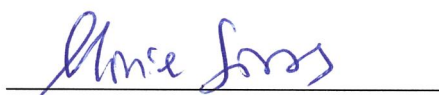

Protokoll zur Laborübung Elektrische Antriebe
Labor PSM/SM
GRUPPE 9



Thomas Ballon
(01229060)



Paul Reisch
(01529144)



Olivier Siess
(01125820)



Markus Sonnleitner
(00326193)



Armin Wessel
(01427066)

zu Händen von
Senior Scientist Dipl.-Ing. Dr.techn. Matthias Hofer
Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Martin Izaak

Technische Universität Wien
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe

Inhaltsverzeichnis

1	Elektrisch erregte Synchronmaschine	3
1.1	Leerlaufversuch	3
1.2	Kurzschlussversuch	3
1.3	Synchronisation an das Spannungsnetz	4
1.4	Bestimmung der Potierreaktanz	5
1.5	Betriebszustände der Synchronmaschine	7
1.5.1	Messungen	8
1.5.2	Berechnung und Zeigerdiagramme	9
2	Permanentmagnet-erregte Synchronmaschine (PSM)	13
2.1	Feldorientierte Regelung	13
2.2	BLDC-Betrieb	18
2.3	Feldschwächbetrieb	18
3	Anhang	20

1 Elektrisch erregte Synchronmaschine

Die in der Laborübung verwendete Maschine besitzt jeweils 3 Wicklungen pro Strang. Die Wicklungen können wahlweise am Klemmkasten seriell oder parallel und in Stern oder Dreieck verschaltet werden. Für die Übungsdurchführung wurden die Wicklungen seriell in Stern geschaltet, wodurch sich folgende Nenndaten ergeben:

$$U_N = 400 \text{ V}, \quad I_N = 57,7 \text{ A}, \quad n_N = 1000 \frac{\text{U}}{\text{min}}$$

Eigentlich handelt es sich dabei um eine Schenkelpolmaschine (Achsigkeit), allerdings wird diese für unsere Zwecke als Vollpolmaschine behandelt. Außerdem besitzt die Synchronmaschine eine gekoppelte Nebenschlussmaschine, welche den Erregerstrom für die Synchronmaschine liefern kann. Somit kann das System im Fall eines Blackouts ohne externe Versorgung (Erregung) hochgefahren werden. Für unsere Anwendung wurde jedoch ein Spartransformator mit einem Gleichrichter für die Erregung verwendet.

Die elektrisch erregte Synchronmaschine (SM) ist mechanisch an eine Gleichstrommaschine (GSM) gekoppelt. Dabei handelt es sich um eine Nebenschluss-Gleichstrommaschine, die über ein starres Gleichspannungsnetz (Batterie) versorgt wird. Beim Einschalten ist darauf zu achten, dass der Einschaltstrom durch einen Anlaufwiderstand R_V begrenzt wird, um eine Beschädigung der Laboreinrichtung (Maschine, Zuleitungen, etc.) zu vermeiden. Nachdem die Maschine hoch gefahren ist, wird der Anlaufwiderstand kurzgeschlossen und die Erregung über den Erregerwiderstand R_E eingestellt (für den Anlaufvorgang wird R_E auf ein Minimum eingestellt, um bei gegebenem Ankerstrom I_A maximales Anzugsmoment zu erhalten).

1.1 Leerlaufversuch

Beim Leerlaufversuch der SM wird ein stromloser Stator und eine konstante Drehzahl $n = n_N$ vorausgesetzt und stellt die in den Statorwicklungen induzierte Spannung (=Klemmenspannung U_{sL}) in Abhängigkeit des Felderregerstroms I_f dar. Dieser wird ausgehend von $I_f = 0$ erhöht, bis sich eine Klemmenspannung von $U_{sL} \approx 500 \text{ V}$ einstellt (1. Leerlaufmessreihe) und anschließend wieder bis $I_f = 0$ reduziert (2. Leerlaufmessreihe).

Die Drehzahl wird über die (mechanisch) gekoppelte GSM auf eine Drehzahl von $n = n_N$ geregelt. Dazu wird die Erregung der Nebenschluss-GSM über den Vorwiderstand R_E im Erregerkreis variiert bis sich die gewünschte Drehzahl einstellt und dort während der gesamten Messung gehalten. Die resultierende Leerlaufkennlinie ist in Abbildung 1 zu sehen. Der charakteristische Felderregerstrom I_{fL} , für den

$$\frac{U_{sL}(I_{fL})}{U_{sN}} = 1$$

gilt, entspricht $\approx 4,5 \text{ A}$.

1.2 Kurzschlussversuch

Der Kurzschlussversuch der Synchronmaschine erfolgt mit kurzgeschlossenen Statorklemmen und (wie beim Leerlaufversuch) ebenfalls mit konstanter Nenndrehzahl $n = n_N$. Der Kurzschlussstrom wird mit einer Stromzange gemessen, während der Erregerstrom I_f gesteigert wird.

Die Nenndrehzahl wurde wieder über die gekoppelte fremderregte GSM eingestellt und bei Bedarf nachgeregelt, sodass die Drehzahl über die gesamte Messung konstant bleibt. Die gemessene Kurzschlusskennlinie ist in Abbildung 2 dargestellt. Der Zusammenhang ist linear, da die innere Spannung der Synchronmaschine aufgrund der Ankerrückwirkung wesentlich kleiner als die Nennspannung der Maschine ist. Die mittlere Steigung der Geraden lässt sich einfach über die gemessenen Werte berechnen:

$$k_K = \frac{dI_{sK}}{dI_f} = \frac{60,5 - 0,7}{4,6 - 0} = 13$$

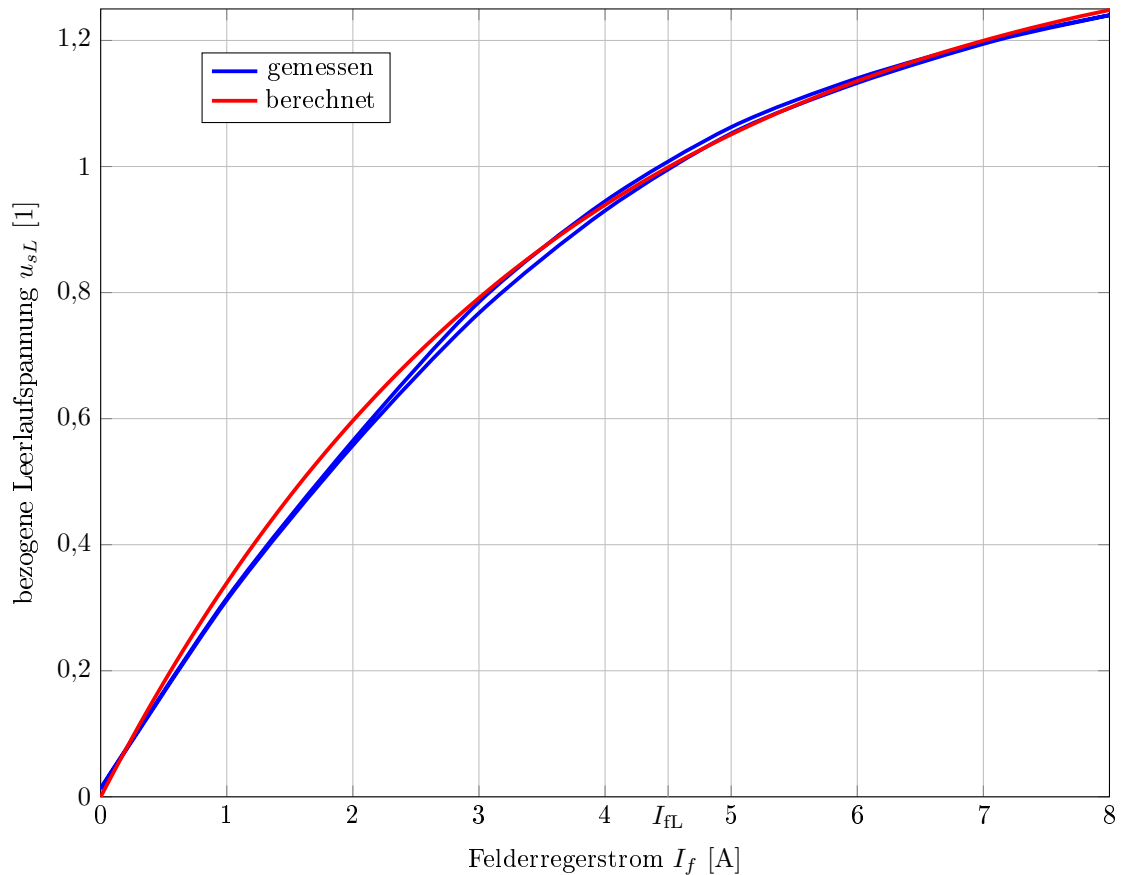


Abbildung 1: Gemessene und korrigierte (Δ) Leerlaufkennlinie der Synchronmaschine

Dies entspricht bezogen auf den Nennstrom ca. 0.2253. Der charakteristische Felderregere Strom I_{fK} entspricht der Gleichung

$$\frac{I_{sK}(I_{fK})}{I_{sN}} = 1$$

und ergibt ca. $I_{fK} = 4,44 \text{ A}$ und ist in der Abbildung ebenfalls eingezeichnet.

1.3 Synchronisation an das Spannungsnetz

Im nächsten Schritt muss die Synchronmaschine mit dem Netz synchronisiert werden. Dabei müssen folgende Bedingungen erfüllt werden für ein stoßfreies Zuschalten:

- gleiche Spannungsamplituden
- gleiche Frequenz
- gleiche Phasenlage
- gleiche Phasenfolge

Die sogenannte Hell-Dunkel-Schaltung wurde für den Abgleich genutzt. Die zugrunde liegende Schaltung kann dem Laborskript entnommen werden. Der Aufbau im Labor hat jeweils 2 redundante Lampen, damit es unter keinem Umständen zu einer falschen Zuschaltung kommt, weil eine Lampe ausgefallen ist.

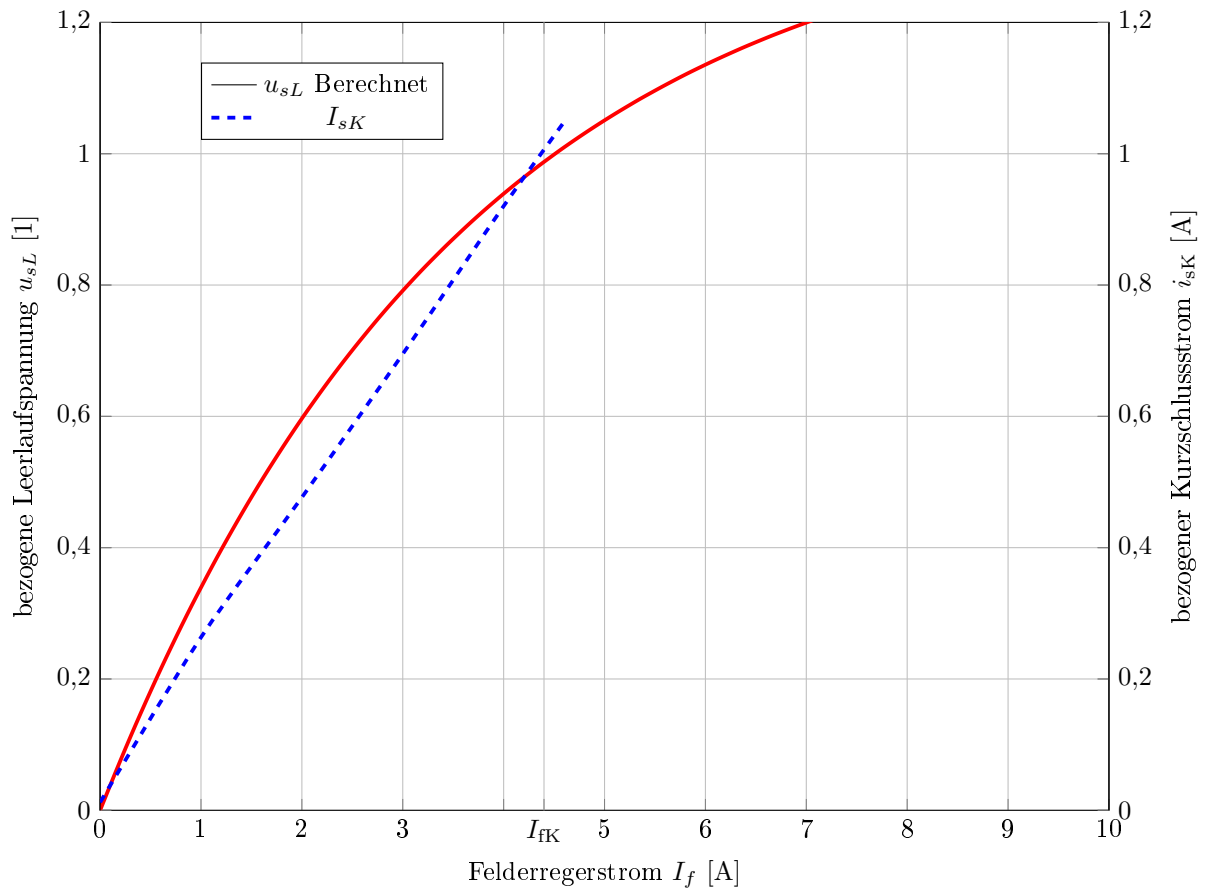


Abbildung 2: Gemessene und korrigierte (Δ) Leerlaufkennlinie und Kurzschluss

Die Spannungsamplitude wurde einfachheitshalber über ein Voltmeter überprüft. Falls die Spannungen nicht übereinstimmen, muss der Erregerstrom der Synchronmaschine entsprechend nachjustiert werden.

Der Frequenzabgleich ist dann gegeben, wenn die Helligkeit der Lampen sich nicht ändert. Bei einer Frequenzdifferenz stellt sich eine fortlaufende Spannungsänderung ein, die über die Lampen visualisiert wird. Um die Frequenz anzupassen muss die Drehzahl der Maschine über die gekoppelte GSM geändert werden.

Die Phasenfolge ist dann richtig, wenn die "richtigen" Lampen hell bzw. dunkel sind. Bei vertauschen der Phasenlage würden die falschen Lampen hell/dunkel sein. Die Phasenlage sind dann gleich, wenn die Dunkellampe dunkel ist und die beiden anderen Lampen gleich hell sind. Ist dies nicht der Fall muss die Drehzahl kurzzeitig geändert werden, damit sich die Phasen verschieben können.

Sind alle Bedingungen erfüllt kann die Maschine über einen Schalter mit dem Netz verbunden werden.

1.4 Bestimmung der Potierreaktanz

Nachdem die Maschine erfolgreich ans Netz gekoppelt wurde, soll die Potierreaktanz bestimmt werden. Dazu wird die graphische Methode nach Fischer-Hinnen genutzt.

Zusätzlich zur Leerlauf- und Kurzschlusskennlinie wird noch der induktive Vollastpunkt IV benötigt, damit alle relevanten Maschinendaten bestimmt werden können. Der Induktive Vollastpunkt ist dadurch gekennzeichnet, dass die Maschine nur Blindleistung abgibt und keine Wirkleistung.

Die Maschine wirkt also kapazitiv aus Sicht des Netzes.

Um die Synchronmaschine in den induktiven Volllastpunkt zu bringen, wurde der Erregerstrom erhöht bis sich Nennstrom und Nennspannung einstellen. Die Verluste der Synchronmaschine werden von der GSM gedeckt, indem das Drehmoment (bzw. der Erregerstrom der GSM) so gewählt wird, dass keine Wirkleistung aufgenommen wird. Der induktive Volllastpunkt ist in Abbildung 3 dargestellt und liegt bei ca. $I_{fIV} = 10,4 \text{ A}$.

Für die Bestimmung der Potierreaktanz muss nun der Strom $I_{fK} = 4,4 \text{ A}$ vom Strom I_{fIV} subtrahiert werden und ins Diagramm eingetragen werden. Durch Parallelverschiebung der Anfangssteigung der Leerlaufkennlinie durch eben erhaltenen Punkt kann mit dem Schnittpunkt der Leerlaufkennlinie die innere Spannung im induktiven Volllastpunkt $u_{iIV} = 1.163$ abgelsen werden. Die Höhe des entstandenen Dreiecks entspricht der Potierreaktanz $x_p = 0.163$. Die Teillänge $I''_{sN} = 4 \text{ A}$ wird für den Umrechnungsfaktor γ gebraucht.

$$\gamma = \frac{I''_{sN}}{I_{sN}} = 0.069$$

Darüber hinaus lassen sich die gesättigte (k_c) und ungesättigte (k_{c0}) Leerlauf-Kurzschluss-Verhältnisse graphisch ablesen.

$$k_{c0} = \frac{I_{f0}}{I_{fK}} = \frac{2,6 \text{ A}}{4,4 \text{ A}} 0.59, \quad k_c = \frac{I'_{f0}}{I_{fK}} = \frac{4,53 \text{ A}}{4,4 \text{ A}} 1.03$$

Aus diesen können die gesättigte und die ungesättigte bezogene synchrone Längsreaktanz abgeleitet werden.

$$x_d = \frac{1}{k_c} = 1.69, \quad x_{d0} = \frac{1}{k_{c0}} = 0.97$$

Die charakteristischen Ströme können durch die Beziehung

$$i_f = \frac{I'_f}{I_{sN}} = \frac{I_f}{\gamma I_{sN}}$$

auf die Statorseite umgerechnet werden. Die aus dem Diagramm entnommenen Werte sind in der Tabelle 1 zusammengefasst, die daraus berechneten Werte können der Tabelle 2 entnommen werden.

	abgelesene Werte
I_{fK}	4,4 A
I_{fL}	4,53 A
I_{fIV}	10,4 A
I''_{sN}	4 A
x_p	0.163
u_{iIV}	1.163
u_{iK}	0.163
k_c	0.59
k_{c0}	1.03

Tabelle 1: Die abgelesenen Werte aus LL- und KS-Versuch nach Fischer-Hinnen

Die synchrone Hauptfeldreaktanz x_{dh} wurde abschließend als Funktion des bezogenen Magnetisierungsstroms i_{md} bestimmt. Es gilt allgemein

$$x_{dh}|_{i_{md}} = \frac{u_{iq}|_{i_{md}}}{i_{md}}$$

Der bezogene Magnetisierungsstrom ist durch

$$i_{md} = i_f + i_{sd}$$

	berechnete Werte
i_{fK}	1.105
i_{fL}	1.137
i_{fIV}	2.612
x_d	1.69
x_{d0}	0.97

Tabelle 2: berechnete charakteristische Größen

gegeben. Für den Leerlauf gilt $i_s = 0 \rightarrow i_{sd} = 0$ und somit vereinfacht sich Gleichung 1.4 zu:

$$x_{dh}|_{i_f} = \frac{u_s|_{i_f}}{i_f}$$

Durch Sättigungserscheinungen sinkt die Hauptfeldreaktanz bei steigendem Magnetisierungsstrom.

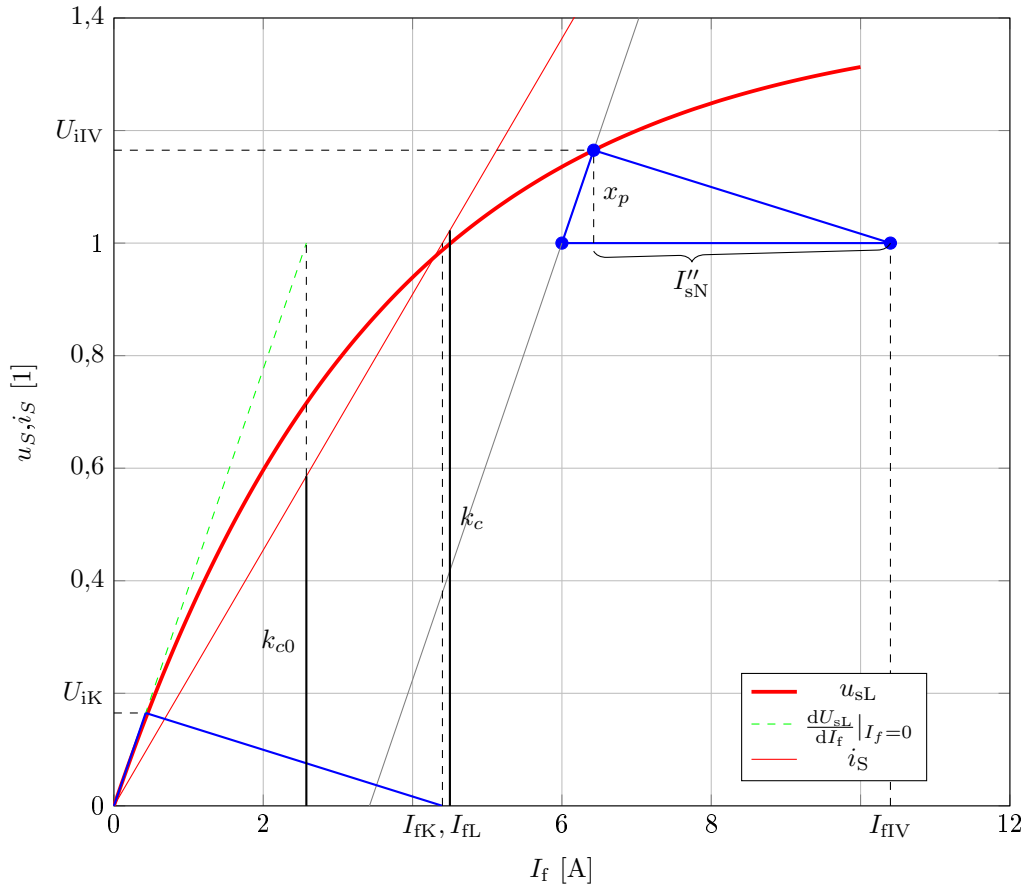


Abbildung 3: Konstruktion nach Fischer-Hinnen für die Bestimmung der Potierreaktanz.

1.5 Betriebszustände der Synchronmaschine

Um die möglichen Betriebszustände der SM zu untersuchen, wurden vier charakteristische Arbeitspunkte eingestellt. Die Synchronmaschine wurde am Netz betrieben, durch Variieren des

Felderregnerstromes I_f der SM kann unter- bzw. übererregung eingestellt werden. Die gekoppelte GSM arbeitet abhängig vom Erregerstrom I_E als Motor oder Generator. Somit kann durch Variation von I_E an der GSM die Synchronmaschine in einen motorischen bzw. generatorischen Arbeitspunkt gezwungen werden.

1.5.1 Messungen

Zum Einstellen der Arbeitspunkte wurden analoge Instrumente verwendet, die eingestellten Werte sind in Tabelle 3 dargestellt.

	$P [kW]$	$Q [kVA]$	$\cos(\varphi)$
Motorisch untererregt	25	26	0.7 ind
Motorisch übererregt	28	-27	0.75 kap
Generatorisch untererregt	-24	28.5	0.66 kap
Generatorisch übererregt	-24	-28	0.76 ind

Tabelle 3: Messwerte der analogen Instrumente

Nach einstellen der Arbeitspunkte wurden zwei digitale Wattmeter verwendet um Außenleiterströme, Außenleiterspannungen und die von der SM aufgenommene Wirkleistung zu messen. Die aufgezeichneten Werte sind in Tabelle 4 dargestellt. Die Wirkleistung P wird entsprechend der 2-Wattmeter-Methode berechnet:

$$P_{ges} = P_1 + P_2.$$

Aus den gemessenen Strömen und Spannungen wird ihr Mittelwert gebildet. Weiters werden die Außenleitergrößen auf Stranggrößen umgerechnet:

$$U_{AL} = \frac{U_1 + U_2}{2} \quad I_{AL} = \frac{I_1 + I_2}{2}$$

$$U_S = \frac{U_{AL}}{\sqrt{3}} \quad I_S = I_{AL}.$$

Aus den so berechneten Größen können weiters die Scheinleistung und die Blindleistung berechnet werden:

$$S = 3 U_S I_S$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}.$$

Die für die Raumzeigerrechnung verwendeten Bezugsgrößen sind

$$U_{Bez} = U_{NS} = 231 \text{ V}$$

$$I_{Bez} = I_{NS} = 57,7 \text{ A}$$

$$S_{Bez} = 3 U_{Bez} I_{Bez} \approx 40 \text{ kV A.}$$

	$I_f [A]$	$U_1 [V]$	$U_2 [V]$	$I_1 [A]$	$I_2 [A]$	$P_1 [kW]$	$P_2 [kW]$
Motorisch untererregt	2	371	370	59.4	58.3	21.4	6.3
Motorisch übererregt	8.5	391	390	57.9	56.3	6.3	21.2
Generatorisch untererregt	2	380	380	55.7	56	-3.1	-19.9
Generatorisch übererregt	8.9	401	402	53.9	54.2	-21.3	-8.3

Tabelle 4: Messwerte der digitalen Instrumente

1.5.2 Berechnung und Zeigerdiagramme

Aus den Werten der Tabelle 4 ergeben sich für jeden Betriebszustand die Werte U_S , I_S und P . Diese werden, zusammen mit den aus ihnen berechneten Größen in bezogene Größen umgerechnet:

$$\begin{aligned} u_S &= \frac{U_S}{U_{Bez}} & i_S &= \frac{I_S}{I_{Bez}} \\ p &= \frac{P}{S_{Bez}} & q &= \frac{Q}{S_{Bez}} \\ s &= \frac{S}{S_{Bez}}. \end{aligned}$$

Der Phasenwinkel φ_S kann aus der Beziehung

$$\cos(\varphi_S) = \frac{P}{S} = \frac{p}{s}$$

berechnet werden, wobei auf das Vorzeichen zu achten ist. Die Potierreaktanz x_p und der Umrechnungsfaktor γ wurden in Punkt 1.4 bestimmt.

$$\begin{aligned} x_p &= 0.163 \\ \gamma &= 0.069 \end{aligned}$$

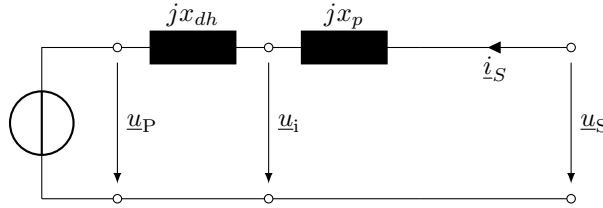


Abbildung 4: Ersatzschaltbild der elektrisch erregten Synchronmaschine

Das Zeigerdiagramm wird ausgehend vom Ersatzschaltbild in Abbildung 4 im statorspannungsfestem uv -Koordinatensystem berechnet. Der Statorwiderstand r_S wurde vernachlässigt. In diesem Koordinatensystem liegt der Statorspannungsraumzeiger \underline{u}_S^{uv} per Definition in der imaginären v -Achse:

$$\underline{u}_S^{uv} = u_S \angle 90^\circ.$$

Die Lage des Statorstromraumzeigers \underline{i}_S^{uv} ist über φ_S relativ zu \underline{u}_S^{uv} bestimmt:

$$\underline{i}_S^{uv} = i_s \angle (90^\circ - \varphi_S).$$

Nach dem Ersatzschaltbild in Abb. 4 kann die innere Spannung \underline{u}_i^{uv} über

$$\underline{u}_i^{uv} = \underline{u}_S^{uv} - jx_P \underline{i}_S^{uv}$$

berechnet werden. Die bezogene Polradspannung \underline{u}_P^{uv} kann nicht mit dieser Methode berechnet werden, da die Hauptfeldreaktanz stark vom Arbeitspunkt abhängig ist, und deshalb x_{dh} unbekannt ist. Der Betrag $|u_P|$ wird stattdessen wie folgt über den Magnetisierungsstrom berechnet, und daraus anschließend x_{dh} bestimmt.

Der magnetisierend wirkende Strom $i_m(u_i)$ kann aus der Leerlaufkennlinie abgelesen werden. In Abb. 1 ist der Verlauf von $I_f(u_i)$ dargestellt, woraus sich für

$$i_m(u_S) = \frac{I_f(u_S)}{\gamma I_{Bez}}$$

ergibt. Da der magnetisierend wirkende Strom per Definition der inneren Spannung \underline{u}_i^{uv} um 90° nacheilt kann der Raumzeiger als

$$\underline{i}_m^{uv} = i_m(u_S) \angle (\arg(\underline{u}_i^{uv}) - 90^\circ)$$

angegeben werden. Aus der Knotenregel folgt nun der berechnete Wert des Felderregerstromes

$$\underline{i}_f^{uv} = \underline{i}_m^{uv} - \underline{i}_S^{uv},$$

wobei der Zusammenhang zwischen bezogener und nicht bezogener Größe als

$$i_f = \frac{I_f}{\gamma I_{Bez}}$$

gegeben ist.

Der Polradwinkel ϑ ist definiert als der Winkel zwischen Statorspannung und Polradspannung, jedoch findet sich dieser Winkel auch zwischen der reellen u -Achse und dem Felderregerstromzeiger wieder:

$$\vartheta = -\arg(\underline{i}_f^{uv})$$

Aus der Ähnlichkeit der beiden von den Zeigern gebildeten Dreiecke

$$u_P : jx_{dh}i_s : u_i = i_f : i_s : i_m$$

folgt für den Betrag

$$u_P = u_i \frac{i_f}{i_m},$$

und für den Raumzeiger

$$\underline{u}_P^{uv} = u_P \angle (90^\circ - \vartheta).$$

Damit sind alle für das Zeigerdiagramm notwendigen Raumzeiger berechnet. Mit der Kenntnis von ϑ können Größen des statorspannungsfesten uv -Koordinatensystems in das rotorfeste dq -Koordinatensystem umgerechnet werden:

$$\underline{z}^{dq} = \underline{z}^{uv} e^{j\vartheta}.$$

Damit kann die innere Spannung u_i in ihren rotorfesten Komponenten angegeben werden:

$$u_{id} + j u_{iq} = \underline{u}_i^{dq} = \underline{u}_i^{uv} e^{j\vartheta}.$$

Aus den bekannten Zeigern kann der Wert der bezogenen Längsreaktanz x_d geometrisch ermittelt werden. Der Cosinussatz angewendet auf das Dreieck mit den Seiten u_S , u_P und dem Winkel ϑ ergibt

$$(x_d i_S)^2 = u_S^2 + u_P^2 - 2u_S u_P \cos(\vartheta),$$

und nach x_d umgestellt

$$x_d = \sqrt{\frac{u_S^2 + u_P^2 - 2u_S u_P \cos(\vartheta)}{i_S^2}}.$$

Die synchrone Hauptfeldreaktanz x_{dh} ist dann

$$x_{dh} = x_d - x_P.$$

Die Ergebnisse der Berechnungen sind für alle Betriebszustände in Tabelle 5 dargestellt. Beachtenswert sind die unterschiedlichen Werte von x_{dh} für die verschiedenen Betriebszustände, in denen sich die Arbeitspunktabhängigkeit der Hauptfeldreaktanz widerspiegelt. Ebenfalls zu beachten sind die Unterschiede zwischen berechneten und gemessenem Felderregerstrom I_f bzw. i_f . Diese Unterschiede ergeben sich zum Teil aus dem Einfluss des in der Berechnung vernachlässigten Statorwiderstands und zum Teil aus der ebenfalls vernachlässigten magnetischen Achsigkeit der Maschine.

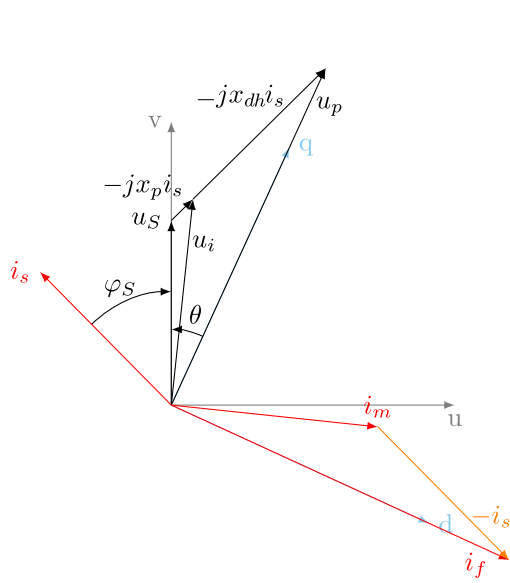
Die Zeigerdiagramme sind in Abbildung 5 dargestellt. Es ist gut erkennbar, dass für die übererregten (kapazitiv) Zustände der Betrag der Polradspannung u_P größer als der Betrag der Statorspannung u_S ist. Außerdem gut erkennbar ist dass die Winkel φ_S und ϑ entsprechend der Tabelle 6 zu liegen kommen.

	motorisch		generatorisch	
	übererregt	untererregt	übererregt	untererregt
u_s	0.97600	0.92601	1.00349	0.94975
i_s	0.9896	1.01993	0.93674	0.96794
$\varphi_s [^\circ]$	-44.59732	42.82172	-141.95259	128.73273
u_i	1.09529	0.8221	1.10416	0.83255
u_{id}	0.34967	0.73441	0.38359	0.73513
u_{iq}	1.03798	0.36945	1.03539	0.3908
x_{dh}	0.99662	0.82331	0.95567	0.79655
i_m	1.09901	0.99853	1.15538	1.0452
$i_{f,ber}$	1.96681	0.94326	1.92981	0.78244
$i_{f,gem}$	2.13498	0.50235	2.23545	0.50235
$I_{f,ber} [A]$	7.83046	3.75540	7.68315	3.11513
$I_{f,gem} [A]$	8.50000	2.00000	8.90000	2.00000
u_p	1.96016	0.7766	1.84426	0.62325
$\vartheta [^\circ]$	24.63719	71.82542	-26.58066	-68.81452
p	0.68774	0.69274	0.74026	0.5752
q	0.67814	0.64197	0.57934	0.71712
s	0.96585	0.94447	0.94001	0.9193

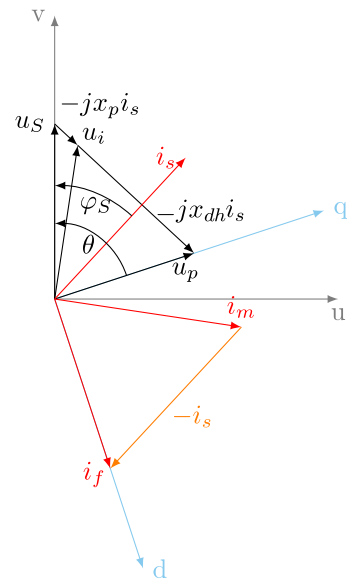
Tabelle 5: Berechnete Werte der vier Betriebszustände

Betriebszustand	φ_s	ϑ
Motor untererregt	$0^\circ < \varphi_s < 90^\circ$	$\vartheta > 0^\circ$
Motor übererregt	$-90^\circ < \varphi_s < 0^\circ$	$\vartheta > 0^\circ$
Generator untererregt	$90^\circ < \varphi_s < 180^\circ$	$\vartheta < 0^\circ$
Generator übererregt	$-90^\circ < \varphi_s < -180^\circ$	$\vartheta < 0^\circ$

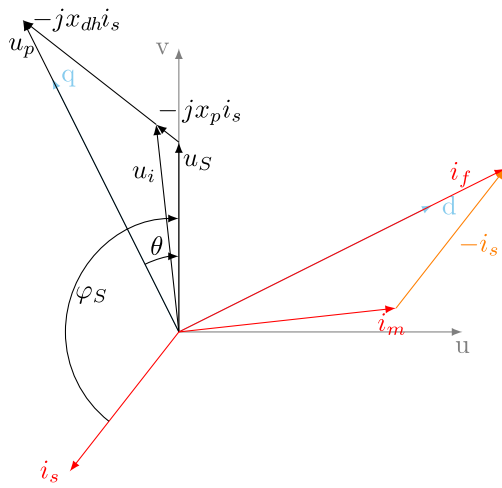
Tabelle 6: Charakteristische Winkel der Betriebszustände



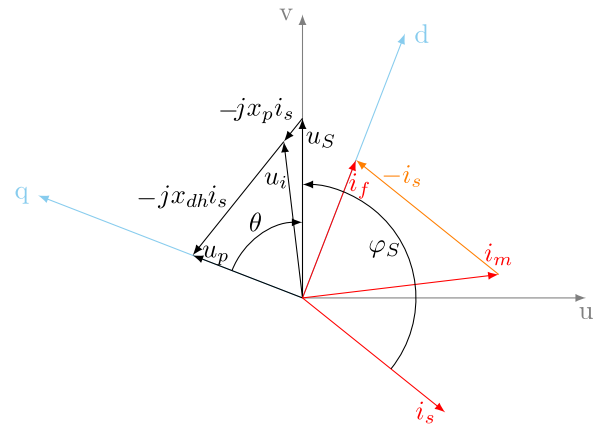
(a) motorisch übererregt



(b) motorisch untererregt



(c) generatorisch übererregt



(d) generatorisch untererregt

Abbildung 5: Zeigerdiagramme zu den verschiedenen Betriebszuständen der Synchronmaschine

2 Permanentmagnet-erregte Synchronmaschine (PSM)

Im Zuge des zweiten Teils der Laborübung erfolgte die Demonstration verschiedener Versuche auf Basis mehrerer Regelprinzipien an einem PSM-Aufbau. Dabei wurde die PSM entsprechend Abbildung 6 über einen Spannungszwischenkreisumrichter versorgt und war mechanisch mit einer Asynchronmaschine gekoppelt. Die Nenndaten beider Maschinen sowie weiterführende Details zum Aufbau sind dem Vorbereitungsskript zu entnehmen.

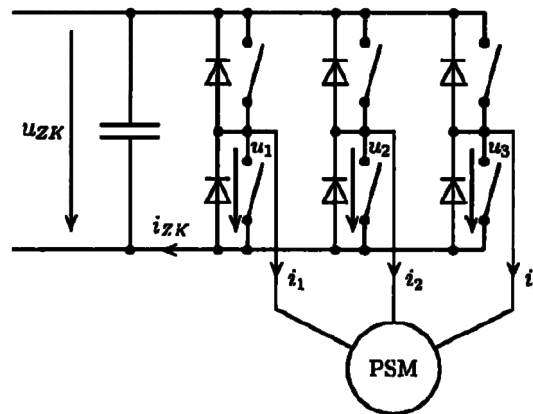


Abbildung 6: Verwendeter Spannungszwischenkreisumrichter.

Der Umrichter inklusive Regeleinheit ermöglicht sowohl BLDC- als auch Feldschwächbetrieb und eine feldorientierte Regelung. Entsprechende Sensoren zeichnen dabei die relevanten Größen auf, welche am Oszilloskop dargestellt und untersucht werden. Im Folgenden wird näher auf die einzelnen Betriebsarten und ihre Messgrößen eingegangen.

2.1 Feldorientierte Regelung

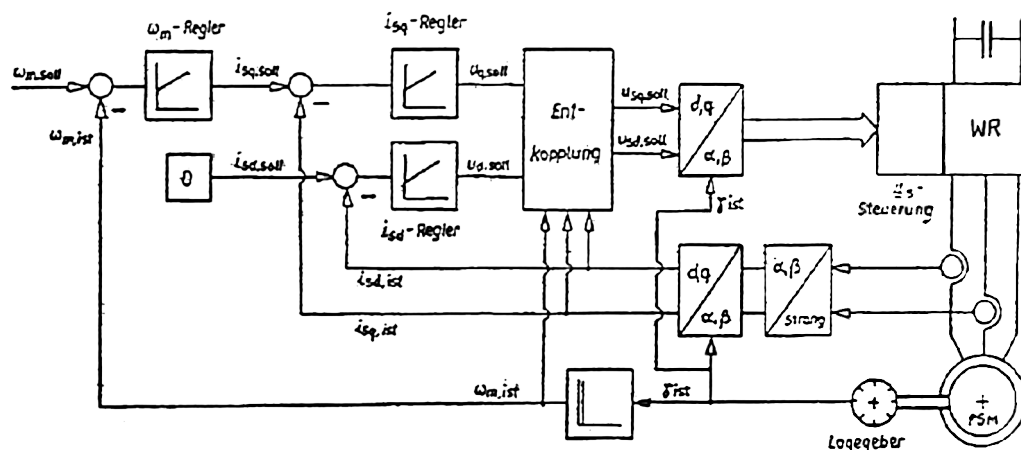


Abbildung 7: Blockschaltbild einer kaskadierten Regelung mit Entkopplungsnetzwerk.

Zunächst wird die hochdynamische feldorientierte Regelung betrachtet, bei der die Drehzahl der Maschine durch das Drehmoment, das entsteht, wenn eine auf den Fluss normal stehende q-Komponente des Stromes eingeprägt wird, beeinflusst werden kann:

$$m_R = -\text{Im}(i_S^* \cdot \underline{\Psi}_S) = i_{S,g} \cdot |\Psi_M| \quad (1)$$

Der Drehzahl-Regelkreis ist dabei entsprechend Abbildung 7 dem Stromregler überlagert (zusätzlich kann theoretisch noch eine Lageregelung überlagert werden). Die Entkopplung sorgt dabei für eine Unabhängigkeit der Spannungen u_d und u_q von den jeweiligen Strömen mit gegenteiligem Index. Die d-Komponente des Stromes wird in dieser Betriebsart zu 0 gewählt, da sie keinen Anteil am Drehmoment hat und lediglich zu unerwünschten Kupferverlusten führen würde.

Der erste Versuch ist das Hochlaufen der Maschine aus dem Stillstand - zunächst mit einer Stellgrößenbeschränkung, die lediglich halbes Nennmoment zulässt (Abbildung 8), und anschließend ohne Beschränkung (Abbildung 9).

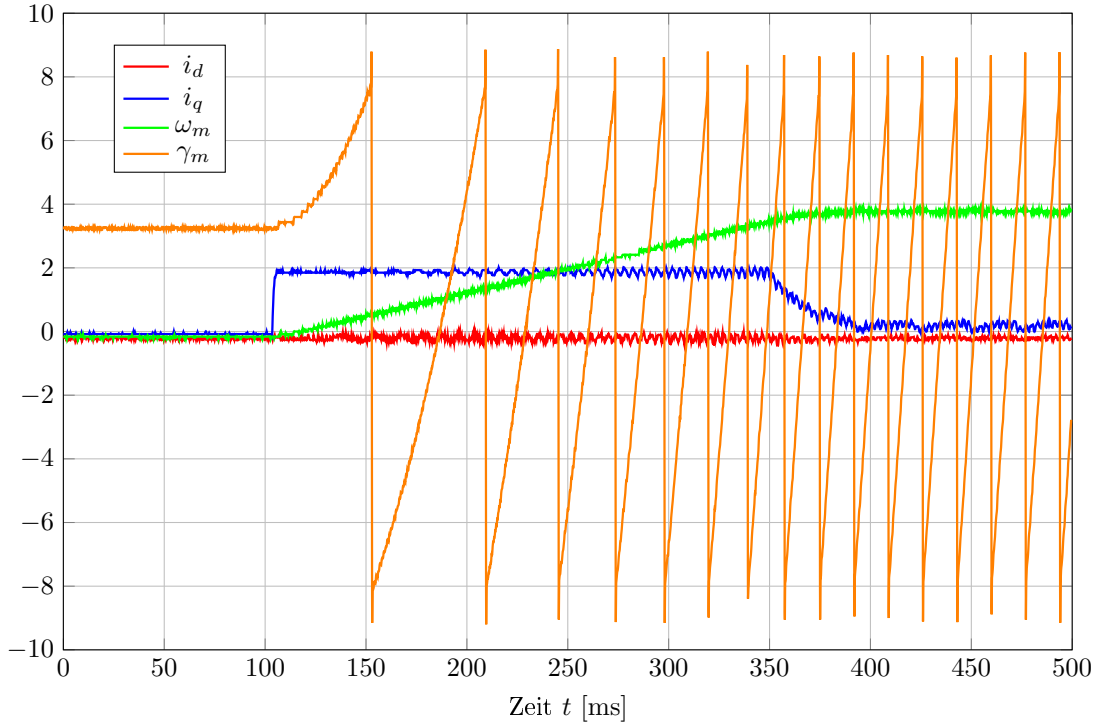


Abbildung 8: Zeitverlauf der Ströme, des Winkels und der Drehzahl beim Einschaltvorgang und halbem Nennmoment im d,q-KOS.

Deutlich erkennbar ist der lineare Anstieg der Drehzahl mit der Zeit, sobald die q-Stromkomponente und damit ein Drehmoment wirksam wird, was auf den Drallsatz zurückzuführen ist. Dementsprechend steigt der Lagewinkel als Integral über der Drehzahl quadratisch an. Ein weiterer linearer Zusammenhang ist erkennbar, wenn man die Zeit vergleicht, die jeweils benötigt wird, um die Nenndrehzahl zu erreichen: Im ersten Fall mit Stellgrößenbeschränkung auf halben Strom dauert es auch doppelt so lange (≈ 300 ms) als im Fall ohne Beschränkung (≈ 150 ms). Sobald die gewünschte Drehzahl erreicht ist, sinkt der Strom auf den vergleichsweise geringen Betrag, der dann nur mehr notwendig ist, um die laufenden (Reib-)Verluste abzudecken. Die d-Komponente des Stromes ist dabei, wie gewünscht und erwartet, bis auf einen gewissen Rippel (Ursache?) immer verschwindend groß. In Abbildung 10 sind die um 90° phasenverschobenen Ströme des Hochlaufs im statorfesten α, β -KOS ersichtlich.

Als nächster Versuch zum Feldschwächbetrieb erfolgte ein Drehzahlsprung, dessen Messgrößen in Abbildung 11 ersichtlich sind. Dabei wurde die Maschine ausgehend von $\omega_m = -1$ ohne Stellgrößenbeschränkung auf $\omega_m = 1$ in die entgegengesetzte Drehrichtung beschleunigt. Man erkennt beim Start des Vorganges ein bremsendes Moment durch Einprägen einer entsprechenden q-Stromkomponente. Die Drehzahl sinkt, bis sie 0 erreicht, und steigt anschließend aufgrund des wirkenden Momentes zur Folge des eingepprägten Stromes wieder in die gewünschte Richtung. Die Maschine beschleunigt wieder auf die gewünschte Drehzahl und es verbleibt abermals lediglich

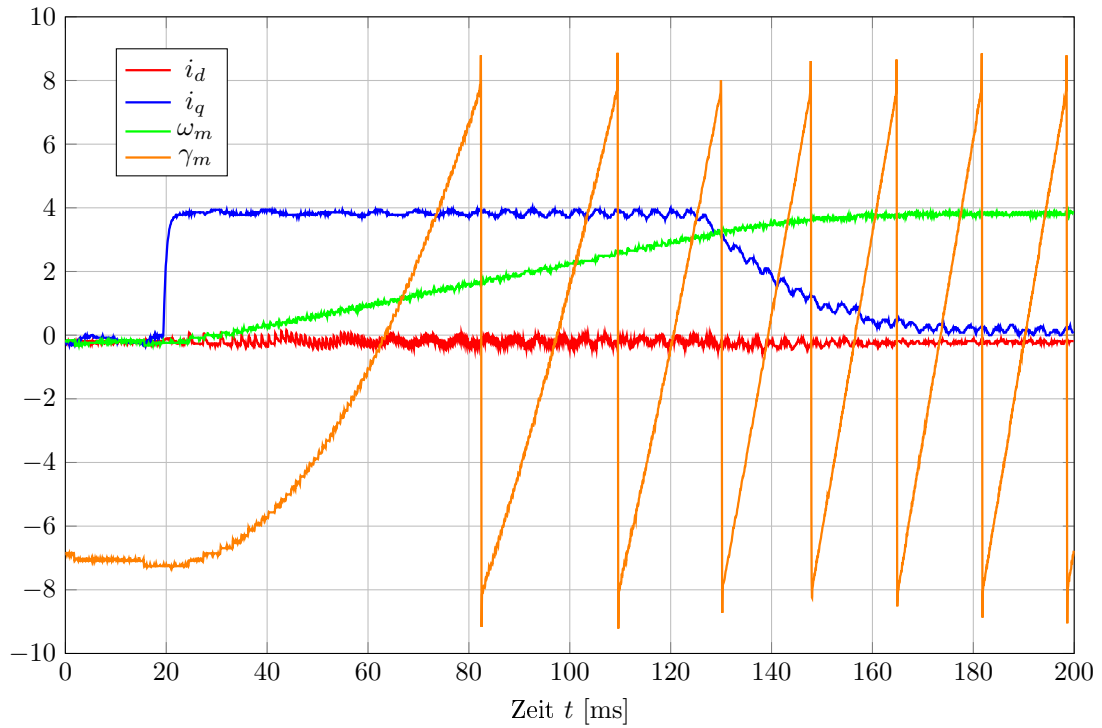


Abbildung 9: Zeitverlauf der Ströme, des Winkels und der Drehzahl beim Einschaltvorgang und vollem Nennmoment im d,q-KOS.

eine geringe Stromkomponente zur Kompensation der laufenden Verluste. Trägt man die Ströme jeweils auf die x- und y-Achse auf, so erhält man entsprechend Abbildung 12 die Stromortskurve für den feldorientierten Betrieb. Ausgehend von einem geringen Strom zur Folge der Reibung wird der Betrag des Stromes erhöht und der Stromraumzeiger vollführt im betrachteten statischen Koordinatensystem mit der Zeit eine annähernd kreisförmige Bewegung. Ist die gewünschte Drehzahl erreicht, verringert sich der Betrag wieder auf jenen Wert, der notwendig ist, um die laufenden Restverluste abzudecken. Die Ortskurve entspricht dabei nicht perfekt einem Kreis, da die diskrete Oberflächenanordnung der Permanentmagnete eine nicht sinusförmige Feldverteilung im Luftspalt hervorruft - daraus resultieren die gemessenen Oberschwingungen als „Ecken“ in der α, β -Stromortskurve. (Stimmt das so? Warum genau, physikalisch?)

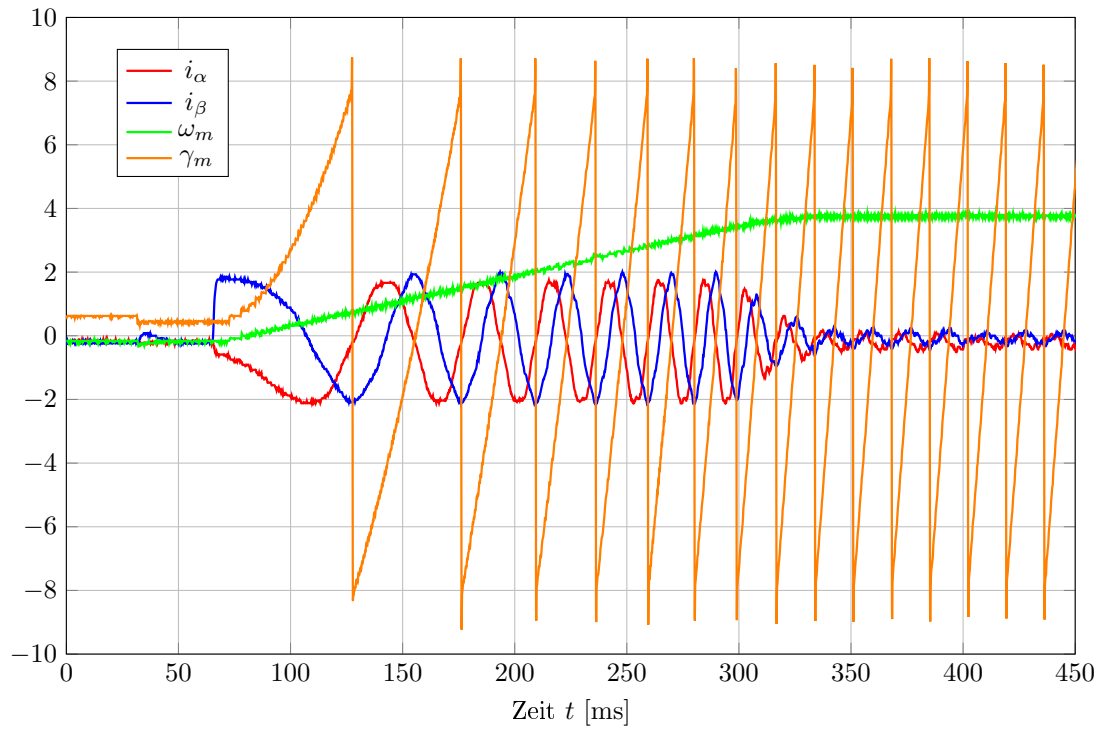


Abbildung 10: Zeitverlauf der Ströme, des Winkels und der Drehzahl beim Einschaltvorgang und halbem Nennmoment im α, β -KOS.

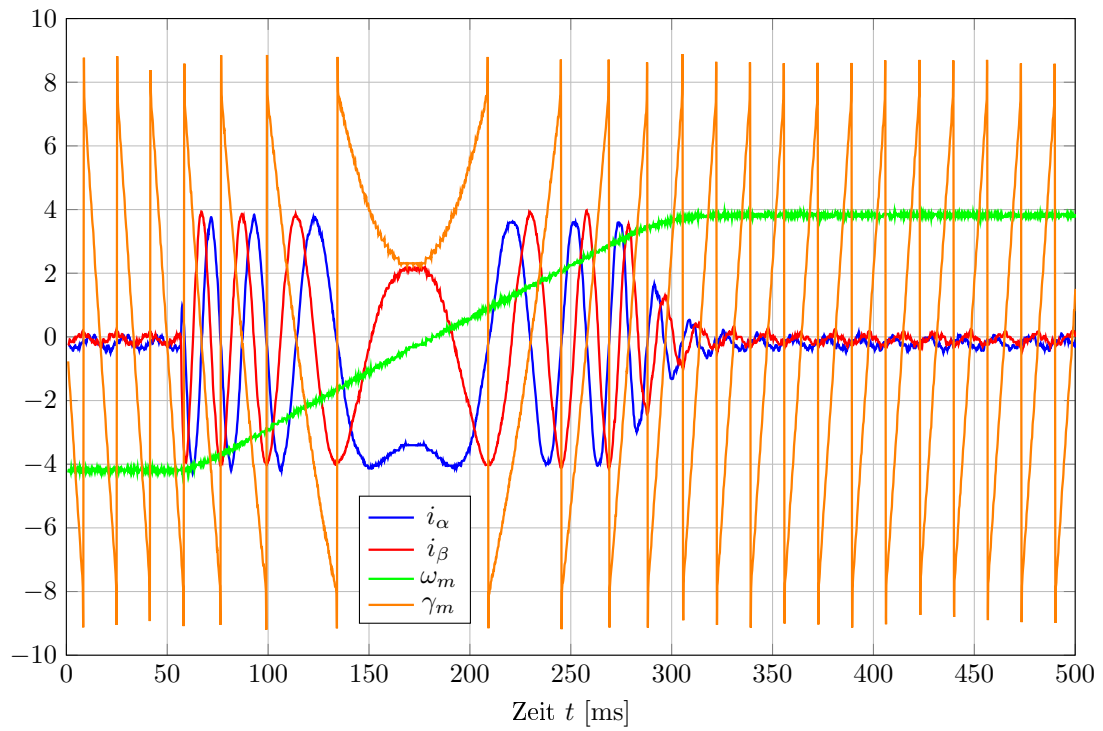


Abbildung 11: Zeitverlauf der Ströme, des Winkels und der Drehzahl beim Drehzahlsprung im Sinus-Betrieb.

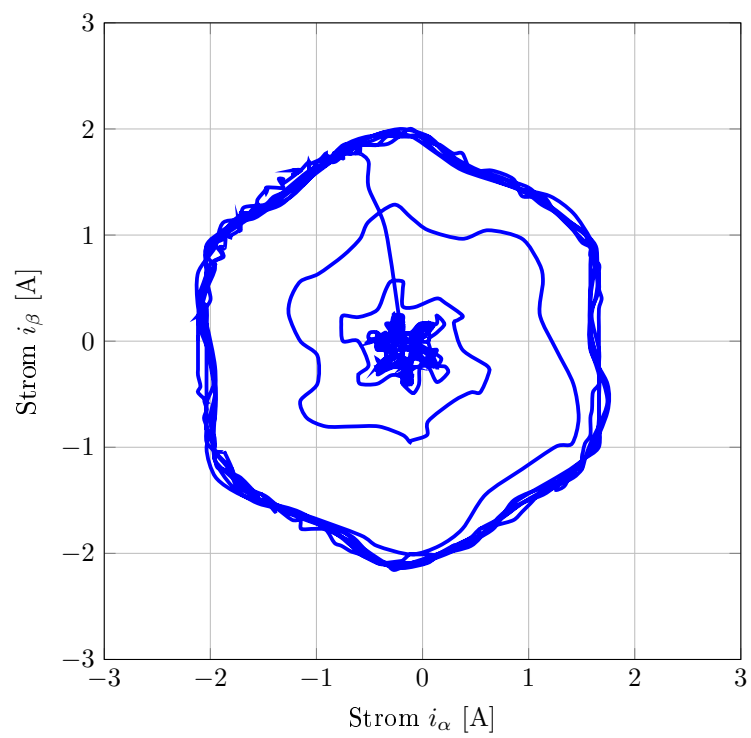


Abbildung 12: Stromortskurve beim Hochlaufen im Sinus-Betrieb.

2.2 BLDC-Betrieb

Der Brushless-DC Betrieb (BLDC) ist dadurch gekennzeichnet, dass zwei Stränge gegensätzlich und der dritte überhaupt nicht bestromt werden. Dadurch ergeben sich für den Stromraumzeiger nur 6 mögliche diskrete Richtungen im Abstand von jeweils 60° zueinander (vgl. links in Abbildung 13). Für die Bestimmung des Umschaltzeitpunktes ist kein teurer Lagesensor mehr nötig - es sind z.B. simple Hallelemente vollkommen ausreichend. Dieser Vorteil wird dadurch erkauft, dass aufgrund der doch recht groben Diskretisierung der möglichen Stromraumzeiger im Großteil der Rotorpositionen keine ideale Momentenausbeute möglich ist. Damit sinkt ausgehend vom maximalen Moment bei idealer Lage eines Stromraumzeigers (dem Fluss 90° voreilend) mit steigendem Lagewinkel γ_m (ist hier gleich dem Winkel zwischen Flussverkettungsraumzeiger und α -Achse) das verfügbare Moment m_R kosinusförmig, bis es beim Eintritt des Flussraumzeigers in den neuen Sektor wieder in der gleichen Form ansteigt und dann abermals das Maximum erreicht, wenn der Fluss dem aktuellen Sektor-Stromraumzeiger um genau 90° nacheilt (vgl. rechts in Abbildung 13).

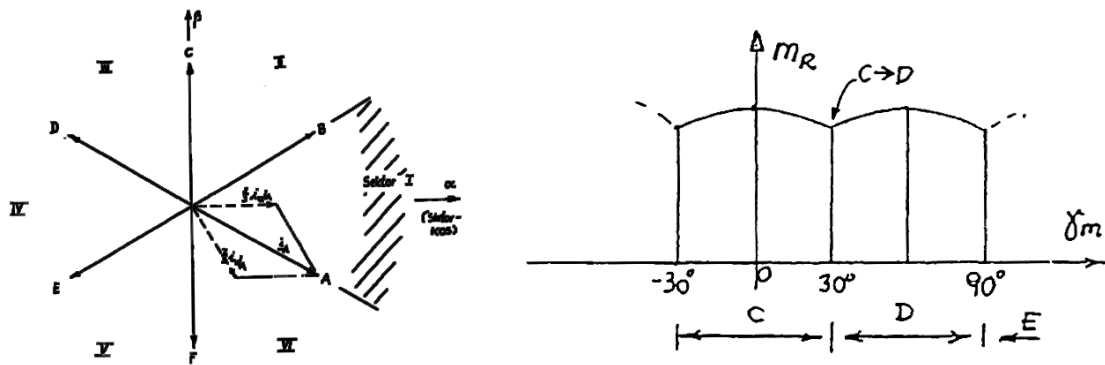


Abbildung 13: Diskrete Raumzeiger mit Sektoren im statorfesten KOS (links) und Momentenverlauf in Abhängigkeit der Rotorposition (rechts).

Im Zuge eines erneuten Drehzahlsprunges wurden die Ströme in dieser Betriebsart gemessen. Diese sind als Stromortskurve in Abbildung 14 dargestellt und zeigen die erwarteten diskreten Stromraumzeiger. Die abweichenden Stromraumzeiger, die mitten in den Sektoren zum Liegen kommen, sind auf ... ?? .. zurückzuführen.

Weiters ist der entsprechende Zeitverlauf der Messgrößen dieses Versuches in Abbildung 15 dargestellt.

2.3 Feldschwächbetrieb

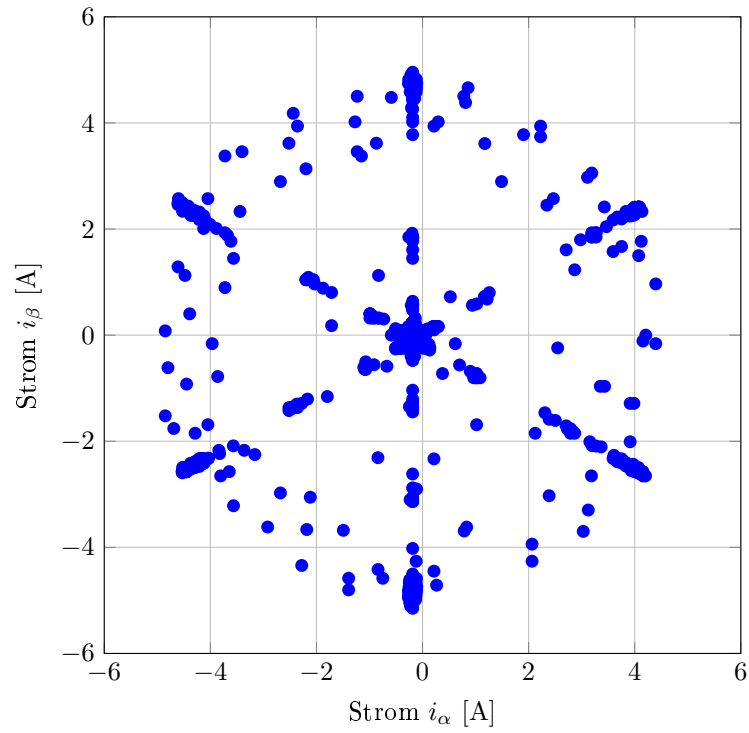


Abbildung 14: Stromortskurve für den Drehzahlsprung im BLDC-Betrieb.

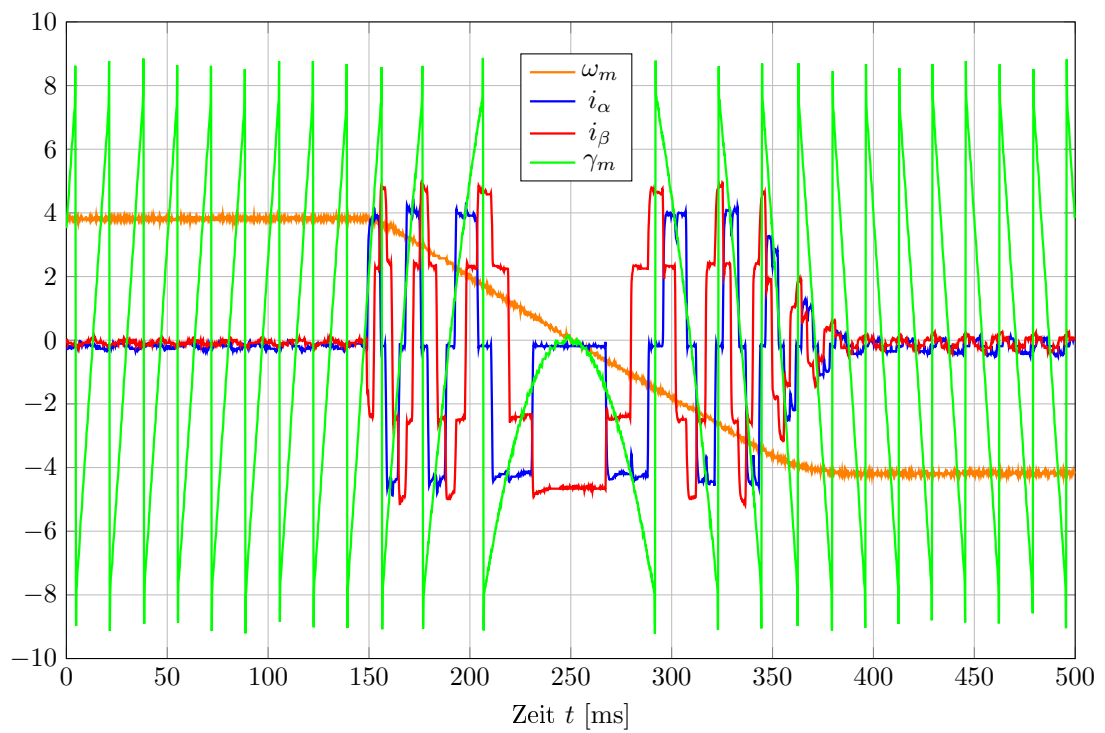


Abbildung 15: Zeitverlauf der Ströme, des Winkels und der Drehzahl bei einem Drehzahlsprung im BLDC-Betrieb.

3 Anhang

$I_f[A]$	$u_{sL}[1]$	$U_N[V]$	$U_{sL}[V]$
0	0.01225	400	4.9
1	0.312	400	124.8
2	0.5575	400	223
3	0.7675	400	307
4	0.93	400	372
5	1.0525	400	421
6	1.1325	400	453
7.1	1.2	400	480
8	1.24	400	496
7.1	1.2025	400	481
6	1.14	400	456
5	1.0625	400	425
4	0.945	400	378
3	0.785	400	314
2	0.565	400	226
1	0.315	400	126
0	0.01375	400	5.5

Tabelle 7: Messwerte zum Leerlaufversuch

$I_f[A]$	$i_s[1]$	$I_N[A]$	$I_S[A]$
0	0.0121	57.7	0.7
1	0.2634	57.7	15.2
2	0.4766	57.7	27.5
3	0.6950	57.7	40.1
4	0.9203	57.7	53.1
4.6	1.0485	57.7	60.5

Tabelle 8: Messwerte zum Kurzschlussversuch