

# **Fachpraktikum**

## **Elektrische Maschinen**

### **Versuch 1:**

## **Gleichstrommaschine**

Theorie

## Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>2</b>
<b>1 Grundprinzip.....</b>	<b>3</b>
1.1 Kanalisierung des Magnetfeldes durch Polschuhe .....	4
1.2 Kommutator.....	5
1.3 Rotor mit vielen Leiterschleifen.....	6
<b>2 Die Gleichstrommaschine .....</b>	<b>7</b>
2.1 Erregerkreis - Erzeugung des Luftspaltfeldes.....	7
2.2 Ankerkreis .....	8
2.3 Ersatzschaltbild .....	8
<b>3 Schaltungsmöglichkeiten.....</b>	<b>9</b>
3.1 Fremderregt.....	9
3.2 Nebenschluss .....	9
3.3 Reihenschluss.....	10
<b>4 Betrieb der Nebenschlussmaschine.....</b>	<b>11</b>
4.1 Anlauf.....	11
4.2 Einstellung der Drehzahl .....	11
<b>5 Betrieb der Reihenschlussmaschine .....</b>	<b>11</b>
5.1 Anlauf.....	11
5.2 Einstellung der Drehzahl .....	12
<b>6 Gleichstrom-Generator.....</b>	<b>12</b>
<b>7 Vorbereitende Aufgaben .....</b>	<b>14</b>
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>16</b>

## Vorbereitung vor dem Praktikumsnachmittag

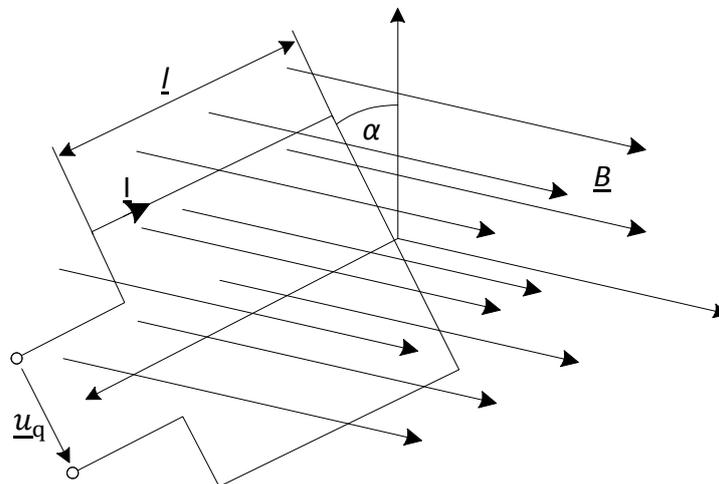
Lesen Sie bitte **vor dem Versuchsnachmittag** den Theorieteil sowie die Versuchsanleitung zur Gleichstrommaschine durch. Ausserdem ist das Ausfüllen der Theorieaufgaben vor dem Praktikum obligatorisch, um die praktischen Versuche durchführen zu dürfen.

### 1 Grundprinzip

Gleichstrommaschinen haben auch heute noch ihren festen Platz in der Antriebstechnik. Im Gegensatz zu Drehstrommaschinen sind sie für einen Drehzahlbereich bis weit über  $10000 \text{ min}^{-1}$  geeignet. Ihr Leistungsbereich geht von unter einem Watt bis über zehn Megawatt.

Beim Gleichstrommotor wird der Effekt der Kraftwirkung eines Magnetfeldes auf eine stromdurchflossene Leiterschleife ausgenutzt und in eine Drehbewegung umgesetzt. Das Magnetfeld wird im feststehenden Teil der Maschine erzeugt und wird als Erregerfeld bezeichnet, während die Ankerwicklung die Leiterschleife bildet.

Für die grundlegenden Überlegungen wird von einer Leiterschleife ausgegangen, die in einem homogenen Magnetfeld gedreht wird (vgl. Abb. 1).



**Abb. 1:** Leiterschleife im homogenen Magnetfeld.

Aus dem Induktionsgesetz folgt die Spannung  $u_q$ , die an den Klemmen der Leiterschleife induziert wird. Der von der Schleife umfasste magnetische Fluss  $\Phi_m$  beträgt:

$$\Phi_m = A \cdot B \cdot \cos \alpha \quad (1.1)$$

Bei gleichförmiger Rotation  $\alpha = \omega \cdot t$  ergibt sich somit für  $u_q$ :

$$u_q = -\frac{d\Phi_m}{dt} = -\frac{d}{dt}(A \cdot B \cdot \cos(\omega t)) = \omega \cdot A \cdot B \cdot \sin(\omega t) \quad (1.2)$$

Es wird also bei gleichförmiger Drehung an den Klemmen eine Wechselspannung induziert, deren Amplitude proportional zur Kreisfrequenz und zum umfassten magnetischen Fluss ist.

Fließt jetzt in dieser Leiterschleife ein Gleichstrom  $I$ , so wirkt auf die "lange" Spulenseite die Kraft

$$\vec{F} = I(\underline{l} \times \underline{B}), \quad (1.3)$$

wobei der Längenvektor  $\underline{l}$  in Richtung des Stromes zeigt und dem Betrag nach gleich der Länge des Leiterstückes ist. Weil in Abb. 1 beide Seiten der Spule den gleichen Kraftbeitrag liefern, ergibt sich ein Drehmoment  $M$ :

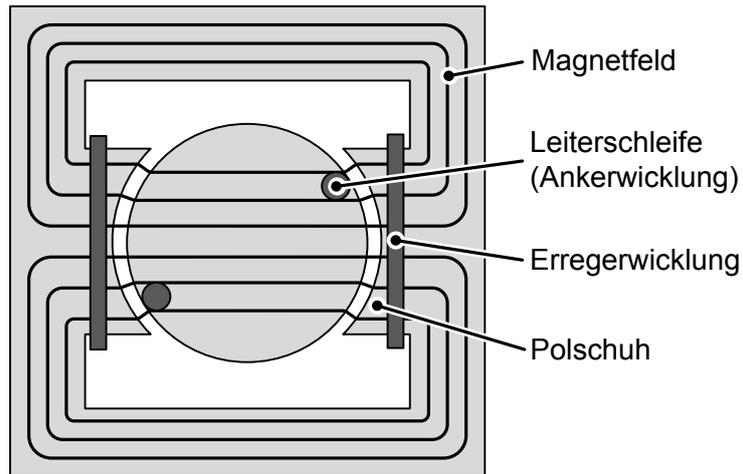
$$M = 2 \cdot r \cdot l \cdot I \cdot B \cdot \sin \alpha = I \cdot A \cdot B \cdot \sin \alpha \quad (1.4)$$

Es entsteht also bei stromdurchflossener Leiterschleife ein Drehmoment, dessen Amplitude proportional zum Strom in der Schleife und zum Betrag des umfassten magnetischen Flusses  $A \cdot B$  ist.

Folgende drei Schritte führen von der Leiterschleife im homogenen Magnetfeld zur praktischen Gleichstrommaschine:

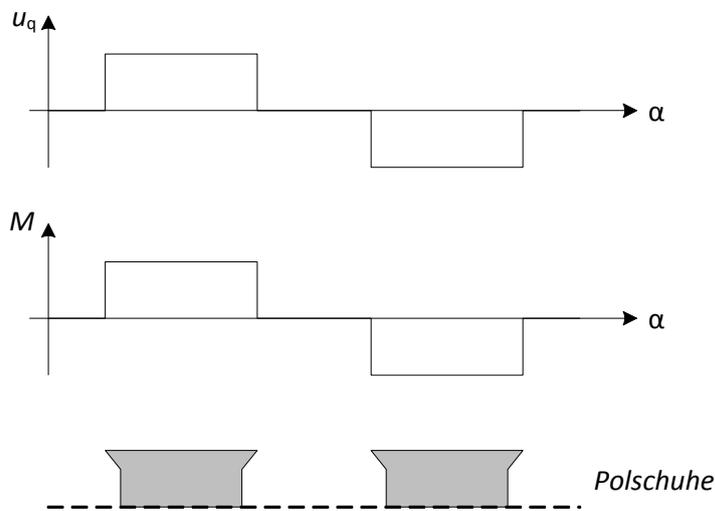
### 1.1 Kanalisierung des Magnetfeldes durch Polschuhe

In der praktischen Maschine wird das Magnetfeld (bzw. der magnetische Fluss) durch Polschuhe aus Eisen geführt. Es entsteht dann die in Abb. 2 gezeigte Anordnung.



**Abb. 2:** Kanalisierung des Flusses durch Polschuhe.

Unter den Polschuhen ist das Feld ungefähr konstant und steht immer senkrecht zur Oberfläche. Der von der Schleife umfasste Fluss ändert sich jetzt bei der Drehung dreieckförmig, wodurch der Verlauf der Spannung in Abhängigkeit von  $\alpha = \omega \cdot t$  rechteckförmig wird. Auch das Drehmoment wird rechteckförmig, weil das Feld unter den Polschuhen näherungsweise konstant ist (Abb. 3).



**Abb. 3:** Verlauf von Spannung und Drehmoment ohne Kommutator.

## 1.2 Kommutator

Die Enden der Leiterschleife werden auf unterteilte Schleifringe geführt, die über örtlich feste Bürsten kontaktiert werden (Abb. 4).

Die induzierte Spannung wird dadurch gleichgerichtet. Es wird nämlich bei dieser Anordnung automatisch in jedem Nulldurchgang der Spannung die Polarität gewechselt. Ausserdem wird das Drehmoment bei stromdurchflossener Leiterschleife durch Umpolen des zugeführten Stromes gleichgerichtet (Abb. 5).

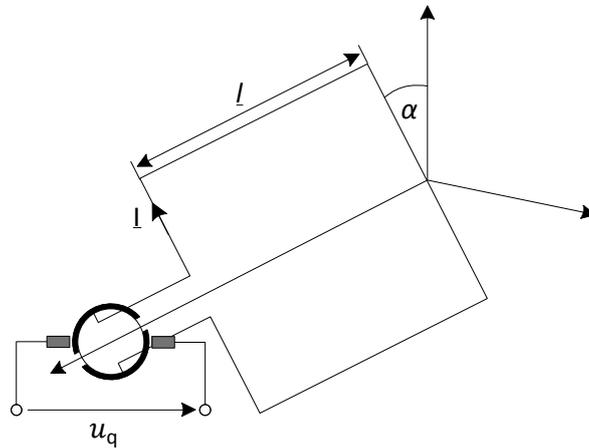


Abb. 4: Prinzip des Kommutators.

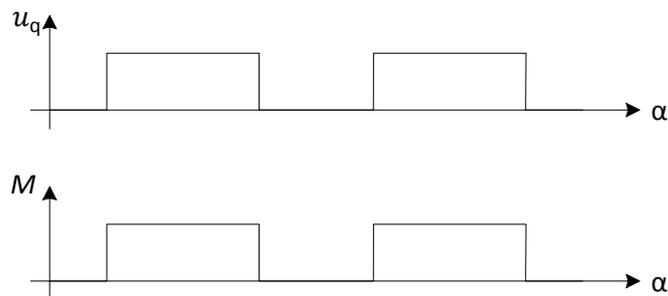


Abb. 5: Gleichgerichtete Spannung und gleichgerichtetes Drehmoment.

### 1.3 Rotor mit vielen Leiterschleifen

In den praktischen Maschinen sind auf dem Anker (Rotor) sehr viele Leiterschleifen (Windungen) untergebracht. Sie sind jeweils um wenige Winkleinheiten versetzt und werden über den Kommutator so kontaktiert, dass die einzelnen Schleifenspannungen gleichgerichtet (vgl. Abb. 5) und in Serie geschaltet werden. Die praktische Realisierung eines solchen Kommutators mit vielen Schleifen ist nicht ganz einfach zu erkennen. Durch die vielen leicht versetzten Schleifen und deren richtige Kommutie-

Die Welligkeit von Spannung und Strom wird nun so stark reduziert, dass diese als gleichförmige Größen betrachtet werden können.

Der mit der gesamten Ankerwicklung verkettete magnetische Fluss wird als Ankerflussverkettung  $\Psi$  bezeichnet.  $\Psi$  ist dabei im wesentlichen der mit der Windungszahl multiplizierte magnetische Fluss  $\Phi_m$ , der von einer einzelnen Schleife umfasst wird.

## 2 Die Gleichstrommaschine

### 2.1 Erregerkreis - Erzeugung des Luftspaltfeldes

Die Erzeugung des Magnetfeldes kann prinzipiell auf zwei verschiedene Arten erfolgen: durch Permanentmagnete oder durch eine Erregerspule im Eisenkreis. Auf jeden Fall gilt für die hier verwendete vereinfachte Betrachtung, dass das im Luftspalt herrschende Magnetfeld unabhängig vom Betriebszustand ist und nur vom Strom in der Erregerspule abhängt, bzw. von den verwendeten Permanentmagneten. Wir wollen im folgenden nur Maschinen betrachten, deren Luftspaltfeld durch eine Erregerspule erzeugt wird.

Die Stärke des Magnetfeldes wird durch den magnetischen Fluss, der vom ganzen Anker umfasst wird, die sog. Ankerflussverkettung  $\Psi$  ausgedrückt. Weil das Magnetfeld durch Eisenwege geführt wird, welche eine nichtlineare Magnetisierungskurve aufweisen, ist der Zusammenhang zwischen der Flussverkettung  $\Psi$  und dem Strom  $I_e$ , der sie erzeugt, nichtlinear:

$$\Psi = f(I_e) \tag{2.1}$$

Dieser Zusammenhang wird mittels Feldsimulationsprogrammen berechnet oder experimentell für jede Maschine gemessen.

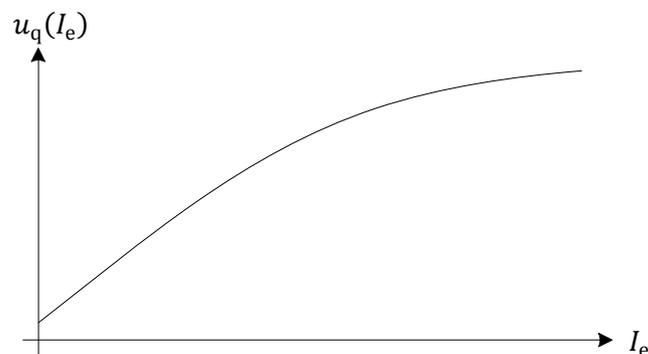


Abb. 6: **Beispiel einer Leerlaufkennlinie**

## 2.2 Ankerkreis

Der Kern der Gleichstrommaschine kann anhand der zwei oben hergeleiteten Grundgesetze ganz einfach modelliert werden: Die induzierte Spannung  $u_q$ , durch den Kommutator gleichgerichtet und wegen der vielen leicht versetzten Ankerwindungen geglättet, wird als Gleichspannungsquelle dargestellt, durch welche ein beliebiger, von der Spannung unabhängiger Strom fließen kann (ideale Spannungsquelle). Dabei gelten folgende Gesetze:

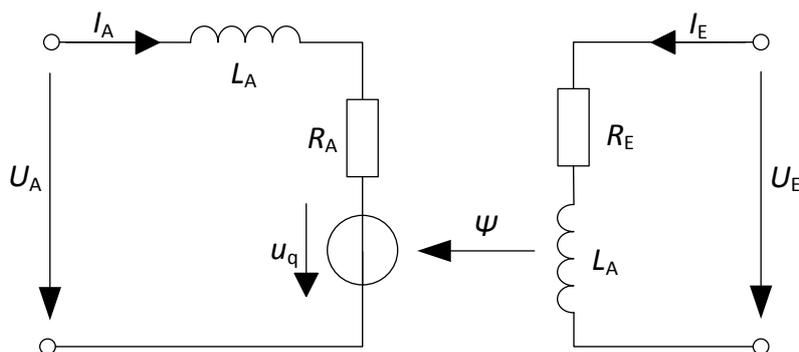
$$u_q = \Psi \cdot \omega \quad (2.2)$$

$$M = \Psi \cdot I_a \quad (2.3)$$

Für die Modellierung des grundsätzlichen Verhaltens der Gleichstrommaschine müssen noch die Wicklungswiderstände und die Wicklungsinduktivitäten berücksichtigt werden.

## 2.3 Ersatzschaltbild

Für die Gleichstrommaschine ergibt sich somit das Ersatzschaltbild gemäss Abb. 6. Werden nur quasi-stationäre Vorgänge betrachtet, können die Induktivitäten vernachlässigt werden. Die Gleichstrommaschine wird durch die Gleichungen (2.1) bis (2.3) und durch das Ersatzschaltbild vollständig beschrieben!



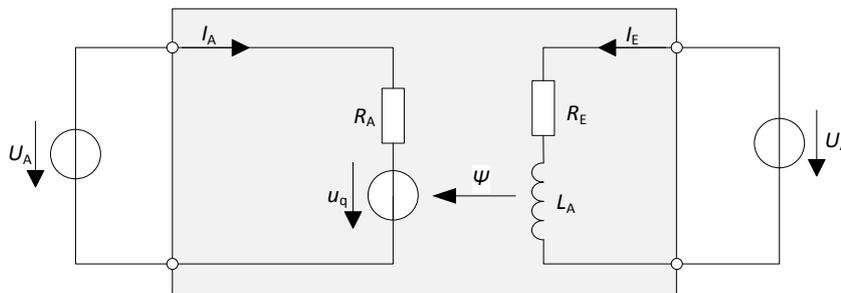
**Abb. 7:** Vollständiges Ersatzschaltbild der Gleichstrommaschine.

### 3 Schaltungsmöglichkeiten

Entsprechend der Beschaltung der zwei Kreise der Gleichstrommaschine (Erregerkreis und Ankerkreis) ergeben sich für die Maschine unterschiedliche Charakteristiken.

#### 3.1 Fremderregt

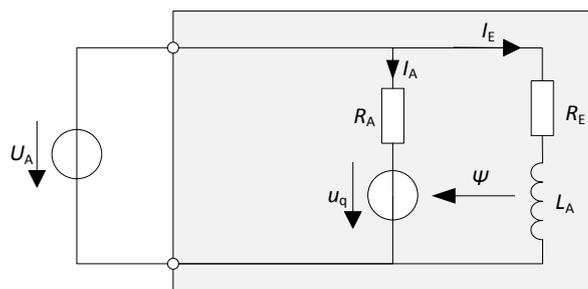
Der Erregerkreis wird durch eine eigene, variable Quelle unabhängig gespeist.



**Abb. 8:** Fremderregte Gleichstrommaschine.

#### 3.2 Nebenschluss

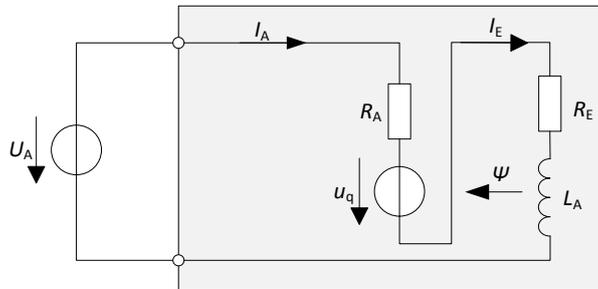
Über dem Erregerkreis liegt dieselbe Spannung wie über dem Ankerkreis. Wird die Maschine an einem starren Netz betrieben, besteht kein Unterschied zur fremderregten Maschine.



**Abb. 9:** Gleichstrommaschine in Nebenschlusschaltung.

### 3.3 Reihenschluss

Bei der Reihenschlusschaltung fließt durch den Erreger- und den Ankerkreis derselbe Strom. Die Reihenschlusschaltung wird auch Hauptschlusschaltung genannt.



**Abb. 10:** Gleichstrommaschine in Reihenschlusschaltung.

## 4 Betrieb der Nebenschlussmaschine

### 4.1 Anlauf

Im ersten Moment nach dem Einschalten der Spannung ist die induzierte Spannung  $u_q = \Psi \cdot \omega = 0$ , weil  $\omega$  noch null ist. Die gesamte Netzspannung liegt somit über dem Ankerwiderstand  $R_A$ , was einen sehr hohen Einschaltstrom zur Folge hat. Erst wenn die Drehzahl und damit die induzierte Spannung steigt, sinkt der Strom.

Um den Einschaltstrom zu begrenzen, wird ein Anlasswiderstand vorgeschaltet. Dieser wird so dimensioniert, dass der Strom in der Grössenordnung des Nennstroms begrenzt wird. Damit das beschleunigende Moment möglichst gross ist und somit  $u_q$  möglichst schnell wächst, muss die Erregung und somit  $\Psi$  auf das zulässige Maximum gebracht werden. Nach dem Hochlaufen kann der Anlasswiderstand überbrückt werden.

### 4.2 Einstellung der Drehzahl

Aus Abb. 6 folgt die Maschengleichung für den Ankerkreis zu:

$$U_A = R_A \cdot I_A + u_q \quad (4.1)$$

Mit Hilfe der Gleichungen (2.1) - (2.3) folgt für die Drehzahl  $\omega$ :

$$\omega = \frac{U_A}{\Psi} - \frac{R_A \cdot I_A}{\Psi} = \frac{U_A}{\Psi} - \frac{R_A \cdot M}{\Psi^2} \quad (4.2)$$

Die Drehzahl lässt sich somit über die Klemmenspannung  $U_a$  und über die Flussverkettung  $\Psi(I_e)$  verändern. Da meistens eine feste Netzspannung zur Verfügung steht, wird die Drehzahl über den Erregerstrom eingestellt. Vergrössern des Erregerstroms bedeutet Verkleinern der Drehzahl und umgekehrt! Geht  $\Psi$  gegen 0, so wächst  $\Omega$  ins Unendliche. In der Praxis heisst das, dass die Erregung nur bis auf ein bestimmtes Minimum reduziert werden darf, weil sonst die Maschine durch zu hohe Drehzahlen zerstört würde!

## 5 Betrieb der Reihenschlussmaschine

### 5.1 Anlauf

Auch bei der Reihenschlussmaschine ist im Moment des Einschaltens die Spannung  $u_q = 0$ . Die Netzspannung liegt über dem Anker- und Erregerwiderstand  $R_A + R_E$ . Der hohe Einschaltstrom fliesst im Falle des Reihenschlussmotors auch durch die Erregerspulen, was wiederum eine grosse Erregung zur Folge hat. Dadurch ist das Antriebsmoment beim Anlauf deutlich grösser, als bei der Nebenschluss-

maschine. Sowohl die Drehzahl, als auch die induzierte Spannung steigen schneller, so dass der Anlaufstrom schneller abfällt.

Ein Anlasswiderstand wird bei Anlauf unter Last trotzdem zur Begrenzung von Strom und Moment eingesetzt.

## 5.2 Einstellung der Drehzahl

Ähnlich wie bei der Nebenschlussmaschine ergibt sich bei der Reihenschlusschaltung die Maschengleichung für den Ankerkreis (siehe Abb. 9) zu:

$$U_A = (R_A + R_E) \cdot I_A + u_q \tag{4.1}$$

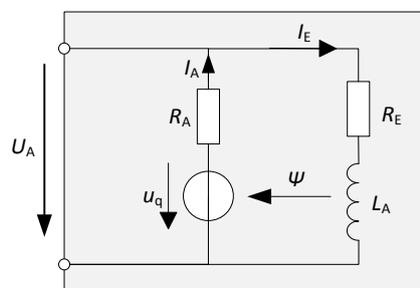
Mit Hilfe der Gleichungen (2.1) - (2.3) folgt für die Drehzahl  $\Omega$ :

$$\omega = \frac{U_A}{\Psi(I_E)} - \frac{(R_A + R_E) \cdot I_A}{\Psi(I_E)} = \frac{U_A}{\Psi(I_E)} - \frac{(R_A + R_E) \cdot M}{\Psi(I_E)^2} \tag{4.2}$$

Die Flussverkettung  $\Psi(I_E)$  hängt in diesem Fall stark vom Lastmoment ab. Ohne Lastmoment geht der Strom und damit die Flussverkettung gegen Null und die Drehzahl gegen unendlich. Für die Reihenschlussmaschine im Leerlauf bedeutet dies, dass nur ein sehr kleines Reibmoment wirkt und die Leerlaufdrehzahl sehr hoch ist. Damit die Maschine nicht zerstört wird, darf eine Reihenschlussmaschine in der Regel nie im Leerlauf betrieben werden.

## 6 Gleichstrom-Generator

Bei der Schaltung der Gleichstrommaschine als Generator liegt die Spezialität darin, dass die Erregung von der eigenen induzierten Spannung gespeist wird (vgl. Abb. 13).



**Abb. 11:** Ersatzschaltung des Nebenschluss-Generators ohne Last.

Der Nebenschluss-Generator kann sich nur selbst erregen, wenn in den Eisenteilen noch eine Remanenzmagnetisierung vorhanden ist, so dass eine kleine Spannung induziert wird, welche die Erregung vergrößern kann, bis ein stabiler Betriebspunkt erreicht wird.

## 7 Vorbereitende Aufgaben

Lösen Sie **vor dem Versuchsnachmittag** bitte die folgenden Aufgaben zur Vorbereitung.

Die Praktikumsmaschine kann sowohl im Reihenschluss als auch im Nebenschluss betrieben werden. Die Kennwerte der Maschine sind in folgender Tabelle aufgelistet.

**Tabelle 1: Daten und Kennwerte der Praktikumsmaschine**

<b>Daten</b>		
Widerstand der Ankerspulen	$R_A$	= 11.3 $\Omega$
Widerstand der Erregerspulen (Nebenschluss)	$R_E$	= 579 $\Omega$
Widerstand der Erregerspulen (Reihenschluss)	$R_D$	= 10.3 $\Omega$
<b>Nennwerte</b>		
Ankerspannung	$U_{aN}$	= 220 V
Ankerstrom	$I_{aN}$	= 1.8 A
Erregerstroms	$I_{eN}$	= 0.25 A
Nennleistung	$P_N$	= 0.3 kW
Nenn Drehzahl	$n_N$	= 2000 $\text{min}^{-1}$

1. Berechnen Sie die Anfahrströme, welche im Moment des Einschaltens der Maschine im Nebenschluss- und Reihenschlussbetrieb bei Nennspannung fließen. Wie können diese Ströme reduziert werden?

Nebenschlussotor:  $I = \underline{\hspace{2cm}}$  A

Reihenschlussmotor  $I = \underline{\hspace{2cm}}$  A

2. Berechnen Sie den zu erwartenden Wirkungsgrad der Maschine für Nebenschluss- und Reihenschlussbetrieb aus den Daten der Praktikumsmaschine.

Nebenschlussotor:  $\eta = \underline{\hspace{2cm}}$  %

Reihenschlussmotor  $\eta = \underline{\hspace{2cm}}$  %

3. Berechnen Sie das Nennmoment der Praktikumsmaschine.

$M_N = \underline{\hspace{2cm}}$  Nm

4. Welche Möglichkeiten gibt es, die Drehzahl einer Nebenschluss- und einer Reihenschlussmaschine zu steuern?

5. Wie lässt sich die Drehrichtung des Motors umkehren?

---

6. Wie gross ist die Leerlaufdrehzahl einer Reihenschlussmaschine? Welche Gefahr besteht darin?

---

---

7. Erklären Sie das Prinzip der Selbsterregung beim Nebenschluss-Generator.

---

---

## Literaturverzeichnis

- [1] Müller, G.; Ponick, B. *Grundlagen elektrischer Maschinen*  
 Wiley VCH Verlag, 9. Auflage, 2005.  
 ISBN: 3-527-40524-0.
- [2] Müller, G. *Theorie elektrischer Maschinen*  
 VCH Verlag, 4. Auflage, 2009.  
 ISBN: 3-527-40526-7.
- [3] Kremser, A. *Elektrische Maschinen und Antriebe*  
 Teubner Verlag, 3. Auflage, 2007.  
 ISBN: 3-8351-0173-0.
- [4] Fischer, R. *Elektrische Maschinen*  
 Hanser Fachbuchverlag, 13. Auflage, 2006.  
 ISBN: 3-446-40613-1.
- [5] Bödefeld, T.; Sequenz, H. *Elektrische Maschinen*  
 Springer Verlag, 8. Auflage, 1971.  
 ISBN: 3-211-80971-6.
- [6] Taegen, F. *Einführung in die Theorie der elektrischen Maschinen,  
 Teil 1.* Vieweg Verlag, 1970.  
 ISBN: 3-528-03538-0.