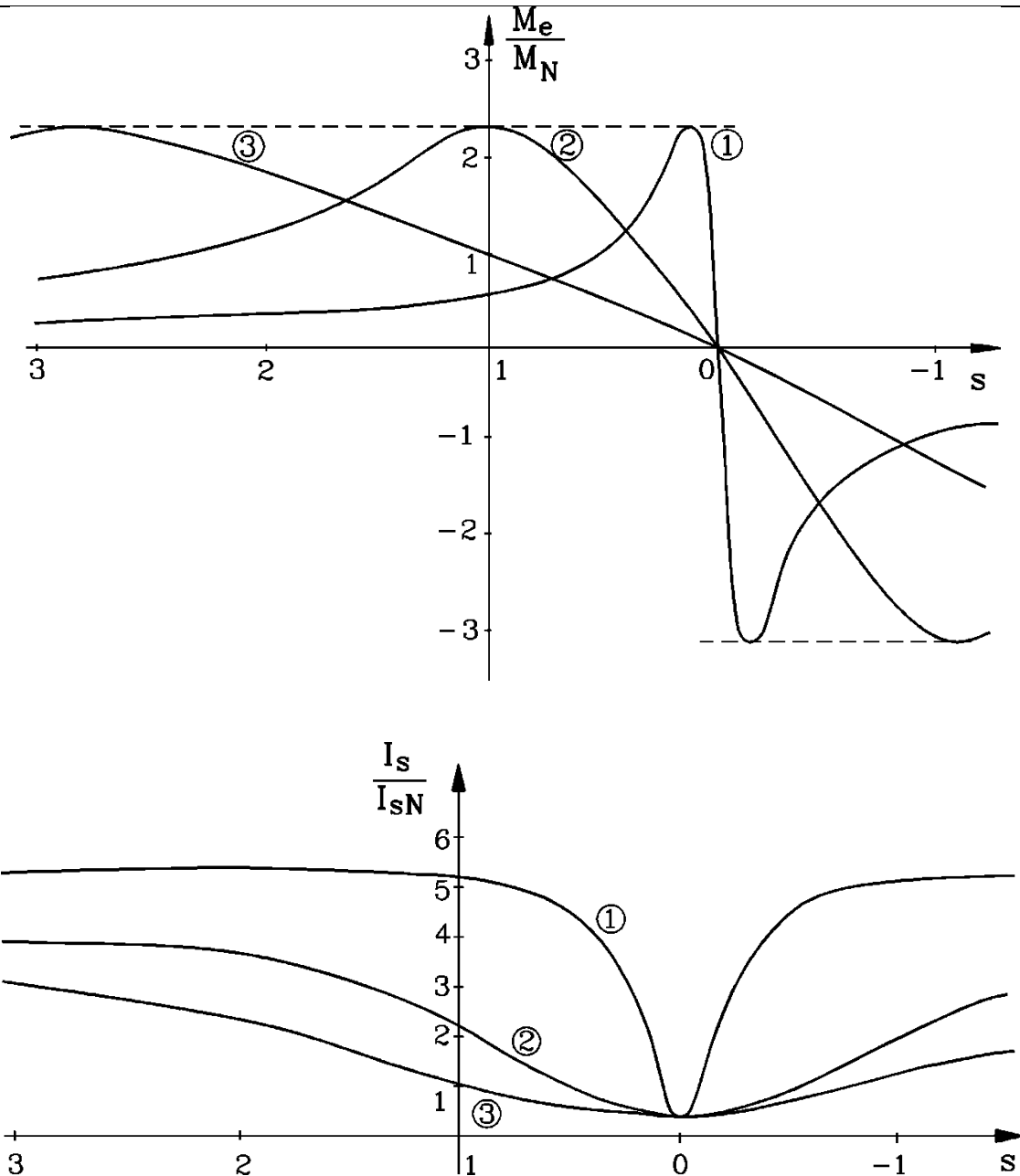


Bild 8: Verschiebung der Drehmoment- und Ständerstrom-Kennlinien durch Zusatzwiderstände im Läuferkreis

$$(R_3 > R_2 > R_1)$$

sieht man, dass zwar eine Änderung von R_r stets eine proportionale Änderung von s zur Folge hat, im übrigen aber die Beziehungen für Ständer- und Läuferstrom sowie für das Drehmoment erhalten bleiben. Es gilt also z. B. für gleiches Drehmoment:

$$\frac{R_r}{s} = \frac{R_r + R_v}{s_v} \rightarrow s_v = s \cdot \frac{R_r + R_v}{R_r} \quad (22)$$

s : Schlupf ohne Zusatzwiderstand

s_v : Schlupf mit Zusatzwiderstand

Graphisch entspricht dies einer "Scherung" (lineare Streckung) der $M(n)$ - bzw. der $M(s)$ -Kurve (Bild 8). Insbesondere bleibt das Kippmoment M_b der Maschine unverändert erhalten, wenn sich auch der Kippschlupf s_b durch den zusätzlichen Widerstand R_v zu größeren Werten hin verschiebt. Es ändert sich die Drehmoment – Drehzahl-Kennlinie entsprechend Bild 8. Man nutzt dies beispielsweise aus, um bei Schweranlauf das Kippmoment als Anlaufmoment zur Verfügung zu haben ($M_1 = M_b$, Bild 8, Kurven 2). Auch ein besonders weicher Anlauf mit $M_1 = M_N$ und $I_1 = I_{sN}$ ist möglich, wenn der natürliche Anlaufstrom (vier- bis siebenfacher Bemessungsstrom!) zu Netzstörungen führen würde (Kurven 3). Durch Verändern der Zusatzwiderstände lässt sich auch eine Drehzahleinstellung durchführen. Dabei ist jedoch nachteilig, dass die Stromwärmeverluste im Läufer $P_{Cu,r}$ proportional zum Schlupf s anwachsen:

$$P_{Cu,r} = 3I_r^2(R_r + R_v) = P_\delta \cdot s. \quad (23)$$

Auch geht bei Vergrößerung des Läuferwiderstands R_r auf $(R_r + R_v)$ zunehmend das „Nebenschlussverhalten“ der Maschine verloren, was oft unerwünscht ist. Besonders zu beachten ist, dass durch Zusatzwiderstände sich weder der Leerlaufstrom noch der Kippstrom in ihrer Höhe beeinflussen lassen. Nur der Schlupfwert, bei dem der Kippstrom auftritt, wird durch die Läuferwiderstände verschoben.

7. Leistungsfluss

Im Motorbetrieb ist der Leistungsfluss in einer "realen" Maschine wie folgt: Die Luftspaltleistung P_δ

$$P_\delta = 2 \cdot \pi \cdot n_{syn} \cdot M_e \quad (24)$$

ist die zugeführte elektrische Leistung $P_{e,in}$, vermindert um die Stromwärmeverluste in der Ständerwicklung $P_{Cu,s}$ und die Ummagnetisierungsverluste ("Eisenverluste", bestehend aus Wirbelstrom- und Hystereseverluste) im Ständerblechpaket P_{Fe} , die durch die mit Netzfrequenz f_s auftretenden Pulsationen des Magnetfelds im Blechkörper entstehen.

$$P_\delta = P_{e,in} - P_{Cu,s} - P_{Fe,s} \quad (25)$$

Das elektromagnetische Drehmoment M_e ist unmittelbar mit den Stromwärmeverlusten in der Läuferwicklung $P_{Cu,r}$ verknüpft, wie (20) zeigt. Mit der Luftspaltleistung P_δ (25) ergeben sich aus (20) die Beziehungen für die Stromwärmeverluste im Läufer $P_{Cu,r}$

$$P_{Cu,r} = s \cdot P_\delta \quad (26)$$

und für die mechanische Leistung P_m

$$P_m = (1-s)P_\delta. \quad (27)$$

Wegen der niedrigen Läuferfrequenz f_r im Bemessungsbetrieb sind die Ummagnetisierungsverluste im Läuferblechpaket P_{Fe} vernachlässigbar klein. Die mechanische Leistung P_m muss die unvermeidlichen Reibungsverluste P_R und Zusatzverluste P_Z , die durch Oberwellen als Wirbelströme im Läufer

auftreten, und die beide den Läufer bremsen, abdecken, so dass als Abgabeleistung an der Welle nur $P_{m,out}$ zur Verfügung steht (Bild 9).

$$P_{m,out} = P_m - P_R - P_Z \quad (28)$$

Damit ist das Wellenmoment (Kupplungsmoment) M_s um das Läuferverlustmoment M_d geringer als das elektromagnetische Moment M_e im Luftspalt.

$$M_s = \frac{P_{m,out}}{\Omega_m} < M_e = \frac{P_m}{\Omega_m} \Leftrightarrow M_d = M_e - M_s \quad (29)$$

Ω_m : mechanische Kreisfrequenz ($\Omega_m = 2 \cdot \pi \cdot n$)

Der Wirkungsgrad η gibt das Verhältnis von abgegebener zu aufgenommener Leistung an:

$$\eta_{Motor} = \frac{P_{m,out}}{P_{e,in}}, \quad \eta_{Generator} = \frac{P_{e,out}}{P_{m,in}} \quad (30)$$

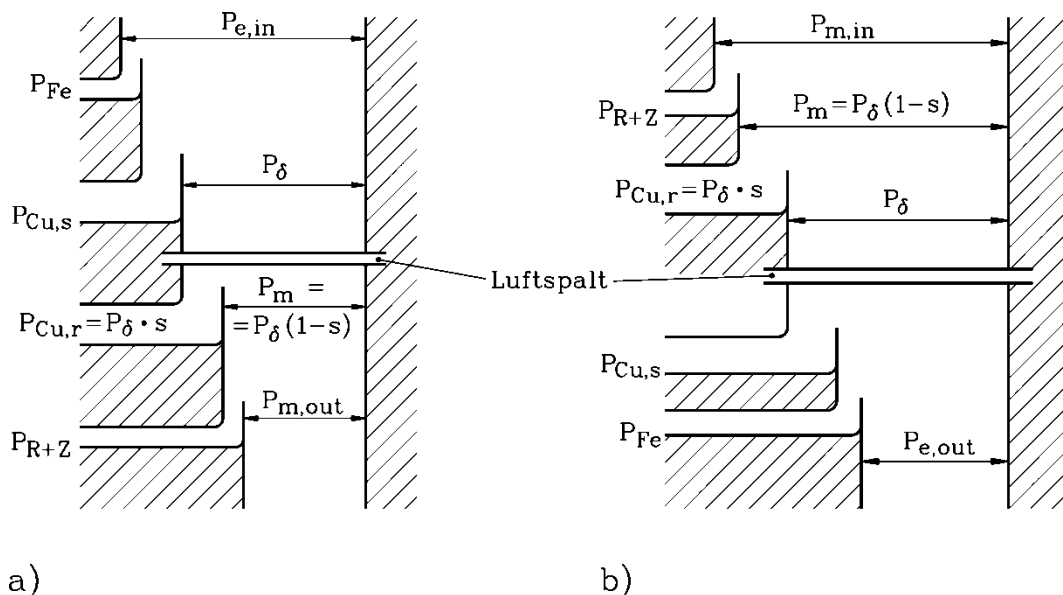


Bild 9: Leistungsfluss in der Asynchronmaschine bei kleinem Schlupf: a) Motorbetrieb, b) Generatorbetrieb. Bei großem Schlupf treten auch im Läufer Ummagnetisierungsverluste durch die Feldgrundwelle auf.

8. Kreisdiagramm und Oberwelleneinflüsse

8.1. Definition und Nutzen des Kreisdiagramms

Als Kreisdiagramm der Asynchronmaschine wird die Ortskurve des Ständerstroms \underline{I}_s mit dem Schlupf s als Parameter bezeichnet: $\underline{I}_s = f(s)$. Dabei wird angenommen, dass nur die Grundwelle des von Strom erregten Luftspaltfelds ein Drehmoment mit den Läuferströmen bildet. Das Kreisdiagramm ermöglicht einen raschen Überblick über den Verlauf von Wirk- und Blindkomponente des Ständerstroms, wenn sich bei Belastung der Maschine der Schlupf s als der den Betriebszustand kennzeichnende Parameter ändert. Darüber hinaus kann man aus dem vollständigen Kreisdiagramm auch die elektrische und mechanische Gesamtleistung der Maschine – sogar einzelne Anteile davon – sowie das Drehmoment direkt für jeden Betriebszustand ablesen. Somit ist das Kreisdiagramm ein sehr geeignetes Mittel zum Verständnis und zur Berechnung des Betriebsverhaltens der Asynchronmaschine.

8.2. Herleitung des Kreisdiagramms in allgemeiner Lage (*OSSANNA*-Kreis): siehe Anhang

Die Herleitung des Kreisdiagramms für $R_s > 0$ wird in der Vorlesung „Elektrische Maschinen und Antriebe“ nicht gezeigt und ist deshalb im Anhang A2 ergänzend für Interessierte angegeben.

8.3. Herleitung von Drehmoment- und Leistungsgerade im *OSSANNA*-Kreis

Die Herleitung der Drehmoment- und Leistungsgeraden für $R_s > 0$ wird in der Vorlesung „Elektrische Maschinen und Antriebe“ nicht gezeigt und ist deshalb im Anhang A3 ergänzend für Interessierte angegeben.

8.4. *HEYLAND*-Kreisdiagramm (Kreisdiagramm bei $R_s = 0$)

Die Abhängigkeit wichtiger Kenngrößen von den Maschinendaten kann sehr übersichtlich am *HEYLAND*-Kreisdiagramm als vereinfachtem Kreisdiagramm gezeigt werden, bei dem der

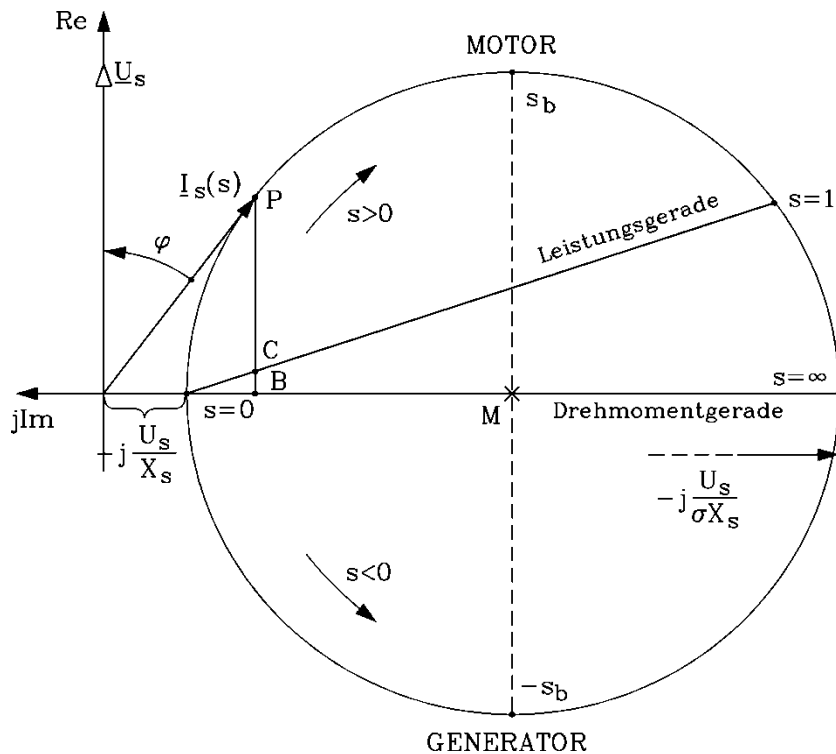


Bild 10: Das *HEYLAND*-Kreisdiagramm

Ständerwiderstand Null gesetzt wird. Der Kreismittelpunkt liegt dann auf der Im-Achse, ebenso die beiden Punkte P_∞ und P_ϕ , die nun identisch sind. Es werden somit die primären Wicklungsverluste vernachlässigt. Wie beim *OSSANNA*-Kreis werden auch die Ummagnetisierungsverluste und die Reibungs- und Zusatzverluste vernachlässigt. Im Skript „Elektrische Maschinen und Antriebe“ ist das *HEYLAND*-Kreisdiagramm Bild 10 aus der Inversion einer Geraden aus dem T-Ersatzschaltbild für $R_s = 0$ hergeleitet worden. Durch Vergleich von Bild A6 und 10 folgt für den Kreisdurchmesser, gemessen im Strommaßstab:

$$I_\phi = \frac{U_s}{\sigma X_s} - \frac{U_s}{X_s} = \frac{U_s}{X_\phi} \Rightarrow X_\phi = \frac{\sigma}{1-\sigma} X_s \approx \sigma X_s \cong X_{s\sigma} + X'_{r\sigma} \quad (31)$$

Da das Kippmoment zum halben Kreisdurchmesser proportional ist, folgt daraus:

$$M_b \sim \frac{2}{X_\phi} = \frac{2(1-\sigma)}{\sigma X_s} \quad (32)$$

Das entspricht direkt dem im Skript „Elektrische Maschinen und Antriebe“ hergeleiteten Kippmoment aus der KLOSS'schen Beziehung.

$$R_s = 0 : M_b = \pm \frac{m_s}{2} \frac{p}{\omega_s} U_s^2 \frac{1-\sigma}{\sigma X_s} \quad (32a)$$

8.5. Praktische Ausführung des Kreisdiagramms

Bei der Konstruktion des Kreisdiagramms für eine reale Asynchronmaschine wird das OSSANNA-Kreisdiagramm verwendet. Weiter können die Ummagnetisierungsverluste näherungsweise durch eine Verschiebung der imaginären Achse nach Bild 11 berücksichtigt werden. Der in einem Betriebspunkt P tatsächlich messbare Strom $I_{s,Fe}$ ist dann der Zeiger $\overline{O'P}$. Ebenso entspricht der Strecke \overline{PQ} jetzt die Klemmenleistung. Alle übrigen Größen werden wie in Abschnitt 8.3, also Anhang A3, entnommen. Die Korrektur durch die Berücksichtigung der Ummagnetisierungsverluste ist aber im Allgemeinen so geringfügig, dass sie hier vernachlässigt werden sollen. Man beginnt also die Konstruktion des Kreisdiagramms mit der Ermittlung des Leerlaufpunkts P_0 nach Kap. 8.2, also Anhang A2. Da das Kreisdiagramm stets für den betriebswarmen Zustand gezeichnet wird, setzt man für R_s den der Betriebstemperatur entsprechenden Wert ein. Hierzu linearisiert man die Funktion $R = f(\mathcal{G})$ nach EN 60530, Teil 1 (Bild 12).

Man erhält dann für den betriebswarmen Wert R_{warm} bei Betriebstemperatur $\mathcal{G}_{\text{warm}}$ (in °C):

$$R_{\text{warm}} = R_{\text{kalt}} \cdot \frac{\mathcal{G}_{\text{warm}} + 235^\circ\text{C}}{\mathcal{G}_{\text{kalt}} + 235^\circ\text{C}}, \quad (33)$$

wobei R_{kalt} der bei $\mathcal{G}_{\text{kalt}}$ (in °C) gemessene Kaltwiderstand ist. Wird anstelle von Kupfer als Leitermaterial Aluminium verwendet, so ist die Zahl 235 in Gleichung (33) durch den Wert 225 zu ersetzen.

Als zweiten Punkt der Peripherie des gesuchten Kreises wählt man bei der praktischen Ausführung besser P_1 statt P_ϕ , weil P_1 aus dem gut durchführbaren „Kurzschlussversuch“ leichter gewonnen werden kann: Im Kurzschlussversuch werden der Anlauf- oder Kurzschlussstrom $I_s = f(U_s)$ und die Kurzschlusswirkleistung $P_1 = f(U_s)$ bei festgebremstem Läufer ($s = 1$) gemessen. Üblicherweise strebt man an, dass das Kreisdiagramm trotz der vorhandenen Nichtlinearitäten (Sättigung usw.) im Bemessungspunkt möglichst genau wird. Da der Anlaufstrom $I_1 = I_s(s=1)$ wesentlich von den stark sättigungsabhängigen Streureaktanzen bestimmt wird, legt man dem Kreisdiagramm jene „Kurzschlussreaktanz“ X_1 zugrunde, die sich für den Fall $I_s = I_{sN}$ ergibt, und rechnet daraus den Kurzschlussstrom für Bemessungsspannung und betriebswarme Wicklungswiderstände aus.

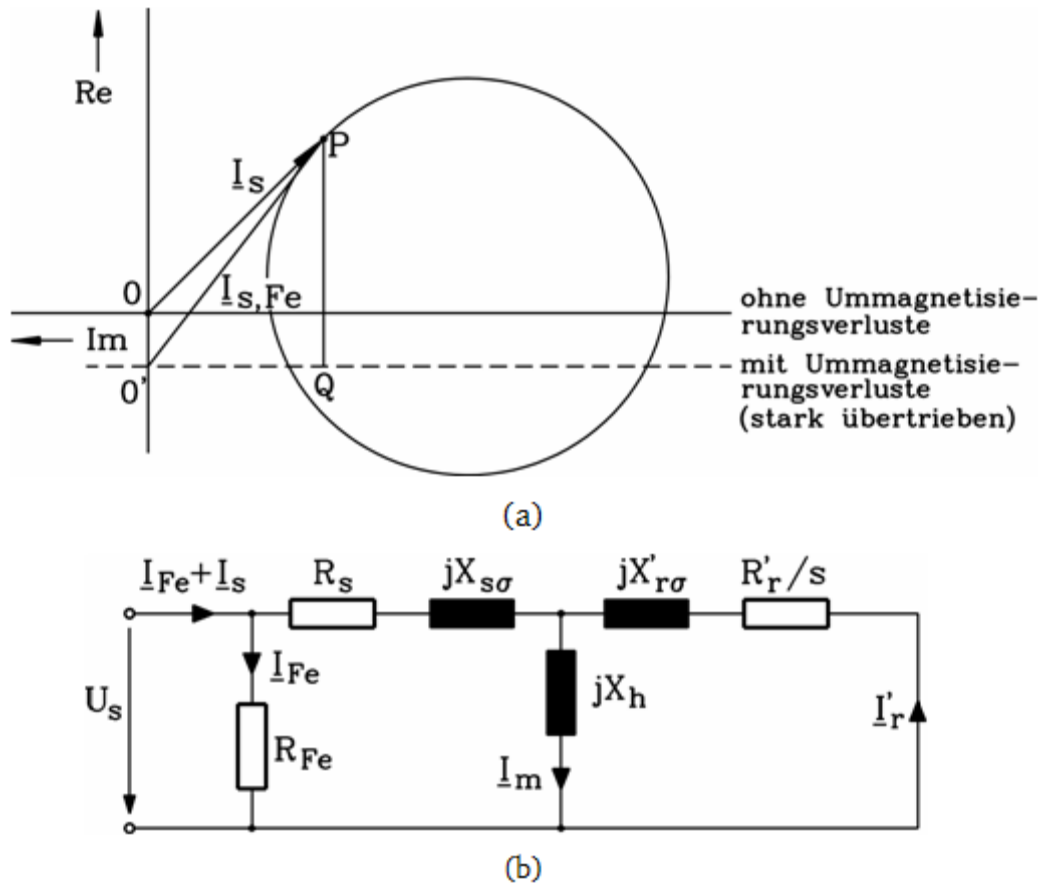


Bild 11: Berücksichtigung der Ummagnetisierungsverluste: a) Kreisdiagramm, b) Zugehöriges Ersatzschaltbild

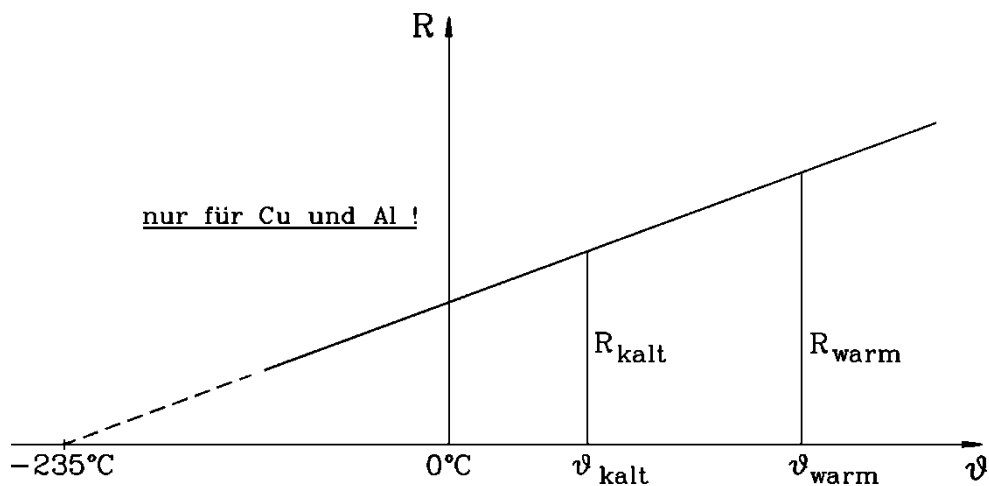


Bild 12: Temperaturabhängigkeit des ohmschen Wicklungswiderstands von Kupfer

Man geht folgendermaßen vor:

(a) Ausmessen der Kurzschlusskennlinien:

$I_s = f(U_s)$ und $P_s = f(U_s)$ bei $s=1$ durch Verändern der Ständerklemmenspannung bei festgehaltenem Rotor,

(b) Entnahme der Wertpaare:

$$I_s = I_{sN}; \quad U_s = U_1$$
$$P_s = P_1; \quad U_s = U_1$$

(c) Ausrechnen der Werte:

$$Z_{1,kalt} = \frac{U_1}{I_{sN}}; \quad \cos \varphi_{1,kalt} = \frac{P_1}{3 U_1 \cdot I_{sN}}$$
$$X_1 = Z_{1,kalt} \cdot \sin \varphi_{1,kalt}; \quad R_{1,kalt} = Z_{1,kalt} \cdot \cos \varphi_{1,kalt}$$
$$Z_{1,warm} = \sqrt{X_1^2 + R_{1,warm}^2}; \quad I_1 = \frac{U_{sN}}{Z_{1,warm}}$$

(d) Einzeichnen des Kurzschlusspunktes P_1 :

Den Kurzschlusspunkte P_1 erhält man als Endpunkt des Zeigers $\underline{I}_1 = I_1 \cdot e^{-j\varphi_{1,warm}}$. Der Mittelpunkt M wird bestimmt als Schnittpunkt der Mittelsenkrechten zu $\overline{P_0 P_1}$ und der durch P_0 laufenden Durchmessergeraden, die um $2\alpha_0$ gegen die imaginäre Achse geneigt ist. Ebenso liefert die Durchmessergerade den Punkt P_ϕ auf dem bereits durch M festgelegten OSSANNA-Kreis. Den zur Auswertung notwendigen Punkt P_∞ bestimmt man entsprechend Bild A6 bzw. Bild 13. Man entnimmt dem Kreisdiagramm den Strom $I_\phi = \lambda_v \cdot \overline{P_0 P_\phi}$ und berechnet mit diesem die Reaktanz $X_\phi = U_s / I_\phi$. Bei Wahl eines geeigneten Impedanzmaßstabes λ_z entspricht X_ϕ der Strecke $\overline{P_0 P_\phi}$. Dies zeigt, dass der Kreisdurchmesser und damit das Kippmoment der Asynchronmaschine von X_ϕ und damit der Streuung bestimmt wird (Gl. 32). In P_ϕ ist dann der auf Betriebstemperatur bezogene ohmsche Ständerwicklungswiderstand R_s senkrecht zu $\overline{P_0 P_\phi}$ einzuzeichnen (Bild A6). Damit sind P'_∞ und auch P_∞ bestimmt.

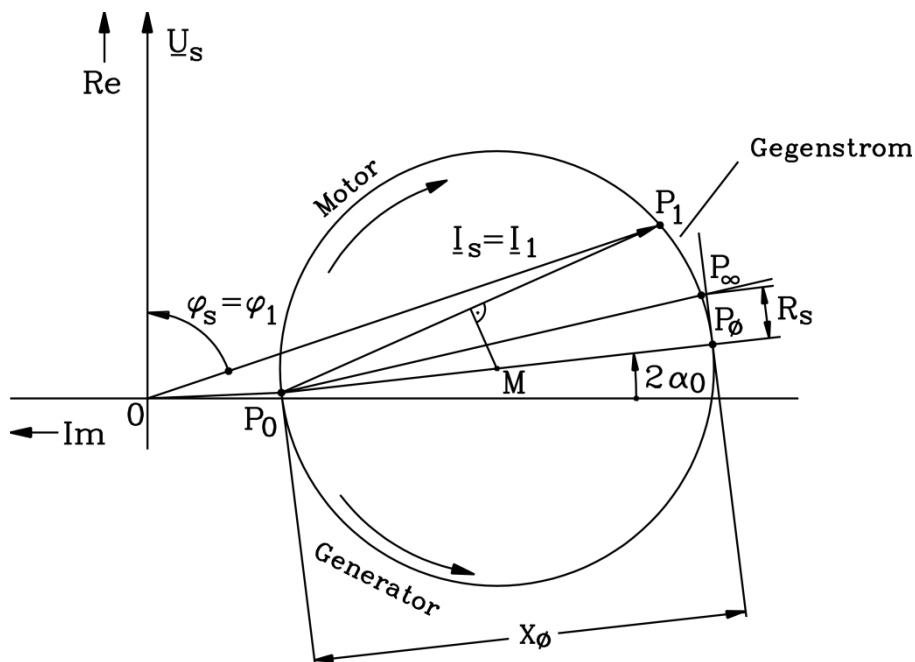


Bild 13: Zur experimentellen Bestimmung des Kreisdiagramms

Anhang A1: Einfluss der Feldoberwellen auf die Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie

Wird die Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie aus dem Kreisdiagramm abgeleitet, so enthält sie keine Oberwellenmomenteffekte, da das Kreisdiagramm nur die Momentenbildung durch die Luftspaltfeld-Grundwelle berücksichtigt. Bei der Versuchsdurchführung wird aber das Drehmoment direkt über eine Gleichstrom-Pendelmaschine als Belastung der Asynchronmaschine gemessen. Dabei werden auch die real auftretenden Oberwellenmomente erfasst und müssen daher hier kurz erläutert werden, um die Messergebnisse verstehen zu können. Eine ausführliche Diskussion der Oberwelleneffekte bei Sinusstromspeisung findet man im Skript „Motor development for drive systems“. Man unterscheidet synchrone und asynchrone Oberwellenmomente. Die „synchrone“ Oberwellenmomente treten jeweils nur bei einer bestimmten Drehzahl mit konstanter Größe auf, und werden von je einer Ständer- und Läuferfeldoberwelle gleicher Polpaarzahl gebildet, wobei beide Oberwellen gleich schnell („synchron“) rotieren müssen. Bei der Schleifringläufer-Asynchronmaschine, die im Stator und im Rotor je eine dreisträngige Drehfeldwicklung hat, sind gemäß Skript „Elektrische Maschinen und Antriebe“ (siehe auch (35), (39)) die Ordnungszahlen ν , μ von Ständer- und Läuferfeldwellen identisch. Daher tritt ein synchrones OW-Moment nur im Stillstand (bei $s = 1$) auf. Dieses zusätzliche konstante Drehmoment wird magnetisches Rastmoment („Klebmoment“) genannt und kommt dadurch zustande, das Ständer- und

Läufernutenzahlen gemeinsame Teiler (nämlich die Polpaarzahl und die Strangzahl, bei der Labormaschine also 4 und 3) haben. Um dieses Rastmoment zu verringern, werden die Läufernuten geschrägt.

Die „asynchronen“ Oberwellenmomente treten als konstante, aber unterschiedlich große Werte über den gesamten Drehzahlbereich auf und verzerren dadurch die Drehmoment-Drehzahlkennlinie. Wie nachfolgend erläutert wird, stören sie vor allem im Drehzahlbereich unterhalb der halben Synchrondrehzahl und im Bereich negativer Drehzahlen (Gegenstrombremsbereich). Gemäß dem Skript „Elektrische Maschinen und Antriebe“ ist das Luftspaltfeld durch die in Nuten angeordnete Dreiphasen-Ständerwicklung nicht sinusförmig verteilt, sondern (bei unendlich schmalen Nutschlitz) bei konstantem Luftspalt treppenförmig. Es kann als FOURIER-Reihe dargestellt werden, wobei nur Wellen mit ungerader, nicht durch drei teilbarer Ordnungszahl ν auftreten.

$$B_{\delta s}(x_s, t) = \sum_{\nu=1}^{\infty} \hat{B}_{\delta s \nu} \cdot \cos(\nu \pi x_s / \tau_p - \omega_s t) \quad \nu = 1 + 2m_s g \quad g = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (34)$$

$$m_s = 3: \nu = 1 + 6g = 1, -5, 7, -11, 13, -17, 19, -23, 25, -29, 31, -35, 37, \dots \quad (35)$$

Die Grundwelle mit der Ordnungszahl $\nu = 1$ hat p Polpaare und rotiert mit $v_{\text{syn}} = 2f_s \tau_p$, $\omega_s = 2\pi f_s$. Sie induziert den Läufer beim Schlupf $s = 0$ nicht. Eine Feldoberwelle mit der Ordnungszahl $\nu \neq 1$ hat $|\nu|p$ Polpaare und rotiert mit $v_{\text{syn}, \nu} = 2f_s \tau_p / \nu$. Sie hat daher gegenüber dem Läufer, der mit der Drehzahl $n = (1-s)n_{\text{syn}}$ und daher mit der Oberflächengeschwindigkeit $v_m = (1-s) \cdot v_{\text{syn}}$ rotiert, den Oberwellenschlupf

$$s_\nu = \frac{v_{\text{syn}, \nu} - v_m}{v_{\text{syn}, \nu}} = \frac{1/\nu - (1-s)}{1/\nu} = 1 - \nu \cdot (1-s) \quad (36)$$

und induziert den Läufer dann nicht, wenn $s_\nu = 0$ ist. Dies ist gemäß (36) beim Schlupfwert

$$s = s_{0\nu} = 1 - \frac{1}{\nu} \quad (37)$$

der Fall. Demnach induziert die 5. Oberwelle, die wegen $\nu = -5$ in entgegengesetzte Richtung zur Grundwelle mit einem Fünftel der Synchrongeschwindigkeit läuft, bei $s = s_{0\nu=-5} = 1 - \frac{1}{-5} = 1,2$ den Läufer nicht. Für die 7. Oberwelle, die wegen $\nu = 7$ in dieselbe Richtung wie die Grundwelle mit

einem Siebentel der Synchrongeschwindigkeit läuft, gilt: $s = s_{0\nu=7} = 1 - \frac{1}{7} = 0,857$ usw. Da die Läuferwicklung ebenfalls eine dreiphasige Wicklung ist, erregt sie über den Läuferstrom je Strang ein Läuferluftspaltfeld mit den Läuferoberwellen mit der Ordnungszahl μ :

$$B_{\delta r}(x_r, t) = \sum_{\nu=1}^{\infty} \hat{B}_{\delta r \nu} \cdot \cos(\mu \pi x_r / \tau_p - \omega_r t) \quad \mu = 1 + 2m_r g \quad g = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad \omega_r = s \cdot \omega_s, \quad (38)$$

$$m_r = 3: \mu = 1 + 6g = 1, -5, 7, -11, 13, -17, 19, -23, 25, -29, 31, -35, 37, \dots \quad (39)$$

Da die Ordnungszahlen von Ständer- und Läuferfeld zahlenmäßig übereinstimmen, induzieren sämtliche Oberwellen der Ständerwicklung die Läuferwicklung und bewirken dort höherfrequente Läuferströme, die mit den entsprechenden sie induzierenden Ständeroberwellen asynchrone Luftspaltmomente bilden, also KLOSS'sche Funktionen, deren Leerlaufdrehzahl aber nicht bei $s = 0$, sondern bei den Schlüpfen (37) liegen. Man kann diese asynchronen Oberwellenmomente als kleine „zusätzliche Asynchronmaschinen“ in der Grundwellenmaschine auffassen, deren Momente sich gemäß Bild 14 dem Grundwellenmoment überlagern. Dadurch wird die resultierende Momentenkurve über der Drehzahl verzerrt.

Die Leerlaufdrehzahlen der höheren Oberwellenordnungen $|\nu| > 7$ liegen wegen (37) innerhalb des Schlupfbereichs $0,857 \dots 1,2$. Die Oberwellen-Momente bremsen im Gegenstrombereich zusätzlich, so dass sich für $s > 1$ das Moment gegenüber dem dort bremsend wirksamen Grundwellenmoment erhöht. Im Anlaufbereich $s < 1$ wirken die Oberwellenmomente als kleine „Asynchrongeneratoren“ und daher leider ebenfalls bremsend, so dass sie das Anlaufmoment schädlicherweise verringern. Die von ihnen verursachten Oberströme im Rotor bewirken zusätzliche Stromwärmeverluste. Wie im Skript „Elektrische Maschinen und Antriebe“ erläutert, nehmen die Amplituden $\hat{B}_{\delta s \nu}$ der Feldoberwellen i. A. mit steigender Ordnungszahl ab, nur die sogenannten Nutharmonischen $\nu_Q = 1 + (Q_s / p) \cdot g \quad g = \pm 1, \pm 2, \dots$ haben etwas erhöhte Amplituden. Da deren Wellenlänge etwa einer Ständernutteilung (und deren Bruchteilen) entspricht, versucht man deren induzierende

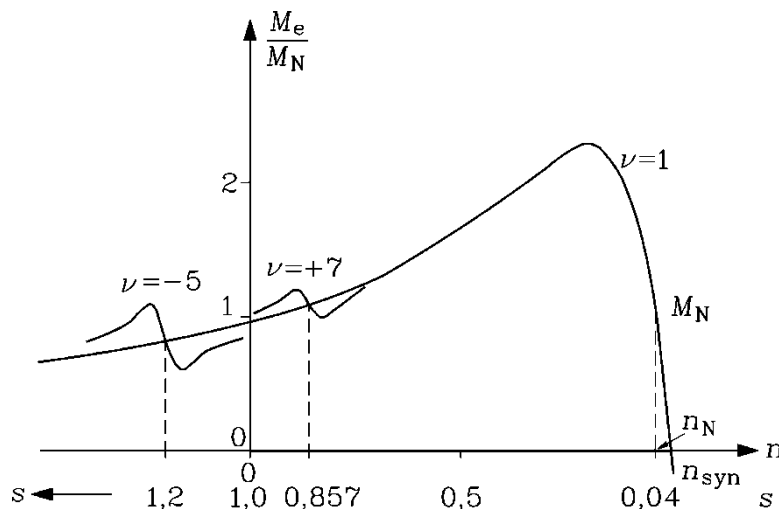


Bild 14: Grundwellen- und asynchrone Oberwellenmomente der Ordnungen -5 und 7

Wirkung durch Schrägung der Läuferfalten um eine Ständernutteilung stark zu verringern (also dieselbe Maßnahme wie zur Verminderung des Rastmoments). Dann verbleiben als dominante Oberwellen die Ordnungen -5 und 7, die bei gesehten Zweischichtwicklungen bei einer Spulensehnung von ca. 0.8 ebenfalls in ihrer Amplitude wirkungsvoll verringert werden können. Kleine Asynchronmaschinen wie die Labormaschine sind aus Kostengründen meist mit den billigeren Einschichtwicklungen ausgeführt, so dass die Wirkung der 5. und 7. Oberwelle im Drehmomentverlauf deutlich merkbar ist. In Bild 15 ist für eine Grundwellenmaschine mit einem Kippschlupf 0.2 die

Wirkung der 5. Oberwelle mit einem Oberwellenkippschlupf 0.2 (also $s = 1,2 + 0,2 = 1,4$ und $s = 1,2 - 0,2 = 1,0$) skizziert

a) für kurzgeschlossenen Läufer ($R_v = 0$),

b) für einen Vorwiderstand in der Läuferwicklung je Strang ($R_v/R_r = 8$).

Fall a):

Man erkennt die Überhöhung des Drehmoments im Gegenstrombereich und die Abnahme im Anlaufbereich. Daher tritt auch im Leerlaufpunkt $s = 0$ ein (sehr kleines) negatives Moment (nämlich das 5. Oberwellenmoment) auf.

Fall b):

Sowohl Grundwellenmoment als auch Oberwellenmoment erfahren eine Streckung ihrer Momentenverläufe. Im Bild 15 ist diese Streckung für das OW-Moment der Einfachheit halber vernachlässigt, dafür ist der OW-Kippschlupf 0,2 größer gewählt als in der Realität. Beim Grundwellenmoment wurde der Streckungsfaktor 9 ($1 + R_v/R_r = 9$) berücksichtigt. Dadurch ist der neue Grundwellenkippschlupf $9 \cdot 0,2 = 1,8$. Man erkennt die verstärkte Überhöhung des Drehmoments im Gegenstrombereich, da sich hier beide Kippmomente addieren. Die Abnahme im Anlaufbereich ergibt in der Realität im Leerlaufpunkt $s = 0$ ein deutlich messbares negatives Moment durch den „gedehnten“ Verlauf des 5. Oberwellenmoments.

Neben den bremsenden Oberwellenmomenten durch Rotoroberströme kommt die bremsende Wirkung durch die zusätzlichen Läufer-Ummagnetisierungsverluste hinzu, die ebenfalls von den Feldoberwellen verursacht werden. Diese Wirkung kann man sich wie eine weitere zur Läuferwicklung parallel geschaltete Wicklung vorstellen, deren Widerstand der „Eisenwiderstand“ $R_{Fe,r}$ des Läufers ist. Die Streuinduktivität dieser „Parallelwicklung“ ist Null. Wieder ergibt sich ein Bremsmomentverlauf z. B. durch die 5. Oberwelle wie in Bild 15, der sich zum Verlauf des OW-Moments infolge der Läuferwicklung addiert. Da $R_{Fe,r}$ viel größer als R_r ist, ist der Kippschlupf der Eisen-OW-Momente deutlich größer als jener der Wicklungs-OW-Momente, so dass eine über einen breiten Drehzahlverlauf auftretende Momentenerhöhung im Gegenstrombereich und eine

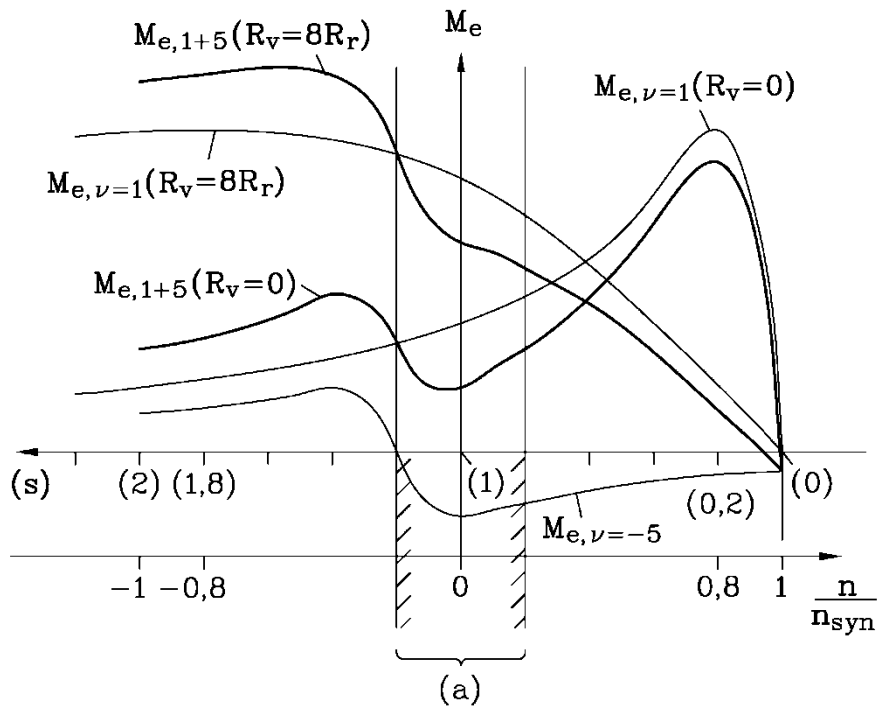


Bild 15: Grundwellen- und 5-tes asynchrones Oberwellenmoment in einer Schleifringläufermaschine ohne und mit Läuferwiderstand $R_v/R_r = 8$. Im Bereich (a) kann beim Laborversuch wegen Schwingungen im Antriebsstrang nicht gemessen werden.

entsprechende Abnahme im Anlaufbereich auftritt. Daher fällt bei der Messung z. B. die Momentenüberhöhung im Gegenstrombereich deutlich höher aus als in Bild 15 skizziert.

Anhang A2: Herleitung des Kreisdiagramms in allgemeiner Lage (OSSANNA-Kreis)

Das Kreisdiagramm wird mit den Methoden der Ortskurventheorie entwickelt, wenn man die Spannungsgleichungen (Abschnitt 3, Gl. (13)), nach \underline{I}_s auflöst:

$$\underline{I}_s = \frac{\underline{U}_s}{R_s + jX_s + \frac{X_h^2}{\dot{u}^2(\frac{R_r}{s} + jX_r)}} = \frac{\underline{U}_s}{Z_s(s)} \quad (A1)$$

Es ergibt sich ein Kreis in allgemeiner Lage (OSSANNA-Kreis) nach Bild A1, der stets rechts vom Spannungszeiger liegt, da der Strom der Spannung nacheilt.

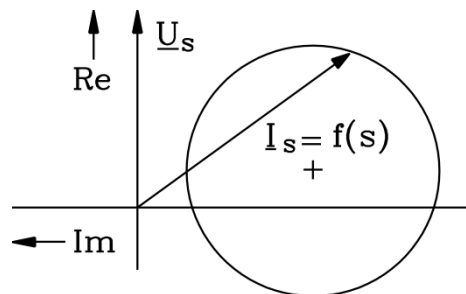


Bild A1: OSSANNA-Kreis

Im Folgenden wird das Kreisdiagramm in allgemeiner Lage hergeleitet, weil bei diesem Vorgehen klar wird, wie außer dem Ständerstrom \underline{I}_s weitere Größen aus dem Kreisdiagramm zu entnehmen

sind. Zunächst werden ausgehend vom Betriebs-Ersatzschaltbild (Bild 6) die Verhältnisse bei offenem Läuferkreis dargestellt. Man hebt also den läuferseitigen Kurzschluss auf, wie es in Bild A2 dargestellt ist:

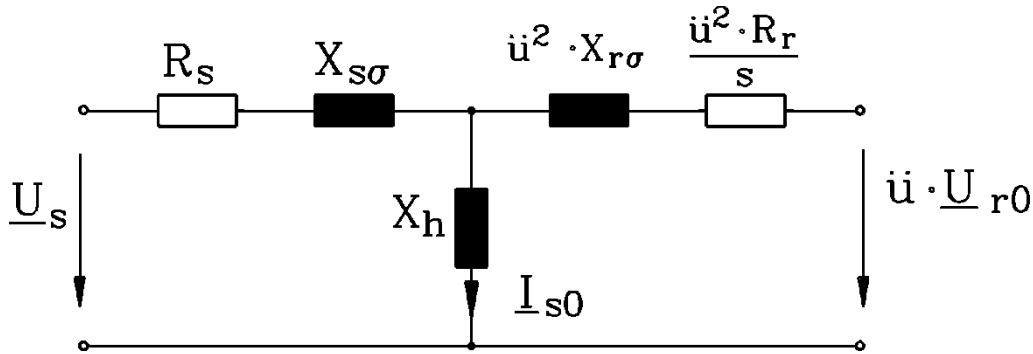


Bild A2: Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine mit offenem Läuferkreis.

Auf der Ständerseite fließt der Leerlaufstrom

$$\underline{I}_{s0} = \frac{\underline{U}_s}{R_s + jX_s} = I_{s0} e^{-j(\frac{\pi}{2} - \alpha_0)} \quad (\text{A2})$$

$$\text{mit } I_{s0} = \frac{U_s}{\sqrt{R_s^2 + X_s^2}} \quad (\text{A3})$$

$$\text{und } \alpha_0 = \arctan \frac{R_s}{X_s} .$$

Somit kann der Leerlaufstrom \underline{I}_{s0} als Stromzeiger mit dem Betrag I_{s0} unter dem Winkel α_0 gegen die imaginäre Achse in Bild A4 eingetragen werden. Sein Endpunkt ist der Leerlaufpunkt P_0 , der einen ausgezeichneten Punkt der gesuchten Ortskurve $\underline{I}_s = f(s)$ darstellt:

$$s = 0 \longrightarrow \underline{I}_s = \underline{I}_{s0} .$$

Der Spannungsfall des Leerlaufstroms \underline{I}_{s0} an der Hauptreaktanz ist die Hauptfeld-Spannung (Bild A2). Sie ist die im Läuferkreis induzierte Spannung \underline{U}_{r0} , die im Ständerkreis mit dem Übersetzungsverhältnis \ddot{u} multipliziert wirksam ist.

$$\underline{I}_{s0} \cdot jX_h = \ddot{u} \underline{U}_{r0} \quad (\text{A4})$$

\underline{U}_{r0} ist an den offenen Läuferklemmen messbar. Eliminiert man den Läuferstrom \underline{I}_{s0} aus (A2) und (A4), so erhält man das komplexe Übersetzungsverhältnis $\underline{\ddot{u}}_k$ ^*:

$$\frac{\underline{U}_s}{\ddot{u} \cdot \underline{U}_{r0}} = \frac{R_s + jX_s}{jX_h} = \frac{\sqrt{R_s^2 + X_s^2}}{X_h} \cdot e^{-j\alpha_0} = \underline{\ddot{u}}_k \quad (\text{A5})$$

Da der Ständerwiderstand klein ist ($R_s \ll X_h$) und die Ständerstreureaktanz ebenfalls klein ist ($X_s/X_h \sim 1,03 \dots 1,05$), ist i. a. der Betrag von $\underline{\ddot{u}}_k$ nur geringfügig größer als 1:

* Das messbare Verhältnis der Ständerspannung zur tatsächlichen Läuferspannung der stillstehenden ASM mit offenem Läuferkreis

$$\text{ist also: } \frac{\underline{U}_s}{\underline{U}_{r0}} = \underline{\ddot{u}}_k \cdot \ddot{u} = \frac{R_s + jX_s}{jX_h} \cdot \frac{N_s \cdot k_{ws}}{N_r \cdot k_{wr}}$$

$\ddot{u}_k \cong 1,03 \dots 1,05$. Bei widerstandsloser, streuungsloser Ständerwicklung ist $\ddot{u}_k = 1$.

Um den Betriebszustand der ASM bei Belastung, also für Schlupf $s \neq 0$ und damit $\underline{I}_s \neq \underline{I}_{s0}$, im Kreisdiagramm darzustellen, definiert man die Differenz zwischen dem Ständerstrom bei Leerlauf und dem bei Last als den Strom \underline{I}_r^+ :

$$\underline{I}_{s0} - \underline{I}_s = \underline{I}_r^+ \quad . \quad (A6)$$

Der Index „r“ für Rotor soll andeuten, dass dieser Differenzstrom eine direkte Folge des bei Belastung ($s \neq 0$) in der Läuferwicklung fließenden Stroms \underline{I}_r ist. Da die Gleichung (A6) nicht ausreicht, um \underline{I}_s selbst oder \underline{I}_r^+ als Funktion vom Schlupf s in der Ortskurve erscheinen zu lassen, wird folgende Beziehung erarbeitet:

$$\underline{I}_r^+ = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}_r(s)} \quad . \quad (A7)$$

Hierzu werden – ausgehend vom T-Ersatzschaltbild (Bild 6) – die Spannungen und Ströme in Bild A3 so bestimmt, dass nach Superposition dieser Größen mit denen der Ersatzschaltung für Leerlauf (Bild A2) sich die Spannungen und Ströme des T-Ersatzschaltbildes, also unseres Betriebs-Ersatzschaltbildes (Bild 6) ergeben.

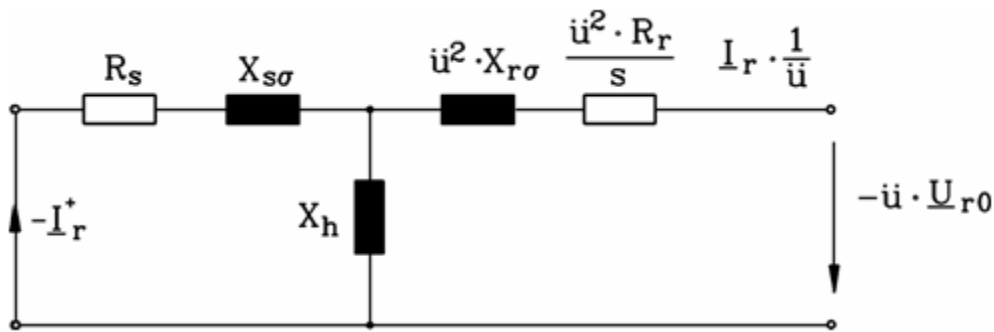


Bild A3: Ersatzschaltbild zur Bestimmung von \underline{I}_r^+

In der Ständermasche fließt nach dieser Vorschrift $\underline{I}_{s0} - \underline{I}_r^+ = \underline{I}_s$ der Strom $-\underline{I}_r^+$. Der Strom in der Läufermasche ist $\underline{I}_r \cdot \frac{1}{\ddot{u}}$, so dass er zusammen mit dem Läuferstrom Null in Bild A3 wiederum als

$\underline{I}_r \cdot \frac{1}{\ddot{u}}$ im Betriebs-Ersatzschaltbild erscheint. Die Ständerspannung muss jetzt Null sein, weil nur so die Superposition mit Bild A2 die tatsächliche Spannung \underline{U}_s ergibt. Also sind die Ständerklemmen kurzzuschließen. Dagegen erscheint an den offenen Läuferklemmen der Ersatzschaltung die Spannung $-\ddot{u} \underline{U}_{r0}$, um durch die Überlagerung mit Bild A2 schließlich im Bild 6 zu verschwinden. Der Strom im Querzweig wird nicht für die Herleitung benötigt. Für Bild A3 ergeben sich über Knoten- und Maschenregel die beiden Gleichungen (A8):

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \ddot{u} \cdot \underline{U}_{r0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + jX_s & jX_h \\ jX_h & \ddot{u}^2 \cdot \left(\frac{R_r}{s} + jX_r \right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -\underline{I}_r^+ \\ \frac{1}{\ddot{u}} \cdot \underline{I}_r \end{bmatrix} \quad (A8)$$

Die Auflösung der ersten Zeile liefert den Rotorstrom je Strang:

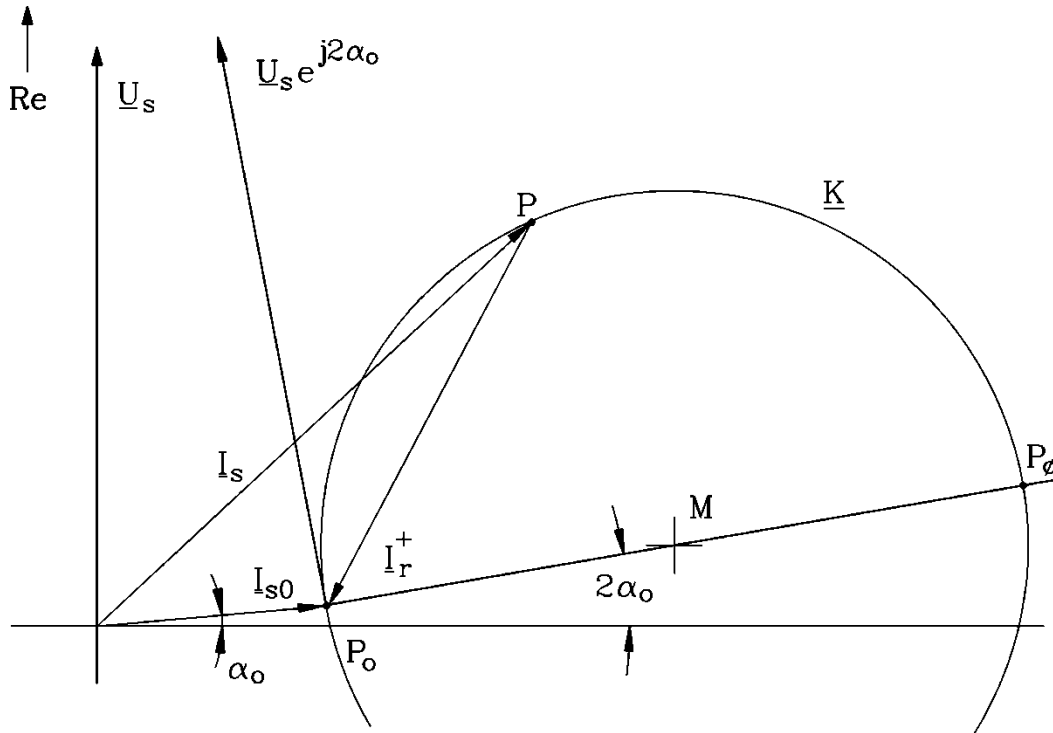


Bild A4: Drehung des Koordinatensystems um $e^{j2\alpha_0}$; Durchmessergerade $\overline{P_0 P_\phi}$

$$\underline{I}_r = \underline{I}_r^+ \cdot \ddot{u} \cdot \frac{R_s + jX_s}{jX_h} = \underline{I}_r^+ \cdot \ddot{u} \cdot \underline{\ddot{u}}_k \quad (\text{A9})$$

Dies in die zweite Zeile eingesetzt, ergibt:

$$-\ddot{u} \cdot \underline{U}_{r0} = -jX_h \cdot \underline{I}_r^+ + \ddot{u}^2 \cdot \left(\frac{R_r}{s} + jX_r\right) \cdot \underline{I}_r^+ \cdot \underline{\ddot{u}}_k,$$

woraus wir den Differenzstrom erhalten.

$$\underline{I}_r^+ = \frac{\ddot{u} \cdot \underline{U}_{r0}}{jX_h - \ddot{u}^2 \cdot \underline{\ddot{u}}_k \cdot \left(\frac{R_r}{s} + jX_r\right)} \quad (\text{A10})$$

Gleichung (A10) stellt die gesuchte Beziehung (A7) dar. Sie wird nur noch so umgeformt, dass sich das Kreisdiagramm leichter zeichnen lässt. Diese Umformungen sind:

(1) Erweiterung mit der zu $\underline{\ddot{u}}_k$ konjugiert-komplexen Größe:

$$\underline{\ddot{u}}_k^* = \frac{R_s - jX_s}{-jX_h} \quad (\text{A11})$$

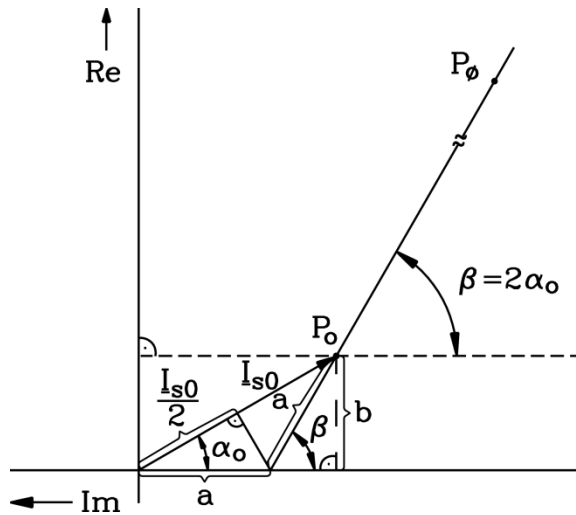
(2) Verwendung von (A5):

$$\underline{I}_r^+ = \frac{-\ddot{u} \cdot \underline{U}_{r0} \cdot \underline{\ddot{u}}_k^*}{(R_s - jX_s) + \ddot{u}^2 \cdot \underline{\ddot{u}}_k^* \cdot \left(\frac{R_r}{s} + jX_r\right)} \quad (\text{A12})$$

(3) Einführung der Abkürzungen:

$$R_r^+ = \ddot{u}^2 \cdot \underline{\ddot{u}}_k^* \cdot R_r; X_r^+ = \ddot{u}^2 \cdot \underline{\ddot{u}}_k^* \cdot X_r; X_\phi = X_r^+ - X_s \quad (\text{A13})$$

Diese Schritte (1) – (3) ergeben als Zwischenergebnis:



$$\sin \beta = \frac{b}{a}$$

$$a = \frac{I_{s0}}{2 \cos \alpha_0}$$

$$b = I_{s0} \cdot \sin \alpha_0$$

$$\rightarrow \sin \beta = 2 \sin \alpha_0 \cos \alpha_0$$

$$\Rightarrow \beta = 2 \alpha_0$$

Bild A5: Der Leerlaufstrom liegt unter dem Winkel α_0 zur Imaginärteilachse, der Kreisdurchmesser, ausgehend vom Leerlaufpunkt, unter dem Winkel $2\alpha_0$

$$\underline{I}_r^+ = \frac{-\underline{u} \cdot \underline{U}_{r0} \cdot \underline{u}_k^*}{R_s + \frac{R_r^+}{s} + jX_\varphi}$$

(4) Umformung des Zählers mit (A5):

$$\underline{I}_r^+ = \frac{-\underline{U}_s \cdot \frac{\underline{u}_k^*}{s}}{R_s + \frac{R_r^+}{s} + jX_\varphi}$$

(5) Wegen $\frac{\underline{u}_k^*}{s} = \frac{e^{+j\alpha_0}}{e^{-j\alpha_0}} = e^{j2\alpha_0}$ kann man endgültig schreiben:

$$\underline{I}_r^+ = \frac{-\underline{U}_s e^{j2\alpha_0}}{R_s + \frac{R_r^+}{s} + jX_\varphi}; \quad -\underline{I}_r^+ = \frac{\underline{U}_s e^{j2\alpha_0}}{R_s + \frac{R_r^+}{s} + jX_\varphi} \quad (\text{A14})$$

Diese Form von $-\underline{I}_r^+ = \underline{U} / \underline{Z}_r(s)$ mit $\underline{U} = \underline{U}_s e^{j2\alpha_0}$ zeigt (Bild A4), dass man in den bereits ermittelten Leerlauf-Punkt P_0 den Ursprung eines neuen, „geneigten“ Koordinatensystems zu legen hat, das gegenüber dem ursprünglichen um den Winkel $+2\alpha_0$ gedreht ist und in dem die Spannung $\underline{U}_s \cdot e^{j2\alpha_0}$ reell ist. Der Zeiger $-\underline{I}_r^+$ entsteht daher aus der Inversion der Geraden $\underline{Z}_r(s) = R_s + R_r^+ / s + jX_\varphi$, die parallel zu $\underline{U}_s \cdot e^{j2\alpha_0}$ ist und im Abstand X_φ links von ihr liegt (Bild A6). Sie ist linear beziffert im Parameter $1/s$. Die Inversion dieser Geraden ergibt den Kreis \underline{K} , der rechts von $\underline{U}_s \cdot e^{j2\alpha_0}$ liegt und durch P_0 geht. Der Ausdruck $R_s + R_r^+ / s$ ist bei $s_\varphi = -R_r^+ / R_s$ Null, so dass $\underline{Z}_r(s_\varphi) = jX_\varphi$ minimal und $-\underline{I}_r^+ = \underline{U} / \underline{Z}_r(s_\varphi)$ maximal wird. Der Kreisdurchmesser ist somit $|\underline{I}_r^+(s_\varphi)| = U_s / X_\varphi$. Der Stromzeiger $-\underline{I}_r^+$ beschreibt einen Kreis \underline{K} durch den Punkt P_0 , wenn der Schlupf s alle Werte zwischen $-\infty$ und $+\infty$ durchläuft. Er erreicht den diametral zum Leerlaufpunkt P_0 gelegenen Durchmesser-Punkt P_ϕ beim negativen Schlupf s_φ . Deshalb heißt X_φ die „Durchmesser-Reaktanz“. Der Mittelpunkt M liegt auf der Durchmessergeraden $\overline{P_0 P_\phi}$. Mit der Beziehung (A6)

erhalten wir durch Addition des konstanten Leerlaufstroms zum variablen Differenzstrom den Ständerstrom, also ist der Kreis \underline{K} auch die gesuchte Ortskurve des Ständerstroms $\underline{I}_s = f(s)$, der OSSANNA-Kreis.

Anhang A3: Herleitung von Drehmoment- und Leistungsgerade im OSSANNA-Kreis

Um das Betriebsverhalten der ASM aufzeigen zu können, soll das in Bild A4 entwickelte Kreisdiagramm erweitert werden. Der besseren Übersicht wegen wird in Bild A6 zunächst nur das durch Gleichung (A14) erhaltene geneigte Koordinatensystem betrachtet (dick ausgezogen!). Die Neigung des Zeigers \underline{I}_r^+ gegen die gedrehte Spannung $\underline{U}_s e^{j2\alpha_0}$ ist wegen $\underline{I} = \underline{U}/(R + jX)$ durch das Verhältnis der Strecken $R = R_s + R_r^+ / s$ und X_ϕ gegeben. Die Gerade $\underline{Z}_r(s) = R_s + R_r^+ / s + jX_\phi$ wird im geneigten Koordinatensystem an $\underline{U}_s e^{j2\alpha_0}$ gespiegelt und im Maßstab so gestaucht, dass die Strecke X_ϕ - in mm gemessen - gleich dem Kreisdurchmesser U_s/X_ϕ ist (Bild A6). Die gespiegelte Gerade geht folglich als Tangente an den Kreis \underline{K} durch den Punkt P_ϕ . Die Strecke $R = R_s + R_r^+ / s$ endet im Punkt P' , dem Schnittpunkt der Verlängerung von \underline{I}_r^+ und der gespiegelten Geraden. Die Impedanz $\underline{Z}_r(s) = R_s + \frac{R_r^+}{s} + jX_\phi$ ist somit durch die Strecke $\overline{P_0 P'}$ dargestellt. Damit findet sich der Stromzeiger \underline{I}_r^+ jetzt stets auf dem gleichen Strahl wie die zugehörige Impedanz $\underline{Z}_r(s) = R_s + \frac{R_r^+}{s} + jX_\phi$. Die Größe $R = R_s + R_r^+ / s$ ist die Strecke $\overline{P_\phi P'}$, die Größe R_s ist die Strecke $\overline{P_\phi P'_\infty}$, da bei $s = \infty$ der Ausdruck $R = R_s + R_r^+ / \infty = R_s$ ist. Die Strecke $\overline{P'_\infty P'}$ ist somit die verbleibende Größe $\frac{R_r^+}{s}$. Damit sind die im vorigen Abschnitt hergeleiteten mathematischen Beziehungen graphisch umgesetzt.

Wird jetzt der Schlupf s als der den Betriebszustand bestimmende Parameter variiert, so ist dies eine Änderung des wirksamen Läuferwiderstands R_r^+ / s , also eine Änderung der Länge $\overline{P_\phi P'}$. Es wandert der Punkt P' auf der Normalen und damit ändert sich die Neigung der Strecke $\overline{P_0 P'}$. Damit ändert sich die Lage des Zeigers \underline{I}_r^+ und damit auch des Ständerstrom-Zeigers \underline{I}_s . Für einen beliebigen Schlupf s erhält man also allgemein einen Punkt P' auf der Normalen zum Kreisdurchmesser im Durchmesserpunkt P_ϕ . Der Strahl $\overline{P_0 P'}$ ergibt auf dem Kreis den zugehörigen Betriebspunkt P . Für den Sonderfall $s = 1$, also für die stillstehende Maschine, erscheint der Wert R_r^+ direkt, als umgerechneter Wert des Läuferwicklungswiderstands, als Strecke bis zum Punkt P'_1 . Der Strahl von dort zum Leerlaufpunkt ergibt als Schnittpunkt mit dem Kreis den *Kurzschlusspunkt* P_1 , der diese Bezeichnung deswegen trägt, weil in diesem Fall die Asynchronmaschine einem sekundär kurzgeschlossenen Transformator gleicht. Lässt man den Schlupf s über den Wert 1 hinaus gegen Unendlich wachsen, so wird schließlich der Strahl $\overline{P_0 P'}$ die Punkte P'_∞ und P_∞ erreichen. Das entspricht wegen $R_r^+ / \infty = 0$ einem wirksamen Läuferwiderstand Null, weswegen P_∞ auch als *ideeller Kurzschlusspunkt* bezeichnet wird.

Um die vom Netz mit der Spannung \underline{U}_s dem Asynchronmotor zugeführte Leistung zu ermitteln, muss man jetzt wieder auf das dünn in Bild A6 gezeichnete, ursprüngliche Koordinatensystem (mit \underline{U}_s in Richtung der reellen Achse) zurückgreifen. Die in diesem System reelle Komponente \overline{AP} des

Ständerstroms, also die Wirkkomponente von \underline{I}_s , ist ein Maß für die aufgenommene Leistung (gesamte Ständerleistung) P_e :

$$P_e = 3 U_s I_s \cdot \cos \varphi = \lambda_p \cdot \overline{AP} \quad (\text{A15})$$

für die Strangzahl $m = 3$ und einen Leistungsmaßstab $\lambda_p = 3 U_s \lambda_1$. Für die Aufteilung dieser Gesamtleistung gehen wir von Gleichung (A14) aus. Sie besagt, dass von der Spannung $\underline{U}_s e^{j2\alpha_0}$ der Strom \underline{I}_r^+ über die Wirkwiderstände $R_s + \frac{R_r^+}{s}$ getrieben wird und folglich dort die *Ersatz-Wirkleistung* P_E umsetzt:

$$P_E = 3 (I_r^+)^2 (R_s + \frac{R_r^+}{s}) \quad (\text{A16})$$

Diese Leistung lässt sich darstellen als das dreifache Produkt von $\underline{U}_s e^{j2\alpha_0}$ und der zu diesem Zeiger parallelen Stromkomponente („Wirkkomponente“ in dem um $2\alpha_0$ gedrehten Koordinatensystem mit $\underline{U}_s e^{j2\alpha_0}$ in der „reellen“ Achse!). Dieser *Wirkstrom* ist, wenn ψ der Winkel zwischen $\underline{U}_s e^{j2\alpha_0}$ und \underline{I}_r^+ ist, $I_r^+ \cdot \cos \psi = \lambda_1 \cdot \overline{DP}$. Er entspricht über dem Strommaßstab λ_1 („A/cm“ oder „A/mm“) der Strecke \overline{DP} im Bild A6. Ihm entspricht die *Ersatzleistung*:

$$P_E = 3 (I_r^+)^2 (R_s + \frac{R_r^+}{s}) = \lambda_p \cdot \overline{DP} \quad (\text{A17})$$

Durch Anwendung des Strahlensatzes erkennt man die beiden Summanden der Ersatzleistung P_E als Strecken:

$$\begin{aligned} 3 (I_r^+)^2 R_s &= \lambda_p \cdot \overline{DB} \\ 3 (I_r^+)^2 \frac{R_r^+}{s} &= \lambda_p \cdot \overline{BP} \end{aligned} \quad (\text{A18})$$

Dem ersten Summanden kommt keine physikalische Bedeutung zu. Im zweiten Summanden erkennt man nach der Umformung mit Hilfe der von (A9) und (A13) die *Luftspaltleistung*:

$$P_\delta = 3 (I_r^+)^2 \frac{R_r^+}{s} = 3 I_r^2 \frac{R_r^+}{s} = \lambda_p \cdot \overline{BP} \quad (\text{A19})$$

Die Bezeichnung deutet an, dass es sich hierbei um die Leistung handelt, die vom Drehfeld über den Luftspalt δ auf den Läufer übertragen wird. Entsprechend heißt der Strahl $\overline{P_0 P_\infty}$ *Luftspaltgerade*. Durch erneute Anwendung des Strahlensatzes lässt sich P_δ weiter zerlegen:

$$P_\delta = 3 (I_r^+)^2 R_r^+ + 3 (I_r^+)^2 R_r^+ \frac{1-s}{s} \quad (\text{A20})$$

$$P_\delta = 3 (I_r^+)^2 R_r^+ + 3 (I_r^+)^2 R_r^+ \frac{1-s}{s} = \lambda_p \cdot \overline{BC} + \lambda_p \cdot \overline{CP}$$

Die Strecke \overline{BC} entspricht also der in der Läuferwicklung entstehenden Verlustleistung:

$$P_{\text{cu,r}} = 3 I_r^2 R_r^+ = \lambda_p \cdot \overline{BC} \quad (\text{A21})$$

Der noch verbleibende Anteil ist schließlich die an der Welle zur Verfügung stehende *mechanische Leistung*, wobei die Reibung vernachlässigt wurde:

Also entspricht die Strecke \overline{BP} gleichzeitig dem von der Maschine entwickelten Drehmoment. Der zugehörige Maßstabfaktor ist gegeben durch

$$\lambda_M = \frac{\lambda_p}{2\pi n_{\text{syn}}} . \quad (\text{A27})$$

Der Strahl $\overline{P_0P_\infty}$ führt daher auch den Namen *Drehmomentgerade*. Mit dieser Hilfslinie lässt sich beispielsweise das höchste von der Maschine erreichbare Drehmoment, das *Kippmoment* M_b , ermitteln (Bild A7). Der zugehörige Betriebspunkt ist daher mit P_b bezeichnet.

Will man auf dem *OSSANNA*-Kreis eine Skala für den Schlupf s aufzeichnen, so ergibt sich der große Nachteil einer nichtlinearen Teilung. Da jeder Kreis als Inversion aus einer Geraden entsteht, wenn das Inversionszentrum S auf dem Kreis liegt, ergibt sich ein einfaches Verfahren, mit dem man eine lineare Schlupfskala erhält (Bild A7), wenn drei Schlupfpunkte, z. B. P_0 , P_1 und P_∞ bereits bekannt sind. Von einem beliebigen Hilfspunkt S auf dem *OSSANNA*-Kreis, der als Inversionszentrum wirken soll, wird je eine Sehne nach P_0 , P_1 und P_∞ gezogen. Dann lässt sich auf einer beliebigen Parallelen zu $\overline{SP_\infty}$ eine lineare Skala für den Schlupf s darstellen, indem man den Punkt $s = 0$ als Schnittpunkt der Sehne $\overline{SP_0}$ und den Punkt $s = 1$ als Schnittpunkt der Sehne $\overline{SP_1}$ mit dieser Parallelen festlegt. Der Schlupf s für einen vorgegebenen Betriebspunkt P wird dann als Schnittpunkt der Verbindungslinie \overline{SP} mit der *Schlupfgeraden* gefunden.

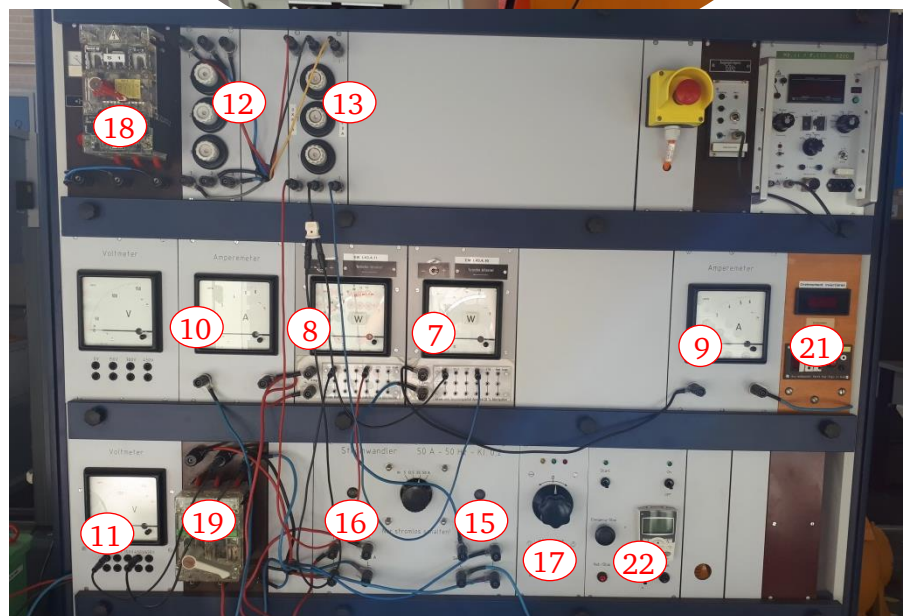
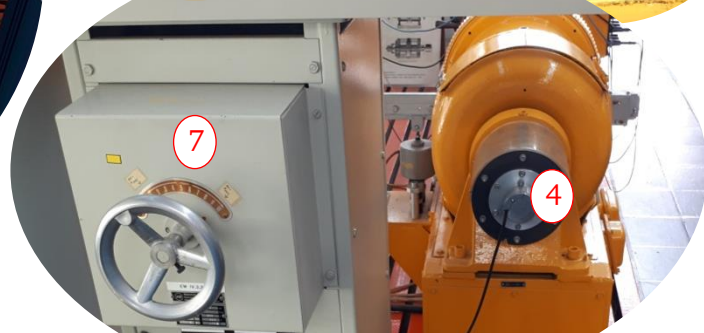
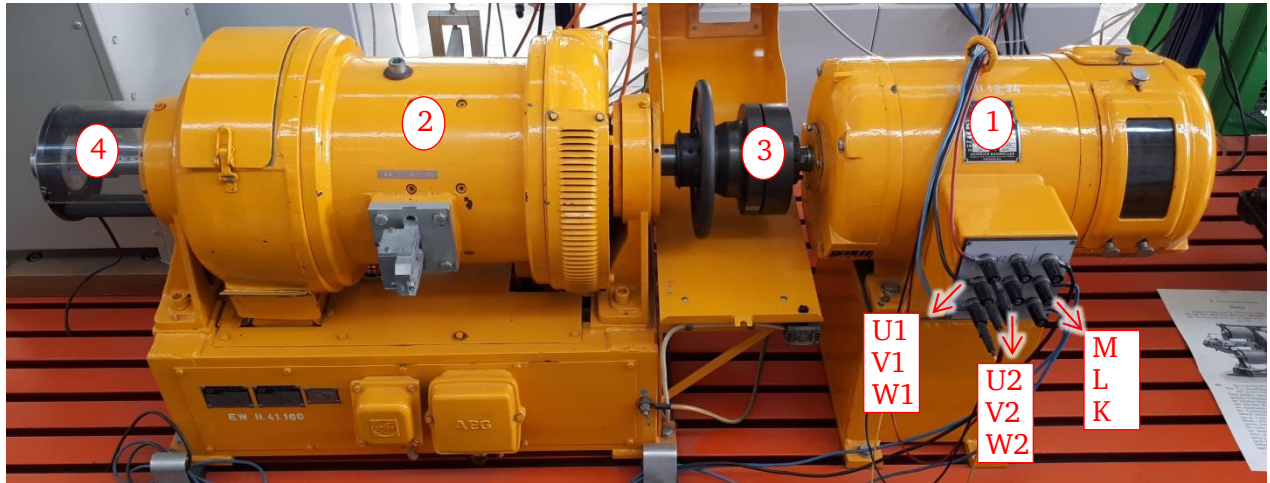


Bild V1: Versuchsaufbau

Die zu untersuchende vierpolige Schleifringläufer-Asynchronmaschine (ASM) hat im Stator und im Rotor jeweils eine in Stern geschaltete Runddraht-Einschicht-Dreiphasenwicklung als Ganzlochwicklungen mit unterschiedlicher Lochzahl, damit sich Stator- und Rotornutenzahl zur Verringerung des magnetischen Rastmoments unterscheiden. Die statorseitige Bemessungsspannung ist 380 V effektiv bei 50 Hz für einen effektiven Bemessungsstrom 18,3 A. Auf der Welle des mit Wälzlagern gelagerten Schleifringläufers ist ein Radiallüfter angebracht, der die erforderliche Kühlluft durch die Maschine bläst. Der ohm'sche Gleichstromwiderstand eines Ständerwicklungsstrangs bei $\vartheta_{\text{kalt}} = 20\text{ }^\circ\text{C}$ beträgt $R_s = 0,48\ \Omega$. Der ohm'sche Gleichstromwiderstand eines Rotorwicklungsstrangs bei $\vartheta_{\text{kalt}} = 20\text{ }^\circ\text{C}$ beträgt $R_r = 0,15\ \Omega$. Die ASM ist mit einer Gleichstrom-Pendelmaschine (GM) lösbar über eine Schiebekupplung verbunden. Bei der Pendelmaschine ist das Statorgehäuse drehbar gelagert, so dass kleine Bewegungen aufgrund des Drehmoments in beide Drehrichtungen möglich sind. Diese für das Auge nicht sichtbare kleine Drehbewegung stützt sich über eine Kraftmessdose auf das Fundament des Maschinensatzes ab. Mit dieser gemessenen Kraft über Dehnungsmessstreifen in der Messdose wird mit dem zugehörigen Abstand des Kraftvektors von der Läuferdrehachse das Drehmoment, das zwischen Stator und Fundament auftritt, messtechnisch ermittelt. Aufgrund von „Actio est reactio“ ist dieses Drehmoment im Stationärbetrieb identisch mit dem Luftspaltmoment M_e der Pendelmaschine. Über dieses Drehmoment kann auf das von der Welle des Prüflings auf die Pendelmaschine übertragene Drehmoment, das hier mit M_m bezeichnet wird, geschlossen werden. Bei Vernachlässigung aller bremsenden Verluste im Läufer der Pendelmaschine gilt: $M_m = M_e$. Für eine genauere Ermittlung müssen die relevanten drehmomentabhängigen bremsenden Verluste berücksichtigt werden, worauf bei diesem Versuch verzichtet wird.

Die Pendelmaschine (GM) wird von einem Stromrichter (SR) gespeist. Somit kann drehzahl geregelt gefahren werden. Der Drehzahl Sollwert n_{soll} wird über ein Potentiometer eingestellt.

Für alle Versuchsteile gilt:

- die Abdeckhaube über der Kupplung ist zu schließen.
- am Stromrichter ist der Hauptschalter einzuschalten, um die Steuerspannung für die Verriegelung bereitzustellen.

Bei der Versuchsdurchführung wird die **verkettete** Spannung gemessen. Dies ist im Protokoll zu vermerken und bei der Auswertung zu berücksichtigen, wenn die Maschine wie hier im Stern geschaltet ist und somit die **Phasenspannungen** an den Strängen anliegen!

Die Nennleistung, Nennspannung, Verschaltung, und der Leistungsfaktor der Schleifringläufer-Asynchronmaschine werden vom Typenschild während des Versuchs aufgenommen und sind Teil der Versuchsdurchführung.

9.1. Zuordnung der Wattmeter und Vorzeichenbestimmung

Bei einem Dreiphasensystem ohne Sternpunktleiter kann man mit zwei Wattmetern die augenblickliche Wirkleistung messen. Im vorliegenden Praktikumsversuch wird der Sonderfall eines zeitlich sinusförmigen, symmetrischen Drehspannungssystems mit symmetrischer Belastung betrachtet. Hier gilt unter Berücksichtigung der Wattmeterkonstanten c_w und der beiden Wattmeteranzeigen α_1 und α_2 :

$$c_w \cdot \alpha_1 = \operatorname{Re}\{\underline{U}_{wv} \cdot \underline{I}_w^*\} = \frac{S}{\sqrt{3}} \cdot \cos(30^\circ - \varphi) = \frac{S}{\sqrt{3}} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cos(\varphi) + \frac{1}{2} \sin(\varphi) \right) \quad (V1)$$

$$c_w \cdot \alpha_2 = \operatorname{Re}\{\underline{U}_{uv} \cdot \underline{I}_u^*\} = \frac{S}{\sqrt{3}} \cdot \cos(30^\circ + \varphi) = \frac{S}{\sqrt{3}} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cos(\varphi) - \frac{1}{2} \sin(\varphi) \right). \quad (V2)$$

Die Summe von (V1) und (V2) ergibt die mittlere Wirkleistung je Periode:

$$P = c_w (\alpha_1 + \alpha_2) = S \cdot \cos(\varphi) . \quad (V3)$$

Aus der Differenz von (V1) und (V2) erhält man die Blindleistung:

$$Q = \sqrt{3} \cdot c_w (\alpha_1 - \alpha_2) = S \cdot \sin(\varphi) . \quad (V4)$$

Zur Bestimmung des Leistungsfaktors erhält man mit (V3) und (V4)

$$\cos(\varphi) = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} . \quad (V5)$$

Die Wattmeterkonstante c_w lässt sich folgendermaßen berechnen:

$$c_w = \ddot{u}_1 \cdot \frac{I_{\text{Watt,N}} \cdot U_{\text{Watt,N}}}{\alpha_{\text{Watt,End}}} . \quad (V6)$$

mit:

\ddot{u}_1 : Übersetzungsverhältnis des Stromwandlers,

$I_{\text{Watt,N}}$: Bemessungsstrom des Wattmeters ($I_{\text{Watt,N}} = 5 \text{ A}$),

$U_{\text{Watt,N}}$: eingestellter Wert des Spannungspfad,

$\alpha_{\text{Watt,End}}$: Skalenteile des Wattmeters (Vollausschlag: $\alpha_{\text{Watt,End}} = 125 \text{ Skt}$).

Die Vorzeichen von α_1 und α_2 werden über den Schaltzustand der Umpolschalter dargestellt. Vor der ersten Leistungsmessung müssen α_1 und α_2 den beiden Wattmetern zugeordnet werden und deren Vorzeichen bestimmt werden. Bild V2 zeigt die Abhängigkeit der beiden Wattmeteranzeigen α_1 und α_2 vom Phasenwinkel $\varphi = \varphi_U - \varphi_I$ bei konstanter Scheinleistung $S = \sqrt{3} \cdot I \cdot U_{\text{verk}}$ und fester Wattmeterkonstante c_w .

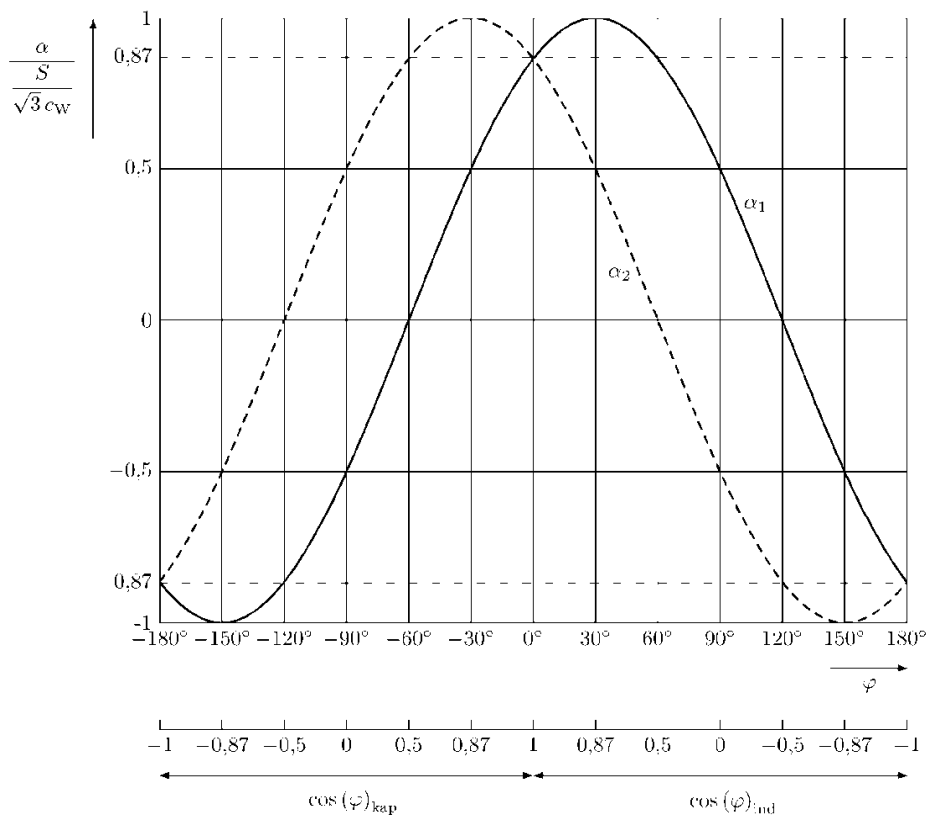


Bild V2: Zwei-Wattmeter-Methode: Abhängigkeit der Wattmeteranzeigen vom Phasenwinkel für konstante Scheinleistung S und feste Wattmeterkonstante c_w gemäß (V1) und (V2)

Um die Zuordnung der Wattmeter und die Vorzeichenbestimmung nach Bild V2 durchzuführen zu können, müssen die Wattmeter bei bekanntem Phasenwinkel abgelesen werden. Dazu wird die Asynchronmaschine bei Bemessungsspannung im motorischen Leerlauf betrieben. In diesem Betriebspunkt gilt für den Phasenwinkel: $60^\circ < \varphi < 90^\circ$, da die Maschine auch im Leerlauf eine kleine positive Wirkleistung benötigt, um die elektrischen und mechanischen Verluste zu überwinden. Aus Bild V2 folgt für diesen Betriebspunkt:

- Die Anzeige mit größerem Ausschlag ist α_1 und hat positives Vorzeichen.
- Die Anzeige mit kleinerem Ausschlag ist α_2 und hat negatives Vorzeichen.

9.2. Strom- und Spannungsmessung

Zur Strom- und Spannungsmessung werden analoge Messinstrumente verwendet. Das Voltmeter zur Messung der Leiter-Leiter-Spannung der ASM hat einen Anzeigebereich von 150 Skalenteilen und drei Messbereichen mit den Übersetzungsverhältnissen $c_v = 1\text{V/Skt}$; 2V/Skt ; 3V/Skt . Das Amperemeter zur Messung des Leiterstroms der ASM hat einen Anzeigebereich von 6 Skalenteilen und verfügt über drei verschiedene Übersetzungsverhältnisse $\ddot{u}_1 = 1\text{A/Skt}$; $2,5\text{A/Skt}$; 5A/Skt .

9.3. Leerlaufversuch

Die mechanische Kupplung zwischen ASM und GM wird ausgerückt. Die Asynchronmaschine ist mit stark verminderter Ständerspannung bei kurzgeschlossenem Anlasswiderstand R_v anzufahren.

Durch Verändern der Klemmenspannung U_{sv} ist die Leerlaufkennlinie aufzunehmen:

$$U_{sv} = f(I_s) \text{ im Bereich } 0,3 \cdot U_{svN} \leq U_{sv} \leq 1,1 \cdot U_{svN}$$

Gleichzeitig wird die aufgenommene Leerlaufleistung gemessen:

$$P_{e,in,0} = f(U_{sv})$$

Die Messergebnisse sind in die Tabelle 1 einzutragen.

Tabelle 1: Messtabelle für Leerlaufversuch. Die grau hinterlegten Spalten sind vor dem Versuch auszufüllen.

Messpunkte		c_v	U_{sv}	\ddot{u}_1	I_s	$U_{Watt,N}$	α_1	α_2
		V/Skt	Skt	A/Skt	Skt	V	Skt	Skt
1.	$0,3 \cdot U_{svN} =$							
2.	$0,4 \cdot U_{svN} =$							
3.	$0,5 \cdot U_{svN} =$							
4.	$0,6 \cdot U_{svN} =$							
5.	$0,7 \cdot U_{svN} =$							
6.	$0,8 \cdot U_{svN} =$							
7.	$0,9 \cdot U_{svN} =$							
8.	$1,0 \cdot U_{svN} =$							
9.	$1,1 \cdot U_{svN} =$							

9.4. Kurzschlussversuch

Die Kupplung zwischen ASM und GM ist einzurücken. Im Stillstand ($s = 1$) wird der Ständerstrom und die Kurzschluss-Wirkleistung bei veränderlicher Klemmenspannung gemessen:

$$I_s = f(U_{sv}) \text{ im Bereich } 0,3 \cdot I_{sN} \leq I_s \leq 1,1 \cdot I_{sN}$$

$$P_{e,in,1} = f(I_s)$$

Die Messung muss wegen der Erwärmung der Wicklungen rasch durchgeführt werden. **Man beginnt zweckmäßig bei $I_s = 1,1 \cdot I_{sN}$.**

Zum Blockieren der ASM wird die Gleichstrommaschine bei Sollwert **Null** mittels Taster am Stromrichter SR eingeschaltet und dann eine möglichst kleine Drehzahl eingestellt. Um eine Beschädigung des Gleichstrom-Kommutators auszuschließen, ist absoluter Stillstand des Maschinensatzes zu vermeiden.

Die Messergebnisse sind in die Tabelle 2 einzutragen.

Tabelle 2: Messtabelle für Kurzschlussversuch. Die grau hinterlegten Spalten sind vor dem Versuch auszufüllen.

Messpunkte		\ddot{u}_I	I_s	c_V	U_{sv}	$U_{Watt,N}$	α_1	α_2
		A/Skt	Skt	V/Skt	Skt	V	Skt	Skt
1.	$0,3 \cdot I_{sN} =$							
2.	$0,4 \cdot I_{sN} =$							
3.	$0,5 \cdot I_{sN} =$							
4.	$0,6 \cdot I_{sN} =$							
5.	$0,7 \cdot I_{sN} =$							
6.	$0,8 \cdot I_{sN} =$							
7.	$0,9 \cdot I_{sN} =$							
8.	$1,0 \cdot I_{sN} =$							
9.	$1,1 \cdot I_{sN} =$							

9.5. Bemessungspunkte im Motor- und Generatorbetrieb

Der Maschinensatz wird folgendermaßen angefahren:

- Anlasswiderstand auf $R_v = R_{\max}$ (Stellung 1) stellen
- Bei offenem Trenner S2 (grauer Griff) $U_{sv} = U_{svN}$ mit Transformator einstellen
- Einschalten der ASM bei $U_{sv} = U_{svN}$, notieren Sie dabei den Anlaufstrom I_{s1}
- Ausschalten der ASM, Feststellen der Drehrichtung des Maschinensatzes beim Auslaufen der ASM
- Spannung U_{sv} auf Null, Anlasswiderstand kurzschließen: $R_v = R_{\min} = 0$ (Stellung 10)

- Sollwertpotentiometer n_{soll} von GM auf *Null*
- Gleichstrommaschine mittels Taster am Stromrichter einschalten
- Mit Sollwertpotentiometer n_{soll} Maschinensatz in der festgestellten Drehrichtung bis Synchrodrehzahl $(1500 \pm 10) \text{ min}^{-1}$ hochfahren.
- Zuschalten der ASM bei $U_{\text{sv}} = 0$
- Erhöhen der Spannung U_{sv} auf U_{svN} . Dabei I_{s} beobachten! Übersteigt I_{s} den Leerlaufstrom I_{s0} , ist die Drehrichtung falsch!

Durch Verändern des Drehzahlsollwertes kann der Bemessungsstrom der Asynchronmaschine im Motor- bzw. Generatorbetrieb eingestellt werden, wobei $U_{\text{sv}} = U_{\text{svN}}$ erforderlichenfalls am Stelltransformator nachgestellt werden soll. Bei $U_{\text{sv}} = U_{\text{svN}}$ und $I_{\text{s}} = I_{\text{sN}}$ werden die folgende Größen jeweils für Motor- und Generatorbetrieb gemessen:

- Drehzahl n
- Wellendrehmoment M_{s}
- Elektrische Leistung $P_{\text{e,in}}$

Die Messergebnisse sind in die Tabelle 3 einzutragen.

Tabelle 3: Messtabelle für Bemessungspunkte im Motor- und Generatorbetrieb

		Motorbetrieb	Generatorbetrieb
c_{v}	V/Skt		
U_{sv}	Skt		
\ddot{u}_{I}	A/Skt		
I_{s}	Skt		
$U_{\text{Watt,N}}$	V		
α_1	Skt		
α_2	Skt		
n	1/min		
M_{s}	Nm		

9.6. Belastungsversuch bei verminderter Spannung

Die Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie soll im gesamten zulässigen Drehzahlbereich (Motor- und Generatorbetrieb!) durchfahren werden. Um den zulässigen Ständerstrom nicht zu überschreiten, wird die Spannung vermindert auf

$$U_{sv} = 100 \text{ V} = \text{konst.}$$

Der zulässige Drehzahlbereich ist $-2000 \text{ min}^{-1} \leq n \leq 2000 \text{ min}^{-1}$. Diese Grenzwerte dürfen auf keinen Fall überschritten werden, da sonst die Maschinen durch die Fliehkräfte zerstört werden könnten.

ACHTUNG! Im Drehzahlbereich von $-300 \text{ min}^{-1} \leq n \leq +300 \text{ min}^{-1}$ treten wegen einer resonanten mechanischen Schwingungsanregung starke Geräusche auf. Diese Drehzahlen sind zu meiden bzw. rasch zu durchfahren!

Die Messergebnisse sind in die Tabelle 4 einzutragen.

Tabelle 4: Messtabelle für Belastungsversuch bei verminderter Spannung, Läufer kurzgeschlossen ($R_v = 0 \Omega$)

Messpunkte	n	M_s	\ddot{u}_l	I_s	$U_{\text{Watt,N}}$	α_1	α_2
	1/min	Nm	A/Skt	Skt	V	Skt	Skt
1.	2000						
2.	1900						
3.	1700						
4.	1600						
5.	1550						
6.	1500						
7.	1450						
8.	1400						
9.	1300						
10.	1200						
11.	1100						
12.	1000						
13.	800						
14.	600						
15.	400						
16.	-400						
17.	-600						
18.	-900						
19.	-1500						
20.	-2000						

9.7. Belastungsversuch mit zusätzlichem Läuferwiderstand

Die Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie ist wie unter 9.6. bei verminderter Spannung $U_{sv} = 100 \text{ V}$, jedoch mit zusätzlichem Läuferwiderstand im zulässigen Drehzahlbereich aufzunehmen. Hierzu ist der Anlasswiderstand in **Stellung 8** zu bringen. Die Messergebnisse sind in die Tabelle 5 einzutragen.

Tabelle 5: Messtabelle für Belastungsversuch mit zusätzlichem Läuferwiderstand.

Messpunkte	n	M_s	\ddot{u}_I	I_s	$U_{Watt,N}$	α_1	α_2
	1/min	Nm	A/Skt	Skt	V	Skt	Skt
1.	2000						
2.	1900						
3.	1700						
4.	1600						
5.	1550						
6.	1500						
7.	1450						
8.	1400						
9.	1300						
10.	1200						
11.	1100						
12.	1000						
13.	800						
14.	600						
15.	400						
16.	-400						
17.	-600						
18.	-900						
19.	-1500						
20.	-2000						

10. Ausarbeitung (10 Punkte)

Alle eingesetzten Maschinen und Messgeräte sind am Anfang der Ausarbeitung aufzulisten. (0,15 Punkte)

10.1. Leerlauf-Versuch

a) Kennlinien

Die Kennlinien sind auf Millimeterpapier zu zeichnen. In der Ausarbeitung wird **immer** die **Phasen-spannung** U_s verwendet! Die Rechenwege und Ergebnisse sind darzustellen und begründen (0,15 Punkte).

1. Die Leerlaufkennlinie $U_s = f(I_s)$ aus 9.3. (0,15 Punkte)
2. Die Leerlaufkennlinie $P_{e,in,0} = f(U_s)$ aus 9.3. (0,15 Punkte)
3. Die Leerlaufkennlinie $\cos\varphi_0 = f(U_s)$ aus 9.3. (0,15 Punkte)

b) Ermittlung der Reibungs- und Ummagnetisierungsverluste aus dem Leerlaufversuch

Zur Trennung von Reibungs- und Ummagnetisierungsverlusten trägt man die bei verschiedenen Spannungen U_s ermittelten Verluste P_{Fe+R} als Funktion von U_s^2 auf (Bild V3). Da die Ummagnetisierungsverluste zum Quadrat der Statorspannung proportional sind, die Reibungsverluste (Lager- und Luftreibung sowie Lüfteraufnahmeleistung) aber wegen der nahezu unveränderlichen Drehzahl konstant sind (spannungsunabhängig), findet man letztere als Achsenabschnitt bei $U_s^2 = 0$.

Eine Tabelle zur Trennung der Stromwärmeverluste $P_{Cu,s}$ und P_{Fe+R} ist zu erstellen (0,2 Punkte). Die Kennlinie ist in einem Diagramm zu zeichnen. Wieviel Watt an Reibungs- bzw. Ummagnetisierungsverlusten treten bei Bemessungslast auf? Tragen Sie diese Werte im Diagramm $P_{Fe+R} = f(U_s^2)$ ein (0,5 Punkte). Begründen Sie die Ergebnisse (0,15 Punkte).

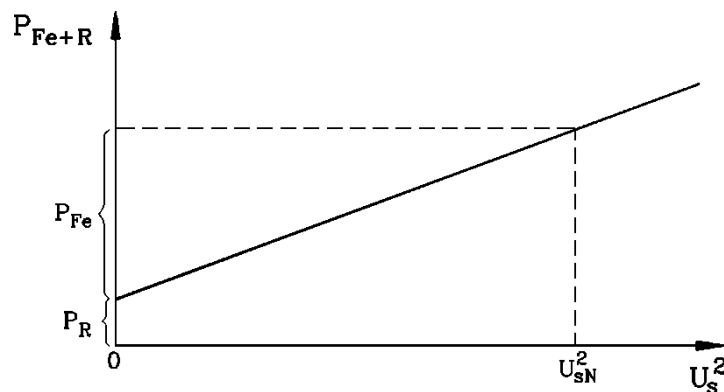


Bild V3: Trennung der Ummagnetisierung- und Reibungsverluste

Zusätzliche Angaben:

Der ohm'sche Gleichstromwiderstand eines Ständerwicklungsstrangs bei $\vartheta_{kalt} = 20^\circ\text{C}$ beträgt $R_s = 0,48\ \Omega$. Der ohm'sche Gleichstromwiderstand eines Rotorwicklungsstrangs bei $\vartheta_{kalt} = 20^\circ\text{C}$ beträgt $R_r = 0,15\ \Omega$. Als Betriebstemperatur nimmt man nach EN 60530 für die verwendete Wärme-kategorie E, $\vartheta_{warm} = 75^\circ\text{C}$ an.

10.2. Kurzschluss-Versuch

a) Kennlinien

Die Kennlinien sind auf Millimeterpapier zu zeichnen. In der Ausarbeitung wird **immer** die **Phasen-spannung** U_s verwendet! Die Rechenwege und Ergebnisse sind darzustellen.

1. Die Kurzschlusskennlinie $I_s = f(U_s)$ aus 9.4. (0,15 Punkte)
2. Die Kurzschlusskennlinie $P_{e,in,1} = f(I_s)$ aus 9.4. (0,15 Punkte)

Begründen Sie die Ergebnisse (0,15 Punkte).

10.3. Konstruktion des Kreisdiagramms 1

Aus den im **Leerlauf-** und **Kurzschlussversuch** gewonnenen Messergebnissen ist das vollständige Kreisdiagramm 1 entsprechend Abschnitt 8.5. einschließlich einer Schlupfgeraden zu konstruieren.

Zur Bewertung sind folgende Punkte zu beachten:

1. Berechnen und Zeichnen von P_0 (0,4 Punkte)
2. Berechnen und Zeichnen von P_1 , berechnen Sie dabei $\ddot{u}_U = \frac{N_s}{N_r}$ (0,4 Punkte),
3. Bestimmung des Kreismittelpunkts (0,2 Punkte)
4. Berechnen des Impedanzmaßstabs (0,4 Punkte)
5. Bestimmung von P_∞ (0,3 Punkte)
6. Konstruktion der Schlupfgeraden (0,4 Punkte)

10.4. Eintragen der Bemessungspunkte im Kreisdiagramm 1

Die unter 9.5. gemessenen Ströme im Motor- und Generatorbetrieb ($I_{sN,Mot,mess}$ und $I_{sN,Gen,mess}$) sind in das Kreisdiagramm einzuzeichnen (0,4 Punkte).

Die entsprechenden theoretischen Werte auf dem Kreisdiagramm ($I_{sN,Mot,theo}$ und $I_{sN,Gen,theo}$) sind zu markieren (0,4 Punkte). Hinweis: Die theoretischen Werte liegen auf dem Kreisdiagramm bei Bemessungsstrom.

Die gemessenen Werte für $\cos \varphi$, n , M_s und $P_{e,in}$ im Motor- und Generatorbetrieb sind mit den theoretisch aus dem Kreisdiagramm ermittelten sowie mit den angegebenen Bemessungsdaten (Typenschild) kritisch in einer Tabelle zu vergleichen (0,75 Punkte). Die Abweichungen sind zu diskutieren (0,2 Punkte).

Tabelle: Vergleich der Messwerte mit dem Werten aus dem Kreisdiagramm

	$P_{Mot,mess}$	$P_{Mot,theo}$	$P_{Gen,mess}$	$P_{Gen,theo}$	Typenschild
I [A]					
n [min^{-1}]					
M_m [Nm]					
s					
P_e [W]					
$\cos(\varphi)$					

10.5. Belastungsversuch bei verminderter Spannung

a) Kennlinien

Die Kennlinien sind auf Millimeterpapier zu zeichnen. Die Rechenwege und Ergebnisse sind darzustellen.

1. Die aufgenommenen Kennlinien $I_s = f(n)$ aus 9.6. und 9.7. sind in einem Diagramm zu zeichnen. (0,2 Punkte)

2. Die aufgenommenen Kennlinien $M_s = f(n)$ aus 9.6. und 9.7. sind in einem Diagramm zu zeichnen. (0,2 Punkte)

b) Kreisdiagramm 2 für verminderte Spannung

Die Ortskurve des Ständerstromes $I_s = f(s)$ bei $U_{sv} = 100$ V ist als Verbindungskurve der unter 9.6. gemessenen Stromzeigerspitzen zu zeichnen (0,5 Punkte). Hierzu ist eine Konstruktion nach 8.5. **nicht** erforderlich! Weiterhin sind in diese Ortskurve die unter 9.7 gemessenen Ströme einzuzeichnen und besonders zu kennzeichnen (0,5 Punkte). Die beiden Punktmengen sind zu vergleichen und der Unterschied ist zu diskutieren (0,2 Punkte).

10.6. Eintragen der Kipp-Punkte im Kreisdiagramm 1

Aus den unter 9.6. gemessenen Kennlinien sind die Werte

$$I_{sb} = f(n) \quad \text{und} \quad M_b = f(n)$$

für Motor- und Generatorbetrieb zu entnehmen und entsprechend

$$I_s \sim U_s \quad \text{bzw.} \quad M_e \sim U_s^2$$

auf Bemessungsspannung umzurechnen (0,4 Punkte). Nehmen Sie dabei an, dass das Luftspaltdrehmoment näherungsweise dem gemessenen Wellendrehmoment entspricht ($M_e \approx M_s$). Die umgerechneten Werte ($I_{sb,Mot,mess}$ und $I_{sb,Gen,mess}$) sind in das Kreisdiagramm einzuzeichnen (0,4 Punkte). Die theoretischen Werte ($I_{sb,Mot,theo}$ und $I_{sb,Gen,theo}$) sind ebenfalls auf dem Kreisdiagramm einzuzeichnen (0,4 Punkte). Die gemessenen Kippmomente sind mit den aus dem Kreisdiagramm entnehmbaren Werten in einer Tabelle zu vergleichen (0,5 Punkte). Die Abweichungen sind zu diskutieren (0,2 Punkte).

Tabelle: Gemessene und abgelesene Werte im Kipp-Punkt

	Motor		Generator	
	Gemessen	Kreisdiagramm	Gemessen	Kreisdiagramm
I_b [A]				
M_b [Nm]				

10.7. Form der Ausarbeitung

Die Form der Ausarbeitung wird auch bewertet (1,0 Punkte).

11. Verständnisfragen

1. In welchem Zusammenhang stehen die Statorfrequenz und die Synchrondrehzahl einer elektrischen Drehfeldmaschine?
2. Wie groß ist die Polpaarzahl p einer Asynchronmaschine mit einer Nenndrehzahl von $n_N = 740 \text{ min}^{-1}$ bei einer Netzfrequenz von $f_N = 50 \text{ Hz}$?
3. Geben Sie die Definition des Schlupfs s einer Asynchronmaschine an!
4. Wie ändert sich der Schlupf durch einen Zusatzwiderstand im Läuferkreis einer Asynchronmaschine (formelmäßig)?
5. Bei welchem Schlupf arbeitet die ASM als Gegenstrombremse/Motor/Generator? Geben Sie jeweils die untere und obere Intervallgrenze für den Schlupf an!
6. Bestimmen Sie die Frequenz f_r der im Läuferkäfig induzierten Spannung für einen Schlupf $s = 0,04$ bei der Statorfrequenz $f_s = 50 \text{ Hz}$!
7. Wie lässt sich bei der Asynchronmaschine eine Drehzahleinstellung durchführen? Nennen Sie drei Möglichkeiten!
8. Zeichnen Sie die Kennlinie $M_e = f(n)$ einer Asynchronmaschine für den Bereich $-1 \leq s \leq 2$ bei kurzgeschlossenem Läufer und zusätzlichen Läuferwiderständen!
9. Zeichnen Sie die Kennlinie $I_s = f(n)$ einer Asynchronmaschine für den Bereich $-1 \leq s \leq 2$ bei kurzgeschlossenem Läufer und zusätzlichen Läuferwiderständen!
10. Bestimmen Sie das Bemessungsmoment einer netzbetriebenen Käfigläufer-Asynchronmaschine mit der Bemessungsleistung $P_N = 21 \text{ kW}$ und der Bemessungsdrehzahl $n_N = 970 \text{ min}^{-1}$!
11. Wie ändert sich der Wert des Statorwiderstands R_s bei steigender Temperatur (formelmäßig)?
12. Welcher Betriebspunkt der Asynchronmaschine wird Kurzschluss genannt?
13. Geben Sie den Leistungsfluss für Motorbetrieb in der Asynchronmaschine an! Wie ändert sich der Leistungsfluss, wenn der Motor im Leerlauf betrieben wird?
14. Zeichnen Sie das T-Ersatzschaltbild einer Asynchronmaschine mit kurzgeschlossenem Läuferkreis! Berücksichtigen Sie auch die Ummagnetisierungsverluste!
15. Skizzieren Sie das Kreisdiagramm der ASM für $R_s = 0$ (Heyland-Kreis)! Beschriften Sie die reelle und die imaginäre Achse sowie die Drehmoment- und Leistungsgerade!

12. Weiterführende Literatur („Klassiker zur Asynchronmaschine“):

- [1] Nürnberg, W.; Hanitsch, R.: Die Prüfung elektrischer Maschinen, Springer, Berlin, 2001, 7. Auflage
- [2] Bödefeld, Th.; Sequenz, H.: Elektrische Maschinen, Springer, Wien, 8. Auflage, 1971
- [3] Fischer, R.: Elektrische Maschinen, Hanser, München, 13. Auflage, 2006
- [4] Müller, G.; Ponick, B.: Elektrische Maschinen, 3: Theorie elektrischer Maschinen, Wiley-VCH-Verlag, 2009
- [5] Müller, G.; Ponick, B.: Elektrische Maschinen, 1: Grundlagen elektrischer Maschinen, Wiley-VCH-Verlag, 2005
- [6] Binder, A.: Elektrische Maschinen und Antriebe, Springer, Heidelberg, 2012
- [7] Binder, A.: Elektrische Maschinen und Antriebe - Aufgabensammlung, Springer, Heidelberg, 2012
- [8] Binder, A.: Kolleg „Elektrische Maschinen und Antriebe“, TU Darmstadt, 2013
- [9] Jordan, H.; Klima, V.; Kovacs, K.P.: Die Asynchronmaschine, Vieweg, 1975
- [10] Nürnberg, W.: Die Asynchronmaschine, Springer, Berlin, 1976