



HTBLuVA St. Pölten

Höhere Abteilung Elektrotechnik

3100 St. Pölten, Waldstrasse 3

Tel: 02742-75051-300

Homepage: <http://et.htlstp.ac.at>

E-Mail: et@htlstp.ac.at



Projekt-Titel:

REGELUNGSTECHNISCHE GRUNDELEMENTE

Mitglieder:

LABENBACHER MICHAEL

NEULINGER DAVID

AUGUST LOIBL

EDER DANIEL

Projektort: HTBL u. VA in St. Pölten

Projektdatum: 28. Oktober 2015

Projektnummer: 03

Projektgruppe: 1

Fach: Laboratorium

Jahrgang/Klasse: 2015/16 5AHET

Lehrer: Dipl.-Ing. Dr. Wilhelm Haager

Protokollführer:	Unterschriften:	Note:
<i>Labenbacher Michael</i>		

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Verwendete Geräte & Betriebsmittel	3
3	Verzögerungsglied 1. Ordnung PT_1	4
3.1	Eigenschaften und Aufgabenstellungen	4
3.2	Schaltungsentwicklung und Dimensionierung	6
3.3	Messungen und Auswertung	8
4	Integrierglied I	15
4.1	Eigenschaften und Aufgabenstellungen	15
4.2	Schaltungsentwicklung und Dimensionierung	17
4.3	Messungen und Auswertung	19
5	Integrierglied mit Verzögerung IT_1	24
5.1	Eigenschaften und Aufgabenstellungen	24
5.2	Blockschaltbild	26
5.3	Schaltungsentwicklung und Dimensionierung	27
5.4	Messungen und Auswertung	29
6	Verzögerungsglied 2. Ordnung PT_2	34
6.1	Eigenschaften und Aufgabenstellungen	34
6.2	Blockschaltbild	37
6.3	Schaltungsentwicklung und Dimensionierung	38
6.4	Messungen und Auswertung	40

7 Resümee	46
Abbildungsverzeichnis	47
Tabellenverzeichnis	48
Literaturverzeichnis	49
Abkürzungsverzeichnis	50

1 Einleitung

In diesem Projekt werden einige regelungstechnische Grundelemente auf dessen Eigenschaften hin untersucht. Dabei sind einige Grundkenntnisse bezüglich der Regelungstechnik vonnöten, welche im Unterricht erlangt wurden. Für die Nachvollziehbarkeit von Berechnungen werden natürlich einige mathematische Kenntnisse vorausgesetzt.

Für die Lösung von lineare zeitinvariante Differentialgleichungen wird die Laplace-Transformation angewandt. Dabei ergibt die Laplace-Transformierte der Zeitfunktion eine Funktion im Laplace-Bereich, was folgendermaßen geschrieben wird:

$$\mathcal{L}\{f(t)\} = F(s) \quad (1.1)$$

Anders gesagt, korrespondiert die Zeitfunktion mit der Funktion im Laplace-Bereich.

$$f(t) \circ \longrightarrow F(s)$$

Die Laplace-Transformierte einer Zeitfunktion ist, wie folgt, definiert:

$$\mathcal{L}\{f(t)\} = \int_0^{\infty} f(t) \cdot e^{-st} dt \quad (1.2)$$

t	Zeitvariable [sec]
s	Laplacevariable [sec ⁻¹]

Das Pendant dazu, sprich die Rücktransformation in den Zeitbereich wird allgemein mit

$$f(t) = \mathcal{L}^{-1}\{F(s)\} \quad (1.3)$$

beschrieben.

Eine wichtige Funktion, die noch zum Verständnis der Aufgaben beschrieben werden muss, ist die Sprungfunktion $\sigma(t)$, welche durch folgende *Funktion* beschrieben ist:

$$\sigma(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases} \quad (1.4)$$

Legt man nun am Eingang eine Funktion $f(t) = \sigma(t)$, so wird das System auf diese sprungförmige Änderung des Einganges reagieren. Die Ausgangsgröße die sich daraus dann ergibt nennt man Sprungantwort.

Mit diesen und weiteren Grundlagen, welche in unserem Lehrbuch *Regelungstechnik* [1] zu finden sind, kann mit der Untersuchung einzelner Elemente begonnen werden.

2 Verwendete Geräte & Betriebsmittel

Bez.	Betriebsmittel	Beschreibung/Typ	Geräte-Nr.
<i>O1</i>	Oszilloskop	Tektronix TDS 2004B	RA - 2/4
<i>FG1</i>	Frequenzgenerator	Voltcraft 7202	N-02-3
<i>N1</i>	Spannungsversorgung	Leybold 762 88 DC 15 V/3 A	—

Tabelle 2.1: Verwendete Geräte & Betriebsmittel

Des Weiteren wurden Widerstände, Kondensatoren, Operationsverstärker (OPV), Bayonet Neill–Concelman (BNC)-Strippen, Stecker, Verbindungsstripfen, etc. für die einzelnen Teilprojekte verwendet.

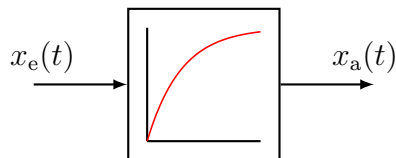
Die Spannungsversorgung aller verwendeten OPV betrug $+15\text{ V} / -15\text{ V}$ & GND und wurde immer mit Hilfe der Versorgung N1 zur Verfügung gestellt, jedoch in den einzelnen Schaltungen aus Übersichtlichkeit nicht eingezeichnet.

3 Verzögerungsglied 1. Ordnung

PT₁

3.1 Eigenschaften und Aufgabenstellungen

Bei einem PT_1 -Element ist die zeitliche Ableitung der Ausgangsgröße $x_a(t)$ proportional der Differenz zwischen Eingangsgröße $x_e(t)$ und Ausgangsgröße $x_a(t)$.



$$x_a(t) + T_{PT1} \cdot \dot{x}_a(t) = k_{PT1} \cdot x_e(t)$$

Auf Grund der Linearität und des Ableitungssatzes gilt bei verschwindenden Anfangsbedingungen:

$$(3.1) \quad G(s) = \frac{k_{PT1}}{1 + s T_{PT1}}$$

$$X_a(s) + s T_{PT1} \cdot X_a(s) = k_{PT1} \cdot X_e(s)$$

Bei der Sprungantwort ist $x_e(t) = 1$, womit sich für die Ausgangsgröße $x_a(t)$ folgendes ergibt:

$$x_a(t) = \left[k_{PT1} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{PT1}}} \right) \right] \cdot \sigma(t) \quad (3.2)$$

k_{PT1}	Stationärverstärkung des PT_1 -Elementes
T_{PT1}	Zeitkonstante des PT_1 -Elementes (beschreibt die Schnelligkeit)

Laut dem Endwerttheorem (EWT) folgt eine Verstärkung nach theoretisch unendlich langer Zeit von k_{PT1} und das Anfangswerttheorem (AWT) liefert 0. Für die Anfangssteigung gilt k_{PT1}/T_{PT1} .

Für die Beschreibung des Amplitudenganges wird die Knickfrequenz, welche sich aus der Polstelle der Übertragungsfunktion 3.1 berechnen lässt,

$$\omega_K = \frac{1}{T_{PT1}} \quad (3.3)$$

verwendet. Dadurch lässt sich der Amplitudengang grob in zwei Bereiche unterteilen:

$$G(j\omega) = \begin{cases} k_{PT1}, & \text{wenn } \omega \ll \omega_K \\ \frac{k_{PT1}}{\omega T_{PT1}}, & \text{wenn } \omega \gg \omega_K \end{cases} \quad (3.4)$$

Die Phasenverschiebung beträgt dabei bei, relativ gesehen, kleinen Frequenzen 0° und bei großen Frequenzen -90° , wobei der Übergang in der Nähe der Knickfrequenz erfolgt, wo $\varphi = 45^\circ$ beträgt. Die exakte Beschreibung des Phasenganges ist:

$$\varphi = -\arctan(\omega T_{PT1}) \quad (3.5)$$

Die Aufgabe besteht nun darin, ein PT_1 -Element mit Hilfe einer aktiven Schaltung, bestehend aus einem OPV, aufzubauen. Die stationäre Verstärkung des Systems soll 1 und die Zeitkonstante 100 msec betragen.

Nach der Entwicklung der Schaltung ist eine Dimensionierung durchzuführen und mit Hilfe vom Computeralgebrasystem Maxima ist die Sprungantwort des Systems zu berechnen und graphisch darzustellen.

Nach dem erfolgreichem Aufbau und Inbetriebnahme ist die Berechnung messtechnisch zu überprüfen, indem als Eingangssignal $x_e(t)$ eine sprungförmige Spannung von 0 V auf 1 V angelegt und daraufhin der Verlauf der Ausgangsspannung $x_a(t)$ gemessen wird.

Die sich ergebende Abweichungen sind im Anschluss darauf zu analysieren und diskutieren.

3.2 Schaltungsentwicklung und Dimensionierung

Ein PT_1 -Element lässt sich mit folgender aktiven, invertierenden OPV-Schaltung aufbauen (Achtung: hier tritt zusätzlich noch eine Invertierung auf):

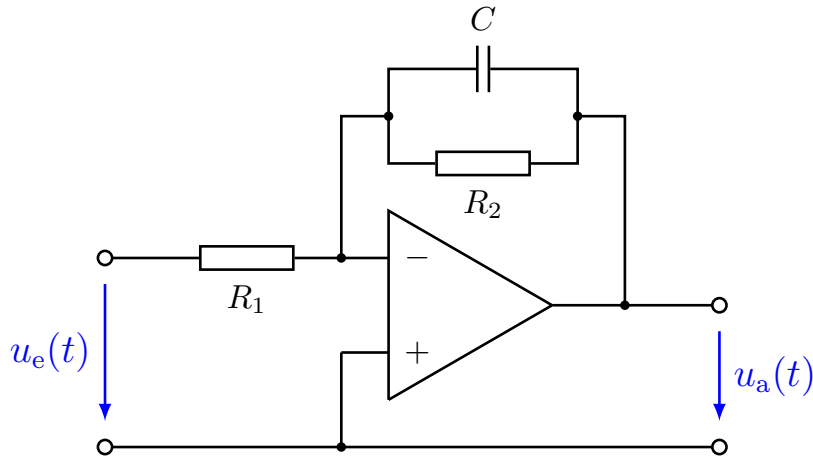


Abbildung 3.1: Schaltung eines PT_1 -Elementes

Zu den gesamten Messschaltungen in diesem Projekt gehören natürlich noch die Spannungsversorgung der OPV von $+15\text{ V}$, 0 V , -15 V , der Frequenzgenerator und das Oszilloskop. Die Übertragungsfunktion dieser Schaltung 3.1 lautet:

$$G(s) = \frac{-\frac{R_2}{R_1}}{1 + s R_2 C} \quad (3.6)$$

, womit sich für den Phasengang

$$\varphi = -\arctan(\omega R_2 C) \quad (3.7)$$

ergibt.

Für die Parameter eines PT_1 -Gliedes bedeutet dies:

$$k_{PT1} = \frac{R_2}{R_1} \quad (3.8)$$

$$T_{PT1} = R_2 C \quad (3.9)$$

Dies bedeutet, dass bei kleinen Frequenzen die Phasenverschiebung 0° , hingegen bei hohen Frequenzen $\varphi = -90^\circ$ beträgt. Der Übergang erfolgt im Bereich der Knickfrequenz, welche bei

$$\omega_K = \frac{1}{R_2 C}$$

liegt. Der Phasenwinkel beträgt dort -45° und der Betrag des Frequenzganges $\frac{1}{\sqrt{2}}$ (-3 dB), wenn $k_{PT1} = 1$ ist.

Bei einer sprungförmigen Eingangsspannung von 0 V auf $u_e(t) = 1\text{ V}$ ($U_e(s) = \frac{1}{s}$) ergibt sich, nach der Formel 3.2, folgende Ausgangsgröße:

$$U_a(s) = G(s) \cdot U_e(s) = \frac{-\frac{R_2}{R_1}}{s(1 + s R_2 C)} \quad (3.10)$$

$$u_a(t) = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{R_2 C}} \right) \quad (3.11)$$

Nun erfolgt die Dimensionierung der Bauelemente mit den Formeln 3.8 & 3.9, wobei ein Kondensator von $C = 1\text{ }\mu\text{F}$ gewählt wurde:

$$\begin{aligned} k_{PT1} = \frac{R_2}{R_1} &\stackrel{!}{=} 1 &\Rightarrow & R_2 = R_1 \\ T_{PT1} = R_2 C &\stackrel{!}{=} 0.1\text{ sec} &\Rightarrow & R_2 = \frac{1}{1\text{ }\mu\text{F}} \cdot 0.1\text{ sec} = 100\text{ k}\Omega = R_1 \end{aligned}$$

C	R_1	R_2	k_{PT1}	T_{PT1}
$[\mu\text{F}]$	$[\text{k}\Omega]$	$[\text{k}\Omega]$	$[\]$	$[\text{sec}]$
1	100	100	1	0.1

Tabelle 3.1: Bauteilwahl und Parametergrößen des PT_1 -Elementes

3.3 Messungen und Auswertung

Nach dem erfolgreichen Aufbau und der Inbetriebnahme der Schaltung Abb. 3.1, konnte die Sprungantwort des PT_1 -Gliedes aufgenommen werden, was folgendes Oszilloskop-Bild ergab:

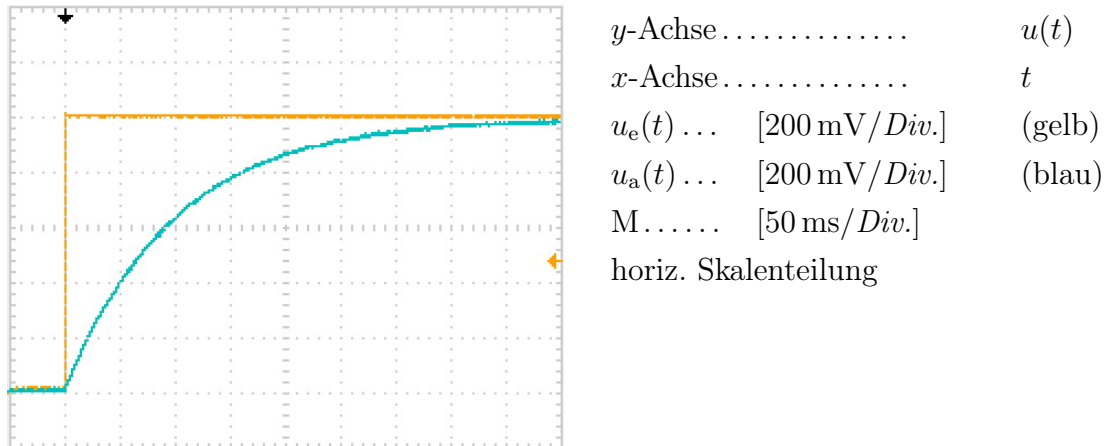


Abbildung 3.2: Oszilloskopaufnahme der Sprungantwort des PT_1 -Elementes

Die Abb. 3.2 zeigt, dass die Steigung von der Ausgangsgröße bei einem PT_1 -Element mit kleiner werdender Differenz zwischen Ein- & Ausgangsgröße sinkt und umgekehrt.

Für die Messung des Stationärwertes und der Zeitkonstante wird nun das Computeralgebrasystem Maxima verwendet.

Die Daten vom Oszilloskop wurden mit Hilfe von Maxima eingelsen und ausgewertet, was folgendes Maxima-Program für die Berechnung und Gegenüberstellung ergab:

```
(%i4) kill(all)$
      load(coma)$
      fpprintprec:5$
      ratprint:false$
      set_draw_defaults(grid=true,point_type=0,points_joined=true)$
```

coma v.1.73, (Wilhelm Haager, 2015-01-09)

PT_1 -Element:

```
(%i5)  Vorgabe:[T_PT1=0.1,k_PT1=1]$
(%i6)  Bauteilwahl:[C=1e-6]$
(%i8)  glg1:k_PT1=R2/R1$
      glg2:T_PT1=C*R2$
(%i9)  ev(solve([glg1,glg2],[R1,R2]),Vorgabe,Bauteilwahl);
(%o9)  [[R1 = 100000, R2 = 100000]]
(%i12) Bauteilwerte:[R1=100*10^(3),R2=100*10^(3),C=1e-6]$
      k_PT1:ev(R2/R1,Bauteilwerte);
      T_PT1:ev(C*R2,Bauteilwerte);
(%o11)  1
(%o12)  0.1
```

Übertragungsfunktion:

```
(%i14) G(s):=-k_PT1/(1+s*T_PT1)$
      G(s);
```

```
(%o14)  -\frac{1}{0.1 \cdot s + 1}
```

Sprungantwort:

```
(%i22) u_e(t):=1$
      u_e(t);
      U_e(s):=laplace(u_e(t),t,s)$
      U_e(s);
      U_a(s):=U_e(s)*G(s)$
      U_a(s);
      u_a(t):=ilt(U_a(s),s,t)$
      u_a(t);
```

```
(%o16) 1
```

```
(%o18) 1
      s
```

```
(%o20) - 1
      (0.1 · s + 1) · s
```

```
(%o22) e-10·t - 1
```

bzw. nach der Formel 3.2:

```
(%i24) u_a(t):=k_PT1*(1-%e^(-t/T_PT1))$
      u_a(t);
```

```
(%o24) 1 - e-10.0·t
```

Anfangssteigungsgerade:

```
(%i26) gerade1(t):=k_PT1/T_PT1*t$
      gerade1(t);
```

```
(%o26) 10.0 · t
```

```
(%i27) step_response( [u_e(t),-G(s),explicit(gerade1(t),t,-1,1)],
    color=[black,navy,forest-green],
    yrange=[-0.2,1.2],xrange=[-0.1,0.5],
    yaxis=true,xaxis=true,line_type=[solid,solid,dots],
    xlabel="t [s]",
    ylabel="u_e(t) [V] (schwarz) / -u_a(t) [V] (blau)");
```

```
(%t27)
```

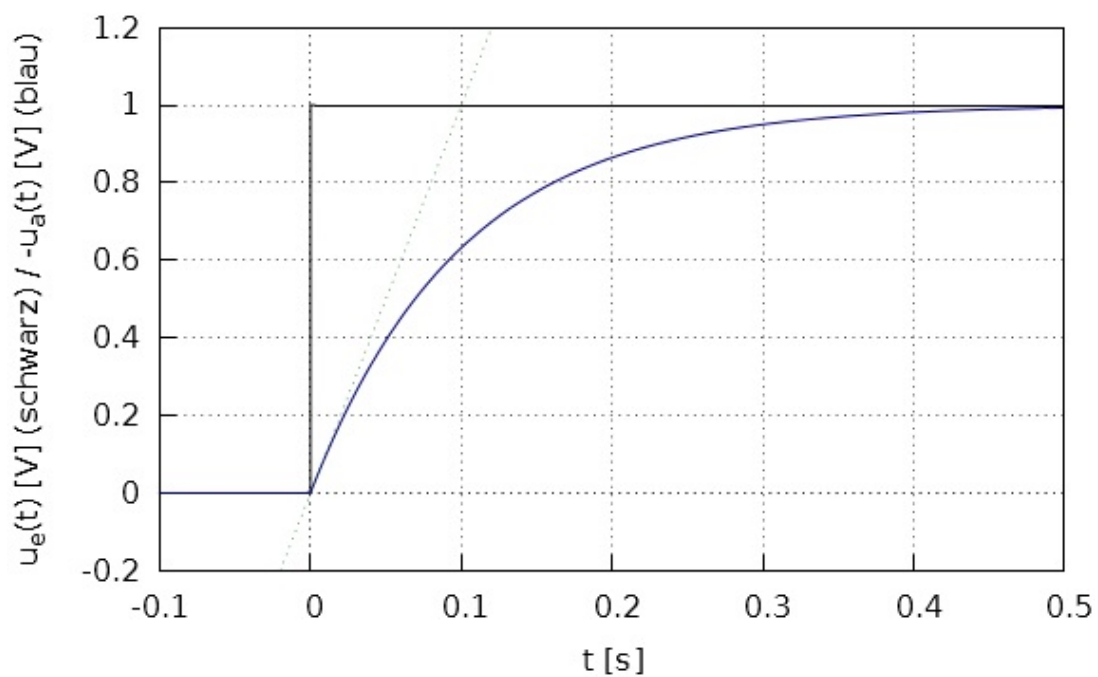


Abbildung 3.3: Berechnung der Sprungantwort des PT_1 -Elementes

```
(%o27)
```

Einlesen der gemessenen Werte und vergleichen der Rechen- mit den Messwerten:

B... Berechnung

M... Messung

```
(%i32) ue_liste:read_nested_list("C:\\Users\\User\\Desktop\\Schule
\\Laboratorium-5AHET\\03_Regelungstechnische Grundelemente
\\0szi\\1_PT1\\F0015CH1.csv",comma)$
ua_liste:read_nested_list("C:\\Users\\User\\Desktop\\Schule
\\Laboratorium-5AHET\\03_Regelungstechnische Grundelemente
\\0szi\\1_PT1\\F0015CH2.csv",comma)$
t_werte:map(fourth,ue_liste)$ue_werte:map(fifth,ue_liste)$
ua_werte:map(fifth,ua_liste)$
(%i33) step_response( [u_e(t),-G(s),explicit(gerade1(t),t,-1,1),
points(t_werte,ua_werte)],yrange=[-0.2,1.2],
color=[black,navy,forest-green,red],xrange=[-0.1,0.5],
yaxis=true,xaxis=true,line_type=[solid,solid,dots,solid],
xlabel="t [s]",ylabel="u_e(t) [V] (schwarz)
/ -u_a_B(t) [V] (blau) / -u_a_M(t) [V] (rot)");
```

(%t33)

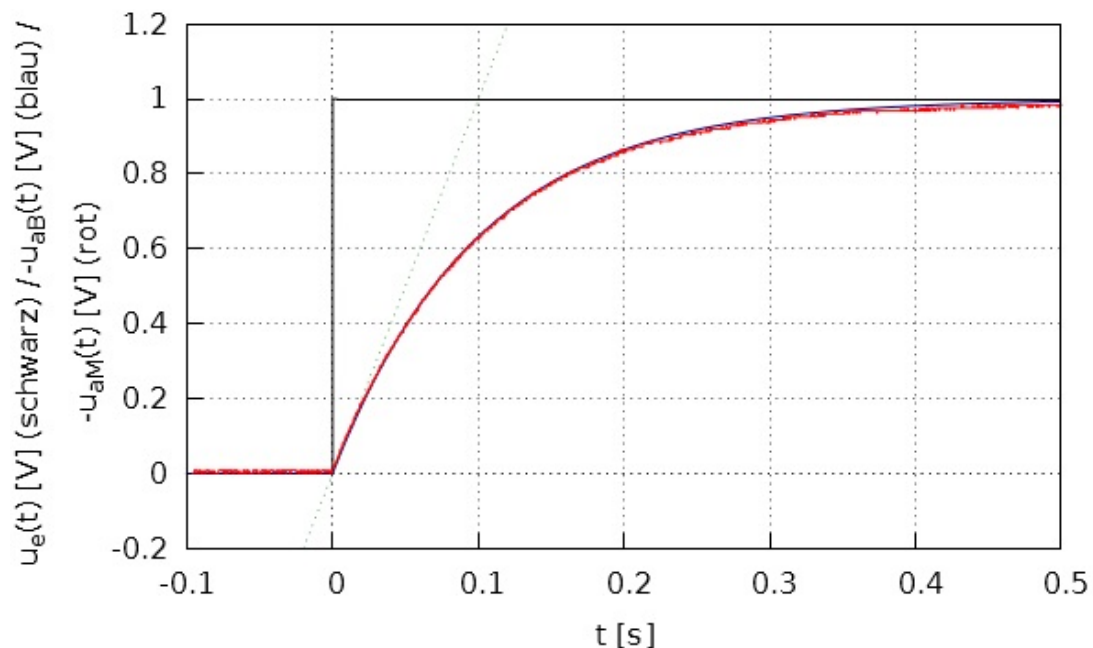


Abbildung 3.4: Vergleich der Sprungantworten eines PT_1 -Elementes

(%o33)

k_{PT1} aus den Messwerten herausfinden, indem die letzten 10 Werte gemittelt werden:

```
(%i39)  anzahl:length(t_werte)$  
        i:anzahl$s:0$  
        k_PT1_Messung_Summe:0$  
        while i>(anzahl-10) do  
            (k_PT1_Messung_Summe:k_PT1_Messung_Summe+ua_werte[i],  
             i:i-1,s:s+1)$  
        k_PT1_Messung:k_PT1_Messung_Summe/s;  
(%o39)  0.9904
```

T_{PT1} aus den Messwerten finden:

```
(%i44)  x:float(1-k_PT1_Messung*%e^(-1))$  
        i:1$s:1$  
        while ua_werte[i]<x do (i:i+1,s:s+1)$  
        T_PT1_Messung:t_werte[s];  
(%o44)  0.1024
```

$u_a(T_{PT1})$ auslesen:

```
(%i45)  ua_T_PT1:ua_werte[s];  
(%o45)  0.64
```


Messabweichungen:

$$F_a = x_m - x_r \quad (3.12)$$

$$F_r = \frac{x_m - x_r}{x_r} \cdot 100 \% \quad (3.13)$$

F_a	absolute Messabweichung
F_r	relative Messabweichung
x_m	Messwert
x_r	richtiger Wert

```
(%i46)  F_a_kPT1:k_PT1_Messung-k_PT1;
(%o46)  -0.0096
(%i47)  F_r_kPT1:(k_PT1_Messung-k_PT1)/k_PT1*100;
(%o47)  -0.96
(%i48)  F_a_T_PT1:T_PT1_Messung-T_PT1;
(%o47)  0.0024
(%i49)  F_r_kPT1:(T_PT1_Messung-T_PT1)/T_PT1*100;
(%o47)  2.4
```

Auswertung:

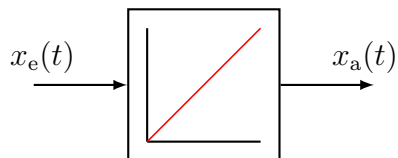
Dieser Abschnitt, bezüglich der Untersuchung von regelungstechnischen Grundelementen zeigte, dass die entstehenden Messabweichungen relativ gering sind und sich hauptsächlich aus Bauteiltoleranzen zusammensetzen.

Wir konnten dadurch feststellen, dass die Ausgangsgröße eines PT_1 -Elementes nach „unendlich langer Zeit“ proportional der Eingangsgröße ist, was sich durch den integrierenden Anteil begründen lässt.

4 Integrierglied I

4.1 Eigenschaften und Aufgabenstellungen

Bei einem I -Element ist die zeitliche Änderung der Ausgangsgröße $x_a(t)$ proportional der Eingangsgröße $x_e(t)$.



$$x_a(t) = \frac{1}{T_I} \cdot \int_0^t x_e(\tau) d\tau$$

Auf Grund der Linearität und des Integralsatzes folgt:

$$(4.1) \quad G(s) = \frac{1}{s T_I} \quad X_a(s) = \frac{1}{s T_I} \cdot X_e(s)$$

Bei der Sprungantwort ist $x_e(t) = 1$, womit sich für die Ausgangsgröße $x_a(t)$ folgendes ergibt:

$$x_a(t) = \left[\frac{1}{T_I} \cdot t \right] \cdot \sigma(t) \quad (4.2)$$

T_I Integrierzeit

Laut dem EWT folgt eine Verstärkung nach theoretisch unendlich langer Zeit von ∞ und das AWT liefert 0. Für die Anfangssteigung gilt $1/T_I$.

Die Phasenverschiebung eines I -Elementes beträgt stets:

$$\varphi = -90^\circ \quad (4.3)$$

Für die Beschreibung des Amplitudenganges wird die Durchtrittsfrequenz ω_D , wo der Betrag von $G(j\omega)$ 1 beträgt, verwendet:

$$\omega_D = \frac{1}{T_I} \quad (4.4)$$

Die Aufgabe ist es nun, ein I -Element mit Hilfe einer aktiven OPV-Schaltung aufzubauen, wobei die Integrierzeit 100 msec betragen soll. Nach der Entwicklung und Dimensionierung der Schaltung ist die Sprungantwort zu messen und mit der berechneten zu vergleichen, um im Anschluss Abweichungen zu analysieren und zu begründen.

4.2 Schaltungsentwicklung und Dimensionierung

Ein I -Element lässt sich mit der Schaltung Abb. 4.1 aufbauen (Achtung: hier tritt zusätzlich noch eine Invertierung auf):

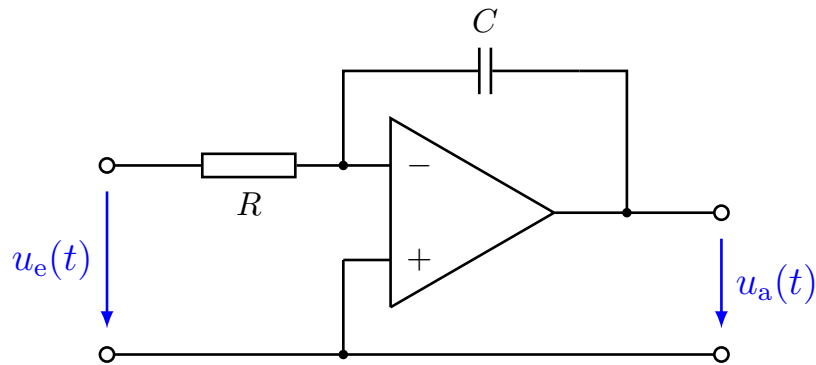


Abbildung 4.1: Schaltung eines I -Elementes

Für die Übertragungsfunktion und den Phasengang gilt:

$$G(s) = -\frac{1}{sRC} \quad (4.5)$$

$$\varphi = -90^\circ \quad (4.6)$$

Für die Parameter eines I -Gliedes bedeutet dies:

$$T_1 = RC \quad (4.7)$$

Durch einen Sprung am Eingang ergibt sich, nach Formel 4.2, folgende Ausgangsgröße:

$$U_a(s) = G(s) \cdot U_e(s) = -\frac{1}{s^2 RC} \quad (4.8)$$

$$u_a(t) = -\frac{1}{RC} \cdot t \quad (4.9)$$

Für die Dimensionierung wird die Formel 4.7 verwendet, wobei ein Kondensator von $1 \mu F$ verwendet wird und sich so ein Widerstand von

$$R = \frac{T_I}{C} = \frac{0.1 \text{ sec}}{1 \mu F} = 100 \text{ k}\Omega$$

C	R	T_I
$[\mu F]$	$[k\Omega]$	$[sec]$
1	100	0.1

Tabelle 4.1: Bauteilwahl und Parametergrößen des I -Elementes

4.3 Messungen und Auswertung

Nach dem Aufbau und der Inbetriebnahme der Schaltung Abb. 4.1, wurde die Sprungantwort, durch Anlegen einer sprungförmigen Eingangsspannung, aufgenommen, was folgendes Oszilloskop-Bild lieferte:

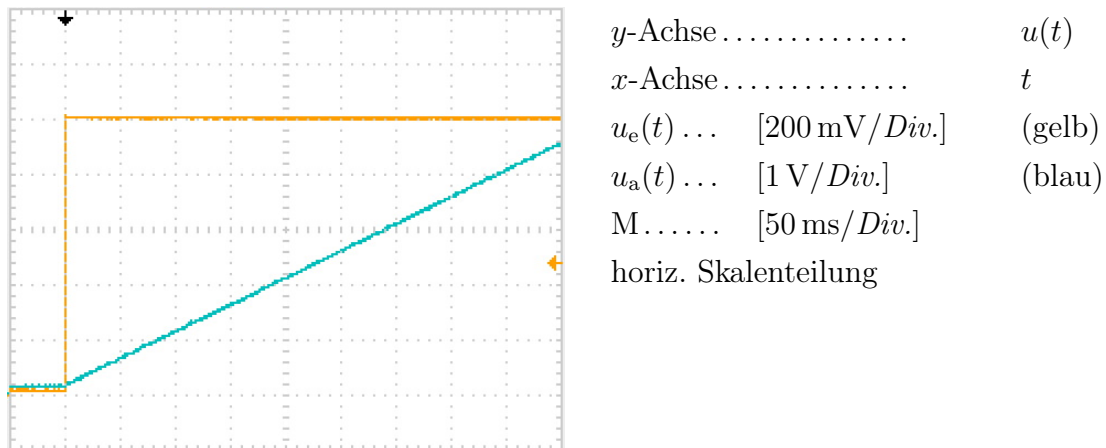


Abbildung 4.2: Oszilloskopaufnahme der Sprungantwort des I -Elementes

Die Aufnahme 4.2 zeigt, dass die Steigung der Ausgangsspannung von der Eingangsspannung abhängig ist. Die Auswertung der Messung erfolgt erneut mit Hilfe von Maxima.

Die Daten vom Oszilloskop wurden mit Hilfe von Maxima eingelsen und ausgewertet:

```
(%i5) kill(all)$
      load(coma)$
      fpprintprec:5$
      ratprint:false$
      load(dynamics)$
      set_draw_defaults(grid=true,point_type=0,points_joined=true)$
```

coma v.1.73, (Wilhelm Haager, 2015-01-09)

I -Element:

```
(%i6)  T_I:0.1;
(%o6)  0.1
```

Übertragungsfunktion:

```
(%i8)  G(s):=1/(s*T_I)$
      G(s);
(%o8)   $\frac{10.0}{s}$ 
```

Sprungantwort:

```
(%i16) u_e(t):=1$
      u_e(t);
      U_e(s):=laplace(u_e(t),t,s)$
      U_e(s);
      U_a(s):=U_e(s)*G(s)$
      U_a(s);
      u_a(t):=ilt(U_a(s),s,t)$
      u_a(t);
(%o10)  1
(%o12)   $\frac{1}{s}$ 
(%o14)   $\frac{10.0}{s^2}$ 
(%o16)   $10 \cdot t$ 
```

```
(%i17) step_response( [u_e(t),G(s)],
    color=[black,navy,forest-green],
    yrange=[-1,4],xrange=[-0.05,0.4],
    yaxis=true,xaxis=true,line_type=[solid,solid,dots],
    xlabel="t [s]", ylabel="u_e(t) [V] (schwarz)
    / u_a(t) [V] (blau)");
```

```
(%t17)
```

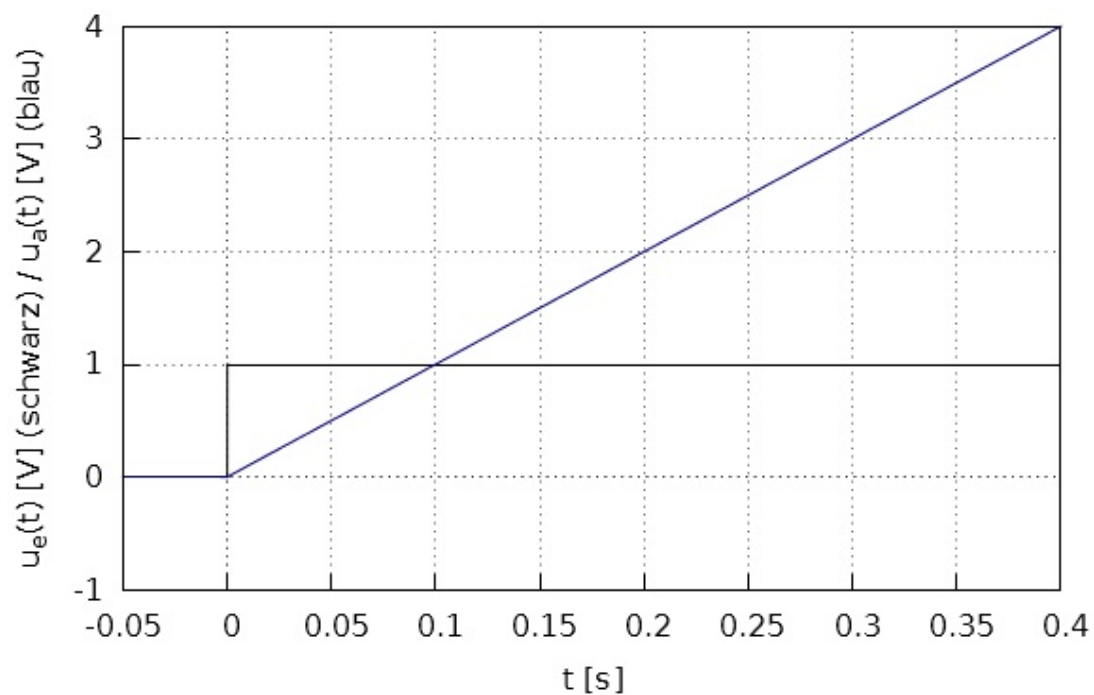


Abbildung 4.3: Berechnung der Sprungantwort des I -Elementes

```
(%o17)
```


Einlesen der gemessenen Werte und vergleichen der Rechenwerte mit den Messwerten:

```
(%i22) ue_liste:read_nested_list("C:\\Users\\User\\Desktop\\Schule
    \\Laboratorium-5AHET\\03_Regelungstechnische Grundelemente
    \\0szi\\2_I\\F0007CH1.csv",comma)$
ua_liste:read_nested_list("C:\\Users\\User\\Desktop\\Schule
    \\Laboratorium-5AHET\\03_Regelungstechnische Grundelemente
    \\0szi\\2_I\\F0007CH2.csv",comma)$
t_werte:map(fourth,ue_liste)$
ue_werte:map(fifth,ue_liste)$
ua_werte:map(fifth,ua_liste)$
(%i23) step_response( [u_e(t),G(s),points(t_werte,ua_werte)],
    color=[black,navy,red],
    yrange=[-1,4],xrange=[-0.05,0.4],
    yaxis=true,xaxis=true,line_type=[solid,solid,solid],
    xlabel="t [s]", ylabel="u_e(t) [V] (schwarz)
    / u_a_B(t) [V] (blau) / u_a_M(t) [V] (rot)");
(%t23)
```

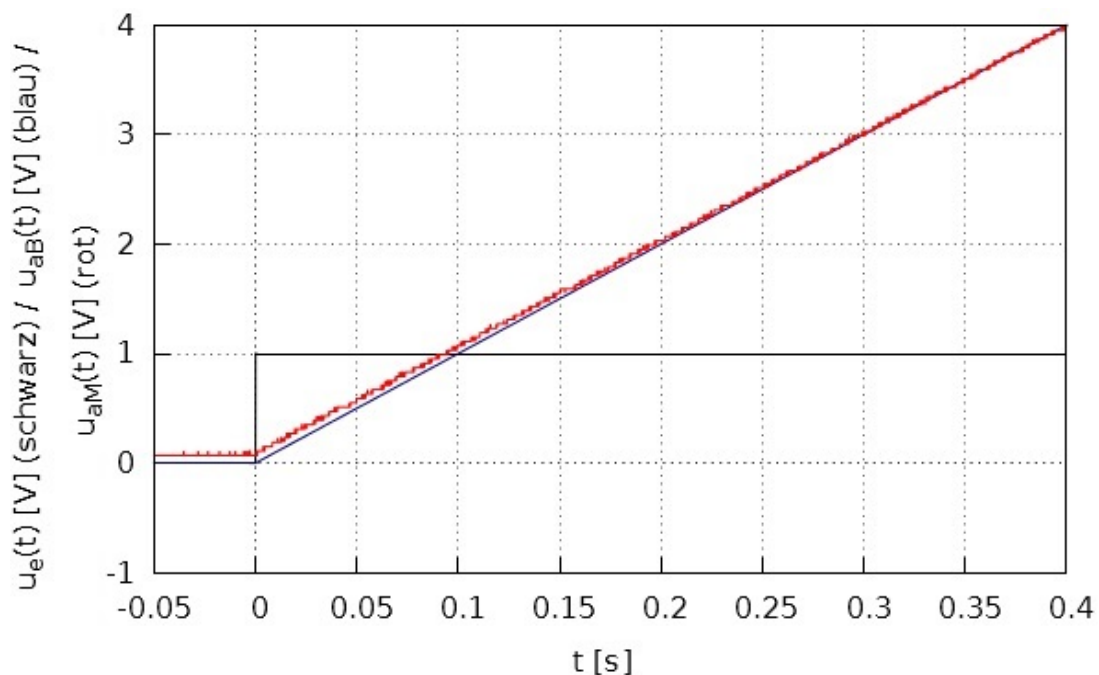


Abbildung 4.4: Vergleich der Sprungantworten eines I -Elementes

```
(%o23)
```

```
(%i29) Startwert_t:1000$i:1$
      Startwert_ua:ua_werte[Startwert_t];
      while ua_werte[i]<(Startwert_ua+1) do (i:i+1)$
      Endwert_t:i$
      Endwert_ua:ua_werte[Endwert_t];

(%o26) 1.6
(%o29) 2.6

(%i30) T_I_Messung:t_werte[Endwert_t]-t_werte[Startwert_t];
(%o30) 0.101
```

Messabweichungen:

```
(%i31) F_a_T_I:T_I_Messung-T_I;
(%o31) 0.001

(%i32) F_r_I:(T_I_Messung-T_I)/T_I*100;
(%o32) 1.0
```

Auswertung:

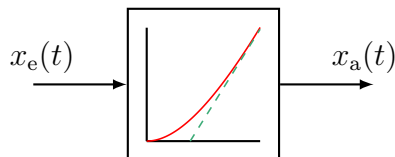
Die Messung und Berechnung zeigten nur sehr kleine Abweichungen ($\approx 1\%$), welche sich hauptsächlich durch Toleranzen der verwendeten Bauteile erklären lassen.

Nachdem der Integrator auf seinen Maximalwert, welcher sich durch den OPV ergibt, aufintegriert hat, kann dieser durch einen Parallelwiderstand an C oder durch Anlegen eines negativen Spannungsprunges wieder entladen werden.

5 Integrierglied mit Verzögerung IT₁

5.1 Eigenschaften und Aufgabenstellungen

Ein IT₁-Element kann als eine Sereinschaltung eines I-Elementes und einem PT₁-Glied aufgefasst werden.



$$x_a(t) + T_{PT1} \cdot \dot{x}_a(t) = k_{PT1} \cdot \frac{1}{T_I} \cdot \int_0^t x_e(\tau) d\tau$$

Auf Grund der Linearität und des Ableitungs- und Integralsatzes gilt bei verschwindenden Anfangsbedingungen:

$$(5.1) \quad G(s) = \frac{k_{PT1}}{s T_I (1 + s T_{PT1})}$$

$$X_a(s) + s T_{PT1} \cdot X_a(s) = k_{PT1} \cdot \frac{1}{s T_I} \cdot X_e(s)$$

Bei der Sprungantwort ist $x_e(t) = 1$, womit sich für die Ausgangsgröße $x_a(t)$ folgendes ergibt:

$$x_a(t) = \left[k_{PT1} \cdot \left(\frac{1}{T_I} \cdot t - \frac{T_{PT1}}{T_I} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{PT1}}} \right) \right) \right] \cdot \sigma(t) \quad (5.2)$$

k_{PT1} Stationärverstärkung des PT₁-Elementes

T_{PT1} Zeitkonstante des PT₁-Elementes

T_I Zeitkonstante des I-Elementes

Das EWT & AWT liefern den Wert 0 und auch die Anfangssteigung beträgt 0.

Für die Beschreibung des Amplitudenganges existiert eine Knickfrequenz ω_K und eine Durchtrittsfrequenz ω_D , welche sich aus den Polstellen der Übertragungsfunktion 5.1 berechnen lassen:

$$\omega_K = \frac{1}{T_{PT1}} \quad (5.3)$$

$$\omega_D = \frac{1}{T_I} \quad (5.4)$$

Der Amplitudengang kann somit näherungsweise mit

$$G(j\omega) = \begin{cases} \frac{k_{PT1}}{\omega T_I}, & \text{wenn } \omega \ll \omega_K \\ \frac{k_{PT1}}{\omega^2 T_{PT1} T_I}, & \text{wenn } \omega \gg \omega_K \end{cases} \quad (5.5)$$

beschrieben werden. Für den Phasengang gilt allgemein:

$$\varphi = -90^\circ - \arctan(\omega T_{PT1}) \quad (5.6)$$

Dies bedeutet, dass bei, relativ gesehen, sehr kleinen Frequenzen die Phasenverschiebung -90° beträgt und bei großen -180° . Der Übergang erfolgt bei der Knickfrequenz, wo $\varphi = -135^\circ$ beträgt.

Die Aufgabe dieses Abschnittes ist die Untersuchung eines IT_1 -Elementes, durch aufbauen einer Schaltung, bzw. durch Zusammenschalten der Schaltungen im Kap. 3 & 4.

Die Parameter bleiben dabei gleich ($T_I = 100 \text{ msec}$, $T_{PT1} = 100 \text{ msec}$, $k_{PT1} = 1$) und so kann auf die Dimensionierung der Bauelemente verzichtet werden und die Bauteilwerte sind den vorangegangenen Kapiteln zu entnehmen.

Nach der Inbetriebnahme ist die Rechnung der Sprungantwort mit Maxima wieder messtechnisch zu überprüfen und die sich dabei ergebenden Abweichungen sind daraufhin zu analysieren und diskutieren.

5.2 Blockschaltbild

Ein IT_1 -Element hat eine sehr hohe Bedeutung in der Regelungstechnik, da häufig die offene Regelschleifen F_o ein solches Verhalten aufzeigen. Als Beispiel sei angeführt das Anlaufverhalten eines Motors, welcher ein Förderband antreibt. Das Integral der Motorumdrehung entspricht dabei der zurückgelegten Strecke des Förderbandes.

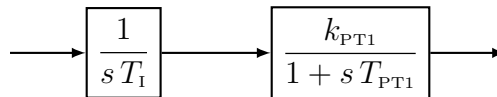


Abbildung 5.1: Blockschaltbild eines IT_1 -Elementes

Allgemein kann die offene Regelschleife folgendermaßen berechnet werden:

$$F_o(s) = F_R(s) \cdot F_S(s) \quad (5.7)$$

F_o	Übertragungsfunktion der offene Regelschleife
F_R	Übertragungsfunktion des Reglers
F_S	Übertragungsfunktion der Regelstrecke

5.3 Schaltungsentwicklung und Dimensionierung

Mit der folgenden Schaltung konnte ein IT_1 -Element aufgebaut werden:

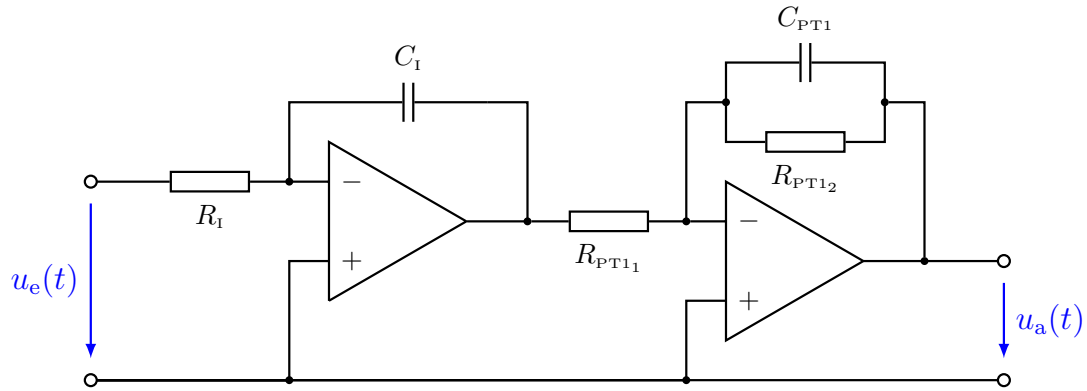


Abbildung 5.2: Schaltung eines IT_1 -Elementes

Die Übertragungsfunktion und der Phasengang können folgendermaßen beschrieben werden:

$$G(s) = \frac{\frac{R_{PT12}}{R_{PT11}}}{s R_I C_I (1 + s R_{PT12} C_{PT1})} \quad (5.8)$$

$$\varphi = -90^\circ - \arctan(\omega R_{PT12} C_{PT1}) \quad (5.9)$$

Für die Parameter eines IT_1 -Gliedes bedeutet dies:

$$T_{PT1} = R_{PT12} C_{PT1} \quad (5.10)$$

$$T_I = R_I C_I \quad (5.11)$$

Für die Knick- & Durchtrittsfrequenz gilt nun:

$$\omega_K = \frac{1}{R_{PT12} C_{PT1}} \quad (5.12)$$

$$\omega_D = \frac{1}{R_I C_I} \quad (5.13)$$

Wird nun eine sprungförmige Eingangsspannung von 0 V auf 1 V angelegt, so ergibt sich, nach der Formel 5.2, folgende Ausgangsgröße:

$$U_a(s) = G(s) \cdot U_e(s) = \frac{k_{PT1}}{s^2 T_I (1 + s T_{PT1})} \quad (5.14)$$

$$u_a(t) = \frac{R_{PT12}}{R_{PT11}} \cdot \left(\frac{1}{R_I C_I} \cdot t - \frac{R_{PT12} C_{PT1}}{R_I C_I} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{R_{PT12} C_{PT1}}} \right) \right) \quad (5.15)$$

Somit ergeben sich folgende Bauteilwerte und Parametergrößen:

C_I	R_I	C_{PT1}	R_{PT11}	R_{PT12}	T_I	k_{PT1}	T_{PT1}
[kΩ]	[μF]	[μF]	[kΩ]	[kΩ]	[sec]	[]	[sec]
1	100	1	100	100	0.1	1	0.1

Tabelle 5.1: Bauteilwahl und Parametergrößen des IT_1 -Elementes

5.4 Messungen und Auswertung

Nach der Inbetriebnahme der Schaltung Abb. 5.2 wurde die Sprungantwort des IT_1 -Gliedes aufgezeichnet, was folgendes Oszilloskop-Bild ergab (besser wäre es gewesen, wenn man „hineingezoomt“ hätte):

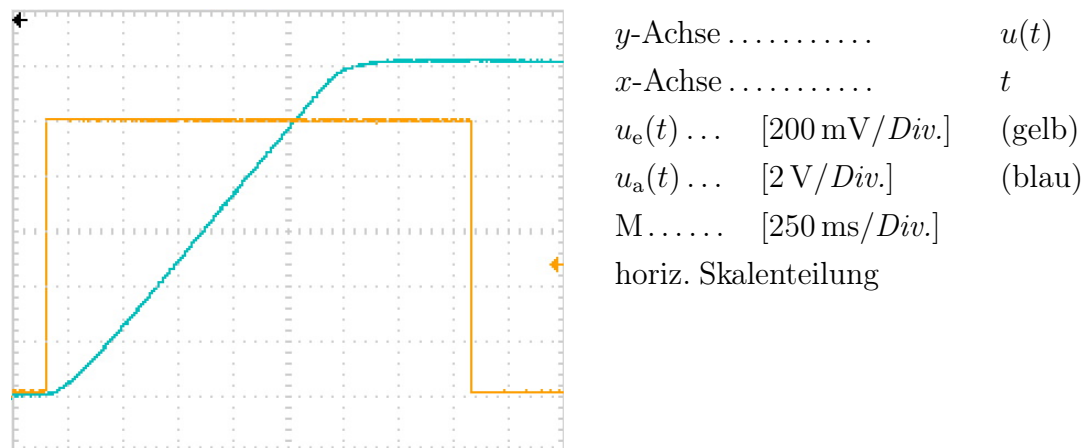


Abbildung 5.3: Oszilloskopaufnahme der Sprungantwort des IT_1 -Elementes

Es ist in der Abbildung deutlich ersichtlich, dass der Integrator durch den OPV auf $\approx 12 \text{ V}$ als Maximalwert begrenzt ist. Im Anschluss darauf wurden die Daten in Maxima eingelesen und ausgewertet.

Folgendes Maxima-Program wurde dafür verfasst:

```
(%i4) kill(all)$
      load(coma)$
      fpprintprec:5$
      ratprint:false$
      set_draw_defaults(grid=true,point_type=0,points_joined=true)$
```

coma v.1.73, (Wilhelm Haager, 2015-01-09)

IT_1 -Element:

```
(%i7)  T_I:0.1;
      T_PT1:0.1;
      k_PT1:1;

(%o5)  0.1
(%o6)  0.1
(%o7)  1

(%i9)  G(s):=1/(s*T_I)*k_PT1/(1+s*T_PT1)$
      G(s);

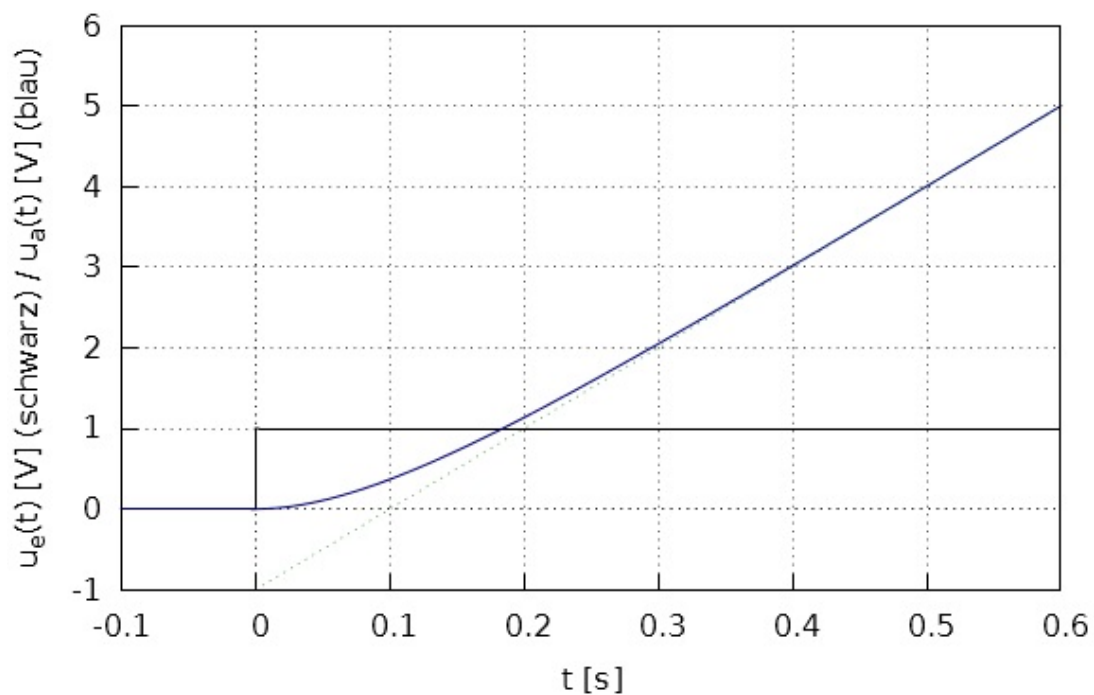
(%o9)  
$$\frac{10.0}{(0.1 \cdot s + 1) \cdot s}$$

```

Sprungantwort:

```
(%i17) u_e(t):=1$
      u_e(t);
      U_e(s):=laplace(u_e(t),t,s)$
      U_e(s);
      U_a(s):=U_e(s)*G(s)$
      U_a(s);
      u_a(t):=ilt(U_a(s),s,t)$
      u_a(t);
```

```
(%o11) 1
(%o13)  $\frac{1}{s}$ 
(%o15)  $\frac{10.0}{(0.1 \cdot s + 1) \cdot s^2}$ 
(%o17)  $e^{-10 \cdot t} + 10 \cdot t - 1$ 
(%i18) step_response( [u_e(t),G(s),explicit(10*t-1,t,0,1)],
    color=[black,navy,forest-green],
    yrange=[-1,6],xrange=[-0.1,0.6],
    yaxis=true,xaxis=true,line_type=[solid,solid,dots],
    xlabel="t [s]", ylabel="u_e(t) [V] (schwarz)
    / u_a(t) [V] (blau)");
(%t18)
```

Abbildung 5.4: Berechnung der Sprungantwort des IT_1 -Elementes

```
(%o18)
```

Einlesen der gemessenen Werte und vergleichen der Rechenwerte mit den Messwerten:

```
(%i23) ue_liste:read_nested_list("C:\\Users\\User\\Desktop\\Schule
\\Laboratorium-5AHET\\03_Regelungstechnische Grundelemente
\\0szi\\3_IT1\\F0012CH1.csv",comma)$
ua_liste:read_nested_list("C:\\Users\\User\\Desktop\\Schule
\\Laboratorium-5AHET\\03_Regelungstechnische Grundelemente
\\0szi\\3_IT1\\F0012CH2.csv",comma)$
t_werte:map(fourth,ue_liste)$ue_werte:map(fifth,ue_liste)$
ua_werte:map(fifth,ua_liste)$
(%i24) step_response( [u_e(t),G(s),points(t_werte-1.41,ua_werte),
explicit(10*t-1,t,0,1)],yrange=[-1,6],
%(1.41 auf Grund der Position des Triggers)
xrange=[-0.1,0.6],color=[black,navy,red,forest-green],
yaxis=true,xaxis=true,line_type=[solid,solid,solid,dots],
xlabel="t [s]", ylabel="u_e(t) [V] (schwarz)
/ u_a_B(t) [V] (blau) / u_a_M(t) [V] (rot)");
(%t24)
```

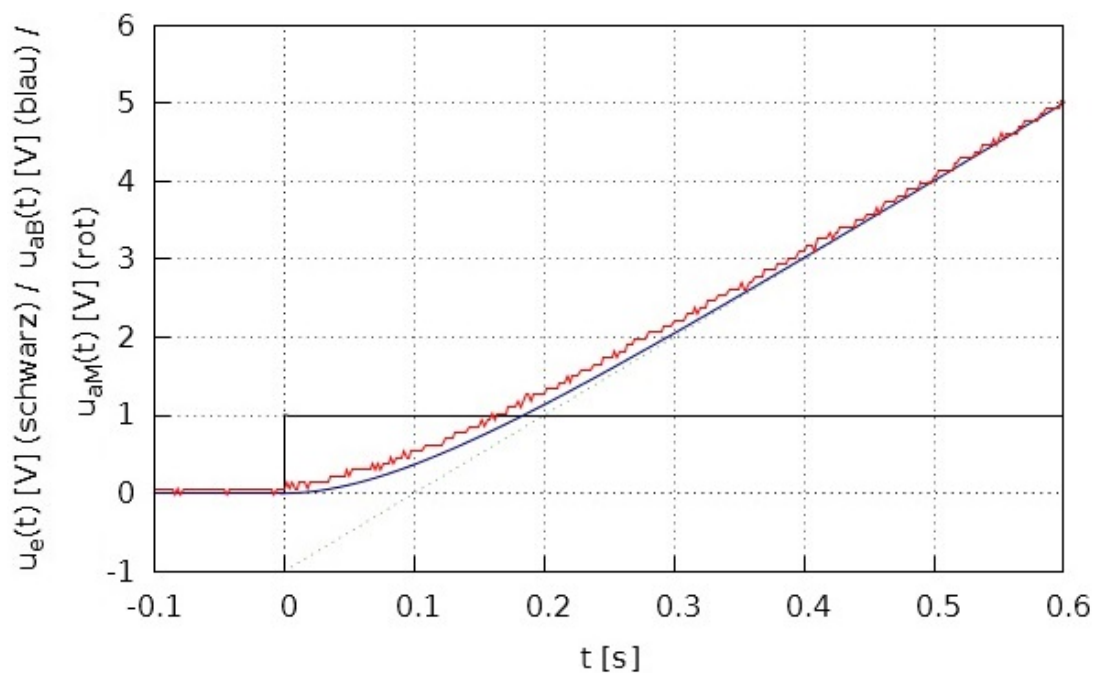


Abbildung 5.5: Vergleich der Sprungantworten eines IT_1 -Elementes

```
(%o24)
```

Auswertung:

Durch dieses Teilprojekt konnten wir das typische Verhalten eines verzögerten Integrierers aufzeigen, wobei der Verlauf der Sprungantwort einen etwas flacheren Verlauf aufzeigte als die Berechnung.

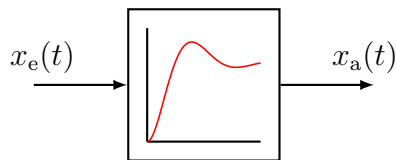
Dies lässt sich dadurch erklären, dass wir im Kap. 4 einen Integrierer mit einer $\approx 1\%$ Abweichung von Messung zur Berechnung verwendet haben und sich diese auch hier bemerkbar gemacht hat, was in der Abb. 5.5 ersichtlich ist.

6 Verzögerungsglied 2. Ordnung

PT₂

6.1 Eigenschaften und Aufgabenstellungen

Bei einem PT_2 -Element handelt es sich um ein proportionales Verzögerungsglied 2. Ordnung.



$$\frac{1}{\omega_n^2} \ddot{x}_a(t) + \frac{2D}{\omega_n} \dot{x}_a(t) + x_a(t) = k_{PT2} x_e(t)$$

Auf Grund der Linearität und des Ableitungssatzes gilt für verschwindende Anfangsbedingungen:

$$(6.1) \quad G(s) = \frac{k_{PT2}}{\frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \frac{2D}{\omega_n} s + 1}$$

$$\frac{1}{\omega_n^2} s^2 X_a(s) + \frac{2D}{\omega_n} s X_a(s) + X_a(s) =$$

$$k_{PT2} X_e(s)$$

Bei der Sprungantwort ist $x_e(t) = 1$, womit sich für die Ausgangsgröße $x_a(t)$, selbstverständlich nach einigen Umformungen, folgendes ergibt:

$$x_a(t) = \begin{cases} k_{PT2} \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau_{PT2}}} \left(1 - \frac{D}{\sqrt{D^2 - 1}} \right) \sinh(\omega_n \sqrt{D^2 - 1} t) \right] \sigma(t) & \text{für } D > 1 \\ k_{PT2} \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau_{PT2}}} \left(1 + \frac{t}{\tau_{PT2}} \right) \right] \sigma(t) & \text{für } D = 1 \\ k_{PT2} \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau_{PT2}}} \underbrace{\left(\cos(\omega_0 t) + \frac{D}{\sqrt{1 - D^2}} \sin(\omega_0 t) \right)}_{\frac{1}{\sqrt{1 - D^2}} \cdot \sin(\omega_0 t + \arccos(D))} \right] \sigma(t) & \text{für } D < 1 \end{cases} \quad (6.2)$$

Laut dem EWT folgt eine stationäre Verstärkung von k_{PT2} und das AWT liefert 0. Für die Anfangssteigung ergibt sich 0.

k_{PT2}	Stationärverstärkung des PT_2 -Elementes
D	Dämpfungsgrad
ω_n	natürliche Kreisfrequenz
T_n	natürliche Periodendauer
τ_{PT2}	Abklingzeitkonstante
ω_0	Kreisfrequenz der gedämpften Schwingung ($\omega_0 < \omega_n$)
T_0	Periodendauer der gedämpften Schwingung ($T_0 > T_n$)

$$\tau_{PT2} = \frac{1}{\omega_n D} \quad (6.3)$$

$$\omega_0 = \omega_n \sqrt{1 - D^2} \quad (6.4)$$

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} \quad (6.5)$$

Im oszillatorischen Fall kann noch die Überschwingweite \ddot{u} , was jener Wert ist, um den die erste Schwingung den Stationärwert k_{PT2} übersteigt, durch das Berechnen des ersten Maximums der Sprungantwort ermittelt werden (Gleichung 6.2 für $D < 1$ ableiten und 0 setzen $\Rightarrow T_{\ddot{u}}$):

$$T_{\ddot{u}} = \frac{\pi}{\omega_0} \quad (6.6)$$

$$\ddot{u} = \frac{x_{a\max} - k_{PT2}}{k_{PT2}} = e^{-\frac{\pi D}{\sqrt{1 - D^2}}} \quad (6.7)$$

$T_{\ddot{u}}$	Überschwingzeit
\ddot{u}	Überschwingweite

Dabei zeigt sich, dass die Überschwingweite $T_{\ddot{u}}$ gleich der halben Periodendauer der gedämpften Schwingung ist.

Um herauszufinden bei welcher Frequenz nun, bei gegebener Dämpfung, die maximale Überhöhung auftritt muss die Resonanzfrequenz ermittelt werden. Ausgangspunkt dafür ist:

$$|G(j\omega)| = \frac{k_{PT2}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + \left(\frac{2D\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (6.8)$$

Nun wird der Ausdruck unter der Wurzel nach ω einmal abgeleitet und gleich 0 gesetzt. Die entstehende Gleichung wird nach ω gelöst ($\omega \neq 0$) und man erhält folgende Resonanzfrequenz bzw. durch Einsetzen in die Gleichung 6.8 die Resonanzüberhöhung, natürlich nur, wenn eine Resonanz vorliegt:

$$\omega_{rz} = \omega_n \sqrt{1 - 2D^2} \quad (6.9)$$

$$\ddot{u}_{rz} = \frac{1}{2D \sqrt{1 - D^2}} \quad (6.10)$$

Die Aufgabe ist es nun, ein PT_2 -Glied, bestehend aus einem, in Serie geschalteten, I - & PT_1 -Element, aufzubauen, indem eine negative Rückführung eingebaut wird. Des Weiteren sind die Eigenschaften des Verzögerungsglied 2. Ordnung zu untersuchen und die Dimensionierung des Reglers und der Regelstrecke bleibt wie im Kap. 5.

Der sich ergebende Regelkreis ist daraufhin zu untersuchen, indem die Sprungantwort gemessen und mit der berechneten verglichen wird.

6.2 Blockschaltbild

Das PT_2 -Element kann folgendermaßen mit Hilfe eines Blockschaltbildes dargestellt werden, indem die Regelschleife im Kap. 5.2 geschlossen wird.

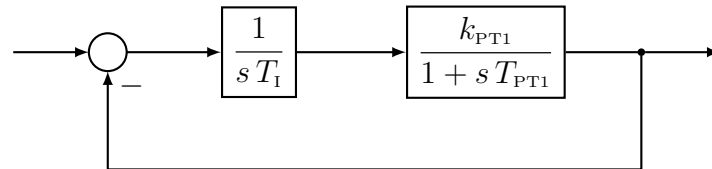


Abbildung 6.1: Blockschaltbild eines PT_2 -Elementes

Durch das Schließen des Regelkreises hat sich die Übertragungsfunktion auf

$$F_w = \frac{F_o}{1 + F_o} \quad (6.11)$$

verändert.

F_o Übertragungsfunktion der offene Regelschleife

F_w Führungsübertragungsfunktion

Für die Summierstelle kann z. B. ein Subtrahierer verwendet werden, aber auch ein Summierverstärker mit einem Invertierer würde funktionieren.

6.3 Schaltungsentwicklung und Dimensionierung

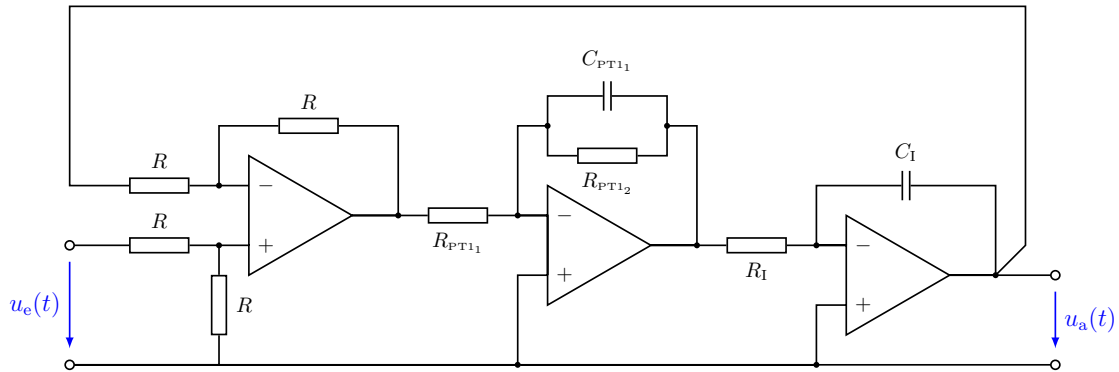


Abbildung 6.2: Schaltung eines PT_2 -Elementes

Für die Übertragungsfunktion dieser Schaltung (bzw. des Regelkreises) gilt:

$$G(s) = \frac{\frac{R_{PT12}}{R_{PT11}}}{R_I C_I R_{PT12} C_{PT1} s^2 + R_I C_I s + 1} \quad (6.12)$$

Für die Parameter gilt nun:

$$k_{PT2} = \frac{R_{PT12}}{R_{PT11}} \quad (6.13)$$

$$D = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{R_I C_I}{R_{PT12} C_{PT1}}} \quad (6.14)$$

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{R_I C_I R_{PT12} C_{PT1}}} \quad (6.15)$$

Für diesen Versuch wurden nun die selben Bauteilwerte gewählt, wie im Kap. 5, und für die Widerstände des Subtrahierers empfiehlt sich ein Wertebereich von $10\text{ k}\Omega - 1\text{ M}\Omega$.

R	C_I	R_I	C_{PT1}	R_{PT1_1}	R_{PT1_2}
$[\text{k}\Omega]$	$[\mu\text{F}]$	$[\text{k}\Omega]$	$[\mu\text{F}]$	$[\text{k}\Omega]$	$[\text{k}\Omega]$
100	1	100	1	100	100

Tabelle 6.1: Bauteilwahl des PT_2 -Elementes

Die sich daraus ergebende Dämpfung $D < 1$ bedeutet, dass ein oszillatorischer Fall vorliegt und das Element zeigt folgende Eigenschaften auf:

k_{PT2}	D	ω_n	τ_{PT2}	ω_0	T_0	$T_{\ddot{u}}$	\ddot{u}
$[-]$	$[-]$	$[\text{sec}^{-1}]$	$[\text{sec}]$	$[\text{sec}^{-1}]$	$[\text{sec}]$	$[\text{sec}]$	$[\%]$
1	0,5	10	0.2	8,66	0.73	0,36	16,30

Tabelle 6.2: Parametergrößen und Eigenschaften des PT_2 -Elementes

6.4 Messungen und Auswertung

Die Schaltung 6.2 zeigt nach erfolgreicher Inbetriebnahme und Anlegen einer sprungförmigen Eingangsspannung folgendes Verhalten:

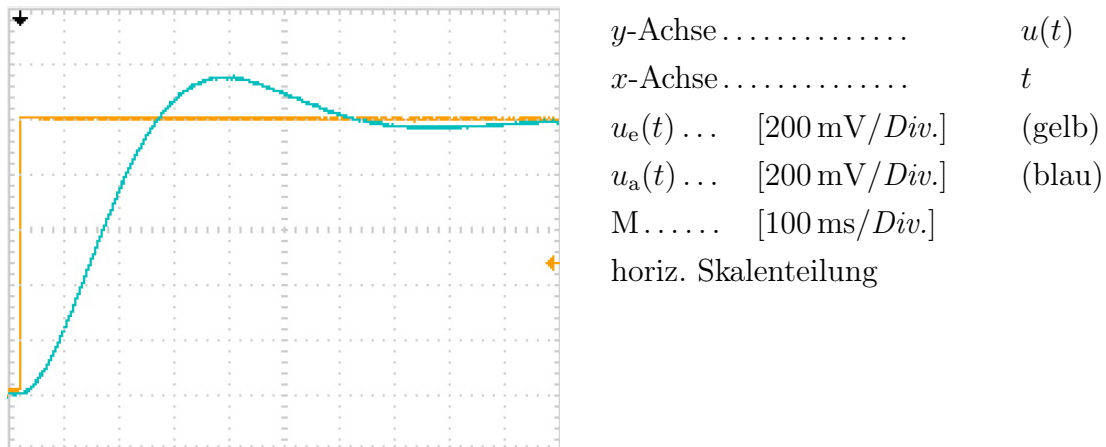


Abbildung 6.3: Oszilloskopaufnahme der Sprungantwort des PT_2 -Elementes

Die Oszilloskop-Aufnahme zeigt ein PT_2 -Element im periodischen Fall und für die Messung der Überschwingweite, der Überschwingung, etc. wurde das nachfolgende Program in Maxima geschrieben, um die Messung mit der Berechnung zu vergleichen.

Folgendes Maxima-Program wurde dafür verfasst:

```
(%i4) kill(all)$
      load(coma)$
      fpprintprec:5$
      ratprint:false$
      set_draw_defaults(grid=true,point_type=0,points_joined=true)$
```

coma v.1.73, (Wilhelm Haager, 2015-01-09)

PT_2 -Element (schwingungsfaehig):

```
(%i5)  Vorgabe: [T_PT1=0.1,k_PT1=1,TI:0.1]$
(%i6)  Bauteilwerte: [RPT1_1=100*10^(3),RPT1_2=100*10^(3),
                      CPT1=1e-6,CI=1e-6,RI=100*10^(3)]$
(%i9)  k_PT1:ev(RPT1_2/RPT1_1,Bauteilwerte);
      T_PT1:ev(CPT1*RPT1_2,Bauteilwerte);
      TI:ev(CI*RI,Bauteilwerte);

(%o7)  1
(%o8)  0.1
(%o9)  0.1

(%i13) omega_n:float(1/sqrt(TI*T_PT1));
      D:float(omega_n*TI/2);
      k_PT2:k_PT1;
      tau_PT2:1/(omega_n*D);

(%o10) 10.0
(%o11) 0.5
(%o12) 1
(%o13) 0.2

(%i17) omega_0:omega_n*sqrt(1-D^(2));
      T_0:float(2*%pi/omega_0);
      ue:float(%e^(-%pi*D/sqrt(1-D^(2))));
      Tue:float(%pi/omega_0);

(%o14) 8.6603
(%o15) 0.72552
(%o16) 0.16303
(%o17) 0.36276
```

```
(%i19) G(s):=k_PT2/(1/omega_n^(2)*s^(2)+2*D/omega_n*s+1)$
      G(s);
```

```
(%o19) 
$$\frac{1}{0.01 \cdot s^2 + 0.1 \cdot s + 1}$$

```

Sprungantwort:

```
(%i27) u_e(t):=1$
      u_e(t);
      U_e(s):=laplace(u_e(t),t,s)$
      U_e(s);
      U_a(s):=U_e(s)*G(s)$
      U_a(s);
      u_a(t):=ilt(ev(U_a(s),Parameter),s,t)$
      u_a(t);
```

```
(%o21) 1
```

```
(%o23) 
$$\frac{1}{s}$$

```

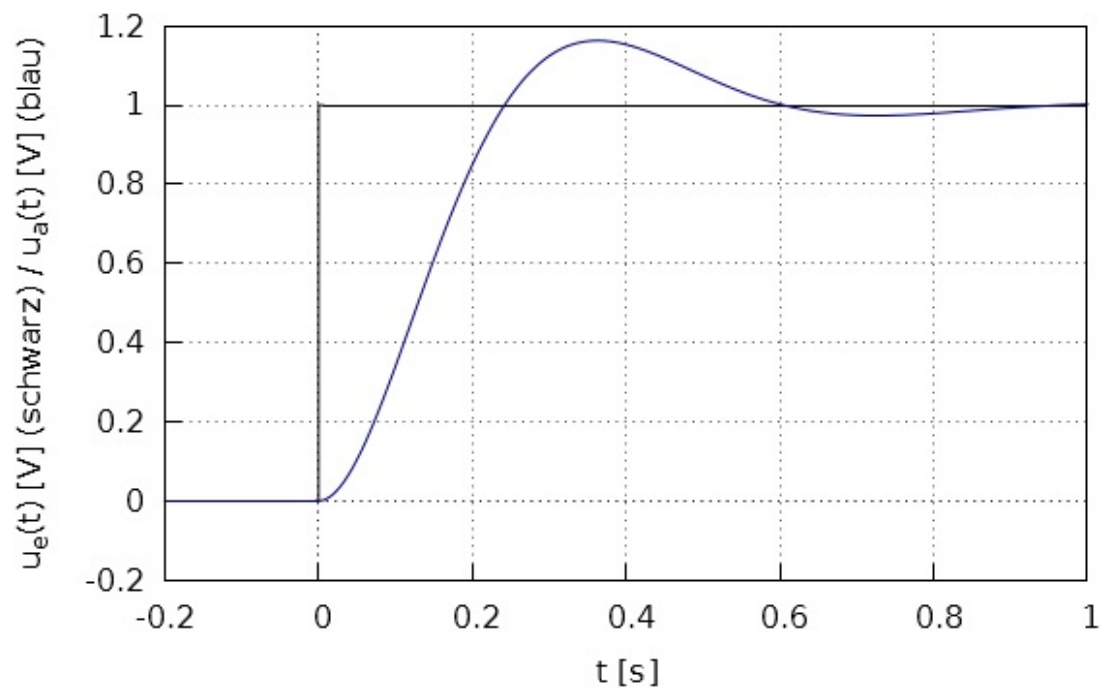
```
(%o25) 
$$\frac{1}{s \cdot (0.01 \cdot s^2 + 0.1 \cdot s + 1)}$$

```

```
(%o27) 
$$e^{-5 \cdot t} \cdot \left( -\cos(5 \cdot \sqrt{3} \cdot t) - \frac{\sin(5 \cdot \sqrt{3} \cdot t)}{\sqrt{3}} \right) + 1$$

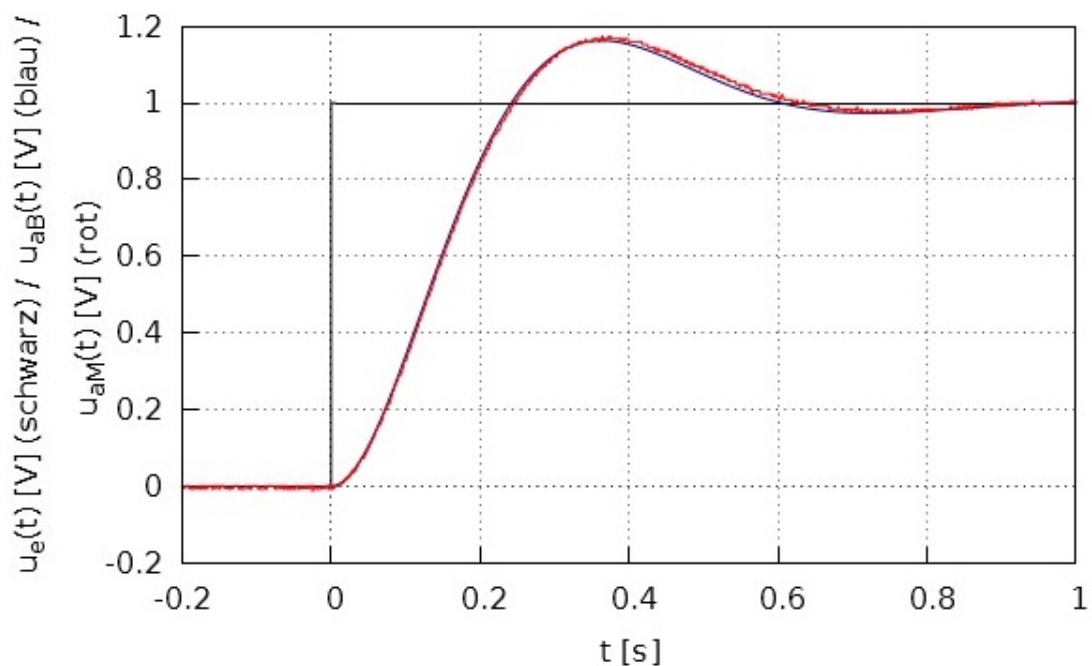
```

```
(%i28) step_response( [ev(u_e(t),Parameter),ev(G(s),Parameter)],
    color=[black,navy,red],
    yrange=[-0.2,1.2],xrange=[-0.2,1],
    yaxis=true,xaxis=true,line_type=[solid,solid,dots],
    xlabel="t [s]", ylabel="u_e(t) [V] (schwarz)
    / u_a(t) [V] (blau)");
(%t28)
```

Abbildung 6.4: Berechnung der Sprungantwort des PT_2 -Elementes

```
(%o28)
```

```
(%i33) ue_liste:read_nested_list("C:\\Users\\User\\Desktop\\Schule
\\Laboratorium-5AHET\\03_Regelungstechnische Grundelemente
\\0szi\\4_PT2\\F0017CH1.csv",comma)$
ua_liste:read_nested_list("C:\\Users\\User\\Desktop\\Schule
\\Laboratorium-5AHET\\03_Regelungstechnische Grundelemente
\\0szi\\4_PT2\\F0017CH2.csv",comma)$
t_werte:map(fourth,ue_liste)$
ue_werte:map(fifth,ue_liste)$
ua_werte:map(fifth,ua_liste)$
(%i34) step_response( [u_e(t),G(s),
    points(t_werte,ua_werte)],
    color=[black,navy,red],
    yrange=[-0.2,1.2],xrange=[-0.2,1],
    yaxis=true,xaxis=true,line_type=[solid,solid,solid],
    xlabel="t [s]", ylabel="u_e(t) [V] (schwarz)
    / u_a_B(t) [V] (blau) / u_a_M(t) [V] (rot)");
(%t34)
```

Abbildung 6.5: Vergleich der Sprungantworten eines PT_2 -Elementes

```
(%o34)
```

```
(%i40)  anzahl:length(t_werte)$
        i:anzahl$ua_max_Messung:0$
        while i>0 do ((if ua_werte[i]>ua_max_Messung
                        then (ua_max_Messung:ua_werte[i])),(i:i-1))$
        ua_max_Messung;
        k_PT2_Messung:ua_werte[2200];

(%o39)  1.176
(%o40)  1.0

(%i42)  ue_Messung:(ua_max_Messung-k_PT2_Messung)/k_PT2_Messung$
        ue_Messung_in_Prozent:ue_Messung*100;

(%o42)  17.6

(%i46)  i:1$s:1$
        while ua_werte[i]<ua_max_Messung do (i:i+1,s:s+1)$
        T_ue_Messung:t_werte[s];

(%o46)  0.364

(%i47)  omega_0_Messung:float(%pi/T_ue_Messung);

(%o47)  8.6307

(%i48)  T_0_Messung:float(2*%pi/omega_0_Messung);

(%o48)  0.728

(%i49)  D_Messung:float(-log(ue_Messung)/
                        (sqrt(%pi^2+(log(ue_Messung)^2))));

(%o49)  0.48393

(%i50)  omega_n_Messung:float(omega_0/(sqrt(1-D_Messung^2)));

(%o50)  9.8962

(%i51)  tau_PT2_Messung:float(1/(D*omega_n_Messung));

(%o51)  0.2021
```


7 Resümee

Dieses Projekt zeigte auf, dass es relativ einfach ist, ein PT_2 -Element mit einer Genauigkeit von $\approx 10\%$ aufzubauen. Wir erlangten dadurch sowohl Kenntnisse bezüglich der Regelungstechnik, als auch bezüglich der „richtigen“ Auswertung der Messwerte mit Hilfe von Maxima.

Wir konnten im Abschnitt 3 feststellen, dass sich bei der verwendeten PT_1 -Regelstrecke die Regelgröße bei einer sprunghaften Stellgrößenänderung sofort, mit einer gewissen Anfangssteigung, änderte. Die Änderungsgeschwindigkeit wurde dabei mit der Zeit kleiner, bis nach „längerer“ Zeit der Endwert erreicht wurde.

Schließlich stellten wir fest, dass der Regler (Integrierer) eine bleibende Regelabweichung von 0 aufweist und somit immer voll ausregelt, hingegen zu einem schnellen P -Regler.

Das entwickelte System (IT_1) im Abschnitt 5 stellte z. B. einen fallenden Körper dar, da die Geschwindigkeit, wie die Sprungantwort des PT_1 -Gliedes, zunimmt und die zurückgelegte Strecke ist gleich dem Integral der Geschwindigkeit.

Durch die negative Rückführung ergab sich ein PT_2 -Element, welches z. B. ein gedämpftes Feder-Masse-System darstellt.

Abbildungsverzeichnis

3.1	Schaltung eines PT_1 -Elementes	6
3.2	Oszilloskopaufnahme der Sprungantwort des PT_1 -Elementes	8
3.3	Berechnung der Sprungantwort des PT_1 -Elementes	11
3.4	Vergleich der Sprungantworten eines PT_1 -Elementes	12
4.1	Schaltung eines I -Elementes	17
4.2	Oszilloskopaufnahme der Sprungantwort des I -Elementes	19
4.3	Berechnung der Sprungantwort des I -Elementes	21
4.4	Vergleich der Sprungantworten eines I -Elementes	22
5.1	Blockschaltbild eines IT_1 -Elementes	26
5.2	Schaltung eines IT_1 -Elementes	27
5.3	Oszilloskopaufnahme der Sprungantwort des IT_1 -Elementes	29
5.4	Berechnung der Sprungantwort des IT_1 -Elementes	31
5.5	Vergleich der Sprungantworten eines IT_1 -Elementes	32
6.1	Blockschaltbild eines PT_2 -Elementes	37
6.2	Schaltung eines PT_2 -Elementes	38
6.3	Oszilloskopaufnahme der Sprungantwort des PT_2 -Elementes	40
6.4	Berechnung der Sprungantwort des PT_2 -Elementes	43
6.5	Vergleich der Sprungantworten eines PT_2 -Elementes	44

Tabellenverzeichnis

2.1	Verwendete Geräte & Betriebsmittel	3
3.1	Bauteilwahl und Parametergrößen des PT_1 -Elementes	7
4.1	Bauteilwahl und Parametergrößen des I -Elementes	18
5.1	Bauteilwahl und Parametergrößen des IT_1 -Elementes	28
6.1	Bauteilwahl des PT_2 -Elementes	39
6.2	Parametergrößen und Eigenschaften des PT_2 -Elementes	39

Literaturverzeichnis

- [1] **Wilhelm Haager:** Regelungstechnik. Wien 2007, 2.Auflage,
Hölder-Pichler-Tempsky GmbH Verlag, ISBN: 978-3-203-02565-4

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
AWT	Anfangswerttheorem
Bez.	Bezeichnung
BNC	Bayonet Neill–Concelman
bzw.	beziehungsweise
Dipl.-Ing.	Diplom-Ingenieur
Div.	Division (Skalenteilung)
Dr.	Doktor
etc.	et cetera
EWT	Endwerttheorem
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GND	ground
horiz.	horizontal
HTBL u. VA	höhere technische Bundeslehr- und Versuchsanstalt
Kap.	Kapitel
Nr.	Nummer
OPV	Operationsverstärker
z. B.	zum Beispiel