

# DREHSTROM-ASYNCHRONMASCHINE MIT SCHLEIFRINGLÄUFER

**Zusammenfassung**—In diesem Versuch soll eine Asynchronmaschine mit Schleifringläufer genauer untersucht werden. Die Versuchsmaschine wird mithilfe einer Käfigläufer-Asynchronmaschine belastet, deren Drehzahl mithilfe eines Frequenzumrichters gesteuert werden kann.

Zur Bestimmung der Ersatzschaltbild-Parameter werden ein Kurzschluss- und ein Leerlaufversuch durchgeführt. Der Kurzschlussversuch dient der Bestimmung der Parameter im Längsweig, des komplexen Anlaufstromes sowie des Anzugmomentes. Mithilfe des Leerlaufversuches lassen sich die Parameter im Quersweig und der komplexe Leerlaufstrom bestimmen. Dazu wird die Ständerspannung verändert.

Im nächsten Versuchsteil wird die Belastung der ASM und die synchrone Drehzahl untersucht. Die Messungen werden im Betriebsbereich um die synchrone Drehzahl aufgenommen, damit die Belastung der Maschine im motorischen und generatorischen Betrieb gemessen werden kann.

Im letzten Versuchsteil wird die im Schleifringläufer induzierte Spannung in Abhängigkeit zur Drehzahl gemessen.

## I. ANLAUFMOMENT UND KIPPMOMENT

Bei diesem Versuch wurde das Drehmoment mit einem 40cm langen Stab und einer Digitalen Wage gemessen.

Mit der Gleichung 1 wurde das Drehmoment aus den Messungen berechnet.

$$M = G \cdot g \cdot l = \frac{G_{I_1}}{1000} \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 0,4 \text{ m} \quad (1)$$

In den Abbildungen 1 und 2 wird das Anlaufmoment der ASM über die Spannung graphisch dargestellt.

Die obere Hälfte der Abbildungen zeigt eine linearisierte Extrapolation des Verlaufs der Drehmomente  $M_{an}$  und  $M_{Kipp}$  über die Spannung  $U_1^2$ , bis  $400^2 \text{ V}$ .

Aber in der unteren Hälfte der Abbildungen wird das Drehmoment der ASM direkt über die Spannung  $U_1$  dargestellt und mit einer quadratischen Polynomfunktion extrapoliert.

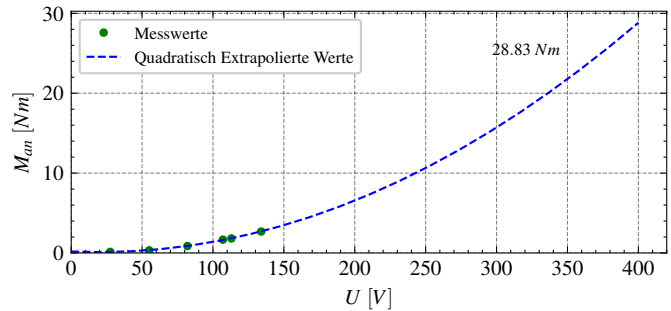
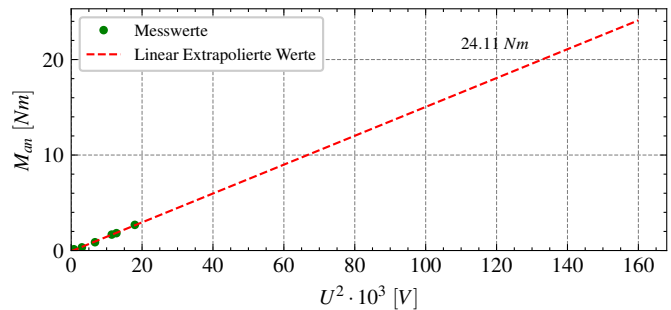


Abbildung 1: Anlaufmoment

Der lineare Verlauf in Abb.1,  $M_{an}(U)$  [rot]:

$$0,1511x - 0,07306$$

$$M_{an}(U_N = 400^2 \text{ V}^2) = 24,11 \text{ Nm}$$

Und die quadratische Polynomfunktion  $M_{an}(U)$  [blau]:

$$0,000199x^2 - 0,007889x + 0,190977$$

$$M_{an}(U_N = 400 \text{ V}) = 28,83 \text{ Nm}$$

$I_1 [\text{A}]$	$P_1 [\text{W}]$	$U [\text{V}]$	$G [\text{g}]$	$M_{an} [\text{Nm}]$
1,0	28	27,5	35	0,137340
2,0	92	55,0	85	0,333540
3,0	194	82,0	222	0,871128
4,0	352	107,0	426	1,671624
4,2	392	113,0	464	1,820736
5,0	470	134,0	685	2,687940

Tabelle I: Anlaufmoment

$I_1 [\text{A}]$	$P_1 [\text{W}]$	$U [\text{V}]$	$G [\text{g}]$	$M_{an} [\text{Nm}]$
1,0	24	36	32	0,125568
2,0	102	73	218	0,855432
3,0	380	108	508	1,993392
4,0	670	140	891	3,496284
4,2	745	148	1000	3,924000
5,0	1046	175	1425	5,591700

Tabelle II: Kippmoment

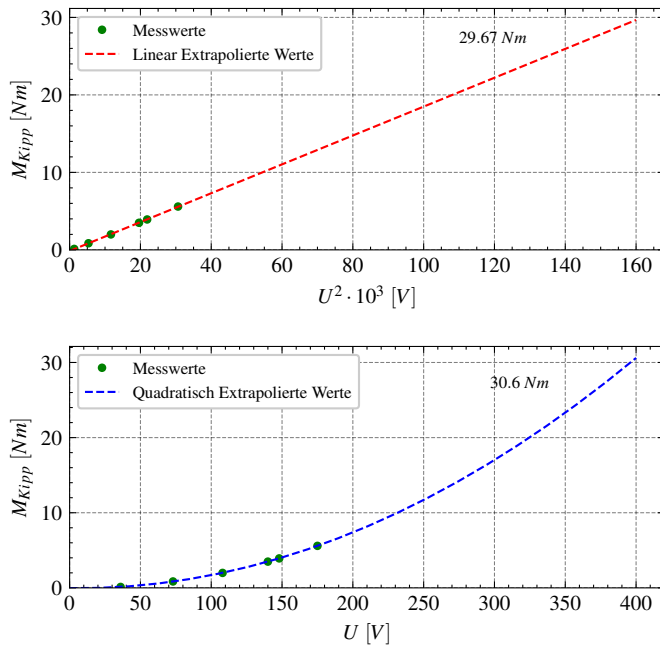


Abbildung 2: Kippmoment

Der lineare Verlauf in Abb.2,  $M_{Kipp}(U)$  [rot]:

$$0,1863x - 0,1431$$

$$M_{Kipp}(U_N = 400^2 V^2) = 29,67 \text{ Nm}$$

Und die quadratische Polynomfunktion  $M_{Kipp}(U)$  [blau]:

$$0,000198x^2 - 0,0024495x - 0,035842$$

$$M_{Kipp}(U_N = 400V) = 30,6 \text{ Nm}$$

Es gibt eine Abweichung von wenigen Prozent zwischen der linearisierten und quadratischen Extrapolation. Durch die quadratische Extrapolation bekommen Messfehler einen stärkeren Einfluss. Eine quadratische Extrapolation eignet sich trotzdem um eine anschauliche Gerade zu bilden.

#### A. Zusammenhang zwischen Drehmoment und Spannung

Bei zunehmender Spannung  $U_1$  steigt das Drehmoment  $M$  quadratisch an. Das Drehmoment ist direkt proportional zu  $U^2$  ( $M \sim U^2$ ) und darauf ergibt sich folgende Beziehung:

$$M = \text{konst.} \cdot U^2$$

## II. BESTIMMUNG DER ERSATZSCHALTBILDPARAMETER

### A. Parameterbestimmung aufgrund der Kurzschlussmessung

Berechnung des gemessenen Ständerwiderstands  $R_1$  um die Maschinenerwärmung auf  $T = 75^\circ\text{C}$  zu berücksichtigen:

$$R_{175} = R_{120} \frac{235^\circ\text{C} + 75^\circ\text{C}}{235^\circ\text{C} + 20^\circ\text{C}} \quad (2)$$

$$= 2,32 \Omega \cdot \frac{235^\circ\text{C} + 75^\circ\text{C}}{235^\circ\text{C} + 20^\circ\text{C}} \quad (3)$$

$$= 2,820 \Omega \quad (4)$$

Berechnen des Läuferwiderstands mithilfe der Übersetzungsverhältnis:

$$R'_{220} = \dot{u}^2 \cdot R_{220} = 4,7^2 \cdot 216\text{m}\Omega = 4,77\Omega \quad (5)$$

$$R'_{275} = R'_{220} \frac{235^\circ\text{C} + 75^\circ\text{C}}{235^\circ\text{C} + 20^\circ\text{C}} \quad (6)$$

$$= 4,77 \Omega \cdot \frac{235^\circ\text{C} + 75^\circ\text{C}}{235^\circ\text{C} + 20^\circ\text{C}} \quad (7)$$

$$= 5,8 \Omega \quad (8)$$

Es gilt:

$$R_k = R_{175} + R'_{275} = 2,820 \Omega + 5,8 \Omega = 8,62 \Omega \quad (9)$$

Aus der Kurzschlussmessung in 4.2.1 wird der Kurzschlusswiderstand  $R_k$  mit:

$$R_k = \frac{U_k}{I_k} \cdot \cos\varphi_k \quad (10)$$

$I_1 [A]$	$P_1 [W]$	$U [V]$	$G [g]$	$M_{an} [Nm]$
4,2	392	113	464	1,82074

Tabelle III: Kurzschlussmessung 4.2.1

Mit den Werten aus der Tabelle III kann  $\cos\varphi_k$  berechnet werden:

$$\cos\varphi_k = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot I_1 \cdot U} \quad (11)$$

$$\cos\varphi_k = \frac{392\text{W}}{\sqrt{3} \cdot 4,2\text{A} \cdot 113\text{V}} = 0,4769 \quad (12)$$

Da die Maschine im Stern geschaltet ist, ergibt sich für die Spannung  $U_k$ :

$$U_k = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{113\text{V}}{\sqrt{3}} = 65,24\text{V} \quad (13)$$

In die Formel 10 einsetzen:

$$R_k = \frac{65,24\text{V}}{4,2\text{A}} \cdot \cos(61,51^\circ) = 7,409\Omega \quad (14)$$

Die Streureaktanzen  $X_{1\sigma}$  und  $X'_{2\sigma}$  werden errechnet:

$$X_{1\sigma} + X'_{2\sigma} = \frac{U_k}{I_k} \cdot \sin\varphi_k \quad (15)$$

Da  $X_{1\sigma} = X'_{2\sigma}$  ist, ergibt sich:

$$X_{1\sigma} = X'_{2\sigma} = \frac{U_k}{I_k} \cdot \frac{1}{2} \cdot \sin\varphi_k \quad (16)$$

$$= \frac{65,24\text{V}}{3,69\text{A}} \cdot \frac{1}{2} \cdot \sin(61,51^\circ) \quad (17)$$

$$= 6,826 \Omega \quad (18)$$

1) Vergleich zwischen ermitteltem und gemessen Kurzschlusswiderstand: Die Werte des berechnete Kurzschlusswiderstands (9) haben eine Abweichung von ca. 15 % zu dem gemessenen Widerstand (14). Diese Differenz ist zu einem großen Teil auf die gewählte Referenztemperatur von 75°C zurück zuführen. Bei einer zügig durchgeführten Messung ist die Wärmeentwicklung der Maschine geringer. Nimmt man also einen Temperaturanstieg auf nur 55°C kommt man dem gemessenen Wert deutlich näher.

$$R'_{255} = R'_{220} \cdot \frac{55^\circ\text{C} + 235^\circ\text{C}}{20^\circ\text{C} + 235^\circ\text{C}} = 5,43\Omega \quad (19)$$

$$R_{155} = R_{120} \cdot \frac{55^\circ\text{C} + 235^\circ\text{C}}{20^\circ\text{C} + 235^\circ\text{C}} = 2,64\Omega \quad (20)$$

aus (9):

$$R_k = R_{160} + R'_{255} = 2,64\Omega + 5,43\Omega = 8,07\Omega \quad (21)$$

### B. Parameterbestimmung aufgrund der Leerlaufmessung

1) Maschinenparameter der Parallelschaltung aus  $X_h$  und  $R_{Fe+Reib}$  aufgrund der Leerlaufmessung: Bei dem folgenden Versuch ist Läuferseitig ein Leerlauf und somit kein Läuferstrom  $I_2$  zu messen. Der fließende Strom besteht ausschließlich aus dem Ständerstrom  $I_1$  bzw. dem Leerlaufstrom  $I_0$ .

Der verwendete Hebelarm aus den letzten Messungen wird entfernt, der Läufer wird mit kurzen Leitungen kurzgeschlossen. Die verwendeten Werte werden Tabelle IV entnommen.

Die gemessene Spannung wird auf die Strangspannung umgerechnet. Anschließend wird über eine Masche der Spannungsabfall  $U_{h,Fe}$  berechnet.

$$U_{Strang} = \frac{U}{\sqrt{3}} = 230,94\text{V} \quad (22)$$

$$U_{h,Fe} = U_{Strang} - U_1 = U_{Strang} - R_1 \cdot I_0 \quad (23)$$

$$= 230,94\text{V} - 2,32\Omega \cdot 2,75\text{A} = 224,56\text{V} \quad (24)$$

$$\varphi_0 = \arccos\left(\frac{P_0 - P_{Cu1}}{3 \cdot U_{Strang} \cdot I_0}\right) = 84,35^\circ \quad (25)$$

$$I_{Fe+Reib} = I_0 \cdot \cos(\varphi) = 0,27\text{A}$$

$$I_m = I_0 \cdot \sin(\varphi) = 2,7367\text{A}$$

$$R_{Fe+Reib} = \frac{U_{h,Fe}}{I_{Fe+Reib}} = 831,7\Omega \quad (26)$$

$$X_h = \frac{U_{h,Fe}}{I_m} = 82,06\Omega \quad (27)$$

2) Verhältnis aus Haupt- und Streureaktanz: mit  $X_\sigma = X_{1,\sigma} + X'_{2,\sigma}$

$$\frac{X_h}{X_\sigma} = \frac{82,06\Omega}{13,652\Omega} = 6,01 \quad (28)$$

Die Hauptreaktanz ist ca. 6 mal größer als die Streureaktanz.

3) Vollständige Ersatzschaltbild [ESB]: Das ESB beschreibt immer einen Strang der Maschine, so dass die Verschaltung (Stern- oder Dreieck) bezüglich der Messgrößen Strom und Spannung zu berücksichtigen ist.  $U_1$  und  $I_1$  stellen die Stranggrößen des Ersatzschaltbildes dar.

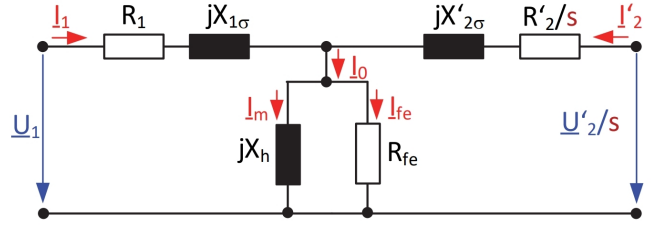


Abbildung 3: Vollständige Ersatzschaltbild

### III. TRENNUNG VON EISEN- UND REIBUNGSVERLUSTEN

Die gemessenen Leerlaufleistungen  $P_0$  beinhalten  $P_{Cu}$ ,  $P_{Reib}$  und  $P_{Fe}$ . Um die Eisen- und Reibungsverluste zu trennen, werden als Erstes die Kupferverluste  $P_{Cu}$  abgezogen.

$$P_0 - P_{Cu} = P_{Reib+Fe} \quad (29)$$

$I_0 [\text{A}]$	$P_0 [\text{W}]$	$P_{Cu} [\text{W}]$	$P_{Fe+Reib} [\text{W}]$	$U [\text{V}]$	$n [\text{min}]$
2,75	240	19,1400	220,8600	400	1493
1,70	140	11,8320	128,1680	300	1490
1,10	80	7,6560	72,3440	200	1485
0,58	44	4,0368	39,9632	100	1461

Tabelle IV: Trennung von Eisen und Reibungsverlusten

Zur graphischen Ermittlung von  $P_{Reib}$  werden die Messwerte für  $P_{Reib+Fe}$  nun graphisch als Funktion der quadratischen Spannung  $U^2$  dargestellt.

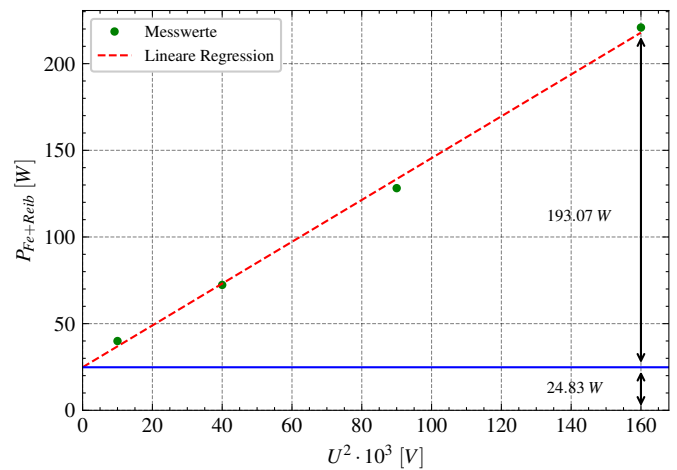


Abbildung 4: Trennung von Eisen- und Reibungsverlusten

Die Messerwerte bilden eine Gerade, deren Ordinatenabschnitt  $P_{Reib}$  darstellt.  $P_{Reib} = 24,38\text{W}$

Zur Berechnung von  $R_{Reib}$  wird die Spannung  $U_{h,Fe}$  aus 23 verwendet

$$R_{Reib} = \frac{3 \cdot U_{h,Fe}^2}{P_{Reib}} = 6205\Omega \quad (30)$$

Zur Bestimmung von  $R_{Fe}$  wird  $P_{Fe}$  an der Stelle  $U_{1N}^2$  abgelesen.  $P_{Fe} = 193,07W$

$$R_{Fe} = \frac{3 \cdot U_{h,Fe}^2}{P_{Fe}} = 783,56\Omega \quad (31)$$

1) Parallelschaltung von  $R_{Reib}$  und  $R_{Fe}$  :

$$R_{Reib} || R_{Fe} = \frac{R_{Reib} \cdot R_{Fe}}{R_{Reib} + R_{Fe}} = 695,7\Omega \quad (32)$$

2) Vergleich der Parallelschaltung von  $R_{Reib}$  und  $R_{Fe}$  mit  $R_{Reib+Fe}$  aus 5.3.2: Die starke Abweichung von  $136\Omega$  zwischen dem über Strom und Spannung berechneten Widerstand  $R_{h,Fe}$  und dem über die Leistung berechneten Widerstand lässt sich zum Teil mit dem sehr ungenauen analogen Wattmeter und dem dadurch entstehenden Parallaxenfehler begründen. Durch die Quadrierung der gemessenen Spannung verstärkt sich zusätzlich der Fehlereinfluss.

#### IV. $M/n$ KENNLINIE

aus (16), (8) und (4)

Mit  $R_1 = 2,82\Omega$ :

$$s_k = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_\sigma^2}} = \frac{5,80\Omega}{\sqrt{2,82^2 + 13,652^2}\Omega} = 0,416 \quad (33)$$

$$M_k = \frac{U_1^2}{4\pi n_1 (R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_\sigma^2})} \quad (34)$$

$$= \frac{400V^2}{4\pi \cdot 25\text{sec}^{-1} \cdot (2,82 + \sqrt{2,82^2 + 13,652^2})\Omega} \quad (35)$$

$$= 31,653Nm \quad (36)$$

Mit  $R_1 = 0\Omega$ :

$$s_k \approx \frac{R'_2}{X_\sigma} = \frac{5,80\Omega}{13,652\Omega} = 0,425 \quad (37)$$

$$M_k \approx \frac{U_1^2}{4\pi X_\sigma n_1} \approx \frac{400V^2}{4\pi \cdot 13,652\Omega \cdot 25\text{sec}^{-1}} \quad (38)$$

$$\approx 37,306Nm \quad (39)$$

$s$	$M[Nm]$	$n_1[\text{min}^{-1}]$
-0,50	-29,58	2250
-0,25	-30,09	1875
0,00	0	1500
0,25	30,09	1125
0,50	29,58	750
0,75	24,01	375
1,00	19,49	0

Tabelle V: Drehmoment über die Drehzahl

$s$	$M_{kippe}[Nm]$	$n_1[\text{min}^{-1}]$
-0,50	-25,32	2250
-0,25	-14,90	1875
0,00	0	1500
0,25	14,90	1125
0,50	25,32	750
0,75	30,39	375
1,00	31,65	0

Tabelle VI: Kippmoment über die Drehzahl

Der eben berechnete Wert hat eine Abweichung von wenigen Prozent im Vergleich zu dem in Kapitel I. gemessenen Drehmoment von  $30,6Nm$ , dies lässt sich mit den typischen Messungenauigkeiten begründen. Klar zu sehen ist aber das eine Vernachlässigung von  $R_1$  zu einem deutlichen Fehler führt.

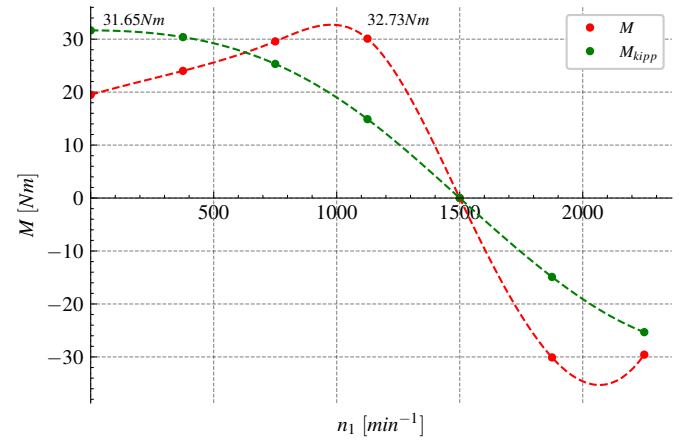


Abbildung 5:  $M/n$  Kennlinie

#### V. WIRKLEISTUNGSFLUSS

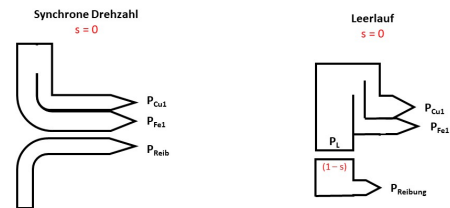


Abbildung 6: Wirkleistungsfluss für Synchrone Drehzahl und Leerlauf

Im Leerlauf und bei synchroner Drehzahl ist der Schlupf  $s = 0$ . Im Läufer wird keine Spannung induziert, das heißt es fließt kein Strom im Läufer. Somit treten keine  $P_{Cu2}$ -Verluste auf.

$$P_{Cu2} = P_L \cdot s \quad (40)$$

Die Synchrone Drehzahl kann nur erreicht werden, wenn die ASM mit einer Lastmaschine belastet wird, die die Leistung  $P_{Reib}$  aufbringt, sodass der Läufer die gleichen Drehzahl wie der Ständer hat.

Bei der Leerlaufmessung beinhaltet die gemessene Leistung  $P_1$  daher  $P_{Cu1}$ ,  $P_{Fe}$  und  $P_{Reib}$ . Bei der Messung bei Synchroner Drehzahl besteht  $P_1$  lediglich aus  $P_{Cu1}$  und  $P_{Fe}$ .

$I_1 [A]$	$P_1 [W]$	$n [min^{-1}]$	$s$	$P_L [W]$	$P_{mech} [W]$
5,4	2860	1330	0,11	2420,24	2121,11
5,0	2620	1347	0,10	2215,43	1964,63
4,2	2040	1388	0,07	1697,70	1546,10
3,1	980	1450	0,03	705,63	657,28
2,8	200	1500	0,00	-57,05	-81,88
3,2	-700	1550	-0,03	-979,70	-1037,19
4,2	-1570	1595	-0,06	-1912,30	-2058,25
5,0	-2040	1625	-0,08	-2444,57	-2673,11
5,4	-2320	1644	-0,10	-2759,76	-3049,53

Tabelle VII:  $P_L$  und  $P_{mech}$

$n [min^{-1}]$	$M_L [Nm]$	$M_{mech} [Nm]$
1330	17,38	15,23
1347	15,71	13,93
1388	11,68	10,64
1450	4,65	4,33
1500	-0,36	-0,52
1550	-6,04	-6,39
1595	-11,45	-12,32
1625	-14,37	-15,71
1644	-16,03	-17,71

Tabelle VIII:  $M_L$  und  $M_{mech}$

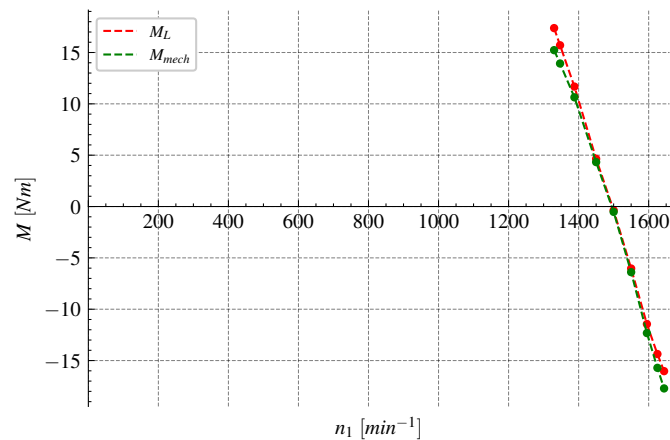


Abbildung 7:  $(M_L)$  bzw.  $(M_{mech})/n$  Kennlinie

## VI. LÄUFERSpannung UND -FREQUENZ

Über die Änderung der Drehzahl  $n$  wird die Läuferfrequenz und damit die im Läufer induzierte Spannung  $U_2$  beeinflusst.

$$f_2 = \frac{n_1 - n}{n_1} \cdot f_1 \quad (41)$$

$n [min^{-1}]$	$U_2 [V]$	$f_2 [Hz]$
0	83,3	50,00
250	69,5	41,67
500	56,0	33,33
750	41,6	25,00
1000	27,7	16,67
1250	14,0	8,33
1500	2,1	0,00
1750	13,8	-8,33
2000	28,3	-16,67

Tabelle IX: Läufer Spannung abhängig von der Drehzahl

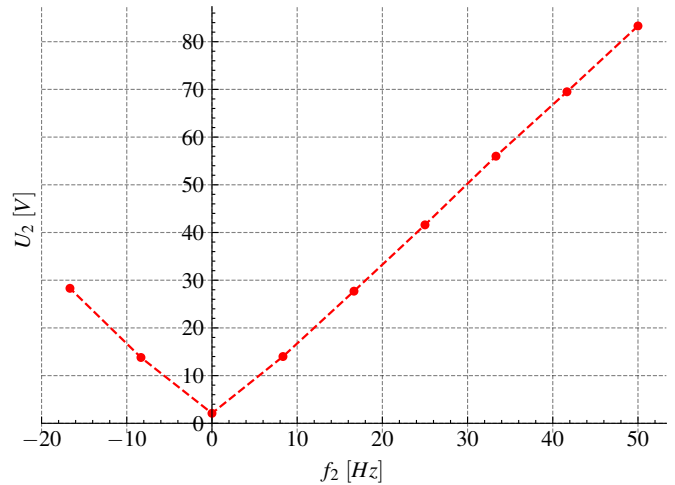


Abbildung 8: Spannung  $U_2$  über  $f_2$

Es ist zu sehen, dass die induzierte Spannung mit steigender Drehzahl also sinkender Frequenz abnimmt, dieser Zusammenhang geht aus dem Induktionsgesetz hervor, wonach die induzierte Spannung abhängig von der relativen Bewegung ist.

Die Läuferfrequenz sinkt bis ins Negative. Diese negative Frequenz gibt den Generatorbetrieb an, weswegen man hier auch wieder eine steigende Läufer Spannung messen kann.

1) *Vergleich des errechneten und gemessenen Übersetzungsverhältnisses  $\ddot{u}$ :* Will man aus den gemessenen Werten das Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u}$  berechnen, benötigt man die Spannung  $U_{20}$  für eine Drehzahl von  $n = 0$  beziehungsweise der synchronen Frequenz von  $f_1 = 50 Hz$ . Die Ständerspannung  $U_1$  liegt an 400V an.

Vergleicht man das mit den Werten des Datenblatts errechnete Übersetzungsverhältnis von 4,77 mit dem gemessenen von 4,8, liegt ein Fehler von knapp 1% vor.

$$\ddot{u} = \frac{U_1}{U_{20}} = \frac{400V}{83,3V} = 4,80 \quad (42)$$

## VII. WEITERE FRAGEN ZUR ASM

### A. Möglichkeiten zur Drehzahländerung einer ASM

$$n = \frac{f_1}{p} \cdot (1 - s) \quad (43)$$

Diese Gleichung zeigt drei Möglichkeiten zur Änderung der Drehzahl auf.

- 1) Änderung der Speisefrequenz mittels Frequenzumrichter
- 2) Änderung der Polpaarzahl

$$n \sim \frac{1}{p} \quad (44)$$

Die Drehzahl ist indirekt proportional zur Polpaarzahl.

- 3) Änderung des Schlupfs

Die Änderung der Statorspannung bei einer gleichbleibenden Belastung führt zu einer Änderung des Schlupfs.

Um im stabilen Betriebsbereich zu bleiben, muss  $s < s_k$  sein.

### B. Warum ist der Leerlaufstrom $I_0$ der ASM nicht Null? Welchen Hauptzweck erfüllt er?

Der Leerlaufstrom  $I_0$  dient der Magnetisierung der Hauptreaktanz und kann daher als Magnetisierungsstrom  $I_m$  interpretiert werden. Im Leerlauf kann das ESB auf den Ständerwicklungswiderstand und die Hauptreaktanz zusammengefasst werden. Daher nimmt die Maschine im Leerlauf nahezu ausschließlich Blindleistung auf.

### C. Welche Frequenz hat der Strom im Läufer einer ASM im Stillstand?

Im Stillstand ist der Schlupf  $s = 1$ . Der Läufer steht still und die Läuferströme haben Netzfrequenz. Die ASM verhält sich im Stillstand wie ein sekundärseitig kurzgeschlossener Transformator. Der Betriebspunkt der ASM im Stillstand wird als Kurzschlusspunkt der ASM bezeichnet.

### D. Welches Drehmoment liefert eine ASM, wenn sie mit synchroner Drehzahl läuft?

Bei synchroner Drehzahl wird keine Spannung im Läufer induziert, weshalb kein Strom im Läufer fließt. Das Drehmoment ist abhängig vom Stromfluss:  $M \sim I^2$

Daher geht das Drehmoment bei synchroner Drehzahl gegen Null.