

Fortgeschrittenenpraktikum der Physik

REGELUNGSTECHNIK

Versuch 25



Durchführung: 17. / 24. April 2008

Erste Abgabe: 5.05.2008

Gruppe: 717

Betreuer: Andre Siegel

Tobias Meisch
tobias.meisch@uni-ulm.de

Oliver Heinrich
oliver.heinrich@uni-ulm.de

Inhaltsverzeichnis

1	Theoretische Grundlagen	5
1.1	Grundbegriffe der Regelungstechnik	5
1.2	Unterschied zwischen Regelung und Steuerung	5
1.3	Verlauf einer Regelung	5
1.4	Laplace-Transformation	6
1.4.1	Verschiebungssatz der Laplace-Transformation	6
1.4.2	Differentiationssatz der Laplace-Transformation	6
1.4.3	Integrationsatz der Laplace-Transformation	6
1.5	Übertragungsfunktionen von Regelementen	7
1.6	Das Bode-Diagramm	8
1.7	Reglertypen	9
1.7.1	Proportionalregler	9
1.7.2	Proportionalregler mit Verzögerung 1. Ordnung	11
1.7.3	Proportionalregler mit Verzögerung 2. Ordnung	13
1.7.4	Totzeitelement	15
1.7.5	Differentieller Regler	17
1.7.6	Integrierender Regler	19
1.7.7	PID-Regler	21
2	Versuchsaufbau	22
2.1	Allgemeines	22
2.2	Analoger Aufbau	24
2.2.1	Eingangsversuch	24
2.2.2	Das Experiment	24
2.3	Digitaler Aufbau	24
3	Versuchsergebnisse	25
3.1	Analoger Aufbau	25
3.1.1	Bode-Diagramm für einen P-Regler	25
3.1.2	Bode-Diagramm für einen PI-Regler	29
3.1.3	Bode-Diagramm für einen PID-Regler	31
3.2	Digitaler Aufbau	35
3.2.1	Einzelne Regelkomponenten in LabView	35
3.2.2	Bode-Diagramm für einen P-Regler	42
3.2.3	Bode-Diagramm für einen PI-Regler	46
3.2.4	Bode-Diagramm für einen PID-Regler	48
4	Fehlerdiskussion	52

Abbildungsverzeichnis

1	Schematischer Aufbau eines Regelkreises [13]	5
2	Bode-Diagramm für einen I-Regler [10]	8
3	Signalflusssymbol für einen P-Regler [1]	9
4	Bode-Diagramm für einen P-Regler [2]	10
5	schematischer Aufbau eines P-Reglers	10
6	Signalflusssymbol für einen PT1-Regler [3]	11
7	Bode-Diagramm für einen PT1-Regler [4]	12
8	Amplitudenverlauf für einen PT2-Regler [5]	14
9	Bode-Diagramm für einen PT2-Regler [6]	14
10	Signalflusssymbol für einen PTt-Regler	15
11	Bode-Diagramm für einen PTt-Regler	16
12	Signalflusssymbol für einen D-Regler [8]	17
13	Bode-Diagramm für einen D-Regler [9]	18
14	schematischer Aufbau eines D-Reglers	18
15	Signalflusssymbol für einen I-Regler [11]	19
16	Bode-Diagramm für einen I-Regler [10]	20
17	schematischer Aufbau eines I-Reglers	20
18	schematischer Aufbau eines PID-Reglers	21
19	Screenshot von der LabView-Umgebung	22
20	Bode-Diagramm für P-Regler ($k_p = 1,067$)	26
21	Bode-Diagramm für P-Regler ($k_p = 3,760$)	28
22	Bode-Diagramm für PI-Regler ($k_p = 1,067, k_I = 103,855$)	30
23	Bode-Diagramm für einen geschlossenen PID-Regler ($k_p = 1,046, k_I = 25,620, k_D = 0,087$)	32
24	Bode-Diagramm für offenen PID-Regler ($k_p = 1,046, k_I = 25,620, k_D = 0,087$)	34
25	Screenshot von der Systemzeiterfassung	35
26	Screenshot von dem Summierer 1	36
27	Screenshot von dem P-Regler	37
28	Screenshot von dem D-Regler	38
29	Screenshot von dem I-Regler	39
30	Screenshot von dem Summierer 2	40
31	Screenshot von der Übersichtsseite	41
32	Bode-Diagramm für P-Regler ($k_P = 1$)	43
33	Bode-Diagramm für P-Regler ($k_P = 1$)	45
34	Bode-Diagramm für PI-Regler ($k_P = 1, k_I = 100$)	47
35	Bode-Diagramm für geschlossenen PID-Regler ($k_P = 1, k_I = 40, k_D = 0,08$)	49
36	Bode-Diagramm für offenen PID-Regler ($k_P = 1, k_I = 40, k_D = 0,08$)	51

Tabellenverzeichnis

1	Bodedaten für P-Regler ($k_p = 1,067$)	25
2	Bodedaten für P-Regler ($k_p = 3,760$)	27
3	Bodedaten für PI-Regler ($k_p = 1,067, k_I = 103,855$)	29
4	Bodedaten für geschlossenen PID-Regler ($k_p = 1,046, k_I = 25,620, k_D = 0,087$)	31
5	Bodedaten für offenen PID-Regler ($k_p = 1,046, k_I = 25,620, k_D = 0,087$)	33
6	Bodedaten für P-Regler ($k_p = 1$)	42
7	Bodedaten für P-Regler ($k_p = 3,76$)	44
8	Bodedaten für PI-Regler ($k_p = 1, k_I = 100$)	46
9	Bodedaten für geschlossenen PID-Regler ($k_p = 1, k_I = 40, k_D = 0,08$)	48
10	Bodedaten für offenen PID-Regler ($k_p = 1, k_I = 40, k_D = 0,08$)	50

Literatur

- [1] <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b5/P-controller-symbol-1.svg>
- [2] <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/58/Bode-p.png>
- [3] <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/bd/Pt1-controller-symbol-1.svg>
- [4] <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c0/Bode-d.png>
- [5] <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/2c/Step-pt2-var.png>
- [6] <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9c/Bode-pt2-var.png>
- [7]
- [8] <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/07/D-controller-symbol-1.svg>
- [9] <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c0/Bode-d.png>
- [10] <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1d/Bode-i.png>
- [11] <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/dd/I-controller-symbol-1.svg>
- [12] <http://de.wikipedia.org/wiki/Regelungstechnik>
- [13] <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/de/5/5a/Standartregelkreis.png>

1 Theoretische Grundlagen

1.1 Grundbegriffe der Regelungstechnik

In der Elektrotechnik versteht man unter einer Regelgröße eine Messgröße, die es zu regeln gilt. Als Führungsgröße bezeichnet man den zu erreichenden Sollwert der Regelgröße. Als verständliches Beispiel kann man den Thermostat an einem Heizkörper heranziehen: Die Regelgröße wäre hier die Temperatur. Ist der Sollwert unterschritten, so öffnet der Thermostat die Leitung und der Raum wird beheizt. Wird diese jedoch erreicht, dann endet der Heizvorgang (das heißt die Warmwasserzufuhr wird unterbrochen).

1.2 Unterschied zwischen Regelung und Steuerung

Nach dem Deutschen Institut für Normung lautet die Definition für „Regelung“: „Das Regeln, die Regelung, ist ein Vorgang, bei dem fortlaufend eine Größe, die Regelgröße (zu regelnde Größe), erfasst, mit einer anderen Größe, der Führungsgröße, verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird.“[12]

Verständlicher ausgedrückt bedeutet dies, dass bei einer Regelung immer der tatsächliche Wert des Ausgangs auf den Regler zurückgeführt wird. Die Anordnung wird auch als *geschlossener Regelkreis* bezeichnet.

Bei einer Steuerung ist dies nicht der Fall. Dort werden gewisse Größen gesteuert aber nicht mehr mit dem Ausgangszustand verglichen. Man spricht von einer *offenen Steuerkette*.

1.3 Verlauf einer Regelung

Die Regelgröße x wird von dem Messglied F_M abgegriffen und entsprechend zur Rückführgröße r bearbeitet (vgl. Verlauf von Abb. 1). Dort findet das Vergleichen von r und der Führungsgröße w statt. Die Differenz e zwischen diesen Beiden wird an das Regelglied F_R und das Stellglied weitergeführt, wo es so geregelt wird, dass in der Regelstrecke F_S der Sollwert erreicht wird. Anschließend trifft die Störgröße F_Z auf das System und verändert wieder den Eingangswert zur Regelgröße x . Der Kreislauf beginnt von Neuem.

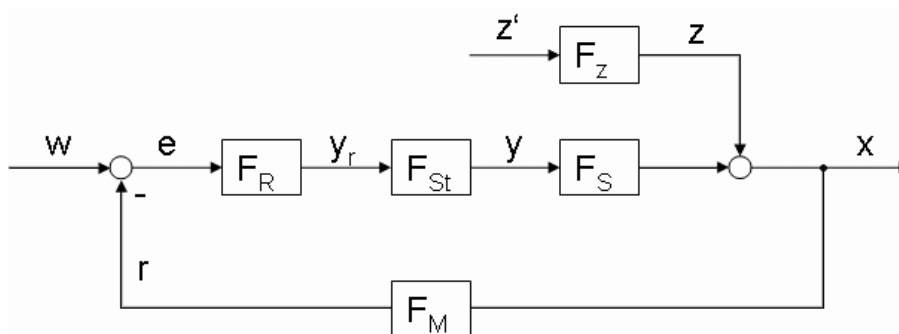


Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines Regelkreises [13]

1.4 Laplace-Transformation

In der Regelungstechnik ist die Laplace-Transformation ein entscheidendes Werkzeug, um die jeweiligen Differentialgleichungen der einzelnen Regler zu lösen und somit auf die Übertragungsfunktion zu gelangen.

Die allgemeine Laplace-Transformation ist durch folgendes Integral definiert:

$$f(s) = \int_0^{\infty} f(t) \cdot e^{-s \cdot t} dt = L\{f(t)\} \quad (1)$$

s steht hier für eine komplexe Frequenz: $s = \sigma + i \cdot \omega$. Man erhält also aus einer reinen Zeitfunktion durch diese Transformation eine Funktion im Frequenzraum. Strebt man den umgekehrten Weg an, so wendet man dieses Integral an:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi \cdot i} \oint f(s) \cdot e^{s \cdot t} ds = L^{-1}\{f(s)\} \quad (2)$$

Um nun konkrete Differentialgleichungen lösen zu können, sind folgende Transformationsregeln noch sehr nützlich:

1.4.1 Verschiebungssatz der Laplace-Transformation

Eine zeitverschobene Funktion $f(t-T)$ mit $T > 0$ wird im Frequenzbereich durch Multiplizieren mit der nicht verschobenen Transformierten mit dem Verschiebungsoperator $e^{-T \cdot s}$:

$$L\{f(t-T)\} = e^{-T \cdot s} \cdot L\{f(t)\} = e^{-T \cdot s} \cdot f(s) \quad (3)$$

1.4.2 Differentiationssatz der Laplace-Transformation

Im Falle einer zeitlichen Ableitung einer Funktion, gilt im Frequenzbereich folgender Zusammenhang:

$$L\left\{\frac{d^n f(t)}{dt^n}\right\} = s^n f(s) - \sum_{i=1}^n s^{n-i} \cdot \left.\frac{d^{i-1} f(t)}{dt^{i-1}}\right|_{t=0}$$

Schafft man es, die Anfangswerte Null zu setzen, so vereinfacht sich die Gleichung zu:

$$L\left\{\frac{d^n f(t)}{dt^n}\right\} = s^n f(s) \quad (4)$$

1.4.3 Integrationsatz der Laplace-Transformation

Analog zum Verschiebungssatz gibt es auch eine entsprechende Regel für die Integration. Für eine Funktion im Zeitbereich gilt für die Transformation in den Frequenzbereich:

$$L\left\{\int f(t) dt\right\} = \frac{1}{s} \cdot L\{f(t)\} = \frac{1}{s} \cdot f(s) \quad (5)$$

1.5 Übertragungsfunktionen von Regelementen

Die Übertragungsfunktion eines jeden Regelementes (mit Ausnahme des Totzeitelements (vgl. Kapitel 1.7.4)) kann durch eine Differentialgleichung beschrieben werden:

$$a_n \frac{d^n x_a}{dt^n} + \dots + a_1 \frac{dx_a}{dt} + a_0 \cdot x_a = b_m \frac{d^m x_e}{dt^m} + \dots + b_1 \frac{dx_e}{dt} + b_0 \cdot x_e$$

Mit Hilfe der Laplace-Transformation (vgl. Kapitel 1.4) können wir diese im Frequenzbereich lösen.

$$a_n \cdot s^n \cdot x_a(s) + \dots + a_1 \cdot s \cdot x_a(s) + a_0 \cdot x_a(s) = b_m \cdot s^m \cdot x_e(s) + \dots + b_1 \cdot s \cdot x_e(s) + b_0 \cdot x_e(s)$$

Durch Quotientenbildung erhalten wir die sogenannte *Übertragungsfunktion*:

$$G(s) = \frac{x_a(s)}{x_e(s)} = \frac{b_m \cdot s^m + \dots + b_1 \cdot s + b_0}{a_n \cdot s^n + \dots + a_1 \cdot s + a_0} \quad (6)$$

Unter Verwendung des Realteils von s folgt daraus unmittelbar die *Frequenzgangfunktion*:

$$F(i\omega) = \frac{x_a(i\omega)}{x_e(i\omega)} = \frac{b_m \cdot (i\omega)^m + \dots + b_1 \cdot i\omega + b_0}{a_n \cdot (i\omega)^n + \dots + a_1 \cdot i\omega + a_0} \quad (7)$$

Mit Hilfe des Betrages der Frequenzgangfunktion können wir das Amplitudenverhalten des Regelementes studieren. Die Phasenverschiebung über das Frequenzspektrum wird wie folgt gebildet:

$$\phi(\omega) = \arctan \left(\frac{\Im\{F(i\omega)\}}{\Re\{F(i\omega)\}} \right) \quad (8)$$

1.6 Das Bode-Diagramm

Im vorigen Kapitel haben wir bereits die Frequenzgangfunktion und die Phasenverschiebung eines beliebigen Reglers hergeleitet. Nun gilt es sich Gedanken über ein passendes Diagramm zum Auftragen der einzelnen Werte zu machen. Um einen möglichst großen Frequenzbereich auf einmal überblicken zu können, bringen erfahrungsgemäß logarithmische Skalen die größten Vorteile. Der Amplitudengang wird ebenfalls logarithmisch aufgetragen. In unserem Fall logarithmieren wir bereits die Messwerte und lassen die Skalierung linear, damit wir für die Phasenverschiebung die gleichen Skalierungswerte verwenden können.

Als Beispiel wird hier das Bode-Diagramm eines Integral-Reglers gezeigt:

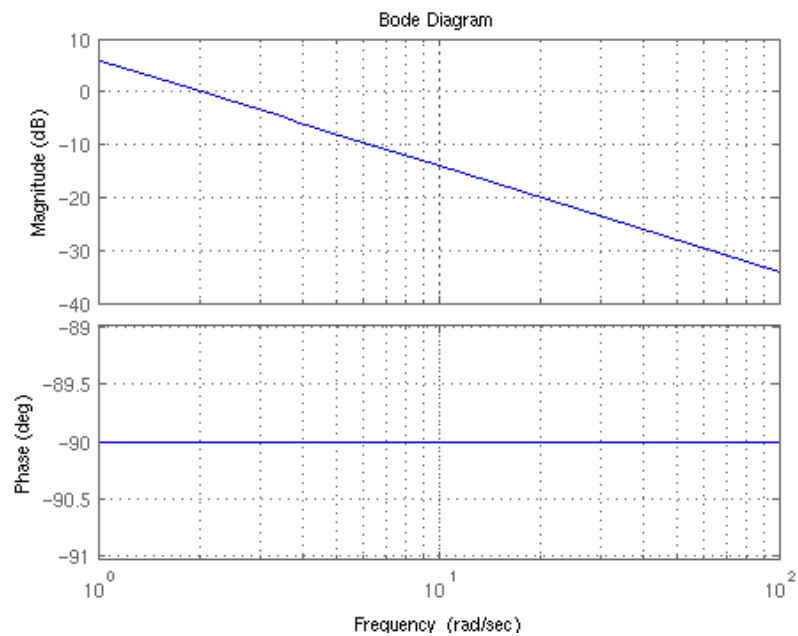


Abbildung 2: Bode-Diagramm für einen I-Regler [10]

1.7 Reglertypen

1.7.1 Proportionalregler

Das allgemeine Symbol für einen Proportionalregler (P-Regler) im Signalflussplan sieht wie folgt aus (Abb. 3):

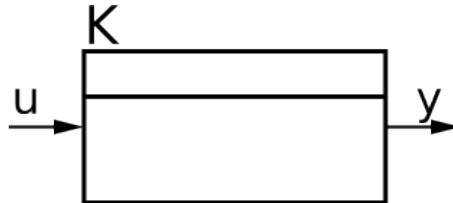


Abbildung 3: Signalflusssymbol für einen P-Regler [1]

Für den Proportionalregler (P-Regler) ergibt sich aus der allgemeinen Differentialgleichung:

$$a_0 \cdot x_a(t) = b_0 \cdot x_e(t)$$

Definieren wir noch $K_P = \frac{b_0}{a_0}$ als den Proportionalfaktor so erhalten wir die Beziehung:

$$x_a(t) = K_P \cdot x_e(t)$$

Die Übertragungsfunktion ergibt sich durch die Laplacetransformation zu:

$$G(s) = \frac{x_a(s)}{x_e(s)} = K_P$$

Durch Einsetzen von $s = i \cdot \omega$ erhalten wir schließlich die Frequenzgangfunktion:

$$F(i\omega) = \frac{x_a(i\omega)}{x_e(i\omega)} = K_P \quad (9)$$

Da diese Funktion reell ist, können wir daraus schließen, dass die Phasenverschiebung über das gesamte Frequenzspektrum gleich Null und der Amplitudengang einen konstanten Wert, nämlich K_P annimmt (vgl. Abb. 5).

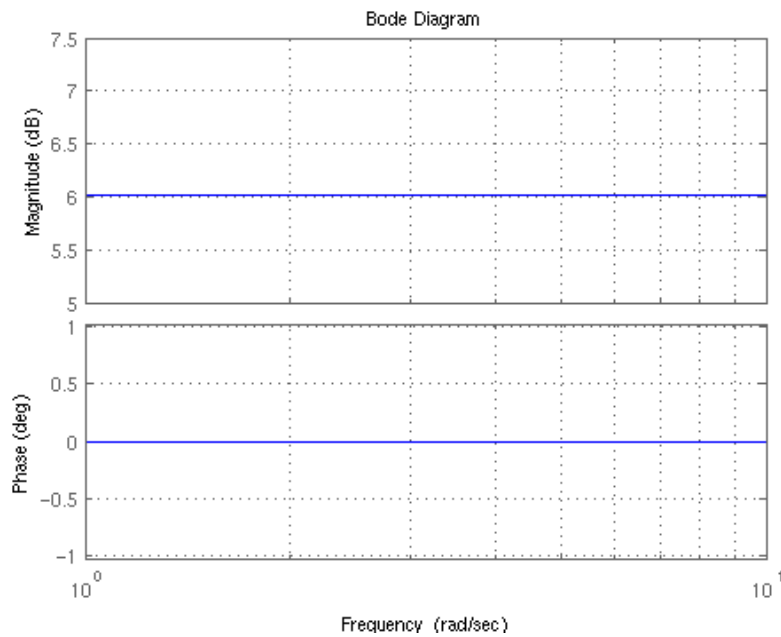


Abbildung 4: Bode-Diagramm für einen P-Regler [2]

Folgende Grafik zeigt einen schematischen Aufbau eines P-Reglers:

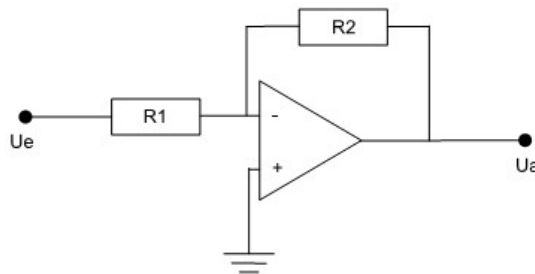


Abbildung 5: schematischer Aufbau eines P-Reglers

Ein P-Regler ohne Zeitverzögerung ist nur ein Idealfall und in der Praxis nur näherungsweise zu erreichen. Jeder Regler hat eine gewisse Zeitverzögerung. Ist diese klein gegen die Verzögerung der Regelstrecke so spricht man jedoch trotzdem von einem P-Regler. Bei größeren Zeiten spricht man von einem PT_1 - bzw. PT_2 -Regler.

1.7.2 Proportionalregler mit Verzögerung 1. Ordnung

Bei einem P-Regler mit einer Verzögerung 1. Ordnung (PT_1 -Regler) treten Zeitverzögerungen auf, bis das Maximum der Regelung erreicht ist. Als Schaltsymbol hat man Folgendes gewählt:

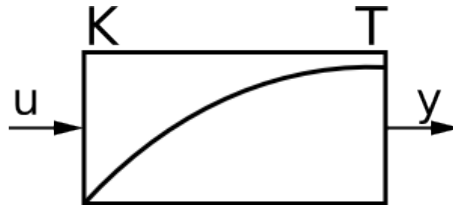


Abbildung 6: Signalflusssymbol für einen PT_1 -Regler [3]

Aus der Allgemeinen (vergleiche Kapitel 1.5) erhalten wir eine Differentialgleichung 1. Ordnung:

$$a_1 \cdot \frac{dx_a(t)}{dt} + a_0 \cdot x_a(t) = b_0 \cdot x_e(t)$$

Mit den Abkürzungen $T_1 = \frac{a_1}{a_0}$ und $K_P = \frac{b_0}{a_0}$ ergibt sich:

$$T_1 \cdot \frac{dx_a(t)}{dt} + x_a(t) = K_P \cdot x_e(t)$$

Durch Anwenden der Laplace-Transformation kommen wir auf folgendes Ergebnis für die Übertragungsfunktion:

$$\begin{aligned} T_1 \cdot s \cdot x_a(s) + x_a(s) &= K_P \cdot x_e(s) \\ \Rightarrow G(s) = \frac{x_a(s)}{x_e(s)} &= \frac{K_P}{T_1 \cdot s + 1} \end{aligned}$$

Durch Einsetzen von $s = i \cdot \omega$ erhalten wir die Frequenzgangfunktion:

$$F(i\omega) = \frac{K_P}{1 + i \cdot \omega \cdot T_1}$$

Durch das Zerlegen der Funktion in Real- und Imaginärteil

$$\begin{aligned} \Re\{F(i\omega)\} &= \frac{K_P}{T_1^2 \cdot \omega^2 + 1} \\ \Im\{F(i\omega)\} &= \frac{-\omega \cdot T_1 \cdot K_P}{T_1^2 \cdot \omega^2 + 1} \end{aligned}$$

können wir somit auf den Betrag der Frequenzgangfunktion

$$\Rightarrow |F(i\omega)| = \frac{K_P}{1 + T_1^2 \cdot \omega^2} \quad (10)$$

und den Phasengang schließen:

$$\phi(\omega) = \arctan\left(\frac{\Im\{F(i\omega)\}}{\Re\{F(i\omega)\}}\right) = -\arctan(T_1 \cdot \omega) \quad (11)$$

Wir erhalten folgendes Bode-Diagramm:

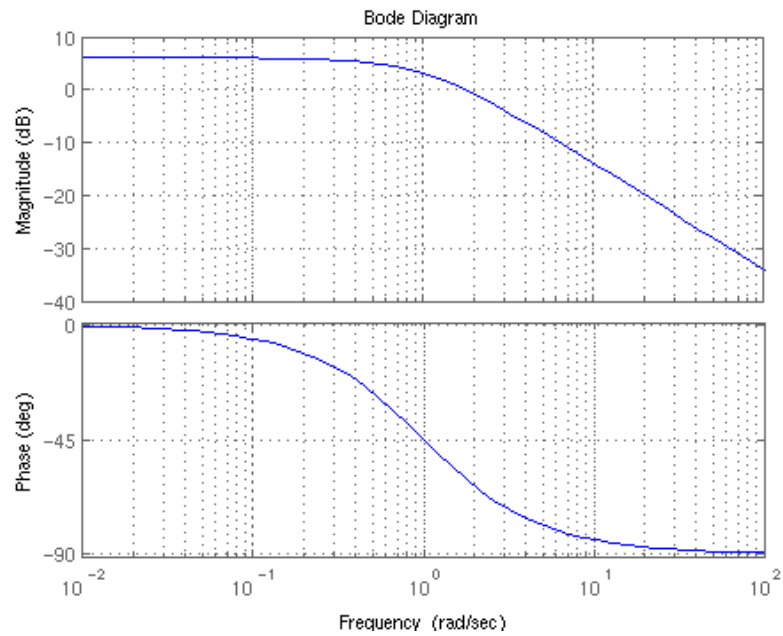


Abbildung 7: Bode-Diagramm für einen PT1-Regler [4]

1.7.3 Proportionalregler mit Verzögerung 2. Ordnung

Es gibt auch Regler mit einer Zeitverzögerung 2. Ordnung (PT_2 -Regler). Diese kann man durch eine Differentialgleichung 2. Ordnung beschreiben:

$$a_2 \cdot \frac{d^2 x_a(t)}{dt^2} + a_1 \cdot \frac{dx_a(t)}{dt} + a_0 \cdot x_a(t) = b_0 \cdot x_e(t)$$

Mit den Abkürzungen $\frac{a_2}{a_0} = \frac{1}{\omega_0^2}$ (ω_0 : Kennkreisfrequenz), $\frac{a_1}{a_0} = \frac{2 \cdot D}{\omega_0}$ (D : Dämpfung des Systems) und $\frac{b_0}{a_0} = K_P$ erhalten wir:

$$\frac{1}{\omega_0^2} \cdot \frac{d^2 x_a(t)}{dt^2} + \frac{2 \cdot D}{\omega_0} \cdot \frac{dx_a(t)}{dt} + x_a(t) = K_P x_e(t)$$

Betrachtet man die Lösung der homogenen Differentialgleichung, so muss man drei Sonderfälle beachten:

- $D \geq 1$ (Kriech- bzw. aperiodischer Grenzfall): Die Sprungantwortfunktion nähert sich ohne Überschwingen dem konstanten Wert K_P an (siehe roter und grüner Verlauf in Abb. 8)
- $0 < D < 1$ (stabiler Schwingfall): Die Sprungantwortfunktion schwingt zunächst über den K_P -Wert hinaus, aber schwingt sich nach einiger Zeit um diesen konstanten Wert ein (siehe blauer Verlauf in Abb. 8)
- $D \geq 0$ (grenzstabiler bzw. instabiler Schwingfall): Die Funktion nimmt auch nach längeren Laufzeiten keinen konstanten Wert mehr an. Bei dem instabilen Schwingfall „schaukelt“ sich diese sogar auf.

Für das Bode-Diagramm ergibt sich ein Verlauf wie die Abbildung 9 zeigt.

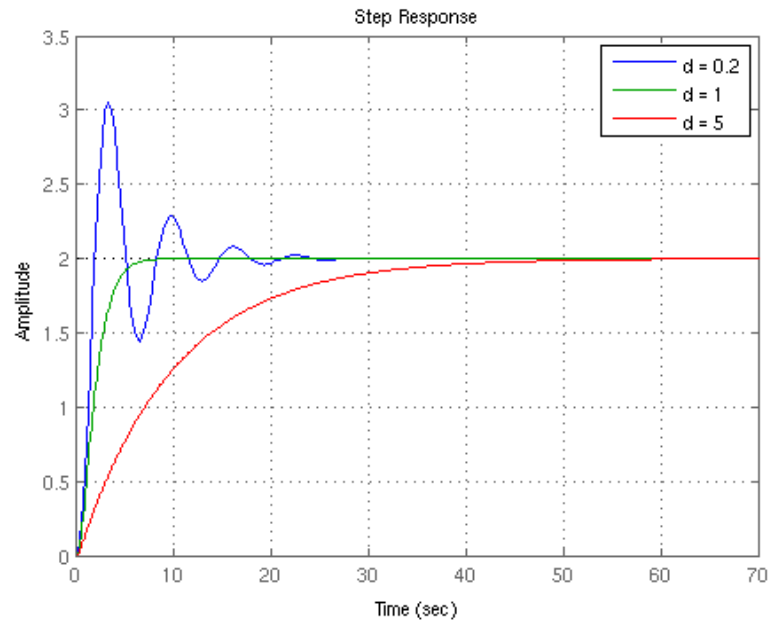


Abbildung 8: Amplitudenverlauf für einen PT2-Regler [5]

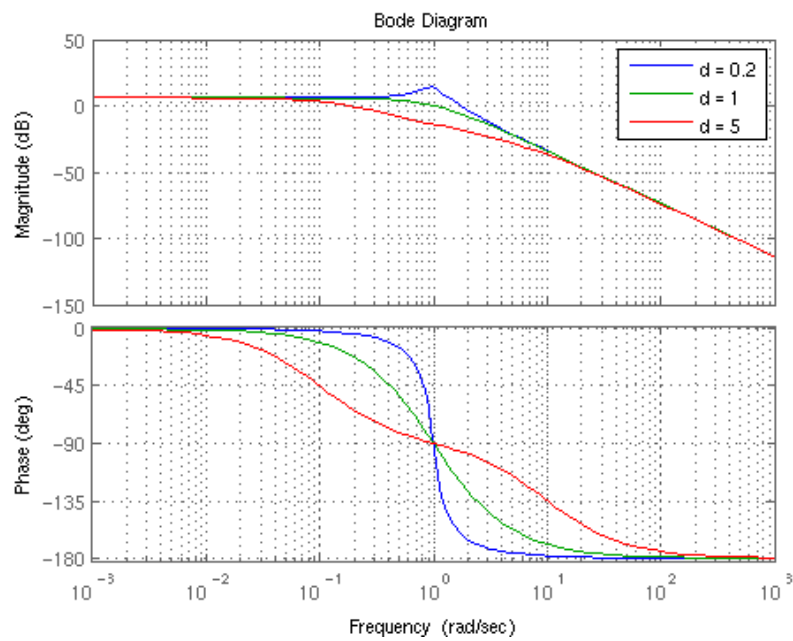


Abbildung 9: Bode-Diagramm für einen PT2-Regler [6]

1.7.4 Totzeitelement

In der Regelungstechnik tritt häufig das sogenannte Totzeitelement (PT_t -Element) auf. Das entsprechende Symbol sieht wie folgt aus:

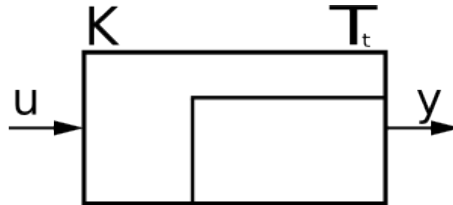


Abbildung 10: Signalflusssymbol für einen PT_t -Regler

Die Aufgabe dieses Bauteils besteht darin, erst nach einer gewissen Zeitspanne, der Totzeit, auf eine Änderung der Ausgangsgröße zu reagieren. Entsprechend einfach ist auch die beschreibende Differentialgleichung aufgebaut:

$$x_a(t) = K_P \cdot x_e(t - T_t)$$

K_P ist hier wie schon zuvor: $K_P = \frac{b_0}{a_0}$ T_t ist die bereits erwähnte Totzeit.

Durch Anwendung des Verschiebungssatzes der Laplace-Transformation entsteht die Übertragungsfunktion des PT_t -Elements:

$$G(s) = \frac{x_a(s)}{x_e(s)} = K_P \cdot e^{-s \cdot T_t}$$

Mit Hilfe der Frequenzganzfunktion und deren Real- und Imaginärteil können wir schließlich das dazugehörige Bode-Diagramm (siehe Abb. 11) kreieren:

$$\begin{aligned} F(i\omega) &= K_P \cdot e^{-i\omega \cdot T_t} \\ \Re\{F(i\omega)\} &= K_P \cdot \cos(\omega \cdot T_t) \\ \Im\{F(i\omega)\} &= -K_P \cdot \sin(\omega T_t) \end{aligned}$$

$$\Rightarrow |F(i\omega)| = K_P \cdot \sqrt{\cos^2(\omega \cdot T_t) + \sin^2(\omega \cdot T_t)} = K_P \tag{12}$$

$$\phi(\omega) = \arctan\left(\frac{\Im\{F(i\omega)\}}{\Re\{F(i\omega)\}}\right) = -\omega \cdot T_t \tag{13}$$

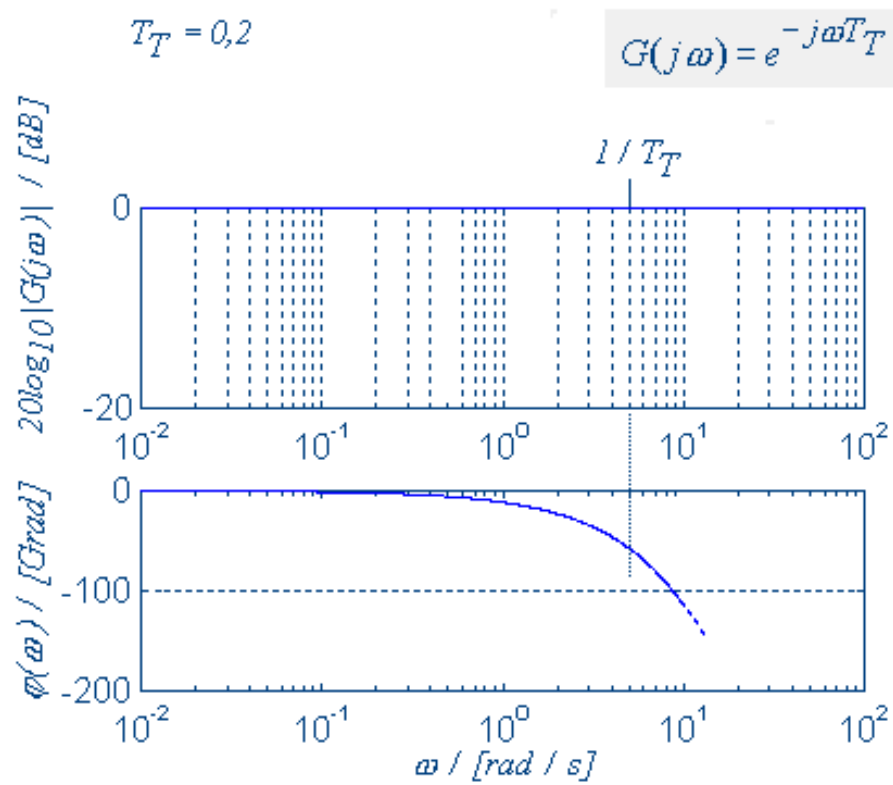


Abbildung 11: Bode-Diagramm für einen PTt-Regler

1.7.5 Differentieller Regler

Die Differentialregler (D-Regler) haben folgende Differentialgleichung:

$$x_a(t) = K_D \cdot \frac{dx_e(t)}{dt}$$

Es gilt $K_D = \frac{b_0}{a_0}$. Die Sprungantwort eines D-Reglers ist ein Dirac-Impuls. Daher wähle man auch folgendes Bild als Symbol in Signalfussplänen: Für die Frequenzgang-

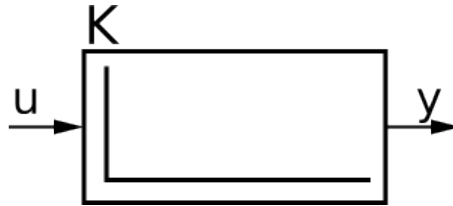


Abbildung 12: Signalfussymbol für einen D-Regler [8]

funktion beziehungsweise für deren Imaginär- und Realteil erhalten wir durch Laplace-Transformation:

$$\begin{aligned} F(i\omega) &= \frac{x_a(i\omega)}{x_e(i\omega)} = K_D \cdot i \cdot \omega \\ \Im\{F(i\omega)\} &= K_D \cdot \omega \\ \Re\{F(i\omega)\} &= 0 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \phi(\omega) = \arctan\left(\frac{\Im\{F(i\omega)\}}{\Re\{F(i\omega)\}}\right) = \frac{\pi}{2} \quad (14)$$

Wir können daraus nun das Bode-Diagramm zeichnen (vergleiche Abbildung 13).

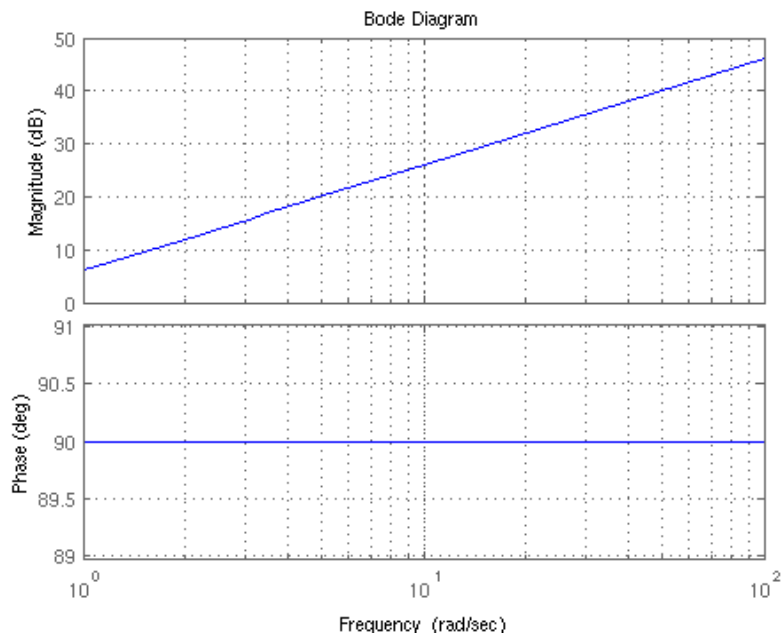


Abbildung 13: Bode-Diagramm für einen D-Regler [9]

Diese Art von Regler bestehen aus einem Kondensator und zwei ohmschen Widerständen, wobei einer der beiden mit dem Operationsverstärker parallel geschaltet ist:

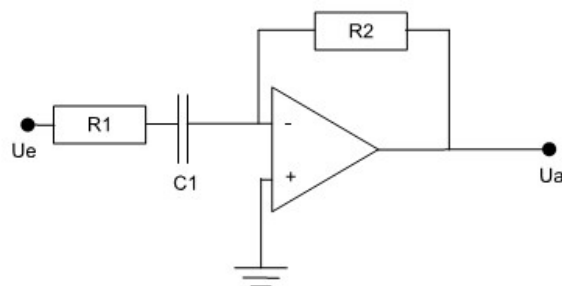


Abbildung 14: schematischer Aufbau eines D-Reglers

1.7.6 Integrierender Regler

Das Verhalten eines Integrierenden Reglers (I-Regler) kann mit folgender Differentialgleichung beschrieben werden:

$$x_a(t) = K_I \cdot \int x_e(t) dt$$

Mit Hilfe des Integralsatzes (vgl. Kapitel 1.4.3) für die Laplace-Transformation erhalten wir für die Übertragungsfunktion:

$$G(s) = \frac{x_a(s)}{x_e(s)} = \frac{K_I}{s}$$

Für die Frequenzgangfunktion und deren komplexen Teile erhalten wir somit:

$$\begin{aligned} F(i\omega) &= \frac{K_I}{i \cdot \omega} \\ \Im\{F(i\omega)\} &= -\frac{K_I}{\omega} \\ \Re\{F(i\omega)\} &= 0 \end{aligned}$$

Der Betrag der Frequenzgangfunktion beträgt:

$$|F(i\omega)| = \frac{K_I}{\omega} \quad (15)$$

Die Phasenverschiebung nimmt eine triviale Form an:

$$\phi(\omega) = -\frac{\pi}{2} \quad (16)$$

Entsprechend gestaltet sich das Bode-Diagramm wie in Abbildung 16 gezeigt. Das Symbol für den I-Regler sieht wie folgt aus:

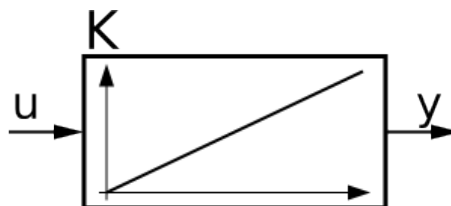


Abbildung 15: Signalflusssymbol für einen I-Regler [11]

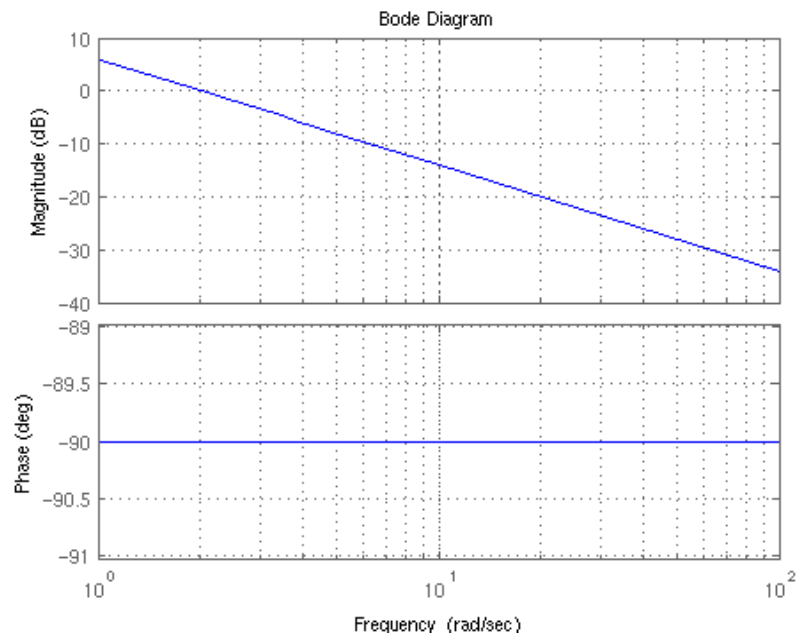


Abbildung 16: Bode-Diagramm für einen I-Regler [10]

Abbildung 17 zeigt den schematischen Aufbau eines I-Reglers:

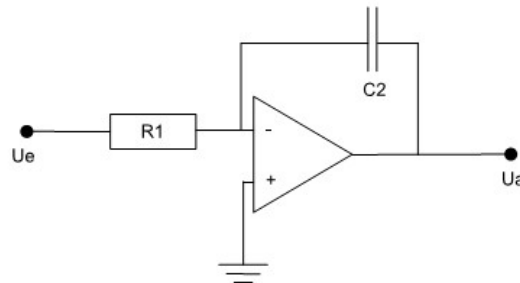


Abbildung 17: schematischer Aufbau eines I-Reglers

1.7.7 PID-Regler

Jeder Reglertyp weist gewisse Nachteile auf. Ein P-Regler zum Beispiel reagiert aufgrund seines fehlenden Zeitverhaltens zwar unmittelbar auf Störungen, jedoch erreicht er nie zu 100% den Sollwert. Genauer hingegen ist der I-Regler, der aber sehr träge in seinem Regelverhalten ist.

Vereint man jedoch einen P-, einen I- und einen D-Regler in einer Parallelschaltung zu einem großen Regler (vergleiche Abbildung 18), so lassen sich durch geschicktes Gewichten der einzelnen Komponenten die meisten negativen Eigenschaften eliminieren.

Der PID-Regler hat sich deshalb als Standard etabliert.

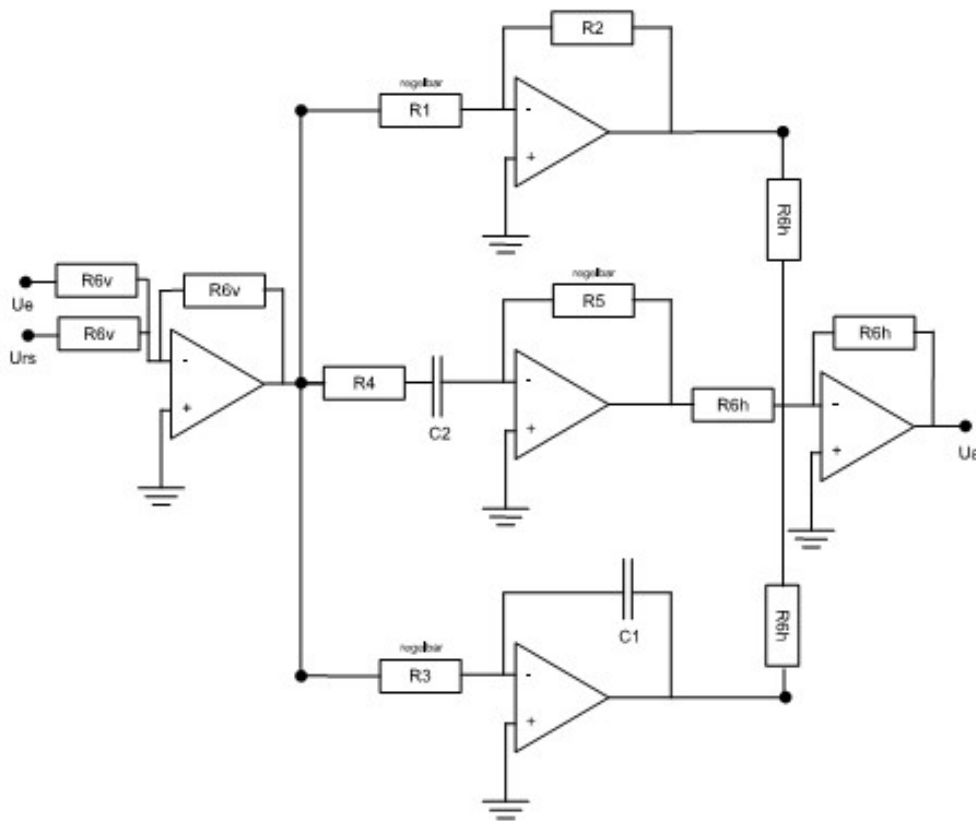


Abbildung 18: schematischer Aufbau eines PID-Reglers

2 Versuchsaufbau

2.1 Allgemeines

Im Aufbau haben wir eine Lampe, die auf eine Photodiode scheint. Beide sind über einen Regler miteinander verbunden. Die Spannung an der Photodiode hängt von der Spannung, also der Helligkeit, der Lampe ab. Je heller diese leuchtet, desto mehr Spannung liegt an der Photodiode an. Ziel ist es, den Regler so zu bauen, dass die Spannung an der Diode immer konstant bleibt. Hält man ein dünnes Blatt Papier zwischen die Lampe und die Diode, so wird die Lampe heller, sodass wieder die gleiche Spannung an der Diode herrscht. Die Spannung stammt aus einem Funktionsgenerator, mit dem man sowohl die Art der Wechselspannung (Sinus-, Dreiecks-, Sägezahnspannung) als auch Frequenz und Amplitude einstellen kann. Alle gesammelten Informationen (Spannungen vom Frequenzgenerator bzw. von der Fotodiode etc) bekommen wir mit Hilfe von *LabView* (vergleiche Abbildung 19) anschaulich über die Zeit aufgetragen. Die Abtastrate des Rechners kann man manuell einstellen (wir haben uns für 5ms entschieden) und die Aufzeichnung in eine Textdatei wird durch einen Start-/Stopp-Button gestartet.



Abbildung 19: Screenshot von der LabView-Umgebung

Nun müssen wir die Fouriertransformation unserer gemessenen Daten durchführen. Dazu verwenden wir das numerische Mathematikprogramm *MatLab*. In dieser Software können wir einstellen, welche Spalten unserer Messdaten eingelesen und verarbeitet werden. Als Ergebnis gibt das Programm die einzelnen Messpunkte im Frequenzraum aus. Die Beträge der Übertragungsfunktion logarithmieren wir noch.

Nun müssen wir erst unsere Übertragungsfunktion F (in *MatLab* ist diese schon eingegeben - wir brauchen sie aber noch einmal, um eine Theoriekurve in *QTIPlot* (siehe unten) einfügen zu können) ermitteln:

Wir wissen, dass die Regelstrecke S mit den Reglern R in Reihe geschaltet sind, und wir deshalb die jeweiligen Übertragungsfunktionen miteinander multiplizieren können: $F = R \cdot S = \frac{\text{Stellgr}}{\text{Fehlergr}} \cdot \frac{\text{Regelgr}}{\text{Stellgr}} = \frac{\text{Regelgr}}{\text{Fehlergr}}$ Mit der Zusatzinformation $\text{Fehlergr} = \text{Sollgr} - \text{Regelgr}$ kommen wir auf folgende Übertragungsfunktion:

$$F = \frac{R \cdot S}{1 + R \cdot S}$$

Nun müssen wir noch konkret die einzelnen Übertragungsfunktionen R und S untersuchen. S nehmen wir hierbei als PT_1 -Regler an, das heißt:

$$S = \frac{K}{1 + i \cdot T \cdot x}$$

R besteht im Allgemeinen aus einem PID-Regler. Verwenden wir lediglich einen P-Regler, so können wir k_I und k_D einfach auf Null setzen. Deshalb erhalten wir folgende Formel für R:

$$R = -\frac{i \cdot k_I}{x} + i \cdot k_D \cdot x + k_P$$

Für das Bode-Diagramm brauchen wir nun den Absolutbetrag, Imaginär- und Realteil dieser Funktion. Dabei ist uns das Computeralgebrasystem *Maxima* eine große Hilfe. Nach Vereinfachen des Terms erhalten wir für den Betrag der Übertragungsfunktion:

$$|F| = \frac{\sqrt{x^2 K^2 P^2 + (-1 - 2ix^2 D + x^4 D^2) K^2}}{\sqrt{x^4 T^2 + (2x^4 D - 2ix^2) KT + x^2 K^2 P^2 + 2x^2 KP + (-1 - 2ix^2 D + x^4 D^2) K^2 + x^2}}$$

Beziehungsweise für den offenen Regelkreis (ohne Regelstrecke S):

$$|F| = \sqrt{k_P^2 + \left(k_D \cdot x - \frac{k_I}{x}\right)^2}$$

Für die Phase bekommen wir folgenden Term:

$$\phi = \arctan \left(\frac{x^3 PT + ix - x^3 D}{(ix^2 - x^4 D) T - x^2 KP^2 - x^2 P + (1 + 2ix^2 D - x^4 D^2) K} \right)$$

Beziehungsweise:

$$\phi = \text{atan} \left(\frac{x \cdot k_D - x \cdot k_I}{k_P} \right)$$

Das Problem, das wir noch haben ist, dass wir T und K der Regelstrecke nicht kennen. Dieses zu lösen, hilft uns *QTIPlot*. Wir geben die von *MatLab* ausgegebenen Messpunkte und die beiden von *Maxima* vereinfachten Funktionen ein, fitten mit T und K als freie Parameter die Übertragungsfunktion, nehmen die beiden so ermittelten Parameter und plotten damit die Theoriekurve des Phasenverlaufs über die Frequenz.

2.2 Analoger Aufbau

2.2.1 Eingangsversuch

Unsere Aufgabe ist es zunächst den linearen Bereich des Systems aus Lampe und Photodiode zu finden. Dazu legen wir an die Lampe eine Dreiecksspannung an, worauf die Photodiode mit einer Trägheit antwortet. Das bedeutet, dass es einer gewissen Spannung an der Glühlampe bedarf, dass die Diode mit einer Spannung antwortet, also eine Schwelle überwunden werden muss. Auf das Ansteigen und Abfallen der Dreiecksspannung reagiert die Photodiode nicht im gesamten Bereich linear. Wir zeichnen also den Verlauf der Spannung der Photodiode auf und finden heraus, dass die Spannung im Bereich von 7-9 V linear verläuft. Um immer die Betriebsspannung der Lampe in diesem Bereich zu halten, können wir die Spannung am Offset geeignet einstellen.

2.2.2 Das Experiment

Glühlampe und Fotodiode sind mit einem Leistungsverstärker und einer Platine (Schaltbrett), auf der man mit einer Kombination aus Widerständen, Operationsverstärkern und Kondensatoren die verschiedenen Reglertypen (P, I, D, PID, PT_1) zusammenbaut, verbunden. Nun versorgen wir bei jedem Teilversuch je einen Regler mit einer Sinusspannung mit unterschiedlichen Frequenzen. Diese Spannung wird von dem Regler verarbeitet und speist die Lampe. Außerdem bekommt der PC (also *LabView*) auch noch die Spannung, die der Regler ausgibt.

2.3 Digitaler Aufbau

Der zweite Versuchstag sieht prinzipiell gleich aus, nur dass der Regler nicht aus elektrischen Bauteilen gebaut wird, sondern mit dem PC mit Hilfe des Programms *LabView* programmiert wird. Das bedeutet, das Signal des Frequenzgenerators und der Photodiode werden durch einen Digital-Analog-Wandler in den PC gespielt. Dort wird das Signal des Frequenzgenerators geregelt und an die Lampe weitergegeben.

Unsere Aufgabe ist es, den Regler zu programmieren. Das funktioniert mittels *Drag and Drop*. Wir haben viele Elemente, wie zum Beispiel Addierer, Subtrahierer, Vergleicher usw., zur Auswahl, die wir dann auf die Schaltflächen der jeweiligen Regler so anordnen, dass sich die Regler ergeben.

Die Messungen selbst sind genau die selben wie im analogen Teil (siehe Kapitel 2.2).

3 Versuchsergebnisse

3.1 Analoger Aufbau

3.1.1 Bode-Diagramm für einen P-Regler

Unsere erste Einstellung am Schaltbrett ergibt einen P-Regler mit kleinem k_P . Wir stellen einen Widerstand von $R_1 = (9,37 \pm 0,01)k\Omega$ ein. Der feste ohmsche Widerstand beträgt $R_2 = 10k\Omega$ und erhalten $k_P = 1,067$. *MatLab* gibt uns folgende fourriertransformierten Werte aus:

f / Hz	$\log(F(s))$	ϕ / rad
0,2014	-0,0920	-0,0193
0,4993	-0,0923	-0,0436
0,9765	-0,0925	-0,0828
1,4899	-0,0977	-0,1269
2,0020	-0,1014	-0,1699
4,0054	-0,1200	-0,3316
6,0059	-0,1473	-0,4771
8,9912	-0,1934	-0,6553
10,0152	-0,2135	-0,7002
12,0140	-0,2550	-0,8005
14,9952	-0,3103	-0,9144
16,9954	-0,3588	-0,9918
19,0180	-0,3949	-1,0435
21,0006	-0,4330	-1,0896
22,9964	-0,4555	-1,1212
25,0157	-0,4891	-1,1638

Tabelle 1: Bodedaten für P-Regler ($k_p = 1,067$)

Das Bode-Diagramm ergibt sich daraus zu folgender Grafik:

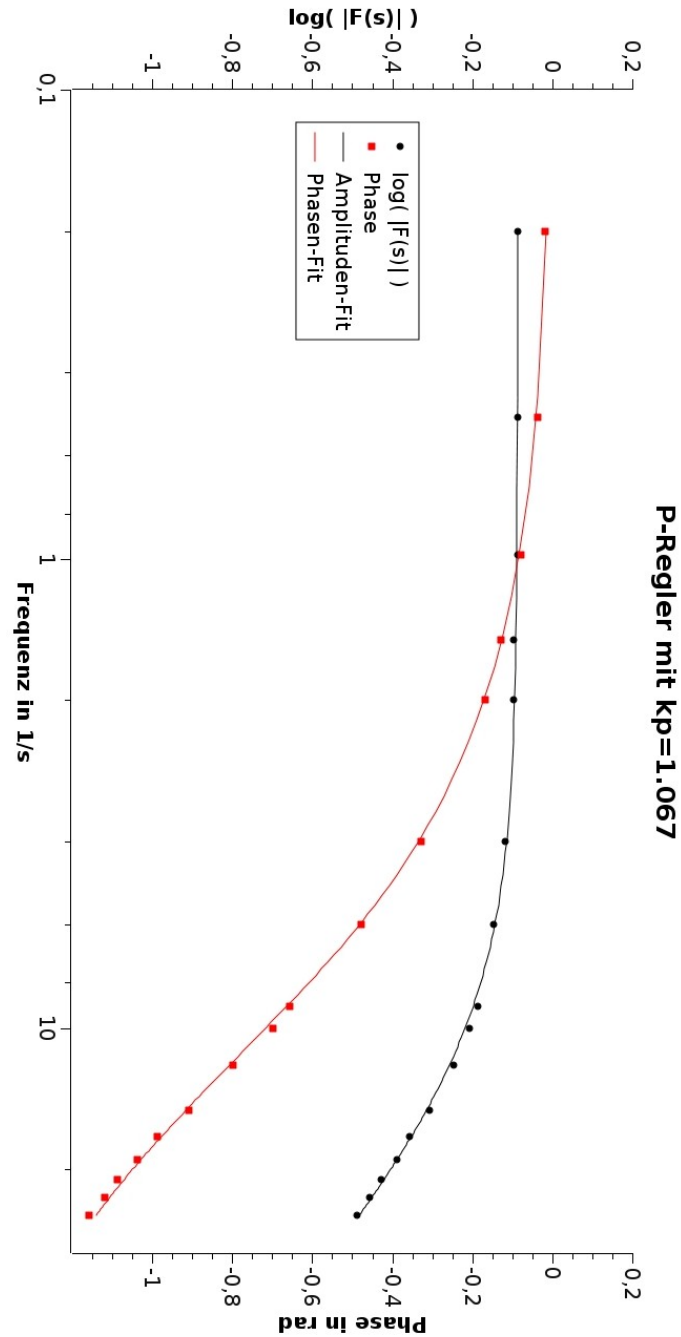


Abbildung 20: Bode-Diagramm für P-Regler ($k_p = 1,067$)

Das Fitten auf die logarithmische Funktion ergibt die Werte für die Regelstrecke S von: $K=2,33$ und $T=0,05s$. Verwenden wir diese Daten und plotten die Theoriekurve der Phase damit, so sehen wir, dass unsere Messwerte den gleichen Verlauf aufweisen.

Wir erhöhen nun den Widerstand $R_1 = (2,66 \pm 0,01)k\Omega$ und somit auf $k_P = 3,760$. Wir erhalten folgende Werte:

f / Hz	$\log(F(s))$	ϕ / rad
0,2013	-0,0226	-0,0049
0,5003	-0,0273	-0,0126
1,0011	-0,0274	-0,0250
1,4892	-0,0276	-0,0378
2,0024	-0,0278	-0,0501
4,0078	-0,0297	-0,1013
5,9685	-0,0334	-0,1540
9,0013	-0,0390	-0,2248
9,9522	-0,0414	-0,2514
12,0125	-0,0475	-0,2974
15,0673	-0,0593	-0,3743
17,0254	-0,0662	-0,4208
19,0684	-0,0731	-0,4499
20,8768	-0,0842	-0,5002
22,8783	-0,0954	-0,5402
25,0336	-0,1040	-0,5713

Tabelle 2: Bodedaten für P-Regler ($k_p = 3,760$)

Das entsprechende Bode-Diagramm sieht wie folgt aus:

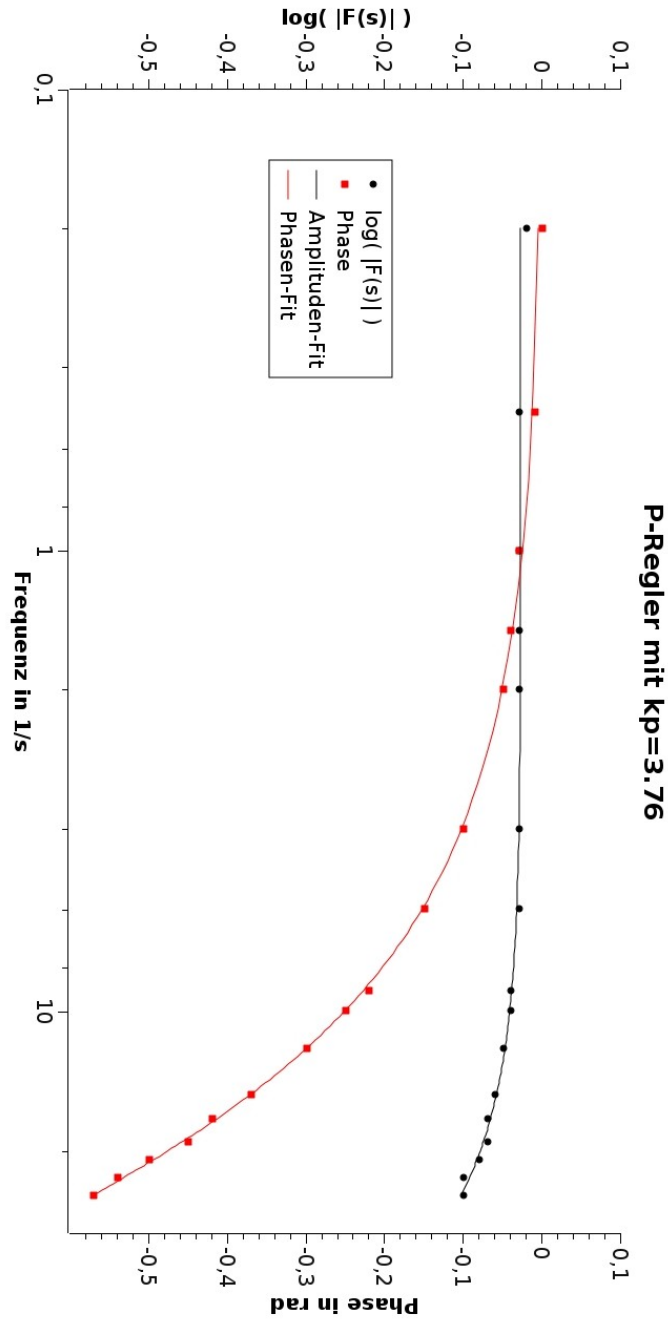


Abbildung 21: Bode-Diagramm für P-Regler ($k_p = 3,760$)

Wir erhalten durch das Fitten der Logarithmusfunktion folgende Werte: $K=4.041$ und $T=0.419s$. Für die Amplitude bleibt der K -Wert gleich und T ändert sich zu $T=0.418s$.

3.1.2 Bode-Diagramm für einen PI-Regler

Nun schalten wir den analogen I-Regler parallel zum P-Regler ($k_P = 1,067$) hinzu. Der Kondensator hat eine Kapazität von $C_1 = 0,68\mu F$ und der entsprechende Widerstand $R_3 = (14,16 \pm 0,01)k\Omega$. Daraus erhalten wir $k_I = \frac{1}{C_1 \cdot R_3} = 103,855$.

MatLab liefert uns folgende Werte:

f / Hz	$\log(F(s))$	ϕ / rad
0,2014	-0,0015	-0,0037
0,4986	-0,0010	-0,0095
1,0014	0,0012	-0,0196
1,5143	0,0046	-0,0309
2,0028	0,0092	-0,0434
4,0075	0,0376	-0,1146
6,0120	0,0754	-0,2400
8,9978	0,1095	-0,5601
10,0185	0,1048	-0,6906
12,0205	0,0668	-0,9351
14,9990	-0,0303	-1,1990
17,0067	-0,1005	-1,3121
19,0124	-0,1643	-1,3821
21,0118	-0,2243	-1,4331
22,9872	-0,2778	-1,4711
25,0350	-0,3253	-1,4991

Tabelle 3: Bodedaten für PI-Regler ($k_p = 1,067$, $k_I = 103,855$)

Es ergibt sich folgendes Bode-Diagramm:

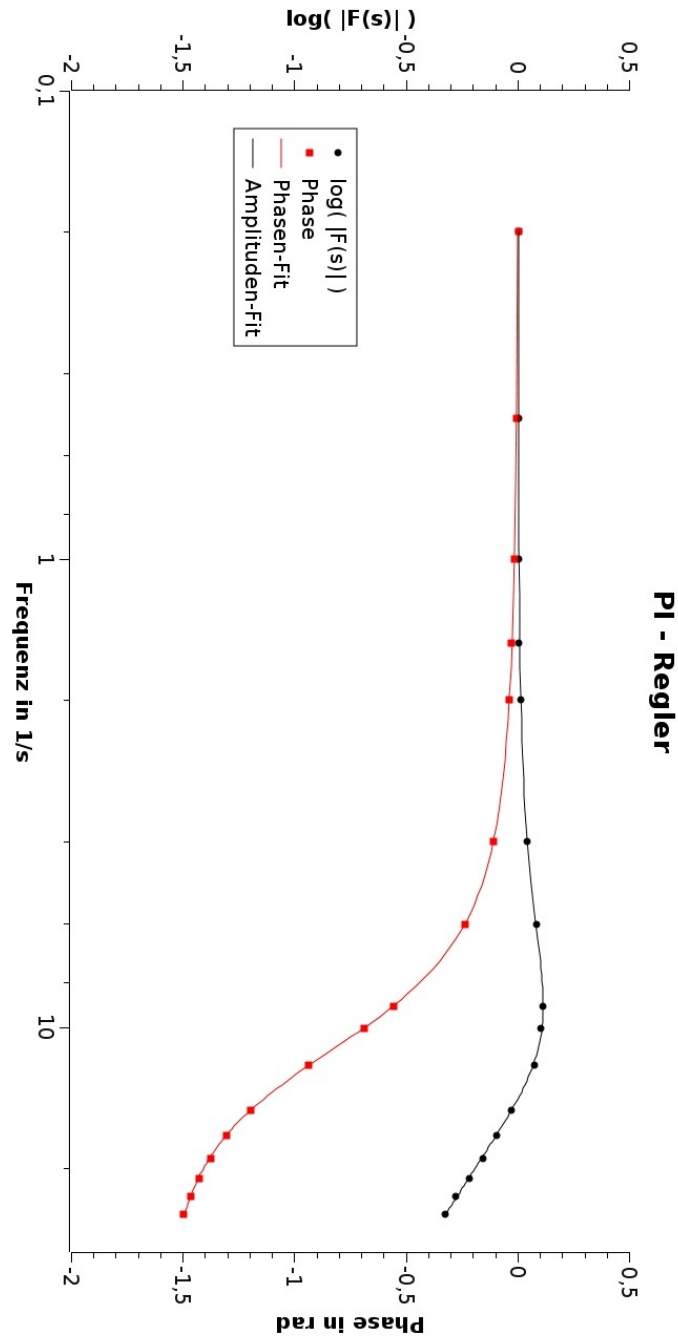


Abbildung 22: Bode-Diagramm für PI-Regler ($k_p = 1,067$, $k_I = 103,855$)

Dadurch, dass wir beim Fitten Schwierigkeiten haben, setzen wir $k_I = 13,716$ und erhalten in diesem Fall für die Amplitudenfunktion folgende Werte: $K=3,782$ und $T=0,408s$. Für die Theoriekurve der Phase erhalten wir: $K=4,034$ und $T=0,434$

3.1.3 Bode-Diagramm für einen PID-Regler

Als letztes schalten wir noch den D-Regler parallel zum PI-Regler mit den Werten: $k_P = 1,046$, $k_I = 25,620$ und $k_D = R_4 \cdot C_2 = (1,86 \pm 0,01)k\Omega \cdot 47\mu F = 0,087$

Es ergibt sich folgende Fourierdaten:

f / Hz	$\log(F(s))$	ϕ / rad
0,2014	-0,0023	-0,0140
0,5004	-0,0016	-0,0333
1,0008	0,0002	-0,0757
1,5010	-0,0018	-0,1344
2,0008	-0,0200	-0,2145
4,0029	-0,1260	-0,0968
5,9924	-0,1099	-0,0327
8,9953	-0,1003	-0,0211
9,9750	-0,0990	-0,0209
12,0045	-0,0973	-0,0214
15,0134	-0,0961	-0,0236
16,9698	-0,0958	-0,0259
18,9890	-0,0954	-0,0278
20,9946	-0,0957	-0,0302
22,9579	-0,0953	-0,0318
24,9024	-0,0955	-0,0349

Tabelle 4: Bodedaten für geschlossenen PID-Regler ($k_p = 1,046$, $k_I = 25,620$, $k_D = 0,087$)

Das Bode-Diagramm sieht wie folgt aus:

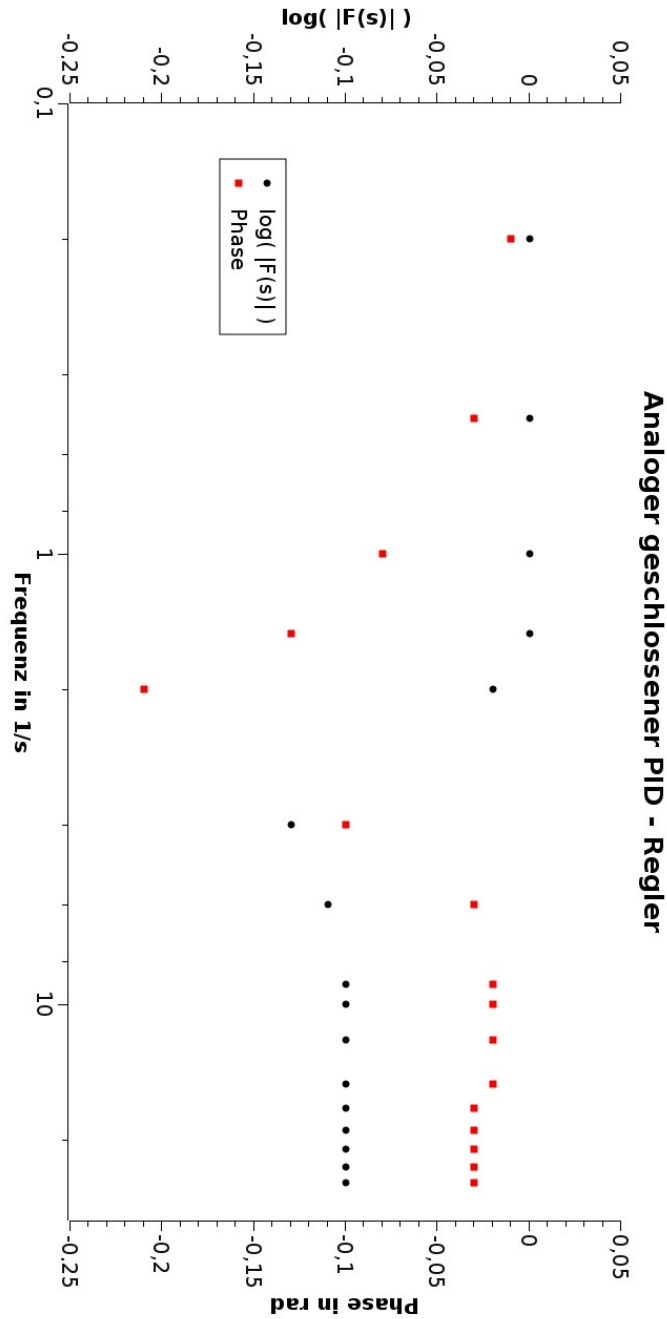


Abbildung 23: Bode-Diagramm für einen geschlossenen PID-Regler ($k_p = 1,046$, $k_I = 25,620$, $k_D = 0,087$)

Ein verwertbarer Fit ist leider nicht möglich. Wir können jedoch nicht herausfinden, ob dies an *QTIPlot* selber liegt, oder an unseren Messwerten. Das Programm jedenfalls gibt

uns Werte für die freien Parameter, die um einige 10er-Potenzen über dem eigentlichen Werten liegen - die vorgeschlagene Theoriekurve weicht zu sehr von unseren Messpunkten ab

Durch Abtrennen der Photodiode findet keine Rückkopplung statt. Der Messdraht, der die Werte für den Computer aufnimmt haben wir nach dem zweiten Summierer angeklemmt. Wir erhalten also einen offenen PID-Regler mit folgenden Werten:

f / Hz	$\log(F(s))$	ϕ / rad
0,2013	1,3129	-1,5270
0,5004	0,9114	-1,4388
0,9997	0,5778	-1,2859
1,4949	0,3592	-1,0744
2,0010	0,1883	-0,7730
4,0033	0,1727	-5,6045
6,0035	0,4068	-5,2122
8,9744	0,6140	-5,0443
9,9978	0,6653	-5,0181
12,0122	0,7492	-4,9806
15,0199	0,8509	-4,9372
16,9790	0,9061	-4,9321
19,0271	0,9552	-4,9203
20,9638	0,9973	-4,9109
23,0308	1,0373	-4,9195
24,9311	1,0758	-4,9132

Tabelle 5: Bodedaten für offenen PID-Regler ($k_p = 1,046$, $k_I = 25,620$, $k_D = 0,087$)

Wir erhalten für das Bode-Diagramm:

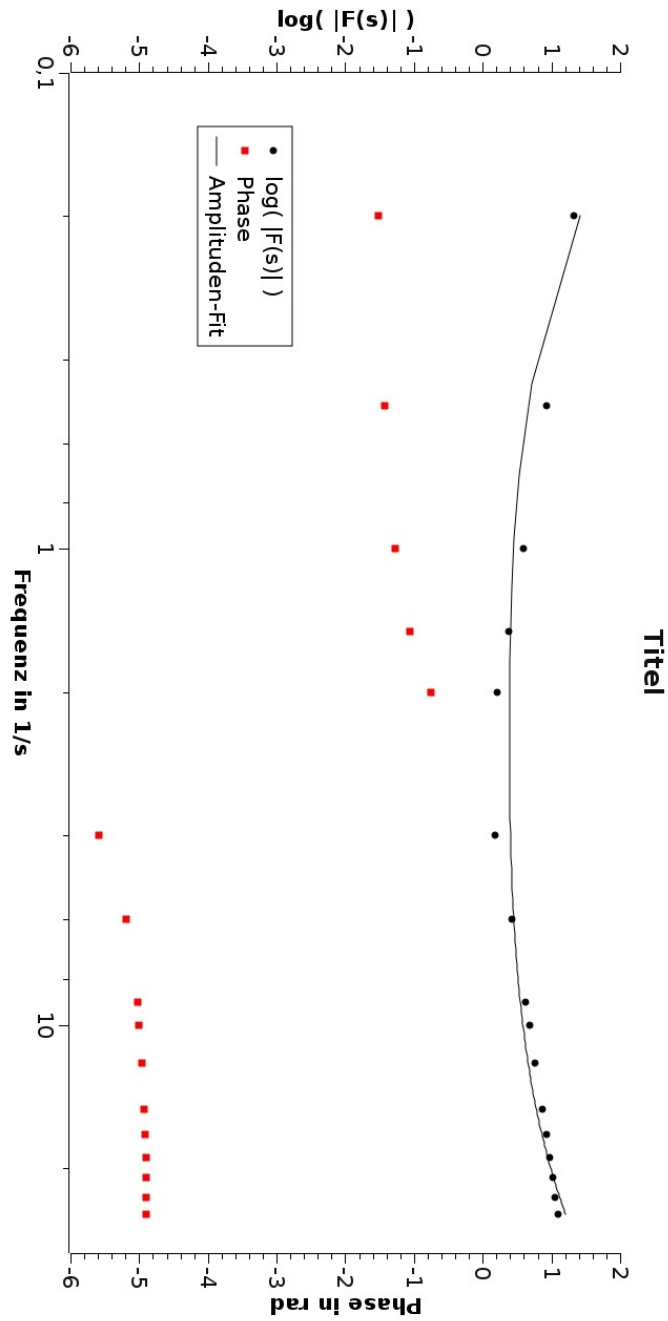


Abbildung 24: Bode-Diagramm für offenen PID-Regler ($k_p = 1,046$, $k_I = 25,620$, $k_D = 0,087$)

Als Zweites bauen wir uns den Summierer (vergleiche Abbildung 26), der den Soll- (*set point*) und den Istwert (*process variable*) miteinander addiert. Da die Spannung, die die Fotodiode liefert, negativ ist erhalten wir deshalb die zu regelnde Differenz zwischen diesen beiden Werten, die in *Err* für die nächsten Regelglieder zwischengespeichert wird. Wollen wir den PID-Regler in einem offenen Regelkreis messen, so müssen wir nur das „+“ mit *for open mode* anstatt mit *process variable* verbinden.

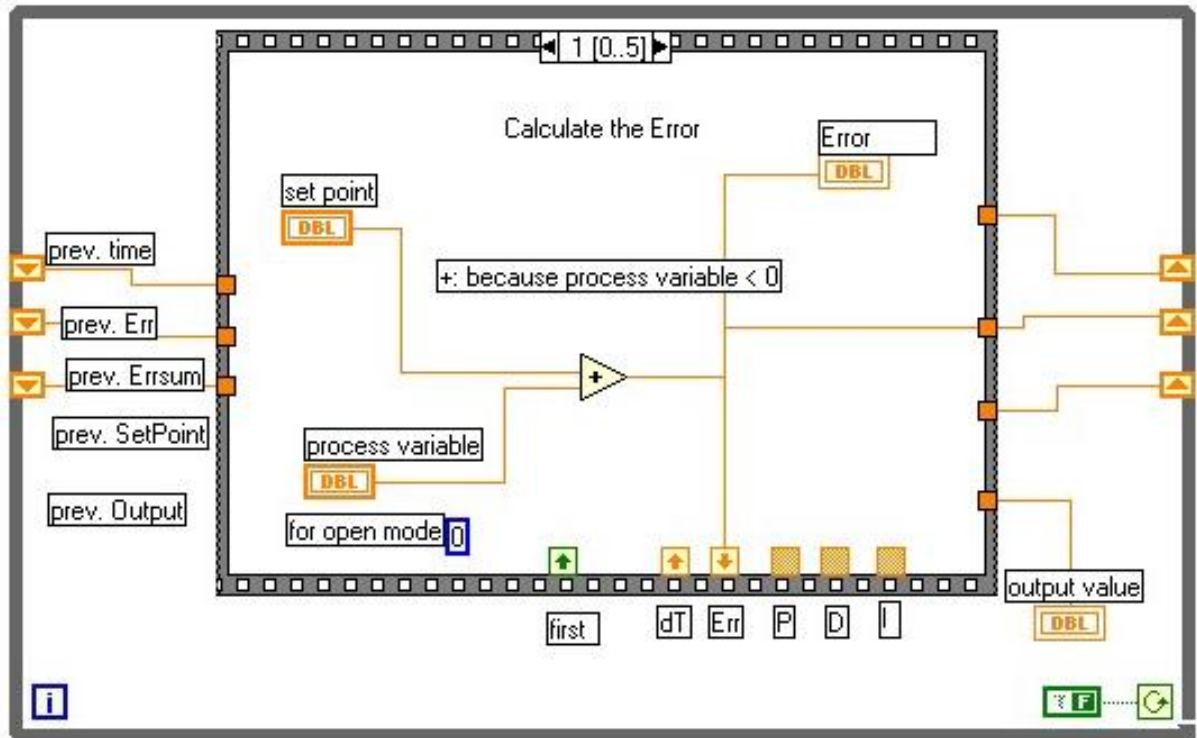


Abbildung 26: Screenshot von dem Summierer 1

Nun können wir unser erstes Regelglied, den Proportionalregler, zusammenstellen. Die zuvor in *Err* zwischengespeicherte Regeldifferenz wird lediglich mit dem k_P -Faktor multipliziert und in *P* wieder für den Summierer am Ende zwischengespeichert. In Abbildung 27 wird unser Ergebnis gezeigt:

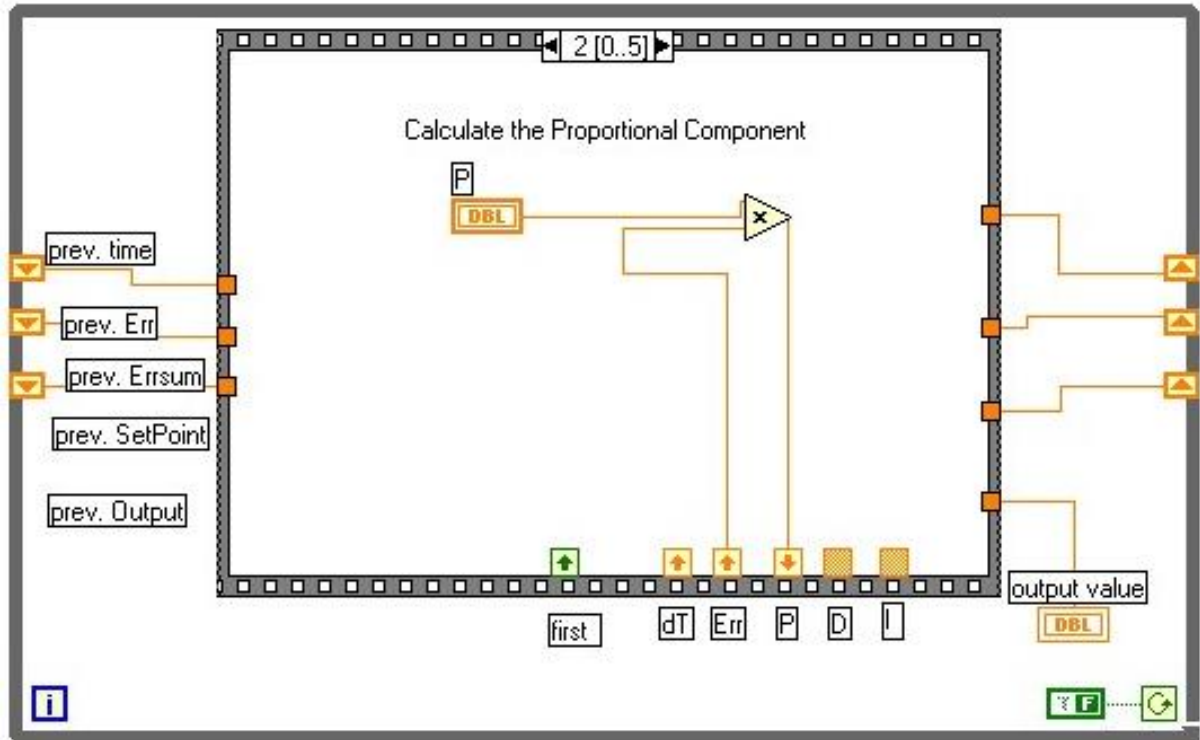


Abbildung 27: Screenshot von dem P-Regler

Als nächstes folgt der Differentielle Regler. Hier wird die aktuelle Fehlerdifferenz mit der zuverigen verglichen und durch die Zeitspanne des Durchlaufes dividiert. Hier kommt nun unsere schon erwähnte Abfrage, ob dies der erste Durchlauf ist, zur Geltung. Ist dies der Fall, so wird für die Zeitspanne einfach 0,1 Millisekunden genommen. Das Ergebnis wird noch mit dem k_D -Faktor multipliziert und für den Summierer zwischengespeichert. Abbildung 28 liefert uns das entsprechende Ergebnis:

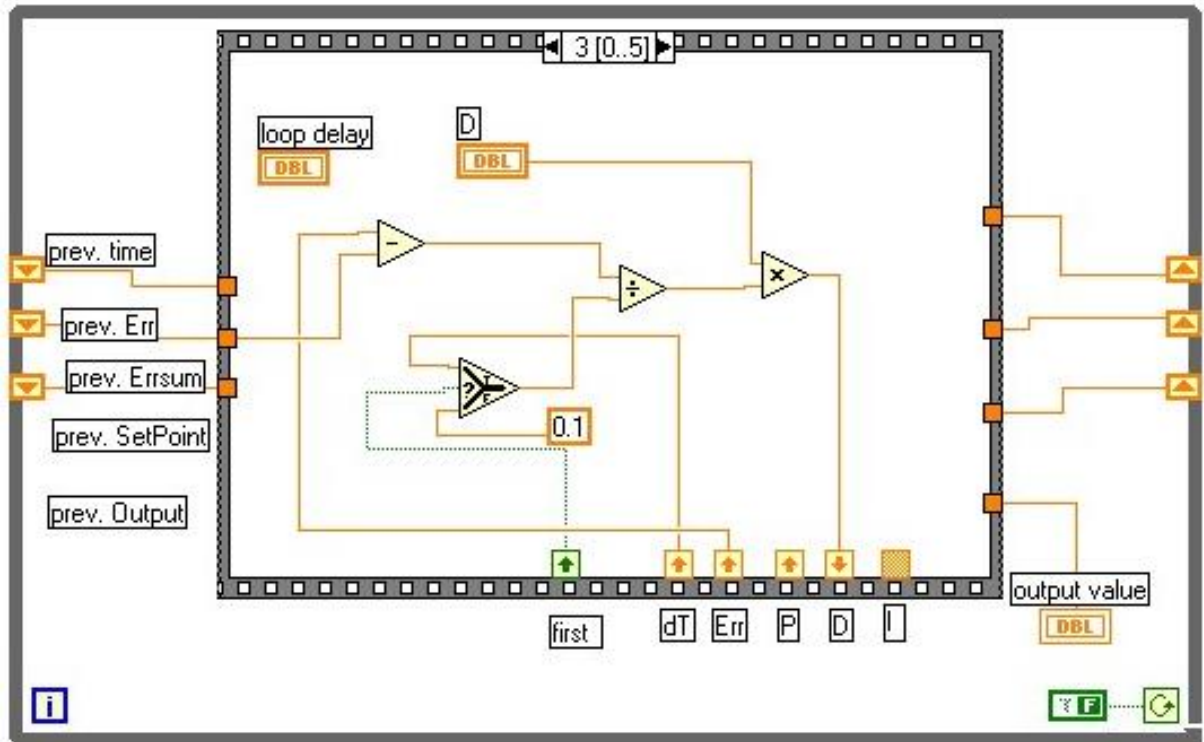


Abbildung 28: Screenshot von dem D-Regler

Der Summierer (Abbildung 30) addiert einfach alle in P , D und I gespeicherten Werte und gibt sie über *output value* wieder an die Lampe aus.

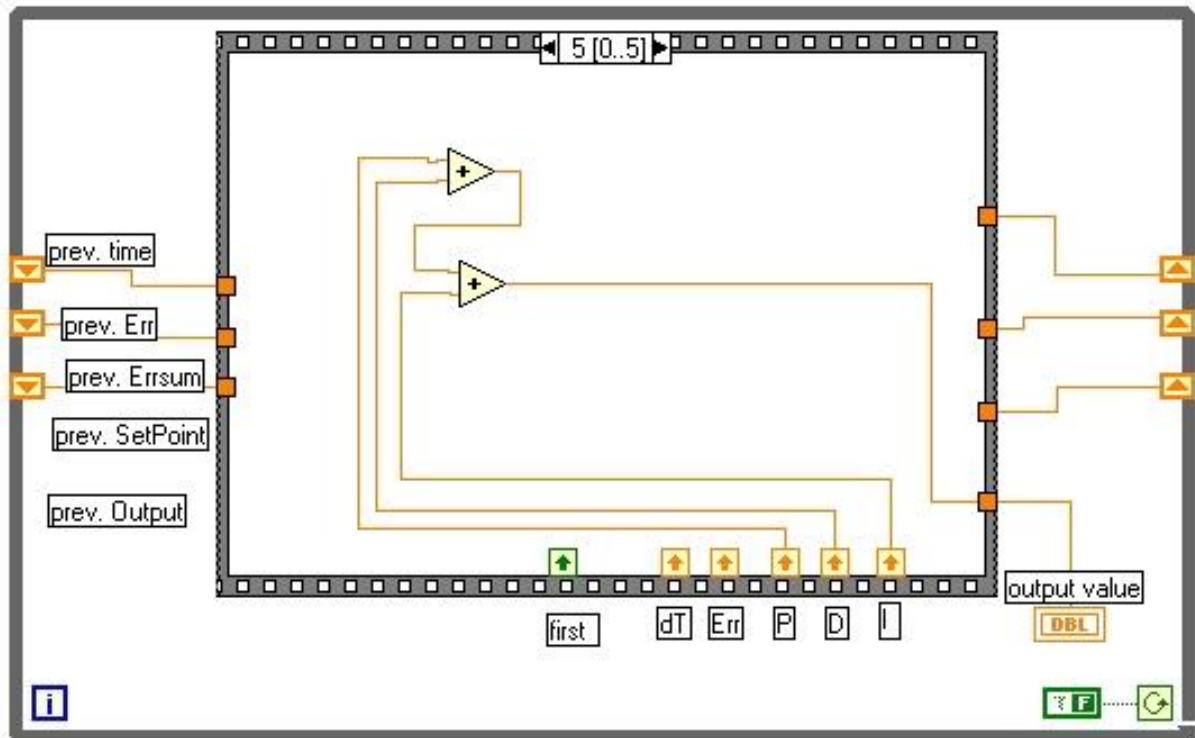


Abbildung 30: Screenshot von dem Summierer 2

Abbildung 31 gibt der Vollständigkeit halber nochmal einen Überblick über das Gesamtsystem. Unser Bereich, in dem wir unsere einzelnen Komponenten programmiert haben, ist lediglich der orange/weiße Kasten (*simplepid2.vi*). Durch Doppelklick auf dieses gelangen wir zu unseren Programmierbereichen.

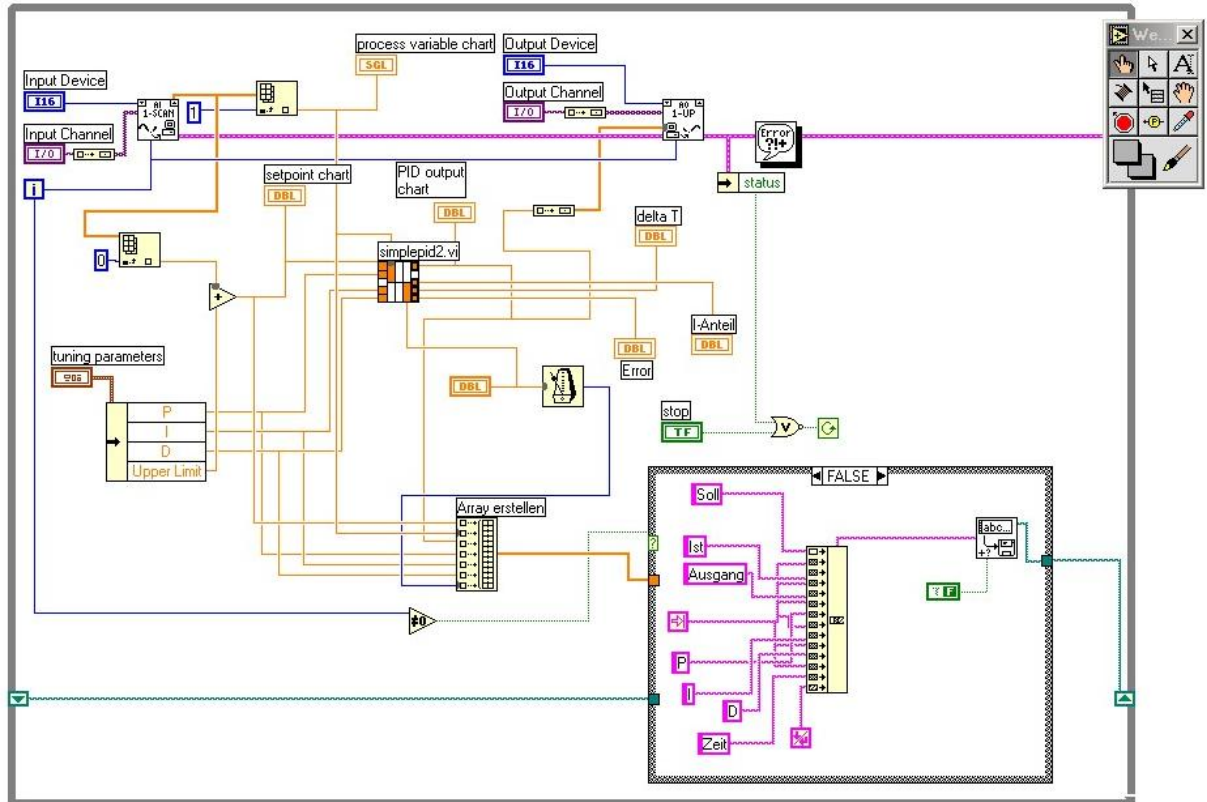


Abbildung 31: Screenshot von der Übersichtsseite

3.2.2 Bode-Diagramm für einen P-Regler

Als Erstes untersuchen wir einen P-Regler bei kleinem $k_P \approx 1$. k_D und k_I haben wir verständlicherweise auf 0 gesetzt. *MatLab* liefert uns folgende fourriertransformierten Werte für den Logarithmus des Betrages der Übertragungsfunktion und der Phase ϕ über die Frequenz f :

f / Hz	$\log(F(s))$	ϕ / rad
0,2150	-0,1382	-0,0337
0,4987	-0,1413	-0,0885
0,9921	-0,1475	-0,1876
1,5133	-0,1578	-0,2668
2,0971	-0,1553	-0,3592
4,0329	-0,2204	-0,6541
5,9647	-0,2766	-0,9025
9,0330	-0,3815	-1,1677
10,0328	-0,4099	-1,2686
12,0198	-0,4565	-1,3829
15,0748	-0,5389	-1,5455
16,9377	-0,5835	-1,6527
19,2552	-0,6139	-1,7275
21,5821	-0,6571	-1,7966
23,0649	-0,6885	-1,8882
25,1454	-0,7272	-1,9569

Tabelle 6: Bodedaten für P-Regler ($k_p = 1$)

Daraus ergibt sich das entsprechende Bode-Diagramm:

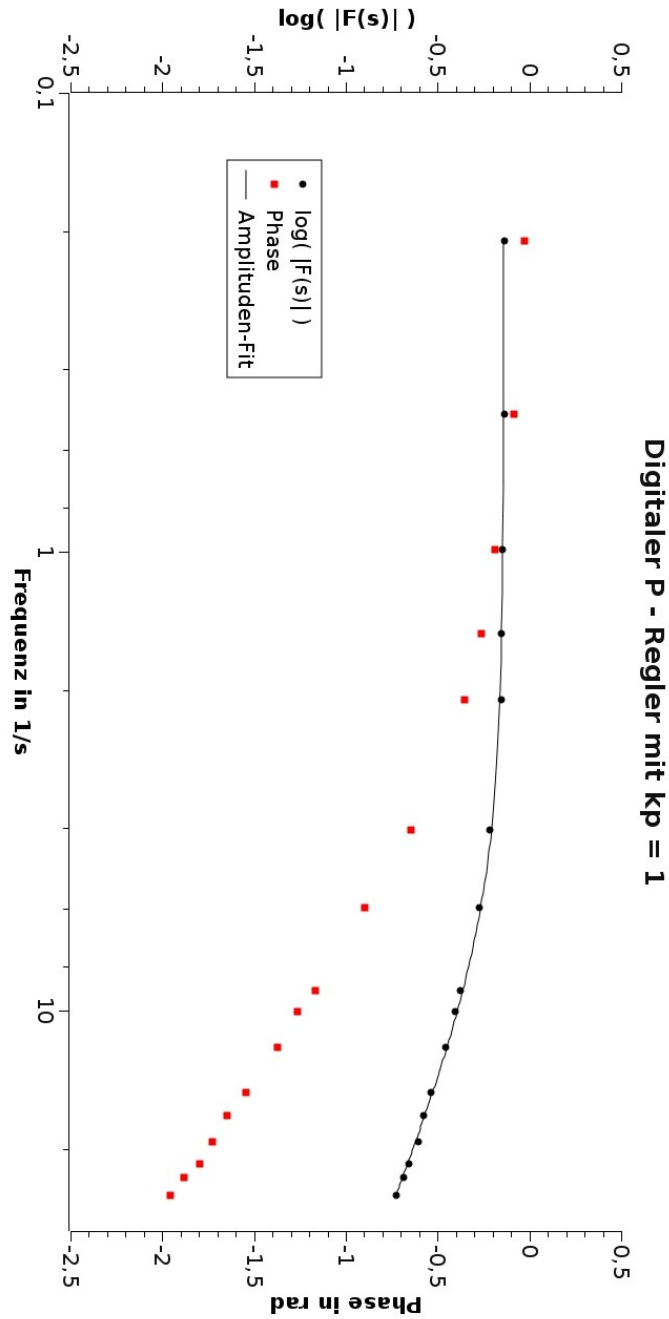


Abbildung 32: Bode-Diagramm für P-Regler ($k_P = 1$)

Durch das Fitten der Übertragungsfunktion erhalten wir ein $T=0.517s$ und ein $K=2.496$ für die Regelstrecke S .

Nun erhöhen wir den Wert von k_P auf $k_P = 3,76$. Entsprechende Daten erhalten wir von *MatLab*:

f / Hz	$\log(F(s))$	ϕ / rad
0,2095	-0,0293	-0,0062
0,5146	-0,0297	-0,0168
1,0174	-0,0294	-0,0332
1,4948	-0,0291	-0,0477
2,0936	-0,0293	-0,0680
3,9398	-0,0287	-0,1287
5,9537	-0,0232	-0,1911
8,9526	-0,0168	-0,2909
9,9969	-0,0113	-0,3281
12,1653	-0,0073	-0,3900
14,9730	0,0082	-0,5187
17,0125	0,0192	-0,5947
18,9494	0,0127	-0,6602
20,9836	0,0304	-0,7586
22,7620	0,0410	-0,8393
25,3274	0,0651	-0,9365

Tabelle 7: Bodedaten für P-Regler ($k_P = 3,76$)

Das entsprechende Bode-Diagramm sehen wir in Abbildung 33.

Durch das Fitten der Phasenmesspunkte erhalten wir für die Regelstrecke S folgende Werte: $K=3.987$ und $T=0.666s$. Der Fit der Übertragungsfunktion ergab auch hier keine brauchbaren Werte.

Das Bode-Diagramm sieht schließlich wie folgt aus:

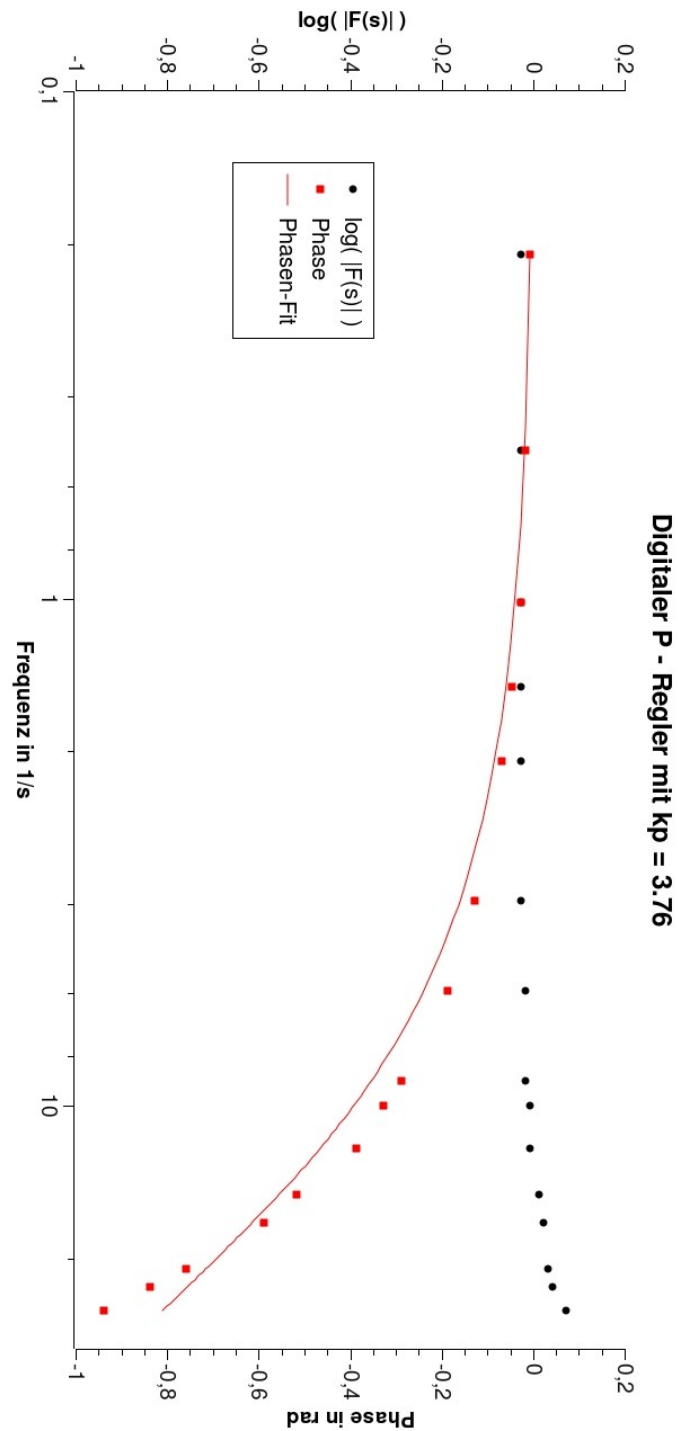


Abbildung 33: Bode-Diagramm für P-Regler ($k_P = 1$)

3.2.3 Bode-Diagramm für einen PI-Regler

Wir erhöhen k_I auf $k_I = 100$, bzw. senken k_P auf $k_P = 1$ und untersuchen dementsprechend das Verhalten eines PI-Reglers. Die Fouriertransformation ergibt:

f / Hz	$\log(F(s))$	ϕ / rad
0,2115	0,0001	-0,0035
0,5186	0,0009	-0,0085
1,0179	0,0032	-0,0179
1,5155	0,0067	-0,0270
1,9694	0,0126	-0,0376
4,0182	0,0499	-0,0964
5,9978	0,1112	-0,2061
9,0420	0,2272	-0,5468
10,0026	0,2587	-0,7380
12,0041	0,2642	-1,1824
15,0066	0,1441	-1,6814
17,0563	0,0365	-1,9246
18,5434	-0,0377	-2,0779
20,4909	-0,1530	-2,1986
23,0434	-0,2074	-2,2566
25,0681	-0,2521	-2,2828

Tabelle 8: Bodedaten für PI-Regler ($k_P = 1$, $k_I = 100$)

Daraus erhalten wir das folgende Bode-Diagramm:

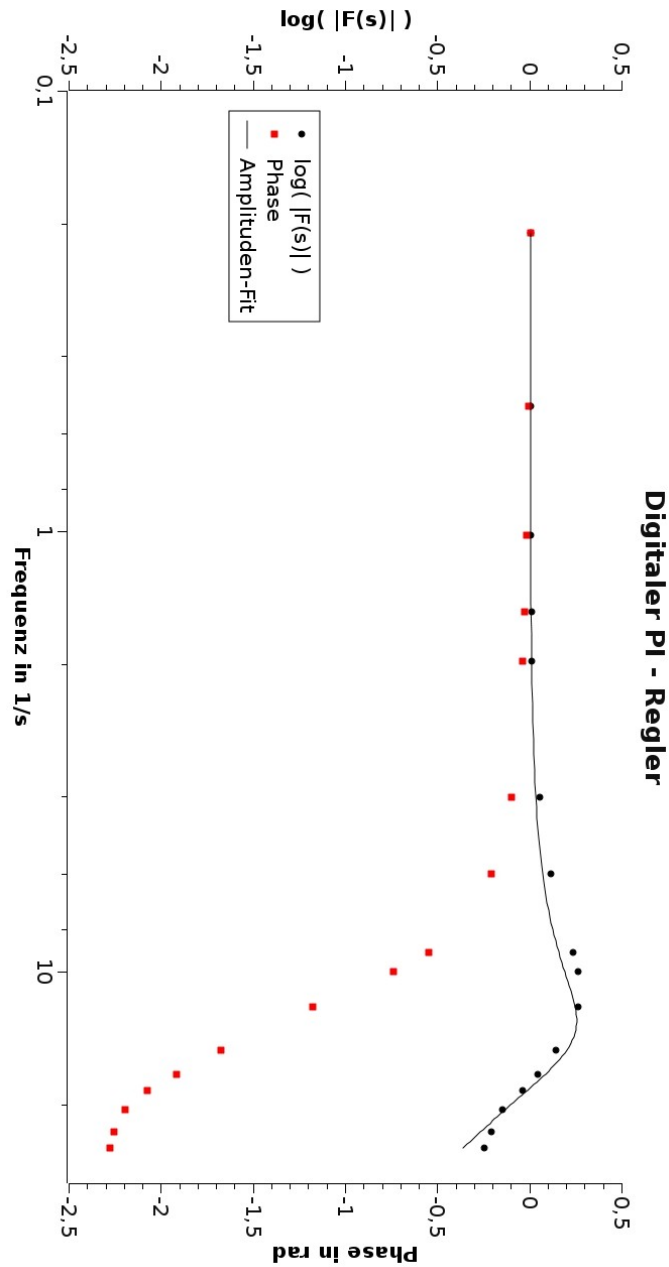


Abbildung 34: Bode-Diagramm für PI-Regler ($k_P = 1$, $k_I = 100$)

Durch den Übertragungsfunktionfit gibt uns *QTIPlot* $T = 0.157s$ und $K = 0.315$ für die Regelungsstrecke aus.

3.2.4 Bode-Diagramm für einen PID-Regler

Unsere neuen Einstellungen für k_P , k_I und k_D sind: $k_P = 1$, $k_I = 40$ und $k_D = 0,08$ - wir untersuchen also im nächsten Schritt einen PID-Regler mit geschlossenem Regelkreis.

MatLab gibt uns folgende Daten:

f / Hz	$\log(F(s))$	ϕ / rad
0,2094	0,0003	-0,0314
0,4906	-0,0039	-0,0784
1,0066	-0,0148	-0,1435
1,5041	-0,0237	-0,2007
1,9817	-0,0329	-0,2452
3,9958	-0,0838	-0,4108
6,0311	-0,1367	-0,5307
8,9890	-0,1941	-0,7932
10,0028	-0,2273	-0,5906
12,0092	-0,2578	-0,8060
14,9129	-0,3494	-0,9173
16,8659	-0,2974	-0,5897
3,3430	2,0405	-6,1779
21,0717	-0,2573	-0,6737

Tabelle 9: Bodedaten für geschlossenen PID-Regler ($k_P = 1$, $k_I = 40$, $k_D = 0,08$)

Mit diesen Daten können wir auf beide Funktionen fitten (vergleiche Abbildung 35).

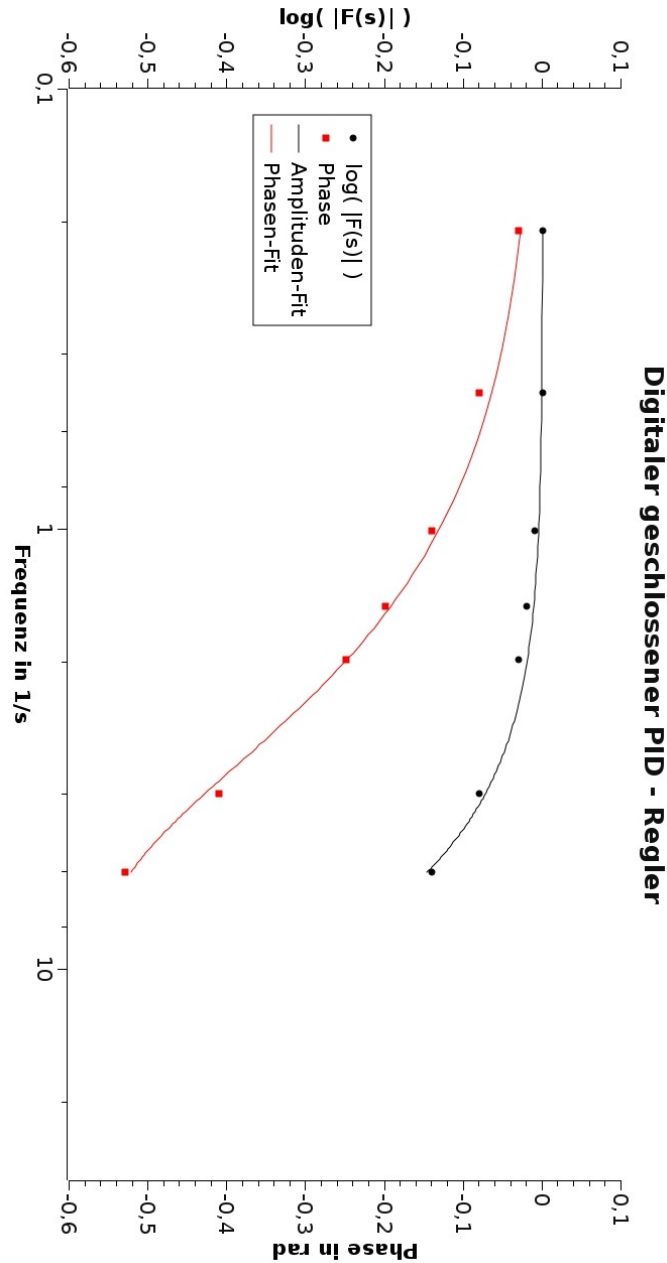


Abbildung 35: Bode-Diagramm für geschlossenen PID-Regler ($k_P = 1$, $k_I = 40$, $k_D = 0,08$)

Wie man sieht, verwenden wir die letzten Messpunkte nicht für das Diagramm, da diese zu stark von unseren Erwartungen abweichen. Die Kurve über die Phase gibt uns folgende Werte: $K=0.188$ beziehungsweise $T=0.050s$. Zum Vergleich die Werte der Kurve über die logarithmische Funktion: $K=0.213$ und $T=0.017s$.

Nun öffnen wir den geschlossenen Regelkreis des PID-Reglers. Unsere Werte für k_I , k_P und k_D bleiben unverändert. Tabelle 10 zeigt die von *MatLab* analysierten Werte.

f / Hz	$\log(F(s))$	ϕ / rad
0,2145	1,4903	-4,7190
0,5207	1,0966	-4,6234
0,9876	0,7797	-4,5473
1,5180	0,5485	-4,4192
2,0061	0,3558	-4,2606
3,9903	0,1220	-2,6232
6,0048	0,4312	-2,0879
9,0346	0,6645	-1,9453
10,0090	0,7271	-1,9361
12,0016	0,8157	-1,9423
15,1498	0,9306	-1,9077
16,9788	0,9860	-1,9515
18,8914	1,0360	-1,9594
20,9593	1,0757	-2,0036
23,0369	1,1213	-2,0235
24,9417	1,1541	-2,0489

Tabelle 10: Bodedaten für offenen PID-Regler ($k_P = 1$, $k_I = 40$, $k_D = 0,08$)

Das entsprechende Bode-Diagramm wird in Abbildung 36 gezeigt.

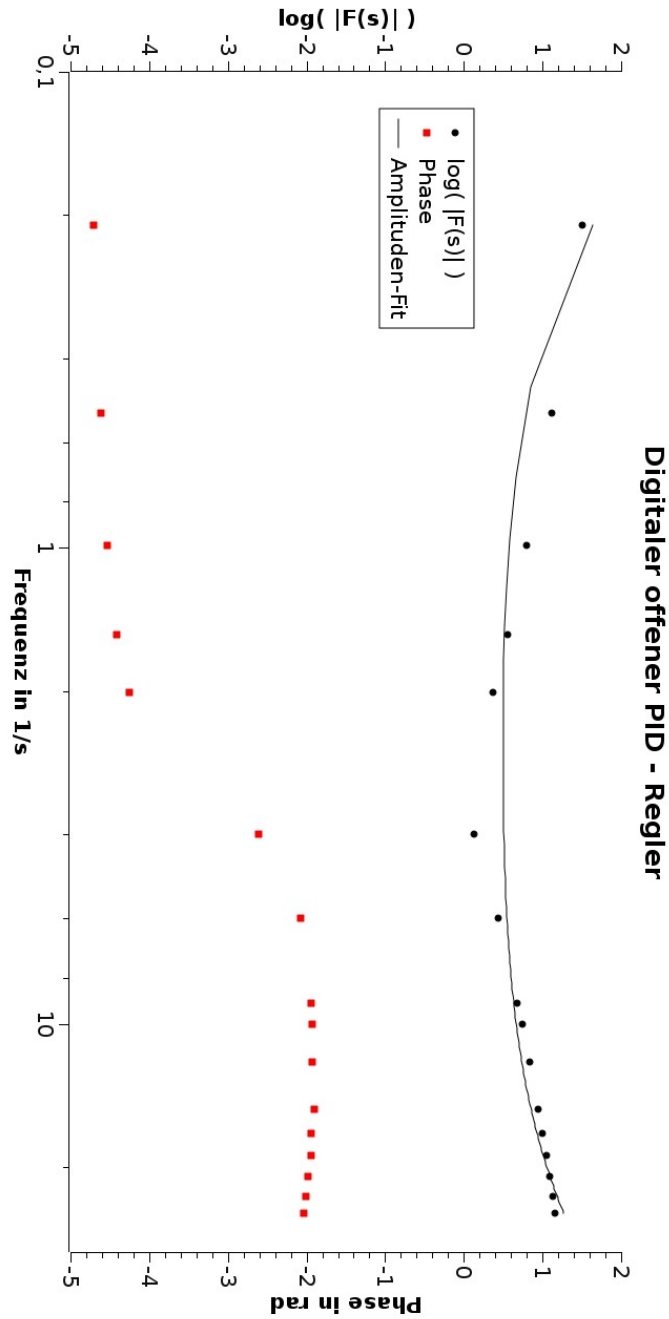


Abbildung 36: Bode-Diagramm für offenen PID-Regler ($k_P = 1$, $k_I = 40$, $k_D = 0,08$)

4 Fehlerdiskussion

Bei diesem Versuch hatten wir generell große Schwierigkeiten ihn reibungslos durchzuführen. Die ersten Stunden mussten wir erst damit verbringen, alle Geräte einigermaßen zu verstehen. Sowohl die Hardware, wie Steckbrett, Kabelführung, Frequenzgenerator etc, als auch die dazu nötige Software (*Labview*, *Maxima*, *QTIPlot* etc) waren neu für uns. So konnten wir zum Beispiel nicht genau einschätzen, wie der jeweilige Spannungsverlauf, der mit *LabView* angezeigt wurde, aussehen sollte. Deshalb sollte man hier als Fehlerquelle eventuell falschdimensionierte Parameter (wie zb. Offset, Abtastrate etc) angeben. Dieses Problem haben wir dadurch zu minimieren versucht, in dem wir nach jedem Versuchsschritt Rücksprache mit dem Versuchsbetreuer gehalten haben.

Die größten Probleme bereitete uns jedoch das Fitten der einzelnen Theoriekurven. Während dem Arbeiten mit *QTIPlot* stießen wir immer wieder auf einzelne Programmierfehler in dem Programm selber. Bei einigen Messkurven schlug es als Fitkurve stark schwankende Funktionen vor, die überhaupt nicht unseren Messdaten entsprachen. Obwohl wir Grenzen für die einzelnen Parameter eingegeben hatten, wurden diese teilweise ignoriert. Ein besseres Programm für das Erzeugen der Theoriekurve konnten wir aber nicht finden.