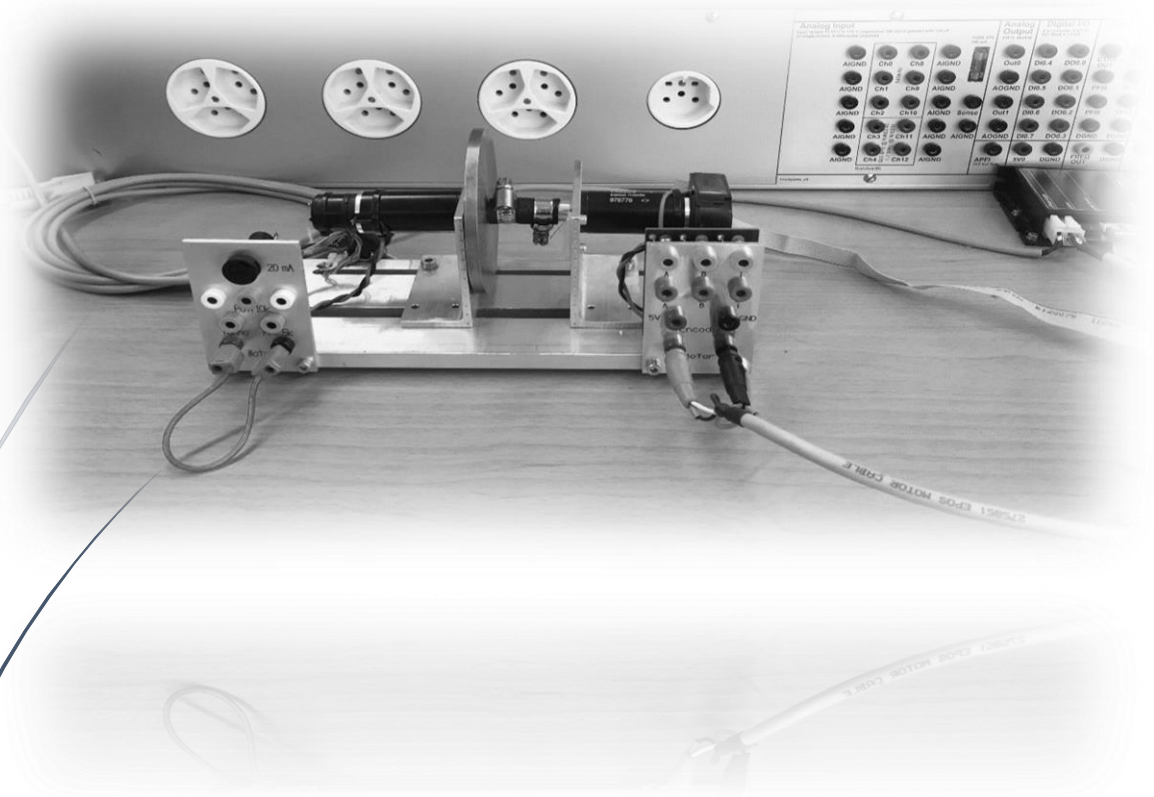


2.6.2015

Projektarbeit Mechatronik 2

Regelung eines DC-Motors



Manuel Ilg, Seyyid Özdemir, Simon Simbürger

1 Inhaltsverzeichnis

2	Aufgabenstellung	2
3	Modellbildung	3
3.1	Kaskadenregelung	3
3.1.1	Stromregler	3
3.1.2	Geschwindigkeitsregler	5
3.1.3	Positionsregler	6
3.1.4	Vorsteuerung	8
3.2	PID Regelung	9
3.2.1	Ohne Filter	9
3.2.2	Mit Filter	10
4	Messungen	11
4.1	Vorbereitung	11
5	Resümee	13
6	Abbildungsverzeichnis	14

2 Aufgabenstellung

Die Aufgabe bestand daraus, die Apparatur in Abbildung 1 mit mathematischen Modellen zu beschreiben und damit das System zu simulieren. In einem dritten Teil wurden am System Messungen durchgeführt, damit die Simulation mit der Realität vergleichbar wird.

Die Apparatur wurde mit einem Blockschaltbild abgebildet und mit einer Kaskadenregelung ergänzt. Mit diesem Modell konnte das Verhalten des Systems simuliert werden. Die Resultate wurden mit Messungen an der realen Apparatur verglichen.

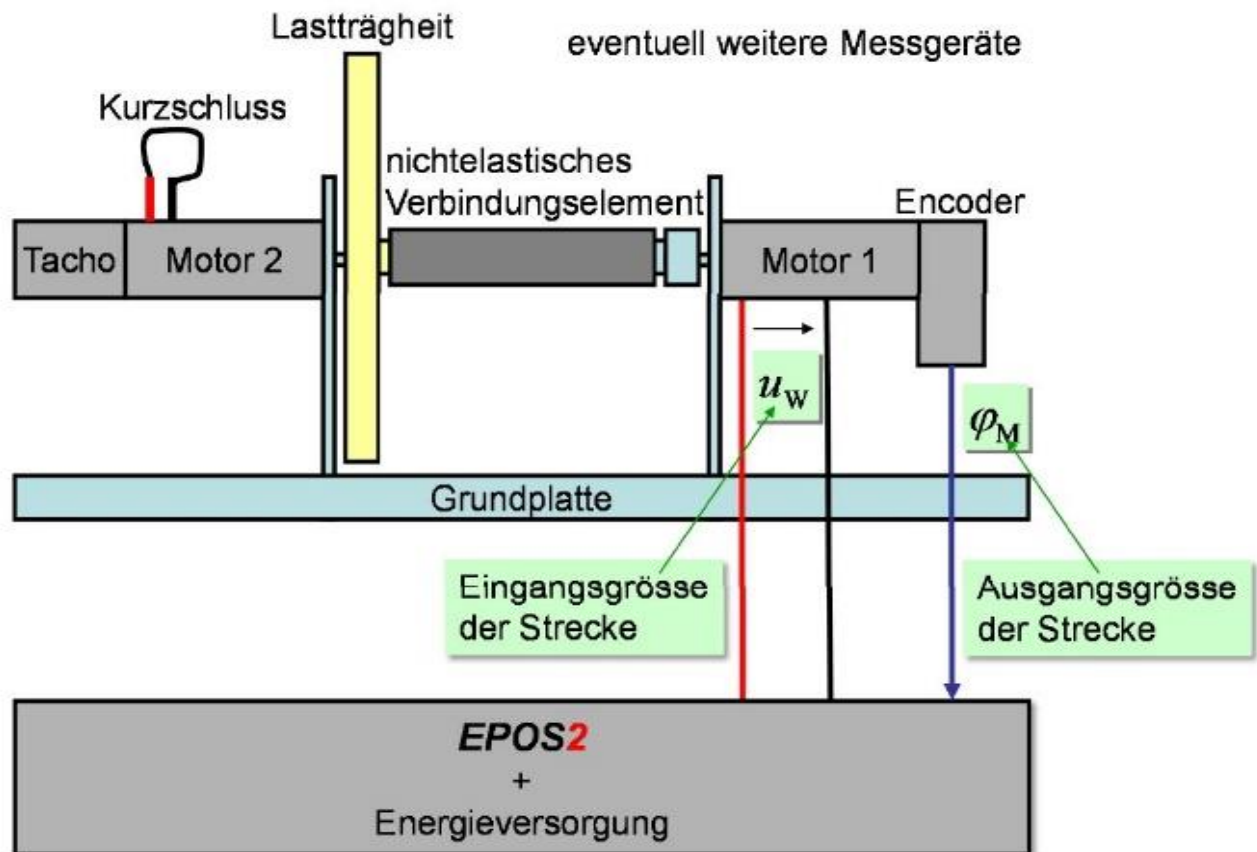


Abbildung 1 Aufgabenstellung

3 Modellbildung

Das Modell des letzten Semesters wurde für dieses Praktikum mit einer Kaskadenregelung ergänzt. Im Folgenden erläutern wir die einzelnen Stufen der Kaskadenregelung.

3.1 Kaskadenregelung

3.1.1 Stromregler

Für die Auslegung der Stromregelung wurde das Vorgehen aus dem Unterricht angewendet. Mit der vorgegebenen Samplingfrequenz f_A haben wir folgende Parameter berechnet:

$$\omega_{gi} = 2 * \pi * \frac{f_A}{10} \cong 6300 \frac{\text{rad}}{\text{sec}} ; \quad f_A = 1000\text{Hz}$$

$$K_{Pi} = L * \omega_{gi} = 0.115 * 10^{-3}\text{H} * 6300 \frac{\text{rad}}{\text{sec}} = 185 \frac{\text{H} * \text{rad}}{\text{sec}}$$

$$K_{Li} = R * \omega_{gi} = 1.26\Omega * 6300 \frac{\text{rad}}{\text{sec}} = 203 \frac{\Omega * \text{rad}}{\text{sec}}$$

Die Regelung wurde danach mit Simulink modelliert, mit den Parametern konfiguriert und getestet. Das Simulinkmodell der Stromregelung ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Totzeit im System setzt sich aus folgenden Operationen zusammen:

1. Messen
2. Wandeln Analog \leftrightarrow Digital
3. Berechnung des Sollwerts
4. Erzeugen des Stellwerts durch die Leistungselektronik

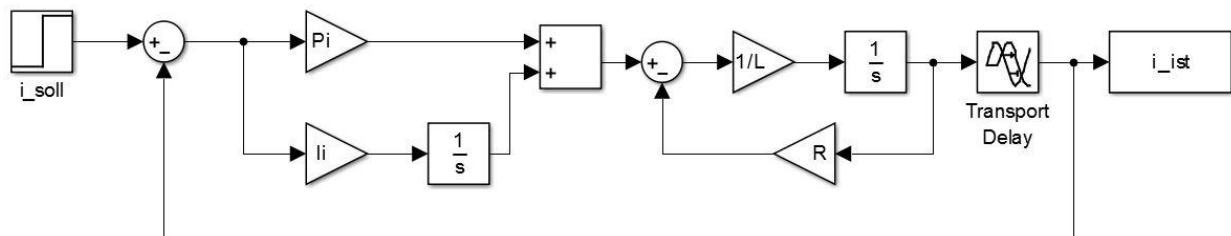


Abbildung 2 Simulinkmodell der Stromregelung

Der Regler wurde mit einem Sprung auf 1 A getestet. Der zugehörige Verlauf ist in Abbildung 3 zu sehen. Das Überschwingen im Verlauf kommt zustande, weil der Phasenrand unter 70° liegt. In unserem Fall liegt der Phasenrand bei 54° , damit erhalten wir, über eine Faustregel, ein Überschwingen von circa 16%. Der Phasenrand berechnet sich wie folgt:

$$\omega_{gi} = \frac{\pi}{5 * T_A} \rightarrow \omega_{gi} * T_A = \frac{\pi}{5}; \quad \frac{\omega_{gi}}{\omega_D} = 1$$

$$\varphi_R = \pi - \frac{\pi}{2} - \omega_D * T_A = \frac{3}{10}\pi = 54^\circ$$

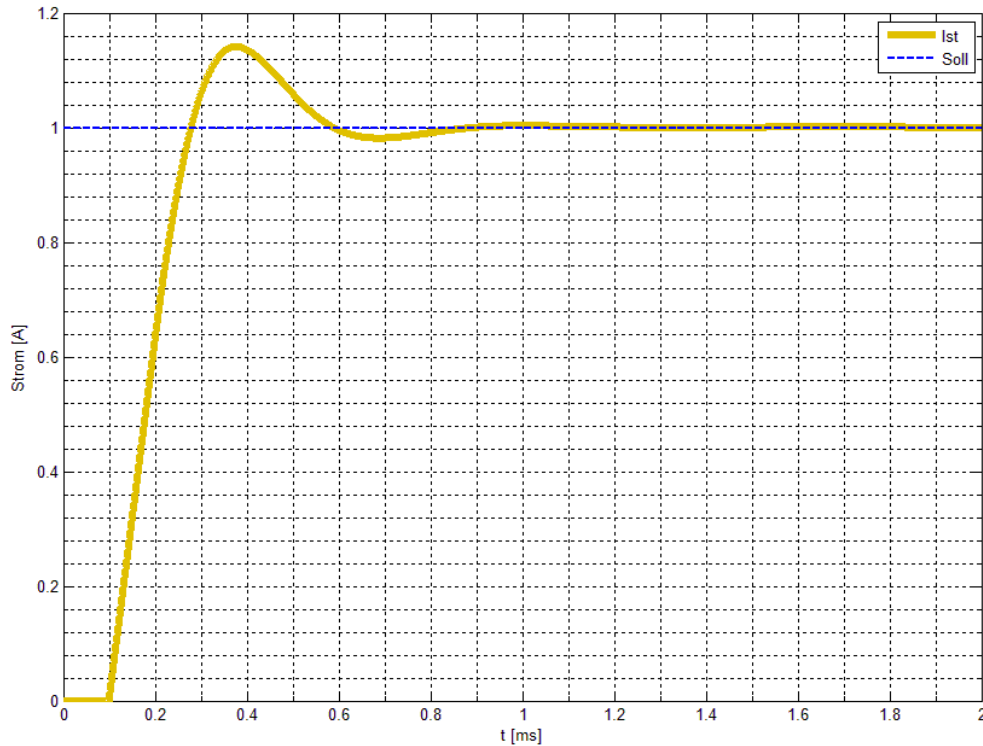


Abbildung 3 Systemantwort der Stromregelung

3.1.2 Geschwindigkeitsregler

Die Geschwindigkeitsregelung wurde ebenfalls gemäss dem Vorgehen aus dem Unterricht und dem Vorschlag aus der Anleitung ausgelegt. Die Werte wurden nach folgenden Formeln berechnet:

$$\omega_{g\omega} = \frac{\omega_{gi}}{10} = \frac{6300 \frac{rad}{sec}}{10} = 630 \frac{rad}{sec}$$

$$K_{P\omega} = \frac{J}{k_M} \omega_{g\omega} = \frac{4.28 * 10^{-4} kgm^2}{0.0163 \frac{kgm^2}{A * sec^2}} * 630 \frac{rad}{sec} = 16.5 Asec$$

$$K_{I\omega} = 4 * \frac{d}{k_M} \omega_{g\omega} = 4 * \frac{k_M^2/R}{k_M} * \omega_{g\omega} = 4 * \frac{0.0163 \frac{Vsec}{rad}}{1.26 \Omega} * 630 \frac{rad}{sec} = 32.5 A$$

Für die nächste Stufe der Kaskade wurde der Geschwindigkeitsregler um den Stromregler modelliert. Das entstandene Modell ist in Abbildung 4 zu sehen. Dieser Regler wurde mit einem Sprung von 1 rad/sec getestet. Der entstandene Verlauf ist in Abbildung 5 ersichtlich.

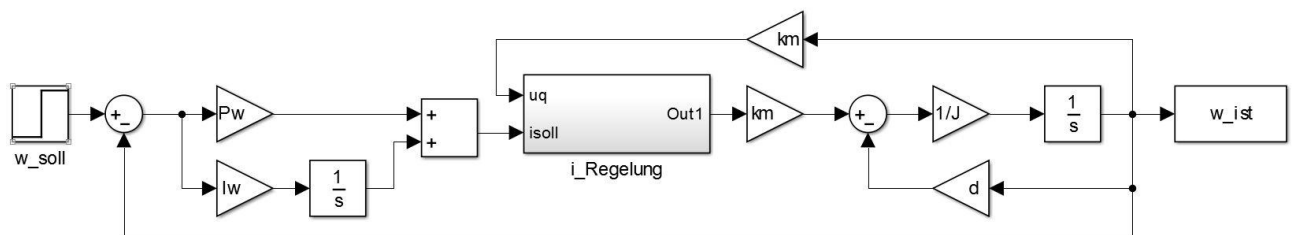


Abbildung 4 Simulinkmodell der Geschwindigkeitsregelung

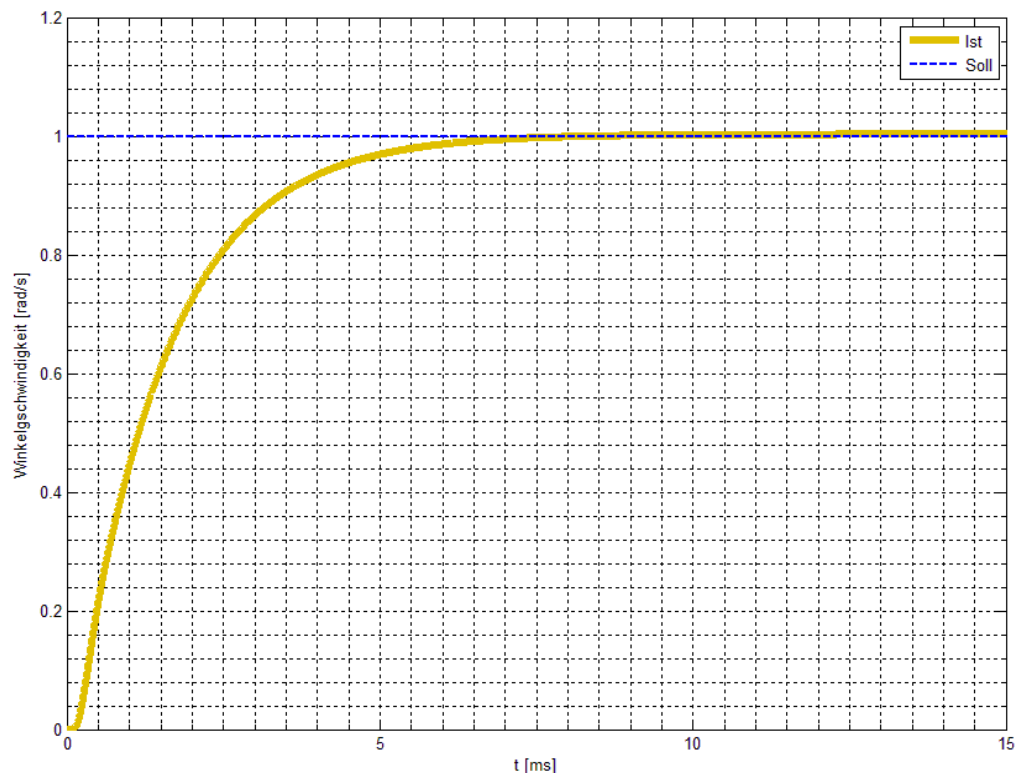


Abbildung 5 Systemantwort der Geschwindigkeitsregelung

3.1.3 Positionsregler

Die Positionsregelung wurde mit folgenden Formeln aus dem Unterricht ausgelegt:

$$\omega_{g\varphi} = \frac{\omega_{g\omega}}{10} = \frac{630 \frac{rad}{sec}}{10} = 63 \frac{rad}{sec}$$

$$K_{P\varphi} = \omega_{g\varphi} = 63 \frac{rad}{sec}$$

Für die letzte Stufe der Kaskade wurde die Positionsregelung um die beiden vorhergehenden Regelungen modelliert. Das Modell ist in Abbildung 6 dargestellt. Dieser Regler wurde mit einer Rampe von 0 auf 2π getestet. Der Verlauf ist Abbildung 7 zu entnehmen. Im Diagramm ist zu erkennen, dass die Ist-Position der Soll-Position hinterher läuft. Diese Verzögerung wird als Schleppfehler bezeichnet.

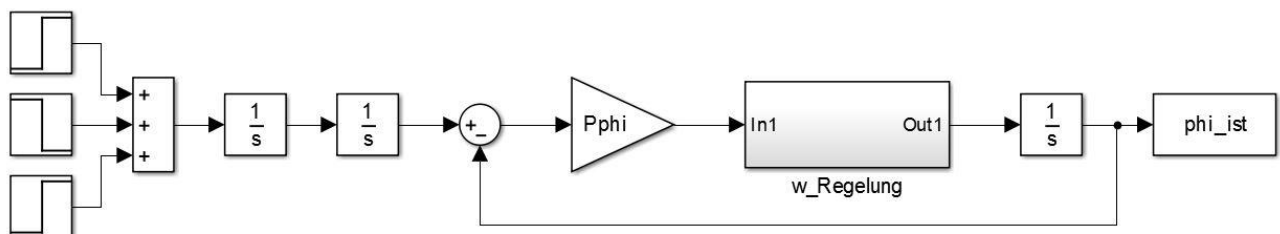


Abbildung 6 Simulinkmodell der Geschwindigkeitsregelung

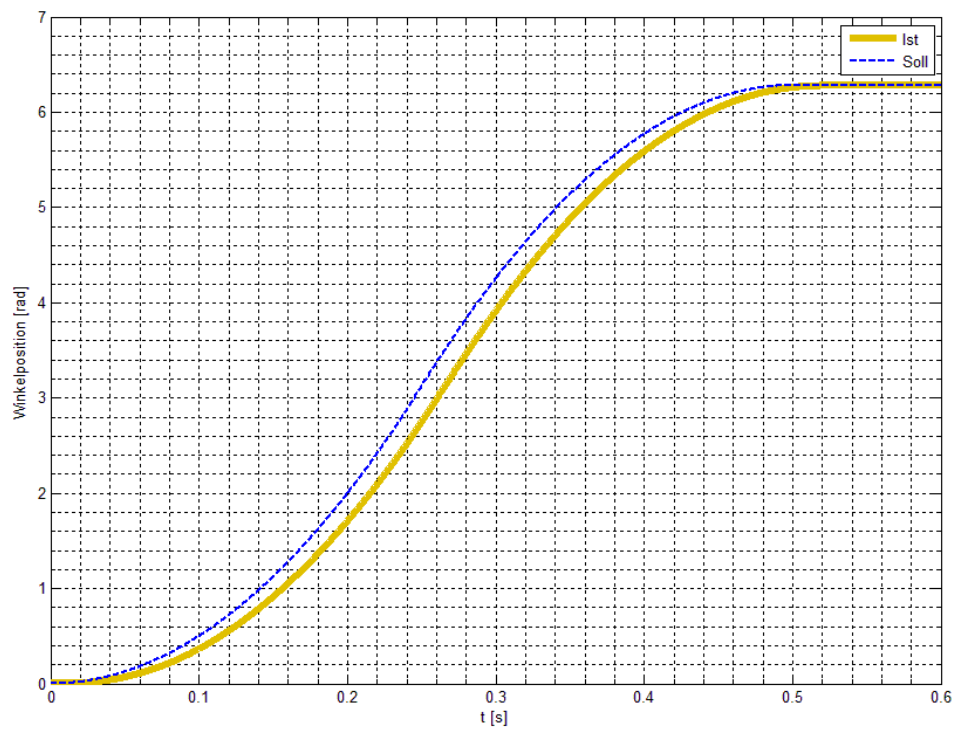


Abbildung 7 Systemantwort der Positionsregelung

3.1.4 Vorsteuerung

Um den Schleppfehler der Kaskadenregelung zu verringern, kann die Regelung bei bekannter Bahn vorgesteuert werden. In Abbildung 8 wurde das Simulinkmodell der Positionsregelung um diese Vorsteuerung ergänzt. Mit diesem Modell wurde die gleiche Rampe wie in Kapitel 3.1.3 simuliert. Das Ergebnis ist in Abbildung 9 dargestellt. Die benötigten Parameter wurden mit folgenden Formeln berechnet:

$$K_{\alpha} = \frac{J}{k_M} = \frac{4.28 * 10^{-4} \text{ kgm}^2}{0.0163 \frac{\text{kgm}^2}{\text{A} * \text{sec}^2}} = 0.0263 \text{ Asec}^2$$

$$K_{\omega} = \frac{d}{k_M} = \frac{0.0163 \frac{\text{Vsec}}{\text{rad}}}{1.26 \frac{\text{V}}{\text{A}}} = 0.0129 \text{ Asec}$$

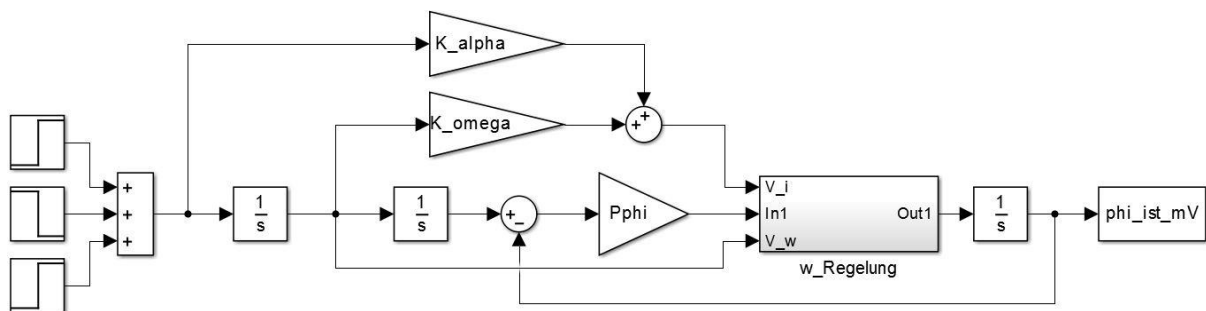


Abbildung 8 Simulinkmodell der Kaskade mit Vorsteuerung

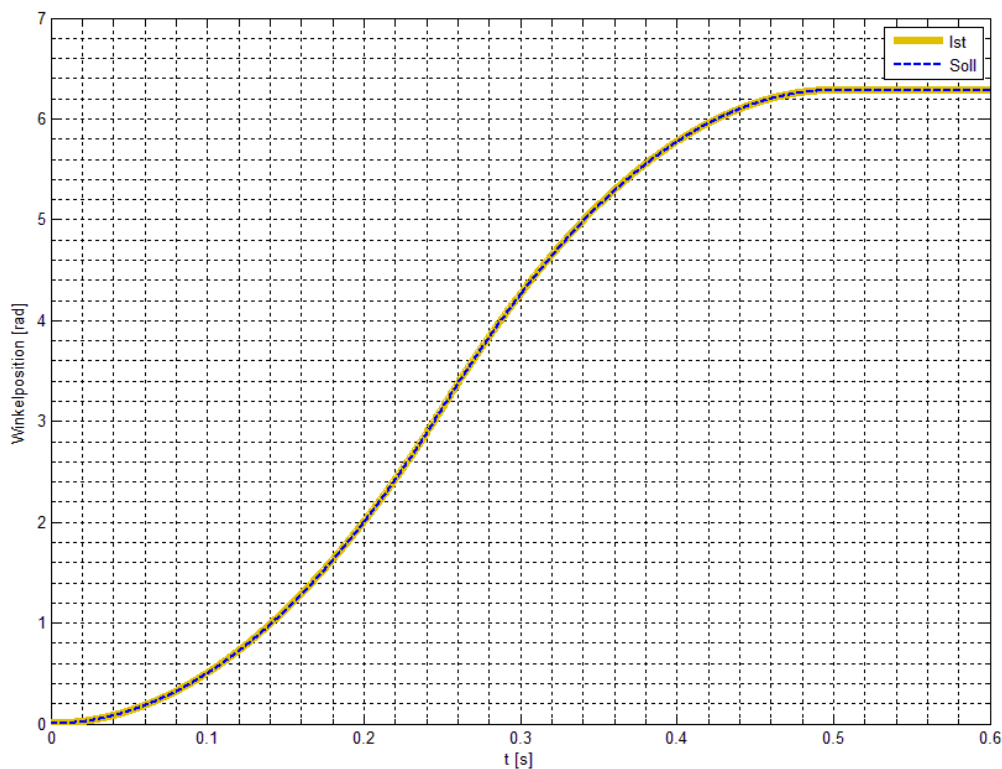


Abbildung 9 Systemantwort der Positionsregelung mit Vorsteuerung

3.2 PID Regelung

3.2.1 Ohne Filter

Durch den Einsatz eines PID-Reglers kann der Positions- und der Geschwindigkeitsregler zusammengefasst werden. Für die Berechnung der Stellwerte muss dafür nur noch die Position bekannt sein. Die Geschwindigkeit wird über den D-Anteil des Reglers errechnet. Die Parameter der PID-Regelung lassen sich mit folgenden Formeln berechnen:

$$K_P = K_{P\varphi} * K_{P\omega} + K_{I\omega} = 63 \frac{\text{rad}}{\text{sec}} * 16.5 \text{ Asec} + 32.5 \text{ A} = 1069.6 \text{ A}$$

$$K_I = K_{P\varphi} * K_{I\omega} = 63 \frac{\text{rad}}{\text{sec}} * 32.5 \text{ Asec} = 2042.9 \frac{\text{A}}{\text{sec}}$$

$$K_D = K_{P\omega} = 16.5 \text{ Asec}$$

Wie auch die Kaskadenregelung wurde die PID Regelung vorgesteuert. Für die PID Regelung der Position wurde ebenfalls ein Modell in Simulink erstellt. Das Modell ist in Abbildung 10 zu sehen. Diese Regelung wurde ebenfalls mit einer Rampe von 0 auf 2π getestet. Der erhaltene Verlauf ist in Abbildung 11 auf der nächsten Seite dargestellt.

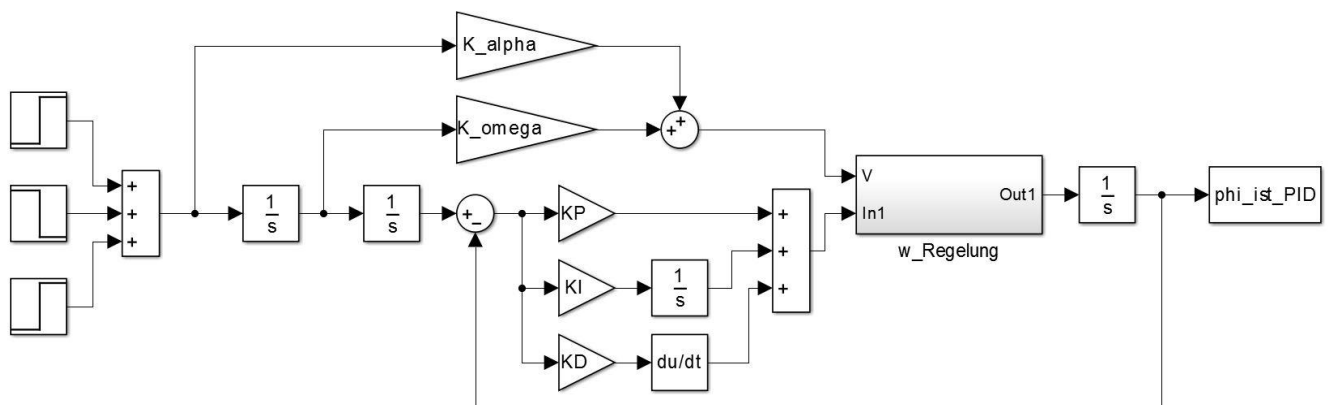


Abbildung 10 Simulinkmodell des PID Reglers ohne Filter

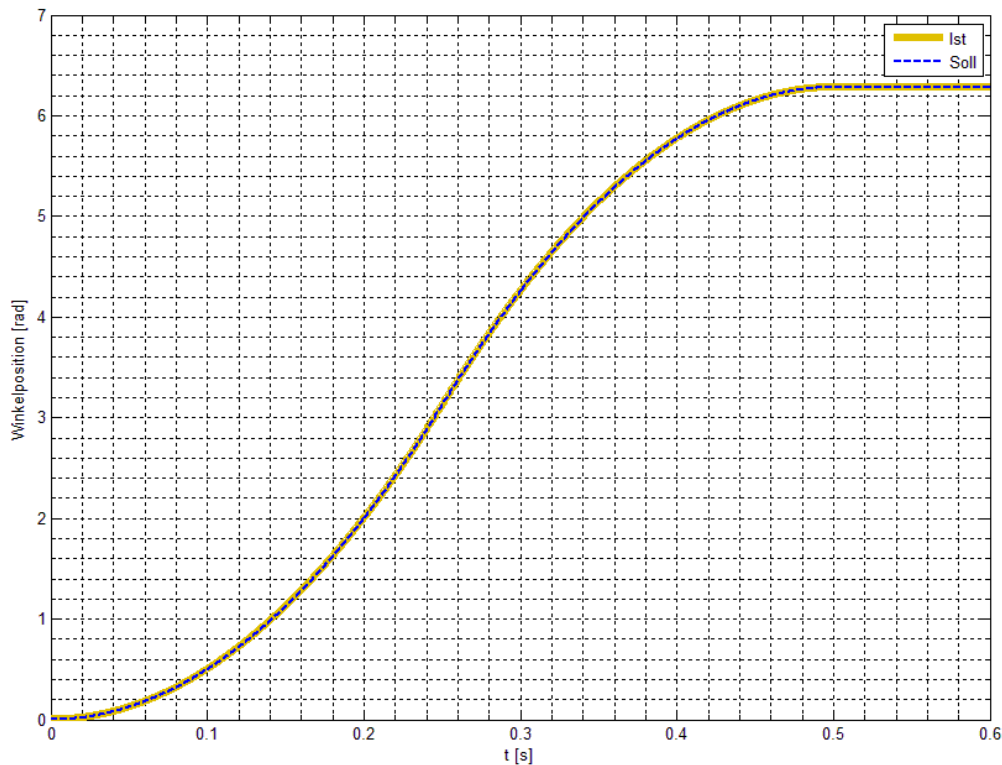


Abbildung 11 Systemantwort des PID Reglers ohne Filter

3.2.2 Mit Filter

Der D-Anteil des PID-Reglers verstärkt Frequenzen stärker, je höher diese sind. Durch dieses Verhalten werden an der realen Apparatur Effekte wie das Quantisierungsrauschen, welches durch die begrenzte Auflösung des Encoders zustande kommt, hörbar. Deshalb muss der D-Anteil mit einem Tiefpassfilter ergänzt werden. Die Übertragungsfunktion des PID-Reglers sieht damit folgendermassen aus:

$$G_{PID(s)} = K_P + \frac{K_I}{s} + \frac{K_D * s}{1 + \frac{K_D}{16 * K_P} s}$$

4 Messungen

4.1 Vorbereitung

Damit die Parameter der Strom- und der Positionsregelung dem Motorcontroller übergeben werden können, müssen diese in ein für den EPOS2-Controller verständliches Format umgerechnet werden. Dies geschieht mit folgenden Formeln:

Stromregler:

$$K_{P_i_EPOS2} = P_i * \frac{2^8}{1\Omega} = 0.7226 \text{ Asec}^2 * \frac{2^8}{1 \frac{V}{A}} = 185 \frac{A^2 \text{sec}^2}{V}$$

$$K_{I_i_EPOS2} = I_i * \frac{2^8 * T_s}{1\Omega} = 7916.8 \text{ Asec} * \frac{2^8 * 100 \mu\text{sec}}{1 \frac{V}{A}} = 203 \frac{A^2 \text{sec}^2}{V}$$

Positionsregler:

$$K_{P_EPOS2} = \frac{K_P}{10 \frac{mA}{rad}} = 1069.6 \text{ Asec}^2 * \frac{1}{10 \frac{mA}{rad}} = 106958 \text{ sec}^2 \text{rad}$$

$$K_{I_EPOS2} = \frac{K_I}{78 \frac{mA}{sec * rad}} = 2042.9 \text{ Asec} * \frac{1}{78 \frac{mA}{sec * rad}} = 26190 \text{ sec}^2 \text{rad}$$

$$K_{D_EPOS2} = \frac{K_D}{80 \frac{\mu\text{Asec}}{rad}} = 16.5 \text{ Asec}^3 * \frac{1}{80 \frac{\mu\text{Asec}}{rad}} = 206319 \text{ sec}^2 \text{rad}$$

$$K_{\alpha_EPOS2} = \frac{K_{\alpha_SI}}{64 \frac{\mu A}{rad/sec^2}} = \frac{0.0263 \text{ Asec}^2}{64 \frac{\mu A}{rad/sec^2}} = 410 \text{ sec}^2 \text{rad}$$

$$K_{\omega_EPOS2} = \frac{K_{\omega_SI}}{64 \frac{\mu A}{sec}} = \frac{0.0129 \text{ Asec}}{64 \frac{\mu A}{sec}} = 202 \text{ sec}^2 \text{rad}$$

Da die Eingabe der EPOS2 bei 32'767 ist, wurden die Werte für K_{P_EPOS2} und K_{D_EPOS2} auf den Maximalwert begrenzt. Bei der Messung kam das Diagramm in Abbildung 12 auf der nächsten Seite zustande. Wenn die Regelung so ausgeführt wird, sind ein deutliches Überschwingen zu beobachten und ein störendes Geräusch hörbar. Diese zwei Phänomene ergeben sich durch die Begrenzung der Parameter. Die Begrenzung führt zu einer Verzerrung der Regelung, so dass der Betrag der geschlossenen Regelung nicht mehr 1 ergibt. Das Geräusch entsteht durch die Verstärkung des Quantisierungsrauschens über den I-Anteil des PID-Reglers.

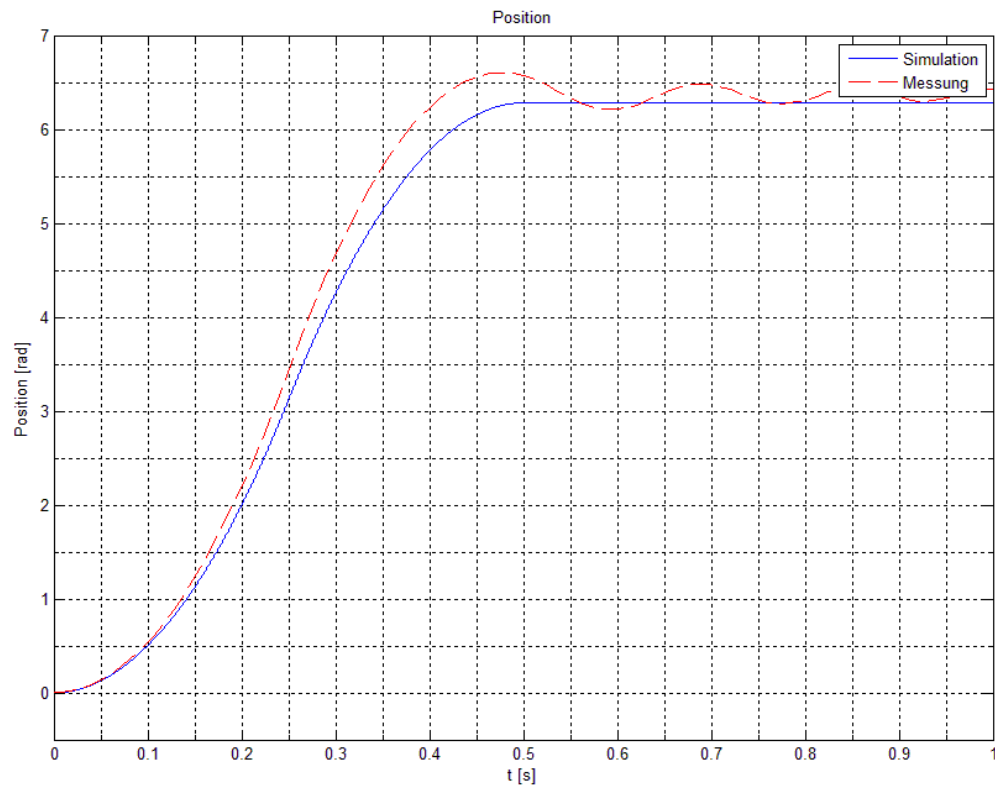


Abbildung 12 Positionsverlauf bei Versuch 1

Aufgrund dieser Messergebnisse wurden die Parameter der Positionsregelung angepasst. Dafür wurden die Bandbreiten der Geschwindigkeits- und der Positionsregelung (neu mit $\omega_{g\omega 2} = \frac{\omega_{gi}}{100}$) angepasst. Über die oben abgebildeten Formeln ergeben sich daraus die folgenden Werte:

$$K_{P_EPOS2} = 1362$$

$$K_{D_EPOS2} = 262$$

$$K_{I_EPOS2} = 20'632$$

Nach der Messung mit den neuen Werten erhalten wir den Verlauf, wie er in Abbildung 13 ersichtlich ist. Die Verläufe von Strom und Winkelgeschwindigkeit sind im Anhang zu finden.

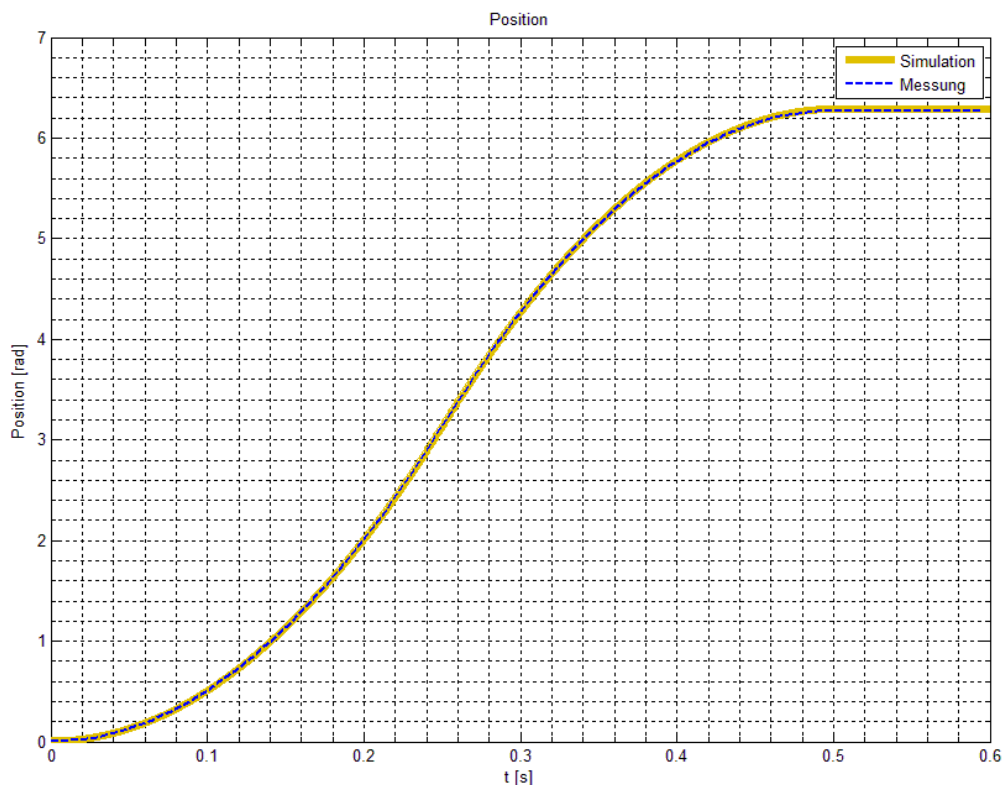


Abbildung 13 Positionsverlauf bei Versuch 2

5 Resümee

Durch das Projekt wurde die Theorie für uns greifbar. Dank der Apparatur konnten wir einen Bezug zwischen Simulation und Realität herstellen. Auch konnten wir die Vorteile einer Vorsteuerung in einer Kaskadenregelung sehen. Uns wurde auch klar, dass eine Simulation nicht den Versuch an einem Prototyp komplett ersetzen kann, da einige Phänomene in der Simulation nicht zum Vorschein kommen.

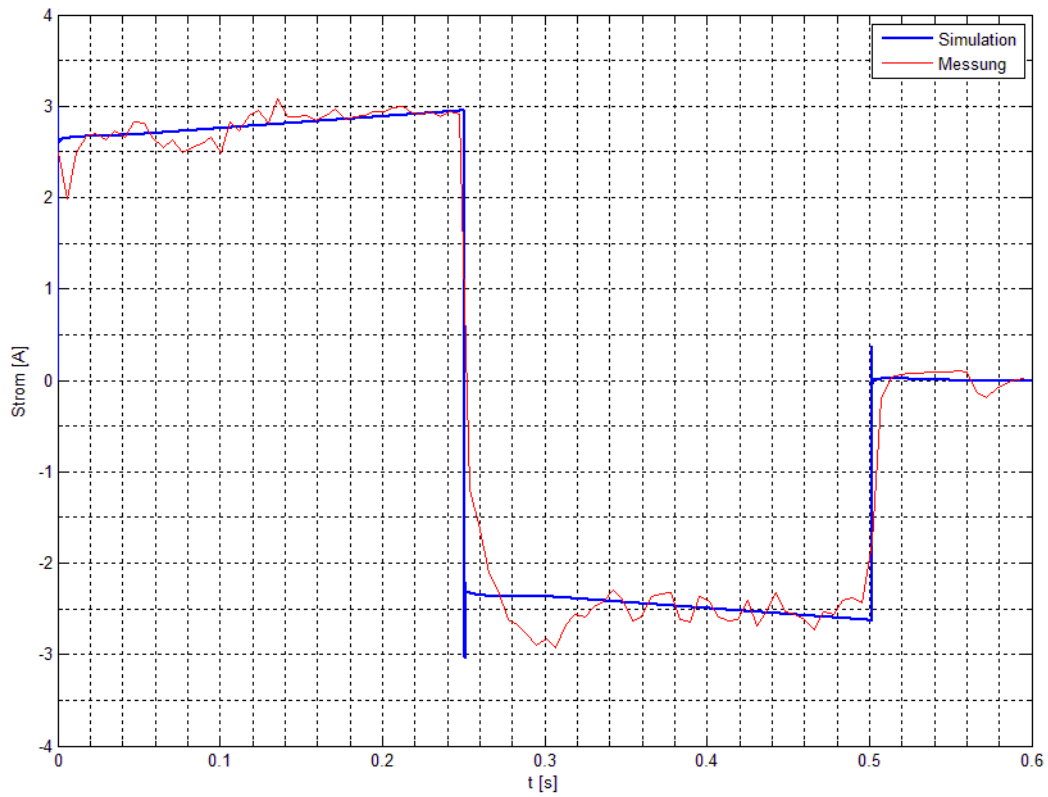
6 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Aufgabenstellung	2
Abbildung 2 Simulinkmodell der Stromregelung	3
Abbildung 3 Systemantwort der Stromregelung	4
Abbildung 4 Simulinkmodell der Geschwindigkeitsregelung.....	5
Abbildung 5 Systemantwort der Geschwindigkeitsregelung	6
Abbildung 6 Simulinkmodell der Geschwindigkeitsregelung.....	6
Abbildung 7 Systemantwort der Positionsregelung	7
Abbildung 8 Simulinkmodell der Kaskade mit Vorsteuerung	8
Abbildung 9 Systemantwort der Positionsregelung mit Vorsteuerung	8
Abbildung 10 Simulinkmodell des PID Reglers ohne Filter	9
Abbildung 11 Systemantwort des PID Reglers ohne Filter	10
Abbildung 12 Positionsverlauf bei Versuch 1.....	12
Abbildung 13 Positionsverlauf bei Versuch 2.....	13

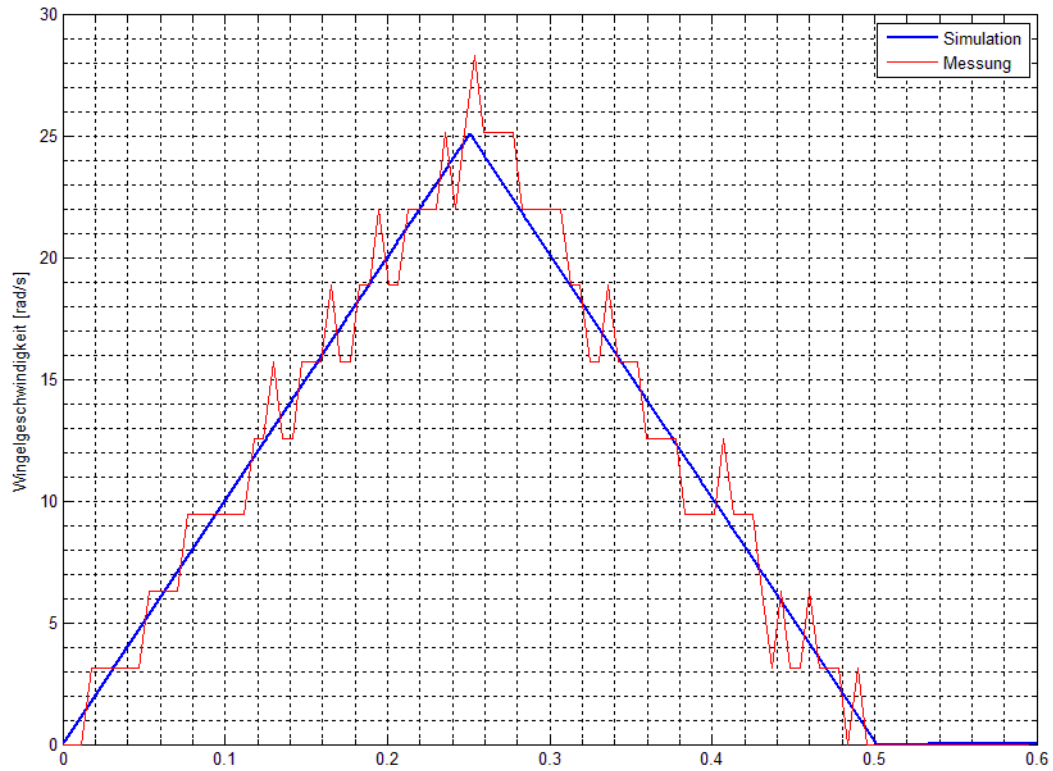
Anhang

Diagramme Messung

Verlauf Strom Versuch 2



Verlauf Geschwindigkeit Versuch 2



Matlab Code

%% System Parameter

```
R = 1.26; % [Ohm]
L = 0.115*10^-3; % [H]
km = 0.0163; % [N*m/A][V*s/rad][kg*m^2/A/s^2]
```

```
J_M = 9.45*10^-7; % [kg*m^2]
J_D = 9.45*10^-7; % [kg*m^2]
J_T = 3*10^-7; % [kg*m^2]
J_S = 4260*10^-7; % [kg*m^2]
J = J_M + J_D + J_T + J_S; % [kg*m^2]
```

```
d = km^2/R; % [N*m*s/rad][kg*m^2/s]
```

```
f_A = 10*10^3; % [1/s], [Hz]
```

% Berechnung i-Regler

```
w_gi = 2*pi*f_A/10; % [rad/s]

Pi = L*w_gi; % [H*rad/s], [kg*m^2/(A^2*s^3)]
li = R*w_gi; % [Ohm*rad/s], [kg*m^2/(A^2*s^4)]
```

% Berechnung w-Regler

```
w_gw = w_gi/10; % [rad/s]

Pw = J*w_gw/km; % [kg*m^2/(V*s^2*rad)], [A*s]
lw = 4*d*w_gw/km; % [N*m/(V*s*rad)], [A]
```

% Berechnung phi-Regler

```
w_gphi = w_gw/10; % [rad/s]

Pphi = w_gphi; % [rad/s]
```

% Berechnung Vorsteuerung

```
K_alpha = J/km; % [kg*m^2*A/(N*m)], [A*s^2]
K_omega = d/km; % [N*m*s*A/(rad*N*m)], [A*s]
```

% Berechnung PID-Regler

```
KP = Pphi*Pw+lw; % [A]
KI = Pphi*lw; % [A/s]
KD = Pw; % [A*s]
```

%% neue Bandbreite

% Berechnung w-Regler

w_gw2 = w_gi/100; %[rad/s]

Pw2 = J*w_gw2/km; %[kg*m^2/(V*s^2*rad)], [A*s]

lw2 = 4*d*w_gw2/km; %[N*m/(V*s*rad)], [A]

% Berechnung phi-Regler

w_gphi2 = w_gw2/10; %[rad/s]

Pphi2 = w_gphi2; %[rad/s]

% Berechnung PID-Regler

KP2 = Pphi2*Pw2+lw2; %[A]

KI2 = Pphi2*lw2; %[A/s]

KD2 = Pw2; %[A*s]

%% Berechnungen EPOS2

% Stromregelung

K_P_i_EPOS2 = Pi*2^8;

K_I_i_EPOS2 = li*2^8/f_A;

% PID w_gw = w_gi/10

K_P_EPOS2 = KP/1e-2;

K_I_EPOS2 = KI/78e-3;

K_D_EPOS2 = KD/80e-6;

% PID w_gw2 = w_gi/100

K_P_EPOS2_2 = KP2/1e-2;

K_I_EPOS2_2 = KI2/78e-3;

K_D_EPOS2_2 = KD2/80e-6;

% Vorsteuerungsparamter

K_alpha_EPOS2 = K_alpha/64e-6;

K_omega_EPOS2 = K_omega/64e-6;

%% Berechnung Weg

% Parameter

a_max = 100; %[rad/s^2]

v_max = 100; %[rad/s]

t_a = sqrt(8*pi/a_max); %[s]