29

3 VERSUCHSAUSWERTUNG

3.1 Potentiometerkennlinie

Die Potentiometerkennlinie wurde gemäß der Versuchsbeschreibung ermittelt. Wir verwendeten dafür ein Voltmeter im Meßbereich 200 V \pm 0,1 V. Die folgende Tabelle veranschaulicht die relative Position x des Wagens zu den Schienen und die jeweis zugehörige Spannung.

x in cm	9,6	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0
U in Volt	0,0	1,7	3,3	4,9	6,5	8,1	9,7	11,4
Steigung in V/cm	0,314	0,320	0,320	0,320	0,320	0,320	0,340	0,320
Gauss-Fehler	0,031	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034
x in cm	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	84,1
TT . TT 1.								
U in Volt	13,0	14,6	16,2	17,9	19,6	21,2	22,8	24,1
U in Volt Steigung	13,0	14,6	16,2 $0,340$	17,9 0,3400	19,6 0,320	21,2 $0,320$	22,8 $0,317$	24,1
	,	,	,	,	,	,	,	24,1

Die Steigung berechneten wir wie folgt:

$$S = \frac{U_2 - U_1}{x_2 - x_1} \tag{48}$$

Für die Gauss-Fehler Berechnung verwendeten wir folgende Formel:

$$\Delta S = \sqrt{\left(\frac{-1}{x_2 - x_1}\Delta U_1\right)^2 + \left(\frac{1}{x_2 - x_1}\Delta U_2\right)^2 + \left(\frac{-U_2 + U_1}{(x_2 - x_1)^2}\Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{U_2 - U_1}{(x_2 - x_1)^2}\Delta x_2\right)^2}$$

Dabei nahmen wir fr
 die x-Messung einen Grtfehler von ± 2 mm und bei der Spannungsmessung, wie bereits angegeben von $\pm 0, 1$ V an.

Anhand des folgenden Schaubildes erkennt man den linearen Zusammenhang zwischen Position des Wagens und Spannung am Potentiometer.

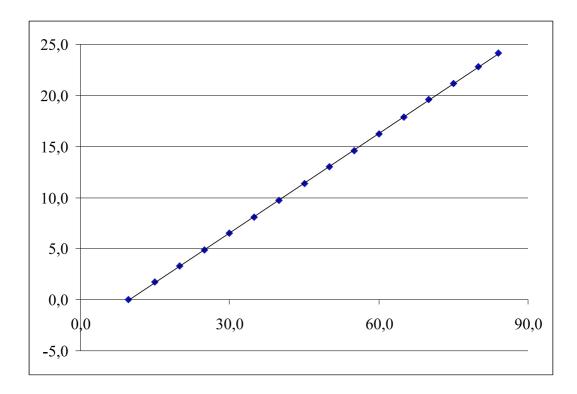


Abbildung 20: Potentiometerkennlinie

Die Gleichung der Regressionsgerade lautet:

$$U = 0,325V/cm \ x - 3,21V \tag{49}$$

Dabei ist die Position x des Wagens in c
m einzusetzen. Für die Spannung U erhält man dann die Einheit Volt. Der Fehler der Regressionsgerade beläuft sich auf 0,034 V/cm.

3.2 Motorkennlinie

Wie schon in der Versuchsbeschreibung erwähnt, legten wir an die x-Achse des x-y-Schreibers die Dreieckspannung an, welche auch am Motor angelegt war. An der y-Achse des Schreibers wurde die Potentiometerspannung aufgetragen. Für das erste Motorschaubild galten folgende Daten:

Frequenz in mHz	230
Maximale Spanning in V	3,200
Offset in mV	100
Einstellung der x-Achse in V/cm	0,2
Einstellung der y-Achse in V/cm	1

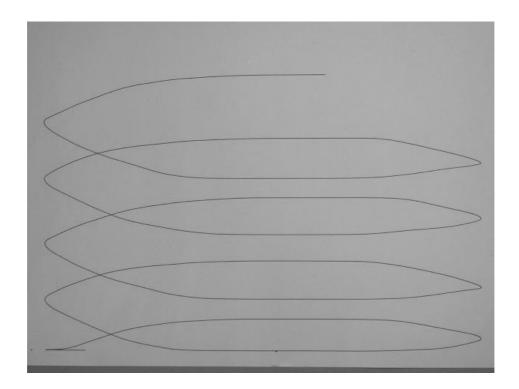


Abbildung 21: Motorschaubild 1

Daraus ergeben sich folgende Daten für die Bewegung einer Periode:

	cm im Diagramm	in V	Wagenbewegung in cm
Fahrt nach Links	7,30	7,30	25,47
Fahrt nach Rechts	2,82	2,82	9,84
Differenz	4,48	4,48	15,63

Hieran läßt sich sehr gut die Asymmetrie des Motors erkennen, der hier je Periode ca. 61 % nach links driftet. Dies ist allerdings kein Richtwert, wie sich im nächsten Bild zeigt.

Beim zweiten Motorschaubild waren die Einstellungen:

Frequenz in mHz	540
Maximale Spanning in V	3,200
Offset in mV	100
Einstellung der x-Achse in V/cm	0,2
Einstellung der y-Achse in V/cm	0,2

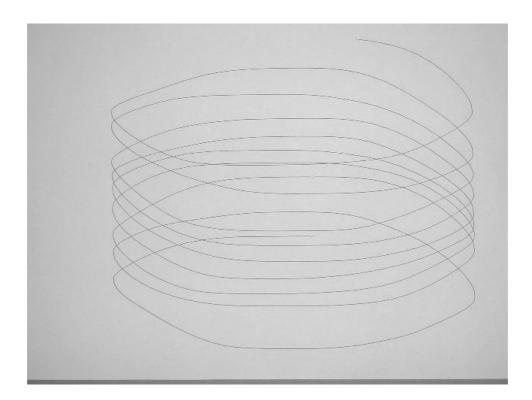


Abbildung 22: Motorschaubild 2

Daraus ergeben sich folgende Daten für die Bewegung einer Periode:

	cm im Diagramm	in V	Wagenbewegung in cm
Fahrt nach Links	10,25	10,25	35,77
Fahrt nach Rechts	8,80	8,80	30,71
Differenz	1,45	1,45	5,06

Hier driftet der Wagen allerdings nur ca. 14 % je Periode nach links. In diesem Diagramm sieht man auch, daß die einzelnen Ovale nicht äquidistant sind. Wir müssen daher im weiteren davon ausgehen, daß sich der Wagen bei identischem Soll-Signal unterschiedlich verhält. Wir weden in den folgenden Versuchsteilen manche Ergebnisse nicht erklären können, da die Ergebnisse sehr fehlerbehaftet sind und nicht mit der Theorie übereinstimmen. Dies kann, wie wir hier festgestellt haben, sehr stark vom Versuchsaufbau, d.h. dem Motor und der Trägheit des Wagens abhängen und somit zu falschen Messergebnissen führen.

Zur Berechnung der Motorkennlinie digitalisierten wir das Motorschaubild mit dem Graph Digitizer. Die Werte rechneten wir dann in die entsprechenden Spannungen um. Für die Steigung im Schaubild gilt:

$$v(U_x) = \frac{dU_y}{dU_x} \frac{A}{K} \tag{50}$$

v ist die Geschwindigkeit des Wagens in Abhängigkeit von der an den Motor angelegten Dreieckspannung U_x . Die Konstante A ist die Steigung der Dreieckspannung und die Konstante K die Steigung der Potentiometerkennlinie. Die Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Spannung aufgetragen ergibt dann folgende Motorkennlinien für die beiden Motorschaubilder:

Für das Diagramm benutzten wir eine stark komprimierte digitale Photographie. Dies wirkte sich leider auf die Messergebnisse aus, da die gemessene Steigung von jedem einzelnen Pixel abhing. Daher sind die Werte hier auch erkennbar diskret. Im folgenden Schaubild wurde dies durch ein qualitativ hochwertigeres digitales Motorschaubild korrigiert. Daher ist das Ergebnis hier bedeutend besser.

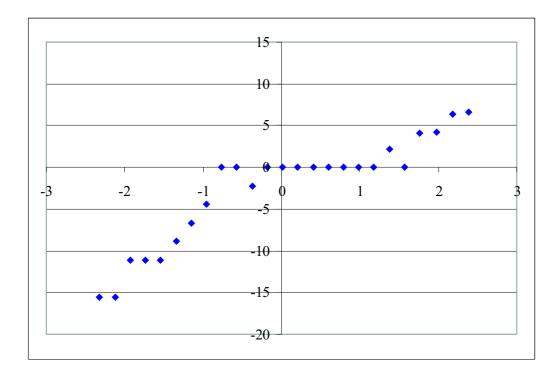


Abbildung 23: Motorkennlinie 1

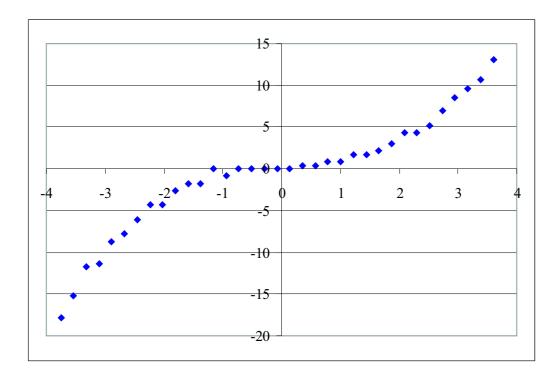


Abbildung 24: Motorkennlinie 2

3.3 Antwortfunktionen auf die Dirac-Delta-Funktion bei der Versuchsführung mit einem P-Element

Bei diesem Versuchsteil wurde dem Regelkreis - wie bereits in der Versuchsbeschreibung erwähnt - eine Dirac-Delta-Funktion als Eingangssignal zur Verfügung gestellt. Zu erwähnen ist jedoch, daß natürlich keine mathematisch korrekte Dirac-Delta-Funktion verwendet werden konnte. Wir bildeten diese Funktion durch einen sehr kurzen Spannungsstoß mit relativ hoher Spannung nach. Die gemessene Antwortfunktion wurde auf folgende Weise ausgewertet:

- 1. Für die analoge Regelstrecke digitaliserten wir die vom Oszilloskop abfotografierten Monitorbilder mit Hilfe des Computerprogramms Graph Digitizer. Mit den Einstellungen am Oszilloskop, konnten dann die Achsen kalibriert werden, und wir erhielten die Zeiten und Spannungen der Antwortfunktion. Diese konnten wir dann für die weitere Auswertung nutzen. Bei der digitalen Regelstrecke war dies natürlich nicht notwendig, da die Daten bereits in digitaler Form vorlagen. Die digitalen Daten wurden dahingehend korrigiert, daß sie invertiert wurden. Grund hierfür war, daß wir versehentlich bei der digitalen Messung eine negative Amplitude eingestellt hatten. Durch das Invertieren des Vorzeichens der Spannung können die gezeichneten Diagramme leichter verglichen werden.
- 2. Vor allem bei der digitalen Regelstrecke fiel die Unsymmetrie des Motors sehr stark ins Gewicht. Das heißt die Spannung zu Beginn eines Zykluses wich sehr stark von der Spannung am Ende des Zykluses ab. Dies hing wie bereits erwähnt damit zusammen, daß der Motor eine Richtung bevorzugte. Wir entschlossen uns diese Asymmetrie in den Daten zu bereinigen. Dazu teilten wir die Spannungsdifferenz zwischen Anfang und Ende des Zykluses in gleiche Teile und addierten entsprechend die jeweilige Korrekturspannung hinzu. Außerdem mußten wir bei den digitalen Daten die Spannungen auf eine Null-Potential-Linie beziehen, welche wir durch den Anfangswert und den Endwert der korrigierten Daten legten.
- 3. Anschließend berechneten wir mit Hilfe der Daten die Übertragungsfunktion. Da wir mit einer Dirac-Delta-Funktion arbeiteten ergibt sich die Übertragungsfunktion G(s) mit dem Parameter s als Laplace-Transformierte der Ausgangsspannung. Problematisch war hierbei lediglich, daß wir keine kontinuierliche Ausgangsfunktion zur Verfügung hatten, sondern nur diskrete Werte.

Wir entschieden, die Laplace-Transformierte durch eine Riemannsche Summe anzunähern.

$$L[U_a(t)] = \sum_{i=1}^{n} U_{ai} e^{-st} \Delta t$$
(51)

Dabei ist n die Anzahl der diskreten Zeit-Spannungs-Paare und U_{ai} der Wert der Spannung zum Zeitpunkt t_i .

- 4. Den Verlauf der Übertragungsfunktion, welche der Laplace-Transformierten aus Gleichung (51) entspricht, trugen wir mit Hilfe des Computerprogramms MAPLE gegen s auf. Dabei legten wir besonderen Wert auf die Darstellung des Maximums der Übertragungsfunktion und ihren Verlauf im positiven Bereich.
- 5. Aus der Übertragungsfunktion $F(i\omega)$ berechneten wir den Frequenzgang. Für den Frequenzgang trugen wir im BODE-Diagramm den Logarithmus des Betrages des Frequenzganges und die Phase logarithmisch gegen die Frequenz ω ab.

Zur besseren Verdeutlichung unserer Auswertungsmethode, haben wir unser MAPLE 6 - WORKSHEET eingebunden:

```
restart:with(plots):with(plottools):
x := :
y:=:
G:=sum((x[i+1]-x[i])*y[i]*exp(-s*x[i]),i=1..250):
F:=log10(abs(subs(s=I*w, G))):
phi:=180/Pi*arctan(Im(subs(s=I*w, G))/Re(subs(s=I*w, G))):
Gplot:=plot(G,s=-10..10):
Fplot:=semilogplot(F,w=0.01..1000):
phiplot:=semilogplot(phi,w=0.01..100):
                labels=[\beta'', G''],
display(Gplot,
                                   labelfont=[TIMES,
                                                         ROMAN,
                                                                     15].
axes=BOXED);
display(Fplot,view=[log10(0.01)..log10(500), -4..0], labels=["w",log-F-"],
labelfont=[TIMES, ROMAN, 15], axes=BOXED);
display(phiplot, view=[log10(0.01)..log10(14), 0..-90], labels=["w",phi"],
labelfont=[TIMES, ROMAN, 15], axes=BOXED);
```

Bei der Auswertung der charakterischen Daten des geschlossenen Regelkreises werden wir folendermaßen vorgehen:

Zuerst werden wir die Daten und Diagramme für die analoge und die digitale Messung bei gleicher Proportionalitätskonstante getrennt darstellen und analysieren. Dabei wird nicht unmittelbar ein Vergleich zur jeweiligen anderen Messung durchgeführt. Der Vergleich soll in einem separaten Abschnitt nach dem Vorstellen der Ergebnisse für die digitale und analoge Messung bei gleicher Proportionalitätskonstante vollzogen werden.

3.3.1 Proportional-Element mit Vertärkung 1 Analoge Messung

Bei dieser Messung hatten wir folgende Einstellungen:

Widerstand R_1 in $k\Omega$	10
Widerstand R_2 in $k\Omega$	10
Verstärkung gemäß $K_P = \frac{R_2}{R_1}$	1
Offset in Volt	6,0
Amplitude der Spannung U in Volt	5,0
Frequenz f der Spannungsquelle in Hz	1,3
Taktverhalten der Spannungsquelle	2 %
Dies entspricht der Zeitdauer Δt in ms	15,38

Aus den digitalisierten Daten, erstellten wir folgendes Diagramm. Es veranschaulicht die Antwortfunktion des Regelkreises auf die aufgeschaltete Dirac-Delta-Funktion. Die Dirac-Delta-Funktion wurde zum Zeitpunkt t=0 zugeschaltet.

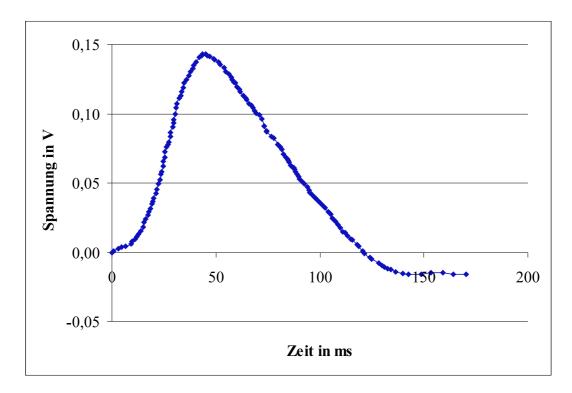


Abbildung 25: Antwortfunktion bei analoger Messung und Verstärkung 1

Im Diagramm ist zu sehen, daß der Endwert des Zykluses nicht mit dem Anfangwert übereinstimmt. Dies ist mit der bereits erwähnten Asymmetrie des

Motors zu begründen. Aufgrund der relativ geringen Unterschiede verzichteten wir auf eine Korrektur. Nun bestimmten wir mit Hilfe der digitalisierten Daten die Übertragungsfunktion gemäß Gleichung (51).

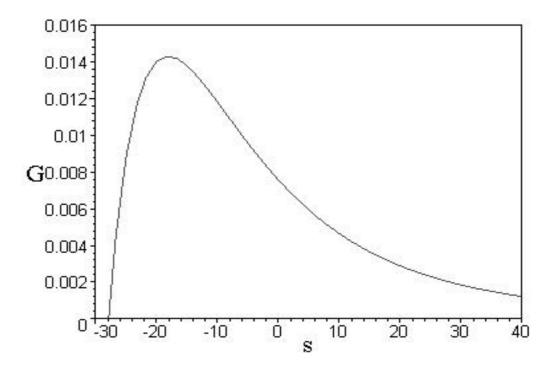


Abbildung 26: Analoge Übertragungsfunktion bei der Verstärkung 1

Die Übertragungsfunktion geht für $s\mapsto -\infty$ gegen $-\infty$. Für $s\mapsto \infty$ nähert sie sich assymptotisch der s-Achse an. Im Zwischenbereich sind ein Maximum und ein Wendepunkt zu beobachten.

Im BODE-Diagramm ergeben sich für den Frequenzganges und die Phase die auf der nächsten Seite abgebildeten Schaubilder. Der Frequenzganges verläuft zunächst parallel zur ω -Achse und fällt darauf hin linear ab. Die Oszillationen, welche im Schaubild zu sehen sind, sollten eigentlich nicht auftreten. Sie sind allerdings darauf zurückzuführen, daß für die Berechnung des BODE-Diagramms nur diskrete Werte benutzt wurden. Daraus resultiert, daß für hohe ω Oszillationen im Schaubild auftreten.

Digitale Messung

Eine digitale Messung mit der Verstärkung 1 war nicht möglich, da unter diesen Umständen der Wagen zu schwingen begann und von einer optimalen Regelung weit entfernt war.

Vergleich und Fazit

Ein Vergleich zwischen analoger und digitaler Messung war hier natürlich nicht möglich.

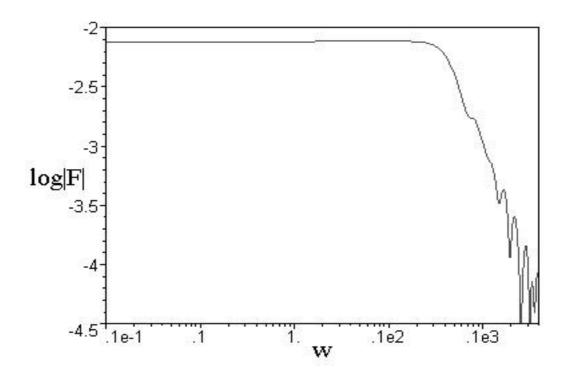


Abbildung 27: $\log |F|$ bei analoger Messung und Verstärkung 1

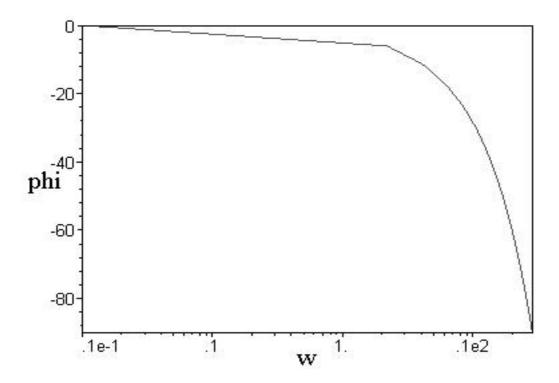


Abbildung 28: Phase ϕ bei analoger Messung und Verstärkung 1

3.3.2 Proportional-Element mit Verstärkung 2,7

Analoge Messung

Für diese analoge Messung entschieden wir uns aufgrund der guten Ergebnisse am Oszilloskop für folgende Einstellungen:

Widerstand R_1 in $k\Omega$	10
Widerstand R_2 in $k\Omega$	27
Verstärkung gemäß $K_P = \frac{R_2}{R_1}$	2,7
Offset in Volt	6,0
Amplitude der Spannung U in Volt	5,0
Frequenz f der Spannungsquelle in Hz	1,3
Taktverhalten der Spannungsquelle	2 %
Dies entspricht der Zeitdauer Δt in ms	15,38

Die Ausgangsfunktion ist im nächsten Diagramm veranschaulicht:

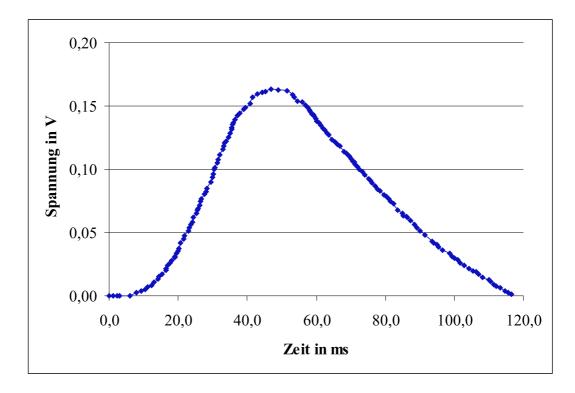


Abbildung 29: Antwortfunktion bei analoger Messung und Verstärkung 2,7

Die Dirac-Delta-Funktion wurde auch hier wieder zum Anfangszeitpunkt für 15,38 ms aufgeschalten. Bei dieser Einstellung fiel offensichtlich das unsymmetrische Verhalten des Motors nicht so sehr ins Gewicht. Die Kurve nähert sich am Ende ihrem Ausgagngszustand wieder sehr genau an.

Die folgende Übertragungsfunktion hat einen ähnlichen Verlauf wie im vorigen Abschnitt. Allerdings erscheint sie etwas nach rechts verschoben. Das Maximum bei 0,008 ist ebenfalls nicht so sehr ausgeprägt wie bei der Messung mit Verstärkung 1.

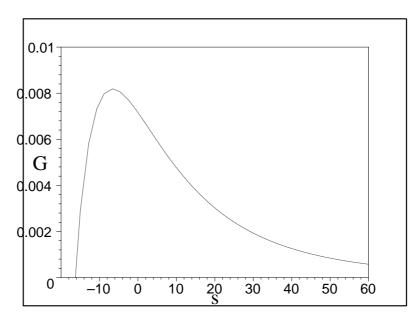


Abbildung 30: Analoge Übertragungsfunktion bei der Verstärkung 2,7

Im BODE-Diagramm ergeben sich für den logarithmischen Betrag des Frequenzganges und die Phase folgende Schaubilder. Der logarithmische Betrag des Frequenzganges hat den aus dem vorigen Abschnitt bekannten Verlauf. Allerdings ist im horizontalen Abschnitt ein leichter Anstieg zu erkennen. Danach fällt er linear ab, wobei für hohe Frequenzen wiederum die Oszillationen zu beobachten sind. Die Oszillationen entstehen wie bereits erwähnt durch die Diskretisierung der Messwerte. Dies führt in den hohen Frequenzbereichen zur Ausbildung schwingungsartiger Lösungen. Die Phase fällt zunächst schwach linear ab bis zu einem Bereich von 1,1 Hz und nähert sich anschließend schlagartig und sehr rasch der -90° Marke. Beide Schaubilder sind auf der nächsten Seite dargestellt.

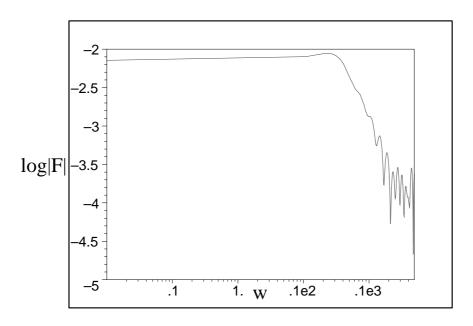


Abbildung 31: $\log |F|$ bei analoger Messung und Verstärkung 2,7

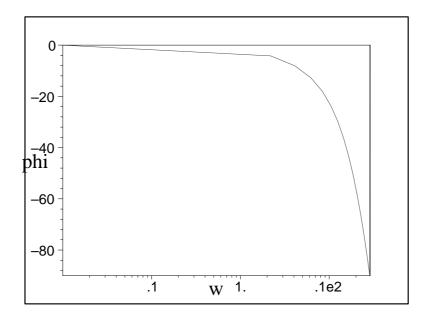


Abbildung 32: Phase ϕ bei analoger Messung und Verstärkung 2,7

Digitale Messung

Bei der digitalen Messung arbeiteten wir mit folgenden Einstellungen.

Frequenz in HZ	2,000
Taktverhalten	5 %
Dies entspricht der Zeitdauer Δt in ms	25,00
Amplitude der Deltafunktion in Volt	-2,00
Upper Limit in Volt	5,00
Lower Limit in Volt	-5,00
Offset in Volt	0,00
Upper Offset in Volt	0,60
Lower Offset in Volt	-0,60
P Einstellung	2,700
I Einstellung	0,060

Upper Limit und Lower Limit geben an, welche maximale bzw. minimale Amplitude die Stellgröße annehmen soll. Bei der digitalen Regelung ist es möglich das obere Limit und das untere Limit getrennt einzustellen. Darauf wurde allerdings von uns verzichtet. Bei der Verstärkung 2,7 wurde ausnahmsweise mit einem geringen Integralanteil gearbeitet, da sonst eine Einstellung eines stabilen Regelkreises nicht möglich war. Ohne den Integralanteil begann der Wagen zu schwingen.

Im ersten Diagramm auf der nächsten Seite werden die Daten des Soll-Wertes und der Stellgröße dargestellt. Die Stellgröße schießt gleich zu Begin auf ihr Maximum uns fällt dann langsam ab. Dann steuert sie nach Ende des Dirac-Delta-Impulses gegen und nähert sich schließlich nach mehreren kleinen Schwingungen dem Endzustand knapp über der ω -Achse an.

Die Antwortfunktion, welche sich auf der nächsten Seite direkt an das Diagramm von Stell- und SOLL-Größe anschließt, behält ihren charakteristischen Verlauf auch bei der digitalen Messung bei. Allerdings ist das Maximum viel stärker ausgeprägt, als bei der analogen Messung, bei der das Maximum einen abgerundeten Übergang aufweist. Nach dem Maximum schwingt die Antwortfunktion in den negativen Bereich um sich schließlich fast linear der ω -Achse zu nähern. Es sei noch darauf hingewiesen, daß wir bei dieser Messung aufgrund starker Schwankungen zwischen Anfangswert und Endwert der Spannung das lineare Ausgleichsverfahren angewandt haben, welches wir oben erwähnten. Im folgenden Diagramm haben wir zudem die Punkte nicht verbunden, da sonst, aufgrund der starken Oszillationen, nichts mehr zu Erkennen gewesen wäre.

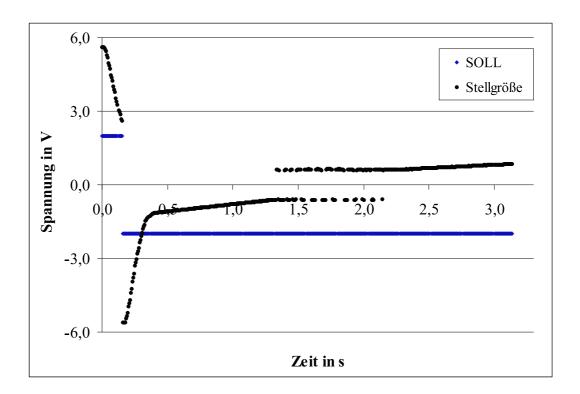


Abbildung 33: Soll und Stellgröße bei der Verstärkung 2,7

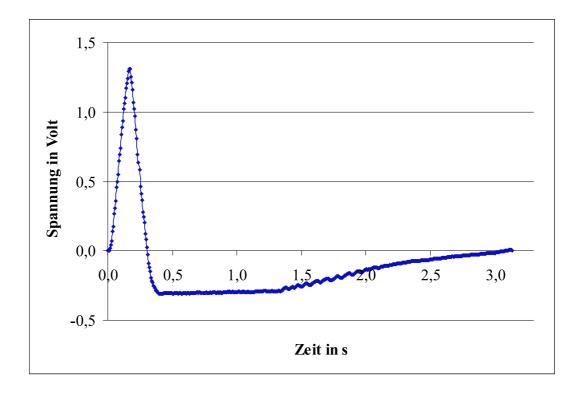


Abbildung 34: Antwortfunktion bei digitaler Messung und Verstärkung 2,7

Die Übertragungsfunktion der digitalen Messung ist im folgenden Schaubild dargestellt:

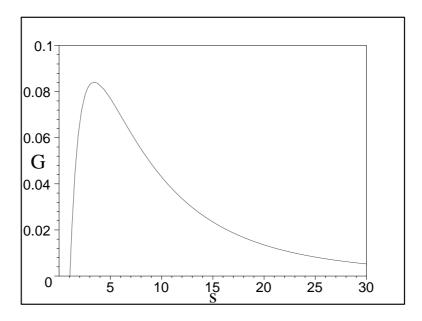


Abbildung 35: Digitale Übertragungsfunktion bei der Verstärkung 2,7

Sie zeigt das bereits bekannte Verhalten für diesen Regelkreis. Sie nimmt für den Parameter s=-11 ihr Maximum bei 0,008 ein und fällt dan über den Wendepunkt gegen Null ab.

Im BODE-Diagramm auf der nächsten Seite kann man zu Begin eine leicht abfallende Kurve beobachten. Dieses Abfallen ist wahrscheinlich durch den zugeschalteten Integralanteil ausgelöst worden. Danach ergibt sich wieder der bekannte starke Abfall der Kurve, an welchen sich die Oszillationen anschließen. Die Phase hat den bereits häufig beobachteten charakteristischen Verlauf. Der Knick im Schaubild ist darauf zurückzuführen, daß für die Auswertung nur diskrete Werte vorlagen.

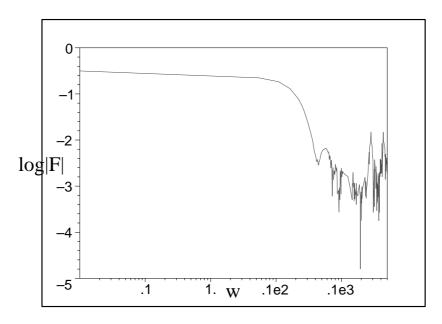


Abbildung 36: $\log |F|$ bei digitaler Messung und Verstärkung 2,7

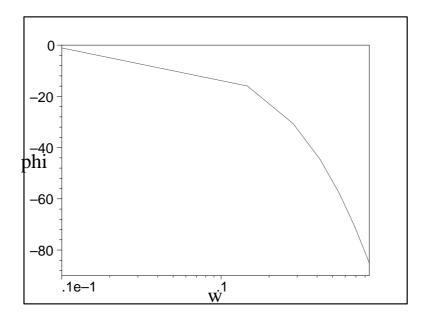


Abbildung 37: Phase ϕ bei digitaler Messung und Verstärkung 2,7

47

Vergleich und Fazit

Ein Vergleich der beiden Antwortfunktionen zeigt deutliche Unterschiede. Während bei der analogen Messung das Maximum den Spannungswert 0,17 Volt annimmt, liegt es bei der digitalen Messung bei 1,3 Volt. Dieser Unterschied ist natürlich auf die unterschiedlichen Einstellungen für Amplitude, Upper und Lower Limit zurückzuführen

Die Übertragungsfunktionen für die analoge und die digitale Messung haben den gleichen prinzipiellen Verlauf. Es ist aber anzumerken, daß die digitale Übertragungsfunktion im Vergleich zur analogen nach rechts verschoben ist und ein um eine Zehnerpotenz höheres Maximum besitzt.

Der Logarithmus des Betrages des Frequenzganges hat bei beiden Messungen einen ähnlichen Verlauf. Bei der digitalen Messung ist ein leichtes Absinken im Anfangsbereich festzustellen, was aber wie bereits erwähnt durch den zugeschalteten Integralanteil begründet ist. Beide Kurven fallen dann bei $\omega \approx 10 Hz$ stark ab, was durch das Integralverhalten des Motors verursacht wird. Beide schließen mit mehr oder minder starken Oszillationen.

Bei den Phasendiagrammen gibt es einen gravierenderen Unterschied. Die Kurve der digitalen Messung bricht schon nach kurzem linearen Abfall bei $\omega \approx 0, 1Hz$ ein. Dies ist wiederum eine Folge des zugeschalteten Integralanteils.

3.3.3 Proportional-Element mit Verstärkung 10

Analoge Messung

Am Spannungsgenerator und am Versuchsaufbau nahmen wir folgende Einstellungen vor:

Widerstand R_1 in $k\Omega$	10
Widerstand R_2 in $k\Omega$	100
Verstärkung gemäß $K_P = \frac{R_2}{R_1}$	10
Offset in Volt	6,0
Amplitude der Spannung U in Volt	5,0
Frequenz f der Spannungsquelle in Hz	1,3
Taktverhalten der Spannungsquelle	2 %
Dies entspricht der Zeitdauer Δt in ms	15,38

Die Reaktion der Regelstrecke auf das Aufschalten einer Dirac-Delta-Funktion ist im nächsten Schaubild dargestellt.

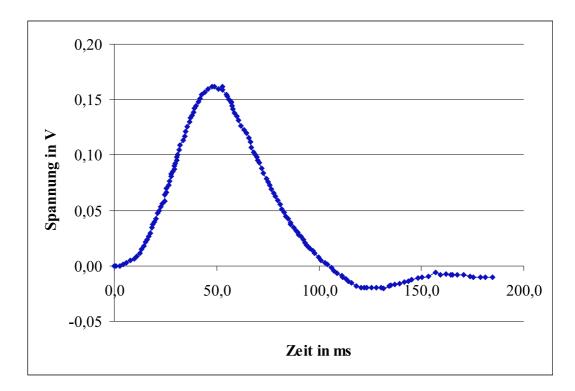


Abbildung 38: Antwortfunktion bei analoger Messung und Verstärkung 10

Es ist festzustellen, daß die Antwortfunktion auf ein Maximum ansteigt und nach Zurücknahme der Dirac-Delta-Funktion wieder absinkt. Allerdings schwingt sie über den Nullwert hinaus und kehrt anschließend auf einen Wert knapp unterhalb der Null-Potential-Linie zurück.

Berechnet man daraus gemäß Gleichung (51) die Übertragungsfunktion des Regelkreises, so ergibt sich folgendes Schaubild. Sie gleicht dem bereits für diesen Regelkreis bekannten charakteristischen Verlauf.

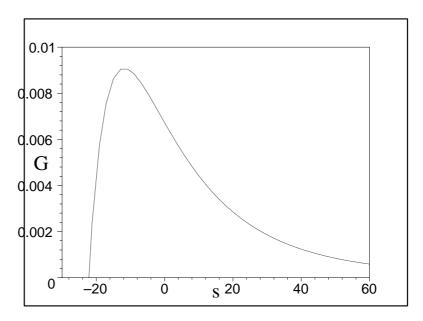


Abbildung 39: Analoge Übertragungsfunktion bei der Verstärkung 10

Das BODE-Diagramm, welches auf der nächsten Seite veranschaulicht ist, unterscheidet sich von den vorigen Ergebnissen im analogen Bereich durch das schnelle Abfallen der logarithmischen Betragsfunktion bei $\omega \approx 20 Hz$ des Frequenzganges. Es kann hier fast von einem aprupten Absinken gesprochen werden. Allerdings fängt sich diese Funktion wiederum und geht in eine horizontale Oszillation über. Die Phase verläuft zunächst leicht fallend. Bei einer Kreisfrequenz von 1 Hz fällt sie sehr stark gegen die 90°-Marke ab.

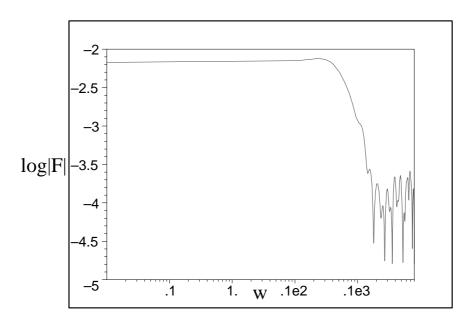


Abbildung 40: $\log |F|$ bei analoger Messung und Verstärkung 10

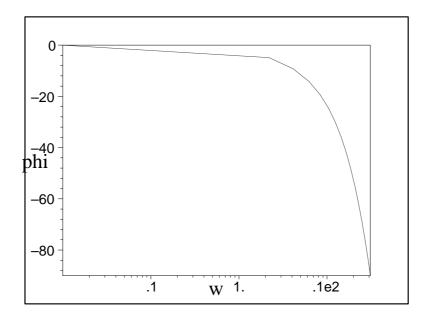


Abbildung 41: Phase ϕ bei analoger Messung und Verstärkung 10

Digitale Messung

Bei der digitalen Messung und der Verstärkung 10 arbeiteten wir mit folgenden Einstellungen.

Frequenz in HZ	5,000
Taktverhalten	5 %
Dies entspricht der Zeitdauer Δt in ms	10,00
Amplitude der Deltafunktion in Volt	-5,00
Upper Limit in Volt	5,00
Lower Limit in Volt	-5,00
Offset in Volt	0,00
Upper Offset in Volt	0,60
Lower Offset in Volt	-0,60
P Einstellung	10,000
I Einstellung	0,000

Im nächsten Diagramm werden die Daten des Soll-Wertes und der Stellgröße dargestellt. Anzumerken ist die Oszillation um die ω -Achse, welche auch in der folgenden Antwortfunktion zu erkennen ist.

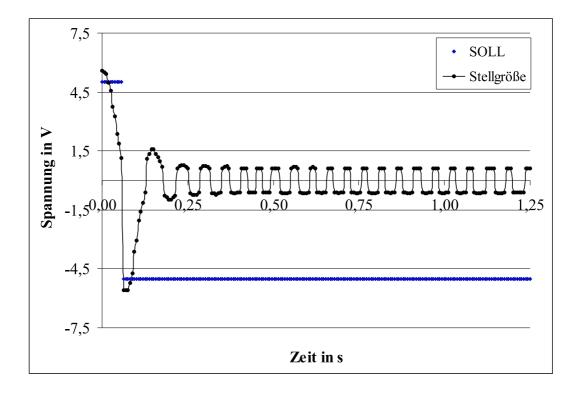


Abbildung 42: Soll und Stellgröße bei der Verstärkung 10

Wieder fällt bei der digitalen Messung das ausgeprägte Mamimum ins Auge. Die Funktion schwingt danach über die ω -Achse hinaus und geht in die bereits erwähnten Oszillationen über, welche durch die Stellgröße verursacht werden. Zu erwähnen ist hier wiederum, daß die Antwortfunktion linear angeglichen wurde, da die Anfangs- und Endwerte der Spannung zu stark voneienander abwichen.

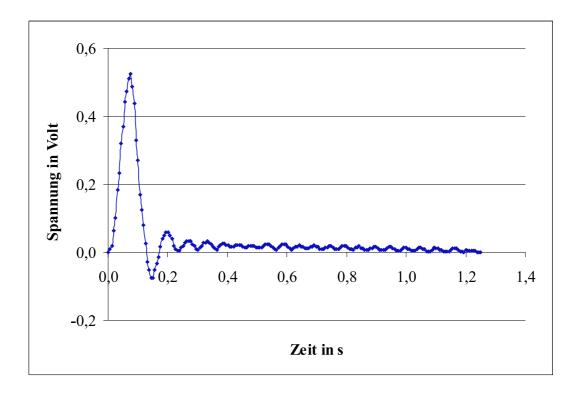


Abbildung 43: Antwortfunktion bei digitaler Messung und Verstärkung 10

Die Übertragungsfunktion der digitalen Messung ist im Schaubild auf der nächsten Seite dargestellt. Trotz mehrerer Versuche konnte kein Maximum im Verlauf dieser Funktion festgestellt werden. Auch die typische Maximumssuche mit Hilfe von MAPLE führte zu keinem Erfolg. Zu sagen ist lediglich, daß die Funktion für $s\mapsto\infty$ sehr langsam wächst und für $s\mapsto-\infty$ sehr rasch abfällt.

Das BODE-Diagramm - im Anschluß an das Diagramm der Übertragungsfunktion - zeigt zunächst eine leicht abfallende Gerade, welche für hohe ω -Werte sehr rasch abfällt und dann bei den Oszillationen einen annähernd stationären Wert annimmt. Bei der Phase des Frequenzganges sticht besonders das lokale Minimum und das lokale Maximum heraus.

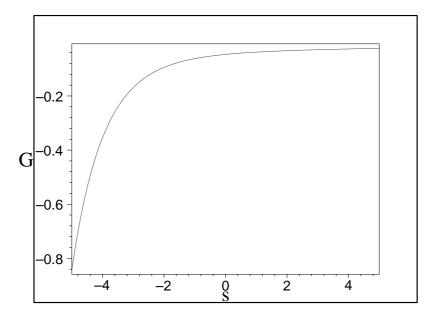


Abbildung 44: Digitale Übertragungsfunktion bei der Verstärkung 10

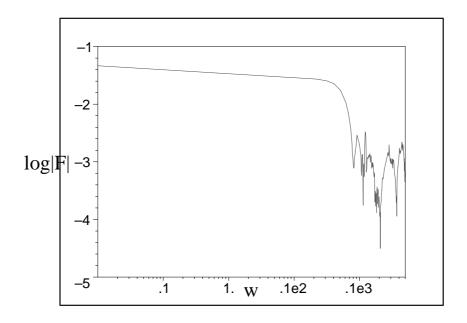


Abbildung 45: $\log |F|$ bei digitaler Messung und Verstärkung 10

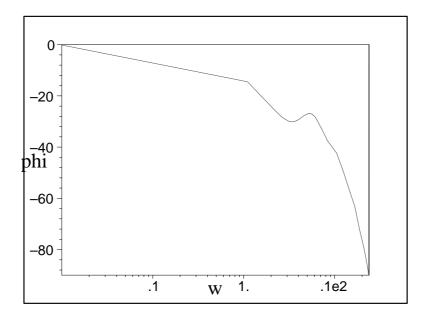


Abbildung 46: Phase ϕ bei digitaler Messung und Verstärkung 10

Vergleich und Fazit

Die Antwortfunktionen haben beide den gleichen typischen Verlauf. Beide schwingen beim Abfallen über die ω -Achse hinaus und nehmen dann - wenn man von den Oszillationen bei der digitalen Messung absieht - einen stationären Wert im Bereich 0 Volt an. Auch hier ist, wie bei der Verstärkung 2,7 zu beobachten, daß die Antwortfunktion der digitalen Messung eine viel höhere Spannung im Maximum annimmt, als die analoge Messung. Dies ist aber wiederum mit der Konfiguration des Systems zu begründen.

Bei der Ubertragungsfunktion kann kein direkter Vergleich angestellt werden. Dies liegt daran, daß die Übertragungsfunktion der digitalen Messung ein vollkommen atypisches Verhalten zeigt. Die analoge Übertragungsfunktion hat verglichen mit den vorigen Messungen den erwarteten Verlauf.

Das BODE-Diagramm beider Messungen verläuft prinzipiell sehr ähnlich. Beide Kurven weisen einen abprupten Abfall bei $\omega \approx 20Hz$ auf. Allerdings verläuft die digitale Messung verglichen zur analogen Messung höher.

Bei der Phase ist vom prinzipiellen Verlauf gesehen eine überaus gute Übereintstimmung zwischen analoger und digitaler Messung festzustellen. Allerdings weist die digitale Messung eine Unregelmäßigkeit im Bereich 0,7 bis 1,5 Hz auf. Diese Unregelmäßigkeit kann allerdings auch durch die Diskretisierung der Meßwerte hervorgerufen werden.

3.3.4 Proportional-Element mit Verstärkung 22

Analoge Messung

Eine optimale Einstellung am Oszilloskop ließ sich mit folgenden Einstellungen realisieren:

Widerstand R_1 in $k\Omega$	10
Widerstand R_2 in $k\Omega$	220
Verstärkung gemäß $K_P = \frac{R_2}{R_1}$	22
Amplitude der Spannung U in Volt	5,0
Offset in Volt	6,0
Frequenz f der Spannungsquelle in Hz	1,3
Taktverhalten der Spannungsquelle	2 %
Dies entspricht der Zeitdauer Δt in ms	15,38

Bei der Antwortfunktion der Regelstrecke ist festzustellen, daß die Ausgangsspannung zuerst ihr Maximum erreicht, aber nach dem Ende der Dirac-Deltafunktion sehr stark in den negativen Spannungsbereich schwingt und danach sich einem minimalen negativen Wert annähert.

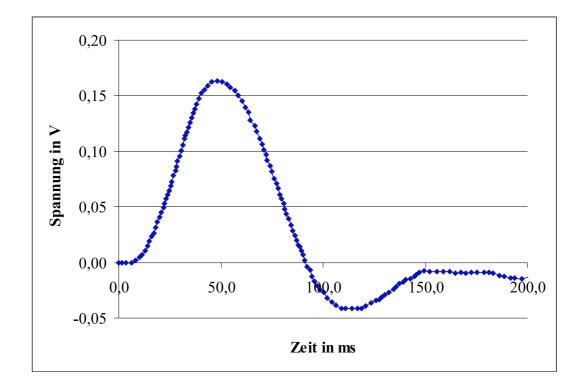


Abbildung 47: Antwortfunktion bei analoger Messung und Verstärkung 22

Die folgende Übertragungsfunktion für die Verstärkung 22 hat den bereits mehrmals beobachteten charakteristischen Verlauf.

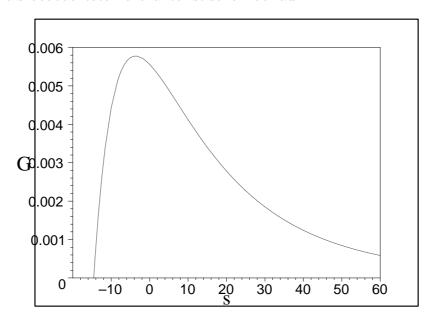


Abbildung 48: Analoge Übertragungsfunktion bei der Verstärkung 22

Das BODE-Diagramm hat einen ähnlichen Verlauf wie in den Messungen zuvor. Es ist aus Platzgründen erst auf der folgenden Seite dargestellt worden. Besonders zu erwähnen ist, daß beim logarithmischen Betrag des Frequenzganges sich an den schwachen linearen Anstieg im Anfangsbereich noch ein gesonderter Bereich mit relativ starken linearen Anstieg anschließt. Der Verlauf der Phase ist mit den vorigen Ergebnissen identisch.

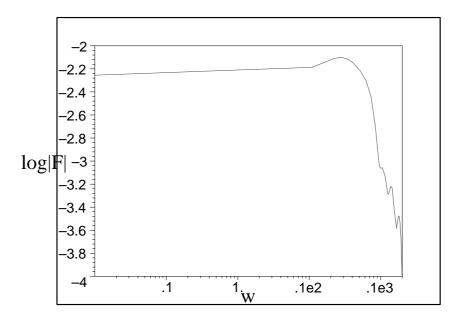


Abbildung 49: $\log |F|$ bei analoger Messung und Verstärkung 22

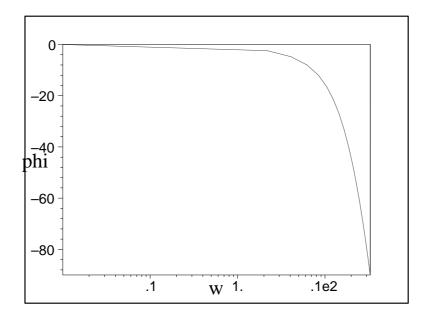


Abbildung 50: Phase ϕ bei analoger Messung und Verstärkung 22

Digitale Messung

Ein akzeptables Ergebnis erhielten wir mit folgenden Einstellungen:

Frequenz in HZ	5,000
Taktverhalten	5 %
Dies entspricht der Zeitdauer Δt in ms	10,00
Amplitude der Deltafunktion in Volt	-6,00
Upper Limit in Volt	7,00
Lower Limit in Volt	-7,00
Offset in Volt	0,00
Upper Offset in Volt	0,50
Lower Offset in Volt	-0,50
P Einstellung	22,000
I Einstellung	0,000

Der Verlauf der SOLL-Größe und der Stellgröße ist im nächsten Diagramm veranschaulicht. Die Stellgröße schwingt zunächst gedämpft um die x-Achse und geht dann in einen stationären Wert über.

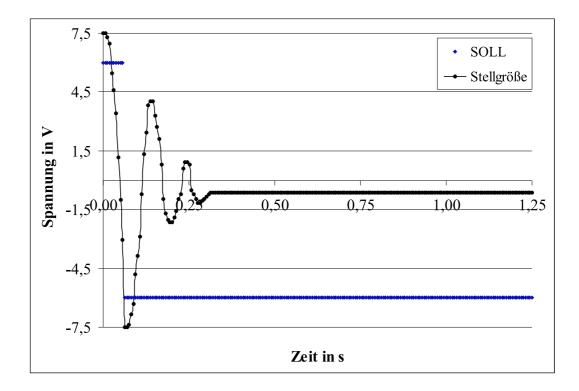


Abbildung 51: Soll und Stellgröße bei der Verstärkung 22

Bei dieser Messung ist für die Antwortfunktion kein Unterschwingen der x-Achse festzustellen. Die Funktion schwingt oberhalb der x-Achse und geht schließlich linear gegen ihren Endwert.

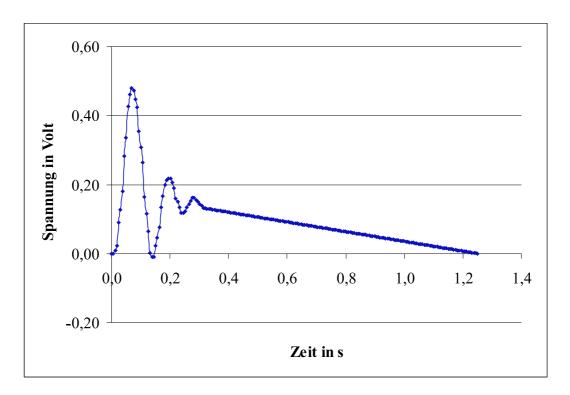


Abbildung 52: Antwortfunktion bei digitaler Messung und Verstärkung 22

Auch hier trat das gleiche Problem wie bei der digitalen Messung mit der Verstärkung 10 auf. Es existiert für diese Versuchsbedingungen kein Maximum der Übertragungsfunktion.

Im BODE-Diagramm ergibt sich eine zunächst annähernd horizontale Gerade für den Betrag der Frequenzgangsfunktion. Diese Gerade fällt auf ein zweites Plateu ab. Dort ergibt sich kurzzeitig ein stationärer Wert. Danach erscheinen die bekannten Oszillationen. Bei der Phase sind besonders der Knick und die Oszillationen um -80° zu erwähnen. Der Knick entstand mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit aufgrund der Diskretisierung der Werte. Die Oszillationen sind allerdings nicht zu erklären.

Übergangsfunktion und BODE-Diagramm sind auf den beiden folgenden Seiten dargestellt:

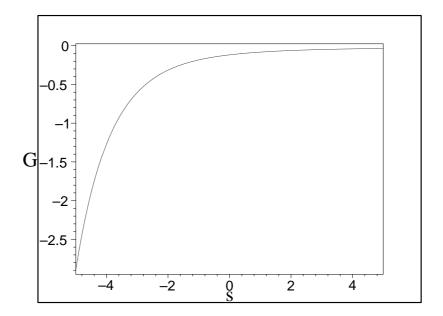


Abbildung 53: Digitale Übertragungsfunktion bei der Verstärkung 22

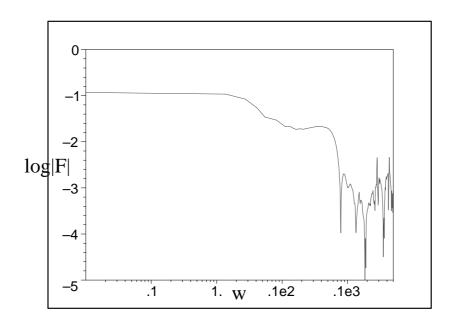


Abbildung 54: $\log |F|$ bei digitaler Messung und Verstärkung 22

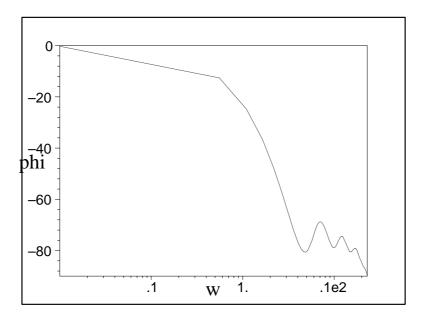


Abbildung 55: Phase ϕ bei digitaler Messung und Verstärkung 22

Vergleich und Fazit

Beim Vergleich der beiden Antwortfunktionen fällt auf, daß die digitale Antwortfunktion fast lediglich im positiven Spannungsbereich anzutreffen ist, während bei der analogen Messung ein starkes Unterschwingen auffällt. Bei der Übertragungsfunktion des digitalen Regelkreises ist wieder das atypische Verhalten zu beobachten wie bei der vorigen digitalen Messung. Es liegt die Vermutung nahe, daß bei der digitalen Messung im höheren Proportionalitätsbereich diese Kurve die charakteristische Übertragungsfunktion darstellt. Der Unterschied zur analogen Messung ist allerdings nicht erklärbar. Auch die BODE-Diagramme weisen einen starken Unterschied auf. Während ie analoge Messung im Bereich um 10 Hz ansteigt und ein Maximum annimmt, fällt die digitale Funktion in diesem Bereich auf ein zweites Plateau ab. Auch die Phasendiagramme differieren sehr stark voneinander. Die Phase der digitalen Messung fällt bei 0,7 Hz sehr stark ab und oszilliert ab 1,3 Hz. Die analoge Funktion weist den auch in den vorigen Messungen beobachteten Verlauf auf.

3.4 Antwortfunktionen auf die Dirac-Delta-Funktion bei der Versuchsführung mit einem PI-Element

Bei dieser Versuchsführung werden wir mit der Auswertung im Prinzip ähnlich vorgehen wie im vorigen Abschnitt. Allerdings stellte sich uns das Problem, daß wir am zweiten Tag bei der digitalen Messung nicht die identischen Einstellungen im PC vornehmen konnten, wie am Vortag bei der analogen Messung. Deshalb werden wir zuerst die beiden analogen Messungen und anschließend die beiden digitalen Messungen präsentieren und versuchen jeweils die beobachtbare Charakteristika herauszuarbeiten.

3.4.1 Analoger Versuchsaufbau

Erste Messung

Die erste Messung wurde mit folgender Konfiguration durchgeführt:

Widerstand R_1 in $k\Omega$	27
Widerstand R_2 in $k\Omega$	27
Verstärkung gemäß $K_P = \frac{R_2}{R_1}$	1
Widerstand R_3 des Integrators in $k\Omega$	27
Kapazität des Kondensators in μ F	4,7
Integratorkonstante $K_I = \frac{1}{RC}$	7,88
Amplitude der Spannung U in Volt	4,0
Offset in Volt	6,0
Frequenz f der Spannungsquelle in Hz	1,3
Taktverhalten der Spannungsquelle	2 %
Dies entspricht der Zeitdauer Δt in ms	15,38

Für diese Einstellung des Regelkreises erhielten wir nachfolgende Antwortfunktion auf die Dirac-Delta-Funktion. Sie nähert sich nach recht kurzer Zeit ihrem Maximum bei $t=45\mathrm{ms}$ und nähert sich dann assymptotisch der Zeitachse. Allerdings macht sich auch bei dieser Messung das unsymmetrische Verhalten des Motors wieder bemerkbar. Wie schon öfters erwähnt fuhr der Eisenbahnwagen deshalb bevorzugt in die linke Richtung. Bei der Rückfahrt in die rechte Richtung erreichte er dann nicht mehr seinen Ausgangspunkt vor dem Zyklus.

Vergleicht man diese Messung mit der Messung ohne Integralanteil, so stellt man fest, daß das Maximum aufgrund des zusätzlichen Integralanteils früher erreicht wird.

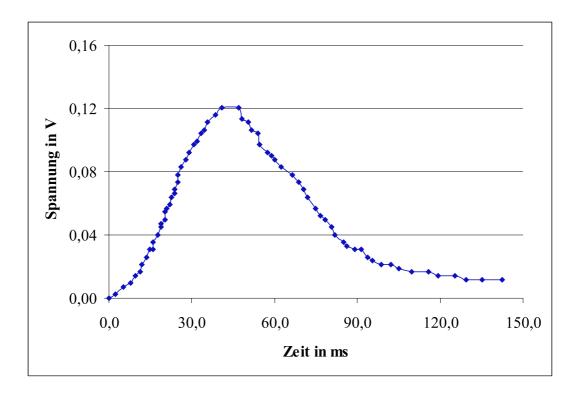


Abbildung 56: Antwortfunktion das ersten analoge PI-Elements

Die Übertragungsfunktion, welche wir mit Hilfe der Gleichung (51) berechneten, hat den nachfolgenden Verlauf. Besonders ist im Bezug auf die vorigen Beobachtungen zu erwähnen, daß die Übertragungsfunktion dieses PI-Elements kein Maximum annimmt.

Im BODE-Diagramm ergibt sich zunächst eine nahezu horizontal verlaufende Linie, welche bei 100 Hz relativ stark abfällt. Es schließen sich die immer zu beobachtenden Oszillationen an. Allerdings scheint es so, als würde der Logarithmus des Betrages des Frequenzganges einen aufstrebenden Trend aufweisen. Mit Sicherheit kann man dies allerdings nicht behaupten, da die Oszillationen dies verschleiern.

Die Phase verläuft zunächst sehr flach fallend und bricht bei einer Kreisfrequenz von 70 Hz ein.

Alle drei Diagramme sind auf den nächsten beiden Seiten dargestellt:

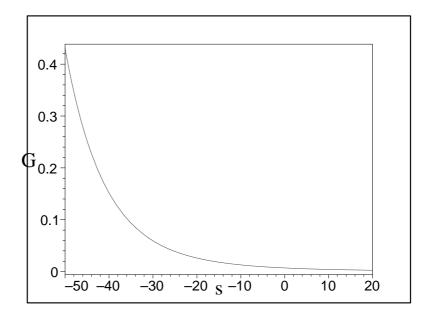


Abbildung 57: Analoge Übertragungsfunktion des ersten PI-Elements

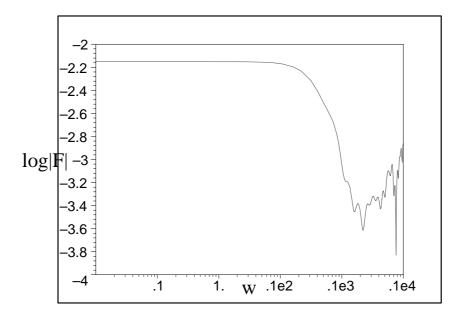


Abbildung 58: $\log |F|$ bei analoger Messung des ersten PI-Elements

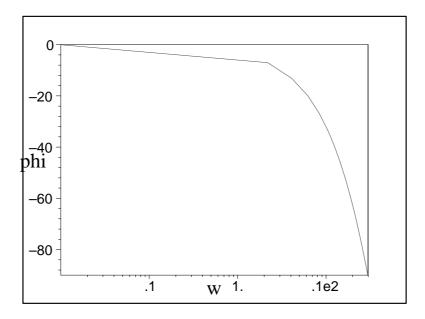


Abbildung 59: Phase ϕ bei analoger Messung des ersten PI-Elements

Zweite Messung

Die zweite Messung wurde mit folgenden Einstellung erstellt:

Widerstand R_1 in $k\Omega$	10
Widerstand R_2 in $k\Omega$	10
Verstärkung gemäß $K_P = \frac{R_2}{R_1}$	1
Widerstand R des Integrators in $k\Omega$	27
Kapazität des Kondensators in μ F	0,98
Integratorkonstante $K_I = \frac{1}{RC}$	37,79
Amplitude der Spannung U in Volt	4,0
Offset in Volt	6,0
Frequenz f der Spannungsquelle in Hz	1,3
Taktverhalten der Spannungsquelle	2 %
Dies entspricht der Zeitdauer Δt in ms	15,38

Die Spannungsantwort des zweiten PI-Elements weist eine sehr starke Oszillation auf. Bei dieser Konfiguration war es nur sehr schwer möglich eine Einstellung mit einigermaßen gutem Regelverhalten zu finden. Dies schlägt sich natürlicherweise wie zu sehen ist auch in den Daten nieder.

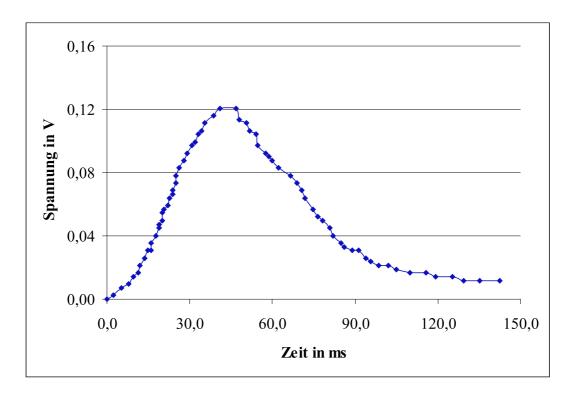


Abbildung 60: Antwortfunktion für das zweite analogen PI-Elements

Bei der Übertragungsfunktion entschieden wir uns zwei Bereiche zu zeichnen. Als einzigstes PI-Element unserer Messungen wies diese Konfiguration ein Minimum und ein Maximum in der Übertragungsfunktion auf. Dies ist im Bereich -4 < s < 4 dargestellt. Im großen Maßstab -10 < s < 10 verschwindet diese Besonderheit fast gänzlich und die Übertragungsfunktion hat die gleiche Gestalt wie in der ersten analogen Messung. Die beiden Diagramme haben wir erst im Anschlauß an den nächsten Textabschnitt gezeichnet. Das BODE-Diagramm hat ebenfalls einmaligen Charakter. Der logarithmische Betrag des Frequenzganges steigt nach einem nahezu horizontalen Abschnitt sehr stark an, erreicht ein Maximum und fällt dann sehr schnell wieder ab. Desweitern ist die Phase dieses PI-Elements sehr interessant. Sie steigt zunächst schwach über 0^o und fällt dann ab.

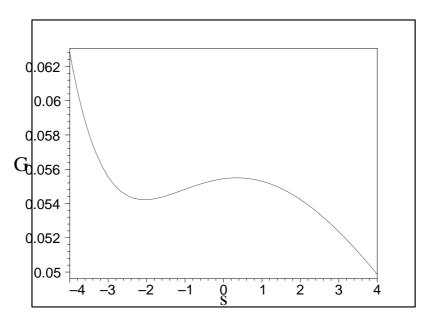


Abbildung 61: Analoge Übertragungsfunktion des zweiten PI-Elements im Bereich -4 < s < 4

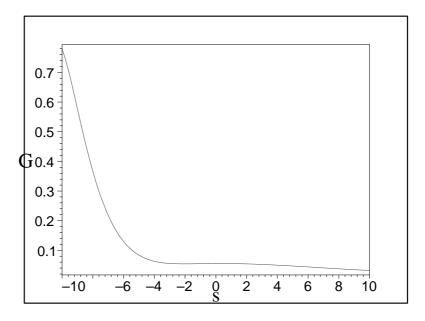


Abbildung 62: Analoge Übertragungsfunktion des zweiten PI-Elements im Bereich -10 < s < 10

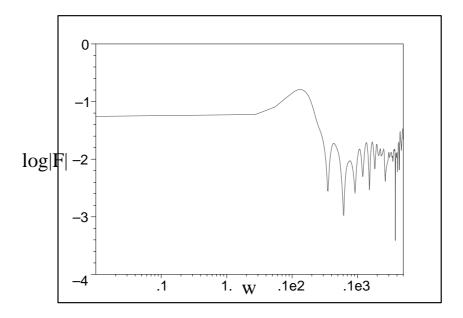


Abbildung 63: $\log |F|$ bei analoger Messung des zweiten PI-Elements

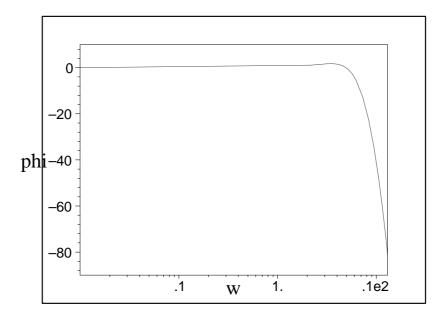


Abbildung 64: Phase bei analoger Messung des zweiten PI-Elements

3.4.2 Digitaler Versuchsaufbau

Erste Messung

Die erste Messung wurde mit folgender Konfiguration durchgeführt:

Frequenz in HZ	4,000
Taktverhalten	5 %
Dies entspricht der Zeitdauer Δt in ms	12,50
Amplitude der Deltafunktion in Volt	-6,00
Upper Limit in Volt	7,00
Lower Limit in Volt	-7,00
Offset in Volt	0,00
Upper Offset in Volt	0,50
Lower Offset in Volt	-0,50
P-Einstellung	10
I-Einstellung	20

Zunächst stellen wir im folgenden Diagramm das Verhalten der SOLL- und der Stellgröße dar:

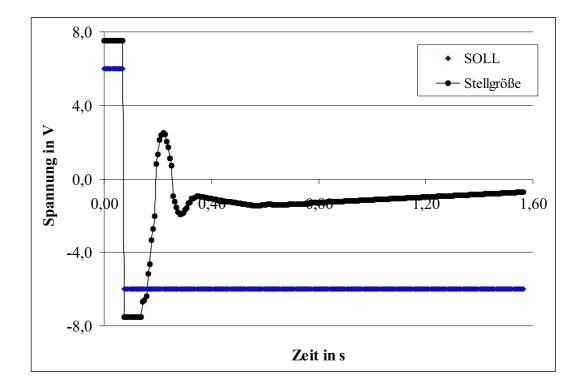


Abbildung 65: Soll und Stellgröße beim ersten digitalen PI-Element

Die Antwortfunktion auf die Dirac-Deltafunktion ist im nächsten Schaubild dargestellt. Sie steigt zunächst sehr stark an, fällt dann aber ebenso schnell wieder ab. Dabei unterschwingt sie die Zeitachse einmal und nähert sich danach dem Spannungswert von 0 Volt.

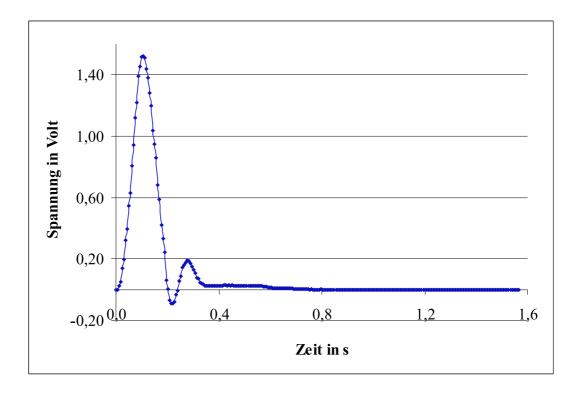


Abbildung 66: Antwortfunktion für das ersten digitale PI-Elements

Die Übertragungsfunktion zeigt ähnliches Verhalten wie bei der ersten analogen Messung. Ein Maximum und ein Minimum wie bei der zweiten analogen Messung sind hier nicht zu erkennen.

Im BODE-Diagramm ist wiederum eine Ähnlichkeit mit der ersten analogen Messung festzustellen. Der Verlauf beider Kurven ist annähernd identisch. Auch das Ansteigen in den Oszillationen kann erkannt werden. Gleiches gilt für die Phase, welche im Anschluß an das Schaubild des logarithmischen Betrages der Frequenzgangsfunktion, dargestellt wird.

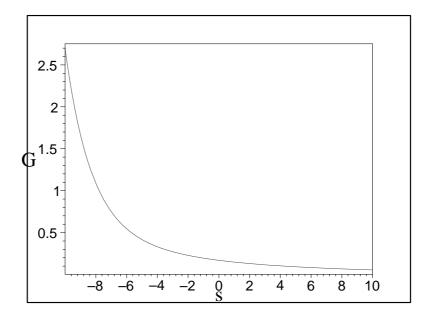


Abbildung 67: Digitale Übertragungsfunktion des ersten PI-Elements

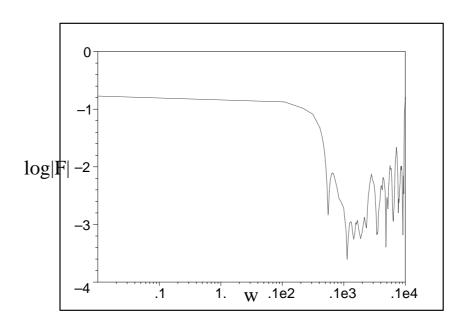


Abbildung 68: $\log |F|$ bei digitaler Messung des ersten PI-Elements

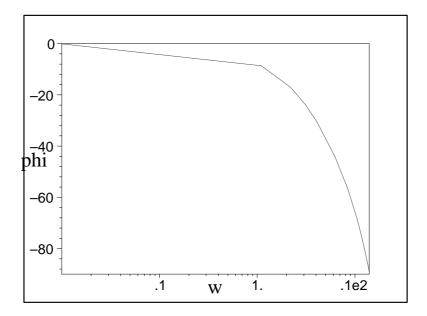


Abbildung 69: Phase ϕ bei digitaler Messung des ersten PI-Elements

Zweite Messung

Die zweite digitale Messung führten wir mit folgenden Einstellungen durch

Frequenz in HZ	2,000
Taktverhalten	5 %
Dies entspricht der Zeitdauer Δt in ms	25,00
Amplitude der Deltafunktion in Volt	-6,00
Upper Limit in Volt	7,00
Lower Limit in Volt	-7,00
Offset in Volt	0,00
Upper Offset in Volt	0,50
Lower Offset in Volt	-0,50
P-Einstellung	20
I-Einstellung	40

Das Verhalten der SOLL- und der Stellgröße werden wir im nächsten Diagramm darstellen.

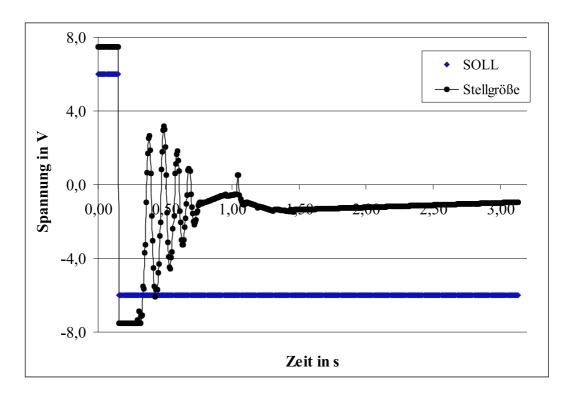


Abbildung 70: Soll und Stellgröße beim zweiten digitalen PI-Element

Es ist besonders die starke Reaktion auf die Dirac-Delta-Funktion zu beachten. Nach dem Abklingen der Dirac-Delta-Funktion, fällt auch die Stellgröße über mehrere Oszillationen ab und nähert sich langsam der Null Volt Geraden an. Das Spannungsverhalten auf die Dirac-Delta-Funktion ist wieder vergleichbar mit der ersten digitalen Messung. Die Spannung wächst sehr stark an und fällt nach erreichen des Maximums ebenso schnell wieder ab. Auch bei diesem Versuchsteil mußten wir die Spannungswerte aufgrund der Unsymmetrie des Motors korrigieren.

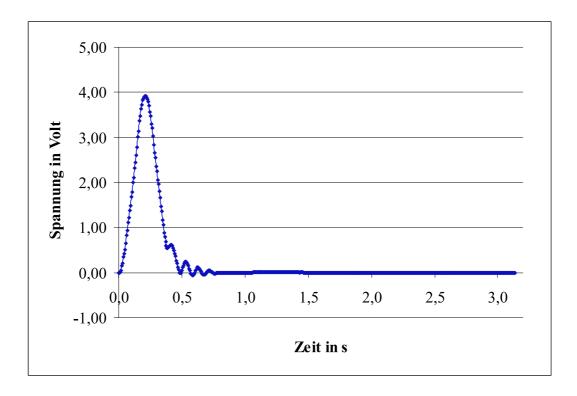


Abbildung 71: Antwortfunktion für das zweiten digitale PI-Elements

Die Übertragungsfunktion mit ihrem typischen Verlauf ist im nächsten Schaubild dargestellt:

Die Kurve des logarithmischen Betrages des Frequenzganges im BODE-Diagramm zeigt wieder das Verhalten der vorigen Messungen. Auch ein kleiner Anstieg für große ω ist zu beobachten. Die Phase verläuft zunächst nur sehr schwach fallend bricht dann aber im Bereich von 1 Hz sehr stark ab.

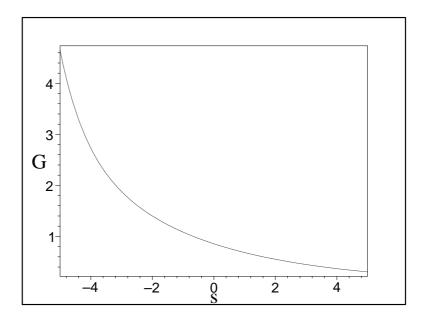


Abbildung 72: Digitale Übertragungsfunktion des zweiten PI-Elements

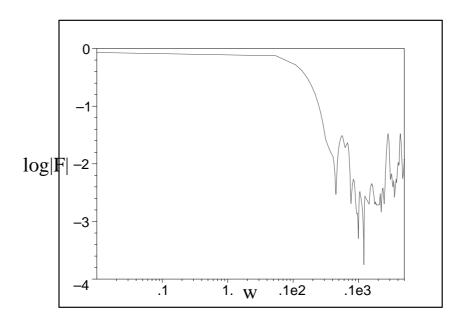


Abbildung 73: $\log |F|$ bei digitaler Messung des zweiten PI-Elements

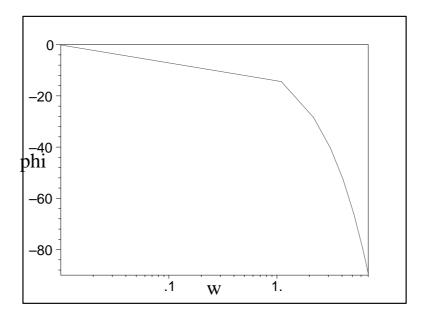


Abbildung 74: Phase ϕ bei digitaler Messung des zweiten PI-Elements

78

3.5 Antwort der Elemente auf die Sprungfunktion

3.5.1 Analoge Schaltungen

Zur Auswertung der Sprungantwort bei der analogen Regelung haben wir das Bild auf dem Oszilloskop mit der Digitalcamera abfotografiert. In diesen Bildern haben wir dann in CorelDraw die Kurven ausgemessen. Anhand der Einstellungen des Oszilloskops und der von uns getroffenen Einstellungen, konnten wir diese Längen dann in die entsprechenden Zeiten und Spannungen umrechnen.

Der in den folgenden Tabellen angegebene Widerstand ist der zum Operationsverstärker parallel geschaltete. Der andere Widerstand hat bei allen Schaltungen 10 $k\Omega$.

Sprungantwort 1

Für unsere erste Schaltung mit einem P-Element galten folgende Werte:

Widerstand in k Ω	10
Frequenz in Hz	1,3
Max. Spanning in V	2,00

Die Sprungantwort sah folgendermaßen aus:

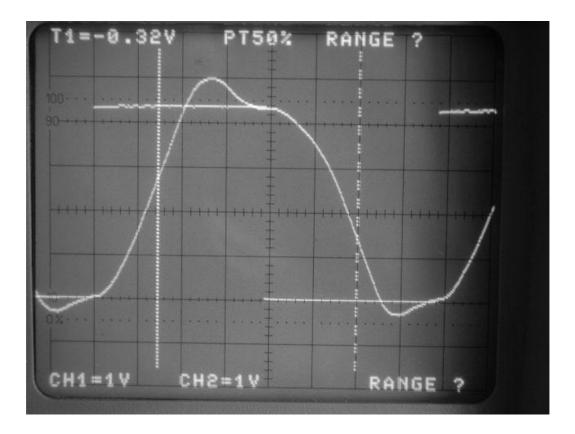


Abbildung 75: Sprungantwort 1 mit P-Element und Verstärkung 1

Folgende Werte lassen sich hieraus berechnen:

Sprunglänge [mm]	237,4
y-Kalibrierung [V/mm]	0,0151
x-Kalibrierung [s/mm]	0,0032

	Länge in mm	Zeit in s
Totzeit	8,7	0,028
10% Höhe	29,5	0,096
50% Höhe	75,1	0,243
90% Höhe	113,9	0,369
100% Höhe	124,7	0,404
	Länge in mm	Δ U in V
10 % Höhe	25,5	0,384
50 % Höhe	132,75	2,000
90 % Höhe	238,9	3,599
100 % Höhe	265,5	4,000
Überschwingweite	37,9	0,571
Unterschwingweite	2,2	0,033
Sprunghöhe	265,5	4,000

Hier wurde die Sprunglänge und die Sprunghöhe der Sprungfunktion gemessen und mit Hilfe der eingestellten Werte von Frequenz und doppelter Spannung der Sprungfunktion die Kalibrierung bestimmt. Als Referenz für die %-Werte wurde der erste Punkt der Sprungantwortfunktion genommen, der die Spannung der Sprungfunktion erreicht. Dieser wird dann als 100 % gesetzt. Ein relativ großer Fehler bei der Berechnung dieser Werte kommt durch das Abfotografieren und die gewölbte Scheibe des Oszilloskops, wodurch es zu Verzerrungen kommt. Dies sieht man am deutlichsten an den Geraden des Oszilloskops, die im Bild alles andere als Geraden sind. Dies gilt auch für alle weiteren Schaltungen.

Sprungantwort 2

Für die zweite Schaltung mit einem P-Element stellten wir folgende Werte ein:

Widerstand in k Ω	10
Frequenz in Hz	1,3
Max. Spanning in V	0,2

Die Sprungantwort sah dann folgendermaßen aus:

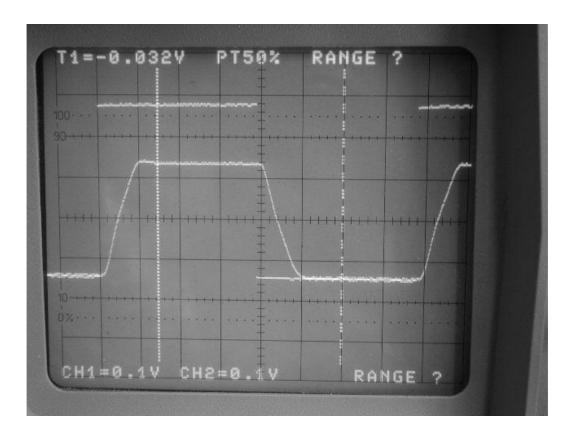


Abbildung 76: Sprungantwort 2 mit P-Element und Verstärkung 1

Folgende Werte haben wir hieraus errechnet:

Sprunglänge [mm]	219,5
y-Kalibrierung [V/mm]	0,0017
x-Kalibrierung [s/mm]	0,0035

	Länge in mm	Zeit in s
Totzeit	3,1	0,011
10% Höhe	12,6	0,044
50% Höhe	26,0	0,091
90% Höhe	44,9	0,157
100% Höhe	52,4	0,184
	Länge in mm	Δ U in V
10 % Höhe	15,8	0,026
50 % Höhe	78,2	0,131
90 % Höhe	141,3	0,236
100 % Höhe	157,0	0,263
Überschwingweite	2,7	0,005
Unterschwingweite	0	0
Sprunghöhe	239,0	0,4

Hier wurde die Sprunglänge und die Sprunghöhe der Sprungfunktion gemessen und mit Hilfe der eingestellten Werte von Frequenz und doppelter Spannung der Sprungfunktion die Kalibrierung bestimmt. Als Referenz für die %-Werte wurde der Wert genommen, bei dem die Kurve nach dem kurzen Überschwingen konstant bleibt. Dieser wird dann als 100 % gesetzt. Daß die Sprungantwort nicht den Wert des Sollfunktion erreicht, liegt wohl an der kleineren Spannung, bei der sich die Verluste im Motor und der Schaltung stärker auswirken.

Sprungantwort 3

Für die dritte Schaltung mit einem P-Element stellten wir folgende Werte ein:

Widerstand in k Ω	27
Frequenz in Hz	1,3
Max. Spanning in V	2,0

Die Sprungantwort sah dann folgendermaßen aus:

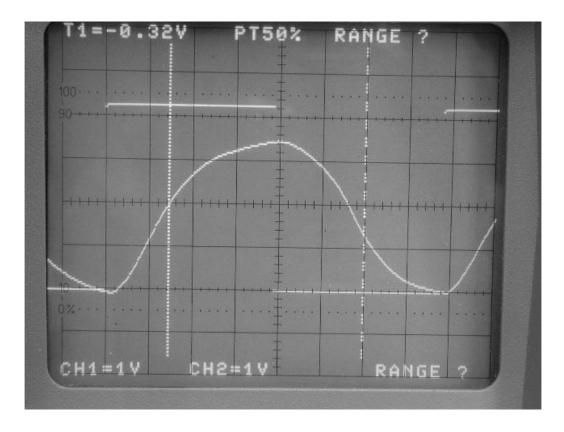


Abbildung 77: Sprungantwort 1 mit P-Element und Verstärkung 2,7

Folgende Werte haben wir hieraus errechnet:

Sprunglänge [mm]	233,5
y-Kalibrierung [V/mm]	0,0156
x-Kalibrierung [s/mm]	0,0033

	Länge in mm	Zeit in s
Totzeit	12,1	0,040
10% Höhe	-	-
50% Höhe	-	-
90% Höhe	-	-
100% Höhe	-	-
	Länge in mm	Δ U in V
10 % Höhe	-	-
50 % Höhe	-	-
90 % Höhe	-	-
100 % Höhe	-	-
Überschwingweite	-	-
Unterschwingweite	-	-
Sprunghöhe	257,1	4,0

Hier haben wir es mit einer sich exponentiell an die Sprungfunktion nähernden Kurve zu tun. Wir konnten daher keinen Gleichgewichtswert feststellen und somit dann auch die anderen Werte nicht errechnen. Hierbei scheint es sich um das Verhalten eines PT_1 -Elementes zu handeln.

Sprungantwort 4

Für die vierte Schaltung mit einem P-Element stellten wir folgende Werte ein:

Widerstand in k Ω	27
Frequenz in Hz	1,3
Max. Spanning in V	0,5

Die Sprungantwort sah dann folgendermaßen aus:

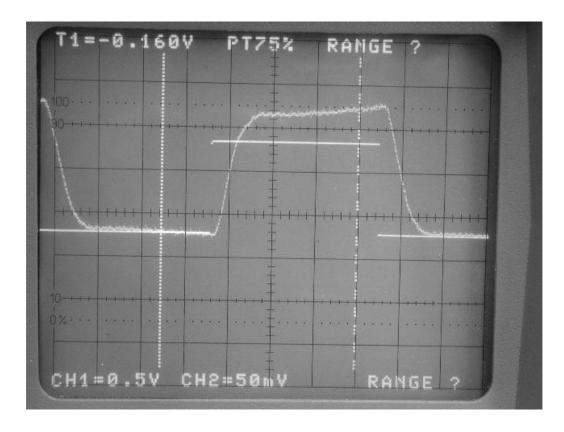


Abbildung 78: Sprungantwort 2 mit P-Element und Verstärkung 2,7

Folgende Werte haben wir hieraus errechnet:

Sprunglänge [mm]	233,0
y-Kalibrierung [V/mm] Kanal 1	0,0078
y-Kalibrierung [V/mm] Kanal 2	0,0008
x-Kalibrierung [s/mm]	0,0033

	Länge in mm	Zeit in s
Totzeit	8,2	0,027
10% Höhe	13,8	0,046
50% Höhe	34,1	0,113
90% Höhe	49,1	0,162
100% Höhe	75,6	0,250
	Länge in mm	Δ U in V
10 % Höhe	16,6	0,013
50 % Höhe	83,2	0,065
90 % Höhe	149,8	0,117
100 % Höhe	166,4	0,130
Überschwingweite	14,3	0,011
Unterschwingweite	0	0
Sprunghöhe	127,9	1,00

Zu Beachten ist hier die unterschiedliche Einstellung von Kanal 1 (Sprungfunktion) und Kanal 2 (Sprungantwortfunktion), weshalb wir 2 verschiedene y-Kalibrierungen haben. Die 100 % -Marke wurde hier an dem Punkt festgelegt, wo die Kurve in die Waagrechte übergeht. Das Überschwingen findet dann erst einige Zeit später statt. Der Verlauf, der trotz gleicher Schaltung völlig anders aussieht, als bei dem vorigen Diagramm, deutet auf einen kleinen Integralanteil hin. Wichtig ist auch noch, daß die Sprungantwort bei weitem nicht den Wert des Sollfunktion erreicht.

Sprungantwort 5

Für die fünfte Schaltung mit einem P-Element stellten wir folgende Werte ein:

Widerstand in k Ω	100
Frequenz in Hz	1,3
Max. Spanning in V	2,00

Die Sprungantwort sah dann folgendermaßen aus:

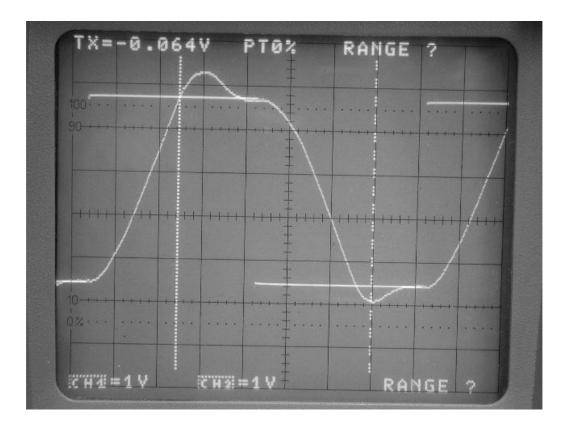


Abbildung 79: Sprungantwort 1 mit P-Element und Verstärkung 10

Folgende Werte haben wir hieraus errechnet:

Sprunglänge [mm]	232,8
y-Kalibrierung [V/mm]	0,0154
x-Kalibrierung [s/mm]	0,0033

	Länge in mm	Zeit in s
Totzeit	6,6	0,022
10% Höhe	31,7	0,105
50% Höhe	78,5	0,259
90% Höhe	116,2	0,384
100% Höhe	120,4	0,398
	Länge in mm	Δ U in V
10 % Höhe	25,9	0,400
50 % Höhe	129,6	2,000
90 % Höhe	233,3	3,600
100 % Höhe	259,2	4,000
Überschwingweite	35,1	0,542
Unterschwingweite	4,2	0,065
Sprunghöhe	259,2	4,000

Als Referenz für die %-Werte wurde der Wert der Sprungfunktion genommen. Dieser wird als 100 % gesetzt. Im Gegensatz zu dem vorigen Diagramm, zeigt dieses wieder das verhalten eines PT_2 -Elements, das auch wieder Überschwingt. Warum dies bei der Verstärkung von 2,7 im Gegensatz zu den beiden anderen nicht so ist, konnten wir uns nicht erklären.

Sprungantwort 6

Für die sechste Schaltung mit einem P-Element stellten wir folgende Werte ein:

Widerstand in k Ω	100
Frequenz in Hz	1,3
Max. Spanning in V	0,2

Die Sprungantwort sah dann folgendermaßen aus:

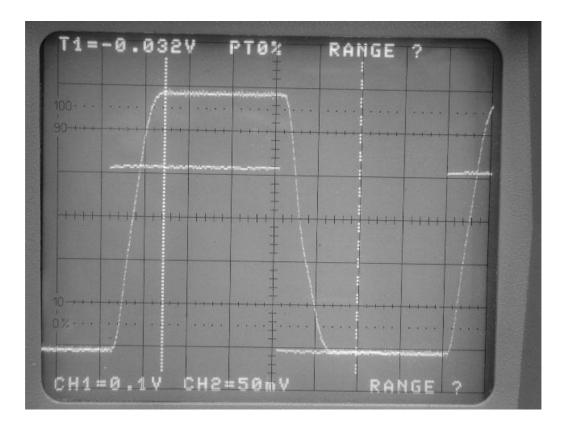


Abbildung 80: Sprungantwort 2 mit P-Element und Verstärkung 10

Folgende Werte haben wir hieraus errechnet:

Sprunglänge [mm]	232,5
y-Kalibrierung [V/mm] Kanal 1	0,0016
y-Kalibrierung [V/mm] Kanal 2	0,0008
x-Kalibrierung [s/mm]	0,0033

	Länge in mm	Zeit in s
Totzeit	5,2	0,017
10% Höhe	14,3	0,047
50% Höhe	31,0	0,103
90% Höhe	54,0	0,179
100% Höhe	76,3	0,252
	Länge in mm	Δ U in V
10 % Höhe	36	0,028
50 % Höhe	180	0,141
90 % Höhe	324	0,254
100 % Höhe	360	0,282
Überschwingweite	0	0
Unterschwingweite	0	0
Sprunghöhe	255	0,4

Zu Beachten ist hier die unterschiedliche Einstellung von Kanal 1 (Sprungfunktion) und Kanal 2 (Sprungantwortfunktion), weshalb wir 2 verschiedene y-Kalibrierungen haben. Die 100 % -Marke wurde hier an dem Punkt festgelegt, wo die Kurve in die Waagrechte übergeht. Auch hier ist wohl wegen der geringen Spannung kein Überschwingen möglich. Auch der große Abstand zur Sollspannung läßt sich so erklären.

Sprungantwort 7

Für die siebte Schaltung mit einem P-Element stellten wir folgende Werte ein:

Widerstand in k Ω	220
Frequenz in Hz	1,3
Max. Spanning in V	2,0

Die Sprungantwort sah dann folgendermaßen aus:

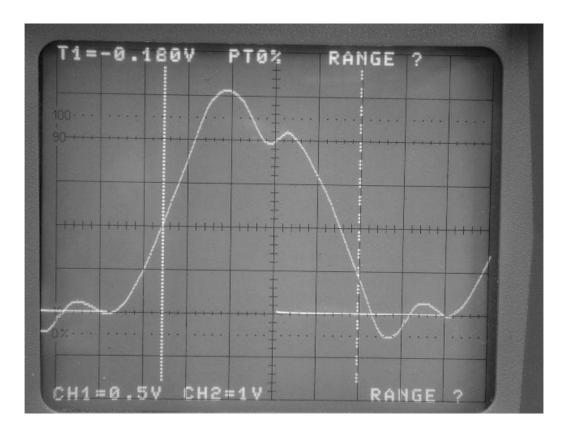


Abbildung 81: Sprungantwort 1 mit P-Element und Verstärkung 22

Folgende Werte haben wir hieraus errechnet:

Sprunglänge [mm]	230,8
y-Kalibrierung [V/mm]	0,0151
x-Kalibrierung [s/mm]	0,0033

	Länge in mm	Zeit in s
Totzeit	6,4	0,021
10% Höhe	32,2	0,107
50% Höhe	79,5	0,265
90% Höhe	118,0	0,393
100% Höhe	135,1	0,450
	Länge in mm	Δ U in V
10 % Höhe	26,4	0,400
50 % Höhe	132,1	2,001
90 % Höhe	237,7	3,600
100 % Höhe	264,1	4,000
Überschwingweite	45,3	0,686
Unterschwingweite	28,2	0,427
Sprunghöhe	264,1	4,000

Bei diesem Diagramm ist uns ein schwerwiegender Fehler unterlaufen. Wir hatten das Oszilloskop leider nicht so eingestellt, daß die Sprungfunktion auf dem Schirm zu sehen war. Deshalb haben wir die Sprunghöhe für die Kalibrierung aus einem anderen Bild mit den selben Einstellungen übernommen. Dieses Diagramm zeigt sehr ausgeprägtes PT_2 -Verhalten.

$3\quad VERSUCHSAUSWERTUNG$

Sprungantwort 8

Für die achte Schaltung mit einem P-Element stellten wir folgende Werte ein:

Widerstand in k Ω	220
Frequenz in Hz	1,3
Max. Spanning in V	0,2

Die Sprungantwort sah dann folgendermaßen aus:

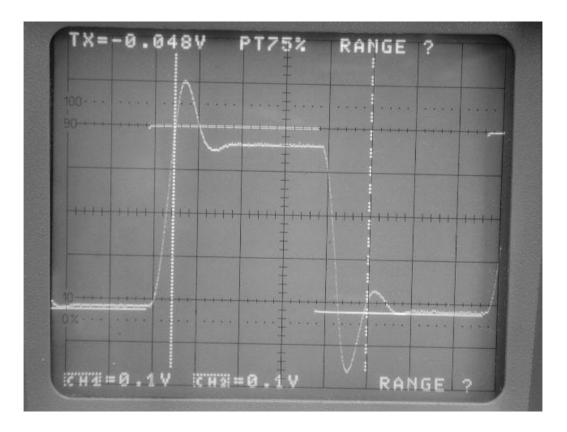


Abbildung 82: Sprungantwort 2 mit P-Element und Verstärkung 22

Folgende Werte haben wir hieraus errechnet:

Sprunglänge [mm]	234,4
y-Kalibrierung [V/mm]	0,0016
x-Kalibrierung [s/mm]	0,0033

	Länge in mm	Zeit in s
Totzeit	4,7	0,015
10% Höhe	12,1	0,040
50% Höhe	24,0	0,079
90% Höhe	33,6	0,110
100% Höhe	34,4	0,113
	Länge in mm	Δ U in V
10 % Höhe	25,6	0,040
50 % Höhe	128,1	0,200
90 % Höhe	230,5	0,360
100 % Höhe	256,1	0,400
Überschwingweite	61,7	0,096
Unterschwingweite	33	0,052
Sprunghöhe	256,1	0,400

Hier haben wir die Höhe der Sprungfunktion als 100 % -Wert genommen. Dieses Diagramm ist das einzige, bei dem ein Überschwingen für die kleinere Spannung zu sehen ist bzw. ein ähnliches Verhalten für die Sprungfunktion mit großer und mit kleiner Spannung zu sehen ist. Hier bestätigt sich dann in beiden Fällen das verhalten eines PT_2 -Elements.

Sprungantwort 9

Für die erste Schaltung mit einem PI-Element stellten wir folgende Werte ein:

Widerstand in k Ω	27
Kapazität in μF	4,7
Frequenz in Hz	1,3
Max. Spanning in V	2,0

Die Sprungantwort sah dann folgendermaßen aus:

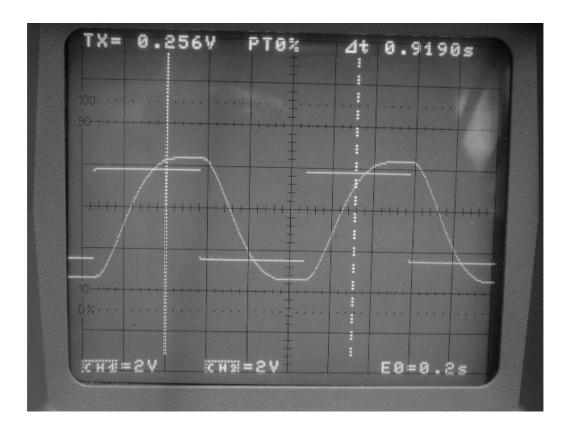


Abbildung 83: Sprungantwort 1 mit PI-Element

Folgende Werte haben wir hieraus errechnet:

Sprunglänge [mm]	147,3
y-Kalibrierung [V/mm]	0,0320
x-Kalibrierung [s/mm]	0,0052

	Länge in mm	Zeit in s
Totzeit	3,2	0,017
	Länge in mm	Δ U in V
100 % Höhe	168,9	5,405
Sprunghöhe	125	4,000

Da das PI-Element nicht mit den anderen vergleichbar ist, haben wir hier nur die Werte für die Totzeit und die maximale Sprungantwort bestimmt. Bemerkenswert ist, daß die Sprungantwort um 35 % höher ist, als das Sprungsignal. Dies ist um ein vielfaches höher, als beim reinen P-Element, wo das Antwortsignal meist weit unterhalb des Sprungsignals lag.

Sprungantwort 10

Für die zweite Schaltung mit einem PI-Element stellten wir folgende Werte ein:

Widerstand in k Ω	10
Kapazität in μF	0,98
Frequenz in Hz	1,3
Max. Spanning in V	2,0

Die Sprungantwort sah dann folgendermaßen aus:

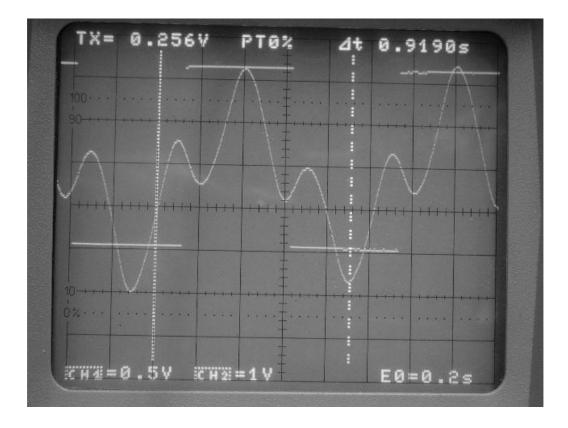


Abbildung 84: Sprungantwort 2 mit PI-Element

Die Sprungantwortfunktion schwingt, allerdings nicht einmal um den Soll-Wert, sondern um die 0 Linie. Dies allerdings mit einer bemerkenswerten Symmetrie. Angesichts der Tatsache, daß an der Kurve nicht einmal der Einfluß der Sprungfunktion bei deren Vorzeichenwechsel zu sehen ist, haben wir hier von einer weiteren Auswertung abgesehen und wollen dies nur als Beispiel angeführt haben.

3.5.2 Digitale Schaltungen

Bei der Digitalen Schaltung nahm, wie schon in der Versuchsbeschreibung erwähnt, der PC die Daten auf. Zur Auswertung nahmen wir nun eine Sprungantwort aus den Daten heraus.

Sprungantwort 1

Für die erste digitale Sprungantwort hatten wir folgende Einstellungen:

Proportionalanteil	1,0
Upper Limit	10,0
Lower Limit	-10,0

Es ergab sich folgendes Diagramm:

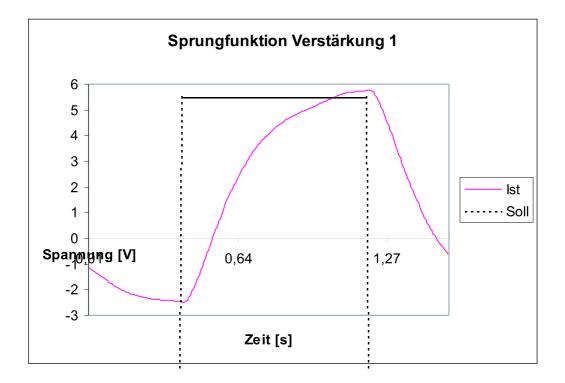


Abbildung 85: Sprungantwort 1 mit digitaler Regelung

Die Daten liefern folgende Werte:

	Zeit in s
Totzeit	0,025
10% Höhe	0,063
50% Höhe	0,203
90% Höhe	0,513
100% Höhe	0,804
	Δ U in V
100 % Höhe	8,223
10 % Höhe	0,801
50 % Höhe	4,185
90 % Höhe	7,403
Überschwingweite	0
Unterschwingweite	0
Sprunghöhe	11

In diesem Diagramm zeigt sich ein stetig ansteigender Verlauf, der auf einen Integralanteil hindeutet. Im Vergleich mit der analogen Schaltung zeigt sich kein sehr ähnlicher Verlauf.

Sprungantwort 2

Für die zweite digitale Sprungantwort hatten wir folgende Einstellungen:

Proportionalanteil	2,7
Upper Limit	10,0
Lower Limit	-10,0

Es ergab sich folgendes Diagramm:

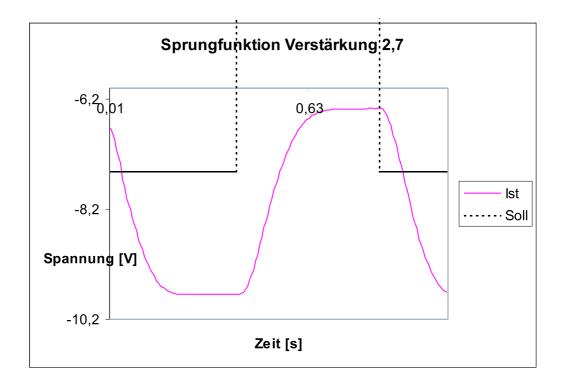


Abbildung 86: Sprungantwort 2 mit digitaler Regelung

Die Daten liefern folgende Werte:

	Zeit in s
Totzeit	0,025
10% Höhe	0,044
50% Höhe	0,106
90% Höhe	0,193
100% Höhe	0,318
	Δ U in V
100 % Höhe	3,364
10 % Höhe	0,351
50 % Höhe	1,719
90 % Höhe	3,022
Überschwingweite	0
Unterschwingweite	0
Sprunghöhe	15

In diesem und den anderen Diagrammen konnte leider die Sprungfunktion nicht ganz dargestellt werden, um die Sprungantwortfunktion besser darzustellen. An der senkrechten gestrichelten Linie läßt sich aber erkennen, wann die Sprungfunktion ihren Vorzeichenwechsel hat. Bei dieser Einstellung ist die Antwortfunktion schon sehr viel kleiner als die Sprungfunktion. Hier sieht die Sprungantwort ähnlich der analogen Sprungantwort aus.

Sprungantwort 3

Für die dritte digitale Sprungantwort hatten wir folgende Einstellungen:

Proportionalanteil	10,0
Upper Limit	10,0
Lower Limit	-10,0

Es ergab sich folgendes Diagramm:

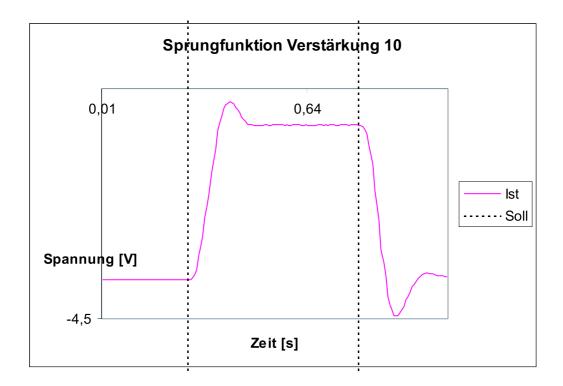


Abbildung 87: Sprungantwort 3 mit digitaler Regelung

Die Daten liefern folgende Werte:

	Zeit in s
Totzeit	0,006
10% Höhe	0,025
50% Höhe	0,063
90% Höhe	0,082
100% Höhe	0,095
	Δ U in V
100 % Höhe	1,025
10 % Höhe	0,068
50 % Höhe	0,547
90 % Höhe	0,850
Überschwingweite	0,137
Unterschwingweite	0
Sprunghöhe	20

Eine Ähnlichkeit mit den analogen Werten ist nicht zu erkennen. Hier wurde als 100~% ein Mittelwert der nur leicht abfallenden Strecke nach dem peak genommen.

Sprungantwort 4

Für die vierte digitale Sprungantwort hatten wir folgende Einstellungen:

Proportionalanteil	22,0
Upper Limit	10,0
Lower Limit	-10,0

Es ergab sich folgendes Diagramm:

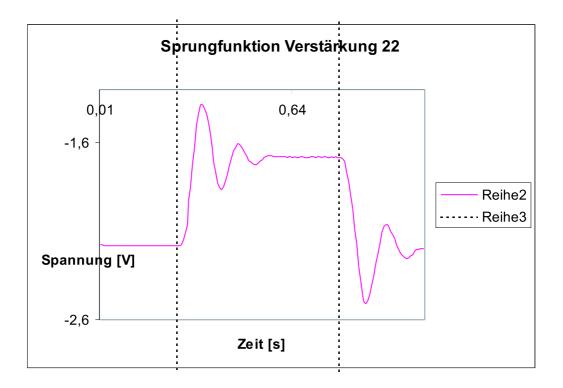


Abbildung 88: Sprungantwort 4 mit digitaler Regelung

Die Daten liefern folgende Werte:

	Zeit in s
Totzeit	0,013
10% Höhe	0,025
50% Höhe	0,038
90% Höhe	0,050
100% Höhe	0,057
	Δ U in V
100 % Höhe	0,557
10 % Höhe	0,074
50 % Höhe	0,254
90 % Höhe	0,464
Überschwingweite	0,239
Unterschwingweite	-0,239
Überschwingweite	0,020
Unterschwingweite	-0,098
Sprunghöhe	20

In diesem Diagramm fängt die Wagen zu Schwingen an. Allerdings regelt sich der Wert noch an. Allerdings ist das Signal, im Vergleich zum Ausgangssignal extrem klein. Eine Ähnlichkeit mit den analogen Werten ist nicht zu erkennen.

Sprungantwort 5

Für die fünfte digitale Sprungantwort hatten wir folgende Einstellungen:

Proportionalanteil	10,0
Integralanteil	20,0
Upper Limit	10,0
Lower Limit	-10,0

Es ergab sich folgendes Diagramm:

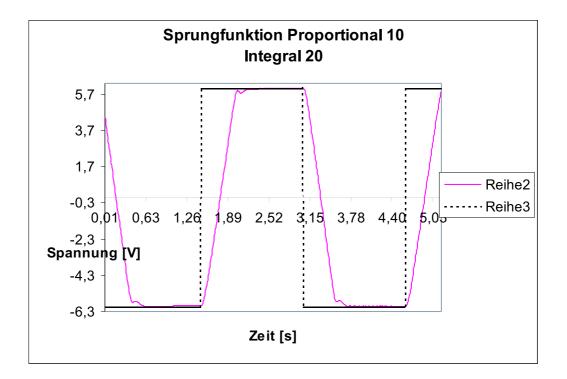


Abbildung 89: Sprungantwort 5 mit digitaler Regelung

In diesem Diagramm zeigt sich der Sinn des Integralanteiles. Beim reinen Proprotionalanteil 10 ist die Sprungantwort bedeutend kleiner als die Sprungfunktion. Hier geht die Sprungantwort aber exakt auf den Werte der Sprungfunktion.

Sprungantwort 6

Für die sechste digitale Sprungantwort hatten wir folgende Einstellungen:

Proportionalanteil	20,0
Integralanteil	40,0
Upper Limit	10,0
Lower Limit	-10,0

Es ergab sich folgendes Diagramm:

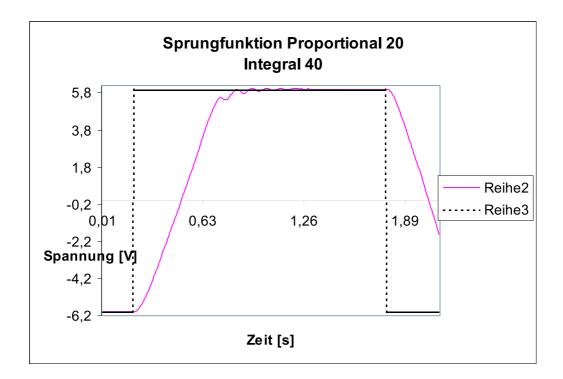


Abbildung 90: Sprungantwort 6 mit digitaler Regelung

In diesem Diagramm sieht man eine ganz gute Regelung, die nur kurz um die Sprungfunktion osziliert um dann direkt auf diesen Wert zu gehen.

3.6 Umprogrammieren der Applikation

Wie bereits in der Veruchsbeschreibung erwähnt war es unsere Aufgabe, die Applikation des Frequenzgenerators derart umzugestalten, daß beliebige Eingangsspannungsverläufe eingegeben werden konnten. Diese gestellte Aufgabe konnten wir nach einer gewissen Einarbeitungsphase lösen.

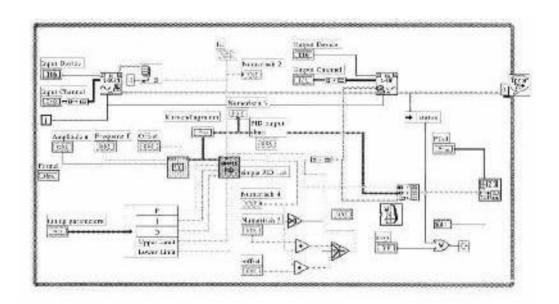


Abbildung 91: Schematische Darstellung der modifizierten Applikation

Im Anschluß suchten wir nach Funktionen, welche eine optimale Regelung des Wagens erlaubten. Dabei wollten wir eine Funktion generieren, die zunächst einen sehr hohen Peak aufweist, so daß die Ausgangsspannung möglichst schnell auf ein hohes Niveau katapultiert wird. Anschließend sollte die Eingangsspannung in einen stationären Wert übergehen.

Nach mehreren Experimenten erhielten wir relativ gute Ergebnisse für folgende Funktion:

$$f(t) = 1 - \exp\left(\frac{-2\pi D \left(ft - \text{floor}(ft)\right)}{\sqrt{1 - D^2}}k\right) + \text{square}\left(ft + 1\right)$$
$$k = \sin\left(\arccos D + 2\pi \left(\sqrt{1 - D^2} \left(ft - \text{floor}(ft)\right)\right)\right)$$

Dabei ist D eine Dämpfungskonstante, welche variable einstellbar war. Zusätzlich könnte der gesamte Term mit einer Proportionalitätskonstante versehen werden.

LITERATUR 109

Literatur

- [1] Lutz, Wendt Taschenbuch der Regelungstechnik Verlag Harri Deutsch; 4. Auflage 2002
- [2] Bronstein, Semedjajew, Musiol, Mühlig Taschenbuch der Mathematik
 Verlag Harri Deutsch; 5. Auflage 2000
- [3] Zirpel Operationsverstärker Franzis Elektronik Fachbuch; 4 Auflage 1986
- [4] Ludwig Merz Grundkurs der Regelungstechnik 1973