

# ProjektB-Elektrik

## Simulationstechnik - Bericht

Studiengang Elektrotechnik

Studienrichtung Fahrzeugelektronik

Duale Hochschule Baden-Württemberg Ravensburg, Campus Friedrichshafen

von

Alexander Herrmann    Johannes Ruffer

Abgabedatum:	19.04.2020
Bearbeitungszeitraum:	01.02.2020 - 19.04.2020
Matrikelnummer:	9859538 x 1011921
Kurs:	TFE18-2
Gutachter der Dualen Hochschule:	Sipler



# Eidesstattliche Erklärung

Gemäß Ziffer 1.1.13 der Anlage 1 zu §§ 3, 4 und 5 der Studien- und Prüfungsordnung für die Bachelorstudiengänge im Studienbereich Technik der Dualen Hochschule Baden-Württemberg vom 29.09.2015.

Wir versichern hiermit, dass wir unsere Projektarbeit mit dem Thema:

*Projekt B-Elektrik*

selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt haben. Wir versichern zudem, dass die eingereichte elektronische Fassung mit der gedruckten Fassung übereinstimmt.

Friedrichshafen, den 21. März 2020

---

Alexander Herrmann

---

Johannes Ruffer

---

AUTOREN



# Kurzfassung

Der folgende Bericht wurde von zwei Studierenden der Duale Hochschule Baden-Württemberg (DHBW)-Ravensburg am Campus Friedrichshafen verfasst. Im Rahmen des Moduls Simulationstechnik sollen die Studierenden mithilfe von Matlab und Matlab-Simulink das Verhalten des Gleichstrommotors eines Unwuchtsystems vereinfachen, simulieren und die darauf folgenden Ergebnisse analysieren und interpretieren.

Zunächst wird das Originalsystem analysiert. Dieses wird zur genaueren Betrachtung in kleine Teilsysteme unterteilt. In diesem Fall wird der Gleichstromkreis des Elektromotors mithilfe eines physikalischen Modells dargestellt. Dies soll den Grundstein für die spätere Simulation legen.

Als nächstes wird das mathematische Modell aufgestellt, in welchem die Spannung die einzige Eingangsgröße darstellt. Anschließend werden Systemgleichungen aufgestellt, in welchem die Zusammenhänge der Ein- und Ausgangsgrößen klar werden. Zu guter Letzt sollen die aufgestellten Modelle in Matlab-Simulink mithilfe von Blockdiagrammen implementiert werden.

Im folgenden Bericht werden alle Modelle dargestellt, erläutert und analysiert.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Aufgabenteil a.)</b>	<b>3</b>
2.1. Physikalisches Modell . . . . .	3
2.2. Mathematisches Modell . . . . .	4
2.3. Simulation . . . . .	5
<b>3. Aufgabenteil b.)</b>	<b>7</b>
3.1. Simulationsergebnisse . . . . .	7
<b>4. Fazit</b>	<b>11</b>
<b>Autorenverzeichnis</b>	<b>13</b>
<b>Verzeichnis verwendeter Abkürzungen und Formelzeichen</b>	<b>15</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>17</b>
<b>Sachwortverzeichnis</b>	<b>17</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>19</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>21</b>
<b>A. Anhang</b>	<b>23</b>
1. Weitere Abbildungen . . . . .	23





# 1. Einleitung

Ausgangsgrößen sind das Motormoment  $M_A$ , die Unwuchtkraft  $F_U$ , die Winkelgeschwindigkeit  $\Omega$  und die Strecke  $s$ , für die Berechnung dieser ist es nötig die jeweiligen Systemgleichungen aufzustellen.



## 2. Aufgabenteil a.)

- a.) Leiten Sie die Gleichungen der Nebenschlussmaschine her und modellieren Sie die Systemgleichungen des mechatronischen Unwuchtsystems in SIMULINK. Bestimmen Sie Unwuchtkraft  $F_U$ , die durch die Rotation der Masse  $m_2$  auf die Masse  $m_1$  wirkt.

### 2.1. Physikalisches Modell

In Abbildung 2.1 wird der Gleichstrommotor des Unwuchtsystems, vereinfacht durch das physikalische Modell einer Nebenschlussmaschine dargestellt. Diese besteht aus einem Wicklungssystem des Ankerkreises und einer Erregerwicklung, welche dem Motor parallel geschaltet ist. Aufgrund von Wicklungen und Streufeldern im Ankerkreis entsteht eine Induktivität  $L_A$ , über welche die Spannung  $U_L$  abfällt. Dazu ist ein Widerstand  $R_A$  geschaltet. Der Gleichstrommotor wird dabei ausschließlich von der Klemmspannung  $U$  gesteuert.

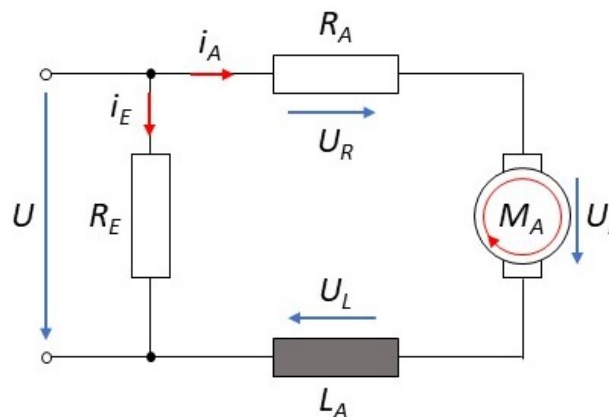


Abbildung 2.1.: Physikalisches Modell einer Nebenschlussmaschine

Die gegebenen Systemparameter lauten dabei:

Ankerflussverkettung, Motorkonstante	$M_A = 50 \frac{\text{Nm}}{\text{A}}$
Ohmscher Widerstand des Ankerkreises	$R_A = 0.1 \Omega$
Induktiver Widerstand des Ankerkreises	$L_A = 10 \frac{\text{Vs}}{\text{A}} = 10 \text{H}$
Klemmspannung	$U = 100 \text{V}$

**Tabelle 2.1.:** Systemparameter des physikalischen Modells für die Nebenschlussmaschine

## 2.2. Mathematisches Modell

Aufgrund der Schaltung in Abbildung 2.1 und der Vernachlässigung des Erregerstroms  $i_E$ , ergibt sich das mathematische Modell der Nebenschlussmaschine mit den drei Systemgleichungen des Unwuchtsystems:

$$\begin{aligned}
 U &= U_R + U_i + U_L \\
 U &= R_A i_A + K_A \dot{\varphi} + L_A \frac{di_A}{dt} \\
 \frac{di_A}{dt} &= \frac{1}{L_A} (U - K_A \dot{\varphi} - i_A R_A) = f_1(U, \dot{\varphi}, i_A)
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Translatorisch:

$$\begin{aligned}
 (m_1 + m_2) \ddot{s} - m_2 e (\ddot{\varphi} \sin \varphi + \dot{\varphi}^2 \cos \varphi) + d_t \dot{s} + cs &= 0 \\
 \ddot{s} &= \frac{1}{m_1 + m_2} [m_2 e (\ddot{\varphi} \sin \varphi + \dot{\varphi}^2 \cos \varphi) - d_t \dot{s} - cs] = f_2(\varphi, \dot{\varphi}, \ddot{\varphi}, s, \dot{s})
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

Rotatorisch:

$$\begin{aligned}
 m_2 e^2 \dot{\varphi} - m_2 e \sin \varphi (\ddot{s} + g) d_r \dot{\varphi} - M_A &= 0 \\
 m_2 e^2 \dot{\varphi} - m_2 e \sin \varphi (\ddot{s} + g) d_r \dot{\varphi} - K_A i_A &= 0 \\
 \ddot{\varphi} &= \frac{1}{m_2 e^2} [m_2 e \sin \varphi (\ddot{s} + g) d_r \dot{\varphi} + K_A i_A] = f_3(\varphi, \dot{\varphi}, \ddot{s}, i_A)
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

Die gegebenen mechanischen Systemparameter lauten dabei:

Um die Unwuchtkraft des Systems zu bestimmen, muss das 2. Newton'sche Axiom 2.4 angewendet werden:

$$F = m \cdot a \tag{2.4}$$

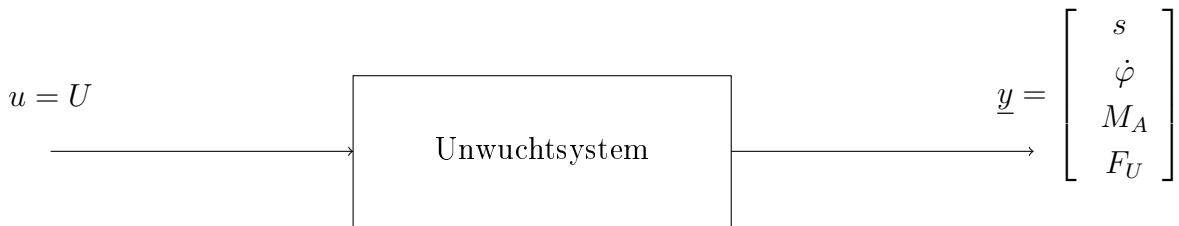
Massen	$m_1 = 90\text{kg}; m_2 = 10\text{kg}$
Federkonstante	$c = 1600 \frac{\text{N}}{\text{m}}$
Dämpfungskonstanten	$d_t = 5 \frac{\text{Ns}}{\text{m}}$
Rotationsarm	$e = 0.2\text{m}$
Erdbeschleunigung	$g = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

**Tabelle 2.2.:** Mechanische Systemparameter der Nebenschlussmaschine

Daraus ergibt sich, angepasst an das Unwuchsystem:

$$\begin{aligned}
 F_U &= -m_2 \cdot \underline{a} \\
 \text{mit } \underline{a} &= \begin{bmatrix} e\ddot{\varphi} \cos \varphi - e\dot{\varphi}^2 \sin \varphi \\ -e\ddot{\varphi} \sin \varphi - e\dot{\varphi}^2 \cos \varphi \end{bmatrix} \text{ ergibt sich:} \\
 \underline{F_U} &= \begin{bmatrix} e\ddot{\varphi} \cos \varphi - e\dot{\varphi}^2 \sin \varphi \\ -e\ddot{\varphi} \sin \varphi - e\dot{\varphi}^2 \cos \varphi \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

Das Unwuchsystem kann modelliert nun wie folgt dargestellt werden:

**Abbildung 2.2.:** Unwuchsystem mit Eingangsspannung und Ausgang (Kinematik, Kinetik)

## 2.3. Simulation

Aufgrund einer Kopplung der beiden Gleichungen 2.2 und 2.3 entsteht eine sogenannte algebraische Schleife, die besagt:

Ursache gleich Wirkung gleich Ursache.

Durch eine Vereinfachung des Systems soll die algebraische Schleife verhindert werden. Dies wird mithilfe von Matlab SIMULINK durchgeführt.



## 3. Aufgabenteil b.)

- b.) Untersuchen Sie die Wechselwirkungen zwischen Schwingsystem und Gleichstrommotor. Bestimmen Sie hierfür die zeitlichen Verläufe des Antriebsmoments  $M_A$ , der Winkelgeschwindigkeit  $\Omega$ , der Unwuchtkraft  $F_U$  und der Auslenkung  $s$  des Systems.

### 3.1. Simulationsergebnisse

Mithilfe von Scopes oder Plots werden nun die gesuchten Signale abgegriffen und als Funktionen der Zeit dargestellt.

Die Abbildungen 3.2, 3.3 und 3.4 sind Plots aus Matlab, die wie folgt definiert wurden:

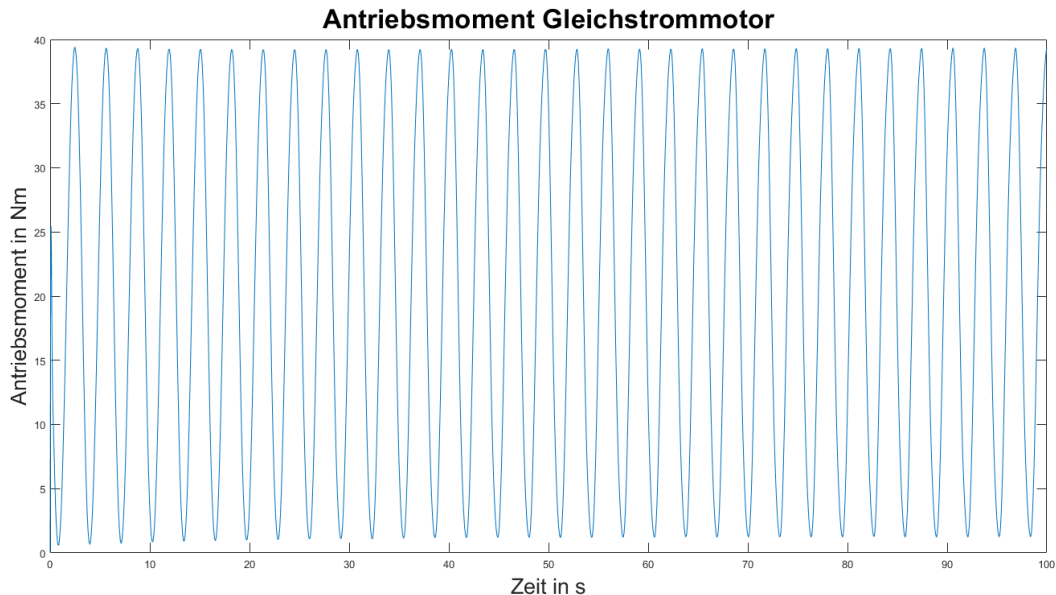
```
22 % Simulation
23 - out = sim('Block_Diagramm_ProjektB');
24
25 - figure(1),plot(out.s_out*1000);
26 - hold on;
27 - plot(out.F_U_out);
28 - hold off;
29 - xlabel('Zeit in s');
30 - ylabel('Weg s_{out} * 1000 in m, UnwuchtkraftF_U in N', 'Interpreter', 'tex');
31 - title('Auslenkung und Unwuchtkraft');
32 - legend('Weg s_{out} * 1000', 'UnwuchtkraftF_U');
33
34 - figure(2),plot(out.omega_out);
35 - xlabel('Zeit in s');
36 - ylabel('Winkelgeschwindigkeit in 1/s', 'Interpreter', 'tex');
37 - title('Winkelgeschwindigkeit Omega');
38
39 - figure(3),plot(out.M_A_out);
40 - xlabel('Zeit in s');
41 - ylabel('Antriebsmoment in Nm', 'Interpreter', 'tex');
42 - title('Antriebsmoment Gleichstrommotor');
```

Abbildung 3.1.: Codeausschnitt aus dem Workspace zur Definition der Plots

### 3. Aufgabenteil b.)

---

In den folgenden Abbildungen 3.2, 3.3 und 3.4 sind das Motormoment  $M$ , die Winkelgeschwindigkeit  $\Omega$ , die Strecke  $s$  und die Unwuchtkraft  $F_U$  über die Zeit von 100ms dargestellt. Für kleine Änderungen der Dämpfungskonstanten können die translatorischen und rotatorischen Bewegungsgleichungen getrennt betrachtet werden.

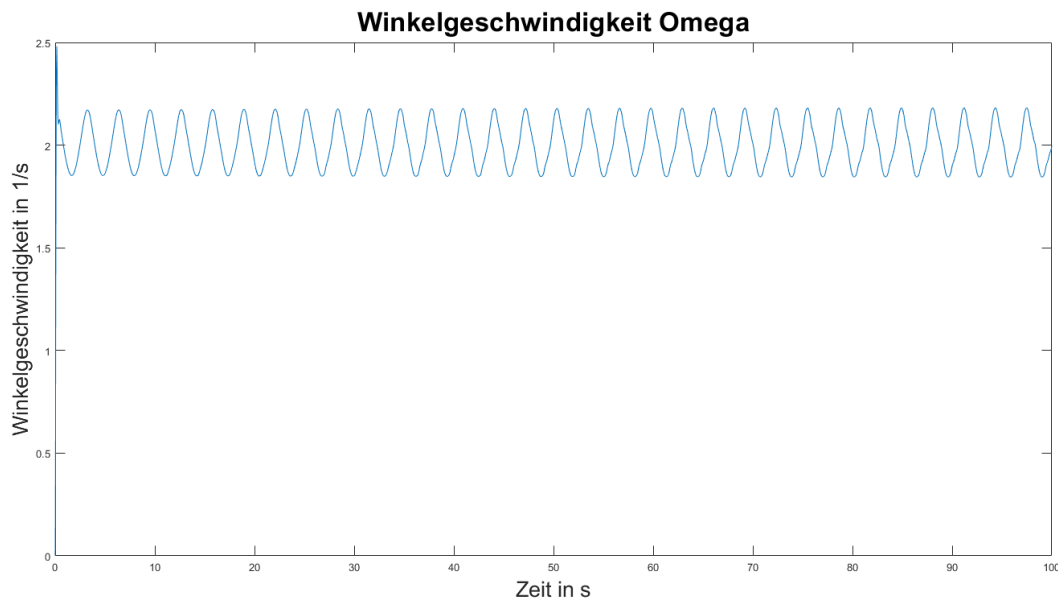


**Abbildung 3.2.:** Simulationsergebnis: Antriebsmoment des Gleichstrommotors

Das in 3.2 dargestellte Antriebsmoment ist hauptsächlich abhängig von der rotatorischen Bewegungsgleichung des Schwingensystems, ebenso wie die Winkelgeschwindigkeit  $\Omega$ . Im Verlauf dieser beiden Größen und aus dem gegebenen Parametersatz kann dieses Teilsystem dem Schwingungsfall zugewiesen werden, dessen zeitlicher Verlauf auf eine ungedämpfte Schwingung deuten lässt und damit auch auf die Grenzstabilität des Systems. Zur genaueren Analyse, wird der Wert der rotatorischen Dämpfungskonstante  $d_r$  verändert, um die Abhängigkeit von dieser zu überprüfen. Verdoppelt man den Wert von  $d_r$  verschiebt sich die Amplitude des Antriebsmoments um 20Nm nach oben. Bei einer weiteren Erhöhung wird die Kurve ebenfalls immer weiter nach oben gerückt, wobei sich jedoch die Amplitude von 40Nm kaum verändert.

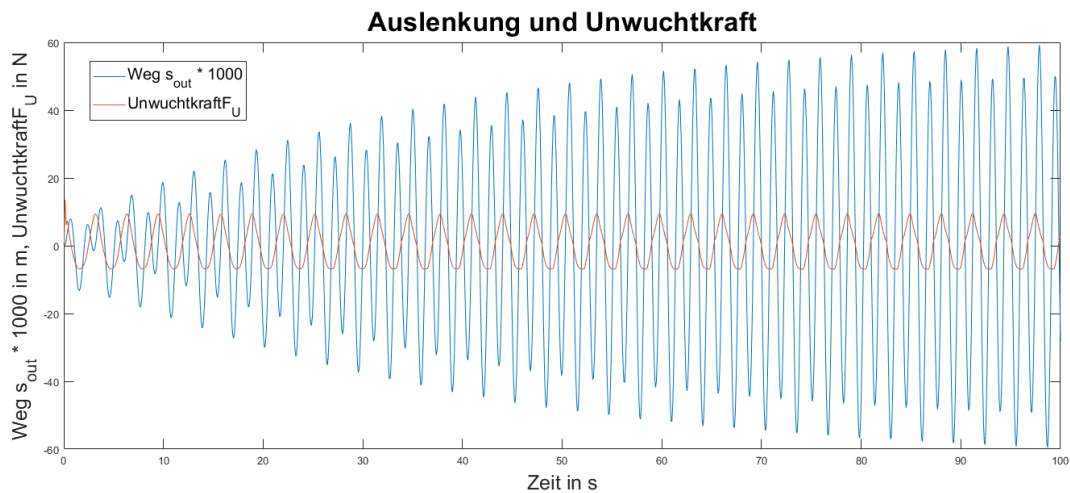
Unter den Standardbedingungen befindet sich die Winkelgeschwindigkeit zwischen  $1,85 \frac{1}{s}$  und  $2,18 \frac{1}{s}$ . Die Veränderungen an der Dämpfungskonstante  $d_r$  hatten keinen nennenswerten Einfluss auf die Winkelgeschwindigkeit. Um diese marginal zu Beeinflussen müsste entweder die Motorkonstante  $K_A$  angepasst werden, was sich wiederum auf das Antriebsmoment und die Unwuchtkraft auswirkt, oder  $d_t$  wird größer gewählt wodurch der Maximalwert von  $\Omega$  verkleinert wird.





**Abbildung 3.3.:** Simulationsergebnis: Winkelgeschwindigkeit des mechatronischen Systems

Auffällig ist in Abbildung 3.4, dass die Auslenkung die doppelte Frequenz der Unwuchtkraft hat. Für die Auslenkung und Unwuchtkraft des Systems ist vor allem die translatorische Bewegungsgleichung verantwortlich. Aus 3.4 ist ersichtlich, dass es sich bei diesem Teilsystem um einen Schwingfall handelt. Im weiteren lässt der zeitliche Verlauf beider Kurven auf zwei unterschiedliche Schwingungsverhalten schließen. Die Amplitude der Auslenkung zeigt ein ungedämpftes Verhalten, wodurch diese Teilgleichung als instabil klassifiziert werden kann. Dahingegen zeigt der Graph von  $F_U$  eine ungedämpfte Schwingung, bei gleichbleibender Amplitude und damit Eigenschaften eines grenzstabilen Systems. Um eine detailliertere Aussage über das translatorische System zu treffen wird dessen Dämpfungskonstante  $d_t$  variiert. Für die Auslenkung und Unwuchtkraft des Systems ist vor allem die translatorische Bewegungsgleichung verantwortlich. Aus 3.4 ist ersichtlich, dass es sich bei diesem Teilsystem um einen Schwingfall handelt. Im weiteren lässt der zeitliche Verlauf beider Kurven auf zwei unterschiedliche Schwingungsverhalten schließen. Die Amplitude der Auslenkung zeigt ein ungedämpftes Verhalten, wodurch diese Teilgleichung als instabil klassifiziert werden kann. Dahingegen zeigt der Graph von  $F_U$  eine ungedämpfte Schwingung, bei gleichbleibender Amplitude und damit Eigenschaften eines grenzstabilen Systems. Um eine detailliertere Aussage über das translatorische System zu treffen wird dessen Dämpfungskonstante  $d_t$  variiert. Bei einer Erhöhung wird die Amplitude im gleichen Zeitbereich verkleinert. Je höher  $d_t$  gewählt wird, desto kleiner wird die Amplitude der Auslenkung und der resultierende Graph lässt darauf deuten, dass sich die Schwingung einem stabilen ungedämpften System annähert. Die Unwuchtkraft zeigt keine Reaktion auf die veränderten Werte der Dämpfungskonstante, ebenso wie  $M_A$  und  $\Omega$ .



**Abbildung 3.4.:** Simulationsergebnis: Auslenkung·1000 und Unwuchtkraft des mechatronischen Systems

Für beide Teilsysteme gilt, dass sie in erster Linie von ihren Dämpfungskonstanten abhängig sind und sich dadurch nicht marginal gegenseitig beeinflussen, solange diese nicht extrem groß werden. Lässt man  $d_r$  gegen einen großen Wert laufen verkleinert sich die Amplitude von  $F_U$ , zugleich nähert sich der Auslenkungsgraph dem von  $F_U$  in Frequenz und Schwingungsverlauf an. Im anderen Teilsystem lässt sich beim Antriebsmoment keine Schwingung mehr erkennen, dieses läuft gegen einen Grenzwert. Vergleichbar vom Signalverlauf verhält sich auch die Winkelgeschwindigkeit, die Anfangs linear ansteigt und letztlich mit kleiner Amplitude um einen Wert schwingt. Wird  $d_t$  sehr groß hat das keine Auswirkungen auf  $M_A$ ,  $\Omega$  und  $F_U$ , nur die Auslenkung wird dadurch beeinflusst. Diese verhält sich ähnlich zur vorherigen Grenzbetrachtung und schmiegt sich zunächst  $F_U$  an. Im weiteren Verlauf verringert sich die Amplitude der Auslenkung jedoch weiter und die der Unwuchtkraft bleibt gleich.

## 4. Fazit

Abschließend kann man sagen, dass es beim Handling mit Matlab einige Probleme aufgrund von fehlenden Kenntnissen und Erfahrungen gab. So war uns anfangs nicht bewusst, dass die Eingangsvariablen bei Matlab Simulink händisch mit einer Referenz auf die im Workspace deklarierten Variablen zu versehen sind. Nachdem wir das festgestellt und behoben haben, wurden die Plots zwar verändert, jedoch entsprachen sie nicht unseren Erwartungen.

Eine Überlegung war, die Eingangsvariable händisch innerhalb in Matlab Simulink zu verändern, sodass wir dann das richtige Ergebnis bezüglich der Graphen herausbekommen. Jedoch hätte dies nach unserer Bewertung das Ziel, den Sinn und damit das ganze Projektergebnis verfälscht, sodass wir uns darauf festgelegt haben diese Möglichkeit nicht in Betracht zu ziehen. Das fehlen von Matlab-Packages war unser erster Verdacht. Nach einer kurzen Recherche, welche Packages benötigt werden und einem Vergleich mit den von uns heruntergeladenen Daten, konnten wir diese Möglichkeit ausschließen.

Auffällig war jedoch, als unser Programm auf einem anderen Laptop mit einer älteren Matlab Version das richtige Ergebnis hervorbrachte. Somit lag der nächste Verdacht nun auf der heruntergeladenen Matlab Version.

Während der Installation der älteren Matlab Version, setzten wir uns weiter mit unserem Programm und den Aufbau des Quellcodes im Workspace auseinander. Auch die Schaltung in Simulink wurde weiter analysiert. Wir konnten so feststellen, dass aufgrund der Historie in Bezug auf die Referenzen der Variablen, einiges von Matlab verfälscht wurde. So veränderte Simulink die Eingangsvariable  $U$ , jedoch wurde diese einmalig abgespeichert, sodass Veränderungen nicht übernommen wurden. Die Ursache hierfür liegt darin, dass die von Simulink erstellte Variable, jene aus dem Workspace überschreibt.

Daher mussten wir uns die vom model Explorer erstellten Variablen und deren Referenzen genauer anschauen. Wir löschten, die von Simulink erstellte Variable  $U$  aus dem Speicher. Diese soll die Eingangsvariable aus dem Workspace nun nicht mehr überschreiben können, sodass der richtige Wert übernommen wird.

So haben wir es dann geschafft nach einiger Zeit, durch Analysieren, Recherchieren und Ausprobieren, Matlab Simulink mit dem Workspace zu verknüpfen und somit das Projekt erfolgreich durchzuführen. Das Installieren einer anderen Matlab Version war auch nicht mehr notwendig.



# Autorenverzeichnis

Alexander Herrmann

Johannes Ruffer



# Verzeichnis verwendeter Abkürzungen und Formelzeichen

DHBW Duale Hochschule Baden-Württemberg





# Literaturverzeichnis



# Abbildungsverzeichnis

2.1. Physikalisches Modell einer Nebenschlussmaschine . . . . .	3
2.2. Unwuchtsystem mit Eingangsspannung und Ausgang (Kinematik, Kinetik) . . .	5
2.3. Matlab SIMULINK Blockdiagramm zur Simulation des Systemverhaltens mit Memory-Block zur Umgehung der algebraischen Schleife . . . . .	6
2.4. Angelegte Variablen in Matlab im Workspace . . . . .	6
3.1. Codeausschnitt aus dem Workspace zur Definition der Plots . . . . .	7
3.2. Simulationsergebnis: Antriebsmoment des Gleichstrommotors . . . . .	8
3.3. Simulationsergebnis: Winkelgeschwindigkeit des mechatronischen Systems . . . .	9
3.4. Simulationsergebnis: Auslenkung·1000 und Unwuchtkraft des mechatronischen Systems . . . . .	10



# Tabellenverzeichnis

2.1. Systemparameter des physikalischen Modells für die Nebenschlussmaschine . . .	4
2.2. Mechanische Systemparameter der Nebenschlussmaschine . . . . .	5



# A. Anhang

## 1. Weitere Abbildungen