

# Fachpraktikum

## Elektrische Maschinen

### Versuch 2: Synchronmaschine

Versuchsanleitung

Basierend auf den Unterlagen von

LD Didactic

Entwickelt von

Thomas Reichert

am Institut von

Prof. J. W. Kolar

Januar 2015

## Praktikumsversuche

Bitte lesen Sie die folgende Einleitung zum Praktikum genau durch. Der Assistent wird Ihnen vor Beginn des Praktikums einige sicherheitsrelevante Fragen stellen.

Für die Versuche wird eine Schenkelpol-Synchronmaschine verwendet. Dabei kann der Rotor entweder an eine Gleichspannungsquelle gehängt werden, oder aber die Rotorwicklungen können kurzgeschlossen werden, was dem Prinzip einer Asynchronmaschine entspricht. Ferner werden die Wicklungsanfänge und –enden der Statorwicklung (3-strängig) nach aussen geführt. Die Synchronmaschine ist mit einer Pendelmaschine gekoppelt, welche einerseits als Last aber auch als Antrieb verwendet werden kann, womit die Synchronmaschine sowohl als Motor wie auch als Generator betrieben werden kann. Die Pendelmaschine wird über ein Maschinenprüfsystem gesteuert.

### 1. Wirkungsgradbestimmung und Kennlinienaufnahme bei Motorbetrieb

Achten Sie darauf, dass Sie bei den folgenden verwendeten Modulen und der Synchronmaschine jeweils die Erdanschlüsse verbinden. Verbinden Sie weiter das speisende Wechselstromnetz mit den Eingängen des Maschinenprüfsystems. Verbinden Sie dann die Ausgänge mit den entsprechenden Wicklungsanfängen der Synchronmaschine (U1, V1 und W1). Die Wicklungsenden können Sie zum Stern verbinden (U2-W2-V2). Schalten Sie die DC-Quelle ein und drehen Sie die Spannung auf 0 V. Verbinden Sie L+ mit dem Anschluss F1 der Synchronmaschine und L- mit F2.

Schalten Sie das Maschinenprüfsystem ein, indem Sie den orangen Knopf drücken. Starten Sie den Computer und dort das Programm Momo.

Bevor die Maschine in Betrieb genommen wird, wollen wir uns die Daten der Maschine genauer anschauen. Ermitteln Sie unter Zuhilfenahme des Leistungsschilds folgende Kenndaten:

Anschlussart (Stern/Dreieck)	
Nennspannung $U_N$ (Aussenleiterspannung)	
Nennleistung $P_{2N}$	
Nenndrehzahl $n_N$	
Nennleistungsfaktor $\cos \varphi_N$	
Maximaler Erregerstrom $I_{E,max}$	
Polpaarzahl $p$ (berechnen)	
Nennmoment $M_N$ (berechnen)	

Schalten Sie nun die Wechselspannung ein und warten Sie bis die Maschine Ihre Nenndrehzahl erreicht hat. Drehen Sie die Spannung und den Stromregler der DC-Versorgung hoch, bis die Hälfte des maximalen Erregerstroms erreicht ist. Schalten Sie das Maschinenprüfsystem in den Modus Drehmomentregelung und synchronisieren Sie die Pendelmaschine durch Drücken des roten Knopfs. Anschliessend können Sie das Lastmoment hochdrehen, bis das Nennmoment erreicht ist. Verändern Sie den Erregerstrom, bis der Leistungsfaktor möglichst nahe an seinen Nennwert ( $\cos \varphi_N = 1$ ) herankommt. Ermitteln Sie auf diese Weise den Nenn-Erregerstrom.

Bestimmen Sie ferner mittels Momo auch die Spannung und den Strom von Seiten des Netzes und notieren Sie die folgenden Messwerte:

$U =$  \_\_\_\_\_ ;  $I =$  \_\_\_\_\_ ;  $\cos \varphi =$  \_\_\_\_\_ ;  $U_{EN} =$  \_\_\_\_\_ ;  $I_{EN} =$  \_\_\_\_\_ ;

Berechnen Sie die Eingangsleistung und den Wirkungsgrad der Maschine:

$$P_1 = 3 \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi + U_E \cdot I_E = \text{_____}; \eta = P_2 / P_1 = \text{_____};$$

Nun soll die Belastungskennlinie der Maschine bestimmt werden. Variieren Sie dazu das Lastmoment und tragen Sie die entsprechenden Messwerte in die folgende Tabelle ein (Erregung bleibt konstant):

	$M/M_N$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2
rechnen	$M/Nm$													
messen	$I / A$													
	$\cos \varphi$													
rechnen	$P_1 / W$													
	$P_2 / W$													
	$\eta$													
Induktiv/kapazitiv?														

**2. V-Kurven und Phasenschieberbetrieb**

Wird bei einer Synchronmaschine der Erregerstrom so eingestellt, dass bei einem bestimmten Belastungsmoment der Leistungsfaktor den Wert 1 annimmt, so weist der Statorstrom ein Minimum auf. Die Maschine nimmt dann praktisch nur Wirkleistung aus dem Netz auf. Wird die Erregung vermindert, so steigt die Stromaufnahme, da die Synchronmaschine jetzt induktive Blindleistung aus dem Netz bezieht. Wird umgekehrt die Erregung erhöht, so erfolgt ebenfalls ein Anstieg der Stromaufnahme, allerdings nimmt die Maschine nun kapazitive Blindleistung aus dem Netz auf. Der als Funktion des Erregerstromes dargestellte Verlauf des Statorstroms bei jeweils konstantem Lastmoment hat einen V-förmigen Verlauf, man spricht daher von V-Kurven.

Bevor wir V-Kurven aufnehmen, überlegen Sie sich zur oberen Tabelle, ob die Maschine kapazitive oder induktive Blindleistung bezieht bei Nenn-Erregung und sich ändernder Last.

Nun wird jeweils ein fixes Lastmoment eingestellt und der Erregerstrom variiert. Füllen Sie dazu die folgenden Tabellen aus. Sobald die Maschine bei zu tiefer Erregung ausser Tritt gerät, schalten Sie die Synchronisation mittels rotem Knopf aus. Fahren Sie dann mit der nächsten Tabelle fort.

Am Schluss können Sie für die verschiedenen Lastpunkte die einzelnen Punkte graphisch einzeichnen und zu den gesuchten V-Linien verbinden.

	$I_E / I_{EN}$	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1	0.9	0.8
rechnen	$I_E / A$								
messen	$I / A$								
	$I_E / I_{EN}$	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
rechnen	$I_E / A$								
messen	$I / A$								

**$M/M_N = 0$**

	$I_E / I_{EN}$	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1	0.9	0.8
rechnen	$I_E / A$								
messen	$I / A$								
	$I_E / I_{EN}$	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
rechnen	$I_E / A$								
messen	$I / A$								

**$M/M_N = 0.25$**

	$I_E / I_{EN}$	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1	0.9	0.8
rechnen	$I_E / A$								
messen	$I / A$								
	$I_E / I_{EN}$	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
rechnen	$I_E / A$								
messen	$I / A$								

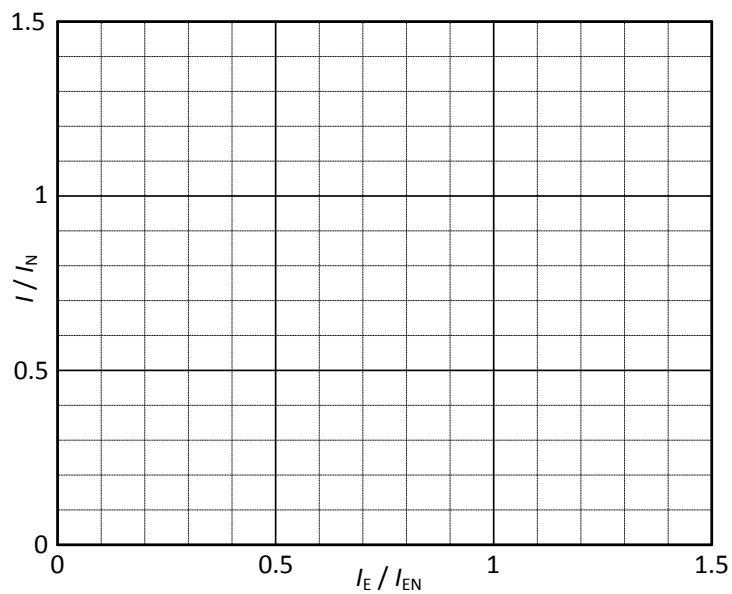
**$M/M_N = 0.5$**

	$I_E / I_{EN}$	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1	0.9	0.8
rechnen	$I_E / A$								
messen	$I / A$								
	$I_E / I_{EN}$	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
rechnen	$I_E / A$								
messen	$I / A$								

**$M/M_N = 0.75$**

	$I_E / I_{EN}$	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1	0.9	0.8
rechnen	$I_E / A$								
messen	$I / A$								
	$I_E / I_{EN}$	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
rechnen	$I_E / A$								
messen	$I / A$								

**$M/M_N = 1$**



**3\*. Rechnergestützte Aufnahme der Hochlaufkennlinien (Versuch überspringen)**

Die Hochlaufkennlinie wird bei asynchroner Betriebsweise gemessen. Schalten Sie dazu die Maschine zuerst ganz aus. Trennen Sie anschliessend die Erregerwicklung von der DC-Quelle und schliessen Sie die Erregerwicklung kurz. Schalten Sie die Maschine ein (Netzschalter) und warten Sie bis Sie die maximale Drehzahl erreicht hat. Diese ist leicht unter der eigentlichen Nenndrehzahl aufgrund des Betriebs als Asynchronmaschine.

Schalten Sie das Maschinenprüfsystem in den Modus Hochlaufkennlinien. Bereiten Sie in Momo eine Messung vor mit Startdrehzahl  $1500 \text{ min}^{-1}$  und Stoppdrehzahl Null. Synchronisieren Sie die Pendelmaschine und starten Sie anschliessend die Messung. Stellen Sie Drehmoment, Strom, Eingangs- und Ausgangsleistung, Leistungsfaktor und Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Drehzahl dar.

Bei welcher Drehzahl (in Prozent der Leerlaufdrehzahl) tritt das Kippmoment auf?: \_\_\_\_\_

**4. Verhalten als Generator im Inselbetrieb**

Nun soll die Synchronmaschine im Generatorbetrieb untersucht werden. Dazu wird Sie von der Pendelmaschine angetrieben. Schalten Sie das Maschinenprüfsystem aus und erneut ein, indem Sie Start drücken und gleichzeitig den orangen Schalter betätigen. Wählen Sie auf dem Maschinenprüfsystem den Modus Belastungskennlinien. Trennen Sie ausserdem die Verbindung zwischen dem Prüfsystem und dem Wechselstromnetz und verbinden Sie stattdessen die Anschlüsse U1, V1 und W1 der Synchronmaschine mit den Eingängen des Prüfsystems. Die Ausgänge können Sie zuerst offen lassen, die Synchronmaschine bleibt in Sternschaltung (U2-V2-W2). Schliessen Sie die DC-Quelle wieder an die Erregung und stellen den Strom auf 0 A. Synchronisieren Sie die Maschine mittels rotem Knopf und drehen Sie die Drehzahl auf  $1500 \text{ min}^{-1}$ . Drehen Sie dann den Erregungsstrom hoch bis zum Nennpunkt. Messen Sie die Spannung in Abhängigkeit der Erregung und füllen Sie die folgende Tabelle aus:

$I_E / I_{EN}$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2
$U_0 / V$													

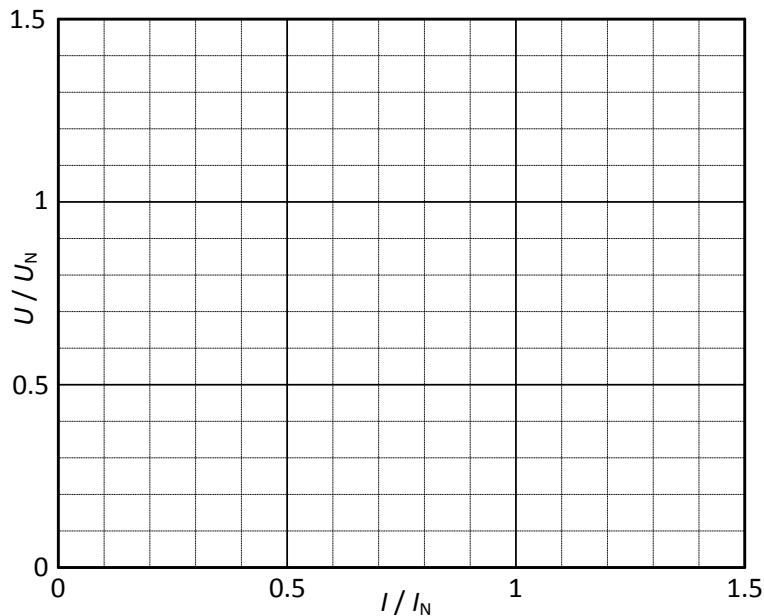
Entregnen Sie die Maschine und schalten Sie die Pendelmaschine aus. Verbinden Sie nun die Ausgänge des Prüfsystems mit dem Widerstand (Anschlüsse der oberen Reihe). Verbinden Sie die untere Reihe der Widerstände im Stern und den Sternpunkt mit demjenigen der Synchronmaschine. Stellen Sie den Widerstand zuerst auf 100% und bringen treiben Sie die Synchronmaschine wieder durch die Pendelmaschinen an (Nenndrehzahl). Stellen Sie anschliessend den Nennerergerstrom ein. Variieren Sie den Widerstand und füllen Sie die folgende Tabelle aus:

$R / \%$	100	90	80	70	60	50	40
$I / A$							
$U / V$							

Stellen Sie den Widerstand erneut auf 100%, entregen Sie die Maschine und schalten Sie die Pendelmaschine aus. Ersetzen Sie die ohmsche Last durch eine induktive Last (Sternschaltung) und wiederholen Sie die Messung für verschiedene Induktivitätswerte. Beachten Sie, dass vor jedem Umstecken der Last die Synchronmaschine entregt werden muss (**nur spannungsfrei umstecken!!!**). Füllen Sie die folgende Tabelle aus:

$L / H$	6	4.8	2.4	1.2	1.0	0.8	0.6	0.4
$I / A$								
$U / V$								

Stellen Sie die Messergebnisse für die beiden Lastarten graphisch dar:



### 5. Synchronisierschaltungen

Nun soll die Synchronmaschine im Generatorbetrieb mit dem Netz synchronisiert werden. Dazu wird die unten abgebildete Synchronisiereinheit verwendet. Erden Sie diese und schalten Sie Sie ein. Der Synchronisationsschalter soll zunächst auf der Position Null stehen. Auf der linken Seite wird das Netz angeschlossen (via Motorprüfsystem), rechts werden die Anschlüsse der Maschine ( $U1$ ,  $V1$  und  $W1$  verbunden). Schliessen Sie die DC-Quelle wieder an die Erregung und stellen Sie den Strom auf 0 A. Synchronisieren Sie die Maschine mittels rotem Knopf und drehen Sie die Drehzahl auf  $1500 \text{ min}^{-1}$ . Erregen Sie die Maschine auf Ihren Nennwert. In einem ersten Schritt wird nun das Synchronoskop verwendet. Passen Sie Drehzahl (über Prüfsystem) und Spannung (über Erregerstrom) der Synchronmaschine dem Netz an. Wenn sich das Synchronoskop nur noch langsam dreht, können Sie den Phasenunterschied zwischen Netz und Maschine genau verfolgen. Leuchtet das grüne LED, können Sie den Synchronisierschalter auf Eins stellen und die Systeme verbinden.

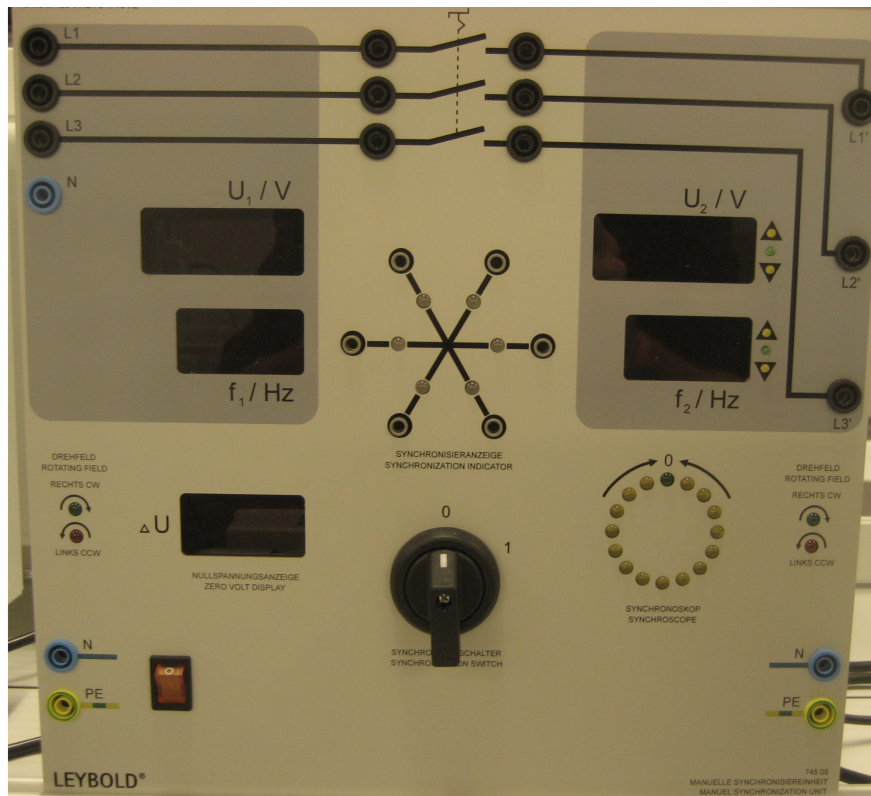


Abb. 1: Synchronisiermodul

Alternativ soll die Maschine mittels Synchronisieranzeige untersucht werden. Dabei gibt es zwei Anschlussmöglichkeiten. Schalten Sie den Synchronisierschalter wieder auf Null, entlegen Sie die Synchronmaschine und stoppen Sie sie. Anschliessen werden die einzelnen LEDs der Synchronisieranzeige mit den Netz- und Maschinenanschlüssen verbunden. Dabei sollen immer die gleiche Phase gegenüber liegen (also z.B. L1 und L1'). Bei Phasendifferenz leuchten die LEDs, wenn das Netz und die Maschine in Phase sind löschen alle ab. Synchronisieren Sie die Maschine mittels rotem Knopf, drehen Sie die Drehzahl auf  $1500 \text{ min}^{-1}$  und stellen Sie Nennerergerstrom ein. Passen Sie Drehzahl (über Prüfsystem) und Spannung (über Erregerstrom) der Synchronmaschine dem Netz an. Wenn die LEDs der Synchronisieranzeige dunkel werden, sind die beiden Systeme in Phase und Sie können den Synchronisierschalter auf Eins stellen.

Als zweite Möglichkeit sollen zwei der Anschlüsse der Synchronisieranzeige vertauscht werden (z.B. L2' mit L3'). Schalten Sie den Synchronisierschalter wieder auf Null, entlegen Sie die Synchronmaschine und stoppen Sie sie. Tauschen Sie dann die zwei Phasen. Synchronisieren Sie die Maschine wieder mittels rotem Knopf, drehen Sie die Drehzahl auf  $1500 \text{ min}^{-1}$  und stellen Sie Nennerergerstrom ein. Passen Sie Drehzahl (über Prüfsystem) und Spannung (über Erregerstrom) der Synchronmaschine dem Netz an. Die Synchronisieranzeige hat nun eine ähnliche Funktion wie das Synchronoskop. Die LEDs blinken in einer bestimmten Reihenfolge, womit sich erkennen lässt, ob die Frequenz der Maschine zu hoch oder zu tief ist. Die Phasenlage stimmt, wenn die 2 LEDs erlöschen, bei denen nun noch die gleiche Phase gegenüberliegt (z.B. L1 und L1'). Schalten Sie den Synchronisierschalter auf Eins wenn diese zwei LEDs dunkel sind.



**6. Verhalten am starren Netz**

Wir können an dieser Stelle gleich fortfahren, nachdem die Maschine nun mit dem Netz synchronisiert ist. Messen Sie mittels Momo Spannung und Strom aus dem Netz und bestimmen Sie die Wirkleistung. Regeln Sie das Drehmoment der Pendelmaschine und den Erregerstrom bis Wirk- und Blindleistung Null sind. Erhöhen Sie dann am Motorprüfsystem das Drehmoment der Pendelmaschine. Schauen Sie sich an, in welchem Quadranten die Maschine betrieben wird. Was beobachten Sie?

---

Verringern Sie anschliessend das Drehmoment der Pendelmaschine unter Nenndrehzahl und schreiben Sie Ihre Beobachtungen auf:

---

Stellen Sie wieder das Drehmoment ein, bei dem die Wirkleistung Null ist. Schauen Sie sich in Momo nun die Blindleistung an. Erhöhen Sie den Erregerstrom der Synchronmaschine. Was beobachten Sie?

---

Drehen Sie die Erregung wieder zurück und gar noch tiefer als davor. Was beobachten Sie?

---

Zum Abschluss soll der Wirkungsgrad bei Generatorbetrieb bestimmt werden. Stellen Sie dazu die Erregung und das Drehmoment so ein, dass der Nennleistungsfaktor erreicht wird und die Maschine Nennleistung ( $P_1 = 300 \text{ W}$ ) abgibt. Damit entspricht die abgegebene Leistung wieder 300 W. Die von der Maschine aufgenommene Leistung ist gleich der Summe aus mechanischer Antriebsleistung und Erregerleistung:

$$P_2 = M \cdot 2\pi \cdot \frac{n}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}} + U_E \cdot I_E = \text{_____}; \quad \eta = P_1/P_2 = \text{_____};$$

Schalten Sie den Synchronisierschalter wieder auf Null, entlegen Sie die Maschine und stoppen Sie sie. Schalten Sie alles aus und entfernen Sie die von Ihnen angebrachten Kabel.