

## Grundlagenpraktikum

### Versuch 002

# „Die Gleichstrommaschine“

Versuchsdurchführung (Ort): Pfaffenwaldring 47, 0/162 (EG)

# **1 Die Gleichstrommaschine (GM)**

## **1.1 Bedeutung**

Die Gleichstrommaschine wird sehr häufig als Antriebsmotor eingesetzt, hat aber als Generator praktisch keine Bedeutung mehr. Sie zeichnet sich vor allem dadurch aus, dass sie nicht wie die Drehstromsynchronmaschine starr oder wie die Asynchronmaschine recht eng an eine synchrone Drehzahl gebunden ist, sondern dass ihr Drehzahlbereich in weiten Bereichen einstellbar ist. Da diese Forderung häufig bei Antriebsaufgaben vorliegt, kommt der GM eine bis heute überragende Rolle in der Antriebstechnik zu. Hinzu kommt dabei, dass in Verbindung mit einem steuerbaren Gleichrichter ein recht geringer regelungstechnischer Aufwand ausreicht, um der Maschine hervorragende dynamische Eigenschaften und Gleichlaufgüte zu verleihen. Ausgeführt sind Gleichstrommaschinen bis zu Spannungen von etwa 3000 V und Leistungen von etwa 10 MW, womit Schwerantriebe z.B. in der Walzwerkstechnik gut beherrscht werden können. Als wichtige Anwendung sind auch batteriebetriebene Geräte zu nennen; der untere Leistungsbereich bewegt sich bei unter einem Watt.

Als Hauptnachteil der GM ist zu werten, dass der Strom über Kohlebürsten, die auf dem Kommutator gleiten, zugeführt werden muss. Das bedeutet Verschleiß, Wartungsaufwand und damit Betriebsausfallzeiten. In der modernen Antriebstechnik geht daher der Trend eindeutig zu bürstenlosen Antriebssystemen.

## **1.2 Grundlagen**

### **1.2.1 Das Induktionsgesetz der Bewegung**

Bewegt sich ein Leiter der Länge  $L$  mit der Geschwindigkeit  $\vec{v}$  in einem Magnetfeld  $\vec{B}$ , so wird in ihm eine Spannung  $U_i$  induziert. Diese ergibt sich zu:

$$U_i = \int_L (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{s} \quad (1.1)$$

### **1.2.2 Kraftwirkung auf einen Leiter im Magnetfeld**

Auf einen Leiter der Länge  $L$ , der vom Strom  $I$  durchflossen wird und sich in einem Magnetfeld  $\vec{B}$  befindet, wirkt eine Kraft  $\vec{F}$ , die sich zu

$$\vec{F} = I \cdot (\vec{L} \times \vec{B}) \quad (1.2)$$

berechnet. Dabei zeigt der Vektor  $\vec{L}$  in die Richtung des Stromes  $I$ .

#### Anmerkung zum Kreuzprodukt:

Das Ergebnis eines Kreuzproduktes  $\vec{c} = \vec{a} \times \vec{b}$  ist ein Vektor  $\vec{c}$ , der auf den Vektoren  $\vec{a}$  und  $\vec{b}$  senkrecht steht (wobei die Vektoren  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  und  $\vec{c}$  ein Rechtssystem bilden) und den Betrag  $c = |\vec{c}| = a \cdot b \cdot \sin(\alpha)$  hat. Dabei ist  $\alpha$  der Winkel zwischen den Vektoren  $\vec{a}$  und  $\vec{b}$ .

## **2 Prinzipieller Aufbau und Funktion der Gleichstrommaschine**

Bild 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Gleichstrommaschine. Sie besteht aus dem Außenpolsystem, d.h. aus den feststehenden Komponenten Ständerjoch, Polkernen und Polschuhen, sowie der sogenannten Erregerwicklung. Diese werden in Abschnitt 2.1 beschrieben. Drehbar ist dagegen der Läufer und die Läuferwicklung, welche in Abschnitt 2.2 beschrieben werden. Der Kommutator, der aus den Kommutatorlamellen besteht, bildet über die Bürsten, die in der Regel aus gesintertem Graphit gefertigt werden, die Verbindung zwischen Ständer und Läufer, siehe Abschnitt 2.3.

### **2.1 Ständer und Erregerwicklung**

Am Ständerjoch, das zumeist auch das Gehäuse der Maschine bildet, sind die Polkerne angebracht, um welche die Erregerwicklungen angeordnet sind. Fließt in diesen Wicklungen ein Gleichstrom, so entsteht der Erregerfluss  $\phi$ , der durch die Polschuhe zum Läufer geleitet wird und im Bereich des Luftspaltes die konstante Induktion  $B$  hervorruft. Ständerjoch, Polkerne und Polschuhe bestehen aus ferromagnetischem Material (Eisen). Unser Demonstrationsmodell ist zweipolig (siehe Bild 1) ausgeführt.

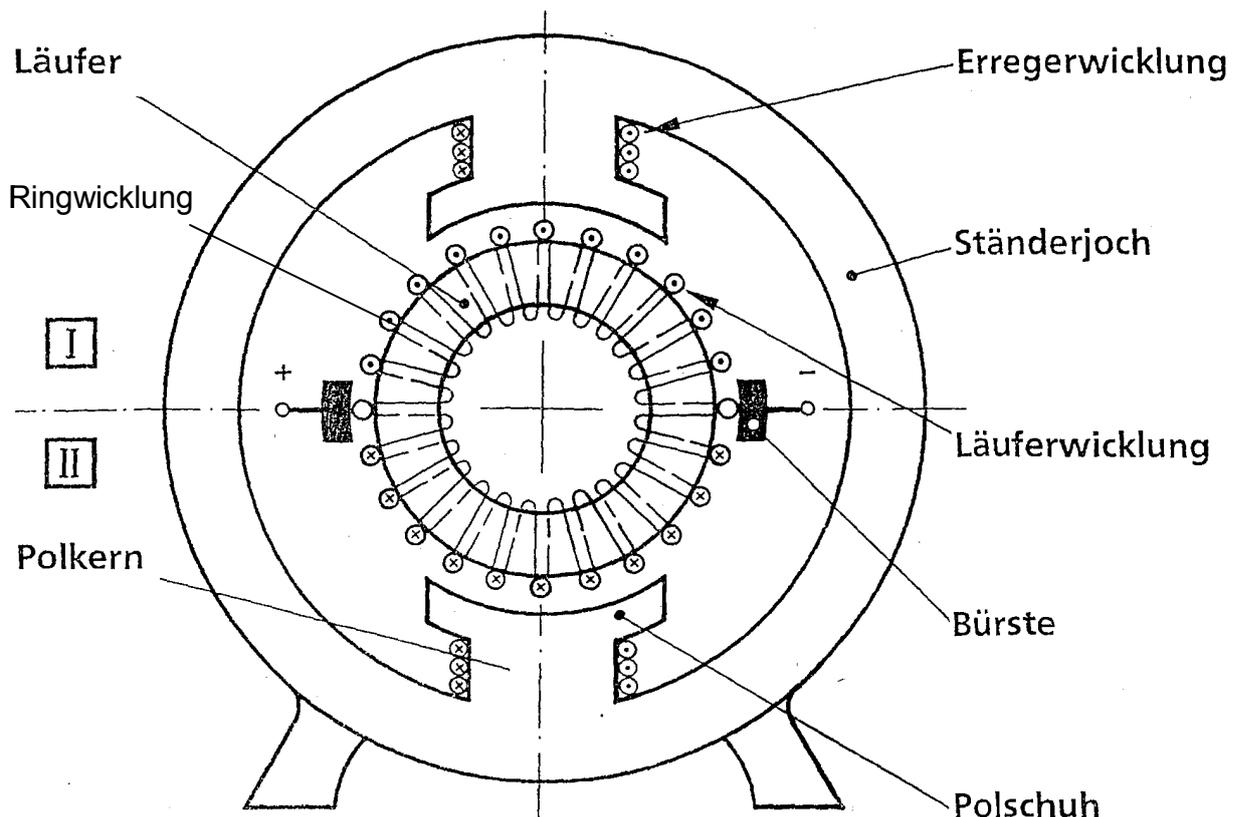


Bild 1 Prinzipieller Aufbau einer Gleichstrommaschine

## 2.2 Läufer (Anker)

Die Funktion der Gleichstrommaschine lässt sich am leichtesten aus dem Läufer nach Paccinotti erkennen, der in Bild 1 zu sehen ist, und bei der vorliegenden Modellmaschine ebenfalls realisiert wurde. Man nennt diese Läuferform auch Ringanker. Dieser besteht aus einem Eisenring, der aus Einzelblechen zylindrisch aufgeschichtet ist und der die Läuferwicklung trägt. Als Anker bezeichnet man denjenigen Teil einer rotierenden elektrischen Maschine, in dem die Spannungsinduzierung erfolgt.

Dazu stellen wir uns vor, dass der Anker mit seiner Wicklung sich nun drehe. Das bedeutet für die einzelnen Leiter der Wicklung, die sich im magnetischen Feld der Ständerpole befinden, dass eine Spannung nach Gleichung (1.1) induziert wird. Durchlaufen wir sämtliche Leiter in der oberen Halbebene I, so stellen wir fest, dass die Teilspannungen der dabei passiertten Einzelleiter zu einer Summenspannung gleicher Teilspannungen addiert werden können. Gleiches gilt für die untere Halbebene II, jedoch besitzen hier die Teilspannungen und damit auch die

Summenspannung die entgegengesetzte Polarität zu denen in der oberen Halbebene I.

Die Verteilung der Spannungen und damit der Betrag und das Vorzeichen der an den Bürsten abgegriffenen Summenspannung ändert sich nicht, wenn sich bei einer Drehung die Summe der Teilleiter, die zu einem bestimmten Zeitpunkt unter den Magnetpolen liegen, nicht ändert. Dabei sind es bei fortgesetzter Drehung des Ankers immer andere Leiter. Nach außen erhält man aber eine konstante Gleichspannung, während in einem einzelnen Leiter eine etwa rechteckförmige Wechselspannung entsteht!

Fließt nun von außen Strom, der über die Bürsten der Läuferwicklung zugeführt wird, in den Anker, so teilt sich dieser in zwei parallele Zweige auf. Der eine durchfließt die Leiter in der oberen Halbebene I, der andere durchfließt die Leiter in der unteren Halbebene II. Dreht sich nun der Läufer weiter, so erfolgt die Stromzufuhr über die nachfolgenden Leiter der Läuferwicklung; die Summe der Ströme, die unter den Polschuhen fließen, ändern sich dadurch nicht. Daraus folgt, dass auch die Kräfte, die nach Gleichung (1.2) auf die Leiter unter den Polschuhen wirken, konstant sind. Daraus ergibt sich ein zeitlich konstantes Drehmoment der Maschine.

### **2.3 Kommutator**

In dem in Bild 1 dargestellten prinzipiellen Aufbau schleifen die Bürsten direkt auf der Läuferwicklung. Betrachten wir zunächst wieder die induzierten Spannungen: Die Tatsache, dass an den Bürsten der Maschine bei Drehung des Ankers eine Gleichspannung ansteht, lässt sich auch so deuten, dass aus den in den einzelnen Leitern entstehenden Wechselspannungen durch die Art des Spannungsabgriffs eine mechanische Gleichrichtung erfolgt.

Bei der Betrachtung des Stromflusses ist folgendes festzustellen: Dreht sich der Läufer weiter, so wird je eine Windung seiner Wicklung unter jeder Bürste durch diese kurzgeschlossen. Nun muss sich in diesen Windungen die Stromrichtung umkehren, bevor diese zur jeweils anderen Halbebene gehören. Diesen Vorgang nennt man Stromwendung oder Kommutierung. Dadurch ist die Stromrichtung in den Leitern unter den Polen immer die gleiche und eine stetige Drehung des Läufers ist möglich, da eine konstante Kraft wirkt.

Im allgemeinen werden die Bürsten jedoch nicht auf den Leitern der Läuferwicklung, sondern auf sogenannten Kommutatorlamellen schleifen. Beim Versuchsmodell sind diese Kommutatorlamellen nicht wie sonst üblich an jeden einzelnen Leiter angeschlossen. Statt dessen ist die Läuferwicklung hier in sechs Gruppen geteilt und die Lamellen sind jeweils am Ende einer und am Anfang der nächsten Gruppe angeschlossen. Die Kommutatorlamellen bilden zusammen den Kommutator, auf dem die Bürsten schleifen.

**Fragen:**

1. Tragen Sie den Feldlinien-Verlauf des Erregerfelds in Bild 1 ein. Beachten Sie dabei, welche Teile der Maschine aus Eisen bestehen!

2. Welche Funktion hat das Ständerjoch?

---

---

3. In welche Richtung würde sich der gezeichnete Motor drehen?

---

Was geschieht, wenn die Stromrichtung

a) in der Erregerwicklung umgekehrt wird?

---

b) in der Ankerwicklung umgekehrt wird?

---

c) in der Anker- und in der Erregerwicklung umgekehrt wird?

---

### **3 Schaltungen und Betriebsverhalten**

Es gibt verschiedene Arten von Gleichstrommaschinen, die sich in Form der Erregung unterscheiden. Werden statt der Erregerwicklungen Permanentmagnete zur Erzeugung des Hauptflusses verwendet, so spricht man von einer permanenterregten Gleichstrommaschine. Ist die Erregerwicklung dagegen an einer gesonderten Stromversorgung angeschlossen, so handelt es sich um eine fremderregte Gleichstrommaschine. Sie sollen hier nicht behandelt werden. Werden Erreger- und Ankerwicklungen an einer gemeinsamen Stromversorgung betrieben,

kann man Anker- und Erregerwicklung entweder parallel oder in Reihe schalten. Man spricht dann von Nebenschluss- bzw. Reihenschlussmaschinen. Diese werden nun in den folgenden Abschnitten näher beschrieben.

Dreht sich der Läufer im Erregerfeld, so wird in der Läuferwicklung nach Gleichung (1.1) eine Spannung induziert. Berechnet man die gesamte im Läufer induzierte Spannung, so ergibt sich:

$$U_i = c_1 \cdot n \cdot \Phi \quad (3.1)$$

Darin ist  $c_1$  eine Maschinenkonstante,  $n$  ist die Drehzahl des Läufers und  $\phi$  ist der Erregerfluss. Die Maschinenkonstante wird durch die Polpaarzahl  $p$  und die Gesamtleiterzahl  $z_A$  im Anker ermittelt:

$$c_1 = z_A \cdot p \quad \text{und} \quad c_2 = c_1 / 2\pi \quad (3.2)$$

Das Drehmoment, welches die Maschine erzeugt, lässt sich nach Gleichung (1.2) berechnen, wenn man alle Leiter der Läuferwicklung bzw. alle Zähne an der Ankeroberfläche (siehe Abschnitt 4) und ihren Abstand vom Drehpunkt berücksichtigt. Das Drehmoment ergibt sich somit zu:

$$M_i = c_2 \cdot I_A \cdot \Phi \quad (3.3)$$

Darin ist  $c_2$  ebenfalls eine Maschinenkonstante (siehe Gleichung (3.2)) und  $I_A$  ist der Strom in der Läuferwicklung (Ankerstrom). Die Gleichungen (3.1) und (3.3) sind sehr allgemein und gelten unabhängig von der Art der Erregung der Maschine.

**Frage:**

1. Welche maschinenabhängigen Größen müssen aufgrund der Gleichungen (1.1) und (1.2) in die Faktoren  $c_1$  und  $c_2$  einfließen?

---

---

---

### **3.1 Die Gleichstrom-Nebenschlussmaschine**

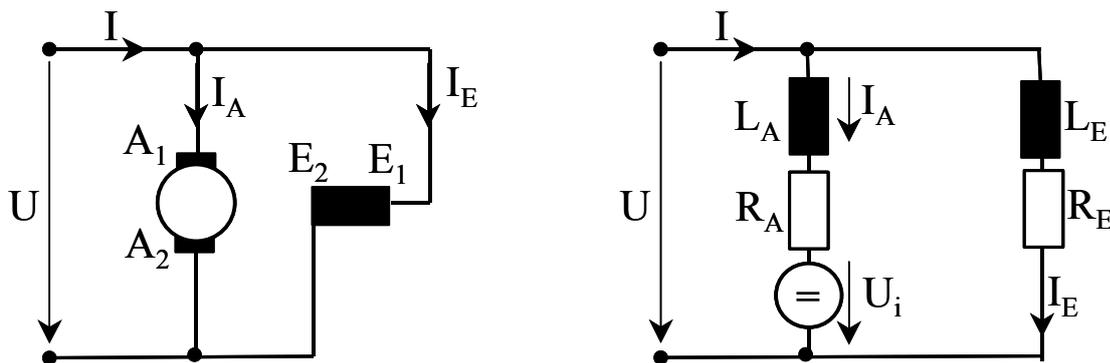
Bild 2 zeigt im linken Teil, wie hier Anker- und Erregerwicklung geschaltet werden. Im rechten Teil von Bild 2 ist das Ersatzschaltbild einer Gleichstrom-Nebenschlussmaschine zu sehen. Die darin eingezeichneten Induktivitäten der

Wicklungen ( $L_A$  und  $L_E$ ) haben beim Betrieb der Maschine mit reinem Gleichstrom keine Bedeutung.  $R_E$  und  $R_A$  bezeichnen die ohmschen Widerstände der Erreger- bzw. der Läuferwicklung.

Aus dem Ersatzschaltbild kann man folgende Beziehungen ablesen:

$$U = U_i + I_A \cdot R_A \quad (3.4)$$

$$I_E = \frac{U}{R_E} \quad (3.5)$$



a) Anordnung

b) Ersatzdarstellung

Bild 2 Gleichstrom-Nebenschlussmaschine

Daraus kann man die für den Betrieb der Maschine unter Last besonders interessante Abhängigkeit des Drehmoments  $M$  von der Drehzahl  $n$  ableiten. Aus Gleichung (3.3) folgt dabei, dass das Moment bei konstanter Erregung direkt proportional zum Ankerstrom  $I_A$  ist ( $M_i \sim I_A$ ). Bezieht man sowohl Strom als auch das Moment auf die Stillstandswerte (Werte, die bei der Drehzahl  $n = 0$  auftreten) und die Drehzahl auf die Leerlaufdrehzahl  $n_0$  (Drehzahl, die sich bei  $M_i = 0$  einstellt), so erhält man:

$$\frac{M_i}{M_{St}} = \frac{I_A}{I_{A,St}} = 1 - \frac{n}{n_0} \quad (3.6)$$

Bild 3 zeigt links oben diese Beziehung als Kennlinie aufgetragen. Beim Einschalten eines Gleichstrommotors wird im Anker zunächst keine Spannung induziert ( $U_i = 0$ , da  $n = 0$ ). Der Einschaltstrom wird also nur durch den ohmschen Widerstand  $R_A$  der Ankerwicklung begrenzt. Für den Ankerstrom im Einschaltzeitpunkt (Anlauf,  $n = 0$ ) erhält man:

$$I_{Ak} = I_{A,St} = \frac{U}{R_A} \quad (3.7)$$

Dieser Einschaltstrom  $I_{Ak}$  ist im allgemeinen (bei großen Maschinen) unzulässig groß und muss deshalb durch einen Vorschaltwiderstand (Anlasswiderstand)  $R_V$  begrenzt werden.

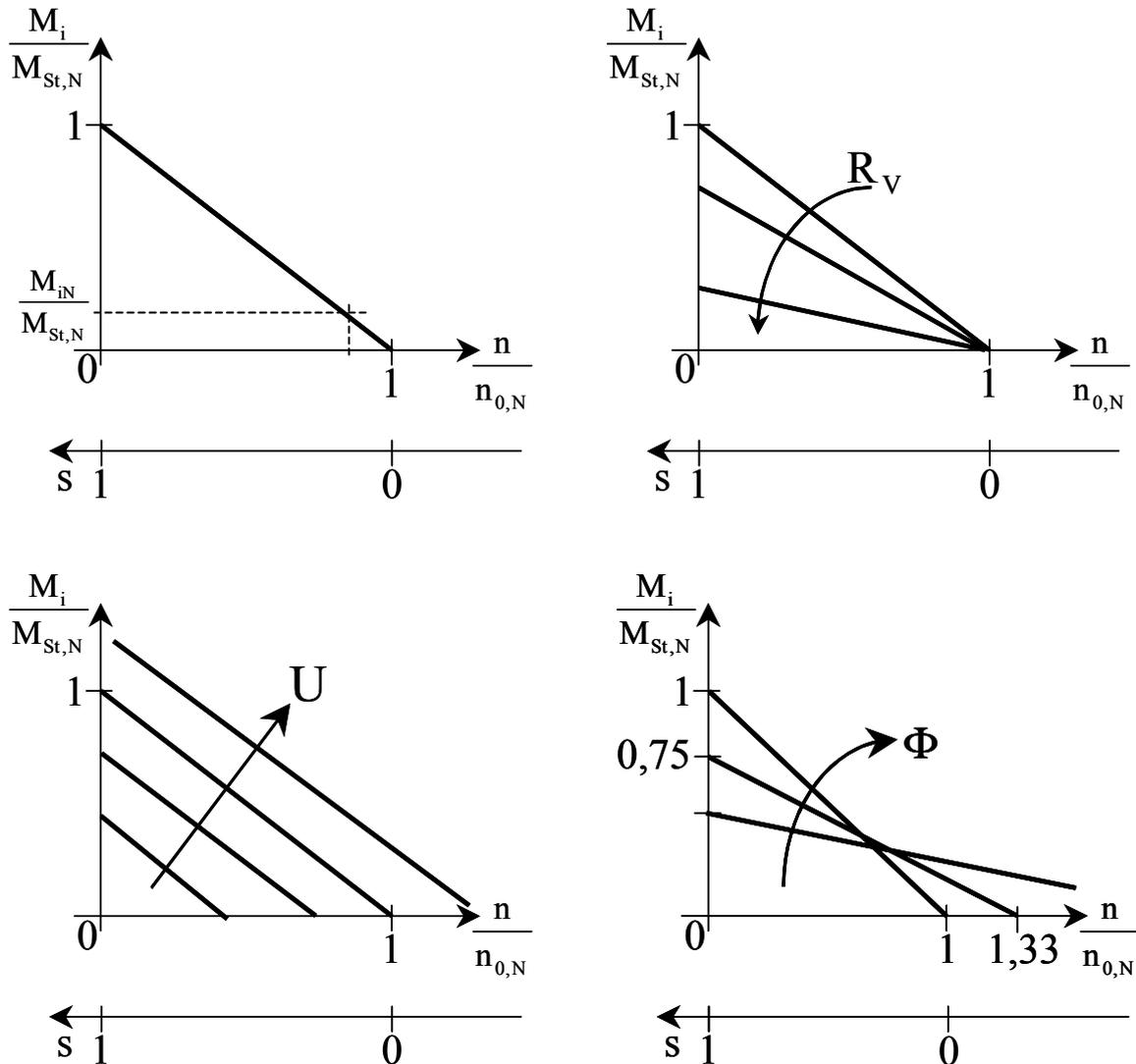


Bild 3 Kennlinien der Gleichstrom-Nebenschlussmaschine und deren Beeinflussungsmöglichkeiten

**Frage:**

1. An welcher Stelle der Anordnung nach Bild 2 a muss der Vorwiderstand eingebaut werden, damit der Motor ein möglichst großes Moment entwickelt? (Bitte auch in Bild 2 a einzeichnen).

---



---



---

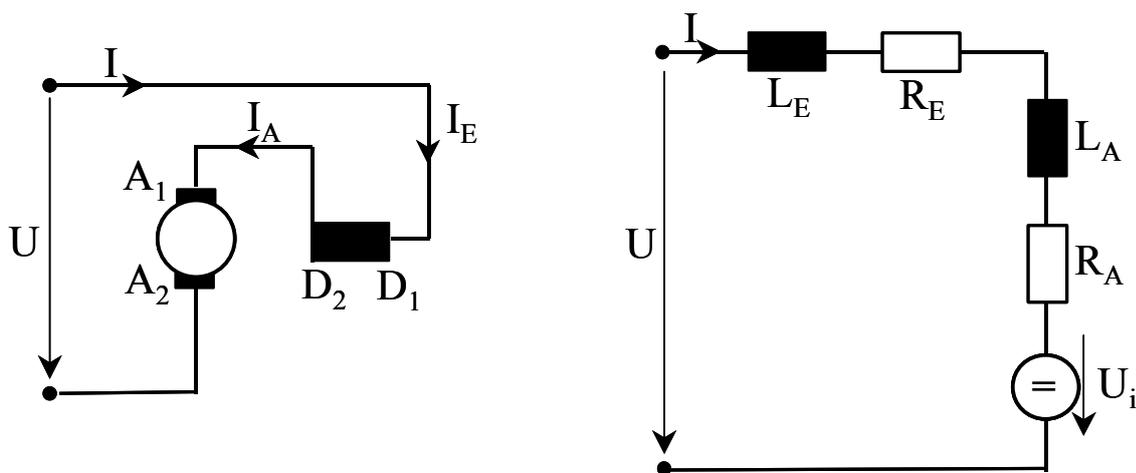
In Bild 3 ist rechts oben dargestellt, wie ein solcher Widerstand die Kennlinie des Motors beeinflusst. In dieser Abbildung ist in der unteren Reihe zu sehen, wie die Maschine durch Variation der Spannung (links) und durch Feldschwächung (rechts) beeinflusst werden kann. Als Feldschwächung bezeichnet man die Verringerung des Erregerfeldes, z.B. durch einen Vorwiderstand zur Erregerwicklung.

**Achtung:**

Die Erregung einer Gleichstrommaschine darf nie abgeschaltet oder getrennt abgesichert werden, da sonst die Maschine bei Entlastung eine unzulässig hohe Drehzahl erreicht (wenn der Ankerkreis noch an Spannung angeschlossen ist)!

**3.2 Die Gleichstrom-Reihenschlussmaschine**

Bild 4 zeigt links, wie hier Ankerwicklung und Erregerwicklung geschaltet werden. Rechts ist das Ersatzschaltbild einer Gleichstrom-Reihenschlussmaschine zu sehen.



a) Anordnung

b) Ersatzschaltbild

Bild 4 Gleichstrom-Reihenschlussmaschine

Aus dem Ersatzschaltbild kann folgende Gleichung aufgestellt werden:

$$U = U_i + I_A \cdot (R_A + R_E) \quad (3.8)$$

Die Ableitung der Drehzahl-Drehmoment-Beziehung (M(n)-Kennlinie) ist bei der Reihenschlussmaschine etwas schwieriger, da der Erregerfluss  $\phi$  vom Erregerstrom, der hier dem Ankerstrom entspricht, abhängt. Bei nicht zu großem Strom ist  $\phi \sim I_A$  (Voraussetzung: keine Eisensättigung). Daraus ergibt sich:

$$\frac{M_i}{M_{St,N}} = \frac{1}{\left(1 + \frac{n}{n_{BN}}\right)^2} \quad (3.9)$$

$n_{B,N}$  gewählte Bezugsdrehzahl, z.B. bei Nennspannung (Index „N“)

Bei Stillstand ( $n = 0$ ) der Maschine ist der Strom ebenfalls durch die ohmschen Widerstände der Wicklungen begrenzt:

$$I_{Ak} = I_{A,St} = \frac{U}{(R_A + R_E)} \quad (3.10)$$

In Bild 5 links ist die Kennlinie einer Gleichstrom-Reihenschlussmaschine und rechts ihre Abhängigkeit von einem Anlasswiderstand  $R_V$  dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass bei der Reihenschlussmaschine das Drehmoment nicht proportional zum Strom ist. Es fällt auch auf, dass es keinen Leerlaufpunkt ( $M_i = 0$ ) gibt. Daraus folgt, dass „große“ Reihenschlussmaschinen nicht ohne Last betrieben werden dürfen. Bild 5 zeigt, wie die Kennlinie der Maschine durch Variation der Spannung (links) und durch Feldschwächung (rechts) beeinflusst werden kann. Die Feldschwächung erfolgt bei der Reihenschlussmaschine durch einen Widerstand, der parallel zur Erregerwicklung geschaltet wird. Dadurch fließt nicht der gesamte Ankerstrom durch diese Wicklung und der Erregerfluss wird kleiner.

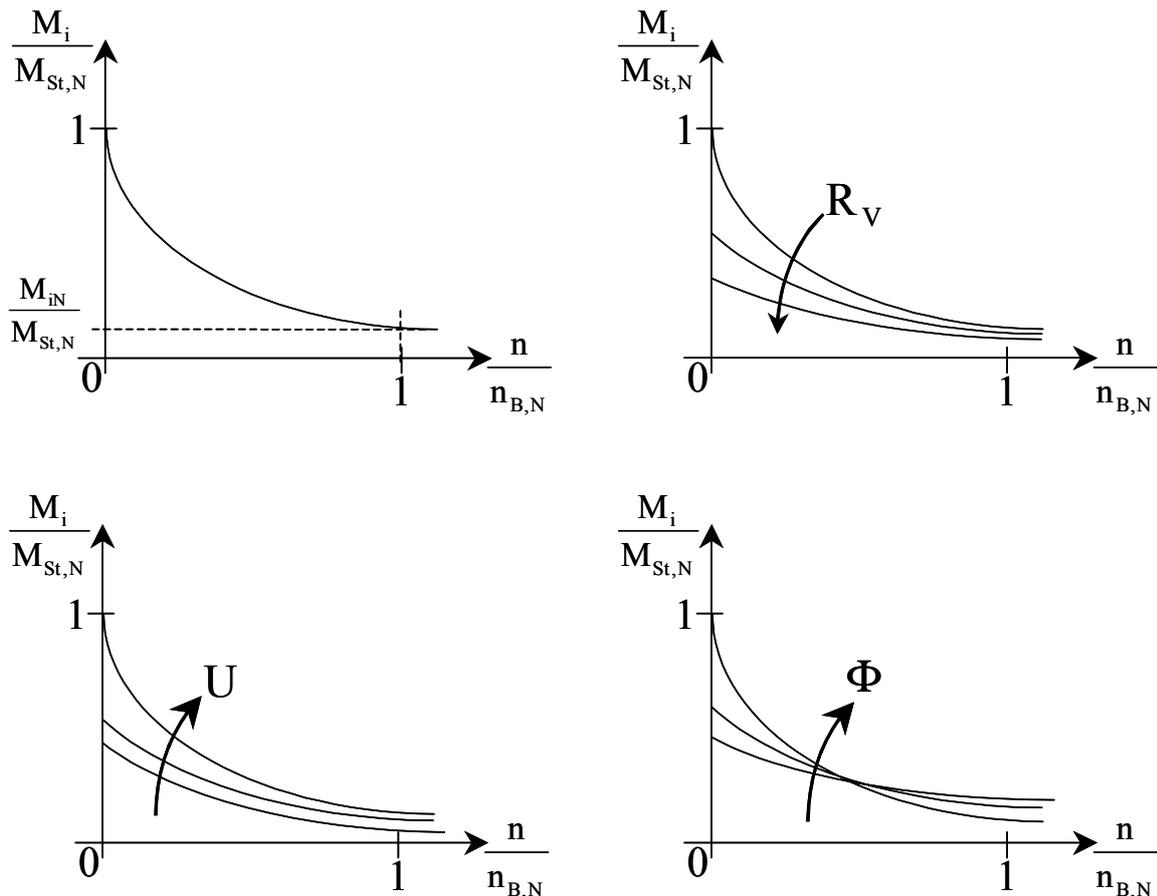


Bild 5 Kennlinien der Gleichstrom-Reihenschlussmaschine

### 3.3 Motor- und Generatorbetrieb

Bisher wurde ausschließlich der Motorbetrieb der Maschine behandelt. Betrachten wir nochmals die Grundgleichungen aus Abschnitt 1.2 und nehmen wir an, der Ankerstrom  $I_A$  fließe in Richtung der induzierten Spannung  $U_i$ , die Maschine bewege sich mit der Geschwindigkeit  $v$ . Wertet man die Kreuzprodukte in den Gleichungen (1.1) und (1.2) aus, so ergibt sich, dass die Kraft  $F$  in Richtung der Leiter- bzw. der Ankerbewegung wirkt. Fließt  $I_A$  jetzt gegen die Richtung der induzierten Spannung und die Bewegung wird aufrecht erhalten, so wirkt die Kraft entsprechend gegen die Leiter- bzw. Ankerbewegung. Das bedeutet wiederum, dass man im zweiten Fall eine Kraft aufwenden muss, um die Bewegung fortsetzen zu können, d.h. es muss mechanische Energie aufgebracht werden:

$$P_{\text{mech,Leiter}} = F \cdot v = I_A \cdot B \cdot L \cdot v \quad (3.11)$$

Nach dem Gesetz der Energieerhaltung gewinnt man die aufgenommene Leistung in Form von elektrischer Energie zurück:

$$P_{\text{el,Leiter}} = v \cdot B \cdot L \cdot I_A = U_i \cdot I_A \quad (3.12)$$

Wir erkennen daraus, dass die Maschine im zweiten Fall elektrische Leistung liefert. Sie arbeitet hier **generatorisch** und im ersten Fall **motorisch**.

Die prinzipbedingte Umsetzbarkeit von mechanischer Energie in elektrische Energie in beiden Wirkrichtungen stellt einen herausragenden Vorteil von elektrischen Maschinen dar.

## **4 Technischer Aufbau der Gleichstrommaschine**

### **4.1 Polpaarzahl und Läuferwicklung**

Bei der Konstruktion elektrischer Maschinen sind auch technische Randbedingungen zu beachten. So soll eine Maschine meist möglichst klein und leicht sein. Um dies zu erreichen muss die magnetische Ausnutzung des Ständers und des Läufers optimiert werden. Dies führt oft zu einer mehrpoligen Ausführung. In Bild 6 ist eine vierpolige Gleichstrommaschine dargestellt. Dadurch wird eine kürzere Eisenweglänge der Erregerfeldlinien erzielt, wodurch eine kleinere Erregerdurchflutung erforderlich ist. Üblich sind vier- und sechspolige Maschinen, das heißt, die Polpaarzahl  $p$  ist zwei oder drei. Bei großen, langsam laufenden Maschinen sind die Polpaarzahlen noch deutlich größer.

Aus Bild 1 erkennt man, dass die innerhalb des Eisenrings gelegenen Leiter der Ankerwicklung an der Drehmomentbildung nicht beteiligt sind (feldfreier Raum). Da in ihnen die Stromrichtung entgegengesetzt der in den Leitern unter dem Pol ist, kann man sie unter den benachbarten Pol verlegen, unter welchem die Ströme ebenfalls entgegengesetzt fließen. Dadurch entsteht die sogenannte Schleifenwicklung. Da im Inneren des Eisenrings nun keine Leiter mehr sind, wird dieser, wie in Bild 6 dargestellt, durch einen Zylinder ersetzt.

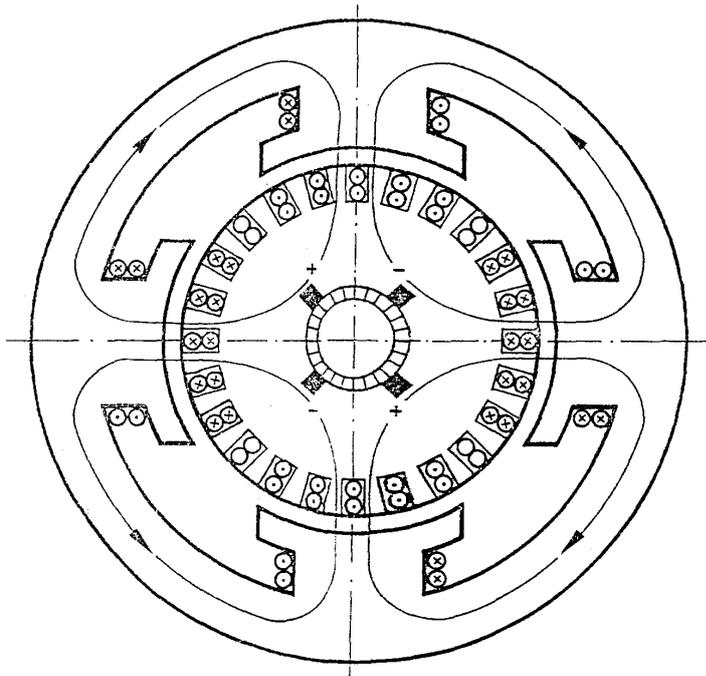


Bild 6 Querschnitt einer vierpoligen Gleichstrommaschine

Um den Luftspalt zu verkleinern, wird die Ankerwicklung in Nuten eingelassen. In jeder dieser Nuten sind entweder zwei Leiterstäbe (Stabwicklung) oder zwei Spulenhälften, Spulenwicklung) untergebracht. Die prinzipiell erarbeiteten Zusammenhänge gelten jedoch unabhängig von dieser Maßnahme weiter!

#### **Achtung:**

Bei in Nuten untergebrachten Wicklungen greift die nach Gleichung (1.2) berechnete Kraft nicht am Leiter, sondern an den Zähnen des Ankers, also an der Ankeroberfläche, an!

## **4.2 Kompensationswicklungen**

Bei Belastung der Maschine fließt im Anker ein Strom, wodurch ebenfalls ein Magnetfeld entsteht. Dieses Magnetfeld, das sogenannte Ankerquerfeld, überlagert sich dem Erregerfeld und schwächt dieses unter einer Hälfte jedes Poles. Unter den anderen Polhälften wird das Erregerfeld verstärkt. Dies hat jedoch den Nachteil, dass in einzelnen Leitern im Läufer eine höhere Spannung induziert wird, wodurch an den Kommutatorlamellen zu hohe Spannungen, die Bürstenfeuer hervorrufen können, auftreten. Des Weiteren ist nachteilig, dass insgesamt der Erregerfluss geschwächt wird, sofern Eisensättigung auftritt. Um die genannten Nachteile zu vermeiden, kann in den Polschuhen eine Wicklung eingebaut werden. Diese kann, wenn sie die

gleiche Anzahl von Leitern hat und vom gleichen Strom (Ankerstrom) gegenseitig durchflossen wird, das Ankerquersfeld vollständig kompensieren. Die Kompensationswicklung wird deshalb mit dem Anker in Reihe geschaltet.

### 4.3 Wendepolwicklungen

Um die Stromwendung in den bei der Kommutierung kurzgeschlossenen Ankerwicklungen zu verbessern bringt man in den Pollücken sogenannte Wendepole an, deren Feld in den kommutierenden Wicklungen rotatorisch eine Spannung induziert (siehe Abschnitt 1.1), die der Selbstinduktionsspannung entgegenwirkt. Auch die Wendepolwicklungen werden in Reihe zum Anker geschaltet, da die auftretende Selbstinduktionsspannung dem Ankerstrom proportional ist. Bild 7 zeigt den Aufbau einer Maschine mit Kompensations- und Wendepolwicklungen und wie diese bei einer Reihenschlussmaschine verschaltet werden (Bild 8).

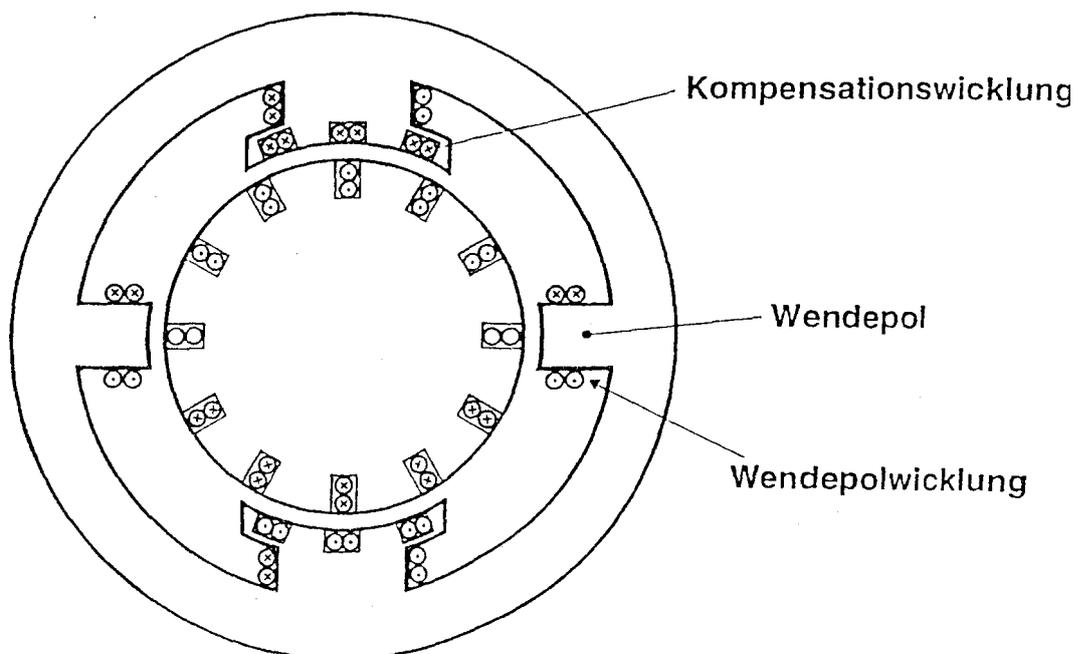


Bild 7 Anordnung einer Maschine mit Kompensations- und Wendepolwicklungen (die Bürsten sind nicht gezeichnet)

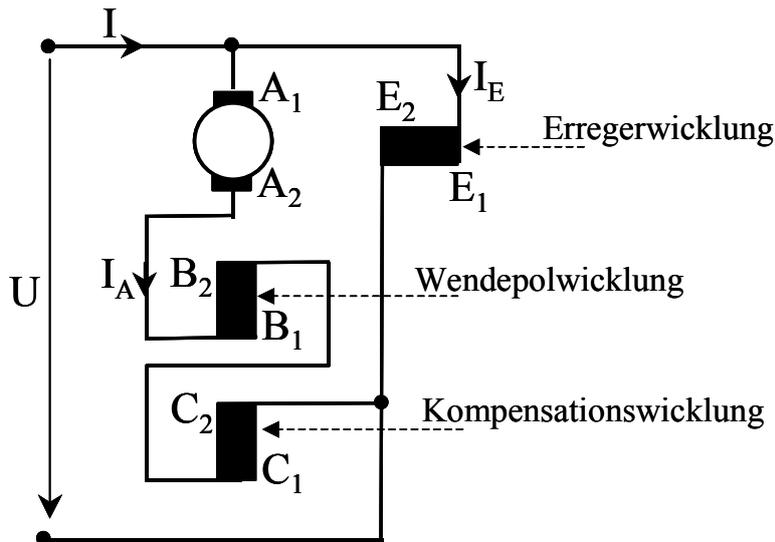


Bild 8 Ersatzdarstellung einer Maschine mit Kompensations- und Wendepolwicklungen

## 5 Versuchsdurchführung

Bild 9 im Anhang zeigt das elektrische Schaltbild des Versuchsaufbaus. Im Bild 10 ist der komplette Versuchsaufbau dargestellt. Betrachten Sie zuerst die Nenndaten der Maschinen in der Tabelle 1 und vergleichen sie diese mit den Daten auf den Leistungsschildern der beiden Maschinen. Auf welche Daten muss man bei der Versuchsdurchführung besonders aufpassen?

---



---



---

### 5.1 Leerlaufdrehzahl

Die Abhängigkeit der Leerlaufdrehzahl  $n_0$  vom Erregerstrom  $I_E$  ist zu untersuchen und mit dem theoretischen Ergebnis zu vergleichen.

**Frage:**

1. Wie hängt die Leerlaufdrehzahl theoretisch vom Erregerstrom  $I_E$  ab?

---



---

**Aufgabe 1:**

- Messen Sie die Leerlaufdrehzahl  $n_0$  des Gleichstrommotors für verschiedene Werte des Erregerstromes  $I_E$ .

$I_E$ [A]	0.65	0.7	0.8	0.85	0.9	1.0	1.1	1.15	1.2
$n_0$ [min <sup>-1</sup> ]									

- Stellen Sie das Ergebnis im vorbereiteten Diagramm grafisch dar.

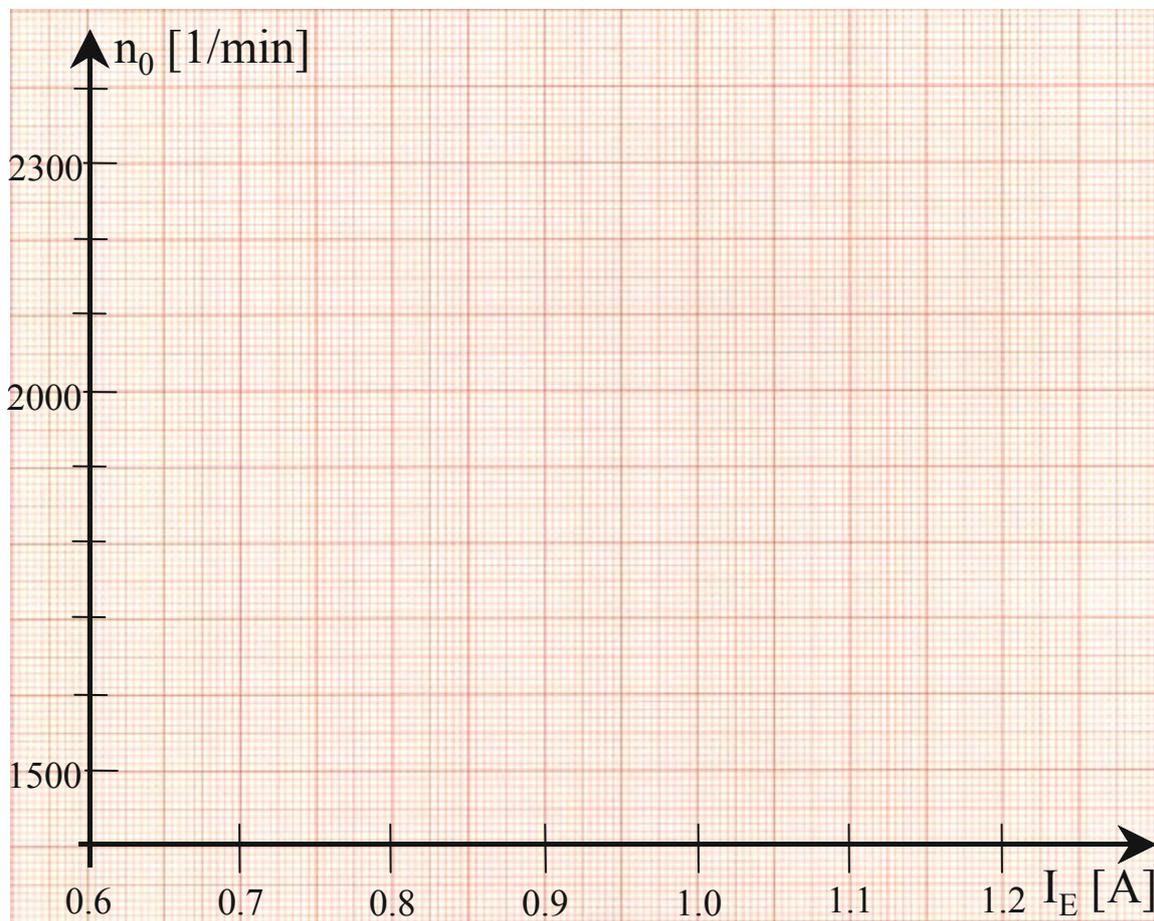


Diagramm 1 Leerlaufdrehzahl  $n_0$  in Abhängigkeit vom Erregerstrom  $I_E$

## 5.2 Drehmoment-Drehzahl-Kennlinien

Für die Anwendung einer elektrischen Maschine ist es erforderlich zu wissen, wie sich diese bei Belastung verhält. Dies lässt sich besonders gut aus den Drehmoment-Drehzahl-Kennlinien ablesen.

### Aufgabe 2:

- Messen Sie die Drehzahl der Maschine in Abhängigkeit vom Drehmoment (im Bereich von 0 ... 30 Nm) für drei verschiedene Motor-Erregerströme  $I_{E1}$ ,  $I_{E2}$  und  $I_{E3}$ .

$I_{E1} = 1,05 \text{ A}$	n [1/min]								
	M [Nm]								
$I_{E2} = 0,85 \text{ A}$	n [1/min]								
	M [Nm]								
$I_{E3} = 0,65 \text{ A}$	n [1/min]								
	M [Nm]								

- Stellen Sie die Ergebnisse im folgenden vorbereiteten Diagramm grafisch dar.

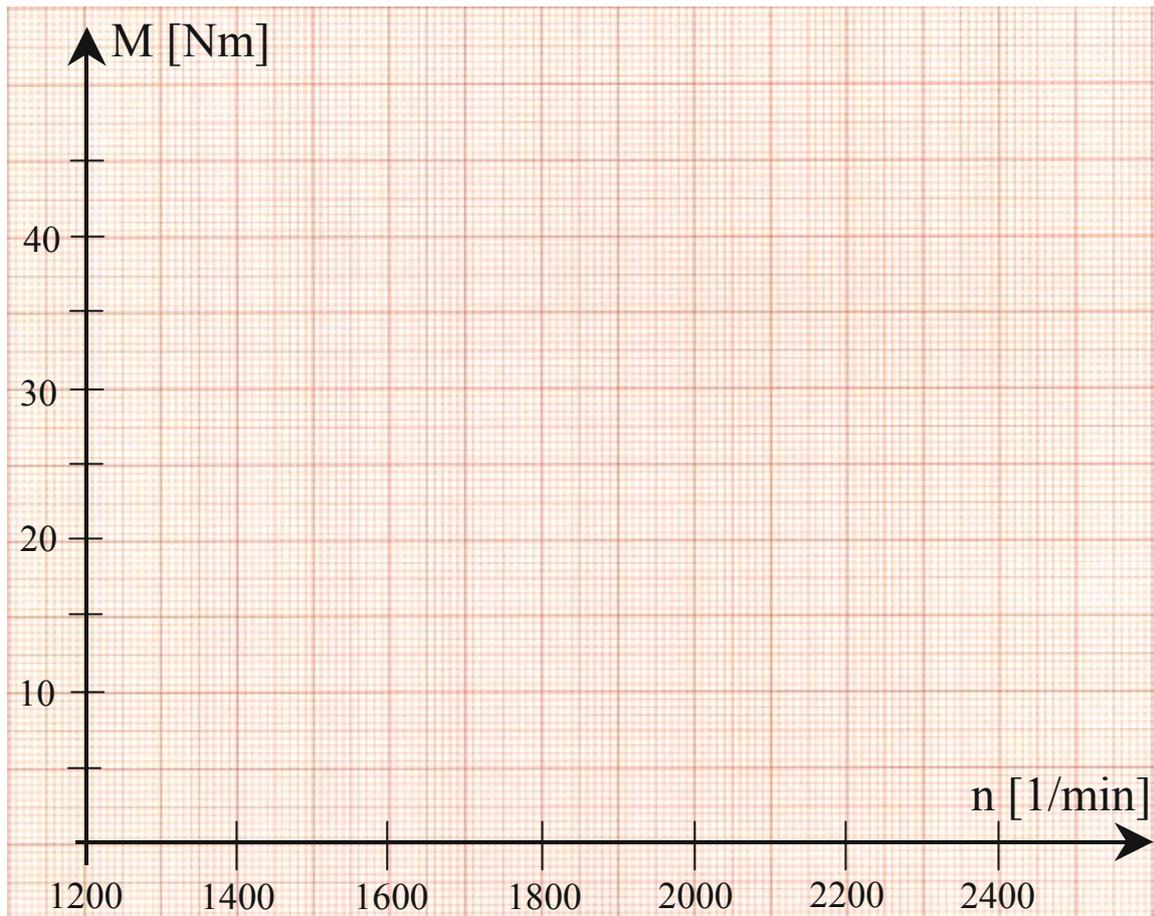


Diagramm 2 Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie

### 5.3 Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad  $\eta$  eines beliebigen Systems ist definiert als das Verhältnis der abgegebenen Leistung  $P_2$  zur aufgenommenen Leistung  $P_1$ .

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (5.1)$$

Allgemein setzt sich die aufgenommene Leistung aus der abgegebenen Leistung der Maschine (mechanische Leistung im Motorbetrieb) und sämtlichen Verlusten zusammen:

$$P_1 = P_2 + P_{V,ges} \quad (5.2)$$

Daraus folgt, dass stets  $\eta \leq 1$  gilt.

Bei dem betrachteten Gleichstrom-Nebenschlussmotor ist die abgegebene Leistung die mechanische Leistung an der Welle  $P_2 = P_{\text{mech}}$ .

$$P_2 = P_{\text{mech}} = M_N \cdot \Omega_N = M_N \cdot 2 \cdot \pi \cdot n_N \quad (5.3)$$

**Fragen:**

1. Wie lässt sich die mechanische Leistung aus den hier messbaren Größen (Drehzahl  $n$  und Drehmoment  $M$ ) berechnen?

---

2. Kann man aus der vom Generator abgegebenen elektrischen Leistung den Wirkungsgrad des Motors bestimmen?

---

---

3. Zu 2.: Wie? Welche Annahmen sind dazu zu treffen?

---

Die aufgenommene Leistung  $P_1$  setzt sich aus der elektrischen Leistung im Anker und in der Erregerwicklung zusammen:

$$P_1 = P_{\text{el}} = U \cdot (I_A + I_E) \quad (5.4)$$

**Aufgabe 3:**

- Stellen Sie den Versuchsaufbau so ein, dass der Motor ungefähr im Nennbetrieb arbeitet und berechnen Sie den Wirkungsgrad des Motors auf zwei verschiedene Arten. Messen Sie dazu die jeweils vorgegebenen Größen. Nehmen Sie für die Lösung 2 an, dass der Wirkungsgrad des Motors und des Generators gleich ist.

Siehe nächste Seite ...

<p><b><u>Lösung 1:</u></b></p> <p><math>U_{AM} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V}</math></p> <p><math>I_{AM} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ A}</math></p> <p><math>U_{EM} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V}</math></p> <p><math>I_{EM} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ A}</math></p> <p><math>M_N = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Nm}</math></p> <p><math>n_N = \underline{\hspace{2cm}} \text{ 1/s}</math></p>	<p><b><u>Lösung 2:</u></b></p> <p><math>U_{AM} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V}</math></p> <p><math>I_{AM} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ A}</math></p> <p><math>U_{EM} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V}</math></p> <p><math>I_{EM} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ A}</math></p> <p><math>U_L = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V}</math></p> <p><math>I_L = \underline{\hspace{2cm}} \text{ A}</math></p> <p><math>U_{EG} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V}</math></p> <p><math>I_{EG} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ A}</math></p>
---	--

## 6 Abwandlungen und weitergehende Betrachtungen

### 6.1 Betrieb an Wechselspannung

Da sich die Drehrichtung einer Gleichstrommaschine nicht ändert, wenn der Erregerfluss und der Strom im Anker gleichzeitig ihre Richtung umkehren, liegt die Vermutung nahe, dass man eine Gleichstrommaschine an Wechselspannung betreiben kann. Es zeigt sich jedoch, dass dies nur bei einer der beiden beschriebenen Schaltungen möglich ist.

**Frage:**

1. Welche der Maschinen (Reihen- oder Nebenschluss) kann man an Wechselspannung betreiben? Man beachte dabei die Induktivitäten der Erreger- und Ankerwicklungen.

---

---

---

---

Betriebs man einen solchen Motor an Wechselspannung, so spricht man von einem Wechselstrom-Kommutatormotor. Bei diesem tritt ein weiteres Problem auf: Da die bei der Kommutierung kurzgeschlossenen Ankerwicklungen voll vom Erregerfluss durchsetzt werden und dieser sich ständig ändert (Wechselfluss), wird in diesen Wicklungen transformatorisch eine erhebliche Spannung induziert. Um diese Spannung in Grenzen zu halten hat man am Anfang dieses Jahrhunderts bei der Eisenbahn die Netzfrequenz auf  $f = 16 \frac{2}{3}$  Hz reduziert.

## **6.2 Umkehrung der Maschinenbauform und elektronische Kommutierung**

Vertauschen wir nun in einem Gedankenexperiment die Außenpolanordnung mit der Erregung des Ständers mit einer Innenpolanordnung im Läufer und ordnen im Ständer, der jetzt als Hohlzylinder ausgebildet ist, in Nuten untergebrachte Spulen am Umfang der Bohrung an. Rotiert der Läufer, so werden jetzt im Ständer Wechselspannungen induziert, der Ständer ist nun der Anker. Die Flusskoordinate ist nicht mehr räumlich ruhend wie bei der Gleichstrommaschine, sondern rotiert mit dem Läufer mit. Wie hier ohne Beweis behauptet werden soll, ist es möglich, die Durchflutungen der in den Ständerspulen fließenden Ströme (Wechselströme!) zu einer Summendurchflutung zusammenzufassen, die mit konstanter Amplitude gleich schnell rotiert wie der Läuferfluss. Bei der Gleichstrommaschine stehen beide Zeiger still und bilden, wie man mit Hilfe von Bild 1 leicht überprüfen kann, einen Winkel von 90 Grad. Bilden die beiden rotierenden Zeiger ebenfalls einen Winkel von 90 Grad, so verhält sich die praktisch "umgekehrt" gebaute Maschine genauso, wie eine GleichstromNebenschlussmaschine. (Auch diese Behauptung muss hier ohne Beweis erfolgen, da die Grundlagen der Maschinentheorie hier noch nicht zur Verfügung stehen). So wie der mechanische Kommutator durch die Stromwendung

bei der Gleichstrommaschine dafür sorgt, dass dieser typische Winkel von 90 Grad aufrecht erhalten bleibt, so muss im hier diskutierten Fall eine elektronische Schaltung die Ständerströme derart steuern, dass dies auch im rotierenden System gewährleistet bleibt. Man nennt diese Maschinen daher allgemein elektrisch kommutierte Maschinen oder kurz ECM. Wichtig ist, dass es sich hierbei um Wechselstrommaschinen handelt und zweitens, welchen entscheidenden Vorteil diese Bauart mit sich bringt: Ersetzen wir die Gleichstromerregung im Läufer nun durch einen Permanentmagneten – wie wir es ja auch bei der Gleichstrommaschine tun können – so erhalten wir eine Maschine, deren Rotor nicht mehr mit Strom versorgt werden muss und daher bürstenlos ausgeführt werden kann. Die aufgeführten Nachteile der Gleichstrommaschine wie Bürstenverschleiß etc. entfallen, jedoch ist der elektronische Schaltungsaufwand hoch und damit wird die Anordnung recht teuer.

**Aufgabe 4:**

- Zeichnen Sie die Anordnung der eben vorgestellten Maschine und diskutieren Sie die Unterschiede und Übereinstimmungen zur Gleichstrommaschine erneut.

**Zeichnung:**

**Unterschiede und Übereinstimmungen zur GM:**

## 7 Anhang

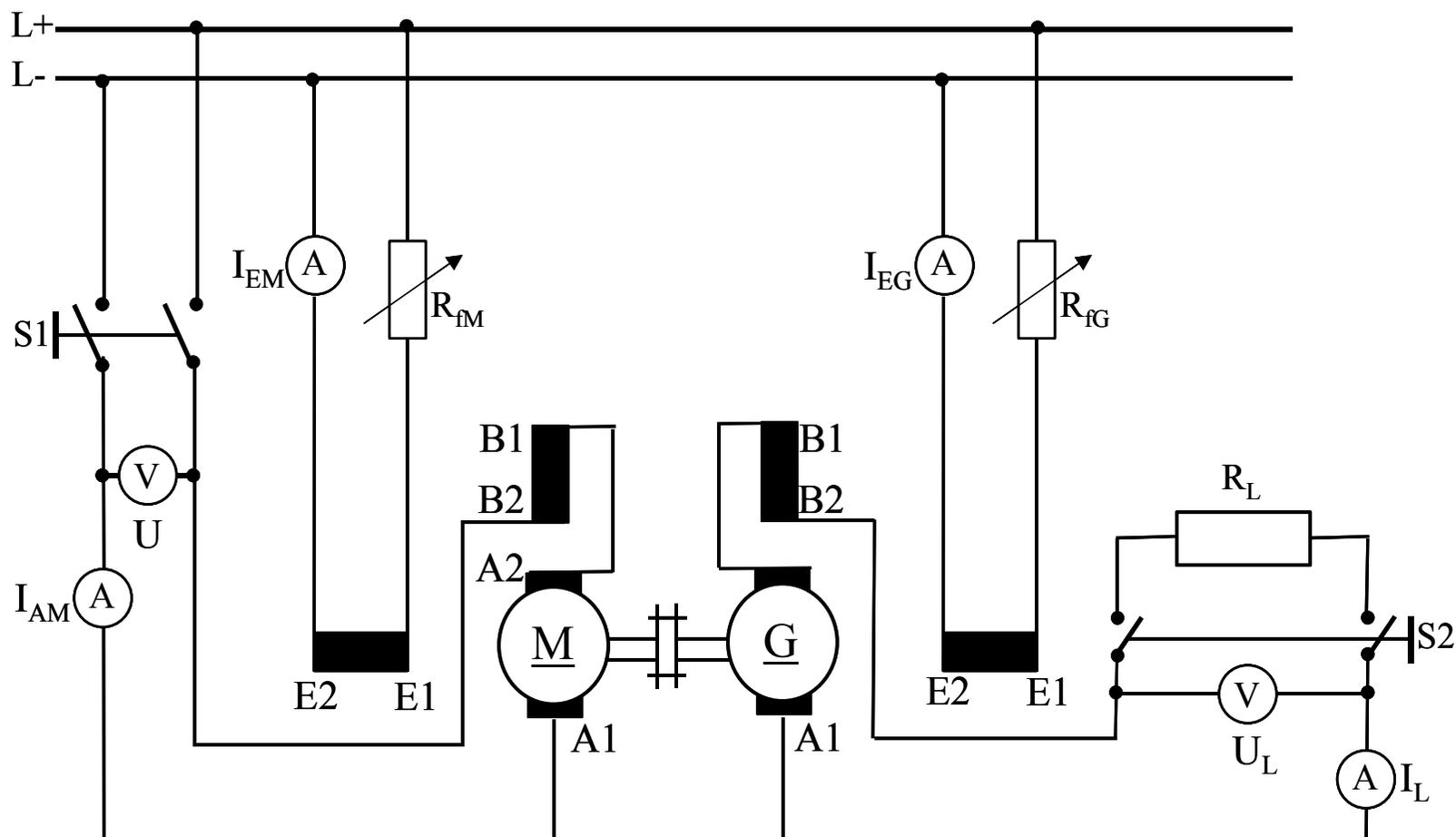


Bild 9 Schaltbild des Versuchsaufbaus

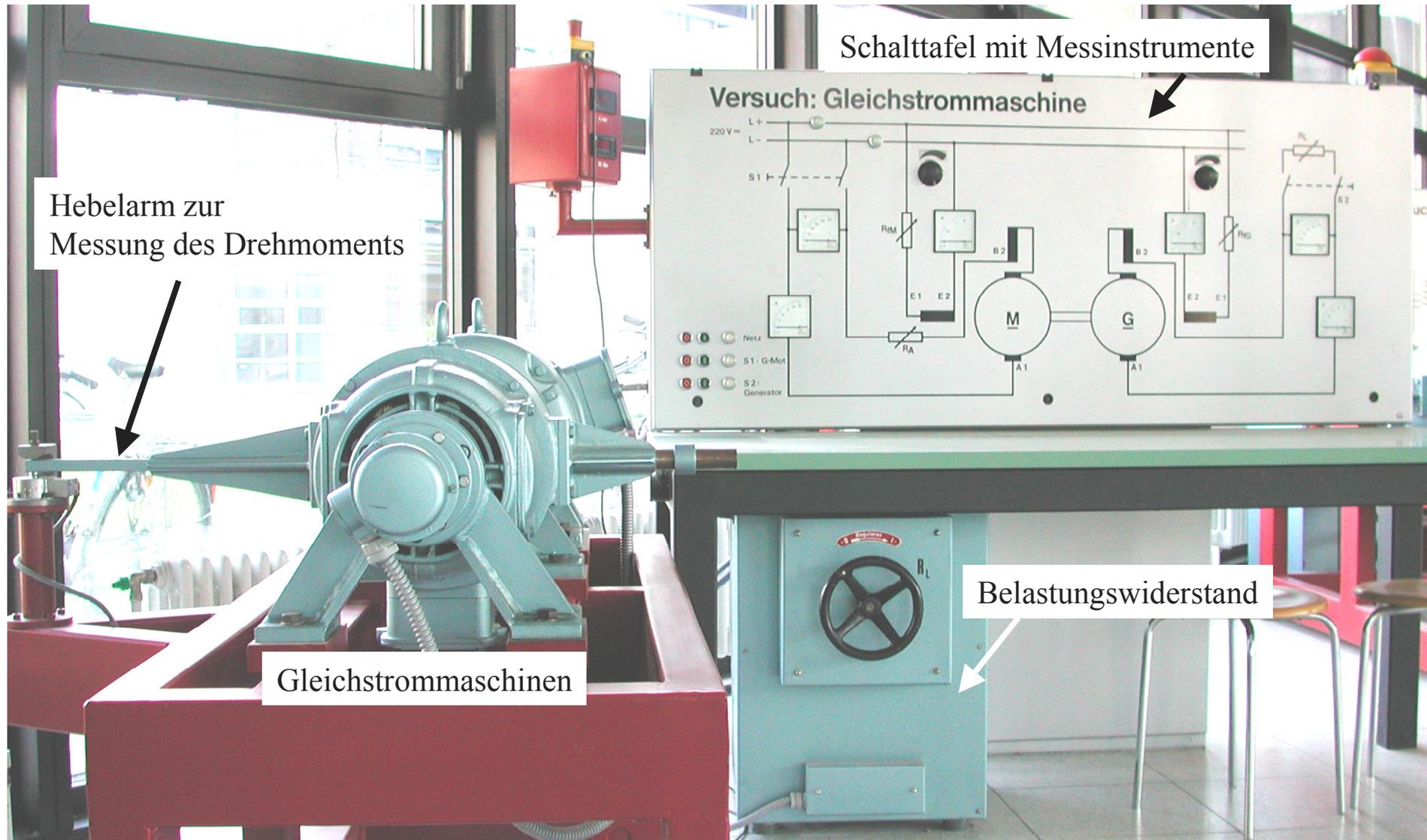


Bild 10 Versuchsaufbau und Schalttafel

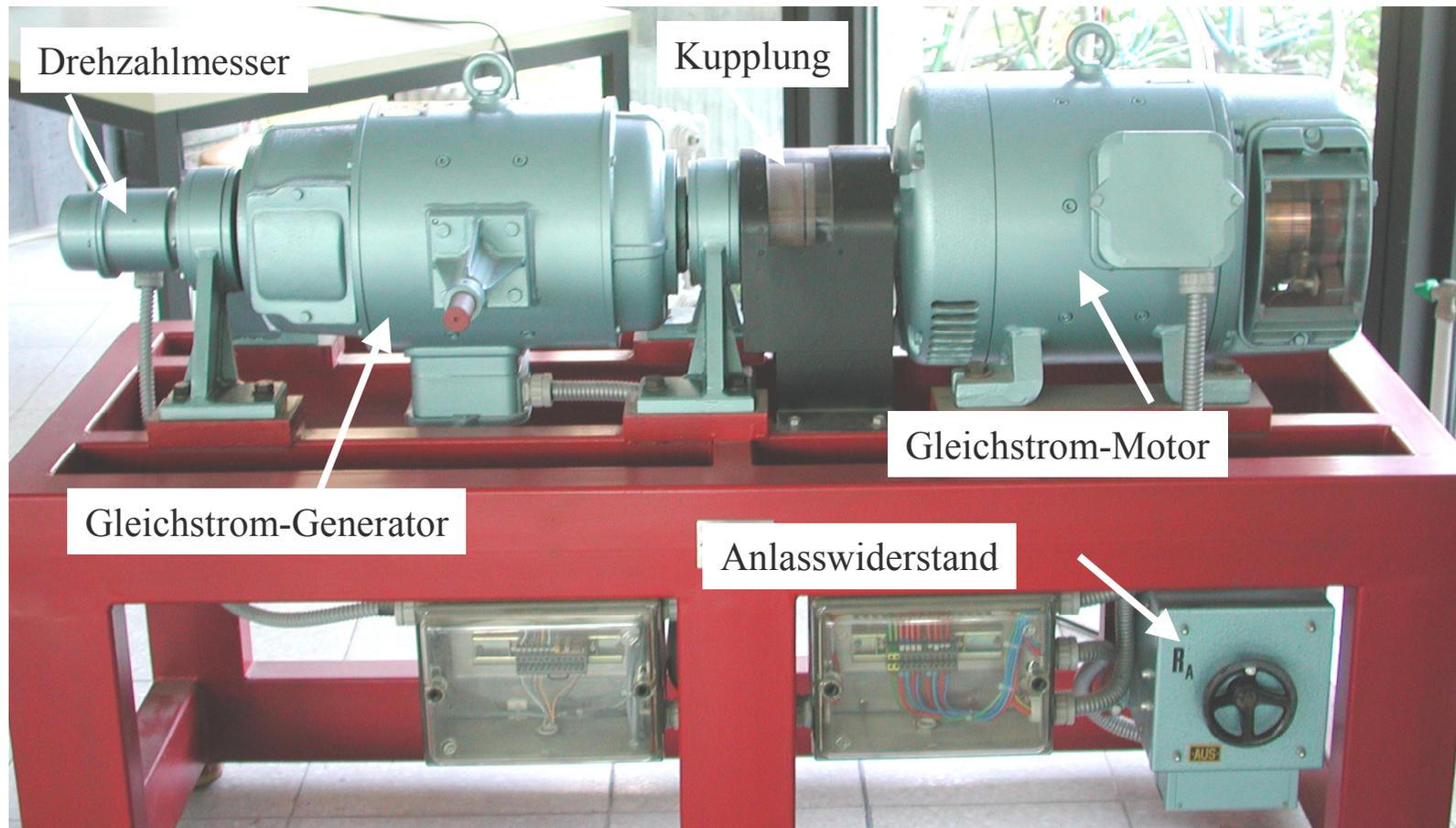


Bild 11 Verwendete Maschinen: Gleichstrommotor und Gleichstromgenerator

	Motor	Generator
Ankerspannung $U_A$ [V]	220	220
Ankerstrom $I_A$ [A]	21,0	18,2 / 21,4
Nennleistung $P_N$ [kW]	4,0	4,0
Nennzahl $n_N$ [1/min]	1500	1500
Erregerspannung $U_E$ [V]	220	220
Erregerstrom $I_E$ [A]	1,14	1,28

Tabelle 1 Daten der im Versuch verwendeten elektrischen Gleichstrommaschinen

## 8 Literatur

- Fischer:** Elektrische Maschinen  
Hanser Verlag, München, 2004
- Kleinrath:** Grundlagen elektrischer Maschinen  
Akademische Verlagsgesellschaft, Wiesbaden, 1975
- Möller/Vaske:** Elektrische Maschinen und Umformer  
aus der Reihe "Möller, Leitfaden der Elektrotechnik"  
Teil 1  
B. G. Teubner Verlag, Stuttgart, 1976
- Bödefeld-Sequenz:** Elektrische Maschinen  
Springer Verlag, Berlin, 1962
- Müller:** Elektrische Maschinen  
Grundlagen, Aufbau und Wirkungsweise,  
VEB Verlag Technik, Berlin, 1989
- Richter:** Elektrische Maschinen, Band 1  
Birkhäuser Verlag, Stuttgart, 1967

**Bitte bringen Sie zur Versuchsdurchführung Zeichenmaterial (Lineal, Zirkel), Schreibmaterial (Stifte und Papier) und einen Taschenrechner mit!**