Hochschule Karlsruhe
University of
Applied Sciences

-Labor Regelungstechnik

Laborbericht

Laborversuch 3

Drehzahlregelung

Student:	Daniel Lipaj
Universität:	Hochschule Karlsruhe
Studiengang:	Elektro- und Informationstechnik
Studienvertiefung:	Informationstechnik
Semester:	Wintersemester 23/24
Dozent:	Prof. Dr. Keller
Bearbeitet am:	7. Dezember 2023

Inhaltsverzeichnis

1 Vorbereitung

Im vorliegenden Laborversuch soll ein Schwungrad mithilfe eines Elektromotors angetrieben werden. Unser Gesamtsystem besteht daher aus zwei Teilsystemen: einem elektrischen und einem mechanischen System.
Das elektrische Teilsystem kann durch folgende Schaltung beschrieben werden:

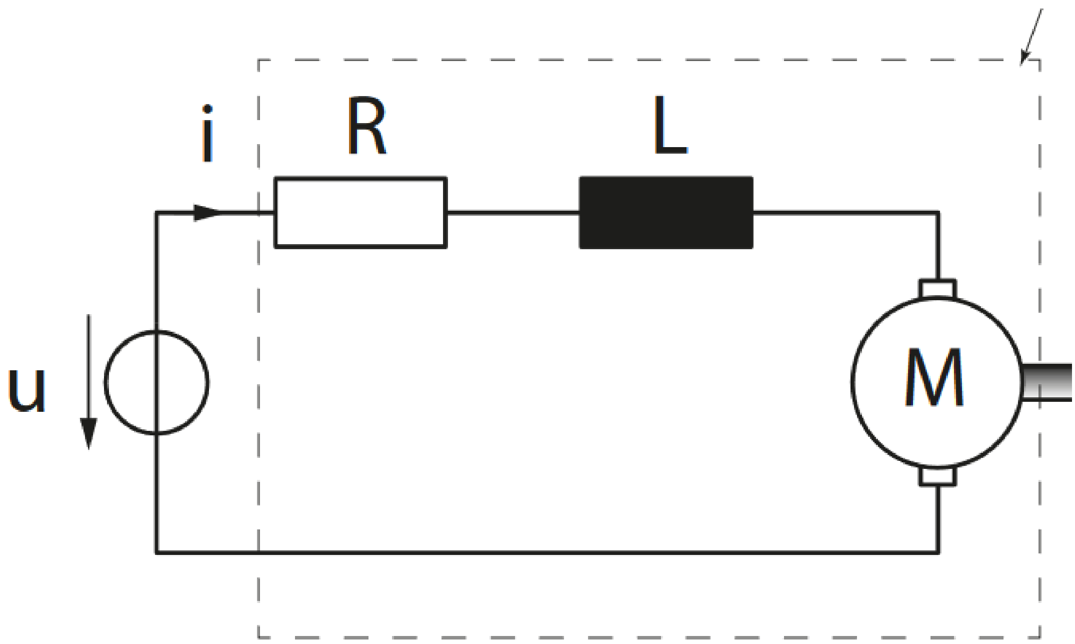

Abbildung 1: Vorbereitung. Elektrisches-Teilsystem

Durch einen Maschenumlauf erhalten wir folgende Beziehung:
$-U + U_R + U_L + e_M = 0$

$U = U_R + U_L + e_M(t)$

Die Spannung an der Induktivität wird durch das Induktionsgesetz beschrieben.

$U_L = L \cdot \frac{di}{dt}$

Durch Einsetzen dieser Gleichung in den Maschenumlauf erhalten wir eine Differentialgleichung erster Ordnung.

$u = R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} + e_M(t)$

Die elektromotorische Kraft $em(t)$ wird durch die Maschinenkonstante des Motors C, den magnetischen Fluss Ψ und die Winkelgeschwindigkeit ω berechnet.

$e_M(t) = C \cdot \Psi \cdot \omega(t)$

Die Maschinenkonstante C und der magnetische Fluss Ψ werden zu einer Variablen zusammengefasst.

$e_M(t) = k \cdot \omega(t)$

Mit der Gleichung für das Antriebsmoment $e_M(t)$ erhalten wir schließlich folgende Differentialgleichung.

$u = R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} + k \cdot \omega$

Da das Antriebsmoment des Elektromotors M proportional zum Strom i des Elektromotors ist, stellen wir die Differentialgleichung nach der Ableitung des Stroms um.

$\dot{i} = \frac{1}{L} \cdot U - \frac{R \cdot i}{L} - \frac{k \cdot \omega}{L}$

I.) $\quad M = k \cdot i$

Das Schwungrad wird durch die Winkelgeschwindigkeit $\dot{w}$, sein Trägheitsmoment und das anliegende Antriebsmoment beschrieben.

$J \cdot \dot{w} = M$

Die zu regelnde Größe ist die Winkelgeschwindigkeit des Schwungrades in Abhängigkeit vom Strom im Elektromotor. Durch Einsetzen der Gleichung I) und anschließendes Umformen ergibt sich:

$\dot{\omega} = \frac{k}{J} \cdot i$

2 Simulation der Regelstrecke

2.1 a.) Signalflussbild

Im folgenden Versuchsteil wird nur untersucht, wie sich das System ohne eine Regelung verhält. Dafür wird zunächst das Signalflussbild des Systems gezeichnet in Abbildung 3:

$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} \cdot (u - R \cdot i - k \cdot \omega)$

$\dot{\omega} = \frac{k}{J} \cdot i$

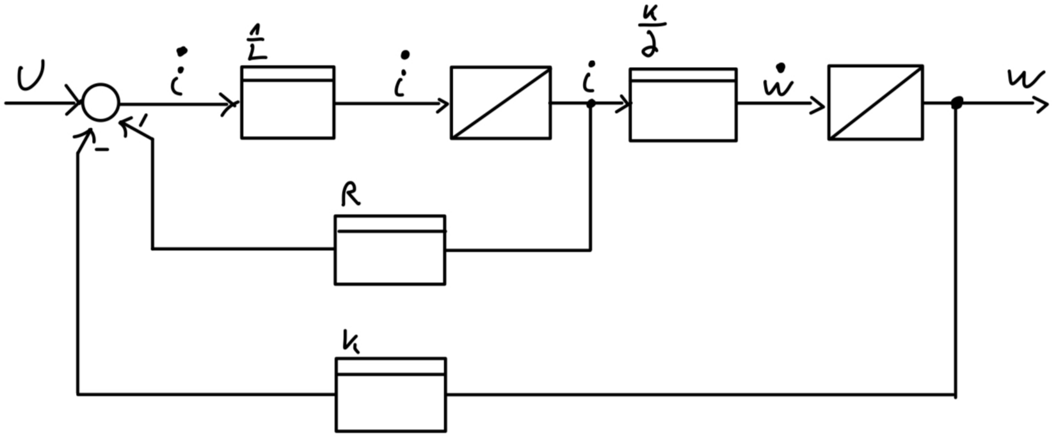

Abbildung 2: Aufgabe 1. Signalflussbild

2.2 b.) Simulink Modell

Dazu wird zuerst das System in MATLAB Simulink modelliert. Abbildung 2:

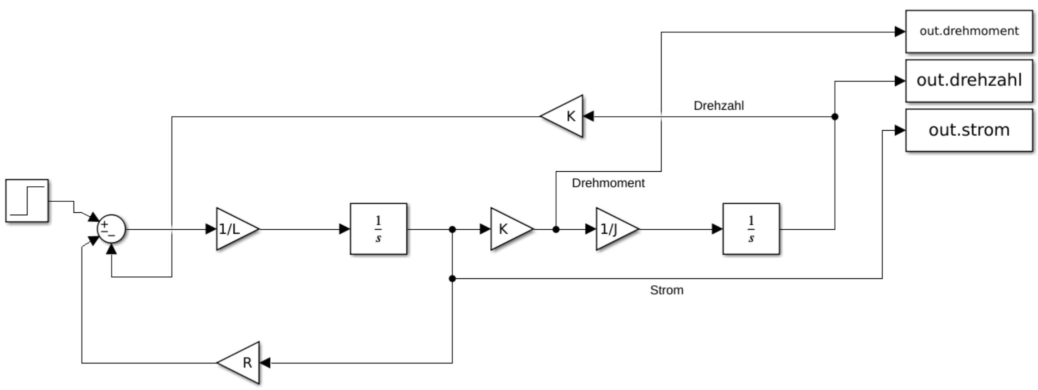

Abbildung 3: Aufgabe 1. Simulink Modell

In Code 1: ist der dafür verwendete Matlab-Code dargestellt.

```
clear all;
K = 30e-3;
J = 4000e-7;
R = 6;
L = 120e-6;

opt=simset('MaxStep', 0.001);
simout=sim("Aufgabe1_sim.slx" , [0,20], opt);
time=simout.drehmoment.time;
drehmoment=simout.drehmoment.signals.values;
drehzahl=simout.drehzahl.signals.values;
strom=simout.strom.signals.values;
figure(1); clf;
hold on;
title('Aufgabe 1');
subplot(3,1,1);
plot(time, drehmoment, 'r', 'LineWidth', 2);
ylabel('Drehmoment [Nm]');
xlabel('Zeit[t]');
subplot(3,1,2);
plot(time, drehzahl, 'LineWidth', 2);
ylabel('Drehzahl [rad/s]');
xlabel('Zeit[t]');
subplot(3,1,3);
plot(time, strom, 'g', 'LineWidth', 2);
ylabel('Strom [A]');
xlabel('Zeit[t]');
hold off;

drehmoment_amp = drehmoment*1000;
f=figure(2); clf;
title('Aufgabe 1');
hold on;
yyaxis left;
plot(time, drehzahl,'b', 'LineWidth', 2);
plot(time, drehmoment_amp, 'r', 'LineWidth', 2);
ylabel('Drehzahl [rad/s], Drehmoment * 1000 [Nm]');
xlabel('Zeit[t]');
yyaxis right;
plot(time, strom, 'g', 'LineWidth', 2);
ylabel('Strom [A]');
```

```
legend("Drehzahl [rad/s]", "Drehmoment * 1000 [Nm]", "Strom[A]");
hold off;
exportgraphics(f,'./Schaubilder/Aufgabe1.png','Resolution',300);
```

Listing 1: Matlab Skript für Versuch 1.

2.3 c.) System Simulation

An den Eingang unseres elektrischen Systems wird ein Spannungssprung von 0V auf 10V geschaltet, und anschließend werden der Strom, das Drehmoment und die Drehzahl in einem Diagramm dargestellt.

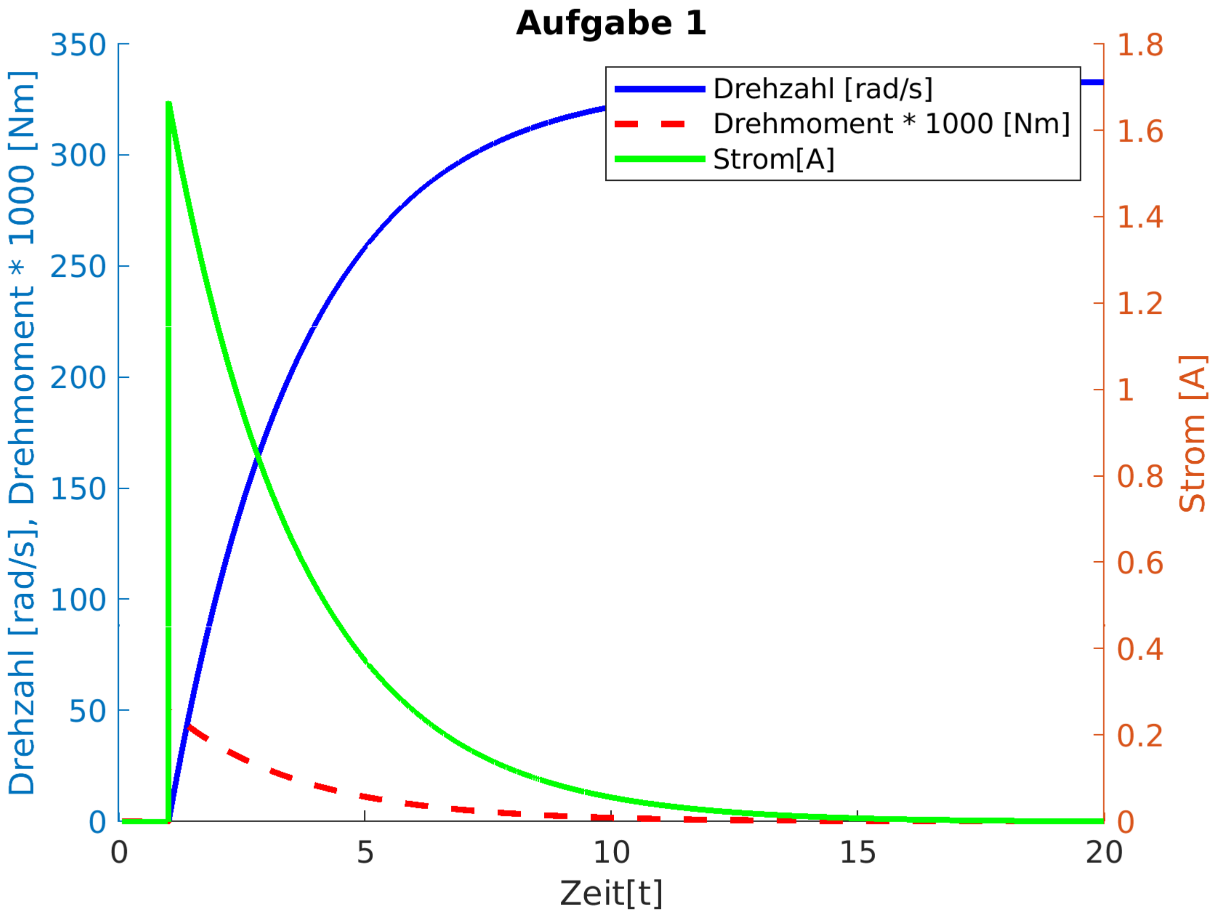

Abbildung 4: Aufgabe 1. Strom, Drehmoment und Drehzahl Plot

In Abbildung 4: kann beobachtet werden, dass anfangs ein größeres Drehmoment aufgebracht werden muss, um das Schwungrad aus der Ruhelage zu beschleunigen. Dies resultiert in einer Strom- und Drehmomentspitze.
Im eingeschwungenen Zustand nimmt der Strom und damit auch das Drehmoment ab. Die Drehzahl erreicht einen stationären Endwert und behält diesen bei, da wir keine Reibung oder Verluste berücksichtigen.

3 Drehzahlregelung mit P-Regler

3.1 a.) Simulink Modell mit P-Regler

Im Folgenden wird das System mithilfe eines P-Reglers mit einem Verstärkungsfaktor KR geregelt. Dazu wird das im Simulink modellierte System erweitert. Abbildung 5:

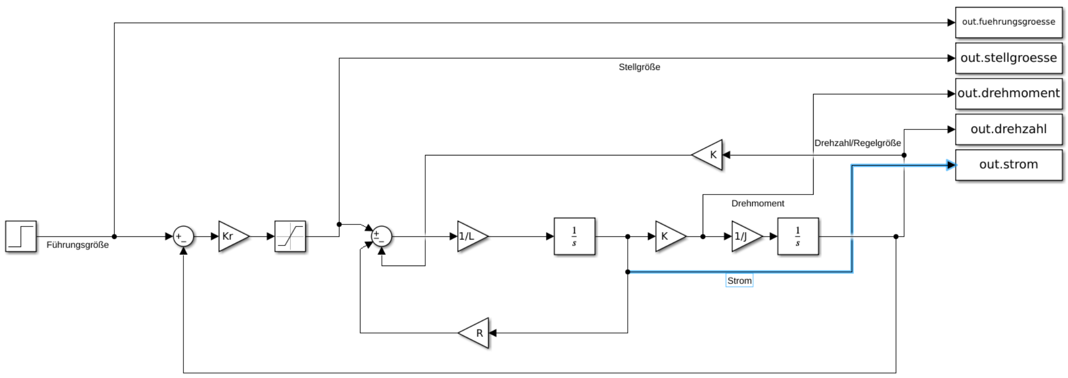

Abbildung 5: Aufgabe 2. Simulink Modell mit P-Regler

In Code 2: ist der dazu verwendete Matlab-Code dargestellt.

```
clear all;
K = 30e-3;
J = 4000e-7;
R = 6;
L = 120e-6;

%Berechnung von Kr
Umax=10;
emax=100;
Kr=Umax/emax;

opt=simset('MaxStep', 0.001);
simout=sim("Aufgabe2_sim.slx" , [0,20], opt);
time=simout.drehmoment.time;
drehmoment=simout.drehmoment.signals.values;
drehzahl=simout.drehzahl.signals.values;
regelgroesse=drehzahl;
strom=simout.strom.signals.values;
stellgroesse=simout.stellgroesse.signals.values;
fuehrungsgroesse=simout.fuehrungsgroesse.signals.values;

f = figure(1); clf;
title('Aufgabe 2');
hold on;
yyaxis left;
plot(time, regelgroesse,'b', 'LineWidth', 2);
plot(time, fuehrungsgroesse, 'r', 'LineWidth', 2);
ylabel('Regelgr  e [rad/s], F hrungsgr  e [rad/s]');
xlabel('Zeit[t]');
yyaxis right;
plot(time, stellgroesse, 'g', 'LineWidth', 2);
ylabel('Stellgr  e [V]');

legend("Regelgr  e [rad/s]", "F hrungsgr  e [rad/s]", "Stellgr  e [V]");
hold off;
exportgraphics(f,'./Schaubilder/Aufgabe2.png','Resolution',300);
```

Listing 2: Matlab Skript für Aufgabe 2

3.2 b.) Bestimmung des Verstärkungsfaktor KR

Es soll eine Drehzahl von 100 rad/s als Führungsgröße eingestellt werden. Dafür muss der Verstärkungsfaktor KR des P-Reglers berechnet werden, indem die allgemeine Gleichung des P-Reglers verwendet wird. Zu beachten ist auch, dass die Leistungselektronik die Spannung im Bereich von -10V bis +10V begrenzt.

$$U_{max} = e_{max} \cdot KR$$

Die Gleichung des P-Reglers wird nach der gesuchten Größe KR umgestellt.

$$KR = \frac{U_{max}}{e_{max}}$$

$$U_{max} = 10V \qquad e_{max} = 100\frac{rad}{s}$$

$$KR = \frac{10V}{100\frac{rad}{s}} = \underline{\underline{\frac{1}{10} \cdot \frac{Vs}{rad}}}$$

3.3 c/d.) Simulation mit P-Regler

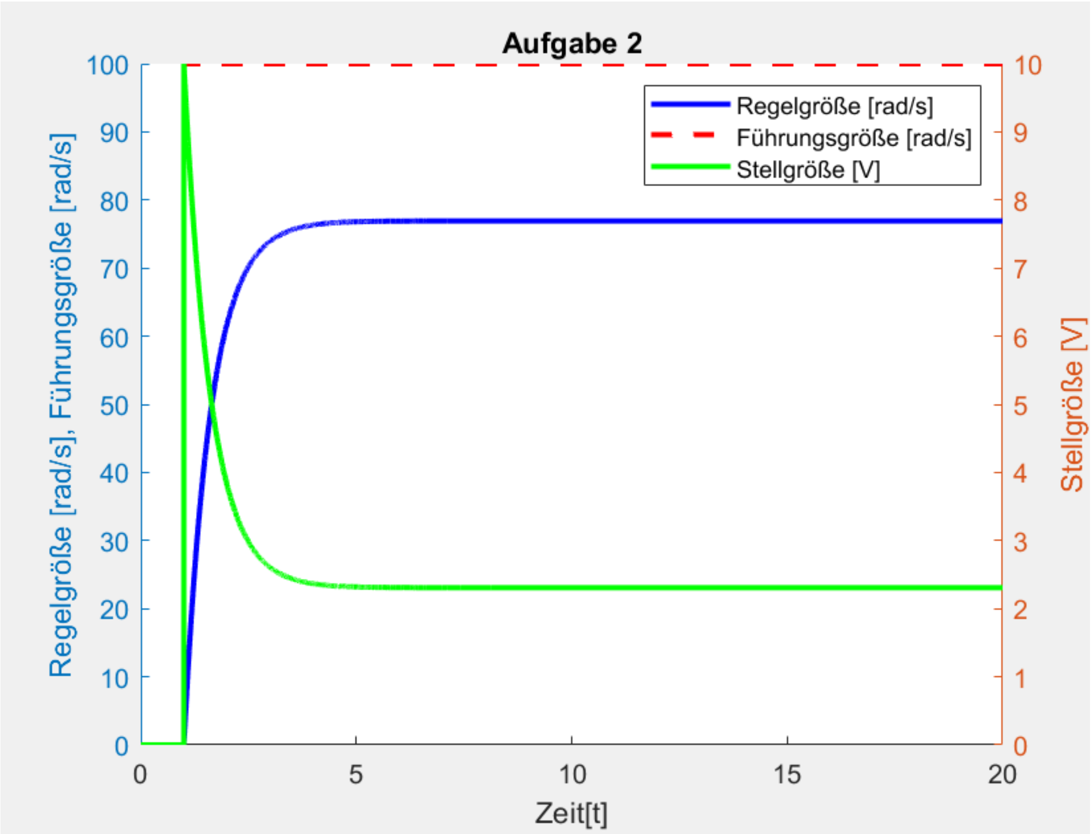

Abbildung 6: Aufgabe 2. Führungs-, Regel- und Stellgröße geplottet

In Abbildung 6: kann man erkennen, dass zu Beginn eine Spannungsspitze auftritt, da anfänglich das Trägheitsmoment überwunden werden muss.

Die Spannung nimmt ab und erreicht einen stationären Wert, da die Regeldifferenz mit der Zeit kleiner wird, aber nicht null erreichen kann.

Da eine Spannung größer als 10V benötigt wird, um die Drehzahl von 100 rad/s zu erreichen.

So kann auch beobachtet werden, dass die Drehzahl konstant niedriger als die Führungsgröße bleibt.

Das System ist nicht stationär genau.

4 Aufgabe 3. Regelung mit PI-Regler

Nun wird der P-Regler durch einen I-Anteil ergänzt, sodass das System mittels eines PI-Reglers geregelt wird.
Im Folgenden wird dieser Regelkreis analysiert.

4.1 a) simulink Modellierung und Analyse des Regelkreises

Simulink-Modell mit einem PI-Regler: Abbildung 7:

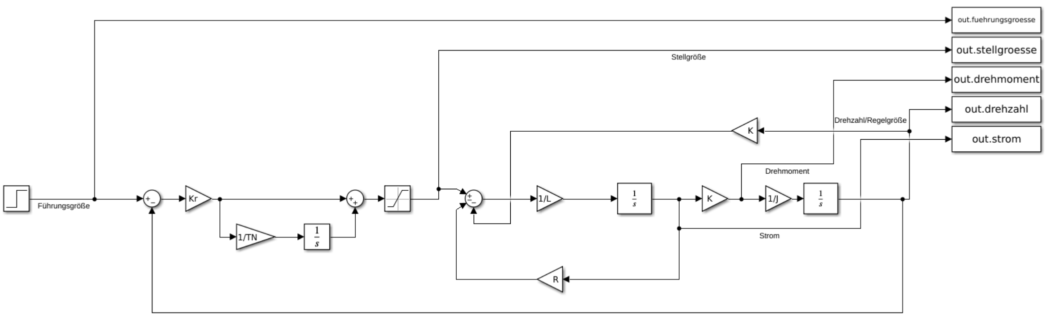

Abbildung 7: Aufgabe 3. a. Simulink-Modell

Um die Nachstellzeit zu ermitteln, indem sich das System möglichst schnell der Führungsgröße annähert, ohne zu überschwingen, wird ein MATLAB-Skript geschrieben (Code 3:). Dieses Skript simuliert automatisch das zuvor in Simulink modellierte System für verschiedene TN-Werte.

```
clear all;
K = 30e-3;
J = 4000e-7;
R = 6;
L = 120e-6;

%Berechnung von Kr
Umax=10;
emax=100;
Kr=Umax/emax;

TN_array = linspace(1, 2.55, 3);

for count=1:length(TN_array)
TN = TN_array(count);

opt=simset('MaxStep', 0.001);
simout=sim("Aufgabe3_sim.slx" , [0,20], opt);
time=simout.drehmoment.time;
drehmoment=simout.drehmoment.signals.values;
drehzahl=simout.drehzahl.signals.values;
regelgroesse=drehzahl;
strom=simout.strom.signals.values;
stellgroesse=simout.stellgroesse.signals.values;
fuehrungsgroesse=simout.fuehrungsgroesse.signals.values;

f=figure(count); clf;
title(strcat('Aufgabe 3a Tn =', num2str(TN)));
hold on;
yyaxis left;
plot(time, regelgroesse,'b', 'LineWidth', 2);
plot(time, fuehrungsgroesse, 'r', 'LineWidth', 2);
ylabel('Regelgr  e [rad/s], F hrungsgr  e [rad/s]');
xlabel('Zeit[t]');
yyaxis right;
plot(time, stellgroesse, 'g', 'LineWidth', 2);
ylabel('Stellgr  e [V]');

legend("Regelgr  e [rad/s]", "F hrungsgr  e [rad/s]", "Stellgr  e [V]");
hold off;
```

```
exportgraphics(f,strcat(strcat('./Schaubilder/Aufgabe3Tn=',
    num2str(TN)), '.png'),'Resolution',300);
end
```

Listing 3: Matlab Skript für Aufgabe 3. a..

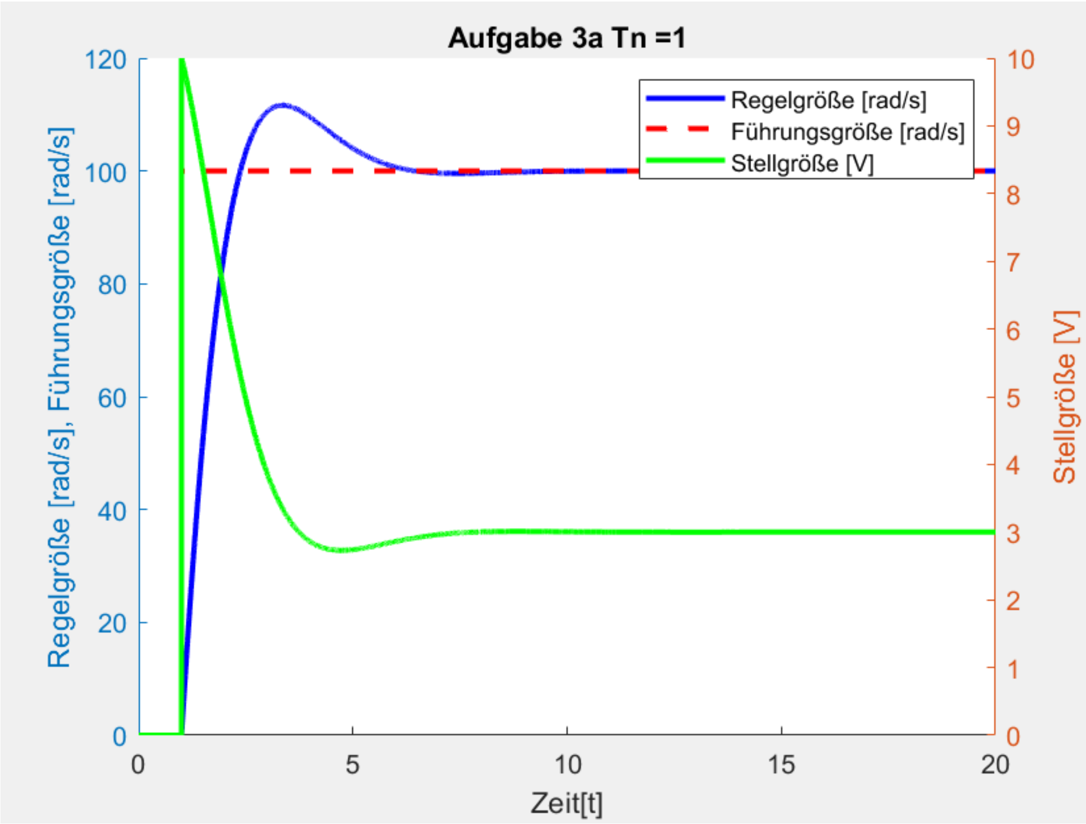

Abbildung 8: Aufgabe 3. a. Nachstellzeit TN = 1,0

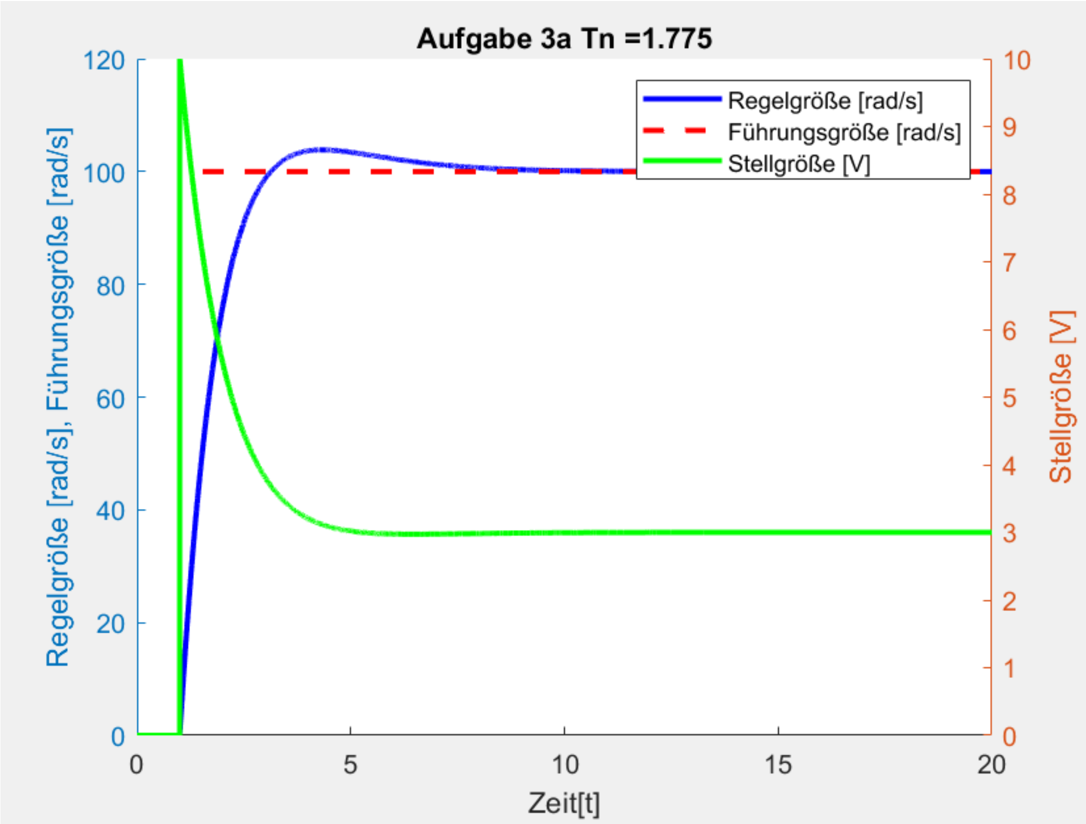

Abbildung 9: Aufgabe 3. a. Nachstellzeit TN = 1,775

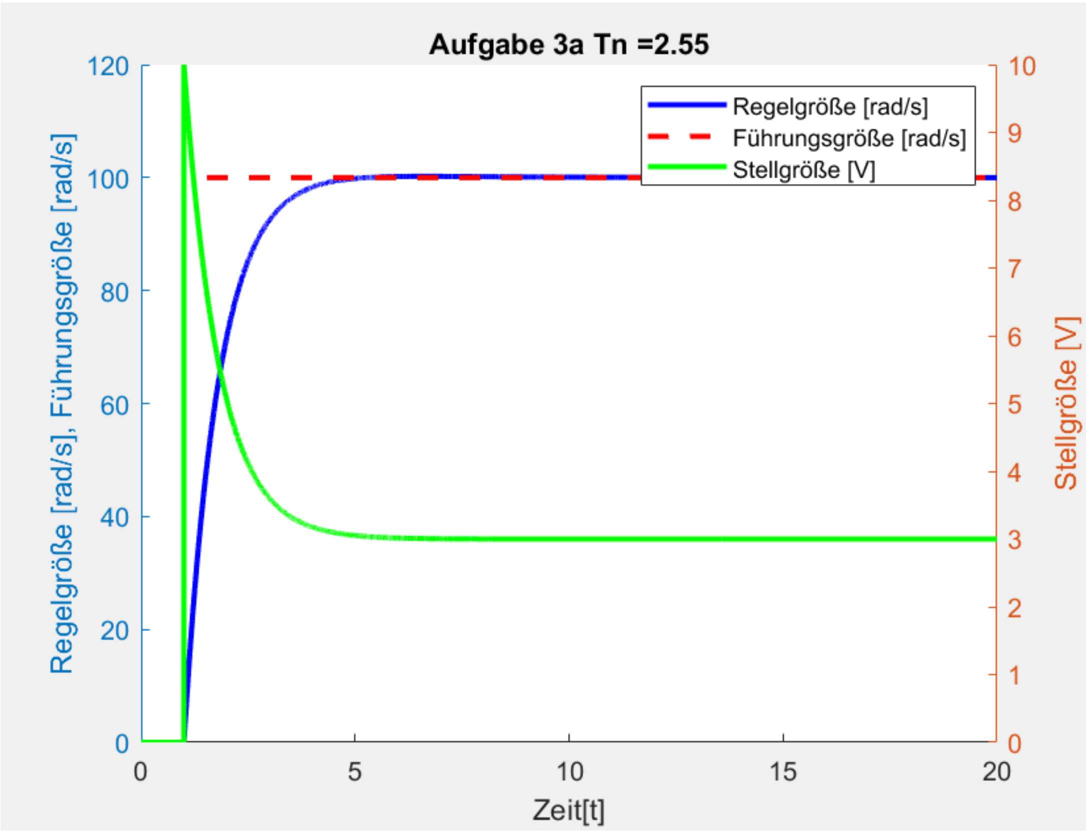

Abbildung 10: Aufgabe 3. a. Nachstellzeit TN = 2,55

In den Abbildungen: Abbildung 8:, Abbildung 9: und Abbildung 10: kann erkannt werden, dass das System bei zunehmender Nachstellzeit TN weniger überschwingt und bei einem TN = 2,55 Statiönar annährt Abbildung 10:

4.2 b.) Integeral Windup

Folgend wird ein Führungsgrößensprung von $300\frac{rad}{s}$ an den Eingang gelegt und beobachtet, was geschieht. In Code 4: ist der verwendete Matlab-Code dargestellt.

```
clear all;
K = 30e-3;
J = 4000e-7;
R = 6;
L = 120e-6;

%Berechnung von Kr
Umax=10;
emax=100;
Kr=Umax/emax;
D_array = linspace(100, 300, 2);
TN=2.55;

for count=1:length(D_array)
D = D_array(count);

opt=simset('MaxStep', 0.001);
simout=sim("Aufgabe3b_sim.slx" , [0,40], opt);
time=simout.drehmoment.time;
drehmoment=simout.drehmoment.signals.values;
drehzahl=simout.drehzahl.signals.values;
regelgroesse=drehzahl;
strom=simout.strom.signals.values;
stellgroesse=simout.stellgroesse.signals.values;
fuehrungsgroesse=simout.fuehrungsgroesse.signals.values;

regelldeifferenz = simout.regeldifferenz.signals.values;

f=figure(count); clf;
title(strcat('Aufgabe 3b rad/s =', num2str(D)));
hold on;
```

```
yyaxis left;
plot(time, regelgroesse,'b', 'LineWidth', 2);
plot(time, fuehrungsgroesse, 'r', 'LineWidth', 2);
ylabel('Regelgr e [rad/s], F hrungsgr e [rad/s]');
xlabel('Zeit[t]');
yyaxis right;
plot(time, stellgroesse, 'g', 'LineWidth', 2);
ylabel('Stellgr e [V]');

legend("Regelgr e [rad/s]", "F hrungsgr e [rad/s]", "Stellgr e [V]");
hold off;


save_regel = strcat("simulation_regel_",num2str(D));
save_diff = strcat("simulation_diff_", num2str(D));
save_time = strcat("simulation_time_",num2str(D));
save(strcat(save_regel,".mat"), "regelgroesse");
save(strcat(save_diff,".mat"), "regelldeifferenz");
save(strcat(save_time,".mat"), "time");
end
end
```

Listing 4: Matlab Skript für Aufgabe 3. b.

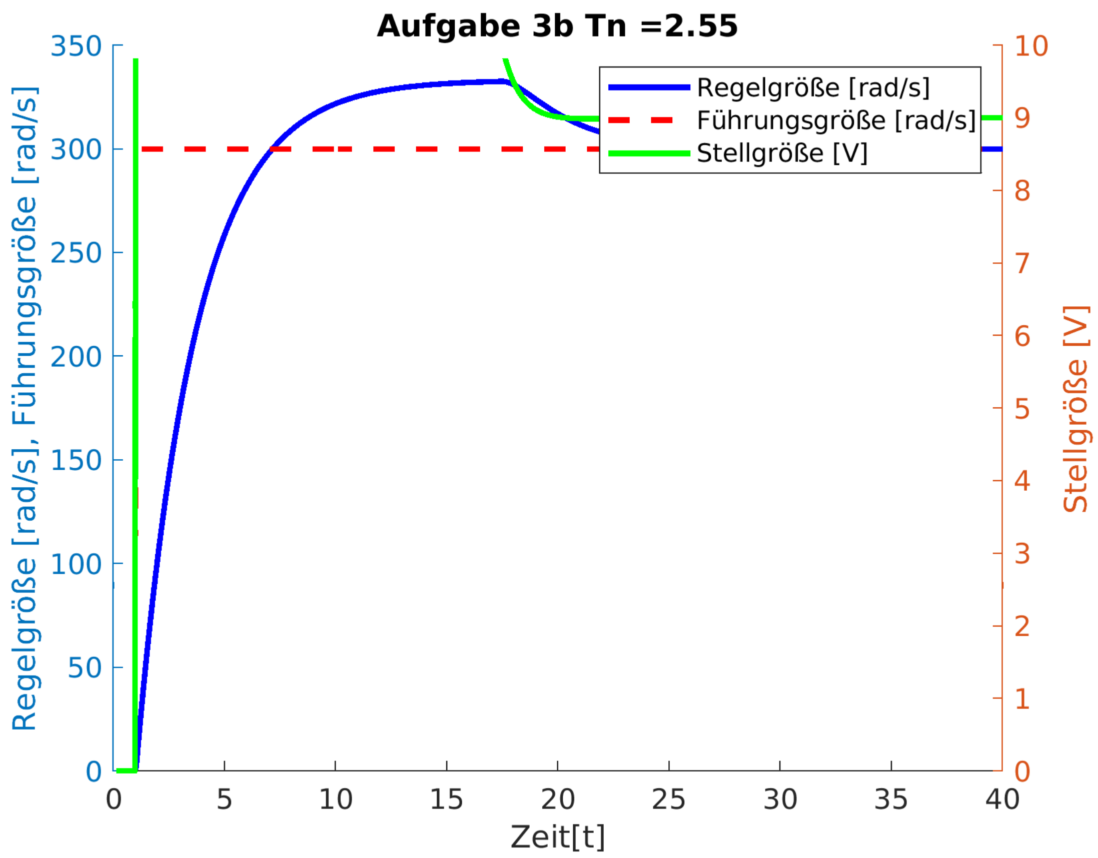

Abbildung 11: Aufgabe 3. b. Plot TN = 2,55

In Abbildung 11: kann beobachtet werden, dass sich die Regelgröße der führungsgröße annährt, dieser allerdings Überschreitet und sich anschließend der Führungsgröße erneut annährt und Stationär bleibt.

$$y(t) = KR \cdot (e(t) + \frac{1}{TN} \cdot \int e(t)\ dt)$$

Der Ausdruck KR * e(t) bleibt durchgehend gering und verursacht keine Probleme für die Regelung. Allerdings wird das System auch durch einen I-Anteil gesteuert, der aus einem Integral besteht.

Der I-Anteil integriert die Fläche der Regeldifferenz über die Zeit. Wenn der Saturation-Block nicht in die Sättigung gerät, kann der Regler schnell die Regelgröße auf die Führungsgröße bringen, und die integrierte Fläche über die Zeit bleibt gering. Siehe Abbildung 12:

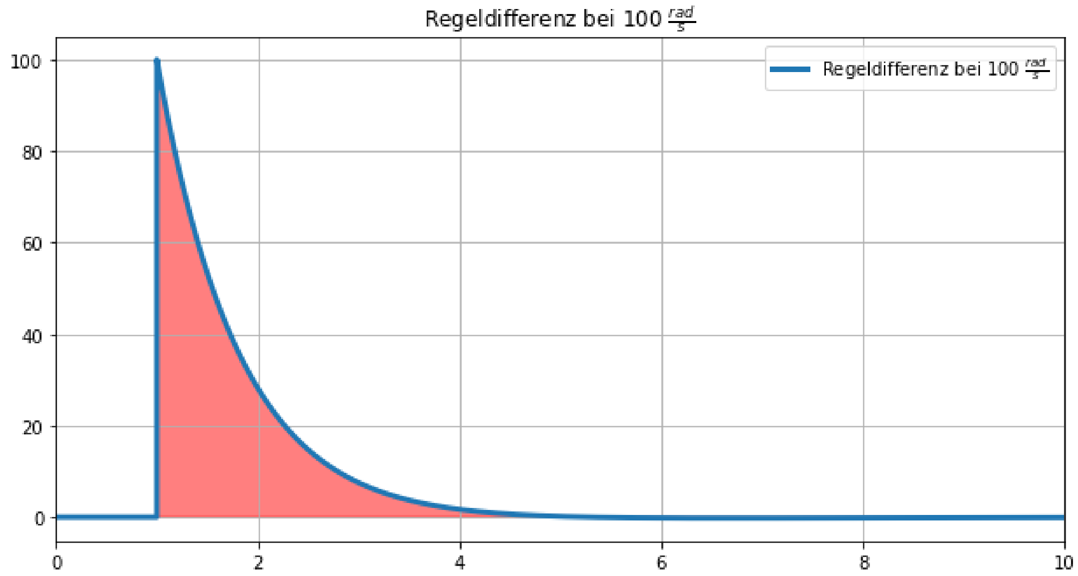

Abbildung 12: Aufgabe 3. b. Regeldifferenz bei 100 $\frac{rad}{s}$

Wenn jedoch eine hohe Führungsgröße vorgegeben wird und der Saturation-Block längere Zeit in die Sättigung geht, nimmt die Regeldifferenz im Laufe der Zeit kontinuierlich zu. Dadurch wird die Fläche der Regeldifferenz immer größer und damit auch das Integral. Zum Zeitpunkt, an dem das System die Führungsgröße erreicht hat, ist die integrierte Fläche der Regeldifferenz sehr groß, und folglich überschreitet die Regelgröße die Führungsgröße.

Danach wird die Regeldifferenz negativ, und die Fläche wird subtrahiert. Der I-Anteil kompensiert sich selbst, und schließlich erreicht die Regelgröße die Führungsgröße und bleibt dann stabil auf diesem Niveau. Siehe Abbildung 13:

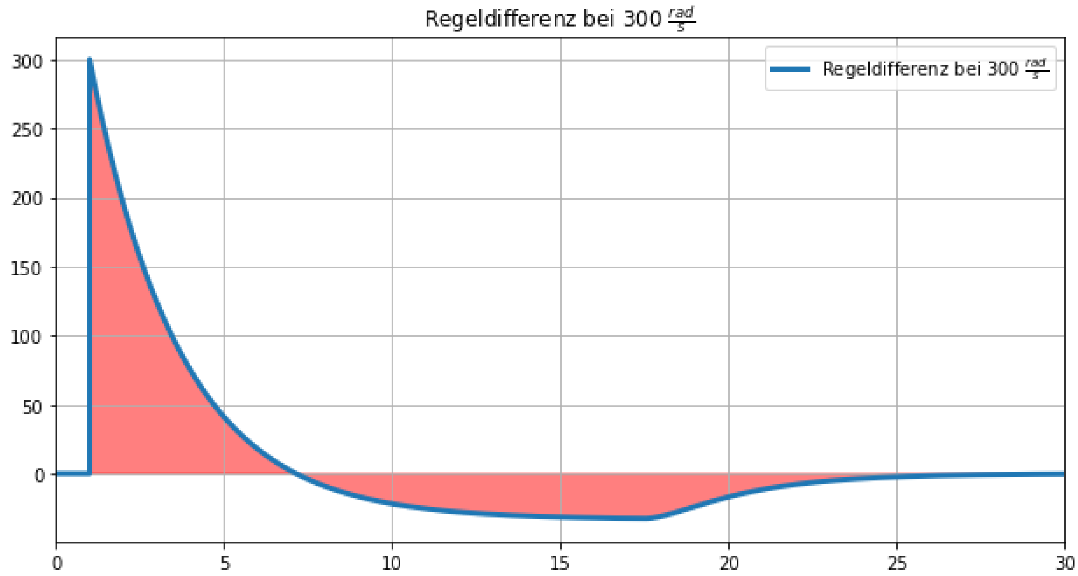

Abbildung 13: Aufgabe 3. b. Regeldifferenz bei 300 $\frac{rad}{s}$

5 Aufgabe 4. Drehzahlregelung mit Lastmoment

In dieser Aufgabe wird ein Lastmoment (z.B. Reibung) auf den Ausgang des Systems ausgeübt, woraufhin das Verhalten untersucht wird. In Abbildung 14: ist das verwendete Simulink Modell dargestellt und der verwendete Matlab-Code in Code 5:

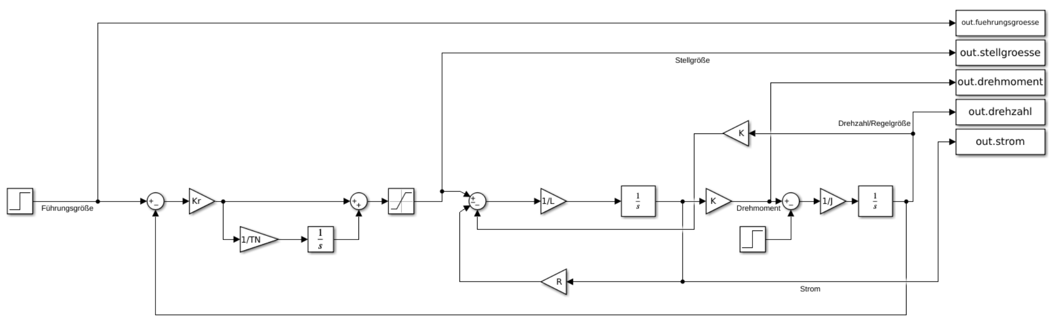

Abbildung 14: Aufgabe 4. Simulink-Modell mit Lastmoment

```
 clear  all;
K = 30e-3;
J = 4000e-7;
R = 6;
L = 120e-6;
D = 100;
LM = 0.01;
T_LAST = 10;

%Berechnung von Kr
Umax=10;
emax=100;
Kr=Umax/emax;

TN=2.55;

opt=simset('MaxStep', 0.001);
simout=sim("Aufgabe4_sim.slx" , [0,20], opt);
time=simout.drehmoment.time;
drehmoment=simout.drehmoment.signals.values;
drehzahl=simout.drehzahl.signals.values;
regelgroesse=drehzahl;
strom=simout.strom.signals.values;
stellgroesse=simout.stellgroesse.signals.values;
fuehrungsgroesse=simout.fuehrungsgroesse.signals.values;

f=figure(1); clf;
title(strcat('Aufgabe4 Tn =', num2str(TN)));
hold on;
yyaxis left;
plot(time, regelgroesse,'b', 'LineWidth', 2);
plot(time, fuehrungsgroesse, 'r', 'LineWidth', 2);
ylabel('Regelgr  e [rad/s], F hrungsgr  e [rad/s]');
xlabel('Zeit[t]');
yyaxis right;
plot(time, stellgroesse, 'g', 'LineWidth', 2);
plot(time, drehmoment*1000, 'm', 'LineWidth', 2);
ylabel('Stellgr  e [V], Drehmoment*1000 [Nm]');

legend("Regelgr  e [rad/s]", "F hrungsgr  e [rad/s]", "
   Stellgr  e [V]", "Drehmoment*1000 [Nm]");
```

```
exportgraphics(f,strcat(strcat('./Schaubilder/Aufgabe4Tn=',
    num2str(TN)), '.png'),'Resolution',300);
hold off;
```

Listing 5: Matlab Skript für Aufgabe 4.

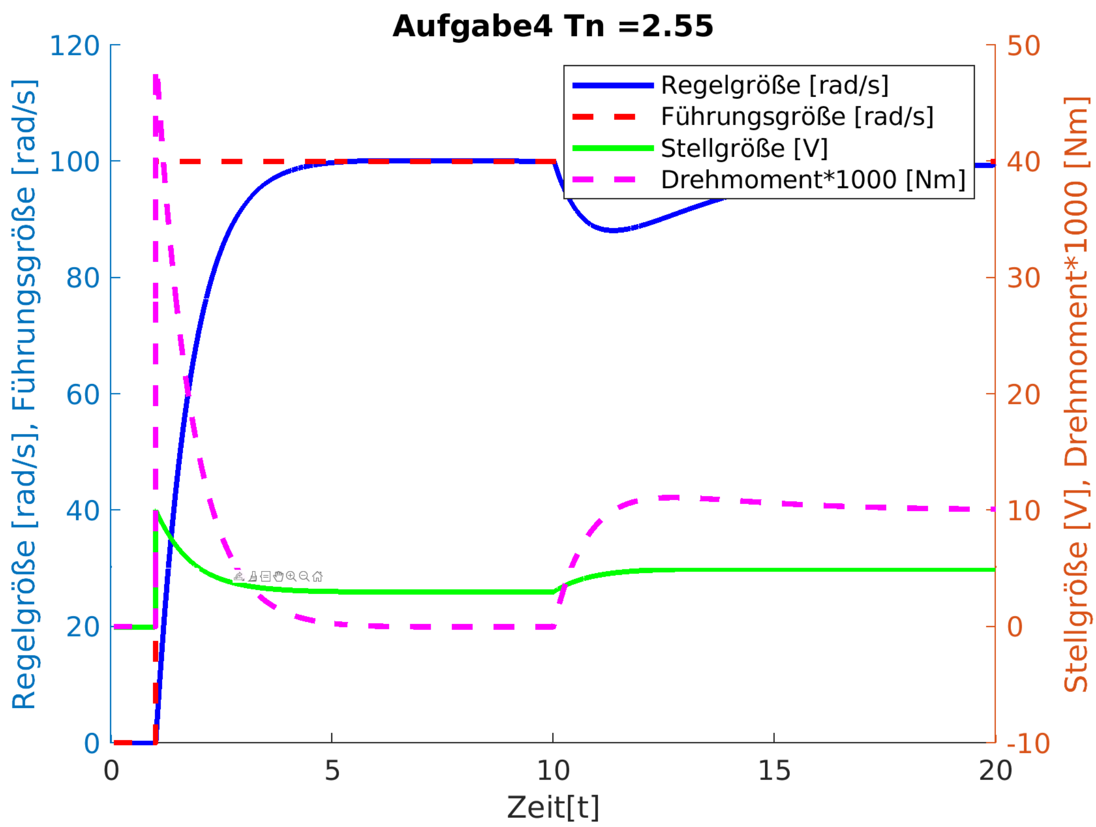

Abbildung 15: Aufgabe 4. Plot mit Lastmoment

In Abbildung 15: ist erkennbar, dass die Regelgröße sich der Führungsgröße annähert und diese erreicht. Ab dem Zeitpunkt t=10s tritt eine Störung auf (z.B. Reibung), was daran zu erkennen ist, dass die Regelgröße von der Führungsgröße abweicht. Der Regler reagiert darauf und gleicht diese Störung aus. Anschließend nähert sich die Regelgröße wieder der Führungsgröße an.

Abbildungsverzeichnis

Codeverzeichnis