

---

## Praktikum Modellbildung und Simulation dynamischer Systeme

### 3 VERSUCH ELEKTROMOTORISCHES HEBEN EINER LAST

---

#### 3.1 HINTERGRUND ZUM VERSUCH

Elektromotoren stellen gekoppelte Systeme dar, die sowohl einen elektrischen Teil als auch einen mechanischen Teil besitzen. Bei der Durchführung des vorliegenden Versuchs und der zugehörigen Modellierungsübung müssen dabei die im Rahmen der Vorlesung besprochenen Systeme (elektrisch / mechanisch) in einem Modell kombiniert werden.

Neben der Modellierung elektrischer und mechanischer Komponenten in einem Modell, müssen hier auch rotatorisch und translatorisch bewegte, mechanische Komponenten berücksichtigt werden.

Die älteste und einfachste Bauform eines Elektromotors ist die Gleichstrommaschine (DC-Motor). Aufgrund der relativ niedrigen Kosten für Motoren mit geringen Leistungsanforderungen ist dieser Maschinentyp weiterhin weit verbreitet. Die Modellierung des Gleichstrommotors auf Basis des Ersatzschaltbildes ist darüber hinaus relativ einfach umsetzbar.

Neben der Modellierung des vorliegenden Systems soll im Rahmen dieses Versuchs auch eine experimentelle Bestimmung von Systemparametern aufgezeigt und durchgeführt werden.

### 3.2 BESCHREIBUNG DES AUFBAUS

Der vorliegende Versuch ist ein elektromechanischer Aufbau zum Heben einer definierten Last (Masse). Das bedeutet, dass sich der Aufbau in Mechanik (Tragrahmen, DC-Motor, Seilscheibe) und Elektrik (Netzteil, Sensorik, Datenerfassung) aufgliedert.

Nachfolgend dargestelltes Schema zeigt den mechanischen, sowie elektrischen Aufbau der Anlage.

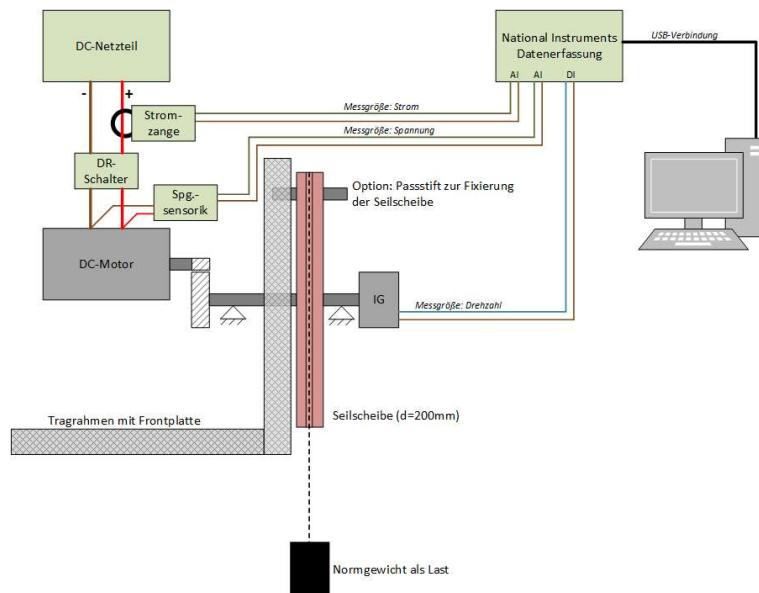


Abbildung 3.1: Schema des elektromechanischen Aufbaus

Zusätzlich sei der Realaubau mit Abbildung 3.2 verdeutlicht:

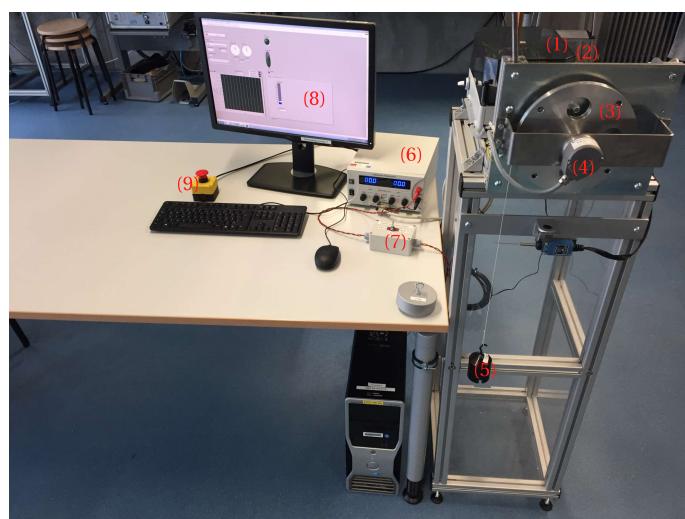


Abbildung 3.2: Darstellung des realen Gesamtaufbaus; (1) Elektronikbox mit NI Datenerfassungsgerät; (2) Stromzange (im Hintergrund); (3) Seilscheibe mit DC-Motor auf der Rückseite; (4) Inkrementalgeber; (5) Masse am Faden; (6) Labornetzteil; (7) Drehrichtungsschalter; (8) PC mit LabView-GUI-Oberfläche; (9) Not-Aus Taster

## 1. Beschreibung Komponenten

- Tragrahmen mit Frontplatte  
Profil aus Item-Konstruktionsprofilen mit angeflanschter Frontplatte zur Aufnahme des Gleichstrommotors
- Seilscheibe (Abb. 3.2 (3))
  - Alu-Drehteil mit effektivem **Radius:**  $r_S = 100\text{mm}$
  - **Massenträgheit um Rotationsachse:**  $J_S = 0,003\text{kgm}^2$
- DC-Motor (Abb. 3.2 (3))
 

Beim Gleichstrommotor handelt es sich um eine permanenterregte Ausführung mit Schleifringläufer und folgenden technischen Daten:

  - Nennspannung: 24 V
  - Nennmoment: 6 Nm
  - Nennstrom: 2 A
  - Anlaufmoment: 25 Nm
  - Anlaufstrom: 8 A
  - **Übersetzung:**  $i_G = 62 : 1$
  - **Ankerinduktivität:**  $L_A = 4.873\text{mH}$
  - **Massenträgheitsmoment:**  $J_M = 5,5 \cdot 10^{-5}\text{kgm}^2$

## 2. Beschreibung elektrische Ansteuerung und Sensorik:

- DC-Labornetzteil (Abb. 3.2 (6))
 

Labornetzteil mit Remote-Control zur Versorgung des Motors mit Gleichspannung
- Sensorik
 

Um das System zu analysieren und später die Simulation zu verifizieren, werden die Systemparameter teilweise experimentell bestimmt. Dazu muss der Aufbau elektrisch betrieben, und die entsprechenden Parameter messtechnisch mit einem Datenerfassungsgerät von National Instruments (NI USB 6210 DAQ) erfasst werden. Die drei wesentlichen Messgrößen sind hierbei:

  - Spannung
  - Strom
  - Drehzahl

- Messung der Motorspannung  
Abgriff der Spannung an den Polklemmen des Motors und Einlesen über eine galvanisch getrennte Spannungsmesssensorik in das DAQ-Gerät

- Messung des Motorstroms  
Der Strom welcher durch die Motorwicklung fließt wird mit Hilfe einer Stromzange erfasst. Durch den Stromfluss in der Motorzuleitung wird im Eisenkern der Stromzange ein magnetisches Feld erzeugt, welches wiederum mit einem Hallsensor erfasst wird. Über eine Auswerteelektronik in der Zange wird ein stromproportionaler Spannungswert (100mV/A) an die BNC-Buchse gelegt. Dieser Analogwert wird mit dem DAQ-Gerät eingelesen und umgerechnet.

- Messung der Drehzahl

Die Motordrehzahl wird indirekt über einen Inkrementalgeber (3600 Imp./Umdr.) gemessen. Bei der Messgröße handelt es sich um ein TTL-Signal welches im Daten erfassungsgerät durch die Umrechnung der Pulsfrequenz in eine Drehzahl über führt wird.

### 3. Vorgehen zur Durchführung von Messungen

- a) PC einschalten und mit lokalem Benutzer anmelden
- b) Messtechnik einschalten (Drehschalter an Elektronikbox)
- c) LabView Instrument öffnen:
  - Verknüpfung „EM\_DAQ\_DE“ (liegt auf dem Desktop) doppelklicken
  - Virtuelles Instrument (vi) öffnet sich
- d) Hardware-Messkonfiguration gemäß Vorgaben in Kapitel 3.3 vorbereiten

**Hinweis:**

Bei Beginn dieses Versuches ist keine Last (Masse) appliziert und der Faden ist auf der Seilscheibe fixiert (Abb. 3.4)

- e) Stromzange durch folgende Prozedur einschalten (um Auto-off Funktion zu umgehen):
 

**Nullabgleichsknopf gedrückt halten und Stromzange einschalten OFF -> ON**
- f) Drehrichtungsschalter: Überprüfen ob in „Off-Stellung“
- g) Labor-Netzgerät einschalten
- h) vi starten durch Klicken auf „Ausführen“ (vgl. Abb. 3.3 (1))
  - es kann testweise durch Schalten des Drehrichtungsschalters die Messfunktion geprüft werden
  - Prüfen Sie dabei, ob bei Auswahl der Drehrichtung *AUF*, sowohl die erfasste Spannung als auch der gemessene Strom positives Vorzeichen zeigen
  - Im Diagramm werden drei Kurven dargestellt (Spannung, Strom, Drehzahl)
  - Das Netzteil kann durch betätigen von „NT Freigabe“ aktiviert werden (vgl. Abb. 3.3 (9))
  - Ist die GUI-LED „Seil Anschlag“ (vgl. Abb. 3.3 (8)) rot hinterlegt ist der Seilsicherheitsschalter betätigt  
→ Störung beheben und vi neu starten
- i) Durch Betätigen von „Messung / Speicher starten“ (vgl. Abb. 3.3 (3)) beginnt eine Messung mit vorgegebener (ausreichend langer) Messdauer
- j) Sobald der gewünschte Messablauf beendet ist, mit Button „STOPP“ (vgl. Abb. 3.3 (2)) die Messdatenerfassung abschließen  
→ eine .tdms-Messdatei (Dateiname: *EM.tdms*) wurde erstellt und auf dem Desktop abgelegt.

- k) Das erscheinende Dialogfeld mit „Beenden“ schließen
- l) Messdatei in Zielordner C:\Praktikumsversuch\_EM\Daten verschieben

**Hinweise:**

- Diese Messdatei (Dateiname: *EM.tdms*; NICHT die Indexdatei!) muss **nach jeder Messung** vom Desktop in den Ordner C:\Praktikumsversuch\_EM\Daten kopiert werden, da bei einer weiteren Messung die Datei *EM.tdms* auf dem Desktop überschrieben wird
- Dateinamen *EM.tdms* im Ordner C:\Praktikumsversuch\_EM\Daten sofort nach Abschluss des Kopievorgangs ändern (Dateiname gemäß jeweiliger Tabelle)  
z.B.: *V3\_Param\_Anker\_3V.tdms* für die erste Messung aus Tabelle 3.1

- m) Nun kann eine neue Messung durchgeführt werden
- n) Nach Abschluss aller Messreihen:
  - Drehrichtungsschalter in „Off-Stellung“ bringen
  - Labornetzgerät ausschalten
  - **Messdateien auf Home-Laufwerk oder eigenem Speichermedium sichern**
  - Programme schließen und PC ausschalten

4. Hinweise zur Durchführung von Messungen

- Vor Messung prüfen ob Stromzange eingeschaltet ist
- Vor Messungs- bzw. Speicherungsbeginn überprüfen, ob alle Graphen im Diagramm „Null“ sind
- **Im Fehlerfall (mech. / elektr. Störung) sofort Not-Aus Taster betätigen!!**

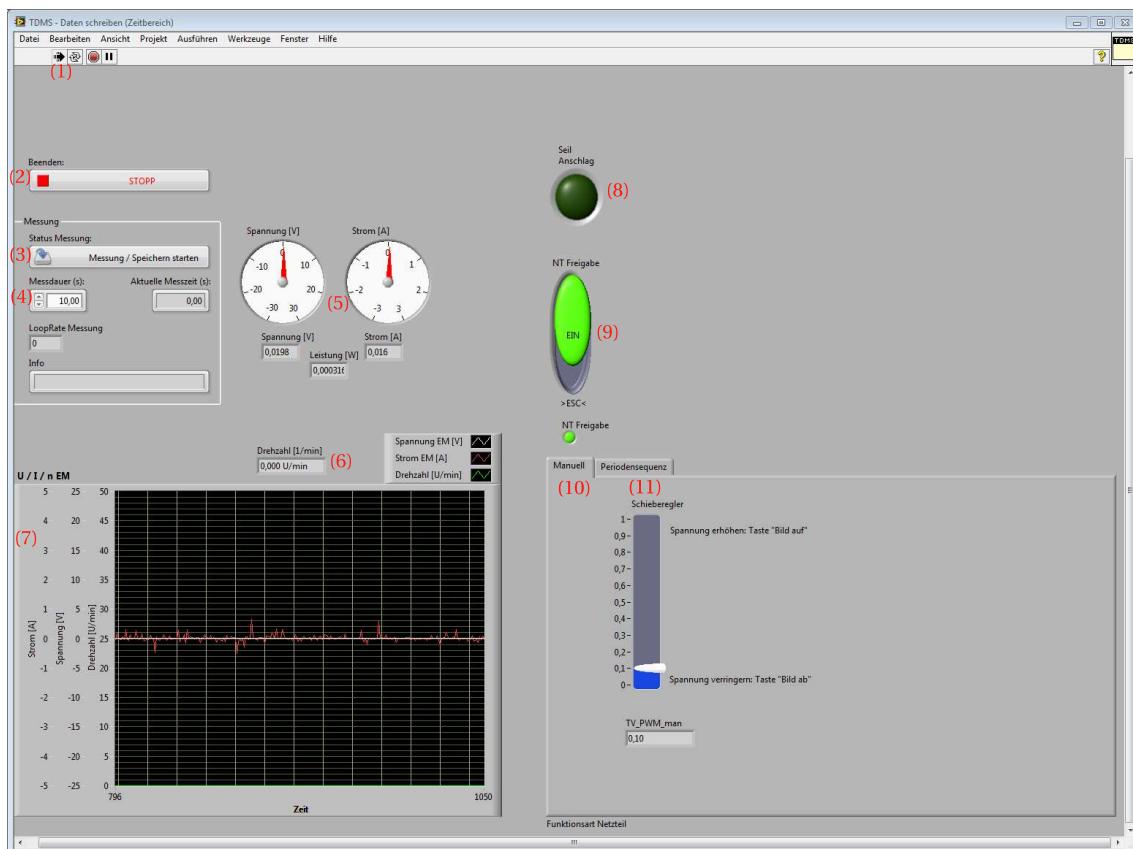


Abbildung 3.3: Ansicht des LabView GUI; (1) Button: „vi-Ausführen“; (2) Button: „Messung stoppen“; (3) Button: „Messung starten“; (4) Dialog zum Einstellen der Messdauer; (5) Anzeigen: Spannung und Strom; (6) Anzeige: Motordrehzahl; (7) Signalverlaufsdigramm: Spannung, Strom, Drehzahl; (8) GUI-LED „Seil Anschlag“; (9) Switch zur Aktivierung des Netzteils; (10) Funktionsart Netzteil „manuell“; (11) Funktionsart Netzteil „Periodensequenz“

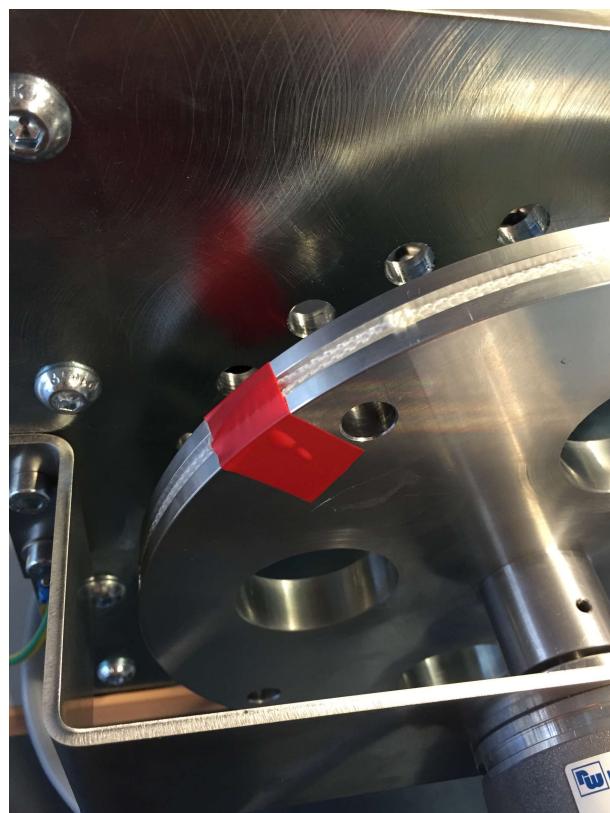


Abbildung 3.4: Fixierter Faden bei Messbeginn

### 3.3 DURCHFÜHRUNG DES VERSUCHES

#### 3.3.1 MESSUNGEN ZUR BESTIMMUNG DER SYSTEMPARAMETER

1. Vorgehen bei der Bestimmung von Ankerwiderstand  $R_A$  und Ankerinduktivität  $L_A$ 
  - a) Blocken Sie den E-Motor durch Einsetzen des Passstiftes (siehe Abb. 3.5)
  - b) Spannung mittels Schieberegler (NT-Funktionsart „manuell“) über Maus oder Tasten *Bild AUF* -> erhöhen bzw. *Bild AB* -> verringern auf die in Tab. 3.1 festgelegten Werte einstellen  
(beginnend mit 3 V)  
Hinweis: Spannung am Netzgerät ablesen
  - c) Messung durch „Messung / Speichern starten“ aktivieren
  - d) Sprung der Eingangsspannung aufprägen; für jeweils ca. 2s (durch Betätigen des Schalters in Richtung *AUF*)
  - e) In jeder Messung 3 mal auf die eingestellte Spannung Springen (Durch Ein- und Ausschalten mittels Kippschalter)
  - f) Wiederholen der Schritte a) - d) bis alle Messungen gemäß Tab. 3.1 durchgeführt sind

Messung / Dateiname	Betriebsspannung $U_B$
	[V]
V3_Param_Anker_3V.tdms	3
V3_Param_Anker_6V.tdms	6
V3_Param_Anker_9V.tdms	9

Tabelle 3.1: Messungen zur Bestimmung der Ankerkreisparameter

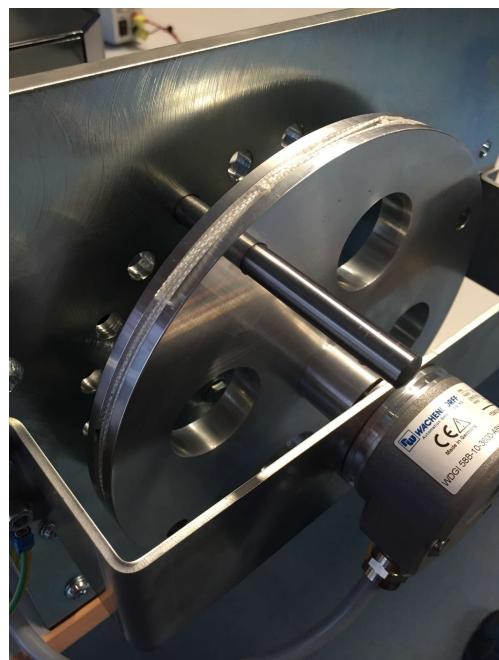


Abbildung 3.5: Die Seilscheibe lässt sich mit Hilfe eines Passstiftes gegenüber Frontplatte blockieren

2. Vorgehen zur Bestimmung von Maschinenkonstante  $k$  und Reibmoment  $M_R$
- a) E-Motor nicht blockieren (Passstift entfernen).
  - b) Klebeband zur Fixierung des Drahtseils entfernen und das Gewicht mit der Masse  $m = 2\text{kg}$  am Ende des Stahlseils fixieren
  - c) Gewicht durch Betätigen des Kippschalters in Stellung  $AB$  bis kurz vor den Boden absenken. Mit Spannung im Bereich von  $U_B = 6V$
  - d) Spannung am Netzteil auf die in Tab. 3.2 festgelegten Werte einstellen
  - e) Messung durch „Messung / Speichern starten“ aktivieren
  - f) E-Maschine durch Betätigen des Kippschalters in Stellung  $AUF$  drehen lassen
  - g) Messdaten mindestens solange aufzeichnen (ca. 3s), bis sich ein stationärer Zustand (konstante EM-Drehzahl) einstellt.
  - h) Dann E-Maschine durch Betätigen des Kippschalters in Stellung  $STOP$  anhalten und kurz warten (ca. 1s)
  - i) Nun E-Maschine durch Betätigen des Kippschalters in Stellung  $AB$  in die Gegenrichtung drehen lassen
  - j) Messdaten mindestens solange aufzeichnen, bis sich ein stationärer Zustand (konstante EM-Drehzahl) einstellt (ca. 3s).
  - k) Schritte d) - j) solange wiederholen, bis alle Messungen gemäß Tabelle 3.2 aufgenommen sind

**wichtiger Hinweis:**

**!!!! Achten Sie sehr sorgsam darauf, dass bei der Aufwärtsfahrt die E-Maschine rechtzeitig gestoppt wird !!!!**

Messung / Dateiname	Betriebsspannung $U_B$	Gewicht
	[V]	[kg]
<i>V3_MK_2kg_4V.tdms</i>	4	2
<i>V3_MK_2kg_8V.tdms</i>	8	2
<i>V3_MK_2kg_12V.tdms</i>	12	2
<i>V3_MK_2kg_16V.tdms</i>	16	2

Tabelle 3.2: Messungen zur Bestimmung von Maschinenkonstante und Reibmoment

### 3.3.2 MESSUNGEN ZUR MODELVALIDIERUNG

Vorgehen bei Messungen die zur Modellvalidierung herangezogen werden sollen

1. Prüfen, ob Kippschalter in Stellung *STOP*
2. E-Motor nicht blockieren (Passstift entfernen). Gewicht mit  $m = 2\text{kg}$  anhängen, falls noch nicht vorhanden.
3. Messung durch „Messung / Speichern starten“ aktivieren
4. Betreiben Sie nun die E-Maschine durch Variation der Spannung am Schieberegler und Umschalten der Drehrichtung am Kippschalter beliebig
5. Messung beenden. Danach Messdatei verschieben und umbenennen (vergeben Sie dazu den in Tabelle 3.3 vorgeschlagenen Dateinamen)

**wichtiger Hinweis:**

**!!!! Achten Sie sehr sorgsam darauf, dass bei der Aufwärtsfahrt die E-Maschine rechtzeitig gestoppt wird !!!!**

Messung / Dateiname	Betriebsspannung $U_B$	Gewicht
	[V]	[kg]
V3_Validation_2kg.tdms	durch Schieberegler beliebig einstellen	2

Tabelle 3.3: Messung zur Validierung des Modells

### 3.4 NACHBEREITUNG UND PARAMETERBESTIMMUNG

#### 3.4.1 THEORETISCHE GRUNDLAGEN ZUR PARAMETERBESTIMMUNG AM GLEICHSTROMMOTOR

Den grundsätzlichen Aufbau eines permanenterregten Gleichstrommotors zeigt Abbildung 3.6 schematisch.

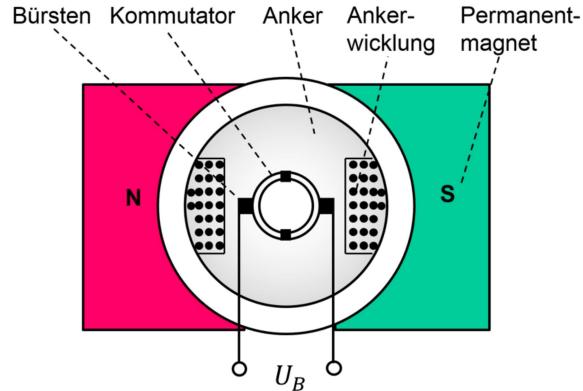


Abbildung 3.6: schematischer Aufbau eines permanenterregten DC-Motors

Daraus lässt sich folgendes Ersatzschaltbild ableiten:

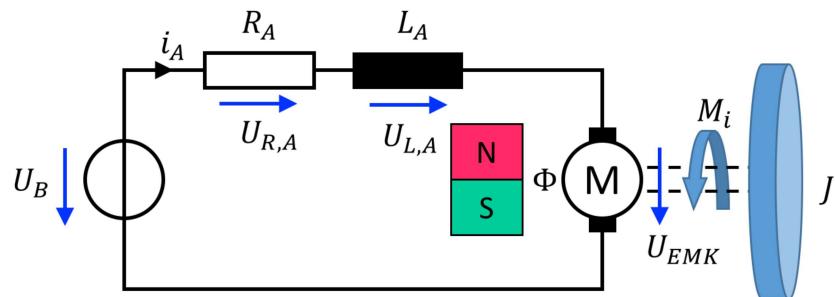


Abbildung 3.7: Ersatzschaltbild des permanenterregten DC-Motors

Dabei gilt für die in der Ankerwicklung induzierte Spannung  $U_{EMK}$ , die der angelegten Betriebsspannung  $U_B$  entgegenwirkt:

$$U_{EMK} = k \cdot \Phi \cdot \omega_M \quad (3.1)$$

Die Gegeninduktion ist also direkt proportional zur Motordrehzahl  $n_M$ . Es gilt nämlich für die Winkelgeschwindigkeit  $\omega_M$ :

$$\omega_M = \frac{2\pi \cdot n_M}{60 \frac{s}{min}} \quad (3.2)$$

Da der magnetische Fluss  $\Phi$  bei der permanenterregten Maschine als näherungsweise konstant angenommen werden kann, kann folgender vereinfachter Zusammenhang Anwendung finden:

$$U_{EMK} = k_M \cdot \omega_M \quad (3.3)$$

$k_M$  wird dabei als Maschinenkonstante bezeichnet.

Für das von der Gleichstrommaschine erzeugte Drehmoment — das sog. innere Moment  $M_i$  — gilt:

$$M_i = k \cdot \Phi \cdot i_A \quad (3.4)$$

Wiederum kann vereinfacht werden:

$$M_i = k_M \cdot i_A \quad (3.5)$$

Das Drehmoment ist also direkt proportional zum fließenden Strom in der Ankerwicklung. Die Maschinenkonstante  $k_M$  ist dabei in Gleichung 3.3 und 3.5 identisch.

### 1. Bestimmung der Ankerparameter $R_A$ und $L_A$

Die Maschengleichung zum Ersatzschaltbild aus Abbildung 3.7 lautet:

$$\sum U_i = 0 \quad (3.6)$$

$$U_B - U_{EMK} - U_{L,A} - U_{R,A} = 0 \quad (3.7)$$

Durch das Blocken der E-Maschine wird die Drehzahl des DC-Motors beim Anlegen einer Betriebsspannung  $U_B$  auf  $n_{mot} = 0$  gehalten.

Daraus folgt gemäß Gleichung 3.3

$$U_{EMK} = k_M \cdot n_{mot} = 0 \quad (3.8)$$

Das Ersatzschaltbild vereinfacht sich zu:

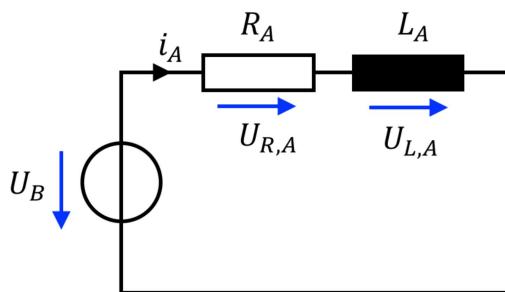


Abbildung 3.8: Ersatzschaltbild des geblockten DC-Motors

Die Übertragungsfunktion für den Zusammenhang zwischen Ankerstrom und Betriebsspannung kann dann hergeleitet werden.

$$G(s) = \frac{I_A(s)}{U_B(s)} = \frac{1}{L_A \cdot s + R_A} = \frac{\frac{1}{R_A}}{\frac{L_A}{R_A} s + 1} \quad (3.9)$$

Dabei handelt es sich um die Übertragungsfunktion eines  $PT_1$ -Gliedes.

Über einen Koeffizientenvergleich mit der Standard-Form eines  $PT_1$ -Gliedes:

$$G(s) = \frac{1}{L_A \cdot s + R_A} = \frac{\frac{1}{R_A}}{\frac{L_A}{R_A} + 1} = \frac{K_P}{T \cdot s + 1} \quad (3.10)$$

erhält man:

$$K_P = \frac{1}{R_A} \quad (3.11)$$

$$T = \frac{L_A}{R_A} \quad (3.12)$$

Aus dem stationären Endwert des Ankerstroms kann somit bei bekannter Betriebsspannung  $U_B$  der Ankerwiderstand  $R_A$  ermittelt werden.

Durch Auswertung der Zeitkonstante  $T$  einer Sprungantwortmessung müsste der Wert der Induktivität  $L_A$  ermittelbar sein, wenn  $R_A$  bekannt ist.

#### Hinweis:

Der reale Wicklungsaufbau der verwendeten E-Maschine weicht vom idealisierten Aufbau gemäß Abb. 3.7 ab.

Die Bestimmung des Ankerwiderstands ist messtechnisch wie beschrieben möglich.

Die Bestimmung der Ankerinduktivität leider nicht. Deswegen ist in 3.2 der tatsächliche Wert gegeben.

## 2. Bestimmung der Maschinenkonstante

Die Übertragungsfunktion gemäß Gleichung 3.9 liefert einen Zusammenhang zwischen angelegter Betriebsspannung  $U_B$  an den Klemmen des Motors und dem fließenden Ankerstrom  $i_A$ .

Gemäß Gleichung 3.5 könnte damit das innere Drehmoment des Motors  $M_i$  bestimmt werden, wenn die Maschinenkonstante  $k_M$  bekannt wäre.

Aus den Messungen gemäß Tabelle 3.2 kann die Maschinenkonstante  $k_M$  des Motors ermittelt werden.

Die Messungen zeigen, dass sich bei konstanter Betriebsspannung  $U_B$  nach einer gewissen Zeit ein stationärer Betriebszustand einstellt. Sowohl die gemessene Motordrehzahl  $n_M$  als auch der gemessene Ankerstrom  $i_A$  bleiben näherungsweise konstant.

Aus der Maschengleichung für das Ersatzschaltbild (siehe Gl. 3.7) lässt sich im ersten Schritt durch Einsetzen der Gl. 3.3 herleiten

$$U_B - k_M \cdot \omega_M - U_{L,A} - U_{R,A} = 0 \quad (3.13)$$

Für den Spannungsabfall am Widerstand  $R_A$  gilt:

$$U_{R,A} = R_A \cdot i_A \quad (3.14)$$

Für den Spannungsabfall an der Spule gilt bei näherungsweise konstantem Ankerstrom  $i_A$

$$U_{L,A} = L_A \cdot \frac{di_A}{dt} = 0 \quad (3.15)$$

Gleichungen 3.14 und 3.15 in Gl. 3.13 eingesetzt liefern:

$$U_B - k_M \cdot \frac{2\pi \cdot n_M}{60 \frac{s}{min}} - 0 - R_A \cdot i_A = 0 \quad (3.16)$$

Mit der Berechnung für die Motordrehzahl  $n_M = n_S \cdot i_G$  ergibt sich für  $k_M$ :

$$k_M = \frac{U_B - R_A \cdot i_A}{\frac{2\pi \cdot n_S \cdot i_G}{60 \frac{s}{min}}} = \frac{U_B - R_A \cdot i_A}{2\pi \cdot n_S \cdot i_G} \cdot 60 \frac{s}{min} \quad (3.17)$$

### 3. Bestimmung der Systemreibung

Mit dem im vorausgegangen Abschnitt beschriebenen Vorgehen, kann ein mittlerer Wert für die Maschinenkonstante  $k_M$  ermittelt werden.

Um die im System auftretende Reibung bestimmen zu können, muss zunächst das mechanische System des Aufbaus durch einen physikalischen Ansatz beschrieben werden. Abbildung 3.9 zeigt die generellen Zusammenhänge am mechanischen System des Aufbaus

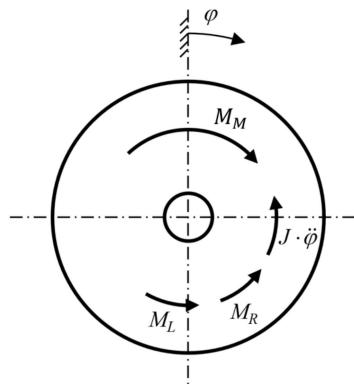


Abbildung 3.9: Momentengleichgewicht an der Seilscheibe

Die Differentialgleichung des mechanisch rotierenden Systems kann durch das Momentengleichgewicht an der Seilscheibe hergeleitet werden.

Es ergibt sich folgender Ansatz:

$$\sum M = 0 = M_M - M_R - M_L - J \cdot \ddot{\varphi} \quad (3.18)$$

Das antreibende Moment  $M_M$  an der Seilscheibe lässt sich dabei aus dem inneren Moment des DC-Motors berechnen. Dabei muss die Wirkung des im realen Aufbau vorhandenen Getriebes berücksichtigt werden. Es gilt:

$$M_M = M_i \cdot i_G = k_M \cdot i_A \cdot i_G \quad (3.19)$$

$i_G$  ist dabei die Übersetzung des Schneckengetriebes

Das Moment  $M_M$  muss im Betrieb also das Reibmoment  $M_R$  und das am Motor wirkende Lastmoment  $M_L$  sowie zum Beschleunigen des Motors die auftretende Systemträgheit überwinden.

Betreibt man den Motor bei konstanter Drehzahl (also:  $\ddot{\varphi} = 0$ ) lässt sich Gleichung 3.18 mit Gleichung 3.19 nach dem Reibmoment  $M_R$  auflösen:

$$M_R = M_M - M_L = k_M \cdot i_A \cdot i_G - M_L \quad (3.20)$$

Das Lastmoment das aus der angehängten Last resultiert, kann dabei wie folgt berechnet werden:

$$M_L = m_G \cdot g \cdot r_S \quad (3.21)$$

Dabei bezeichnet  $m_G$  die Masse der angehängten Last,  $r_S$  den Radius der Seilscheibe.

Man erhält als für die Reibung:

$$M_R = M_M - M_L = k_M \cdot i_A \cdot i_G - m_G \cdot g \cdot r_S \quad (3.22)$$

Alle Größen auf der rechten Seite der Gleichung 3.22 sind bekannt (werden teilweise gemessen bzw. sind bekannte Parameter). Also kann das wirksame Reibmoment (bezogen auf die Seilscheibe) ermittelt werden.

Die Reibung hängt dabei zum Einen von der aktuellen Drehzahl ab, da durch die drehzahlabhängige Gegeninduktion  $U_{EMK}$  der Strom  $i_A$  beeinflusst wird. Als auch von der angehängten Masse  $m_G$ .

Im vorliegenden Versuchsaufbau wird die Masse nicht verändert.

Entsprechend soll das Reibmoment hier nur in Abhängigkeit der Drehzahl ( $\sim$  Betriebsspannung) erfasst werden. Gemäß Tabelle 3.2 wird also die Betriebsspannung variiert, um aus diesen Messungen drehzahlabhängig die Reibung zu bestimmen.

### 3.4.2 PRAKTISCHE DURCHFÜHRUNG DER AUSWERTUNGEN ZUR BESTIMMUNG DER SYSTEM-PARAMETER

#### 1. Auswertung der Ankerparameter

Vorgehen für die Auswertung der Messungen zur Ermittlung der Ankerparameter des Gleichstrommotors:

- a) Starten Sie *MATLAB* (Icon liegt auf dem Desktop)
- b) Navigieren Sie (in Matlab) zum Pfad C:\Praktikumsversuch\_EM\Matlab
- c) Führen Sie das Matlab-Skript *A\_V3\_Auswertung\_Ankerparameter.m* aus.
- d) Im erscheinenden Dialog-Feld wählen Sie die Messdateien *V3\_Param\_Anker\_3V.tdms*, *V3\_Param\_Anker\_6V.tdms* und *V3\_Param\_Anker\_9V.tdms* gleichzeitig aus (Mehrfachauswahl) und klicken auf *Öffnen*.
- e) Die Messwerte der ersten ausgewählten Messdatei (*V3\_Param\_Anker\_3V.tdms*) werden in einem Plot-Fenster dargestellt
- f) Zoomen sie in die erste Phase mit konstanten Werten für Betriebsspannung  $U_B$  und Ankerstrom  $i_A$
- g) Durch klicken des Push-Buttons *Mittelwerte berechnen* werden die gemittelten Werte des ausgewählten Zeitbereichs bestimmt.
- h) Zeigt der gezoomte Ausschnitt konstante Verläufe, kann der berechnete Wert für den Ankerwiderstand in die entsprechende Zeile/Spalte der Tabelle 3.4 eingetragen werden.
- i) Drücken Sie eine der *Reset*-Buttons, um die ursprüngliche Darstellung der Messdaten wiederherzustellen
- j) Wiederholen Sie die Schritte f - i für die zweite und dritte Phase mit konstanten Werten für Betriebsspannung  $U_B$  und Ankerstrom  $i_A$
- k) Nach Ermittlung der drei Werte für den Ankerwiderstand aus der erstes Messreihe, schließen Sie das Plot-Fenster.
- l) Die Messwerte der nächsten ausgewählten Messdatei (*V3\_Param\_Anker\_6V.tdms*) werden in einem Plot-Fenster dargestellt
- m) Wiederholen Sie die Schritte f - k für diese Messdatei und schließen danach das Plot-Fenster
- n) Die Messwerte der letzten ausgewählten Messdatei (*V3\_Param\_Anker\_9V.tdms*) werden in einem Plot-Fenster dargestellt
- o) Wiederholen Sie die Schritte f - k für diese Messdatei und schließen danach das Plot-Fenster
- p) Berechnen Sie nach Abschluss der Auswertungen die Mittelwerte der Ankerwiderstände der einzelnen Messreihen und den über alle Werte gemittelten Ankerwiderstand und tragen Sie die Werte an den entsprechenden Stellen in Tabell 3.4 ein.

Messung	$R_{A,1}$	$R_{A,2}$	$R_{A,3}$	$R_{A,MW}$
[-]	[ $\Omega$ ]	[ $\Omega$ ]	[ $\Omega$ ]	[ $\Omega$ ]
V3_Param_Anker_3V.tdms				
V3_Param_Anker_6V.tdms				
V3_Param_Anker_9V.tdms				
<b>Mittelwert</b>	-	-	-	

Tabelle 3.4: Ergebnisse Auswertung Ankerwiderstand

## 2. Auswertung von Maschinenkonstante und Reibung

Vorgehen für die Auswertung der Messungen zur Ermittlung der Maschinenkonstante des Gleichstrommotors und der Systemreibung:

- a) Führen Sie das Matlab-Skript *B\_V3\_Auswertung\_Maschinenkonstante\_Reibung.m* aus.
- b) Sie werden durch einen Auswahldialog aufgefordert, alle Messungen zur Bestimmung der Maschinenkonstante zu markieren.
- c) Durch klicken auf *Öffnen* wird die Abarbeitung der Dateien gestartet
- d) Die Verläufe der ersten Messung werden in einem Plot-Fenster angezeigt
- e) Wählen Sie zunächst durch zoomen einen Zeitbereich in der ersten Phase (Richtung: AUF) in der die Messwerte konstant sind
- f) Berechnen Sie die Mittelwerte des ausgewählten Zeitbereichs durch klicken auf *Mittelwerte berechnen*
- g) Falls der ausgewählte Zeitbereich näherungsweise konstante Verläufe der Messgrößen zeigt, tragen Sie diese berechneten Mittelwerte in die entsprechende Zeile/-Spalten der Tabelle 3.5 ein.  
Falls keine konstanten Verläufe im gewählten Zeitbereich vorliegen, kann durch erneutes Zoomen der Bereich weiter eingegrenzt werden.
- h) Klicken Sie einen der *Reset*-Buttons zum Rücksetzen des Plots
- i) Wiederholen Sie die Schritte e) - g) für die zweite Phase der Messung (Richtung: AB)
- j) Durch Schließen des Plot-Fensters wird die Auswertung mit der nächsten Messdatei fortgesetzt
- k) Wiederholen Sie die Schritte e) - j) bis alle Messdateien zur Auswertung von Maschinenkonstante und Reibung ausgewertet sind.
- l) Berechnen Sie die Werte der Winkelgeschwindigkeiten der Seilscheibe  $\omega_M$  gemäß folgendem Zusammenhang aus dem jeweiligen Messwert der Scheibendrehzahl  $n_S$ :

$$\omega_S = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_S}{60 \frac{s}{min}} \quad (3.23)$$

- m) Berechnen Sie die Werte der Maschinenkonstante für die einzelnen Auswertungen gemäß Formel 3.17.
- n) Berechnen Sie dann den Mittelwert aller ermittelten Maschinenkonstanten und tragen Sie diesen Wert in der letzten Zeile der Tabelle 3.5 ein.
- o) Ermitteln sie abschließend die drehzahlabhängigen Werte für das Reibmoment  $M_R$  gemäß Gleichung 3.22

Messung	Richtung	$n_S$	$i_A$	$U_B$	$\omega_S$	$k_M$	$M_R$
[-]	[-]	[ $U/min$ ]	[A]	[V]	[rad/s]	[Nm/A]	[Nm]
V3_MK_2kg_4V.tdms	heben						
	senken						
V3_MK_2kg_8V.tdms	heben						
	senken						
V3_MK_2kg_12V.tdms	heben						
	senken						
V3_MK_2kg_16V.tdms	heben						
	senken						
<b>Mittelwert</b>	-	-	-	-	-		-

Tabelle 3.5: Ergebnisse Auswertung Maschinenkonstante und Reibung

### 3.5 MODELLBILDUNG

#### 3.5.1 ELEKTRISCHER KREIS

Die Modellbildung des elektrischen Kreises des Gleichstrommotors basiert auf den in Abschnitt

3.4.1 diskutierten elektrischen Grundlagen.

Aus Gleichung 3.13 lässt sich mit Gleichung 3.14 und der Komponentengleichung der Spule (Induktionsgesetz):

$$U_{L,A} = L_A \cdot \frac{di_A}{dt} \quad (3.24)$$

Folgender Zusammenhang herleiten:

$$U_B - k_M \cdot \omega_M = L_A \cdot \frac{di_A}{dt} + R_A \cdot i_A \quad (3.25)$$

Die linke Seite der Differentialgleichung kann dabei als Eingangsgröße  $u(t)$  in das System betrachtet werden. Der Ankerstrom  $i_A(t)$  sei die Ausgangsgröße.

Damit erhält man:

$$u(t) = L_A \cdot \frac{di_A}{dt} + R_A \cdot i_A \quad (3.26)$$

Die Laplace-Transformation der DGL liefert:

$$U(s) = L_A \cdot s \cdot I_A(s) + R_A \cdot I_A(s) \quad (3.27)$$

Daraus kann nun die Übertragungsfunktion für den elektrischen Kreis hergeleitet werden:

$$G(s) = \frac{I_A(s)}{U(s)} = \frac{1}{L_A \cdot s + R_A} = \frac{\frac{1}{R_A}}{\frac{L_A}{R_A} \cdot s + 1} \quad (3.28)$$

Das Übertragungsverhalten des elektrischen Kreises kann also durch ein  $PT_1$ -Glied im Modell abgebildet werden. Mit der Eingangsgröße  $u(t) = U_B - k_M \cdot \omega_M$

#### 3.5.2 MECHANISCHE KOMPONENTEN

Die Differentialgleichung des mechanischen Teils des betrachteten Systems lässt sich aus dem Momentengleichgewicht an der Seilscheibe herleiten (siehe Abb. 3.10).

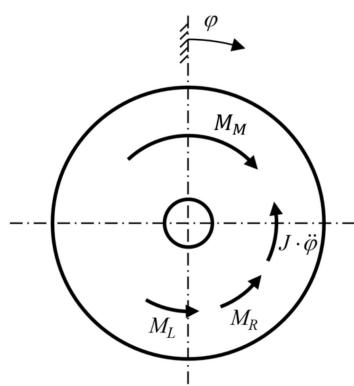


Abbildung 3.10: Momentengleichgewicht an der Seilscheibe

Die mechanischen Zusammenhänge wurden bereits in Abschnitt 3.4.1 diskutiert.  
 Mit den Gleichungen 3.19 und 3.21 kann also die Differentialgleichung der mechanischen Systemkomponenten (Gl. 3.18) in folgende Form überführt werden:

$$\sum M = 0 = k_M \cdot i_A \cdot i_G - M_R - m_G \cdot g \cdot r_S - J \cdot \ddot{\varphi} \quad (3.29)$$

Das Reibmoment  $M_R$  ist als drehzahlabhängige Größe im Abschnitt 3.4.2 ermittelt worden.

Als Trägheitsmoment muss das gesamte Trägheitsmoment aller rotierenden Komponenten berücksichtigt werden (**reduziertes Trägheitsmoment**).

Der tatsächliche Versuchsaufbau enthält ein sog. Schneckengetriebe, dieses muss bei der Modellierung berücksichtigt werden. Das Getriebe kann dabei als ideales Getriebe betrachtet werden (Wirkungsgrad  $\eta = 1$ ), da die im Getriebe auftretende Reibung bei der Ermittlung der Systemreibung  $M_R$  mit enthalten war.

Den schematischen Aufbau des realen Versuchsaufbaus zeigt Abbildung 3.11

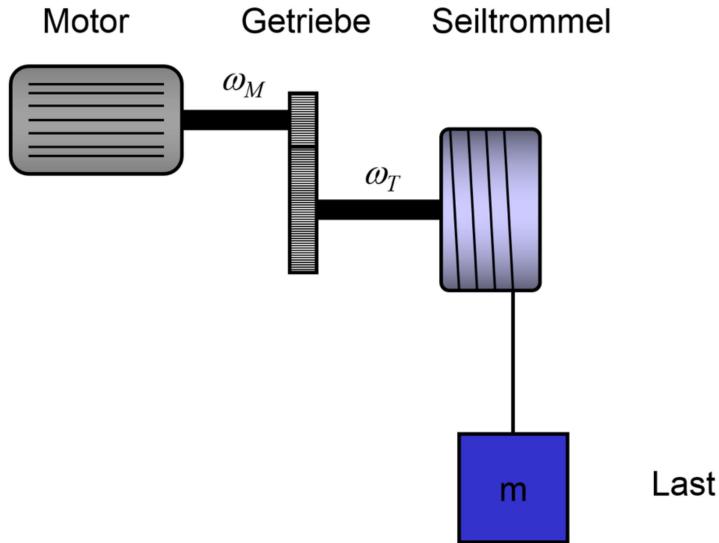


Abbildung 3.11: schematischer Aufbau des Versuchs (inkl. Getriebe)

Das real verbaute Getriebe hat dabei eine Übersetzung von  $i_G = 62$ . Der Motor ( $n_M$ ) dreht also 62mal so schnell wie die Seilscheibe ( $n_S$ ). In der Konsequenz ist das Moment an der Seilscheibe  $M_S$  um den gleichen Faktor größer.

Da die Drehzahl des Motors im Vergleich zur Seilscheibe durch das Getriebe erheblich größer ist, ist auch die auf den Anker wirkende Beschleunigung deutlich höher. Dies muss bei der Berechnung des Gesamtträgheitsmoments berücksichtigt werden.

Das gesamt wirkende Trägheitsmoment — bezogen auf die Winkelgeschwindigkeit der Seilscheibe — berechnet sich damit wie folgt:

$$J = J_M \cdot i_g^2 + J_S + m_G \cdot r_S^2 \quad (3.30)$$

### 3.6 IMPLEMENTIERUNG, SIMULATION UND VALIDIERUNG

Kopieren Sie zunächst den Ordner ...\\Daten aus der Versuchsdurchführung in Ihren aktuellen MATLAB-Arbeitspfad

#### 3.6.1 IMPLEMENTIERUNG DES MODELLS

##### Vorgehen für die Implementierung:

1. Erzeugen Sie ein neues Simulink-Modell für die Implementierung.

##### Hinweis:

Als Lösungsalgorithmus verwenden Sie bitte den **ode3**-Fixed Step-Solver und eine Schrittweite von **0,001s**

2. Die Implementierung des elektrischen Ankerkreis kann mittels der Methode der Übertragungsfunktion erfolgen (siehe Übertragungsfunktion Gl. 3.28)
3. Die Implementierung der mechanischen Systemanteile erfolgt über den Ansatz des Standardverfahrens.  
Der Ankerstrom aus 2. ist dabei eine Eingangsgröße in die Differentialgleichung 3.29
4. Die Implementierung der nichtlinearen Reibung des Systems soll durch eine Kennlinie erfolgen, welche als Eingangsgrößen die Winkelgeschwindigkeit der Seilscheibe  $\omega_S$  verwendet.

##### Hinweis:

Eine Kennlinie kann durch den Simulink-Block *1-D Lookup Table* implementiert werden.

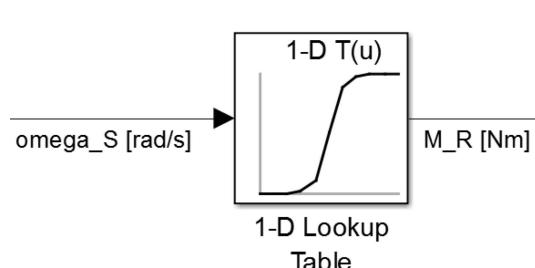


Abbildung 3.12: Simulink-Block *1-D Lookup Table*

### 3.6.2 PARAMETRIERUNG DES MODELLS

- Die Parametrierung der Kennlinie kann durch Doppelklicken des Blocks (Abb. 3.12) erfolgen.

Das in Abbildung 3.13 gezeigte Dialogfeld öffnet sich.

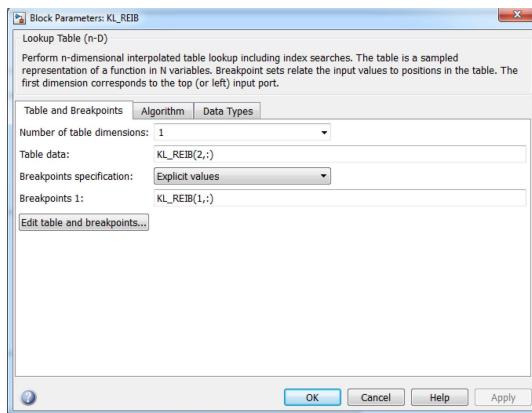


Abbildung 3.13: Parametrierung Kennfeld

- Tragen Sie den Bezug zur MATLAB-Workspace-Variable *KL\_REIB* wie in Abbildung 3.13 ersichtlich ein.

*KL\_REIB(1, :)* adressiert dabei die erste Zeile es entsprechenden Arrays. Dort sind im Parameterskript folglich die Werte der Winkelgeschwindigkeit der Seilscheibe  $\omega_S$  einzutragen

*KL\_REIB(2, :)* die zweite Zeile. Dort sind entsprechend die Werte der Reibmomente einzutragen. .

- Erzeugen Sie das Parametrierungsskript *V3\_Parameter.m* und legen Sie dort alle nötigen Parameter für Ihr Modell als Variablen an.

#### Hinweise:

- In das Array zur Parametrierung der Reibkennlinie *KL\_REIB* sollen die ermittelten Werte der Winkelgeschwindigkeit der Seilscheibe (1.Zeile) und die Reibmomente (2.Zeile) aus den jeweiligen Spalten der Tabelle 3.5 eingetragen werden.

**zu beachten:** Die erste Zeile des Arrays *KL\_REIB* muss dabei streng monoton steigend sein. Das bedeutet, die Winkelgeschwindigkeitswerte sind in aufsteigender Reihenfolge zu sortieren. Es muss dabei darauf geachtet werden, dass die zweite Zeile (Reibmomente) ebenfalls entsprechend sortiert wird, um eine korrekte Zuordnung der Winkelgeschwindigkeiten zu den Reibwerten abzubilden.

- Um das Reibverhalten im Stillstand und stillstandsnahen Bereich physikalisch näherungsweise korrekt abzubilden soll für eine Winkelgeschwindigkeit  $\omega = 0 \text{ rad/s}$  ein Reibmoment von  $M_R = 0 \text{ Nm}$  eingetragen. Um nach dem Anlauf möglichst sofort eine Reibmoment anliegen zu lassen, wird für die Werte der Winkelgeschwindigkeiten  $\omega = 0.001 \text{ rad/s}$  und  $\omega = -0.001 \text{ rad/s}$  jeweils die zu den kleinsten gemessenen Drehzahlen (in jeder Drehrichtung) gehörenden Werte des Reibmoments  $M_R$  eingetragen.

- Führen sie das Skript *V3\_Parameter.m* aus.

### 3.6.3 SIMULATION UND VALIDIERUNG

**Vorgehensweise:**

1. Nun kann eine erste Simulation erfolgen. Prägen Sie hierfür dem Modell durch einen Sprung eine Eingangsspannung von 8 V auf und prüfen Sie das Systemverhalten auf Plausibilität (ist die Drehrichtung richtig, .... ???).

2. Nach der ersten Plausibilisierung soll das Modellverhalten mit dem real gemessenen Systemverhalten verglichen werden. Dazu sollen die Messungen dienen, die im Abschnitt 3.3.2 aufgezeichnet wurden.

Zur Validierung des Modells soll dabei der Spannungsverlauf, der am realen Motor angelegt wurde auch der modellierten E-Maschine aufgeprägt werden. Dies kann durch einen *From Workspace*-Block erfolgen.

3. Um überprüfen zu können, ob sich das modellierte System ähnlich dem realen System verhält, können die gemessenen Verläufe des Ankerstroms und der Motordrehzahl mit den simulierten Verläufen verglichen werden. Dies kann ebenfalls durch *From Workspace*-Blöcke erreicht werden.

Den Aufbau des Modells (als Subsystem) inklusive der *From Workspace*-Blöcke zeigt Abbildung 3.14. Die *Mux*-Blöcke dienen dabei zur Darstellung realer Messwerte und simulierter Werte in einem Achsenstrom.

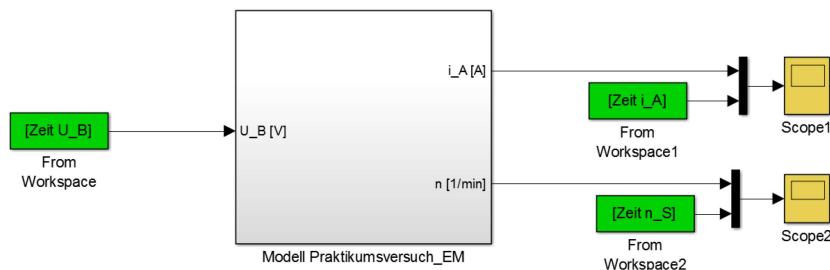


Abbildung 3.14: Modellaufbau zur Validierung

4. Um die für die Validierung nötigen Variablen *Zeit*, *U\_B*, *i\_A* und *n\_S* im *MATLAB*-Workspace verfügbar zu machen, wird in Moodle ein entsprechendes Importskript für die Messdaten aus Abschnitt 3.3.2 zur Verfügung gestellt.

**Vorgehen zum Import der gemessenen Signalverläufe:**

- Laden Sie das zip-Archiv zum Versuch 3 aus Moodle herunter und entpacken Sie das Archiv in ihren aktuellen *MATLAB*-Arbeitspfad
  - Führen Sie das Skript *A\_V3\_Import\_Messdaten\_Simulation.m* aus
  - Im erscheinenden Auswahl-Dialog können Sie festlegen, welche Messdatei importiert werden soll
  - Die nötigen Variablen sind nun im *MATLAB*-Workspace vorhanden
5. Nun kann die Simulation gestartet werden und nach deren Ausführung die simulierten Verläufe mit den gemessenen Verläufen verglichen werden.

### 3.7 ERWARTETE ARBEITSERGEBNISSE FÜR TESTAT

Für die erfolgreiche Absolvierung des Testats werden folgende Arbeitsergebnisse erwartet:

1. Ergebnisse der Bestimmung des Ankerwiderstands der E-Maschine (Tabelle 3.4)
2. Ergebnisse der Bestimmung von Maschinenkonstante der E-Maschine und Reibmoment des Systems (Tabelle 3.5)
3. lauffähiges Simulink-Modell des Systems (\*.slx - File) inklusive den Blöcken für die Validierung des Modells
4. Paramterskript, das (nach Ausführung) eine vollständige Parametrierung des Modells liefert (inkl. Reibkennlinie *KL\_REIB*).
5. lauffähige Simulation mit den Daten aus der Validierungsmessung zur Bewertung der erreichten Modellqualität

**Hinweis:**

Darüber hinaus sind von den Gruppenmitgliedern Fragen zum Versuch zu beantworten.