

# Aktorik Sensorik Labor Protokolle

Anton Kress (S872899), Jan Abel (S876662)

Dezember 2020

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Labor 1</b>	<b>3</b>
1.1 Einleitung und Ziel . . . . .	3
1.2 Grundlagen und Theorie . . . . .	4
1.2.1 Methode der kleinsten Quadrate . . . . .	4
1.2.2 Inkrementalgeber . . . . .	4
1.3 Aufgabenstellung und Versuch . . . . .	5
1.3.1 Messung des Stillstands Drehmomentes . . . . .	5
1.3.2 Messung des Ankerwiderstand . . . . .	6
1.3.3 Messung des Stillstands Drehmomentes . . . . .	7
1.3.4 Messung der Kennlinie des Verstärkers . . . . .	9
1.4 Anhang . . . . .	11
1.4.1 Aufgabenbeschreibung . . . . .	11
1.4.2 Matlab Code . . . . .	12
<b>2 Labor 2</b>	<b>17</b>
2.1 Einleitung und Ziel . . . . .	17
2.2 Aufgabenstellung und Versuch . . . . .	18
2.2.1 Bestimmung der Ankerinduktivität . . . . .	18
2.2.2 Bestimmung der Reibungskonstanten . . . . .	20
2.3 Zusammenfassung . . . . .	23
2.4 Anhang . . . . .	24
2.4.1 Aufgabenbeschreibung . . . . .	24
2.4.2 Matlab Code . . . . .	25
<b>3 Labor 3</b>	<b>28</b>
3.1 Einleitung und Ziel . . . . .	28
3.2 Grundlagen und Theorie . . . . .	29
3.3 Aufgabenstellung und Versuch . . . . .	30
3.4 Diskussion und Zusammenfassung . . . . .	33
3.5 Anhang . . . . .	34
3.5.1 Aufgabenbeschreibung . . . . .	34
3.5.2 Matlab Code . . . . .	34
<b>4 Labor 4</b>	<b>36</b>
4.1 Einleitung und Ziel . . . . .	36
4.2 Grundlagen und Theorie . . . . .	37
<b>5 Aufgabenstellung und Versuch</b>	<b>39</b>
5.1 Bestimmung der Ankerinduktivität . . . . .	39
5.2 Bestimmung der Reibungskonstanten . . . . .	39
<b>6 Zusammenfassung</b>	<b>40</b>
<b>7 Anhang</b>	<b>41</b>
7.1 Aufgabenbeschreibung . . . . .	41
7.2 Matlab Code . . . . .	42

# 1 Labor 1

## 1.1 Einleitung und Ziel

Um später einen permanent erregten Gleichstrommotor zu modellieren, soll in dieser ersten Laborübung in Aktor und Sensorik die wichtigsten Kennwerte des Systems bestimmt werden. Dieses sind die Momentenkonstante  $k_M$ , der Ankerwiderstand  $R$ , die Motorkonstante  $k_e$  und der Verstärkungsfaktor  $A$  des Messverstärkers.

Um diese Konstanten zu bestimmen wurden jeweils eine Menge an Messwerten aufgenommen. Mit diesen wird mittels der Methode der kleinsten Quadrate Ausgleichsrechnungen durchgeführt. Dadurch erhalten wir eine lineare Funktionen aus denen sich die gesuchten Konstanten bestimmen lassen.

## 1.2 Grundlagen und Theorie

### 1.2.1 Methode der kleinsten Quadrate

Die Methode der kleinsten Quadrate ist ein mathematisches Verfahren, bei dem eine lineare Regression auf der Basis einer Wolke aus Datenpunkten berechnet werden soll. Es soll eine Kurve gefunden werden, die möglichst nah an den Punkten verläuft. Dazu bestimmt man die Parameter dieser Kurve numerisch, indem die Summe der quadratischen Abweichungen der Kurve von den beobachteten Punkten minimiert wird.

Zur Umsetzung der Methode der kleinsten Quadrate in Matlab werden die Funktionen `polyfit()` und `polyval()` verwendet. `polyfit()` erhält beim Aufruf die Werte der Punktwolke sowie den Grad des Polynoms und gibt die entsprechenden Koeffizienten zurück. `polyval()` ermittelt aus den Koeffizienten und den x-Werten die tatsächlichen Werte, mit welchen die Kurve geplottet werden kann.

### 1.2.2 Inkrementalgeber

Ein Inkrementalgeber ist ein Messinstrument zur Ermittlung von Lage- oder Winkeländerung (bei rotierenden Objekten). Als verschiedene Arten wird zwischen der photoelektrischen Abtastung (entweder als abbildendes oder interferentielles Messprinzip), der magnetischen Abtastung und per Schleifkontakt unterschieden. Dabei werden zwei um 90 Grad verschobene Signale erzeugt, über die sich Drehgeschwindigkeit, -richtung und -winkel bestimmen lassen. Im Beispielt der photoelektrischen Abtastung wird eine Drehscheibe verwendet, die mit mehreren Schlitzen unterteilt ist und zwischen einer Leuchtdiode und zwei leicht versetzten Photodetektoren angebracht ist. Wenn sich die Scheibe dreht, zählen die Photodetektoren die Impulse, welche von Leuchtdiode und Lichtgitter der Drehscheibe entstehen.

## 1.3 Aufgabenstellung und Versuch

### 1.3.1 Messung des Stillstandsrehmomentes

Im ersten Versuch soll die Momentenkonstante  $k_m$  bestimmt werden. Sie hängt folgendermaßen mit dem Drehmoment  $M_M$  und dem Motorstrom  $i_a(t)$  zusammen.

$$\begin{aligned} M_M(t) &= k_m \cdot i_a(t) \\ k_m &= \frac{M_M(t)}{i_a(t)} \end{aligned} \tag{1}$$

Als Messwerte ist eine Matrix mit den Motorströmen  $I_a$  und der Auslenkungskraft  $F$  gegeben. Um daraus das Drehmoment  $M_M$  zu bestimmen wird der Radius  $r$  benötigt, welcher mit 1cm gegeben ist.

$$\begin{aligned} M_M &= r \cdot F \\ k_m &= \frac{r \cdot F(t)}{i_a(t)} \end{aligned} \tag{2}$$

Anschließend kann die Momentenkonstante  $k_m$  über die Steigung der geplotteten Gerade bestimmt werden. Hierfür muss gewährleistet werden, dass der Arbeitspunkt linear ist. Deshalb dürfen die letzten drei Messwerte in der linearen Regression nicht betrachtet werden.

$$k_m \simeq 0.022 \frac{\text{Nm}}{\text{A}} \tag{3}$$

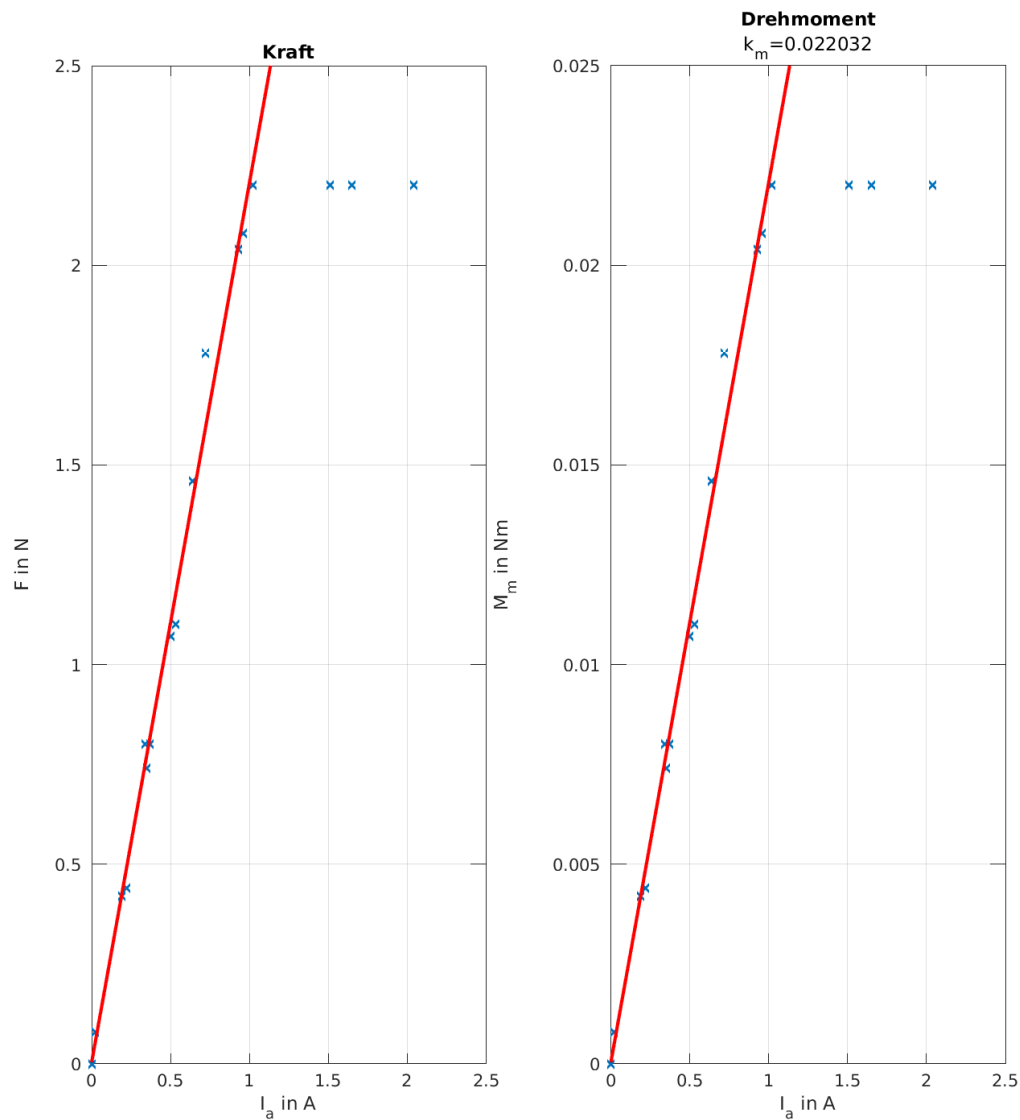


Abbildung 1: Plot der Aufgabe 1

### 1.3.2 Messung des Ankerwiderstand

Im zweiten Versuch soll der Ankerwiderstand  $R$  bestimmt werden. Der Ankerwiderstand kann über das Ohm'sche Gesetz berechnet werden, dafür ist eine Matrix mit den gemessenen Messwerten der Spannungen und Ströme gegeben.

Da mit den Messwerten die Ströme über den Spannungen abgebildet werden ist die Steigung nicht der Widerstand sondern der Leitwert. Deshalb muss zur Ermittlung des Ankerwiderstand noch das Reziproke des Leitwerts berechnet werden.

$$R = \frac{U_a}{I_a} \Leftrightarrow G = \frac{1}{R} = \frac{I_a}{U_a} \quad (4)$$

$$R \simeq 3.26\Omega$$

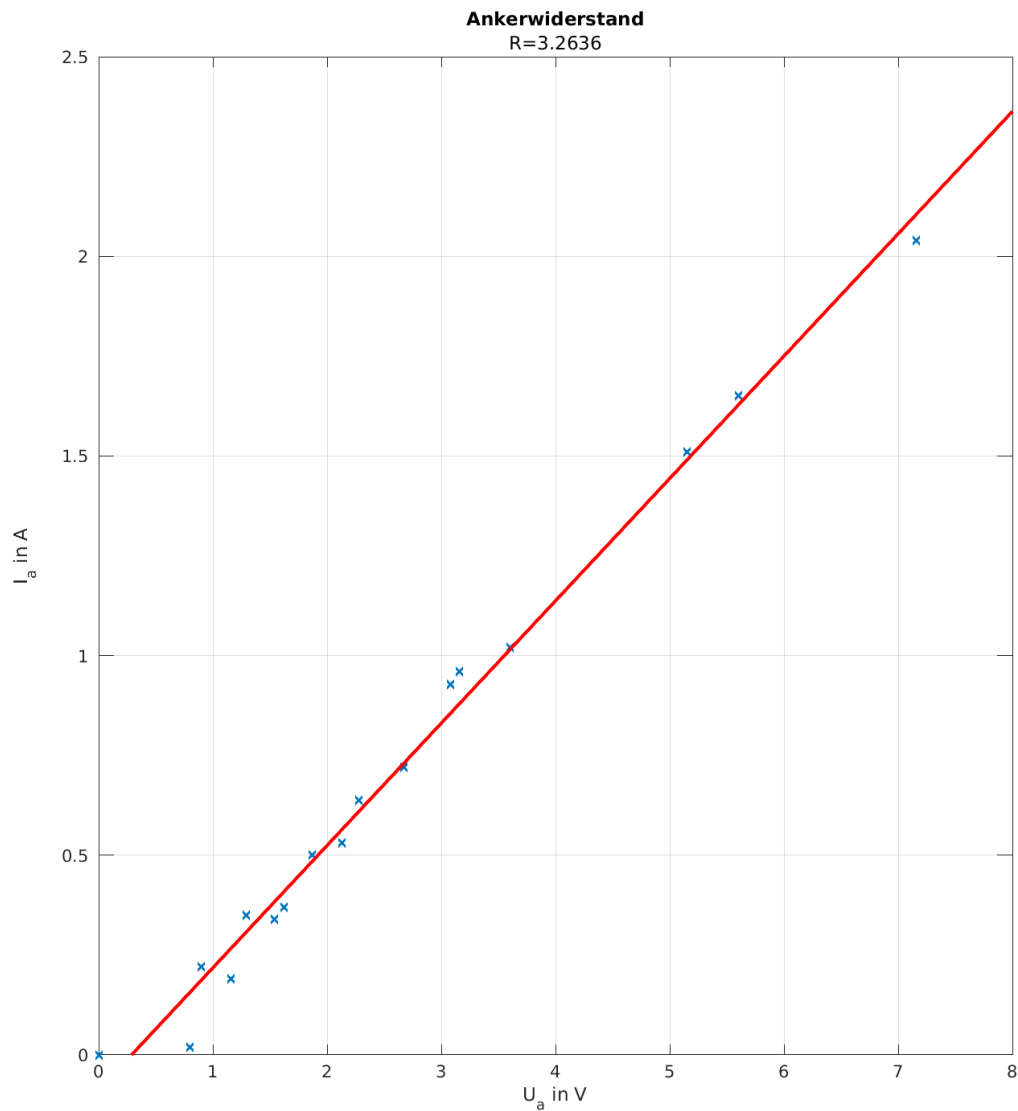


Abbildung 2: Plot der Aufgabe 2

### 1.3.3 Messung des Stillstands Drehmomentes

Im dritten Versuch soll die Konstante  $k_e$  bestimmt werden. Diese beschreibt als Proportionalfaktor den Zusammenhang zwischen der induzierten Spannung  $U_i$  und der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$ .

$$u_i(t) = k_e \cdot \omega(t) \quad (5)$$

Gegeben sind in dieser Aufgabe sind die Messwerte in einer Matrix. Diese enthält die Spannungswerten von  $U_a = U_i$ , welche mit einem Multimeter gemessen worden sind und den Inkrementen pro ms  $Y$ , ermittelt durch einen Inkrementalgeber und einen Mikrocontroller.

Um  $k_e$  zu bestimmen wird neben der direkt gegebenen Spannung  $U_a$  auch die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  benötigt. Diese ist das Produkt aus  $2\pi$  und der Drehzahl  $n$ . Während die Winkelgeschwindigkeit angibt wie schnell sich ein Winkel mit der Zeit um eine Achse ändert, gibt die Drehzahl die Anzahl der Umdrehungen in einer Zeitspanne an.

$$k_e = \frac{U_a}{\omega} = \frac{U_a}{2\pi n} \quad (6)$$

Die gemessenen Inkremente pro Zeit müssen daher umgerechnet werden. Diese wurden mit dem C167 Mikrocontroller mit einer Abtastzeit  $T = 1\text{ms}$  aufgenommen. Der Inkrementalgeber besitzt 500 Inkremente pro Umdrehung. Durch eine Vierfachauswertung ergeben sich  $P_z = \frac{2000}{2\pi} \frac{\text{INK}}{\text{rad}}$ . Dadurch ergibt sich folgender Umrechnungsfaktor  $\lambda$ .

$$\lambda = \frac{1000 \text{ ms rad}}{P_z \text{ s INK}} \quad (7)$$

Über diesen Faktor lässt sich die Drehzahl bestimmen, damit die Winkelgeschwindigkeit und abschließend auch  $k_e$ .

$$\begin{aligned} n &= \lambda \cdot Y && \text{in } \frac{\text{rad}}{\text{s}} \\ \omega &= 2\pi \lambda \cdot Y && \text{in } \frac{\text{rad}}{\text{s}} \\ k_e &= \frac{U_a}{2\pi \lambda \cdot Y} && \text{in } \frac{\text{Vs}}{\text{rad}} \end{aligned} \quad (8)$$

Dadurch berechnet sich  $k_e$  nach über das Reziproke der Steigung der Funktion multipliziert mit dem Faktor  $\lambda$ .

$$k_e = \frac{1}{m \cdot \lambda} \simeq 0.0235 \frac{\text{Vs}}{\text{rad}} \quad (9)$$



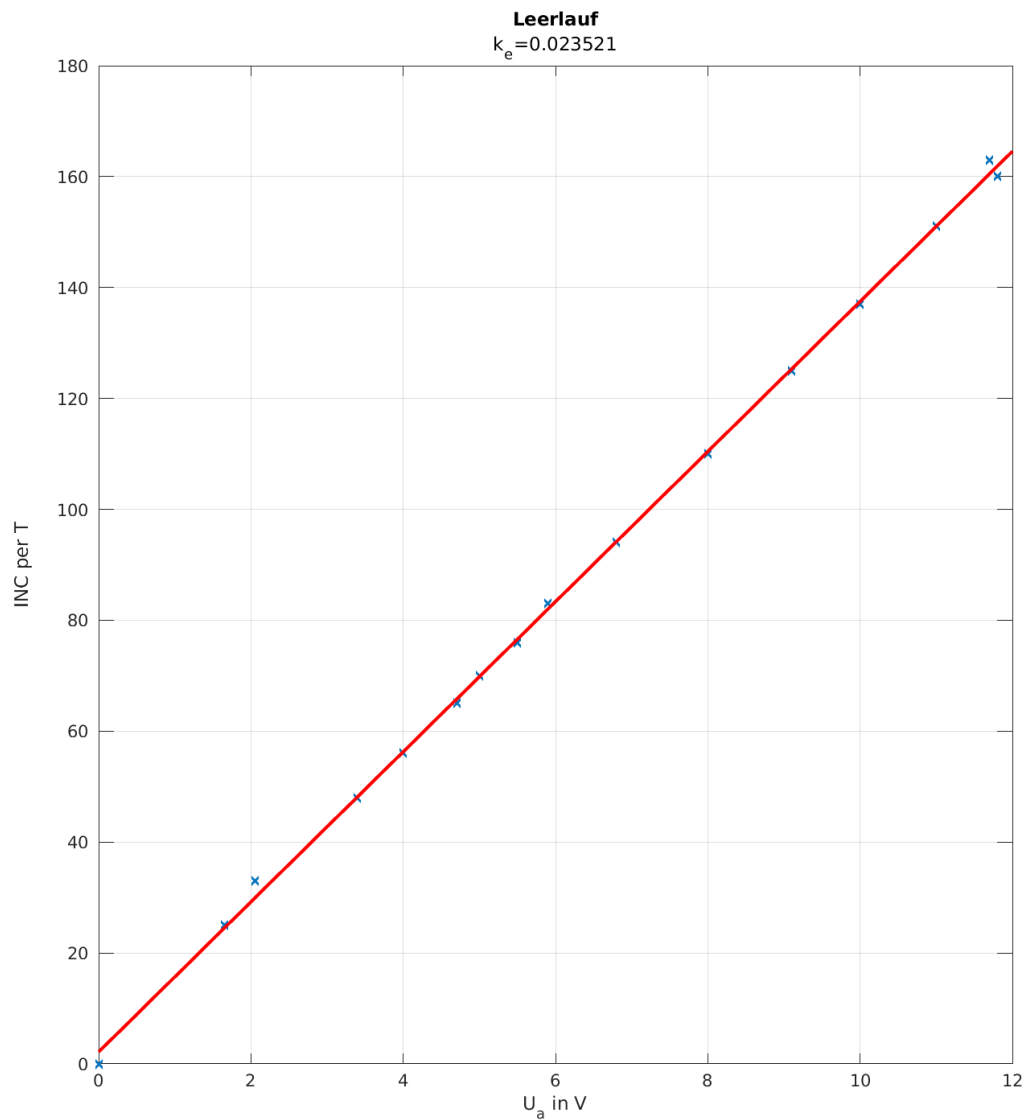


Abbildung 3: Plot der Aufgabe 3

#### 1.3.4 Messung der Kennlinie des Verstärkers

In der letzten Messung soll die Kennlinie des Messverstärkers ermittelt werden und damit der Verstärkungsfaktor  $A$  bestimmt werden. Dafür liegt eine Matrix mit den Eingangsspannungen  $U_e$  und den Ausgangsspannungen  $U_a$  vor. Da der Verstärker ausgangsseitig bei etwa  $+13.75\text{V}$  und  $-13.06\text{V}$  in Sättigung geht, werden die jeweils ersten beiden und die letzten beiden Messwerte für die Berechnung der Funktion nicht betrachtet.

Der Verstärkungsfaktor  $A$  ist der Quotient aus Ausgangs- und Eingangsspannung und somit die Steigung der ermittelten Funktion.

$$A = \frac{U_a}{U_e} \simeq 2V \quad (10)$$

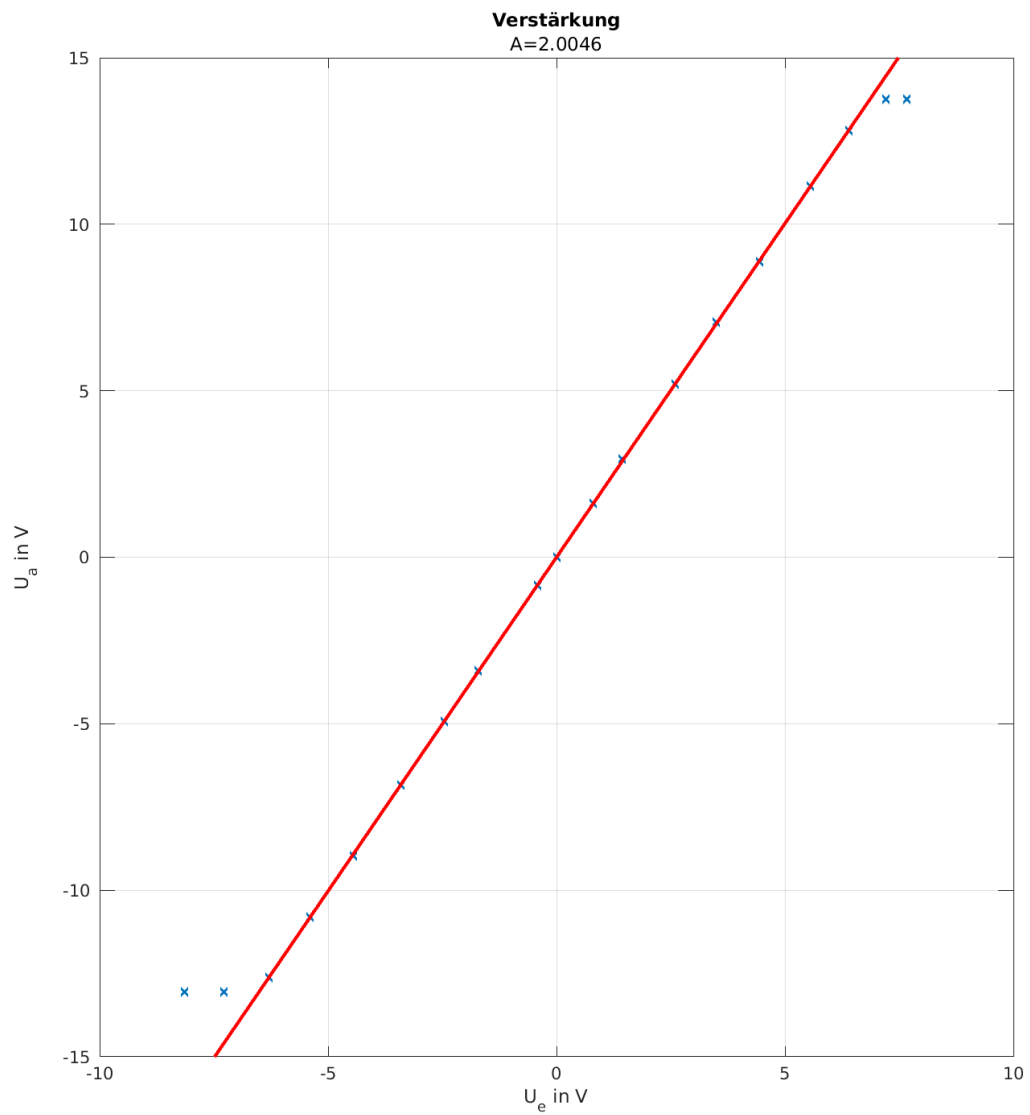


Abbildung 4: Plot der Aufgabe 4

## 1.4 Anhang

### 1.4.1 Aufgabenbeschreibung

#### 1 Termin

In der ersten Laborübung sollen die Werte der Elemente des Ersatzschaltbildes eines permanent erregten Gleichstrommotors bestimmt werden.

Vorbereitung:

1. Um Parameter richtig identifizieren zu können, muss man viele Messungen durchführen. Nun ist die Frage, wie man einen statistisch relevanten Wert für einen Parameter aus vielen Messungen bekommt ...
2. Recherchieren Sie nach der Methode der Kleinsten Quadrate und finden Sie heraus, wie diese Methode funktioniert.
3. Was ist ein Inkrementalgeber? Welche Typen davon gibt es? Wie funktioniert so ein Gerät? Lesen Sie bitte die Wikipedia Seiten dazu: [https://en.wikipedia.org/wiki/Incremental\\_encoder](https://en.wikipedia.org/wiki/Incremental_encoder) und <https://de.wikipedia.org/wiki/Inkrementalgeber> ).

#### 1.1 Messung des Stillstands Drehmomentes

Das vom Motor abgegebene Antriebsmoment ist über die Momentenkonstante  $k_M$  mit dem Motorstrom verknüpft. Ziel der ersten Teilaufgabe ist die Bestimmung dieser Konstante  $k_M$ . Hierzu wird der Motorstrom mit Hilfe unseres Netztes von 0 A bis 2 A vorgegeben und das Drehmoment mit Hilfe der Federwaage gemessen. Der Motor wird bei dieser Messung im Stillstand betrieben. Die entstehende Kennlinie, die das Drehmoment über dem Motorstrom darstellt, wird in MATLAB gezeichnet und die Steigung dieser Kennlinie stellt die Konstante  $k_M$  dar.

#### 1.2 Messung des Ankerwiderstandes $R$

Ein wesentlicher Teil des Modells der permanent erregten Gleichstrommaschine ist der Ankerwiderstand  $R$ . Ziel dieser Teilaufgabe ist es, diesen zu bestimmen. Welcher Teil des technischen Aufbaus des Motors liegt im Stromkreis, wurde aber bisher nicht berücksichtigt? Wenn dieses Bauteil weiter außen vor gelassen wird, welche Konsequenz hat das für die Durchführung der Messung des Ankerwiderstandes  $R$ ? Schlagen sie nun eine geeignete Messung vor und bestimmen sie nach dieser den Ankerwiderstand  $R$ .

#### 1.3 Messung der Leerlaufkennlinie

Die induzierte Spannung  $u_i$  ist proportional zur Winkelgeschwindigkeit des Motors  $\omega$ . Es gilt  $u_i(t) = k_e \cdot \omega(t)$ . Ziel der zweiten Teilaufgabe ist die Bestimmung der Konstanten  $k_e$ . Wir geben mit Hilfe unseres Netztes die Motorspannung mit 0 V bis 12 V vor und messen die Drehzahl. Hierbei wird der Motor nicht belastet, d. h. er wird im Leerlauf betrieben. Die entstehende Kennlinie wird Leerlaufkennlinie genannt und wird mit Hilfe von MATLAB dargestellt. Die gesuchte Konstante  $k_e$  ist die Steigung dieser Kennlinie. Zur Messung der Drehzahl verwenden wir einen Inkrementalencoder. Er wird an Timer 3 des Mikrocontrollers C167, der ein Inkrementalkoder-Interface besitzt, angeschlossen und in Vierfachauswertung betrieben. Wir erhalten so eine Pulszahl von PZ = 2000 Pulsen pro Umdrehung. Die Abtastzeit der Interruptroutine, in der der Inkrementaldekoder ausgewertet wird, beträgt  $T = 1$  ms. Was ist der Unterschied zwischen Drehzahl und Winkelgeschwindigkeit? Welche Variablen werden für diese beiden Angaben benutzt?

Beuth-Hochschule für Technik Berlin	Labor für Automatisierungstechnik	Übungsveranstaltung für Aktorik & Sensorik
Prof. Dr.-Ing. FJ Morales		3 von 10

#### 1.4 Messung der Kennlinie des Leistungsverstärkers

Die Eingangsspannung des Leistungsverstärkers wird im Bereich von  $-12\text{ V}$  bis  $+12\text{ V}$  mit Hilfe des Netztesles vorgegeben und die Ausgangsspannung mit Hilfe des Multimeters gemessen. Aus der Verstärkerkennlinie, in der mit MATLAB die Ausgangsspannung über der Eingangsspannung dargestellt wird, erhält man die Verstärkung  $A$  des Leistungsverstärkers.

Hinweis: Nehmen Sie genug Messpunkte auf, damit Sie mögliche Nichtlinearitäten der Kennlinie feststellen können

Beuth-Hochschule für Technik Berlin	Labor für Automatisierungstechnik	Übungsveranstaltung für Aktorik & Sensorik
Prof. Dr.-Ing. FJ Morales		4 von 10

#### 1.4.2 Matlab Code

```
1 % Aktorik & Sensorik - WS 2020
2 %
3 % 1.1 Messung des Stillstandsrehmomentes
4 %
5 % Datum: 27.10.2020
6 % Autoren: Anton Kress, S872899
7 %           Jan Abel, S876662
8
9 clear
10 home
11 close all
12
```

```

13 FolderName = "./src/";
14 A_Name = "A.mat";
15 B_Name = "B.mat";
16
17 A_test = FolderName + A_Name;
18 A = fullfile(FolderName, A_Name);
19 B = fullfile(FolderName, B_Name);
20
21 % A = B - 3 letzte Elemente - Arbeitsbereich
22 load(A);
23 load(B);
24 r=0.01;
25 % Auslesen der Ströme und Drehmomente
26 A_plot=sortrows(A,2);
27 B_plot=sortrows(B,2);
28
29 % lineares fitting im Arbeitsbereich - Kraft
30 f1 = polyfit(A_plot(:,2), A_plot(:,3), 1);
31
32 % lineares fitting im Arbeitsbereich - Drehmoment
33 f2 = polyfit(A_plot(:,2), A_plot(:,3)*r, 1);
34 % Momentenkonstante k_m entspricht Steigung der Gerade
35 k_m=f2(1,1)
36
37 % Erzeugung der Ausgleichsgerade
38 x1 = linspace(0, 2.5);
39 y1 = polyval(f1, x1);
40 y2 = polyval(f2, x1);
41
42
43 figure(1);
44 subplot(1,2,1);
45 plot(B_plot(:,2), B_plot(:,3),'x', x1, y1, 'r','linewidth',2 );
46 axis([0 2.5 0 2.5])
47 title('Kraft')
48 xlabel('I_a in A');
49 ylabel('F in N');
50 grid on
51
52 subplot(1,2,2);
53 plot(B_plot(:,2), B_plot(:,3)*r, 'x', x1, y2, 'r','linewidth',2 );
54 axis([0 2.5 0 0.025])
55 title('Drehmoment')
56 subtitle(['k_m=' num2str(k_m)])
57 xlabel('I_a in A');
58 ylabel('M_m in Nm');
59 grid on
60
61 % save current plot to img/-folder
62 imagePath = fullfile('../img/', mfilename);
63 print(imagePath, '-dpng');

```

```

1 % Aktorik & Sensorik - WS 2020
2 %
3 % 1.2 Messung des Ankerwiderstandes
4 %
5 % Datum:      27.10.2020

```

```

6 % Autoren: Anton Kress, S872899
7 % Jan Abel, S876662
8
9 clear
10 home
11 close all
12
13 FolderName = "./src/";
14 B_Name = "B.mat";
15 B = fullfile(FolderName, B_Name);
16
17 % Auslesen der Ströme und Spannungen
18 load(B);
19 B_plot=sortrows(B,1);
20
21 % lineares fitting im Arbeitsbereich
22 f2 = polyfit(B_plot(:,1), B_plot(:,2), 1);
23 % Leitwert G entspricht Steigung der Gerade
24 % R = 1/G
25 R=1/f2(1,1)
26 % Erzeugung der Ausgleichsgerade
27 x1 = linspace(0, 8);
28 y1 = polyval(f2, x1);
29
30 figure(1);
31 plot(B_plot(:,1), B_plot(:,2),'x', x1, y1, 'r','linewidth',2 );
32 axis([0 8 0 2.5])
33 title('Ankerwiderstand')
34 subtitle(['R=' num2str(R)])
35 xlabel('U_a in V');
36 ylabel('I_a in A');
37 grid on
38
39 % save current plot to img/-folder
40 imagePath = fullfile('../img/', mfilename);
41 print(imagePath, '-dpng');

```

```

1 % Aktorik & Sensorik - WS 2020
2 %
3 % 1.3 Messung der Leerlaufkennlinie
4 %
5 % Datum: 27.10.2020
6 % Autoren: Anton Kress, S872899
7 % Jan Abel, S876662
8
9 clear
10 home
11 close all
12
13 FolderName = "./src/";
14 C_Name = "C.mat";
15 C = fullfile(FolderName, C_Name);
16
17 % Auslesen der Winkelgeschwindigkeit und Spannungen
18 load(C);
19 C_plot=sortrows(C,1);
20 % Pulse pro Umdrehung in [pulse/rad]

```

```

21 Pz=2000/(2*pi)
22 % Faktor in [Ink/rad]
23 lambda= 1000/Pz
24 % Winkelgeschwindigkeit
25
26 % lineares fitting im Arbeitsbereich
27 f3 = polyfit(C_plot(:,2), C_plot(:,1), 1);
28 % die Steigung hat die Einheit [Ink/V ms]
29 % ke hat die Einheit [Vs/rad]g
30 k_e=1/(lambda*f3(1,1));
31 % Erzeugung der Ausgleichsgerade
32 x1 = linspace(0, 12);
33 y1 = polyval(f3, x1);
34
35
36 figure(1);
37 plot(C_plot(:,2), C_plot(:,1), 'x', x1, y1, 'r', 'linewidth', 2);
38 axis([0 12 0 180])
39 title('Leerlauf')
40 subtitle(['k_e=' num2str(k_e)])
41 xlabel('U_a in V');
42 ylabel('INC per T') ;
43 grid on
44
45 % save current plot to img/-folder
46 imagePath = fullfile('..img/', mfilename);
47 print(imagePath, '-dpng');

```

```

1 % Aktorik & Sensorik - WS 2020
2 %
3 % 1.4 Messung der Kennlinie des Leistungsverstärkers
4 %
5 % Datum:      27.10.2020
6 % Autoren:    Anton Kress,      S872899
7 %             Jan Abel,         S876662
8
9 clear
10 home
11 close all
12
13 FolderName = "./src/";
14 D_Name = "D.mat";
15 D = fullfile(FolderName, D_Name);
16
17 % Auslesen der EIngangs und Ausgangsspannungen
18 load(D);
19 D_plot=sortrows(D,1);
20
21 % lineares fitting im Arbeitsbereich
22 f4 = polyfit(D_plot(3:17,1), D_plot(3:17,2), 1);
23 % Verstärkung A entspricht Steigung der Gerade
24 A=f4(1,1)
25 % Erzeugung der Ausgleichsgerade
26 x1 = linspace(-10, 10);
27 y1 = polyval(f4, x1);
28
29 figure(1);

```

```

30 plot(D_plot(:,1), D_plot(:,2), 'x', x1, y1, 'r', 'linewidth', 2 );
31 axis([-10 10 -15 15])
32 title('Verstärkung')
33 subtitle(['A=' num2str(A)])
34 xlabel('U_e in V');
35 ylabel('U_a in V');
36 grid on
37
38 % save current plot to img/-folder
39 imagePath = fullfile('../img/', mfilename);
40 print(imagePath, '-dpng');

```



## 2 Labor 2

### 2.1 Einleitung und Ziel

Im 2. Labor im Modul Aktorik und Sensorik soll die Ankerinduktivität  $L$  und die Reibungskonstante  $c_r$  eines Gleichstrommotors bestimmt werden.

## 2.2 Aufgabenstellung und Versuch

### 2.2.1 Bestimmung der Ankerinduktivität

Um die Ankerinduktivität zu bestimmen, muss der Motor gebremst sein, damit die induzierte Gegenspannung  $U_{ind} = 0$  ist. Dann ergibt sich folgendes Schaltbild.

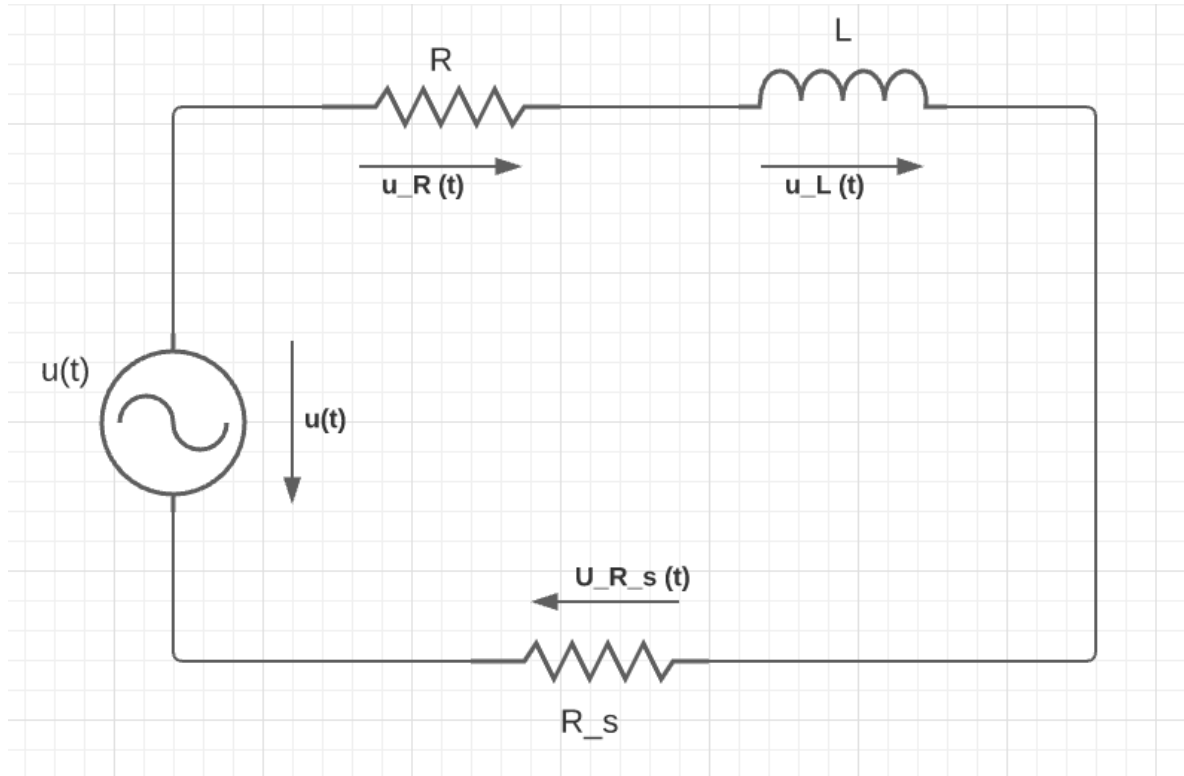


Abbildung 5: Mess-Schaltung Ankerinduktivität

Diese Schaltung kann durch folgende Maschengleichung beschrieben werden.

$$\begin{aligned} u(t) &= u_R(t) + u_L(t) \\ u(t) &= R \cdot i(t) + L \frac{di(t)}{dt} \\ u(t) &= (R + R_s) \cdot i(t) + L \frac{di(t)}{dt} \end{aligned} \tag{11}$$

Die Idee zur Bestimmung der Induktivität ist nun folgende. Die Schaltung wird mit einer sinusförmigen Wechselspannung betrieben. Über die Phasenverschiebung der Eingangsspannung und des Stromes kann die Induktivität bestimmt werden.

$$\begin{aligned} \underline{U} &= A \cdot e^{j0} \\ \underline{I} &= B \cdot e^{j\varphi} \end{aligned} \tag{12}$$

Der Strom  $i(t)$  wird indirekt über den Messwiderstand  $R_s = 1\Omega$  bestimmt, da folgendes gilt.

$$i(t) = \frac{u_{Rs}(t)}{R_s} = u_{Rs}(t) \quad (13)$$

Der Phasenwinkel kann über die Impedanz  $\underline{Z}$  berechnet werden.

$$\begin{aligned} \underline{Z} &= (R + R_s) + j\omega L \\ \varphi\{\underline{Z}\} &= \arctan\left(\frac{\omega L}{R + R_s}\right) \end{aligned} \quad (14)$$

Da nicht der Phasenwinkel  $\varphi$  sondern die Phasenverschiebung  $\Delta t$  gemessen wird, muss dieser noch umgerechnet werden.

$$\begin{aligned} \varphi &= \frac{\Delta t}{T} \cdot 2\pi \\ \varphi &= \omega \Delta t = 2\pi f \Delta t \end{aligned} \quad (15)$$

Nun lässt sich die Induktivität  $L$  folgendermaßen berechnen.

$$L = \frac{(R + R_s)}{2\pi f} \cdot \tan(2\pi f \Delta t) \quad (16)$$

Da in der Messung die Phasenverschiebung  $\Delta t$  in Abhängigkeit von der Frequenz  $f$  gemessen worden ist, ergibt sich die Funktion  $f_1(f)$ .

$$\Delta t = f_1(f) = \frac{1}{2\pi f} \arctan\left(\frac{2\pi L}{R + R_s} f\right) \quad (17)$$

Um diese Funktion zu Linearisieren muss diese noch umgestellt werden.

$$\tan(2\pi f \Delta t) = f_2(f) = \frac{2\pi L}{R + R_s} f \quad (18)$$

Nun kann mittels der linearen Regression aus den beiden Vektoren die Steigung  $m$  bestimmt werden, aus der sich die Induktivität  $L$  berechnen lässt.

$$\begin{aligned} m &= \frac{2\pi L}{R + R_s} \\ L &= \frac{m \cdot (R + R_s)}{2\pi} \simeq 175.462 \mu\text{H} \end{aligned} \quad (19)$$

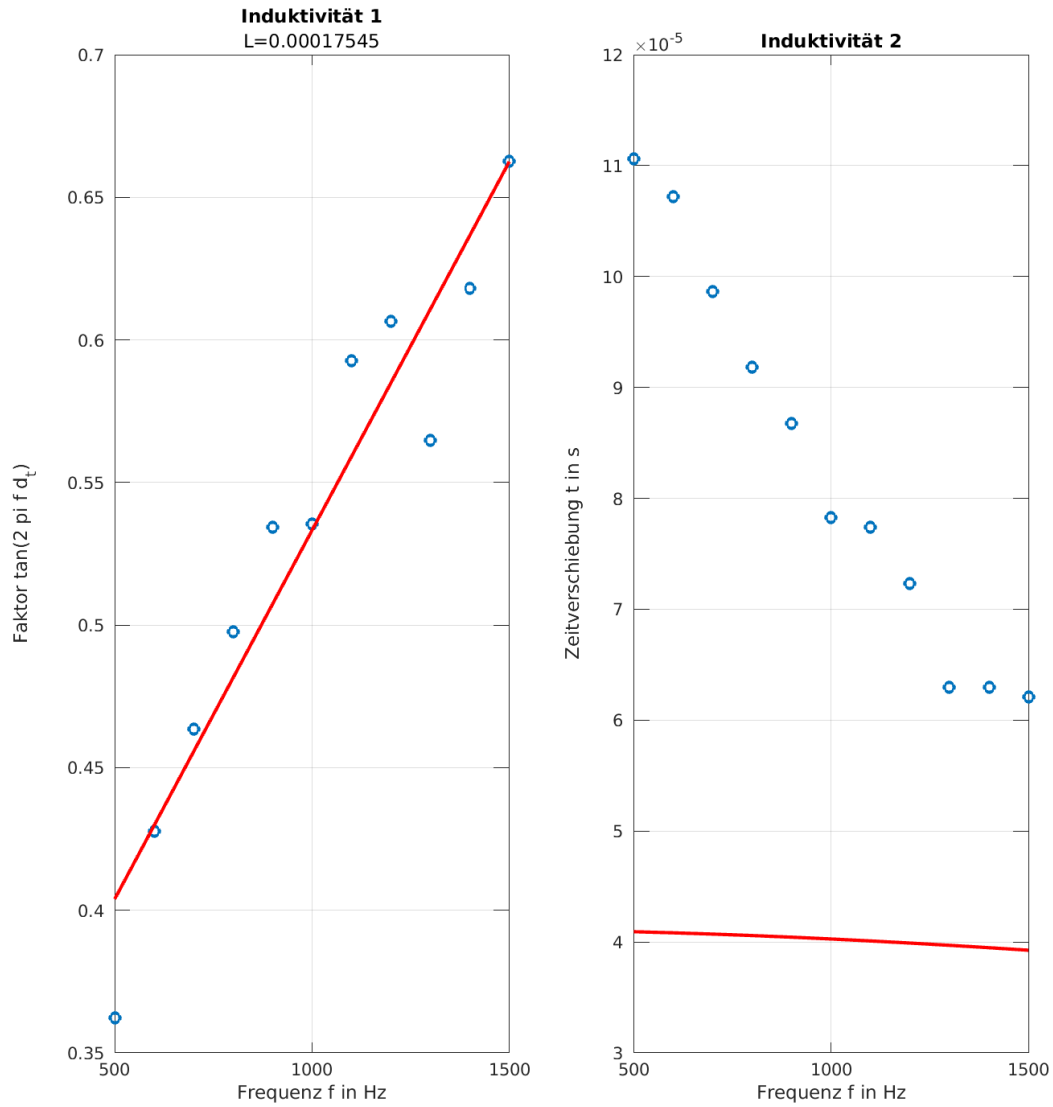


Abbildung 6: Plot der Aufgabe 1

### 2.2.2 Bestimmung der Reibungskonstanten

Die Reibungskonstante kann über folgende DGL berechnet werden. Die Summe der Drehmomente ergibt sich aus dem Drehmoment  $M_m$  abzüglich des Reibungsdrehmoments  $M_R$  und des Lastdrehmoments. Diese sind gleich der zeitlichen Änderung der Winkelgeschwindigkeit  $\frac{d\omega}{dt}$  multipliziert mit dem Trägheitsmoment  $J$ .

$$\begin{aligned}
 J \frac{d\omega}{dt} &= \sum M = M_m - M_R - M_L \\
 J \frac{d\omega}{dt} &= \sum M = k_m \cdot i(t) - c_r \omega(t) - M_L
 \end{aligned} \tag{20}$$

Um die Reibungskonstante  $c_r$  nun zu bestimmen, ist es günstig das System im Leerlauf

zu betrachten, da  $M_L = 0$  und nach Abklingen des Einschaltvorgangs  $\frac{d\omega}{dt} = 0$ . Aus der DGL ergibt sich folgende einfache Gleichung.

$$0 = k_m \cdot i(t) - c_r \omega(t) \quad (21)$$

Daraus ergibt sich folgende Funktion.

$$\omega = f_3(i) = \frac{k_m}{c_r} i \quad (22)$$

Nun kann mittels der linearen Regression aus den beiden Vektoren die Steigung  $m$  bestimmt werden, aus der sich die Reibungskonstante  $c_r$  berechnen lässt.

$$\begin{aligned} m &= \frac{k_m}{c_r} \\ c_r &= \frac{k_m}{m} \simeq 3,24 \cdot 10^{-9} \frac{\text{Nms}}{\text{rad}} \end{aligned} \quad (23)$$

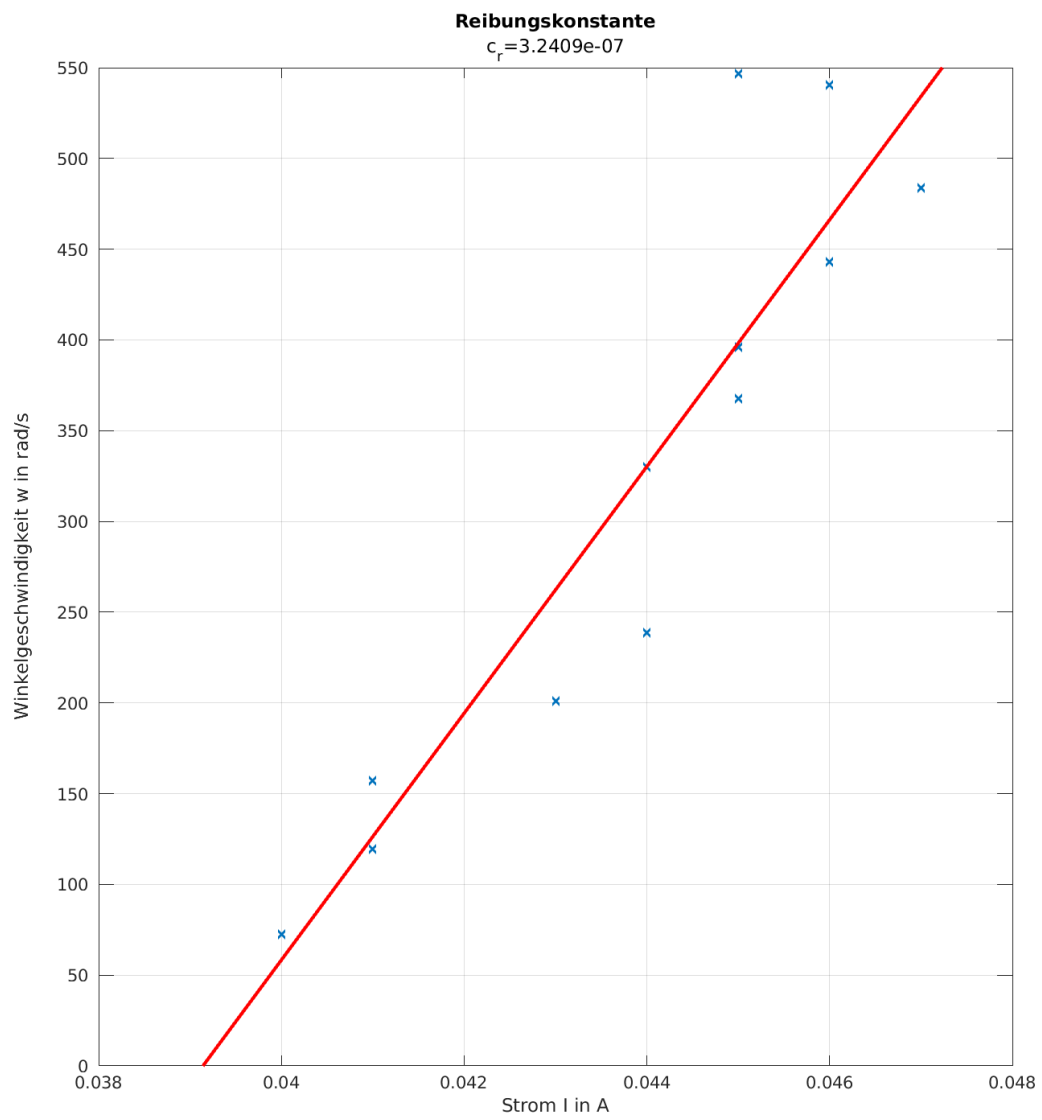


Abbildung 7: Plot der Aufgabe 1

## 2.3 Zusammenfassung

Mittels der Messwerte sind wir auf folgende Werte für die Ankerinduktivität  $L$  und die Reibungskonstante  $c_r$  gekommen.

$$\begin{aligned} L &= 175.462\mu\text{H} \\ c_r &= 3,24 \cdot 10^{-9} \frac{\text{Nms}}{\text{rad}} \end{aligned} \tag{24}$$

Die Berechnung der Reibungskonstante stellte uns vor keine Herausforderung und ist sowohl Einheitenmäßig als auch Dimensionsmäßig nachvollziehbar.

Die Bestimmung der Ankerinduktivität stellte uns allerdings vor die Herausforderung das System zu linearisieren (Abbildung 2: Induktivität 1). Nach der Linearisierung der Funktion und anschließender Regression haben wir den errechneten Wert der Induktivität wieder in die Ursprungsfunktion eingesetzt (Abbildung 2: Induktivität 2). Hier ist zu erkennen, dass die ermittelte Gerade sich nur bedingt in der Nähe der Messpunkte befindet. Wir vermuten, dass entweder eine Ungenauigkeit in unseren Modell vorhanden ist oder es ist einen vielleicht sogar frequenzabhängigen Offset in den Messdaten gibt. Um dieses Verhalten genauer zu untersuchen, haben wir die Funktion und die Messdaten interaktiv in Desmos erstellt.

Wir konnten diese Diskrepanz leider nicht abschließend klären, sind aber zum Entschluss gekommen das unser Ergebnis von  $175.462\mu\text{H}$  ausreichend genau und auch realistisch ist.

## 2.4 Anhang

### 2.4.1 Aufgabenbeschreibung

#### 2 Termin

##### 2.1 Vorbereitung zur Bestimmung der Ankerinduktivität

Die Ankerinduktivität des Motors soll bestimmt werden. Dazu ist bei gebremstem Motor die Phasenlage des Stromes gegenüber der steuernden Spannung zu messen.

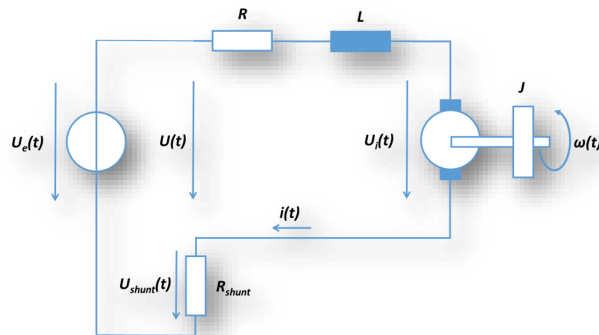


Abb. 2.1: Messung des Motorstromes bzw. Ankerstromes

Beantworten Sie die folgende Frage: Warum wird bei gebremstem Motor gemessen?

##### 2.2 Berechnung der Induktivität

Berechnen Sie entweder mit Hilfe der komplexen Wechselstromrechnung oder mit Hilfe der Übertragungsfunktion  $U_{shunt}(s) / U_e(s)$  ausgehend von der Abbildung 2.1 den Winkel zwischen den Spannungen  $U_e$  und  $U_{shunt}$ .

Lösen Sie die entstehende Gleichung nach der gesuchten Größe, der Induktivität  $L$ , auf.

##### 2.3 Messung des Phasenwinkels

Messen Sie mit dem PicoScope<sup>1</sup>, eingestellt auf Betrieb mit zwei Kanälen, den Versatz bzw. den Winkel zwischen  $U_e$  und  $U_R$ . Benutzen Sie als Signalquelle für das benötigte Sinussignal den in das PicoScope eingebauten Generator bei einer Frequenz von z.B. 1 kHz. Entlasten Sie bitte den Ausgangstreiber des Gerätes und benutzen Sie den vorhandenen Leistungsverstärker. Bestimmen Sie mit Hilfe des Ergebnisses aus 2.2) die Induktivität  $L$  des Motors.

##### 2.4 Berechnung & Messung der Reibungskonstante

Stellen Sie eine Gleichung zur Ermittlung der Reibungskonstante  $C_r$  auf.

Hinweise:

1:  $\tau M = J \cdot d\omega/dt$

2: Wie groß ist  $M_L$  im Leerlauf?

3: Wie groß ist  $d\omega/dt$  nach Abklingen des Einschaltvorganges?

<sup>1</sup> PicoScope ist ein über die USB Schnittstelle angeschlossenes Gerät mit dessen Hilfe der PC als Oszilloskop fungieren kann.

Beuth-Hochschule für Technik Berlin	Labor für Automatisierungstechnik	Übungsveranstaltung für Aktorik & Sensorik
Prof. Dr.-Ing. FJ Morales		5 von 10



Messen Sie alle Größen, die Sie zur Bestimmung von  $C_r$  benötigen und geben sie den Wert von  $C_r$  für den Ihnen vorliegenden Motor an.

Beuth-Hochschule für Technik Berlin	Labor für Automatisierungstechnik	Übungsveranstaltung für Aktorik & Sensorik
Prof. Dr.-Ing. FJ Morales		6 von 10

## 2.4.2 Matlab Code

```
1 % Aktorik & Sensorik - WS 2020
2 %
3 % 2.1-2.3 Berechnung der Induktivität mittels des Phasenwinkels
4 %
5 % Datum:      12.11.2020
6 % Autoren:    Anton Kress,      S872899
7 %             Jan Abel,         S876662
8
9 clear
10 home
11 close all
12
```

```

13 FolderName = "./src/";
14 E_Name = "E.mat";
15 E = fullfile(FolderName, E_Name);
16 load(E);
17
18 R = 3.263586106324851;           % Ankerwiderstand      in [V/A]
19 Rs = 1;                         % Messwiderstand   in [V/A]
20 delta_t = E(:,2);               % Phasenverschiebung in [s]
21 f = E(:,1);                     % Frequenzen       in [1/s]
22 freq=linspace(500,1500);        % Frequenz         in [1/s]
23
24 % Linearisierung
25 y = tan(2*pi*f.*delta_t);       % Y-Achse Faktor - einheitenlos
26
27 % Fitting
28 f1=polyfit(f, y, 1);
29 m=f1(1,1);
30
31 y1=polyval(f1,freq);
32
33 L = (m*(R+Rs))/(2*pi)
34
35 y2=atan((2*pi*L*f)/(R+Rs))./(2*pi*f);
36
37 figure(1)
38 subplot(1,2,1)
39     plot(f,y, 'o', freq,y1,'r','linewidth',2);
40     grid on;
41     title('Induktivität 1')
42     subtitle(['L=' num2str(L)])
43     xlabel('Frequenz f in Hz')
44     ylabel('Faktor tan(2 pi f d_t)')
45 subplot(1,2,2)
46     plot(E(:,1), E(:,2), 'o', f, y2,'r','linewidth',2);
47     grid;
48     title('Induktivität 2')
49     xlabel('Frequenz f in Hz')
50     ylabel('Zeitverschiebung t in s')
51
52 % save current plot to img/-folder
53 imagePath = fullfile('../img/', mfilename);
54 print(imagePath, '-dpng');

```

```

1 % Aktorik & Sensorik - WS 2020
2 %
3 % 2.4 Berechnung der Reibungskonstanten
4 %
5 % Datum:      12.11.2020
6 % Autoren:    Anton Kress,      S872899
7 %             Jan Abel,         S876662
8
9 clear
10 home
11 close all
12
13 FolderName = "./src/";
14 Leerlauf_Name = "Leerlauf.mat";

```

```

15 Leerlauf = fullfile(FolderName, Leerlauf_Name);
16 load(Leerlauf);
17
18 Pz = 2000/(2*pi);           % Pulse Inkrementalgeber      in [inc/rad]
19 lambda = 1000/Pz;          % Umrechnungsfaktor          in [(ms rad)/(s inc)
    ]
20 I = Leerlauf(:,2);          % Strom I_a              in [A]
21 INC = Leerlauf(:,3);        % INC per T            in [INC/ms]
22 w = lambda*INC;             % Winkelgeschwindigkeit  in [rad/s]
23 km = 0.022031575949394;    % Momentenkonstante     in [Nm/A]
24
25 % lineares Fitting im Arbeitsbereich
26 f2 = polyfit(I(2:end), w(2:end), 1);
27 % Strom Vektor
28 x2 = linspace(0, 0.05);
29 % Winkelges. Vektor
30 y2 = polyval(f2, x2);
31 % Steigung m hat die Einheit [rad/(A s)]
32 m = f2(1);
33 % Reibungskonstante cr in [(Nm s)/rad]
34 cr = km*1/m
35
36 figure(1);
37     plot(I,w,'x', x2, y2, 'r', 'linewidth', 2);
38     title('Reibungskonstante');
39     subtitle(['c_r=' num2str(cr)])
40     grid;
41     axis([0.038 0.048 0 550]);
42     xlabel('Strom I in A');
43     ylabel('Winkelgeschwindigkeit w in rad/s');
44
45 % save current plot to img/-folder
46 imagePath = fullfile('..img/', mfilename);
47 print(imagePath, '-dpng');

```

## 3 Labor 3

### 3.1 Einleitung und Ziel

Im 3. Labor des Moduls Aktorik und Sensorik soll ein mathematische Modell eines Gleichstrommotors aufgestellt und in Simulink umgesetzt werden.

Die dafür nötigen Konstanten (u.a Ankerwiderstand, Induktivität, etc.) sind in den beiden vergangenen Versuchen bereits bestimmt worden. Um das Trägheits-moment  $J$  – die einzige fehlende Konstante im Modell – zu bestimmen, wird das Modell mit einer Messung am realen System verglichen. In dieser Messung wurde ein Spannungs-Sprung auf den Motor gegeben und der Strom als Sprungantwort aufgenommen.

## 3.2 Grundlagen und Theorie

Das Blocksschaltbild, welches in Simulink umzusetzen ist, resultiert aus den beiden folgenden DGL.

$$\begin{aligned} \dot{i}(t) &= \frac{1}{L} [u(t) - (R + R_s) \cdot i(t) - k_e \cdot \omega(t)] \\ \dot{\omega}(t) &= \frac{1}{J} [k_m \cdot i(t) - C_r \omega(t)] \end{aligned} \tag{25}$$

Die erste Gleichung ergibt sich aus der Maschengleichung des elektrischen Teils. Der zweite Teil der DGL ist auf die Summation der Drehmomente zurückzuführen.

### 3.3 Aufgabenstellung und Versuch

Aus den bereits aufgestellten DGL-System kann das Blockschaltbild in Simulink erstellt werden.

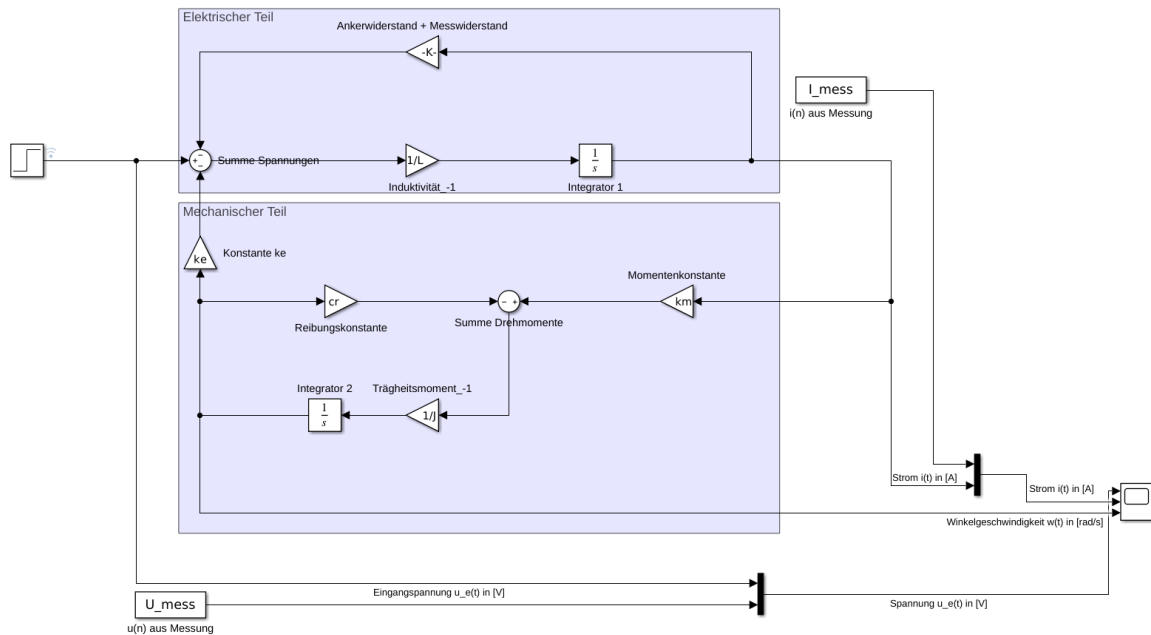


Abbildung 8: Blockschaltbild in Simulink

Als Eingang wurde ein Step-Block benutzt und als Ausgang ein Scope-Block. Die erste DGL wurden im oberen Teil des Modell realisiert und beschreibt den elektrischen Teil des Systems. Im unteren wird der mechanische Teil des Motors modelliert der aus der zweiten DGL hervorgeht.

Die schon ermittelten Konstanten des Systems wurden in einem Matlab-File abgespeichert und werden über dieses auch aufgerufen. Auch die Daten der Messung des Spungs und der Sprungantwort sind hier zu finden.

Um den gemessenen Spung und die Sprungantwort in Simulink anzuzeigen wurde der Block "From Workspace" benutzt der jeweils den Zeit-Spannungs-Vektor und den Zeit-Spannungs-Vektor lädt.

Der Spung aus dem Modell wurden dem Sprung aus der Messung mit folgenden Parameter angepasst.

Step time	0.048s
Final Value	8.2V
Sample time	0.001s

Abbildung 9: Parameter Step Block

Um das Trägheitsmoment  $J$  zu bestimmen, wurde dann  $J$  auf den Initialwert von  $10^{-3}\text{Kg} \cdot \text{m}^2$  gesetzt. Dieser stammt aus dem Datenblatt des DCX10L aus der Vorlesung. Danach haben wir das System für 30 Sekunden simuliert und erhielten folgendes Ergebnis.

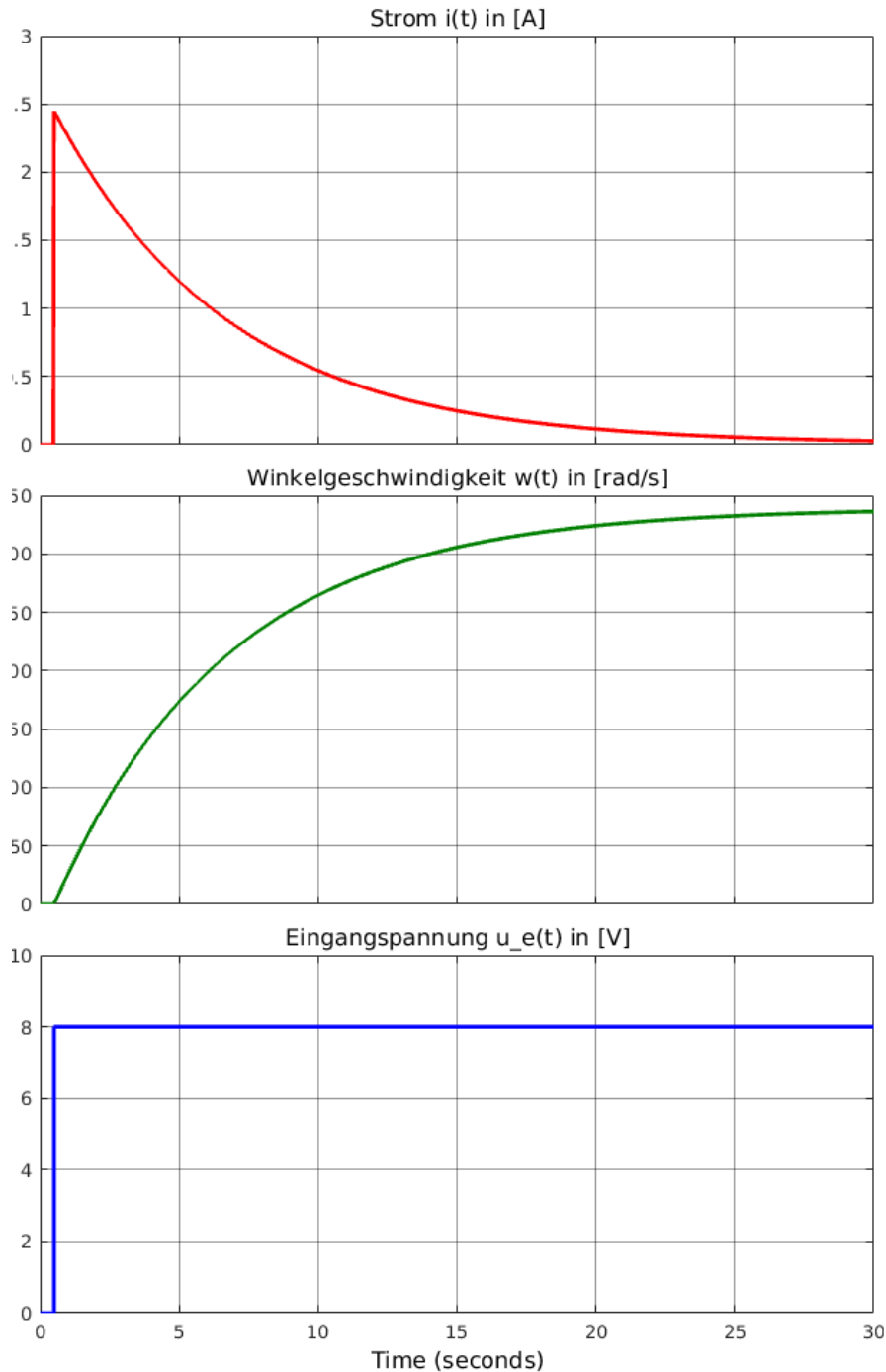


Abbildung 10: Simulation 1

Wir haben dann durch manuelles iteratives Anpassen den Wert des Trägheitsmoments so bestimmt, dass die Funktion des Modells mit den Messdaten übereinstimmt.

$$J \simeq 5\mu\text{Kg} \cdot \text{m}^2 \quad (26)$$

Anschließend simulierten wir in der Zeit der gegebenen Messdaten  $\Delta T = 0.6\text{s}$ . Daraus ergab sich folgendes Ergebnis.

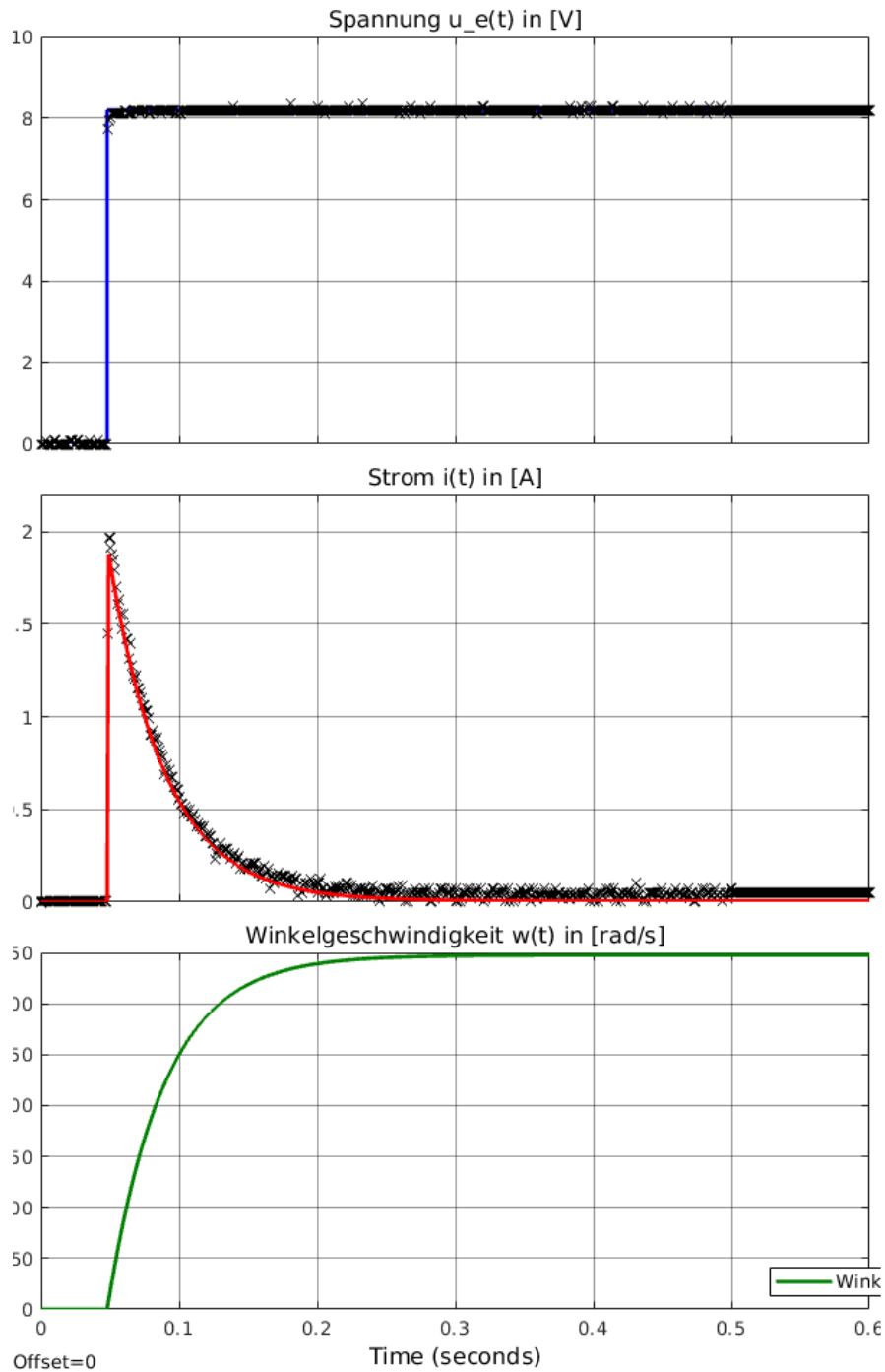


Abbildung 11: Simulation 2



### 3.4 Diskussion und Zusammenfassung

Der exponentiell fallende Stromverlauf ist ein normales Verhalten des Anlaufstroms eines Motors. Dies ist daher zu erklären, dass die Schwungmasse an der Welle des Motors aus der Ruhelage erst auf Nenndrehzahl gebracht werden muss. Dafür ist im Anschaltmoment eine große Energie nötig, welche über den erhöhten Strom zugeführt wird.

Die errechneten Funktionen unseres Modells stimmen nahezu vollständig mit den gemessenen Daten überein. Sie liegen unter einer maximalen Abweichung von 5%. Dieses gute Ergebnis ist auf ein ausreichend gutes Modell und valide Messdaten zurückzuführen.

## 3.5 Anhang

### 3.5.1 Aufgabenbeschreibung

#### 3 Termin

##### 3.1 Simulation des Motors

Erzeugen Sie unter MATLAB / Simulink eine Simulation des permanent erregten Gleichstrommotors. Benutzen Sie dafür Signalquellen und -senken, Übertragungsfunktionen und Summationspunkte. Stellen Sie die Winkelgeschwindigkeit und den Ankerstrom als Funktion der Zeit in jeweils einem Scope (Signalsenke) dar. Verwenden Sie dabei die von Ihrem Team gemessen bzw. geschätzten Parameter!  
Stellen Sie sicher, dass Sie mindestens zwei Sekunden simulieren!

##### 3.2 Messen des Einschaltverhaltens & Vergleich mit Simulation

Messen Sie mit dem PicoScope das Einschaltverhalten des Stromes des Motors und speichern Sie die Messwerte ab. Erklären Sie dabei, warum der Stromverlauf so ist, wie Sie ihn gemessen haben. Nun lesen Sie die Messwerte in MATLAB ein und stellen Sie den gemessenen Stromverlauf mit der Anzeige des simulierten Motorstromes in einem Bild dar.

Beantworten Sie folgende Fragen: Sind die Verläufe identisch? Warum nicht? Woran liegt es?

##### 3.3 Diskussion

Diskutieren Sie, ob Ihre vorwiegend aus statischen Messungen stammenden Werte eine vernünftige Simulation des Motorverhaltens ermöglichen.  
Passen Sie die Parameter der von Ihnen erzeugten MATLAB-Simulation so an, dass der Unterschied zwischen der Messung und der Simulation eine maximale Abweichung von 5 % beträgt!

Beuth-Hochschule für Technik Berlin	Labor für Automatisierungstechnik	Übungsveranstaltung für Aktorik & Sensorik
Prof. Dr.-Ing. FJ Morales		7 von 10

### 3.5.2 Matlab Code

```
1 %  
   %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
2 % Aktorik & Sensorik - WS 2020  
3 %  
4 % Labor 3 - Simulinkmodell eines Spannungsgesteuerten Gleichstrommotor  
5 %
```

```

6 % Datum:      24.11.2020
7 % Autoren:    Anton Kress,      S872899
8 %             Jan Abel,         S876662
9 %
   %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
10 clear
11 home
12 close all
13
14 %
   %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
15 % Konstanten wurden in den vorherigen Versuchen bestimmt
16 R = 3.263586106324851;           % Ankerwiderstand      in [V/A]
17 L = 1.754462619198655e-04;       % Induktivität      in [Vs/A]
18 ke = 0.023520507251362;          % Konstante         in [Vs/ rad]
19 km = 0.022031575949394;          % Momentenkonstante in [Nm / A]
20 cr = 3.240869773689936e-07;      % Reibungskonstante in [Nm*s/rad]
21 Rs=1;                             % Messwiderstand    in [V/A]
22
23 %
   %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
24 J = 0.000005;                    % Trägheitsmoment   in [kg*m^2]
25 %
   %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
26 % Laden der Daten des gemessenen Sprung und der Sprungantwort
27 FolderName = "./src/";
28 F_Name = "F.mat";
29 F = fullfile(FolderName, F_Name);
30 F_import = load(F);
31
32 % Eingangssprung u_e(t)
33 U_mess(:,1) = (1 : length(F_import.A))' * F_import.Tinterval;
34 U_mess(:,2) = F_import.B;
35
36 % Sprungantwort i_a(t)
37 I_mess(:,1) = (1 : length(F_import.A))' * F_import.Tinterval;
38 I_mess(:,2) = F_import.A;

```

## 4 Labor 4

### 4.1 Einleitung und Ziel

Im 4. Labor soll der zuvor modellierte, spannungsgesteuerte Gleichstrommotor nun stromgesteuert werden. Dieses soll Mittels eines Vierquadrantensteller auch H-Brücke genannt in Simulink als Modell umgesetzt werden.

## 4.2 Grundlagen und Theorie

Mit Hilfe einer sogenannten H-Brücke lassen sich die Wicklungen eines Motors auf eine einfache Art und Weise ansteuern.

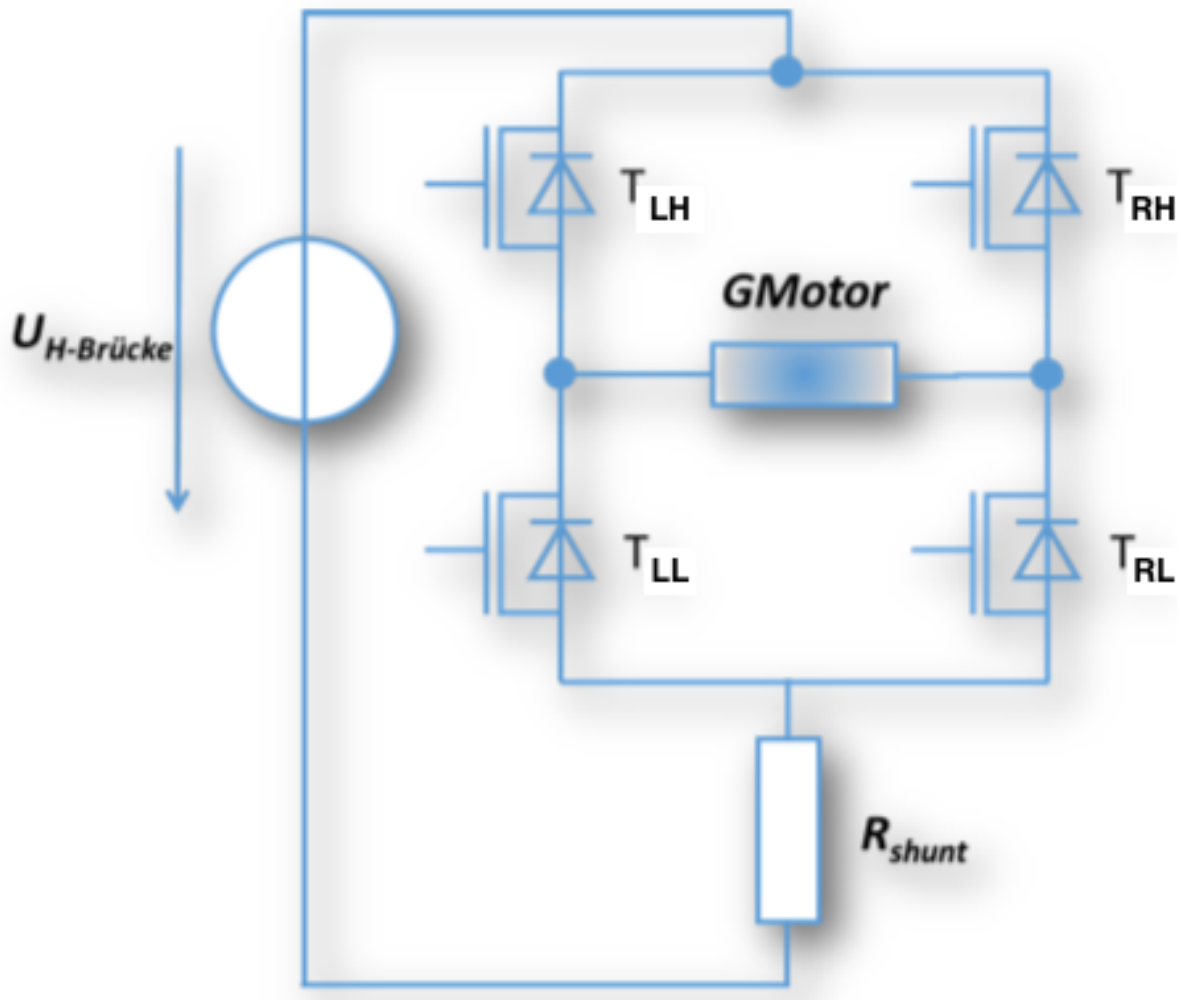


Abbildung 12: Schaltung H-Brücke

Um den Strom positiv, also von links nach rechts, fließen zu lassen, müssen die MOSFETS  $T_{LH}$  und  $T_{RL}$  angesteuert werden.

Wenn diese beiden besagten Transistoren ausgeschaltet werden, treibt die Energie im Magnetfeld der Spule den Strom weiter. Dadurch fließt der Motorstrom  $I_M$  durch die parasitären Bodydioden der Transistoren  $T_{LL}$  und  $T_{RH}$ .

Dieser Strom kann indirekt durch die Spannung die über den Messwiderstand  $R_{shunt}$  gemessen werden.

Soll der Motor in die entgegengesetzte Richtung betrieben werden, müssen die MOSFETS  $T_{RH}$  und  $T_{LL}$  angesteuert werden.

Dadurch gibt es insgesamt 4 Zustände. Links-Rechts-Lauf Transistoren an oder ausgeschaltet und Rechts-Links-Lauf Transistoren an oder ausgeschaltet.

Um die H-Brücke zu betreiben wird eine Steuerung benötigt. Die Steuerung benötigt als Eingänge den Sollstrom  $I_{soll}$ , den momentanen Strom  $I_{ist}$  und die Eingangsspannung. Als Ausgänge besitzt die Steuerung die gepulste Motorspannung.

Die 4 Maschengleichung der 4 Zustände lauten wie folgt, wenn der Drain-Source Widerstand vernachlässigt wird.

Link-Rechts-Lauf:

$$\begin{aligned} 0 &= U_H - R \cdot i_M - L \cdot \dot{i}_M - k_e \cdot \omega - R_{Shunt} \cdot i_M \\ 0 &= U_H + 2U_D + R \cdot i_M + L \cdot \dot{i}_M + k_e \cdot \omega + R_{Shunt} \cdot i_M \end{aligned} \quad (27)$$

Rechts-Links-Lauf:

$$\begin{aligned} 0 &= U_H + R \cdot i_M + L \cdot \dot{i}_M + k_e \cdot \omega - R_{Shunt} \cdot i_M \\ 0 &= U_H + 2U_D - R \cdot i_M - L \cdot \dot{i}_M - k_e \cdot \omega + R_{Shunt} \cdot i_M \end{aligned} \quad (28)$$

## 5 Aufgabenstellung und Versuch

### 5.1 Bestimmung der Ankerinduktivität

Um die Ankerinduktivität zu bestimmen, muss der Motor gebremst sein, damit die induzierte Gegenspannung  $U_{ind} = 0$  ist. Dann ergibt sich folgendes Schaltbild.

### 5.2 Bestimmung der Reibungskonstanten

Die Reibungskonstante kann über folgende DGL berechnet werden. Die Summe der Drehmomente ergibt sich aus dem Drehmoment  $M_m$  abzüglich des Reibungsdrehmoments  $M_R$  und des Lastdrehmoments. Diese sind gleich der zeitlichen Änderung der Winkelgeschwindigkeit  $\frac{d\omega}{dt}$  multipliziert mit dem Trägheitsmoment  $J$ .

$$\begin{aligned} J \frac{d\omega}{dt} &= \sum M = M_m - M_R - M_L \\ J \frac{d\omega}{dt} &= \sum M = k_m \cdot i(t) - c_r \omega(t) - M_L \end{aligned} \quad (29)$$

Um die Reibungskonstante  $c_r$  nun zu bestimmen, ist es günstig das System im Leerlauf zu betrachten, da  $M_L = 0$  und nach Abklingen des Einschaltvorgangs  $\frac{d\omega}{dt} = 0$ . Aus der DGL ergibt sich folgende einfache Gleichung.

$$0 = k_m \cdot i(t) - c_r \omega(t) \quad (30)$$

Daraus ergibt sich folgende Funktion.

$$\omega = f_3(i) = \frac{k_m}{c_r} i \quad (31)$$

Nun kann mittels der linearen Regression aus den beiden Vektoren die Steigung  $m$  bestimmt werden, aus der sich die Reibungskonstante  $c_r$  berechnen lässt.

$$\begin{aligned} m &= \frac{k_m}{c_r} \\ c_r &= \frac{k_m}{m} \simeq 3,24 \cdot 10^{-9} \frac{\text{Nms}}{\text{rad}} \end{aligned} \quad (32)$$

## 6 Zusammenfassung

Mittels der Messwerte sind wir auf folgende Werte für die Ankerinduktivität  $L$  und die Reibungskonstante  $c_r$  gekommen.

$$\begin{aligned} L &= 175.462\mu\text{H} \\ c_r &= 3,24 \cdot 10^{-9} \frac{\text{Nms}}{\text{rad}} \end{aligned} \tag{33}$$

Die Berechnung der Reibungskonstante stellte uns vor keine Herausforderung und ist sowohl Einheitenmäßig als auch Dimensionsmäßig nachvollziehbar.

Die Bestimmung der Ankerinduktivität stellte uns allerdings vor die Herausforderung das System zu linearisieren (Abbildung 2: Induktivität 1). Nach der Linearisierung der Funktion und anschließender Regression haben wir den errechneten Wert der Induktivität wieder in die Ursprungsfunktion eingesetzt (Abbildung 2: Induktivität 2). Hier ist zu erkennen, dass die ermittelte Gerade sich nur bedingt in der Nähe der Messpunkte befindet. Wir vermuten, dass entweder eine Ungenauigkeit in unseren Modell vorhanden ist oder es ist einen vielleicht sogar frequenzabhängigen Offset in den Messdaten gibt. Um dieses Verhalten genauer zu untersuchen, haben wir die Funktion und die Messdaten interaktiv in Desmos erstellt.

Wir konnten diese Diskrepanz leider nicht abschließend klären, sind aber zum Entschluss gekommen das unser Ergebnis von  $175.462\mu\text{H}$  ausreichend genau und auch realistisch ist.



## 7 Anhang

### 7.1 Aufgabenbeschreibung

#### 2 Termin

##### 2.1 Vorbereitung zur Bestimmung der Ankerinduktivität

Die Ankerinduktivität des Motors soll bestimmt werden. Dazu ist bei gebremstem Motor die Phasenlage des Stromes gegenüber der steuernden Spannung zu messen.

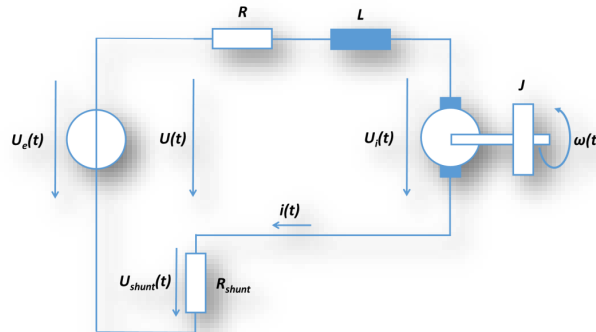


Abb. 2.1: Messung des Motorstromes bzw. Ankerstromes

Beantworten Sie die folgende Frage: Warum wird bei gebremstem Motor gemessen?

##### 2.2 Berechnung der Induktivität

Berechnen Sie entweder mit Hilfe der komplexen Wechselstromrechnung oder mit Hilfe der Übertragungsfunktion  $U_{shunt}(s) / U_e(s)$  ausgehend von der Abbildung 2.1 den Winkel zwischen den Spannung  $U_e$  und  $U_{shunt}$ .

Lösen Sie die entstehende Gleichung nach der gesuchten Größe, der Induktivität  $L$ , auf.

##### 2.3 Messung des Phasenwinkels

Messen Sie mit dem PicoScope<sup>1</sup>, eingestellt auf Betrieb mit zwei Kanälen, den Versatz bzw. den Winkel zwischen  $U_e$  und  $U_R$ . Benutzen Sie als Signalquelle für das benötigte Sinussignal den in das PicoScope eingebauten Generator bei einer Frequenz von z.B. 1 kHz. Entlasten Sie bitte den Ausgangstreiber des Gerätes und benutzen Sie den vorhandenen Leistungsverstärker. Bestimmen Sie mit Hilfe des Ergebnisses aus 2.2) die Induktivität  $L$  des Motors.

##### 2.4 Berechnung & Messung der Reibungskonstante

Stellen Sie eine Gleichung zur Ermittlung der Reibungskonstante  $C_r$  auf.

Hinweise:

1:  $\tau M = J \cdot d\omega/dt$

2: Wie groß ist  $M_t$  im Leerlauf?

3: Wie groß ist  $d\omega/dt$  nach Abklingen des Einschaltvorganges?

<sup>1</sup> PicoScope ist ein über die USB Schnittstelle angeschlossenes Gerät mit dessen Hilfe der PC als Oszilloskop fungieren kann.

Beuth-Hochschule für Technik Berlin	Labor für Automatisierungstechnik	Übungsveranstaltung für Aktorik & Sensorik
Prof. Dr.-Ing. FJ Morales		5 von 10

Messen Sie alle Größen, die Sie zur Bestimmung von  $C_r$  benötigen und geben sie den Wert von  $C_r$  für den Ihnen vorliegenden Motor an.

Beuth-Hochschule für Technik Berlin	Labor für Automatisierungstechnik	Übungsveranstaltung für Aktorik & Sensorik
Prof. Dr.-Ing. FJ Morales		6 von 10

## 7.2 Matlab Code

```
1 % Aktorik & Sensorik - WS 2020
2 %
3 % 2.1-2.3 Berechnung der Induktivität mittels des Phasenwinkels
4 %
5 % Datum:      12.11.2020
6 % Autoren:    Anton Kress,      S872899
7 %             Jan Abel,         S876662
8
9 clear
10 home
11 close all
12
```

```

13 FolderName = "./src/";
14 E_Name = "E.mat";
15 E = fullfile(FolderName, E_Name);
16 load(E);
17
18 R = 3.263586106324851;           % Ankerwiderstand      in [V/A]
19 Rs = 1;                         % Messwiderstand   in [V/A]
20 delta_t = E(:,2);               % Phasenverschiebung in [s]
21 f = E(:,1);                     % Frequenzen       in [1/s]
22 freq=linspace(500,1500);        % Frequenz         in [1/s]
23
24 % Linearisierung
25 y = tan(2*pi*f.*delta_t);       % Y-Achse Faktor - einheitenlos
26
27 % Fitting
28 f1=polyfit(f, y, 1);
29 m=f1(1,1);
30
31 y1=polyval(f1,freq);
32
33 L = (m*(R+Rs))/(2*pi)
34
35 y2=atan((2*pi*L*f)/(R+Rs))./(2*pi*f);
36
37 figure(1)
38 subplot(1,2,1)
39     plot(f,y, 'o', freq,y1,'r','linewidth',2);
40     grid on;
41     title('Induktivität 1')
42     subtitle(['L=' num2str(L)])
43     xlabel('Frequenz f in Hz')
44     ylabel('Faktor tan(2 pi f d_t)')
45 subplot(1,2,2)
46     plot(E(:,1), E(:,2), 'o', f, y2,'r','linewidth',2);
47     grid;
48     title('Induktivität 2')
49     xlabel('Frequenz f in Hz')
50     ylabel('Zeitverschiebung t in s')
51
52 % save current plot to img/-folder
53 imagePath = fullfile('../img/', mfilename);
54 print(imagePath, '-dpng');

```

```

1 % Aktorik & Sensorik - WS 2020
2 %
3 % 2.4 Berechnung der Reibungskonstanten
4 %
5 % Datum:      12.11.2020
6 % Autoren:    Anton Kress,      S872899
7 %             Jan Abel,         S876662
8
9 clear
10 home
11 close all
12
13 FolderName = "./src/";
14 Leerlauf_Name = "Leerlauf.mat";

```

```

15 Leerlauf = fullfile(FolderName, Leerlauf_Name);
16 load(Leerlauf);
17
18 Pz = 2000/(2*pi);           % Pulse Inkrementalgeber      in [inc/rad]
19 lambda = 1000/Pz;          % Umrechnungsfaktor           in [(ms rad)/(s inc)
    ]
20 I = Leerlauf(:,2);          % Strom I_a                in [A]
21 INC = Leerlauf(:,3);        % INC per T              in [INC/ms]
22 w = lambda*INC;             % Winkelgeschwindigkeit     in [rad/s]
23 km = 0.022031575949394;    % Momentenkonstante        in [Nm/A]
24
25 % lineares Fitting im Arbeitsbereich
26 f2 = polyfit(I(2:end), w(2:end), 1);
27 % Strom Vektor
28 x2 = linspace(0, 0.05);
29 % Winkelges. Vektor
30 y2 = polyval(f2, x2);
31 % Steigung m hat die Einheit [rad/(A s)]
32 m = f2(1);
33 % Reibungskonstante cr in [(Nm s)/rad]
34 cr = km*1/m
35
36 figure(1);
37     plot(I,w,'x', x2, y2, 'r', 'linewidth', 2);
38     title('Reibungskonstante');
39     subtitle(['c_r=' num2str(cr)])
40     grid;
41     axis([0.038 0.048 0 550]);
42     xlabel('Strom I in A');
43     ylabel('Winkelgeschwindigkeit w in rad/s');
44
45 % save current plot to img/-folder
46 imagePath = fullfile('..img/', mfilename);
47 print(imagePath, '-dpng');

```