

Praktikum Grundlagen der Elektrotechnik

Versuch **GET 2.2: Gleichstrommaschine**

Standort GET-Laborräume im Helmholtzbau (H2546, H2547, H2548 bzw. H2549)

Inhalt

- 1 Ziel und Inhalt des Versuches
- 2 Vorausgesetztes Wissen
- 3 Literatur
- 4 Vorbereitungsaufgaben
- 5 Geräte und Baugruppen am Versuchsplatz sowie Bedienhinweise
- 6 Aufgabenstellungen zur Versuchsdurchführung und Versuchsauswertung

1 Ziel und Inhalt des Versuches

- Vermittlung und Vertiefung von Kenntnissen über den Aufbau, die Wirkungsweise, die Schaltung und das Betriebsverhalten von Gleichstrommaschinen
- Aufnahme wesentlicher Kennlinien der Maschine im Motor- und Generatorbetrieb

2 Vorausgesetztes Wissen

- Skalare und vektorielle physikalische Größen in magnetischen Feldanordnungen
- Verhalten des magnetischen Flusses in technischen Eisenkreisen (siehe GET 1.4)
- Anwendung des Induktionsgesetzes und Berechnung eines Drehmomentes mit Hilfe des Ampèreschen Kraftgesetzes für einfache Leiterschleifengeometrien
- Schaltungsvarianten für Gleichstrommaschinen

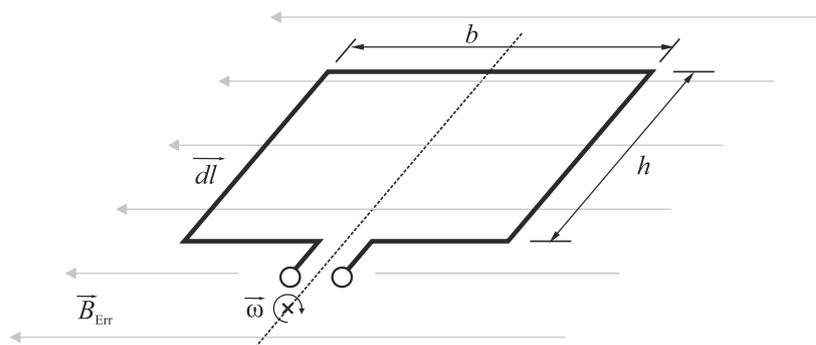
3 Literatur

- Vorlesungs- und Seminarunterlagen „Allgemeine Elektrotechnik 2“
- Lehrbuch Seidel/Wagner: Allgemeine Elektrotechnik 1, Unicopy Ilmenau 2009, Kapitel 4.1.3, 5.1 und Kapitel 5.4
- Linse, Elektrotechnik für Maschinenbauer, Abschn. 4.1. Verlag B. G. Teubner Stuttgart
- Lesics: Wie arbeitet ein Gleichstrommotor?
<https://www.youtube.com/watch?v=U6bHUksgnMg>

4 Vorbereitungsaufgaben

4.1 Herleitung der 1. Maschinengleichung (Generatorgleichung)

- Leiten Sie die 1. Maschinengleichung: $u_{\text{ind}} = K_1 \cdot n \cdot \Phi_{\text{Err}}$ für rotierende Leiterschleifen in einem homogenen externen Magnetfeld (Erregung) her.
- **Hinweis:** Die Spannung ist über die Bewegungsinduktion (siehe Seminaufgabe 04.01.06) für die Lage der Leiterschleife entsprechend **Abbildung 1** zu berechnen (Flussdichte und Schleifenfläche liegen in einer Ebene - entsprechende Vereinfachung gilt für eine radialsymmetrische Feldanordnung).



Daten der Schleife:

- b Breite
- h Höhe
- N Windungszahl
- ω Winkelgeschwindigkeit

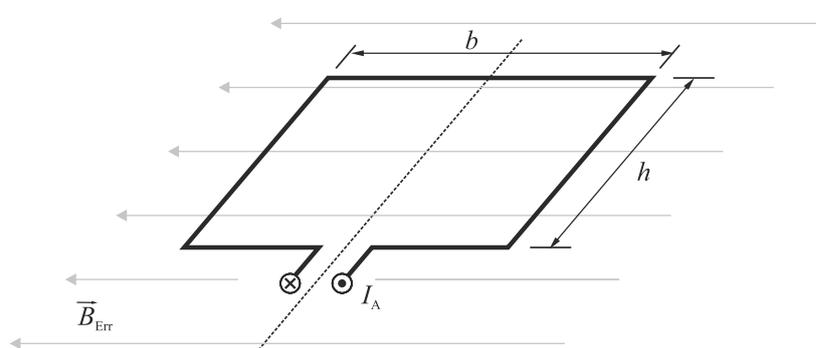
Daten der Umgebung:

- \vec{B}_{Err} Äußere magnetische Flussdichte

Abbildung 1: Dargestellter Moment, in dem die Fläche einer bewegten Leiterschleife in der gleichen Ebene liegt, wie das äußere, homogene Magnetfeld

4.2 Herleitung der 2. Maschinengleichung (Motorgleichung)

- Leiten Sie die 2. Maschinengleichung: $M = K_2 \cdot \Phi_{\text{Err}} \cdot I_A$ für eine stromdurchflossene Leiterschleife in einem homogenen externen Magnetfeld (Erregung) her.
- **Hinweis:** Das Drehmoment wird über die wirksamen Kraftkomponenten mit Hilfe des Ampèreschen Kraftgesetzes (siehe Seminaufgabe 05.01.04) für die Lage der Leiterschleife entsprechend **Abbildung 2** berechnet (Flussdichte und Schleifenfläche liegen in einer Ebene - entsprechende Vereinfachung gilt für eine radialsymmetrische Feldanordnung).



Daten der Schleife:

- b Breite
- h Höhe
- N Windungszahl
- I_A Strom in Leiterschleife

Daten der Umgebung:

- \vec{B}_{Err} Äußere magnetische Flussdichte

Abbildung 2: Ruhende, stromdurchflossene Leiterschleife im homogenen äußeren Magnetfeld

4.3 Aufbau der Gleichstrommaschine, Bestimmung des elektrischen Ersatzschaltbildes und der Maschengleichungen für verschiedene Anschluss- und Betriebsarten

Wird eine Leiterschleife in einem statischen äußeren Magnetfeld durch eine mechanische Kraft bewegt, so wird eine Spannung induziert. Die Anordnung wirkt als Generator. Wird in der gleichen Anordnung ein Stromfluss in dieselbe Leiterschleife eingepreßt, so wirkt durch das äußere Magnetfeld eine Kraft auf die Leiterschleife, die ein Drehmoment zur Folge hat. In diesem Fall spricht man von einem Motor.

Werden die Gleichungen für die Bewegungsinduktion bzw. für das Ampèresche Kraftgesetz für die Anordnungen in **Abbildung 1** und **Abbildung 2** für jeden beliebigen Drehwinkel berechnet, ergibt sich eine von der Lage abhängige induzierte Spannung bzw. ein entsprechendes Drehmoment. Ziel ist es jedoch, zu jeder Zeit eine möglichst konstante Klemmspannung oder ein konstantes Drehmoment zu erhalten.

Dazu zeigt **Abbildung 3** eine mögliche technische Ausführung einer Gleichstrommaschine im motorischen Betrieb. Das feststehende Gehäuse der Maschine bildet den Stator aus, welcher den technischen Magnetkreis der Erregung bildet. Im Zentrum der Maschine befindet sich der rotierende Anker (Rotor), welcher umlaufend mit einer Vielzahl von Leiterschleifen versehen wurde. Mit Hilfe der Ausführung der Erregerwicklung und der Polschuhe im Stator ergibt sich für die jeweils aktiven Ankerwicklungen ein radialsymmetrisches Erregerfeld, so dass die Annahmen aus der Aufgabenstellung 4.1 und 4.2 ihre Gültigkeit behalten und somit das Drehmoment und die induzierte Spannung als konstant angenommen werden können.

Die Ankerwicklungen sind an dem mitlaufenden Kommutator aufgelegt. Über das feststehende Bürstenpaar wird die elektrische Verbindung zum feststehenden Gehäuse und den Anschlussklemmen hergestellt. Durchläuft eine Ankerwicklung den Bereich der Kommutierungsachse, wird der Stromfluss zunächst kurzzeitig unterbrochen und danach in umgekehrter Richtung durch die Leiterschleife eingepreßt. Somit ergibt sich für jede Leiterschleife zu jedem Zeitpunkt die gleiche Wirkrichtung für die induzierte Spannung bzw. Kraftwirkung.

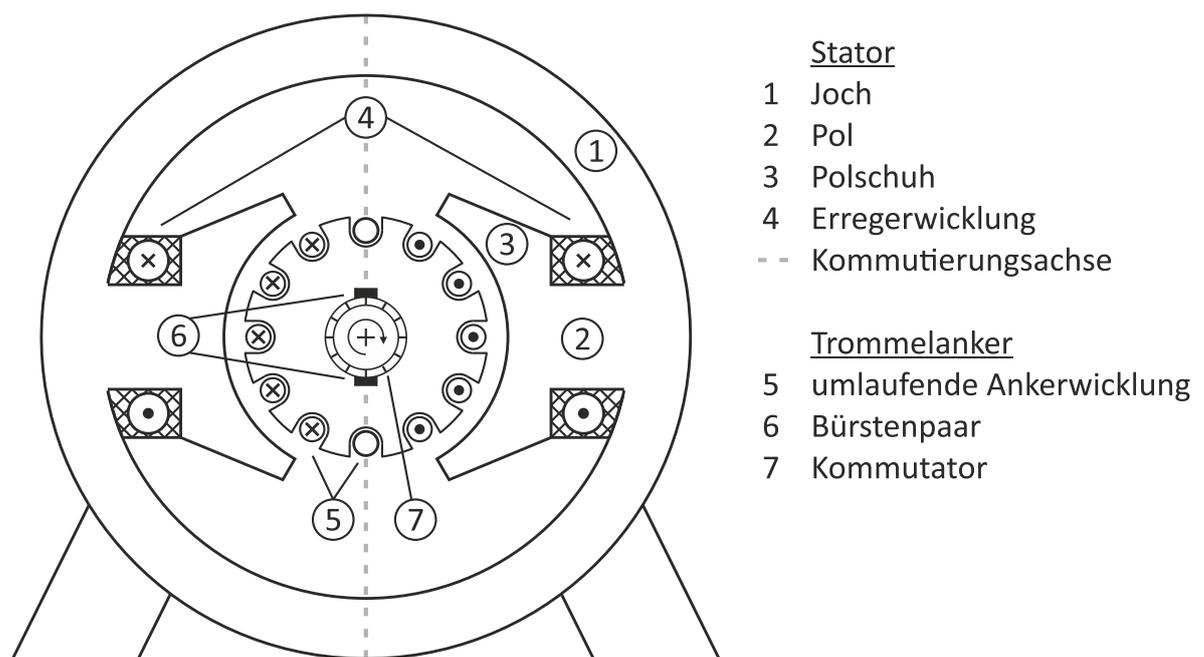


Abbildung 3: Schematischer Aufbau einer Gleichstrommaschine mit Trommelanker

Abbildung 4 a) zeigt das Schaltbild eines Motors mit einer elektrischen Erregung. Beide, die Anker- und die Erregerwicklung, können jeweils durch eine Induktivität mit ihrem Verlustwiderstand (Wicklungsverluste) beschrieben werden, so dass sich ein elektrisches Ersatzschaltbild entsprechend **Abbildung 4** b) ergibt. Aus Ihrer Herleitung in der Vorbereitungsaufgabe 4.1 wird ersichtlich, dass in der Ankerwicklung eine Gleichspannung induziert wird. Vereinfachend wird die Induktivität L_A durch eine äquivalente Gleichspannungsquelle $U_{A,M}$ angenommen. Weiterhin ist der magnetische Fluss der Erregung Φ_{Err} konstant, so dass keine Spannungsinduktion in der Erregerinduktivität L_{Err} hervorgerufen wird. Die Induktivität L_{Err} wird folgend vernachlässigt, so dass sich ein vereinfachtes Ersatzschaltbild für den elektrischen Motor entsprechend **Abbildung 4** c) ergibt.

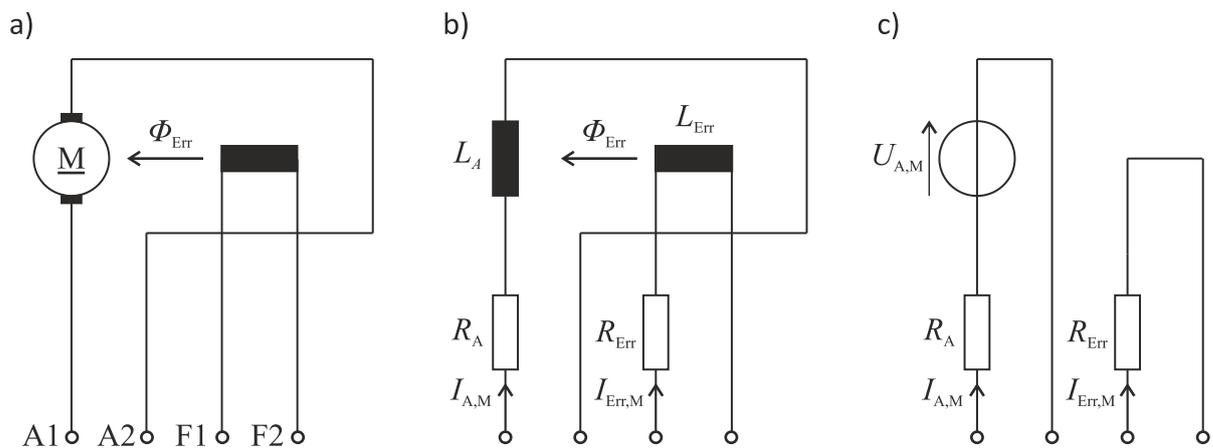


Abbildung 4: a) technisches Schaltbild des fremderregten Motors; b) elektrisches Ersatzschaltbild des Motors und c) vereinfachtes elektrisches Ersatzschaltbild

Je nach Aufbau und Verschaltung der unterschiedlichen Wicklungspakete maschinenintern bzw. an den äußeren Anschlussklemmen ergibt sich ein anderes Betriebsverhalten der rotierenden elektrischen Maschine. Möglich sind u.a. eine fremderregte Maschine, die Reihen- und die Nebenschlusmaschine. Für eine schnelle Erkennung und Unterscheidung wurden die entsprechend **Tabelle 1** festgelegten Klemmenbezeichnungen eingeführt.

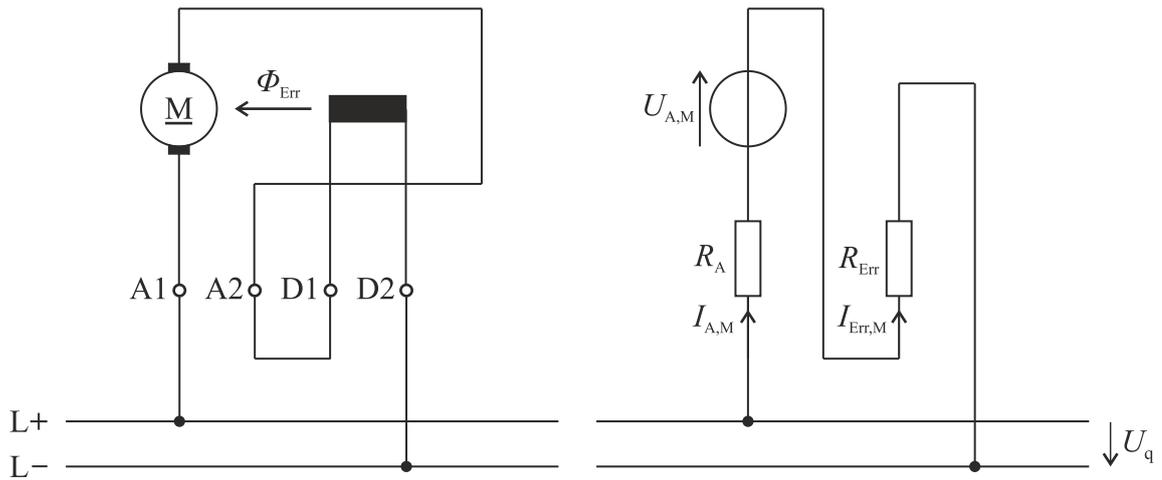
Tabelle 1: Klemmenbezeichnungen nach DIN EN 60034-8 (Auszug)

Klemmenbezeichnung	Wicklungsart
A1 – A2	Ankerwicklung
B1 – B2	Wendepolwicklung
C1 – C2	Kompensationswicklung
D1 – D2	Reihenschlusserregerwicklung
E1 – E2	Nebenschlusserregerwicklung
F1 – F2	Fremderregerwicklung

Die Haupt- bzw. Reihenschlussmaschine ist für den Motorbetrieb in **Abbildung 5 a)** dargestellt. Der Ankerstrom $I_{A,M}$ und die Ankerspannung $U_{A,M}$ zeigen im elektrischen Ersatzschaltbild beide in die gleiche Richtung – elektrische Leistung wird in mechanische Leistung umgewandelt. **Abbildung 5 b)** zeigt die gleiche Maschine im Generatorbetrieb. Der Ankerstrom $I_{A,G}$ wechselt die Richtung und zeigt im elektrischen Ersatzschaltbild entgegen der Ankerspannung $U_{A,G}$. Der Anker wirkt als elektrische Quelle. Da für beide Betriebsarten die Erregung gleichbleibt, werden die Klemmen D1 und D2 getauscht.

- Tragen Sie die Kirchhoffschen Gleichungen für beide Betriebsarten in **Abbildung 5** ein.

a) Reihenschlussmaschine im Motorbetrieb



b) Reihenschlussmaschine im Generatorbetrieb

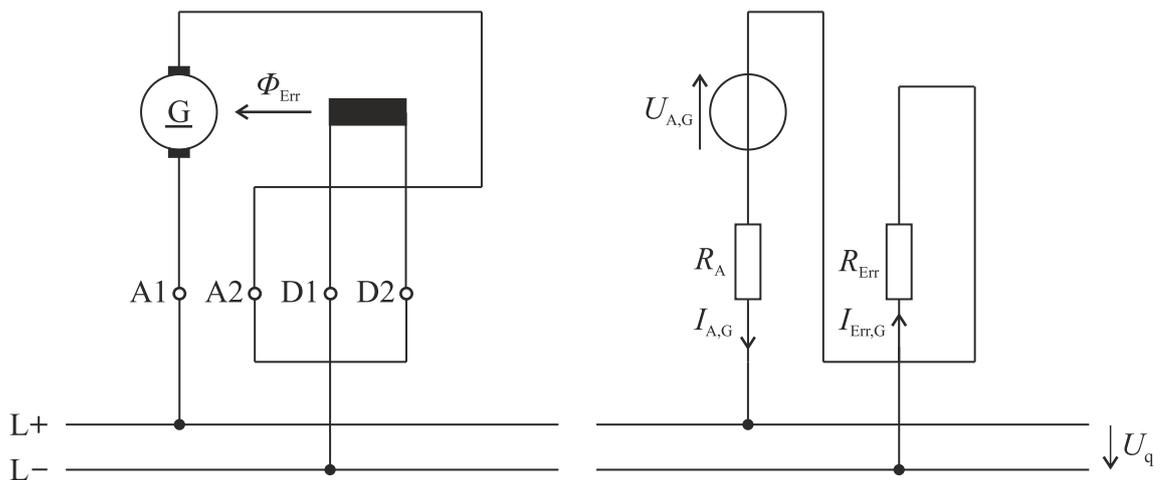


Abbildung 5: Übersicht über die Betriebsarten der Reihenschlussmaschine als technisches Schaltbild (links) mit dazugehörigem vereinfachten elektrischen Ersatzschaltbild (rechts)

- 4.4 Zeichnen Sie das technische Schaltbild und das dazugehörige vereinfachte elektrische Ersatzschaltbild für die Nebenschlussmaschine und die fremderregte Maschine für den motorischen und generatorischen Betrieb analog zur Reihenschlussmaschine (siehe **Abbildung 5**). Ergänzen Sie die Kirchhoffschen Gleichungen für beide Betriebsarten.
- 4.5 Leiten Sie unter Zuhilfenahme Ihrer Lösungen zu den Vorbereitungsaufgaben 4.1, 4.2 und 4.4 den analytischen Ausdruck her, um die Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie des Nebenschlussmotors zu beschreiben. Skizzieren Sie den zu erwartenden Verlauf.
- 4.6 Bereiten Sie die Messtabellen vor (siehe Messaufgaben 6.1 bis 6.6). Bereiten Sie weiterhin die dazugehörigen Diagramme (Millimeterpapier im Hochformat) vor.
- Diagramm 6.1: Abszisse: Spannung von 0 bis 35 V mit 1 cm für 2,5 V
Ordinate: Leerlaufdrehzahl von 0 bis 4500 min^{-1} mit 1 cm für 500 min^{-1}
 - Diagramm 6.2: Abszisse: Strom von 0 bis 2,5 A mit 1 cm für 0,25 A
Ordinate: Leerlaufdrehzahl von 0 bis 4500 min^{-1} mit 1 cm für 500 min^{-1}
 - Diagramm 6.3: Abszisse: Drehmoment von 0 bis 25 Ncm mit 1 cm für 2,5 Ncm
Ordinate 1: Drehzahl von 0 bis 4500 min^{-1} mit 1 cm für 500 min^{-1}
Ordinate 2: Strom von 0 bis 4,5 A mit 1 cm für 0,5 A
 - Diagramm 6.4: Abszisse: Drehzahl von 0 bis 4000 min^{-1} mit 1 cm für 500 min^{-1}
Ordinate: Spannung von 0 bis 35 V mit 1 cm für 5 V
 - Diagramm 6.5: Abszisse: Strom von 0 bis 2,5 A mit 1 cm für 0,25 A
Ordinate: Spannung von 0 bis 35 V mit 1 cm für 5 V
 - Diagramm 6.6: Abszisse: Strom von 0 bis 3,5 A mit 1 cm für 0,25 A
Ordinate: Spannung von 0 bis 35 V mit 1 cm für 5 V

5 Geräte und Baugruppen am Versuchsplatz sowie Bedienhinweise

- 1 Bausatz Motor-Generator
- 1 Drehzahl-Drehmoment-Messgerät
- 1 Gleichspannungsnetzgerät für den Motor (2 Ausgänge 0 .. 36 V, 0 .. 5,0 A)
- 1 Gleichspannungsnetzgerät für den Generator (2 Ausgänge, 0 .. 40 V, 0 .. 2,5 A)
- 2 Digitalmultimeter GDM-392 (bei Praktikumsassistent)
- 1 Schiebewiderstand $R_{\text{variabel}} = 0 \dots 123 \Omega$, $I_{\text{Max,Zulässig}} = 3 \text{ A}$

Allgemeine Hinweise zum Messaufbau

- Die fremderregte Motor-Generator-Einheit (**Abbildung 6**) besteht aus zwei umgebauten Universalmotoren, deren Wellen über ein Drehzahl-Drehmomentmessgerät mit Digitalanzeige miteinander gekoppelt sind.
- Achten Sie darauf, dass die **Minusleitungen direkt an Motor bzw. Generator** (Anker / Erregerkreis) herangeführt werden. In die Plusleitungen sind, sofern erforderlich, Widerstände und Strommessgeräte zu legen.
- **Vor jedem Umbau** sind alle **Quellen** über die Drehregler auf Null **herunter zu regeln**. Nach dem Umbau dürfen selbstständig die Sollwerte an den Quellen eingestellt werden.

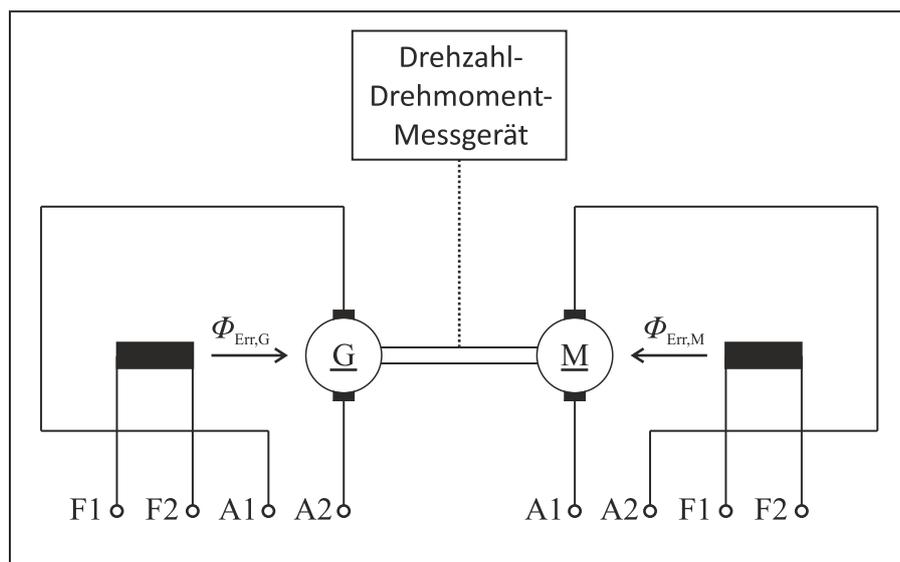


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus im Praktikum

6 Aufgabenstellung zur Versuchsdurchführung und Versuchsauswertung

Messungen am Motor

6.1 Einfluss der Ankerspannung $U_{A,M}$ auf die Leerlaufdrehzahl n_0 bei konstanter Erregung $\Phi_{\text{Err},M}$

- Stellen Sie den Erregerstrom am Motor ein. Variieren Sie die Ankerspannung des Motors $U_{A,M}$ in Schritten von 5 V. Nehmen Sie die Leerlaufdrehzahl n_0 auf (Anschluss- und Messbedingung siehe **Tabelle 2**).

Tabelle 2: Übersicht über die Anschlussbelegung zur Bestimmung $n_0 = f(U_{A,M})$

Baugruppe	Klemmen	Anschlussbedingung	Regelung / Messung des Signals
Motor	F1 – F2	$I_{\text{Err},M} = 1,5 \text{ A}$	Digitalmultimeter
	A1 – A2	$U_{A,M} = 0 \dots 30 \text{ V}$	Digitalmultimeter

6.2 Einfluss des Erregerstromes $I_{\text{Err},M}$ auf die Leerlaufdrehzahl n_0 bei konstanter Ankerspannung $U_{A,M}$

- Stellen Sie die Ankerspannung des Motors $U_{A,M}$ ein. Variieren Sie den Erregerstrom des Motors $I_{\text{Err},M}$ in Schritten von 0,25 A. Nehmen Sie die Leerlaufdrehzahl n_0 auf (Anschluss- und Messbedingung siehe **Tabelle 3**).

Tabelle 3: Übersicht über die Anschlussbelegung zur Bestimmung $n_0 = f(I_{\text{Err},M})$

Baugruppe	Klemmen	Anschlussbedingung	Regelung / Messung des Signals
Motor	F1 – F2	$I_{\text{Err},M} = 0 \dots 2,5 \text{ A}$	Digitalmultimeter
	A1 – A2	$U_{A,M} = 25 \text{ V}$	Digitalmultimeter

6.3 Verhalten des Motors unter variabler Belastung bei konstanter Erregung $I_{\text{Err},M}$ und Ankerspannung $U_{A,M}$

- Stellen Sie am Motor den Erregerstrom $I_{\text{Err},M}$ und die Ankerspannung $U_{A,M}$ ein.
- Die Baugruppe des Generators wird zur Belastung des Motors eingesetzt. Die Klemmen am Anker des Generators sind kurzzuschließen. Die Belastung der Motorbaugruppe ist über die Änderung des Erregerstromes des Generators $I_{\text{Err},G}$ in Schritten von 0,25 A vorzunehmen. Nehmen Sie die Drehzahl n , das Drehmoment M und den Ankerstrom des Motors $I_{A,M}$ auf (Anschluss- und Messbedingung siehe **Tabelle 4**).

Tabelle 4: Übersicht über die Anschlussbelegung zur Bestimmung $n = f(M)$, $I_{A,M} = f(M)$

Baugruppe	Klemmen	Anschlussbedingung	Regelung / Messung des Signals
Motor	F1 – F2	$I_{\text{Err},M} = 1,5 \text{ A}$	Anzeige am Netzteil
	A1 – A2	$U_{A,M} = 25 \text{ V}$	$U_{A,M}$: Anzeige am Netzteil $I_{A,M}$: Digitalmultimeter
Generator	A1 – A2	Kurzschluss	Keine Messung
	F1 – F2	$I_{\text{Err},G} = 0 \dots 2,5 \text{ A}$	Digitalmultimeter

Messungen am Generator

6.4 Verhalten der Ankerspannung des Generators $U_{A,G}$ als Funktion der Drehzahl n bei konstanter Erregung $I_{Err,G}$

- Stellen Sie den Erregerstrom des Motors $I_{Err,M}$ und des Generators $I_{Err,G}$ ein. Die Drehzahl n wird über eine Änderung der Ankerspannung des Motors $U_{A,M}$ in Schritten von 5 V eingestellt. Nehmen Sie die Ankerspannung des Generators $U_{A,G}$ und die Drehzahl n auf (Anschluss- und Messbedingung siehe **Tabelle 5**).

Tabelle 5: Übersicht über die Anschlussbelegung zur Bestimmung von $U_{A,G} = f(n)$

Baugruppe	Klemmen	Anschlussbedingung	Regelung / Messung des Signals
Motor	F1 – F2	$I_{Err,M} = 1,0 \text{ A}$	Anzeige am Netzteil
	A1 – A2	$U_{A,M} = 0 \dots 25 \text{ V}$	Anzeige am Netzteil
Generator	A1 – A2	Leerlauf	Digitalmultimeter
	F1 – F2	$I_{Err,G} = 1,5 \text{ A}$	Digitalmultimeter

6.5 Verhalten der Ankerspannung des Generators $U_{A,G}$ als Funktion des Erregerstromes des Generators $I_{Err,G}$ bei konstanter Drehzahl n

- Stellen Sie den Erregerstrom des Motors $I_{Err,M}$ ein. Die Ankerspannung des Motors $U_{A,M}$ ist so zu regeln, dass die Drehzahl n während des Versuches konstant bleibt. Steigern Sie den Erregerstrom des Generators $I_{Err,G}$ in 0,25 A Schritten und nehmen Sie die Ankerspannung des Generators $U_{A,G}$ auf (Anschluss- und Messbedingung siehe **Tabelle 6**).

Tabelle 6: Übersicht über die Anschlussbelegung zur Bestimmung von $U_{A,G} = f(I_{Err,G})$

Baugruppe	Klemmen	Anschlussbedingung	Regelung / Messung des Signals
Motor	F1 – F2	$I_{Err,M} = 1,0 \text{ A}$	Anzeige am Netzteil
	A1 – A2	$U_{A,M} = 0 \dots 30 \text{ V}$	Drehzahlgeber: $n = 3000 \text{ min}^{-1}$
Generator	A1 – A2	Leerlauf	Digitalmultimeter
	F1 – F2	$I_{Err,G} = 0 \dots 2,5 \text{ A}$	Digitalmultimeter

6.6 Quellencharakteristik des Generators bei veränderlicher elektrischer Belastung

$U_{A,G} = f(I_{A,G})$ und konstanter Drehzahl n

- Stellen Sie den Erregerstrom des Motors $I_{Err,M}$ und des Generators $I_{Err,G}$ ein. Über die Stellung der Ankerspannung des Motors $U_{A,M}$ ist die Drehzahl n während des Versuches konstant zu halten. Mit Hilfe des Schiebewiderstandes $R_{variabel}$ (variable Last) ist der Ankerstrom des Generators $I_{A,G}$ in 0,25 A Schritten zu steigern bis die Drehzahl n nicht mehr konstant zu halten ist. Messen Sie die Spannung $U_{A,G}$ am Ausgang des Generators (Anschluss- und Messbedingung siehe **Tabelle 7**).
- Messen Sie anschließend die Leerlaufspannung am Anker des Generators ($I_{A,G} = 0 \text{ A}$) durch Unterbrechung des Lastkreises.

Tabelle 7: Übersicht über die Anschlussbelegung zur Bestimmung von $U_{A,G} = f(I_{A,G})$

Baugruppe	Klemmen	Anschlussbedingung	Regelung / Messung des Signals durch
Motor	F1 – F2	$I_{Err,M} = 1,5 \text{ A}$	Anzeige am Netzteil
	A1 – A2	$U_{A,M} = 0 \dots 30 \text{ V}$	Drehzahlgeber: $n = 2000 \text{ min}^{-1}$
Generator	A1 – A2	$R_{variabel} = 0 \dots 123 \text{ } \Omega$	Strom: Digitalmultimeter Spannung: Digitalmultimeter
	F1 – F2	$I_{Err,G} = 1,5 \text{ A}$	Anzeige am Netzteil

Auswertung der Messungen

6.7 Auswertung der Messungen am Motor und Generator

- Stellen Sie die gemessenen Größen in den vorbereiteten Diagrammen (Aufgabe 4.6) dar.
- Geben Sie zu jedem dargestellten Verlauf den analytischen Zusammenhang als Formel mit Hilfe der Gleichungen aus den Vorbereitungsaufgaben 4.1, 4.2 und 4.4 an.
- Vergleichen Sie den analytischen Zusammenhang mit den Messverläufen und erklären Sie vorhandene Abweichungen.
- Bestimmen Sie mit Ihren Messwerten und der grafischen Auswertung zur Aufgabe 6.6 die Quellencharakteristik (U_q, I_K, R_i) des Generators.