

Energietechnisches Praktikum



Stationäres Betriebsverhalten der Asynchronmaschine (ASM)



ETI
Elektrotechnisches Institut

Stand: 17.10.2016

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Erläuterungen	2
2.1. Aufbau des Asynchronmotors	2
2.2. Drehfeld	2
2.3. Wirkungsweise des Asynchronmotors	3
2.4. Ersatzschaltbild und Spannungsgleichungen der Asynchronmaschine	4
2.5. Wirkleistung und Drehmoment	5
2.6. Leistungs- und Drehmomentkennlinien	7
2.7. Blindleistung	9
2.8. Spannungsabhängigkeit	10
2.9. Stern-Dreieck-Anlaßschaltung	10
2.10. Verluste und Wirkungsgrad	12
2.10.1. Aufteilung der Verluste	12
2.10.2. Ermittlung des Wirkungsgrades	13
2.11. Leistungsmessung mit der Aronschaltung	14
3. Versuchsanleitung	18
3.1. Versuchsaufbau	18
3.2. Typenschild	18
3.2.1. Auswertung des Typenschildes	19
3.3. Versuche	20
3.3.1. Belastungskennlinien	20
3.3.2. Kippmoment	22
3.3.3. Anzugsmomente bei Stern- und Dreieckschaltung	23
3.3.4. Leerlaufversuch zur Bestimmung der Eisen- und Reibungsverluste	26
3.3.5. Bestimmung der Zusatzverluste	27
A. Abkürzungen in dieser Anleitung	36
A.1. Formelzeichen	36
A.2. Indices	36
B. Fragen zum Versuch AM	37
C. Abbildungsverzeichnis	38
D. Literaturverzeichnis	38

1. Einleitung

Die Drehstrom-Asynchronmaschine ist die am weitesten verbreitete elektrische Antriebsmaschine mit einem Marktanteil von über 50% [1]. Sie wird beispielsweise zum Antrieb von Lüftern, Pumpen, Hebezeugen, Zentrifugen, Kreissägen, Kompressoren usw. verwendet. In der häufigsten Bauform mit Kurzschlussläufer ist sie die billigste und wartungsärmste elektrische Maschine überhaupt. Mit nahezu 100%-iger Sicherheit wird ein un geregelter Antrieb größer 2kW in einer Industrieanlage oder in einem Handwerksbetrieb von einer Drehstrom-Asynchronmaschine mit Kurzschlussläufer angetrieben. Dagegen ist die Bedeutung als Generator, sieht man von wenigen Sonderfällen ab, sehr gering. Der Leistungsbe reich von Drehstrom-Asynchronmaschinen erstreckt sich von wenigen Watt bis weit in den Megawatt-Bereich. In Einzelfällen wurden Leistungen von ca. 80 MW realisiert [1]. Mit der Entwicklung leistungsstarker und schneller Stromrichter elemente erschließt sich auch das Gebiet der geregelten Antriebe, das früher der Gleichstrommaschine vorbehalten war. In den nachfolgenden Versuchen soll das charakteristische Betriebsverhalten der Drehstrom-Asynchronmaschine mit Kurzschlussläufer bei Belastung, beim Anlauf, bei Überlast und im Leerlauf untersucht werden.

2. Erläuterungen

2.1. Aufbau des Asynchronmotors

Der Induktionsmotor besteht aus Ständer und Läufer. In den Ständernuten sind die drei räumlich gegeneinander am 120° el. versetzten Wicklungsstränge untergebracht, während sich im Läufer im allgemeinen ein Kurzschlußkäfig (Käfigläufermotor) befindet. Beim Schleifringläufermotor wird auch hier eine dreisträngige Drehstromwicklung mit Anschluß über Schleifringe und Bürsten verwendet. Im Luftspalt zwischen Stator und Rotor bildet sich das umlaufende Drehfeld aus.

2.2. Drehfeld

Voraussetzung für ein symmetrisches Drehstromsystem sind drei sinusförmige Spannungen gleicher Amplituden, die gegenseitig zeitlich um den Winkel $2\pi/3$ phasenverschoben sind.

$$u_R = \sqrt{2} \cdot U \cdot \cos(\omega t) \quad (2.1)$$

$$u_S = \sqrt{2} \cdot U \cdot \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.2)$$

$$u_T = \sqrt{2} \cdot U \cdot \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (2.3)$$

Diese werden an die Klemmen einer symmetrischen Drehstromwicklung angeschlossen, deren Stränge räumlich um 120° el. gegeneinander versetzt sind ($\gamma_{el} = p \cdot \gamma_{mech}$). Die in den Strängen fließenden Ströme erregen im Luftspalt ein resultierendes magnetisches Feld, das sich - wenn nur die Grundwelle der räumlichen Feldverteilung berücksichtigt wird - durch die folgende Abhängigkeit der magnetischen Flußdichte von Ort (x) und Zeit (t) beschreiben läßt.

$$B(x, t) = \hat{B} \cos\left(\omega_{syn} t - \frac{x}{\tau_p} \pi\right) \quad (2.4)$$

Dies ist die mathematische Form einer im Luftspalt räumlich umlaufenden Welle. Die Geschwindigkeit läßt sich folgendermaßen berechnen. Der Cosinus-Term wird nach x aufgelöst

$$x = \frac{\omega_{\text{syn}} t \cdot \tau_{\text{p}}}{\pi} \quad (2.5)$$

und danach nach der Zeit differenziert

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{\omega_{\text{syn}} t \cdot \tau_{\text{p}}}{\pi} = \omega_{\text{syn}} \frac{\tau_{\text{p}}}{\pi} = 2\pi f_{\text{syn}} \cdot \frac{\tau_{\text{p}}}{\pi} = 2 \cdot n_{\text{syn}} \cdot p \cdot \tau_{\text{p}} \quad (2.6)$$

2.3. Wirkungsweise des Asynchronmotors

Die Oberfläche des Läufers mit kurzgeschlossener Wicklung nimmt diese Geschwindigkeit im theoretischen Leerlauf (Reibungs- u. Lüfterverluste vernachlässigt) an, wobei das umlaufende Drehfeld im Läuferkreis keine Spannung induziert, in dieser Wicklung also kein Strom fließt und somit kein Drehmoment entsteht.

Beim Abbremsen der Maschine auf eine niedrigere Drehzahl $n < n_{\text{S}}$ rotiert das Drehfeld gegenüber dem Läufer mit der Relativedrehzahl $n_{\text{S}} - n$. Wegen der jetzt in der Läuferwicklung auftretenden Flußänderung werden in ihr Wechselfrequenzen der Frequenz $f_{\text{R}} = s f_{\text{S}}$ induziert (meßbar nur bei offener Schleifringwicklung), deren Effektivwerte dem Schlupf

$$s = \frac{n_{\text{syn}} - n}{n_{\text{syn}}} \quad (2.7)$$

proportional sind. Als Folge fließen in der kurzgeschlossenen Läuferwicklung Ströme, deren Größe im Bereich $0 < s < s_{\text{K}}$ in erster Linie vom ohmschen Widerstand bestimmt wird (Reaktanz klein wegen niedriger Frequenz f_{R}). Im Zusammenwirken dieser Läuferströme mit dem resultierenden Drehfeld entsteht ein Drehmoment.

Beim Schlupf $s > s_{\text{K}}$ überwiegt der frequenzabhängige (schlupfproportionale) Streublindwiderstand $s \cdot X'_{\text{R}\sigma}$ ($X'_{\text{R}\sigma}$: Läuferstreureaktanz bezogen auf den Stator) der Läuferwicklung gegenüber dem ohmschen Widerstand R_{R} und begrenzt schließlich den Strom. Durch das Anwachsen des Blindanteiles der Läuferimpedanz vergrößert sich die Phasenverschiebung zwischen dem Läuferstrom I_{R} und der vom Drehfeld induzierten Spannung mit dem Schlupf. Sobald der Phasenwinkel 45° erreicht ist, nimmt das Drehmoment nach Erreichen des Maximalwertes (Kippmoment M_{K}) trotz der weiteren Zunahme des Stromes wieder ab (Bild 2.1).

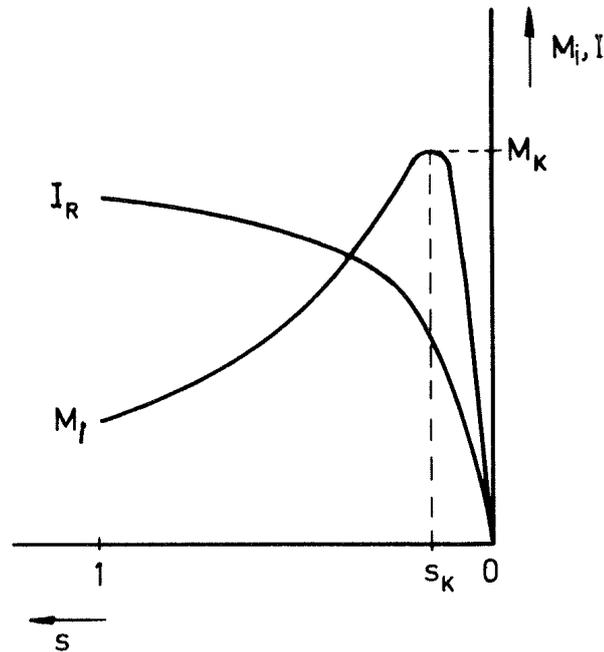


Abbildung 2.1.: Verlauf des inneren Drehmomentes und des Rotorstromes als Funktion des Schlupfes eines stromverdrängungsfreien Asynchronmotors

2.4. Ersatzschaltbild und Spannungsgleichungen der Asynchronmaschine

In Bild 2.2 sind die Stromkreise von Ständer und Läufer für stationären symmetrischen Betrieb in einem zusammenhängenden Ersatzschaltbild dargestellt, wobei der Läuferkreis auf die Frequenz f_s und die wirksame Windungszahl des Ständers umgerechnet ist. Weiterhin wird für die Gültigkeit dieses Ersatzschaltbildes vorausgesetzt:

- Das Feld im Luftspalt sei sinusförmig
- Die magnetische Spannung im Eisen wird zu Null angenommen. Der magnetische Spannungsabfall im Eisen wird pauschal durch Vergrößerung des Luftspaltes berücksichtigt. Aus $H_{Fe} = 0$ folgt, daß somit keine Hystereseverluste auftreten und die Induktivitäten stromunabhängig sind.
- Wirbelstromverluste werden vernachlässigt
- Die ohmschen Widerstände seien temperaturunabhängig.

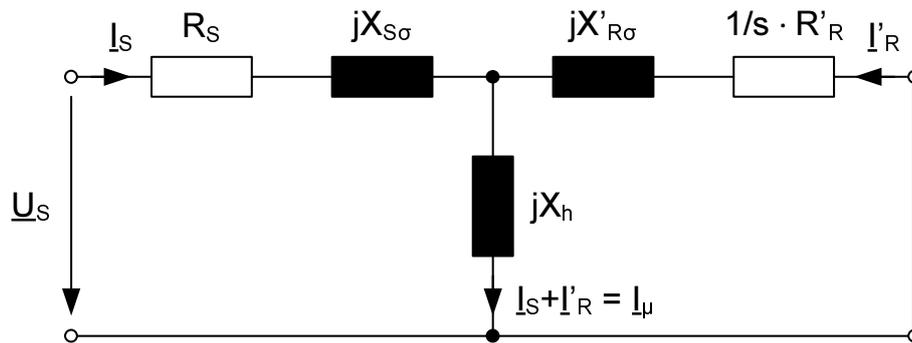


Abbildung 2.2.: Umgezeichnetes Ersatzschaltbild der Drehstrom-Asynchronmaschine

- Stromverdrängung wird nicht berücksichtigt.

Mit

$$X_S = X_{S\sigma} + X_h = \omega L_{S\sigma} + \omega L_h \quad (2.8)$$

und

$$X'_R = X'_{R\sigma} + X_h = \omega L'_{R\sigma} + \omega L_h \quad (2.9)$$

lauten die Spannungsgleichungen des Ersatzschaltbildes:

$$\underline{U}_S = (R_S + jX_S) \cdot \underline{I}_S + jX_h \cdot \underline{I}'_R \quad (2.10)$$

$$0 = jX_h \cdot \underline{I}_S + \left(\frac{R'_R}{s} + jX'_R \right) \cdot \underline{I}'_R \quad (2.11)$$

U_S und I_S sind Stranggrößen!

Aus diesen Gleichungen läßt sich das Verhalten des Induktionsmotors im stationären Betrieb, d.h. für ein symmetrisches Statorspannungssystem sowie stationäre Belastung (konstante Drehzahl) näherungsweise ableiten.

2.5. Wirkleistung und Drehmoment

Mit Hilfe der Spannungsgleichungen und der allgemeinen Beziehung für die komplexe Scheinleistung \underline{S}

$$\underline{S} = 3\underline{U} \cdot \underline{I}^* = P + jQ \quad (2.12)$$

läßt sich die von der Asynchronmaschine dem Netz entnommene Wirkleistung P_S berechnen

$$P_S = \Re \{3\underline{U}_S \underline{I}_S^*\} = 3U_S I_S \cos \varphi = 3R_S I_S^2 + 3\frac{R'_R}{s} I_R^2 = P_{VS} + P_D \quad . \quad (2.13)$$

$$P_{VS} = 3R_S I_S^2 \quad (2.14)$$

ist die in der Ständerwicklung in Wärme umgesetzte Verlustleistung und

$$P_D = 3\frac{R'_R I_R^2}{s} \quad (2.15)$$

die vom Ständer über das Drehfeld auf den Läufer übertragene Wirkleistung (Drehfeldleistung). Nach Abzug der in der Läuferwicklung auftretenden Stromwärmeverluste

$$P_{VR} = 3R'_R I_R^2 = sP_D \quad (2.16)$$

von der Drehfeldleistung verbleibt die innere mechanische Leistung $P_{\text{mech},i}$ (einschließlich der Lager- u. Luftreibungsverluste):

$$P_{\text{mech},i} = P_D - P_{VR} = 3R'_R I_R^2 \left(\frac{1}{s} - 1 \right) = 3\frac{R'_R}{s} I_R^2 (1 - s) = (1 - s)P_D \quad (2.17)$$

Bei Vernachlässigung der Lager- u. Luftreibungsverluste ist $P_{\text{mech},i} = P_{\text{mech}}$, also gleich der an der Welle des Motors zur Verfügung gestellten Antriebsleistung.

Für die Drehfeldleistung gilt somit die Beziehung

$$P_D = P_{\text{mech},i} + P_{VR} = (1 - s)P_D + sP_D \quad . \quad (2.18)$$

Im Ersatzschaltbild 2.2 kann demnach der eingezeichnete Rotorwiderstand $1/s \cdot R'_R$ aufgeteilt werden in einen Teil $(1/s - 1)R'_R$, an dem die innere mechanische Leistung abfällt und einen Teil R'_R , an dem die Stromwärmeverluste der Rotorwicklung abfallen.

Im Stillstand ($s=1$) ist die mechanisch abgegebene Leistung gleich Null, und die gesamte zugeführte elektrische Leistung wird im Rotor in Wärme verwandelt. Daher ist die Rotorwicklung bei blockierter Maschine oder bei sehr langsamem Hochlauf (großes Schwungmoment, z.B. Zentrifuge) thermisch stark gefährdet.

Das auf den Läufer der Asynchronmaschine ausgeübte innere Drehmoment M_i ergibt sich aus der inneren mechanischen Leistung und der Winkelgeschwindigkeit.

$$M_i = \frac{P_{\text{mech},i}}{\Omega} \quad (2.19)$$

Der aus der Definition des Schlupfes abgeleiteten Beziehung zwischen den Drehzahlen

$$n = (1 - s)n_{\text{syn}} \quad (2.20)$$

entspricht

$$\Omega = (1 - s)\Omega_{\text{syn}} \quad . \quad (2.21)$$

Damit wird

$$M_i = \frac{P_{\text{mech},i}}{(1 - s)\Omega_S} = \frac{P_D}{\Omega_S} \quad . \quad (2.22)$$

Das Drehmoment ist also bei konstanter Statorfrequenz der Drehfeldleistung proportional.

2.6. Leistungs- und Drehmomentkennlinien

In Bild 2.3 sind die Drehfeldleistung P_D , die innere mechanische Leistung $P_{\text{mech},i}$ und die Stromwärmeverlustleistung P_{VR} , alle bezogen auf den Maximalwert der Drehfeldleistung (Kippdrehfeldleistung P_{DK}), in Abhängigkeit vom Schlupf bzw. von der Drehzahl aufgetragen.

Wegen der Beziehung $P_D = M \cdot \Omega_{\text{syn}}$ ist die Kennlinie $P_D/P_{\text{DK}} = f(s)$ identisch mit der Drehmomentkennlinie $M_i/M_K = f(s)$.

Die Drehfeldleistung, bezogen auf die Kippdrehfeldleistung, ist für $s = s_K$ und $s = -s_K$ nur unter der Voraussetzung $R_S = 0$ gleich groß. Normalerweise ist

$$\frac{P_D}{P_{\text{DK}}}(s = -s_K) > \frac{P_D}{P_{\text{DK}}}(s = s_K) \quad . \quad (2.23)$$

Folgende Betriebspunkte sind hervorzuheben:

$s = 0$ Synchroner Lauf mit $n = n_{\text{syn}}$, die Drehfeldleistung und das Drehmoment sind Null.

Die aufgenommene elektrische Leistung sind die durch den Erregerstrom in der Sta-

- Motorbereich

Die Drehfeldleistung deckt die mechanische Leistung und die Stromwärmeverluste in der Läuferwicklung:

$$|P_D| = |P_{\text{mech},i}| + |P_{\text{VR}}| \quad . \quad (2.24)$$

- Generatorbereich (übersynchroner Bereich)

Der Läufer wird so angetrieben, daß er übersynchron läuft. Sowohl $P_{\text{mech},i}$ als auch P_D werden negativ, die Energierichtung dreht sich um. Die innere mechanische Leistung deckt hier die Verluste im Läufer und die an den Ständer weitergegebene Drehfeldleistung

$$|P_{\text{mech},i}| = |P_D| + |P_{\text{VR}}| \quad . \quad (2.25)$$

Nach Abzug der Verluste im Ständer wird Wirkleistung an das Drehstromnetz abgegeben.

- Gegenstrombremsbereich

Der Läufer wird entgegen dem Drehfeld angetrieben, sowohl das Netz als auch die Arbeitsmaschine liefern an die Maschine (Wirk-)Leistung, die - abgesehen von den Verlusten im Stator - im Rotor in Wärme umgesetzt wird.

$$|P_{\text{VR}}| = |P_D| + |P_{\text{mech},i}| \quad . \quad (2.26)$$

2.7. Blindleistung

Auch der Blindleistungsbedarf der Asynchronmaschine läßt sich mit Hilfe der Spannungsgleichungen und der Beziehung

$$Q = \Im \{3\underline{U}_S \underline{I}_S^*\} = 3U_S I_S \sin \varphi \quad (2.27)$$

berechnen. Q setzt sich aus der Magnetisierungsblindleistung und der mit den Streufeldern verbundenen Blindleistung zusammen.

2.8. Spannungsabhängigkeit

Bei einem bestimmten Wert des Schlupfes ist der Statorstrom direkt proportional der Statorspannung und das innere Drehmoment proportional dem Quadrat von U_S .

$$I_S \sim U_S, \quad M_i \sim U_S^2 \quad \text{bei } s = \text{const.} \quad (2.28)$$

2.9. Stern-Dreieck-Anlaßschaltung

Im Stillstand verhält sich der Asynchronmotor ähnlich einem Transformator mit kurzgeschlossener Sekundärwicklung (vergleiche Ersatzschaltbild, Bild 2.2 für $s = 1$). Der Term $1/s \cdot R'_R$ wird klein im Vergleich zum Nennbetrieb. Beim Einschalten treten daher hohe Ströme auf, vor denen das Netz gegebenenfalls geschützt werden muß.

Eine Möglichkeit, den Anzugsstrom herabzusetzen, ist das Anlassen mit Stern - Dreieck - Umschaltung. Die Maschine muß hierbei für Dreieckschaltung bei Nennspannung ausgelegt sein. Zum Anschluß an ein 400 V - Drehstromnetz also für Y/ Δ 690/400 V bzw. für Δ 400 V.

Beim Einschalten des Motors in Sternschaltung liegt gegenüber dem normalen Betriebszustand (Dreieck) am Wicklungsstrang nur die $1/\sqrt{3}$ -fache Nennspannung an, wodurch der Strangstrom ebenfalls auf das $1/\sqrt{3}$ -fache reduziert wird. Der Netzstrom ist gleich dem Strangstrom, so dass die Umschaltung für das Netz eine Herabsetzung des Anzugsstromes auf ein Drittel bedeutet (Bild 2.4 und 2.5).

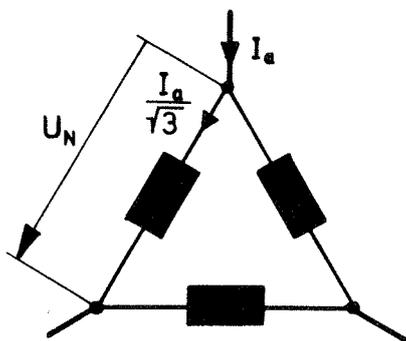


Abb. 2.4.: Dreieckschaltung der Drehstrom-Asynchronmaschine

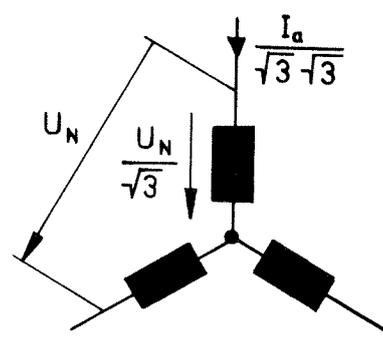


Abb. 2.5.: Sternschaltung der Drehstrom-Asynchronmaschine

Allerdings geht wegen 2.8 das Anzugsdrehmoment ebenfalls auf etwa ein Drittel zurück. Das Stern - Dreieck - Anlaßverfahren ist daher nur bei entsprechend niedrigen Gegenmomenten im Hochlaufbereich anwendbar (siehe Bild 2.6), z.B. bei leer anlaufenden Werkzeugmaschinen. Nach Erreichen einer stationären Drehzahl in Sternschaltung wird auf Dreieck umgeschaltet. Dabei tritt eine gegenüber dem direkten Einschalten erheblich verringerte Stromspitze auf. Bild 2.6 zeigt die Stern-Dreieck-Umschaltung für einen stromverdrängungsbehafteten Asynchronmotor. Wegen des höheren Lastmoments ist das Anlaufverhalten im rechten Bild ungünstiger. Das Umschalten erfolgt in der Nähe des Kipp-schlupfs, wodurch der auftretende Netzstrom noch das Dreifache des Nennstroms beträgt.

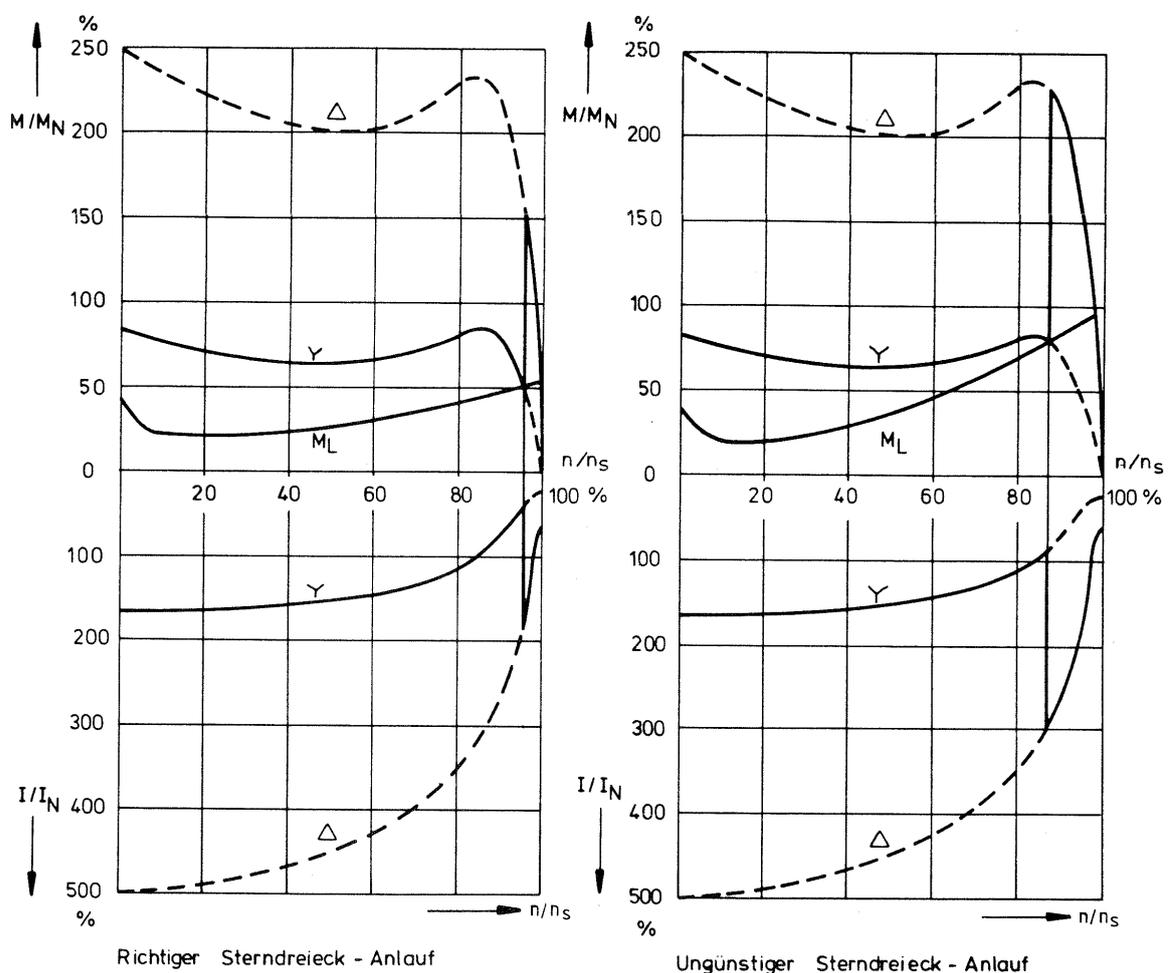


Abbildung 2.6.: Drehmoment-Kennlinie der Drehstrom-Asynchronmaschine beim Anlauf in Stern- und Dreieckschaltung

In der Praxis existieren heute weltweit in Industrieanlagen hinreichend starke Netze und die zulässigen Einschaltströme werden in den entsprechenden Normen, z.B. IEC 60034 Teil 12, begrenzt. Daher wird der Schaltaufwand für das Y-D Verfahren eher bei Motoren größerer Leistung betrieben.

2.10. Verluste und Wirkungsgrad

In diesem Versuch wird der Wirkungsgrad aus dem Verhältnis von abgegebener Leistung zu aufgenommener Leistung berechnet. Für die möglichst exakte Bestimmung des Wirkungsgrades ist diese Methode zu ungenau. Bei der Prüfung elektrischer Maschinen wird die nach DIN EN 60034 Teil 2 angegebene Meßmethode nach dem Einzelverlustverfahren angewendet (indirekte Wirkungsgradbestimmung).

Hiernach berechnet sich der Wirkungsgrad aus

$$\eta = 1 - \frac{\sum P_V}{P_{ab} + \sum P_V} = \frac{P_S - \sum P_V}{P_S} \quad (2.29)$$

2.10.1. Aufteilung der Verluste

- Konstante Verluste
 - Verluste im aktiven Eisen und Leerlauf-Zusatzverluste in anderen metallenen Teilen
 - Reibungsverluste durch Lager und Bürsten, wenn die Bürsten während des Betriebes nicht abgehoben werden. Verluste eines getrennten Schmierungssystems werden, sofern verlangt, gesondert ausgewiesen.
 - Gesamte Lüftungsverluste der Maschine. Verluste eines getrennten Belüftungssystems (nicht von der Maschinenwelle angetrieben) werden, sofern verlangt, gesondert ausgewiesen.
- Lastabhängige Verluste
 - Stromwärmeverluste in der Ständerwicklung
 - Stromwärmeverluste in der Rotorwicklung
 - Elektrische Verluste an den Bürsten (falls vorhanden)

- Lastabhängige Zusatzverluste¹
 - Bei Last auftretende Zusatzverluste im aktiven Eisen und anderen metallenen Teilen, ausgenommen stromführende Leiter
 - Wirbelstromverluste in den Leitern der Stator- und Rotorwicklung, verursacht durch stromabhängige Änderung des Streufeldes

2.10.2. Ermittlung des Wirkungsgrades

- Konstante Verluste (Leerlaufversuch als Motor bei Nennspannung)

Die Summe der konstanten Verluste wird durch Motorbetrieb der Maschine im Leerlauf ermittelt. Die Maschine wird bei Nennspannung und Nennfrequenz betrieben. Die aufgenommene Wirkleistung abzüglich der Stromwärmeverluste in der Statorwicklung ergibt die Summe der konstanten Verluste. Die Stromwärmeverluste in der Rotorwicklung können vernachlässigt werden.
- Lastabhängige Verluste (Belastungsversuch)

Die lastabhängigen Verluste werden aus den mit Gleichstrom gemessenen, auf die Bezugstemperatur umgerechneten Widerständen der Statorwicklung und dem der Belastung entsprechenden Strom berechnet.

Wenn eine Belastungsprüfung durchgeführt wird, werden zur Ermittlung der Stromwärmeverluste im Rotor, die Rotorwicklungsverluste als Produkt aus dem Schlupf und der gesamten auf die Rotorwicklung übertragenen Leistung angenommen, d.h. der aufgenommenen Leistung abzüglich der konstanten Eisenverluste und der Stromwärmeverluste in der Statorwicklung.
- Lastabhängige Zusatzverluste

Es wird angenommen, daß sich die Lastabhängigen Zusatzverluste quadratisch mit dem Statorstrom ändern und daß der Gesamtwert bei Nennlast 0,5% der Leistungsaufnahme bei Motoren und 0,5% der Leistungsabgabe bei Generatoren beträgt.

¹Diese Verluste werden mitunter allgemein als Zusatzverluste bezeichnet, sie enthalten jedoch nicht die konstanten Leerlauf-Zusatzverluste.

2.11. Leistungsmessung mit der Aronschaltung

Im Versuchsaufbau wird die elektrische Wirkleistung P_S , die von der Maschine aus dem Netz bezogen wird, mit einer Aronschaltung gemäß Bild 2.7 gemessen. Diese Schaltung hat den Vorteil, daß man für die Leistung, die bei beliebiger unsymmetrischer Last über 3 Phasen bezogen wird, nur 2 Meßgeräte benötigt.

Zur Messung werden die Strompfade der beiden Wattmeter in zwei Zuleitungen geschaltet, die Spannungspfade liegen an den entsprechenden Leiterspannungen gegenüber der dritten Zuleitung. Für die Vorzeichenprobe ist ein Tastschalter vorgesehen. Der Leiter S kann

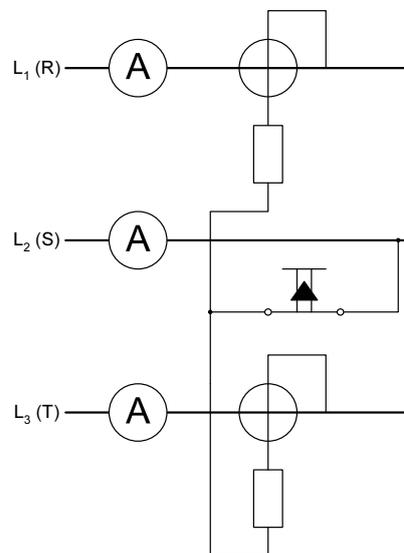


Abbildung 2.7.: Aufbau der Aronschaltung. Die Gesamtleistung wird auch bei unsymmetrischer Last und Vorhandensein von Oberschwingungen genau gemessen.

als Rückleitung für die Ströme i_R und i_T angesehen werden. Die Summe der aus den Leiterspannungen und -strömen gebildeten Teilleistungen $p_1 = u_{RS} \cdot i_R$ bzw. $p_2 = u_{TS} \cdot i_T$ ergibt die Gesamtleistung. Je nach Art der Last setzen sich die Messwerte zusammen zu

$$P = |P_1 \pm P_2| = c \cdot |a_1 \pm a_2| \quad . \quad (2.30)$$

Eine Möglichkeit der Vorzeichenwahl ist, sich an die Stellung der die Ausschlagsrichtung der Wattmeter ändernden Umschalter zu halten. Die einmalige Festlegung der Stellung für positives Vorzeichen erfolgt bei $\cos(\phi) \approx 1,0$.

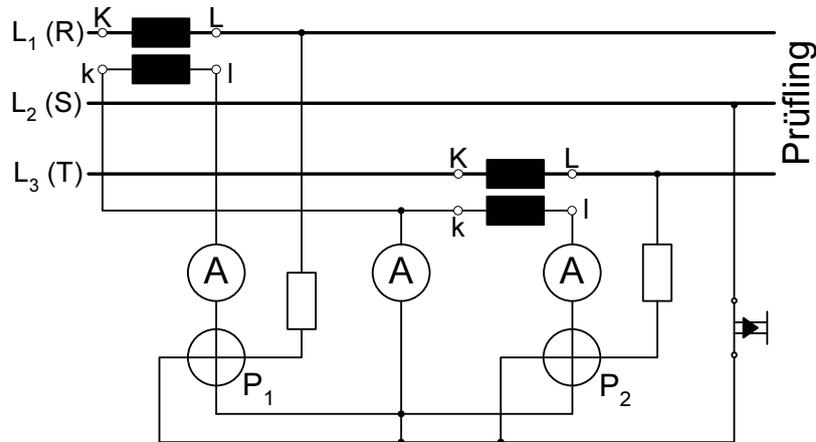


Abbildung 2.8.: Aufbau der Messschaltung mit 2 Stromwandlern und 3 Amperemetern, verwendbar bis 500 V

Beweis für die Messung der Gesamtleistung: Der Augenblickswert der Gesamtleistung kann ausgedrückt werden in

$$p = u_R \cdot i_R + u_S \cdot i_S + u_T \cdot i_T \quad . \quad (2.31)$$

Aus der Stromgleichung $i_R + i_S + i_T = 0$ bei Fehlen des Sternpunktleiters folgt:

$$i_S = -(i_R + i_T) \quad (2.32)$$

Nach Einsetzen in die Leistungsgleichung:

$$p = i_R \cdot (u_R - u_S) + i_T \cdot (u_T - u_S) \quad (2.33)$$

$$= i_R \cdot u_{RS} + i_T \cdot u_{TS} \quad (2.34)$$

Die Summe der in der Aronschaltung gemessenen Produkte ergibt somit in jedem Augenblick die Gesamtleistung.

Vorzeichenkontrolle bei Symmetrie und sinusförmigem Verlauf von Strom und Spannung: Die einzelnen Wattmeter messen die Leistungen

$$P_1 = U_{SR} \cdot I_R \cdot \cos(\varphi_1) \quad , \quad (2.35)$$

$$P_2 = U_{ST} \cdot I_T \cdot \cos(\varphi_2) \quad , \quad (2.36)$$

wobei φ der Phasenwinkel zwischen Leiterspannung und -strom ist. Unter der Annahme einer Last mit ohmschem und induktivem Anteil wird

$$\varphi_1 = \varphi + \alpha \quad , \quad (2.37)$$

$$\varphi_2 = \varphi - \beta \quad . \quad (2.38)$$

Die Winkel α und β ergeben sich für den Fall der reinen Wirklast ($\varphi = 0$) zu $\alpha = \beta = 30^\circ$.

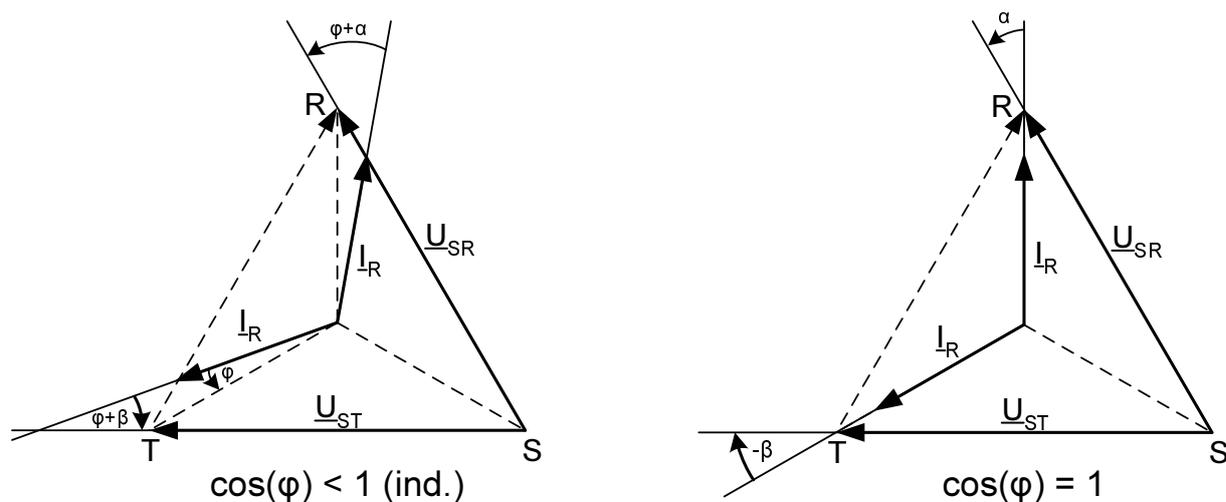


Abbildung 2.9.: Zeigerdiagramme bei Leistungsmessung

Somit ist

$$P_1 = U_{SR} \cdot I_R \cdot \cos(\varphi + 30^\circ) \quad , \quad (2.39)$$

$$P_2 = U_{ST} \cdot I_T \cdot \cos(\varphi - 30^\circ) \quad . \quad (2.40)$$

Die Vorzeichen der Wattmeteranzeigen, und damit der Summanden P_1 und P_2 , werden in Abhängigkeit von φ durch $\cos(\varphi)$ bestimmt:

$$\frac{P_1}{U_{SR} \cdot I_R} = a_1 \cdot \frac{c}{U_{SR} \cdot I_R} = \cos(\varphi + 30^\circ) = f_1(\varphi) \quad (2.41)$$

$$\frac{P_2}{U_{ST} \cdot I_T} = a_2 \cdot \frac{c}{U_{ST} \cdot I_T} = \cos(\varphi - 30^\circ) = f_2(\varphi) \quad (2.42)$$

$$\text{mit } a_1, a_2 \in \{-1, +1\} \quad (2.43)$$

Bei $\varphi < 60^\circ$ sind die Wattmeteranzeigen mit gleichem Vorzeichen, bei $\varphi > 60^\circ$ mit verschiedenem Vorzeichen zu versehen. Zur Vorzeichenprobe wird die Verbindung der beiden

Spannungspfade vom Leiter S abgetrennt, an den Wattmetern liegen nun die Spannungen $\frac{U_{TR}}{2}$ an. In diesem Fall ist bei einer Last mit ohmschem und induktivem Anteil

$$\Phi_1 = \phi - \alpha \quad , \quad (2.44)$$

$$\Phi_2 = \phi + \beta \quad . \quad (2.45)$$

Die Winkel α und β ergeben sich auch hier aus einer Betrachtung bei $\phi = 0^\circ$ zu $\alpha = \beta = 30^\circ$. Die Vorzeichen der Wattmeteranzeigen sind in Abhängigkeit von ϕ bestimmt durch:

$$a_1 \cdot \frac{2 \cdot c}{U_{TR} \cdot I_R} = \cos(\phi - 30^\circ) = f_2(\phi) \quad (2.46)$$

$$a_2 \cdot \frac{2 \cdot c}{U_{RT} \cdot I_T} = \cos(\phi + 30^\circ) = f_1(\phi) \quad (2.47)$$

Gegenüber dem ersten Fall ist der Verlauf der beiden Funktionen vertauscht. Aus dem Vergleich folgt als Regel für die Vorzeichenkontrolle:

Wird die Verbindung der beiden Spannungspfade vom Leiter S abgetrennt (Tastschalter in den Schaltbildern 2.7 und 2.8) und es bleiben hierbei die Ausschläge beider Wattmeter positiv, dann sind die Leistungen P_1 und P_2 mit gleichem Vorzeichen in Gleichung 2.30 einzusetzen. Ändert sich jedoch das Vorzeichen beider Ausschläge, so haben die Leistungen verschiedene Vorzeichen.

Im Fall von Unsymmetrie ist ein Bereich vorhanden, in dem bei Öffnen des Prüftasters nur ein Ausschlag das Vorzeichen ändert. Hier ist das obige Kriterium nicht anwendbar.

3. Versuchsanleitung

3.1. Versuchsaufbau

Abbildung 3.12 auf Seite 35 zeigt das Schaltbild des Versuchsaufbaus. Als Prüfling steht eine Asynchronmaschine mit Kurzschlussläufer zur Verfügung, an die ein Motorschutzschalter fest angebaut ist. Über eine lösbare Magnetkupplung ist die Asynchronmaschine mit einer Gleichstrom-Pendelmaschine verbunden. Diese kann als Belastung auf einen Widerstand arbeiten (Generator) oder vom Gleichstromnetz gespeist werden (Motor). Über einen Stelltransformator kann die Betriebsspannung der Asynchronmaschine zwischen Null und 410 V eingestellt werden. Die Messung der Leiterströme erfolgt über Stromwandler, die aufgenommene Leistung wird mit einer Aron-Schaltung ermittelt.

3.2. Typenschild

Das Typenschild einer Maschine enthält alle für die Aufstellung und den Betrieb erforderlichen Daten. Man kann ihm unter anderem die Art des Motors (Drehstrommotor), die Nennbetriebsspannung, die Schaltungsart bei Nennbetrieb (Dreieckschaltung), den Nennstrom, die mechanische Nennabgabeleistung, den Nennleistungsfaktor und die Nenndrehzahl entnehmen. Darüber hinaus informiert das Typenschild über die Art des eingebauten Rotors (KL = Kurzschlussläufer), die Isolationsklasse und die Baugröße der Maschine. Nachstehend ist das Typenschild der im Versuch verwendeten Maschine abgebildet.

Siemens - Schuckert							
D-Mot	1RA3078-4AB			E51107890			
380	V	Δ			16,5	A	
7,5	kW				cos(φ)	0,82	
1450	U/min		Hz	50	Is. Kl.	E	
VDE 0530/59	KL 16 P22			Baugr.	132M		
Tropenfest					B3		

Abbildung 3.1.: Typenschild der verwendeten Asynchronmaschine

3.2.1. Auswertung des Typenschildes

Das Nenndrehmoment M_N ist eine wichtige Kenngröße jeder rotierenden Maschine. Es kann gemäß untenstehender Gleichung aus den Angaben des Typenschildes berechnet werden. Diese Rechnung sollte vor dem Versuchsnachmittag durchgeführt werden.

$$M_N = \frac{P_N}{\Omega_N} \quad \text{mit } \Omega = \frac{2\pi n}{60} \cdot \frac{\text{min}}{\text{s}} \quad (3.1)$$

$$M_N = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Nm} \quad (3.2)$$

3.3. Versuche

Im Folgenden sollen verschiedene Betriebszustände des Asynchronmotors untersucht werden. Vor jedem Versuchsteil wird der Ausschnitt der Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie abgebildet, in dem der Asynchronmotor während des Versuchsteils betrieben wird.

In Fällen, in denen eine Vernachlässigung einzelner Komponenten des Ersatzschaltbildes möglich ist, wird es in der vereinfachten Form abgebildet.

3.3.1. Belastungskennlinien

In diesem Versuchsteil soll der Verlauf der Drehzahl – Drehmoment Kennlinie im Bereich unterhalb des Kippmoments bestimmt werden.

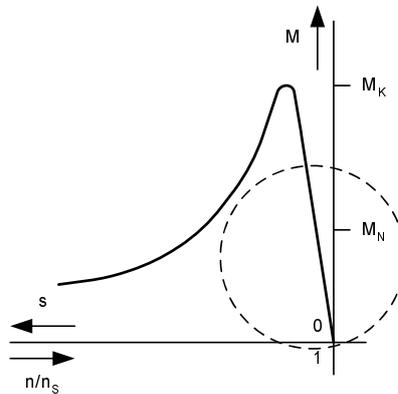


Abbildung 3.2.: Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie im Bereich des Nennbetriebes

Schalter S2 in Stellung 1 (Der Ankerkreis der Gleichstrommaschine wird an den Belastungswiderstand geschaltet.). Die Asynchronmaschine wird in Dreieckschaltung betrieben.

Konstant halten: $U_{L,N} = 380 \text{ V}$ (Nennspannung im Dreieck)

Verstellen: Drehmoment vom Leerlauf bis zum Nennwert durch Erhöhen der Belastung der Gleichstrom-Pendelmaschine. Die einzustellenden Werte sind der Auswertetabelle 3.1 zu entnehmen. Der erste Wert entspricht den Reibungsmomenten im Leerlauf.

Messen:

- Drehmoment M
- Leiterströme I_L (Bei leichter Unsymmetrie Mittelwert beider Anzeigen bilden)
- aufgenommene Wirkleistung P_S
- Drehzahl n

Berechnen:

- Scheinleistung S
- abgegebene Leistung P_{mech}
- Wirkungsgrad $\eta = \frac{P_{\text{mech}}}{P_S}$
- Leistungsfaktor $\cos \varphi = \frac{P_S}{S}$
- Verhältnis abgegebene Leistung zu Scheinleistung $\frac{P_{\text{mech}}}{S} (= \eta \cos \varphi)$

Auftragen in Abhängigkeit vom Drehmoment:

- 1. Kurvenblatt (Abbildung 3.8): $I_L, S, P_S, P_{\text{mech}}, n$
- 2. Kurvenblatt (Abbildung 3.9): $\eta, \cos \varphi, \eta \cdot \cos \varphi$

3.3.2. Kippmoment

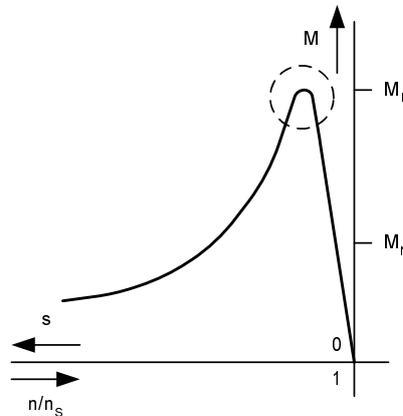


Abbildung 3.3.: Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie im Bereich des Kipp-Punktes

Um eine Überlastung der Maschine zu vermeiden, wird die Messung bei herabgesetzter Spannung durchgeführt ($U'_L \approx 150 \text{ V}$ einstellen).

Doch Vorsicht! Durch die steigende Belastung des Transformators liegt U'_L am Kipp-Punkt noch wesentlich niedriger!

Schalter S 2 in Stellung 1 (Der Ankerkreis der Gleichstrommaschine wird mit dem Belastungswiderstand verbunden), am Leistungswiderstand 3 Schalter auf Stellung 1.

Messen: Bei diesem Versuchsteil ist Teamarbeit gefragt. Erhöhen Sie vom Leerlauf aus langsam die Belastung durch Erhöhen des Erregerstromes. Gleichzeitig beobachtet ein Kollege die Spannung U'_L und regelt kontinuierlich nach. In dem Augenblick, in dem das größte Moment anliegt, müssen folgende Werte gleichzeitig abgelesen werden:

$$U'_L, I'_K, M'_K, n_K$$

Umrechnen: I'_K und M'_K auf I_K und M_K bei Nennspannung U_N

Überlegen Sie, an welcher Stelle im 1. Kurvenblatt man M_K und I_K auftragen müsste!

$$U'_L = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V} \qquad n_K = \underline{\hspace{2cm}} \text{ min}^{-1} \qquad (3.3)$$

$$I'_K = \underline{\hspace{2cm}} \text{ A} \qquad M'_K = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Nm} \qquad (3.4)$$

$$I_K = \underline{\hspace{2cm}} \text{ A} \qquad M_K = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Nm} \qquad (3.5)$$

3.3.3. Anzugsmomente bei Stern- und Dreieckschaltung

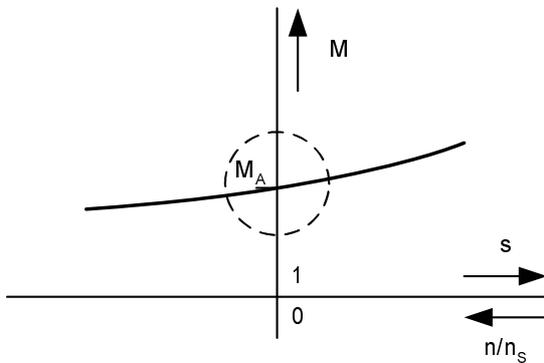


Abbildung 3.4.: Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie im Bereich der Stillstandes

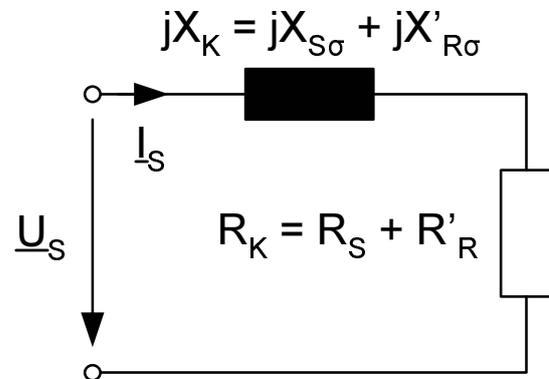


Abbildung 3.5.: Vereinfachtes Ersatzschaltbild bei $s=1$ (vgl. kurzgeschlossener Transformator)

Einstellen von $n = 0$:

- Sekundärspannung des Stelltrafos auf Null stellen.
- Asynchronmaschine einschalten und Sekundärspannung so lange erhöhen, bis die Maschine langsam anläuft.
- Bei maximalem Ankervorwiderstand (1 Schalter auf Stellung 1 am Leistungswiderstand) und größtem Erregerstrom (Schiebewiderstand am Anschlag) Pendelmaschine ans Netz schalten (Schalter S2 in Stellung 2 bringen).
- Ankervorwiderstand so einstellen, dass der Maschinensatz langsam entgegen der Motordrehrichtung umläuft. Motorspannung am Stelltrafo langsam steigern, bis bei stillstehender Maschine der Nennstrom $I_{S,N}$ fließt (eventuell auf der Gleichstromseite nachstellen).
- Auch bei diesem Versuchsteil wird mit verringerter Spannung gearbeitet, um die Maschine nicht zu überlasten.

Messen:

- U'_L und M'_a bei stillstehender Maschine in Sternschaltung für $I'_a \approx I_{N\lambda} = \frac{1}{\sqrt{3}}I_N$
- U'_L und M'_a bei stillstehender Maschine in Dreieckschaltung für $I'_a \approx I_{N\Delta} = I_N$

Umrechnen: $I'_{n,a}$ und M'_a auf $I_{n,a}$ und M_a bei Nennspannung U_N .

Berechnen:

- a. Verhältnis der Anzugsströme I_a und -drehmomente M_a bei Stern- und Dreieckschaltung mit Angabe der theoretischen Werte.
- b. Verhältnis der Anzugsströme I_a zu den Nennströmen I_N .

Auswertung:

$$U'_{L,\lambda} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V} \quad I'_{a\lambda} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ A} \quad M'_{a\lambda} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Nm} \quad (3.6)$$

$$U_{L,\lambda} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V} \quad I_{a\lambda} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ A} \quad M_{a\lambda} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Nm} \quad (3.7)$$

$$U'_{L,\Delta} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V} \quad I'_{a\Delta} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ A} \quad M'_{a\Delta} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Nm} \quad (3.8)$$

$$U_{L,\Delta} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V} \quad I_{a\Delta} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ A} \quad M_{a\Delta} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Nm} \quad (3.9)$$

zu a: gemessen:

$$\frac{I_{a\lambda}}{I_{a\Delta}} = \underline{\hspace{2cm}} \quad (3.10)$$

$$\frac{M_{a\lambda}}{M_{a\Delta}} = \underline{\hspace{2cm}} \quad (3.11)$$

theoretisch:

$$\frac{I_{a\lambda}}{I_{a\Delta}} = \underline{\hspace{2cm}} \quad (3.12)$$

$$\frac{M_{a\lambda}}{M_{a\Delta}} = \underline{\hspace{2cm}} \quad (3.13)$$

zu b:

$$\frac{I_{a\lambda}}{I_{N\lambda}} = \underline{\hspace{2cm}} \quad (3.14)$$

$$\frac{I_{a\Delta}}{I_{N\Delta}} = \underline{\hspace{2cm}} \quad (3.15)$$

3.3.4. Leerlaufversuch zur Bestimmung der Eisen- und Reibungsverluste

Gleichstromkreis abschalten. Pendelmaschine abkuppeln.

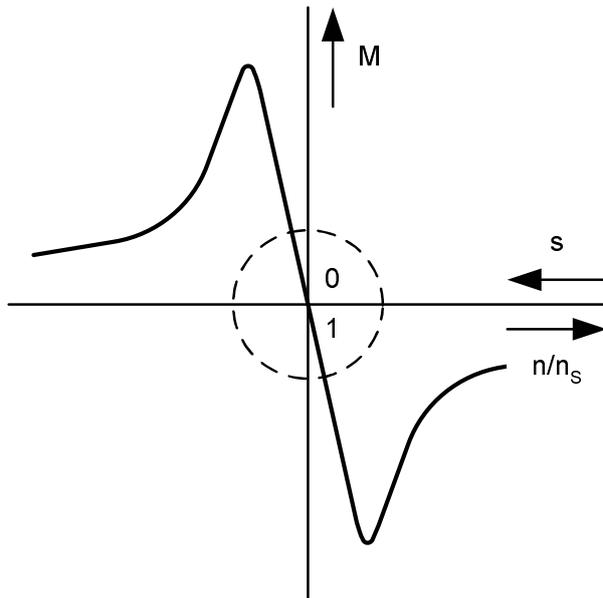


Abb. 3.6.: Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie im Bereich des Leerlaufpunktes

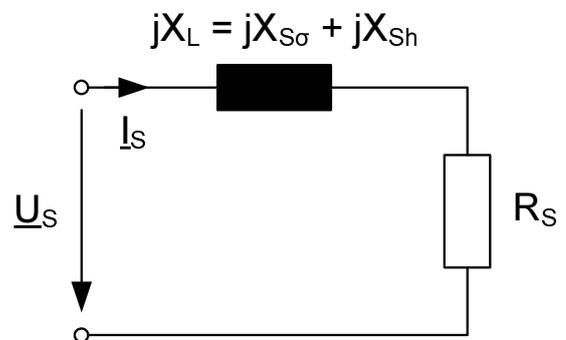


Abb. 3.7.: Vereinfachtes Ersatzschaltbild bei $s=0$ (vgl. leerlaufender Transformator)

Verstellen: Spannung U bei leerlaufendem Motor von 75 V bis 400 V nach Tabelle 3.2.

Messen: I_L ; P_S

Messen: Widerstand R_S eines Stranges der Ständerwicklung mit der Messbrücke.

Auswertung:

$$R_{Ph}(\text{betriebswarm}) = \underline{\hspace{2cm}} \text{ m}\Omega \quad (3.16)$$

Berechnen: Leerverluste $P_{V_0} = P_S - 3I_{Ph}^2 R_{Ph}$

Auftragen in Abhängigkeit von $(\frac{U}{U_N})^2$:

- 3. Kurvenblatt (Abbildung 3.10): P_{V_0}

Bestimmen Sie aus dem Diagramm die Reibungs- und Lüfterverluste durch lineare Extrapolation der Kurve für $U \rightarrow 0$ V. Dabei werden nur die Messpunkte bei kleiner Spannung, etwa $(U/U_N)^2 < 0,5$ verwendet.

Auswertung:

$$P_{\text{Rb+Lf}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ W} \quad (3.17)$$

Bestimmen Sie die Eisenverluste im Stator bei Nennspannung durch Subtraktion der Reibungs- und Lüfterverluste von den Leerverlusten.

Auswertung:

$$P_{\text{VS,Fe}} = P_{V_0}(U = U_N) - P_{\text{Rb+Lf}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ W} \quad (3.18)$$

3.3.5. Bestimmung der Zusatzverluste

In diesem Aufgabenteil wird die nach internationalen Normen übliche Berechnung der lastabhängigen Zusatzverluste nach dem Einzelverlustverfahren in vereinfachter Form durchgeführt.

$$P_{\text{Zus}} = P_S - \Sigma P_V - P_{\text{mech}} = P'_{\text{mech}} - P_{\text{mech}} \quad (3.19)$$

Die Gesamtverluste bestehen aus 5 Teilverlusten:

1. Ohmsche Kupferverluste im Stator (bei Nennstrom)
2. Eisenverluste im Stator (bei Nennspannung)
3. Ohmsche Kupferverluste im Rotor (im Nennbetrieb)
4. Lüfter- und Reibungsverluste
5. Die hier zu bestimmenden allgemeinen Zusatzverluste

Tragen Sie die die nachfolgend berechneten Einzelverluste in den unteren Teil der Tabelle 3.1 ein.

Die Ohmschen Statorverluste berechnen sich zu

$$P_{VS,\Omega} = 3 \cdot R_{Ph} \cdot I_{Ph}^2 \quad . \quad (3.20)$$

Die Eisenverluste im Stator sind nicht Lastabhängig, also für alle Messpunkte gleich. Sie wurden in 3.3.4 bestimmt.

Die ohmschen Rotorverluste bestimmen sich zu $s \cdot P_\delta$, dabei entspricht die Drehfeldleistung der Differenz der zugeführten Leistung und der Verluste im Stator

$$P_\delta = P_S - (P_{VS,\Omega} + P_{VS,Fe}) \quad (3.21)$$

mit

$$P_{VR,\Omega} = s \cdot P_\delta \quad . \quad (3.22)$$

Die Lüfter- und Reibungsverluste wurden in 3.3.4 bestimmt.

Auftragen in Abhängigkeit von $(\frac{M}{M_N})^2$:

- 4. Kurvenblatt (Abbildung 3.11): P_{zus}

	U_L/V	380					
	R_{Ph}/Ω (3.16)						
	M_{Soll}/Nm	10	20	30	40	50	55
Messung	M_{Mess}/Nm						
	I_L/A						
	P_S/W						
	$n \cdot \min$						
Auswertung	$(M/M_N)^2$						
	S/VA						
	P_{mech}/W						
	η						
	$\cos \varphi$						
	$\eta \cos \varphi$						
Einzelverluste	$P_{VS,\Omega}/W$ (3.20)						
	$P_{VS,Fe}/W$ (3.18)						
	P_δ/W (3.21)						
	s (2.20)						
	$P_{VR,\Omega}/W$ (3.22)						
	P_{Rb+Lf}/W (3.17)						
	$\Sigma P_V/W$						
	$P'_{mech} = (P_S - \Sigma P_V)/W$						
	$P_{Zus} = (P'_{mech} - P_{mech})/W$						

Tabelle 3.1.: Auswertetabelle für Versuch 3.3.1 und 3.3.5

U/U_N	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9	0,95	1,0	1,05
U_{Soll}/V	75	95	115	150	190	230	270	340	360	380	400
U_{Mess}/V											
I_L/A											
P_S/W											
P_{V_0}/W											
$(U_{\text{Mess}}/U_N)^2$											

Tabelle 3.2.: Auswerttabelle für Versuch 3.3.4

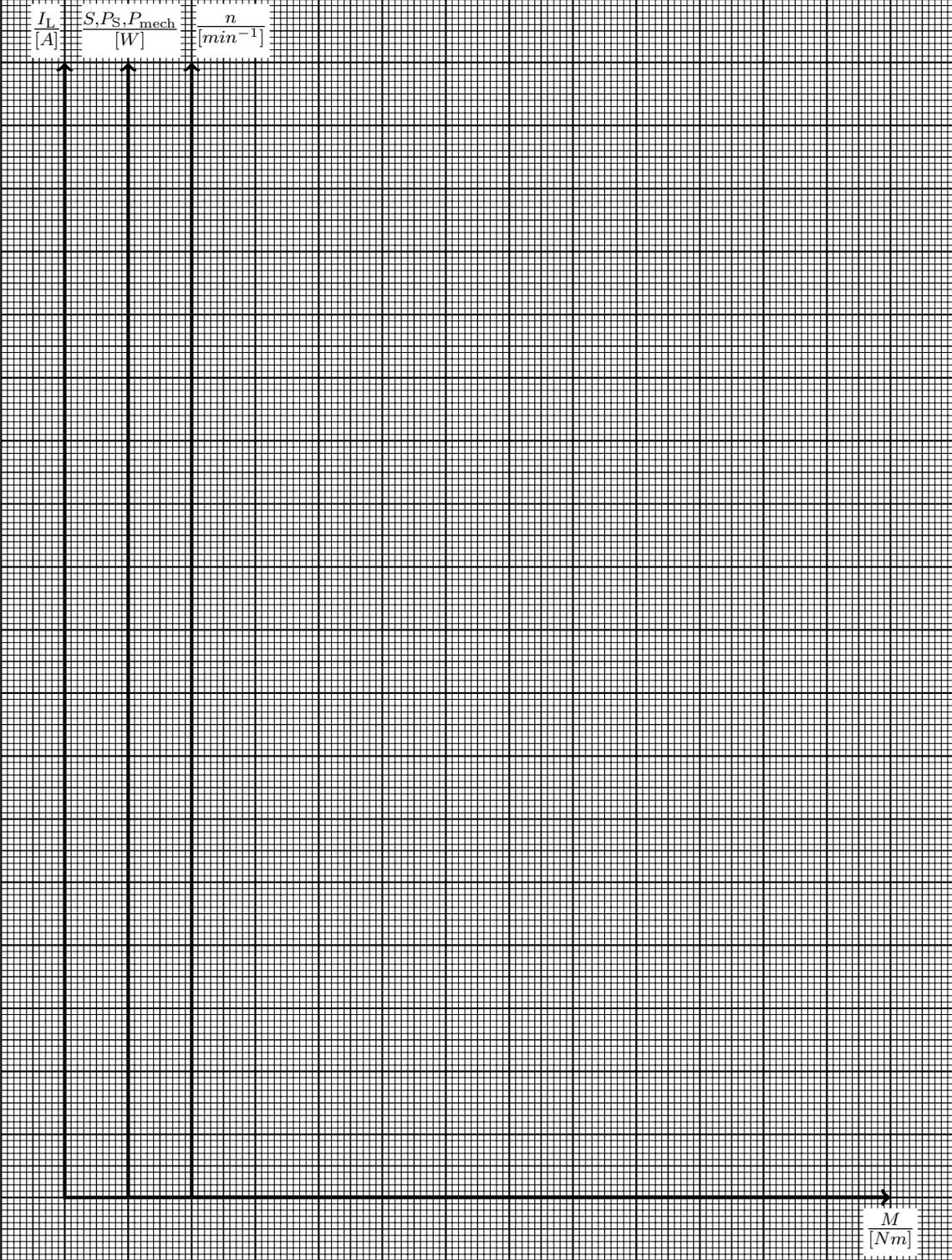


Abbildung 3.8.: Diagramm zu Aufgabe 3.3.1

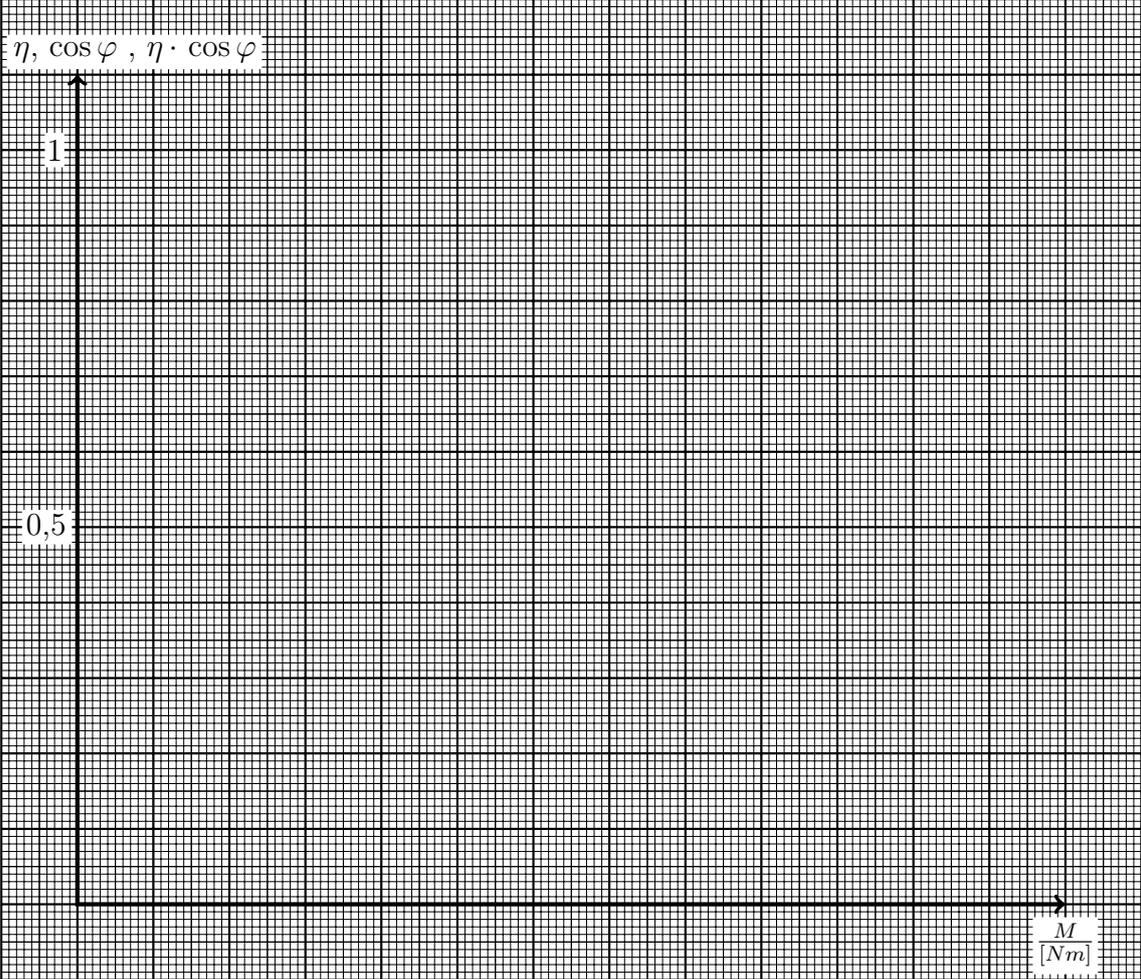


Abbildung 3.9.: Diagramm zu Aufgabe 3.3.1

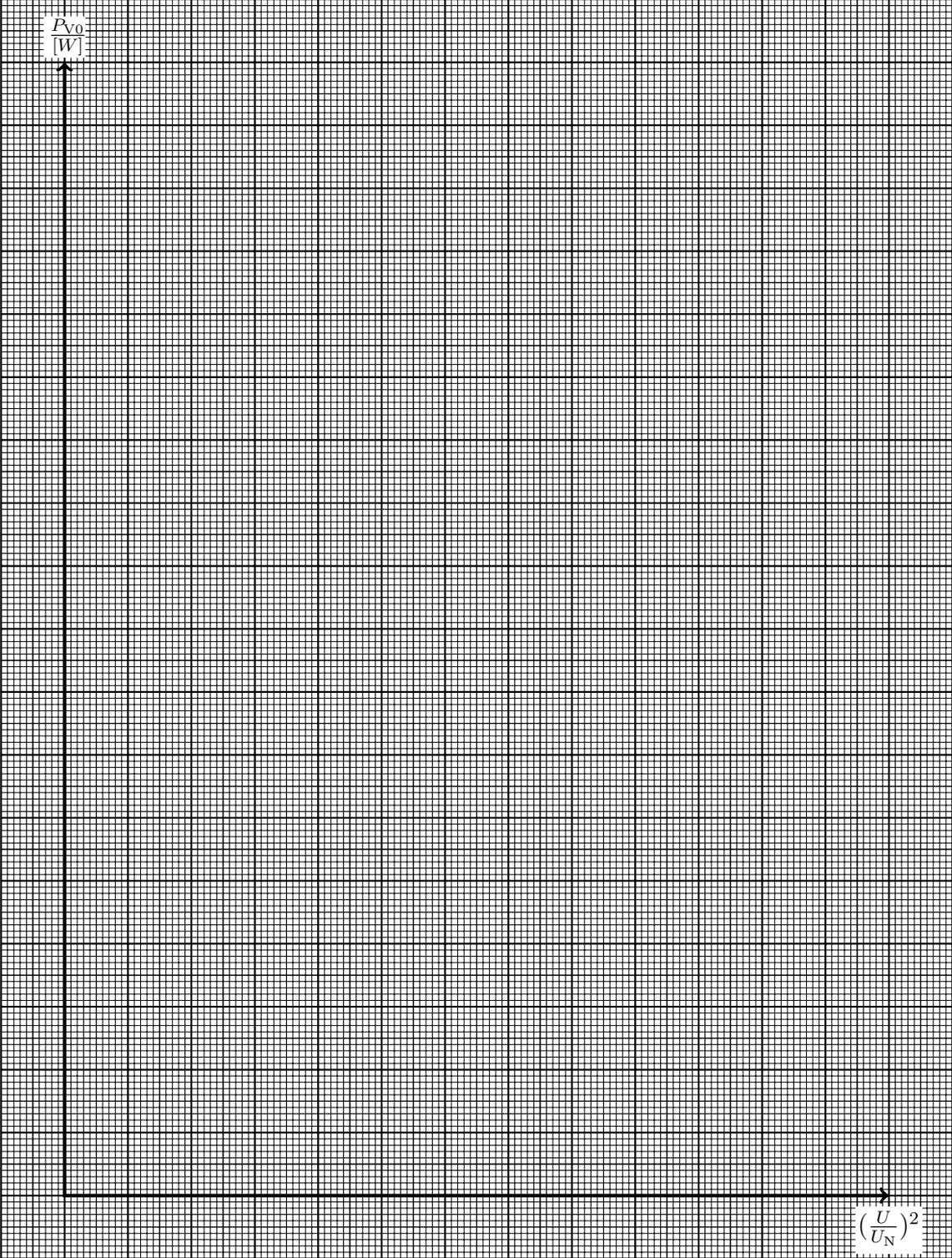


Abbildung 3.10.: Diagramm zu Aufgabe 3.3.4

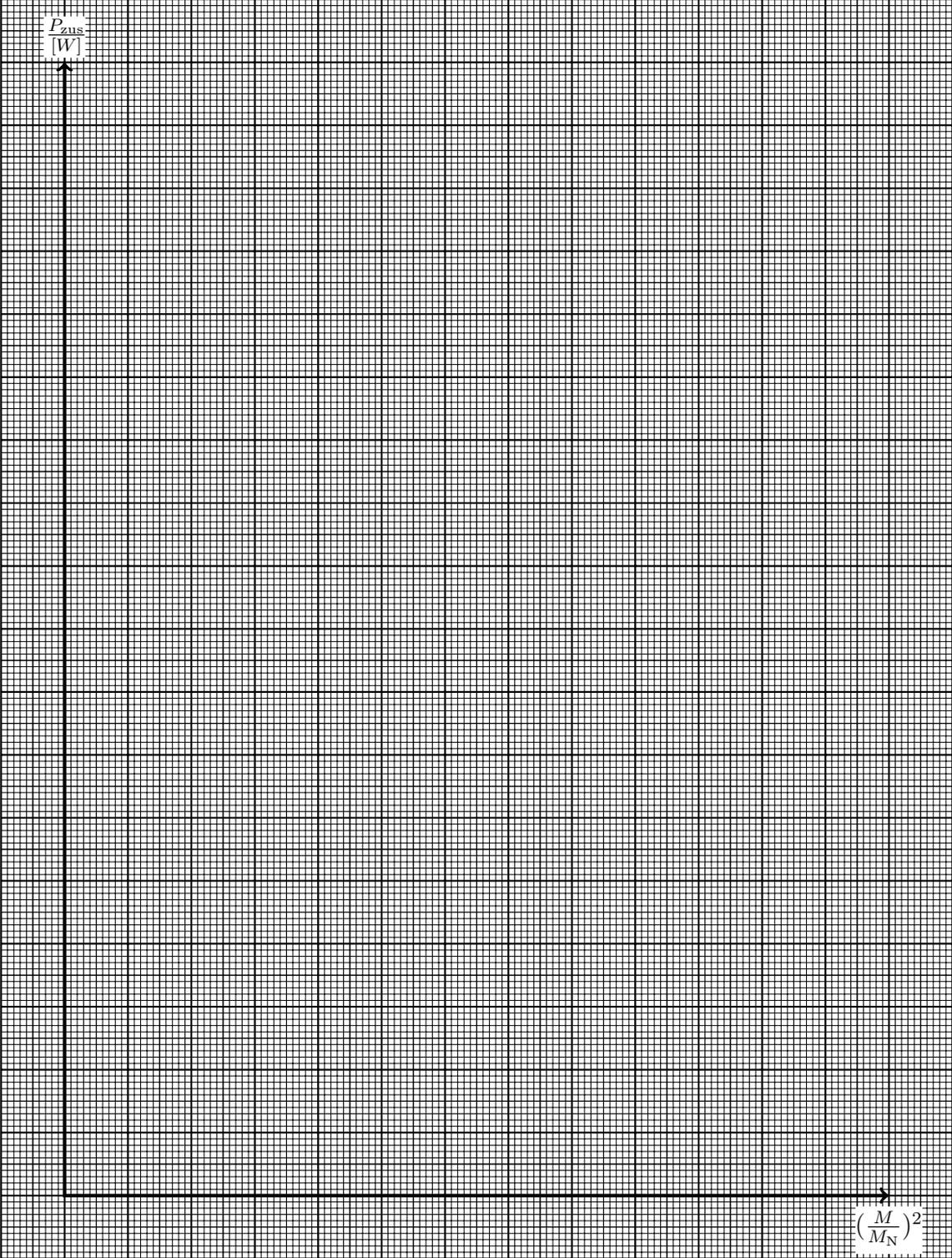


Abbildung 3.11.: Diagramm zu Aufgabe 3.3.5

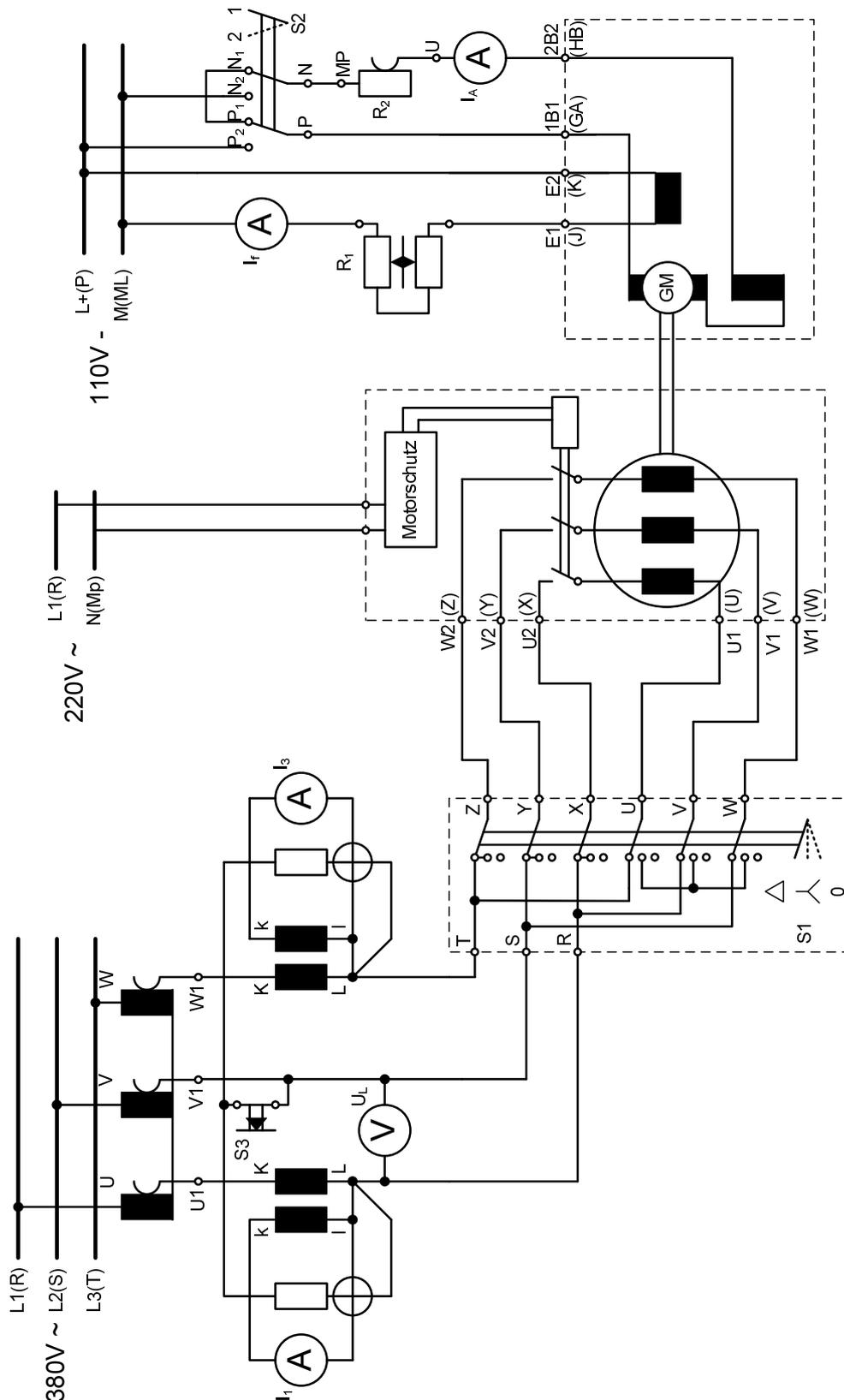


Abbildung 3.12.: Versuchsaufbau, in Klammern geschrieben sind die veralteten Klemmenbezeichnungen, wie sie zum Teil noch an den Maschinen angebracht sind. Gültig sind jedoch die nicht in Klammern stehenden Klemmenbezeichnungen nach DIN 42400 und DIN 42401.

R_1 bezeichnet den Schiebewiderstand $R = 0..210\Omega$, $I_{\text{Max}} = 2\text{A}$ und R_2 bezeichnet den Leistungswiderstand $R = 72,4..1,2\Omega$, $I_{\text{Max}} = 3..90\text{A}$

A. Abkürzungen in dieser Anleitung

A.1. Formelzeichen

P	Wirkleistung
p	Polpaarzahl
S	Scheinleistung
s	Schlupf
R	Wirkwiderstand
i	elektrischer Strom, Zeitwert
I	elektrischer Strom, Effektivwert
L	Induktivität
M	Drehmoment
Ω	mechanische Winkelgeschwindigkeit ($= 2 \cdot \pi \cdot f$, $[\Omega] = \frac{1}{s}$)
ω	elektrische Winkelgeschwindigkeit / Kreisfrequenz ($= 2 \cdot \pi \cdot f$, $[\omega] = \frac{1}{s}$)
n	Drehzahl ($[n] = \frac{1}{min}$)
η	Wirkungsgrad
φ	Phasenwinkel zwischen Spannung und Strom
τ_p	Polteilung im Luftspalt

A.2. Indices

R	Rotor- (z.B. R_R Rotorwiderstand)
S	Stator- (z.B. R_S Statorwiderstand)
V	Verlust- (z.B. P_V Verlustleistung)
el	elektrisch (z.B. P_{el} Elektrische Leistung)
mech	mechanisch (z.B. P_{mech} Mechanische Leistung)
N	Nenn- (z.B. P_N Nennleistung)
L	Leiter- (z.B. U_L Leiterspannung zwischen zwei Außenleitern; I_L Leiterstrom)
Ph	Phasen- (z.B. R_{ph} Widerstand einer Phase (eines Stranges) der Maschine)
K	Kipp- (z.B. M_K Kippmoment)
σ	Streu- (z.B. L_σ Streuinduktivität)
A	Anlauf- (z.B. M_A Anlaufmoment)
syn	Synchron- (z.B. n_{syn} Synchrondrehzahl)

B. Fragen zum Versuch AM

1. Welche Betriebsbereiche gibt es bei der Asynchronmaschine und in welche Richtung fließen dabei jeweils elektrische und mechanische Leistung?
2. Warum tritt im Ersatzschaltbild im Läuferkreis der Widerstand $\frac{1}{s}R'_R$ auf?
3. Wo tritt die an der Welle abgegebene Leistung im Ersatzschaltbild auf?
4. Welche Frequenz hat der vom Läufer auf den Ständer umgerechnete Läuferstrom?
5. Welche Anlassschaltungen gibt es? Wo liegen die Vor- und Nachteile?
6. Was versteht man unter Leerverlusten?
7. Warum wird P_{V_0} über dem Quadrat der Spannung aufgetragen?
8. Wie wird im Versuch die Motorkennlinie der AM gemessen?
9. Erläutern Sie anhand der Motor- und Lastkennlinie die Messmethode zur Ermittlung des Anzugs- und des Kippmoments!
10. Warum werden Anzugs- und Kippmoment bei verminderter Spannung gemessen, und wie werden sie auf Nennspannung umgerechnet?
11. Wie funktioniert die Aronschaltung?

C. Abbildungsverzeichnis

2.1.	Verlauf des inneren Drehmomentes und des Rotorstromes als Funktion des Schlupfes eines stromverdrängungsfreien Asynchronmotors	4
2.2.	Umgezeichnetes Ersatzschaltbild der Drehstrom-Asynchronmaschine	5
2.3.	Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie der Drehstrom-Asynchronmaschine	8
2.4.	Dreieckschaltung der Drehstrom-Asynchronmaschine	10
2.5.	Sternschaltung der Drehstrom-Asynchronmaschine	10
2.6.	Drehmoment-Kennlinie der Drehstrom-Asynchronmaschine beim Anlauf in Stern- und Dreieckschaltung	11
2.7.	Aufbau der Aronschaltung. Die Gesamtleistung wird auch bei unsymmetrischer Last und Vorhandensein von Oberschwingungen genau gemessen.	14
2.8.	Aufbau der Messschaltung mit 2 Stromwandlern und 3 Amperemetern, verwendbar bis 500 V	15
2.9.	Zeigerdiagramme bei Leistungsmessung	16
3.1.	Typenschild der verwendeten Asynchronmaschine	19
3.2.	Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie im Bereich des Nennbetriebes	20
3.3.	Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie im Bereich des Kipp-Punktes	22
3.4.	Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie im Bereich der Stillstandes	23
3.5.	Vereinfachtes Ersatzschaltbild bei $s=1$ (vgl. kurzgeschlossener Transformator)	23
3.6.	Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie im Bereich des Leerlaufpunktes	26
3.7.	Vereinfachtes Ersatzschaltbild bei $s=0$ (vgl. leerlaufender Transformator)	26
3.8.	Diagramm zu Aufgabe 3.3.1	31
3.9.	Diagramm zu Aufgabe 3.3.1	32
3.10.	Diagramm zu Aufgabe 3.3.4	33
3.11.	Diagramm zu Aufgabe 3.3.5	34
3.12.	Versuchsaufbau	35

D. Literaturverzeichnis

[1] MEYER, M.: *Elektrische Antriebstechnik, Band 1*. Springer, 1985