

Kurzfassung

In dieser Arbeit ist die Programmierung und Regelung eines Balles im Luftstrom beschrieben. Zuerst erfolgt die Beschreibung der verwendeten Komponenten, danach die Identifikation des Übertragungsverhaltens der Regelstrecken. Anschließend werden klassische Regler nach der Pol-/Nullstellenkompensation entworfen und mit empirischen Einstellregeln verglichen. Zusätzlich erfolgt ein Vergleich zwischen stetiger und unstetiger Regler. Zur Verbesserung des Regelverhaltens wird eine Kaskadenregelstruktur aufgebaut. Außerdem wird die Programmierung deren mit einer nicht echtzeitfähigen PCI-6221 Datenerfassungskarte und dem Programm LabVIEW von National Instruments beschrieben. Als Ergebnis wird gezeigt, dass eine Regelung trotz auftretender Probleme realisiert werden kann.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	V
1 Einleitung	1
2 Versuchsaufbau	3
2.1 Lüfter	4
2.2 Ultraschallsensor	6
2.3 NI PCI-6221 (37 Pin)	8
2.4 Platine	11
2.5 Optimierung	12
3 Theoretische Grundlagen	15
3.1 PWM-Signal	15
3.2 Regelungstechnik	15
3.2.1 Steuerung	15
3.2.2 Regelung	16
3.2.3 Kaskadenregelung	17
3.2.4 Anregungsfunktion und Systemantwort	18
3.2.5 Regelstrecken	19
3.2.6 PT ₁ -Strecke	20
3.2.7 PT ₂ -Strecke	21
3.2.8 PID-Regler	22
3.2.9 Zweipunktregler	24
3.3 Echtzeit	25
3.3.1 Echtzeitbetriebssysteme	25
3.3.2 Allgemeines Betriebssystem	26
4 Identifikation der Regelstrecken	27
4.1.1 Regelstrecke des Lüfters	28
4.1.2 Regelstrecke des Balles	28
5 Reglerentwurf	32
5.1 Reglerentwurf für die PT ₁ -Strecke unter Vernachlässigung der Totzeit	32
5.2 Reglerentwurf für die PT ₂ -Strecke	33
5.3 Empirischer Reglerentwurf	35
5.4 Zweipunktregler Einstellungen	36
6 LabVIEW	38
6.1 Einlesen der Drehzahl	39
6.2 Einlesen des Abstandes	40

6.3	Erzeugung des PWM-Signals.....	40
6.4	PID-Regler als Express-VI	43
6.5	Zweipunktregler als SubVI	44
6.6	Gesamtprogramm	46
7	Ergebnisse	49
7.1	Vergleich der Lüfterregelung	49
7.2	Vergleich der Ballregelung	51
7.3	LabVIEW.....	56
7.4	Probleme.....	57
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	59
	Literatur- und Quellenverzeichnis	IV
9	Anhang.....	V
9.1	Gesamtprogramm: Frontpanel	V
9.2	Gesamtprogramm: Blockdiagramm.....	VI
9.3	Lüfter Datenblatt.....	VII
9.4	Ultraschallsensor Datenblatt.....	IX
9.5	NI-PCI-6221 (37 Pin) Datenblatt.....	XII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Versuchsaufbau.....	3
Abbildung 2: Lüfter FD1212 (Quelle: [1])	4
Abbildung 3: Anschlüsse und Lüfter-Elektronik (Quelle: [2])	4
Abbildung 4: Tachosignal	5
Abbildung 5: Ultraschallsensor HC-SR04 (Quelle: [3]).....	6
Abbildung 6: Funktionsprinzip vom HC-SR04.....	7
Abbildung 7: Aufnahme mit dem Oszilloskop des Trigger-und Echo-Signals.....	8
Abbildung 8: 37-Pin PCI-6221 Datenerfassungskarte (Quelle: [4])	9
Abbildung 9: 37-Pin-Sub-D-Anschluss der PCI-6221 Karte (Quelle: [5]).....	10
Abbildung 10: Schematische Darstellung der Platine	11
Abbildung 11: Platinen-Layout.....	12
Abbildung 12: Die verschiedenen Objekte	13
Abbildung 13: laminare-und turbulente Luftströmung (Quelle: [6])	14
Abbildung 14: Spannungszeitverlauf eines Pulsweitenmodulierten Signals mit Tastverhältnis 0,5	15
Abbildung 15: Blockschaltbild einer Steuerkette	16
Abbildung 16: Allgemeine Regelkreisstruktur	17
Abbildung 17: Grundstruktur einer Kaskadenregelung	18
Abbildung 18: Ein-und Ausgangsfunktionen einer Regelstrecke.....	18
Abbildung 19: Einheitssprung	19
Abbildung 20: Sprungantwort einer PT_1 -Strecke.....	20
Abbildung 21: Sprungantwort von schwingfähigen (grün) und nichtschwingfähigen (rot) PT_2 -Regelstrecken	22
Abbildung 22: Struktur des PID-Reglers	23
Abbildung 23: Regelkreis mit einem Zweipunktregler	24
Abbildung 24: Funktionsdarstellung des Zweipunktreglers	24
Abbildung 25: Jitter.....	26
Abbildung 26: Sprungantwort des Lüfters.....	28
Abbildung 27: Sprungantwort des Balles	29
Abbildung 28: Kenngrößen der Sprungantwort für das Wendetangentenverfahren (Quelle: [7])	29
Abbildung 29: Vorgehensweise und Entscheidungsablauf beim Wendetangentenverfahren (Quelle: [7])	30
Abbildung 30: T_u/T_g in Abhängigkeit $\alpha = T_2/T_1$ (Quelle: [7])	31
Abbildung 31: T_g/T_1 in Abhängigkeit vom Zeitkonstantenverhältnis $\alpha = T_2/T_1$, (Quelle: [7])	31

Abbildung 32: Einstellregeln nach Chien, Hrones und Reswick	35
Abbildung 33: Frontpanel	38
Abbildung 34: Blockdiagramm.....	38
Abbildung 35: Blockdiagrammausschnitt: Einlesen der Drehzahl	39
Abbildung 36: Blockdiagrammausschnitt: zum Einlesen des Abstandes.....	40
Abbildung 37: Express-VI Signal-Simulieren	41
Abbildung 38: Signal-Simulieren Konfigurationsdialogfeld	42
Abbildung 39: PID-Regler, Blockdiagramm	44
Abbildung 40: PID-Regler, Frontpanel.....	44
Abbildung 41: Zweipunktregler, Blockdiagramm.....	45
Abbildung 42: Zweipunktregler, Frontpanel	45
Abbildung 43: Blockdiagramm des gesamten Programms.....	46
Abbildung 44: Frontpanel des gesamten Programms	47
Abbildung 45: Blockdiagramm: Kaskadenregelung.....	48
Abbildung 46: Sprungantwort des geschlossenen Regelkreises des Lüfters ($K_R=0,03448$; $T_N=0,39$)	49
Abbildung 47: Sprungantwort des geschlossenen Regelkreises des Lüfters ($K_R=0,13448$; $T_N=0,39$).....	50
Abbildung 48: Sprungantwort des geschlossenen Regelkreises des Lüfters ($K_R=0,26896$; $T_N=0,39$).....	50
Abbildung 49: Sprungantwort des geschlossenen Regelkreises des Balles mit Pol-/Nullstellenkompensation	51
Abbildung 50: Einschwingvorgang der Regelgröße nach Auftreten der Störgröße mit Pol-/Nullstellenkompensation.....	52
Abbildung 51: Sprungantwort des geschlossenen Regelkreises des Balles mit Empirischen Einstellparametern	53
Abbildung 52: Einschwingvorgang der Regelgröße nach Auftreten der Störgröße mit Empirischen Einstellparametern.....	54
Abbildung 53: Regelung mit Zweipunktregler	55
Abbildung 54: Zeitlicher Verlauf der Stellgröße.....	55

Abkürzungsverzeichnis

A/D	Analog-Digital-Wandlung
AI	Analog Input
AO	Analog Output
Blockdiagramm	Programmieroberfläche in LabVIEW
D/A	Digital-Analog-Wandlung
DAQ	Data Acquisition (Datenerfassung)
Datenquelle	Anschluss, der Daten aufnimmt
Datensenke	Anschluss, der Daten liefert
DC	direct current (Gleichspannung)
DIN	Deutsch Institut für Normung
D-Regler	Differential-Regler
Frontpanel	interaktive Benutzeroberfläche in LabVIEW
G	Grafische Programmiersprache von LabVIEW
GND	Masse, 0 V Bezugspotential
I-Regler	Integral-Regler
Jitter	Abweichung von der gewünschten Zykluszeit
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
OTP	Oberer Trigger Punkt
P0,P1	Digital Input/Output
PFI	Zähler und Trigger Input
P-Regler	Proportional-Regler
Schleife	wiederholt eine Anweisung
SubVI	Unterprogramm eines anderen VIs
TTL	Transistor-Transistor-Logik
UTP	Unterer Trigger Punkt
VI	Virtuelles Instrument

1 Einleitung

Die Regelungstechnik gehört zu den wichtigsten Ingenieurwissenschaftsfächern, die sich mit der Regelung einzelner Prozesse sowie geschlossener Produktionsabläufen befasst. Durch die schnelle Verbreitung und vielseitige Anwendungsbereiche von Regelungssystemen ist erst eine zunehmende Automatisierung ermöglicht worden. Die wichtigsten zu regelnden Größen in technischen Systemen wie z.B. Druck, Temperatur, Drehzahl, Strom, Spannung, Flüssigkeits- und Höhenstand usw. können heute mit geringem Aufwand geregelt werden. Dies lässt sich durch leistungsstarke Prozessrechner realisieren.

Komplizierte Regelsysteme, welche auch in der Industrie vorhanden sind, können anhand kleiner Versuchsaufbauten nachgestellt werden. Im Rahmen eines Projekts ist ein Versuchsaufbau zur Höhenregelung im Luftstrom entstanden. Die Idee hinter diesem Projekt ist jene, dass eine praktische Übung anhand des Versuchsaufbaus den Studenten geboten werden kann. Es soll ein Programm mit LabVIEW entwickelt werden, das die Höhlenregelung des Balles ermöglicht.

Dazu ist es notwendig sich in den bestehenden Versuchsaufbau einzuarbeiten und diesen ggf. zu optimieren. Die theoretischen Grundlagen müssen hierbei näher betrachtet werden. Des Weiteren ist es nötig die Regelstrecke des Systems zu erfassen, einen passenden Regler dafür zu entwerfen und die Regelung mittels des Programms zu realisieren.

Die schriftliche Ausarbeitung ist in mehrere Kapitel gegliedert.

In **Kapitel 2** dieser Arbeit wird der Versuchsaufbau, sowie die verwendete Komponenten näher erläutert. Dadurch wird ersichtlich wie diese funktionieren und welche Optimierungen vorgenommen werden müssen. Des Weiteren werden hier die nötigen Berechnungen dargestellt.

Durch das **Kapitel 3** werden alle Grundlagen aufbereitet, welche benötigt werden, um dem weiteren Inhalt der Arbeit folgen zu können. Dazu werden allgemeine sowie in der Arbeit vorhandene Schwerpunkte näher erklärt.

In **Kapitel 4** werden Identifikationsmethoden vorgestellt, die Möglichkeiten der Regelstreckenbeschreibung sowie die Identifikation der vorhandenen Regelstrecken.

Kapitel 5 erklärt den genauen Ansatz des Reglerentwurfsverfahrens. Dazu werden die vorgenommenen Berechnungen für die Reglerentwürfe beschrieben. Außerdem wird

eine experimentelle Entwurfsmethode aufgeführt und zusätzlich der Entwurf eines unstetigen Reglers.

Das **Kapitel 6** zeigt und erläutert das Programm schrittweise. Es wird zuerst erklärt wie die benötigten Signale eingelesen werden. Dann wird die Erzeugung des PWM-Signals erläutert. Dazu wird auf die verwendeten Regler im Programm und deren Parametrierung eingegangen. Zuletzt wird das Gesamtprogramm dargestellt.

In **Kapitel 7** werden alle Ergebnisse der Arbeit dargestellt und beurteilt. Dann wird auf die Ausführung mit LabVIEW auf dem allgemeinen Betriebssystem eingegangen. Zusätzlich werden die Probleme und die Entscheidungen erläutert.

Kapitel 8 stellt die zusammenfassenden Ergebnisse dar. Im Ausblick werden Verbesserungen sowie mögliche Anknüpfpunkte beschrieben.

2 Versuchsaufbau

Das Experiment befasst sich mit der Regelung eines Balles in einem Luftstrom. Der Versuchsaufbau wird in Abbildung 1 dargestellt.

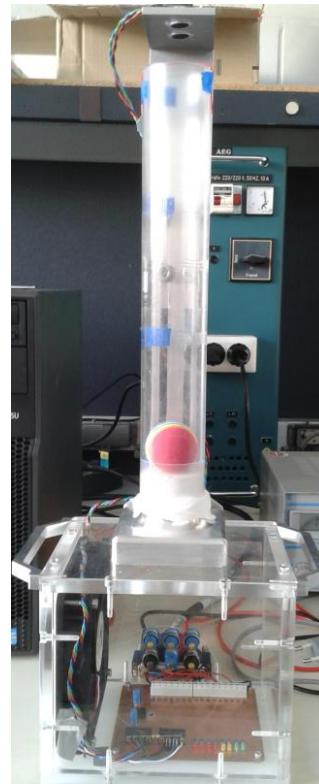


Abbildung 1: Versuchsaufbau

Der Aufbau besteht aus einem würfelförmigen Plexiglasgehäuse. Darauf ist ein senkrecht stehendes Plexiglasrohr angebracht. In diesem befindet sich ein Ball, der sich in vertikaler Richtung im Luftstrom bewegen kann. Der Durchmesser des Plexiglasrohres beträgt 45 mm, so dass ein kleinerer Ball hineinpasst. An der Seite ist ein 12 cm großer PC-Lüfter (s. Kapitel 2.1) eingebaut, der die Luft einsaugt. Der entstehende Luftstrom wird durch das Gehäuse in das Rohr geleitet und sorgt für den Auftrieb des Balles. Am oberen Ende des Rohres ist ein Ultraschallsensor (s. Kapitel 2.2) verbaut, der die aktuelle Entfernung des Balles zum Sensor misst. In dem Gehäuse befindet sich die Platine (s. Kapitel 2.4) mit den entsprechenden Anschlüssen für die Spannungsversorgung sowie zum Auslesen der Sensorik. Diese Anschlüsse sind mit einem 37-PIN D-SUB Stecker verbunden, womit die Kommunikation mit der sich im Computer befindlichen PCI¹-6221 Datenerfassungskarte von National Instrument (s. Kapitel 2.3) erfolgt.

¹ Peripheral Component Interconnect: Ist ein Bus-Standard zur Verbindung von Peripheriegeräten mit dem Chipsatz eines Prozessors

2.1 Lüfter



Abbildung 2: Lüfter FD1212 (Quelle: [1])

Die Abbildung 2 zeigt den verwendeten Lüfter für die Erzeugung des Luftstroms.

Dem Datenblatt (s. Anhang 9.3) wurden u.a. folgende technische Daten entnommen:

- Maße: 120x120x25mm
- Bürstenloser Gleichstrommotor
- Versorgungsspannung 12 V DC
- PWM-gesteuerter Lüfter

Die Abbildung 3 zeigt die 4 Pin-Anschlüsse des Lüfters und die Lüfter-Elektronik.

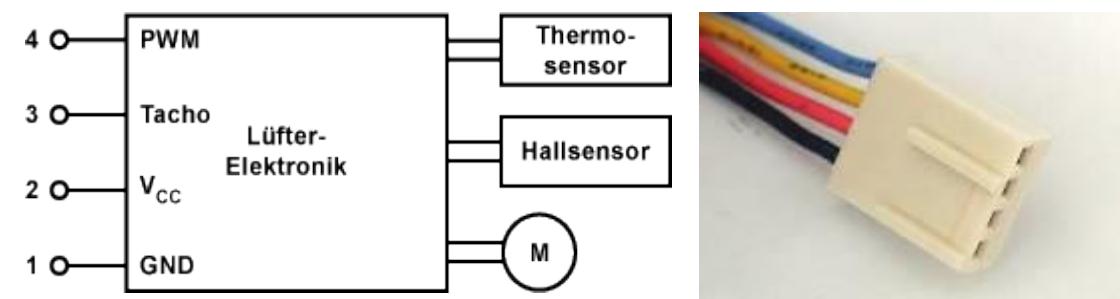


Abbildung 3: Anschlüsse und Lüfter-Elektronik (Quelle: [2])

Der Lüfter benötigt an Pin 1 und Pin 2 eine konstante Versorgungsspannung von 12 Volt DC. Die Drehzahlregelung und -steuerung des 4-Pin DC-Lüfters findet über den separaten Pin 4 statt. An diesem Pin wird das Pulsweitenmodulierte-Signal (s. Kapitel 3.1) angelegt. Das PWM-Signal dient nur noch als Stellgröße für die in dem Lüfter eingebaute Elektronik. Die Drehzahl wird über das variable Tastverhältnis eingestellt. Pin 3 liefert das integrierte Tachosignal zur kontinuierlichen Auswertung der Drehzahl. Das Tachosignal wird über einen separaten Pin ausgeführt und liefert ein drehzahlproportionales Rechtecksignal zu externen Drehzahlüberwachung des Lüftermotors. Der interne Open-Kollektor- Ausgang in dem DC-Lüfter verhält sich wie ein

Schaltausgang, der allerdings nicht definiert ist. Zur Generierung des Signals wird ein beliebiges Spannungsniveau angelegt. Der Open-Kollektor-Ausgang wird mit einem Pull-Up-Widerstand beschaltet, damit ein Spannungspotential von z.B. + 2 V ansteht. Das angeschlossene Spannungspotential wird baubedingt mit zwei Impulsen pro Umdrehung durch den Emitter auf die Masse geschaltet (s. Abbildung 4). Zur Einstellung und Haltung der Soll-Drehzahl bei der späteren Regelung, wird dieses Signal zur Drehzahlerfassung eingelesen.

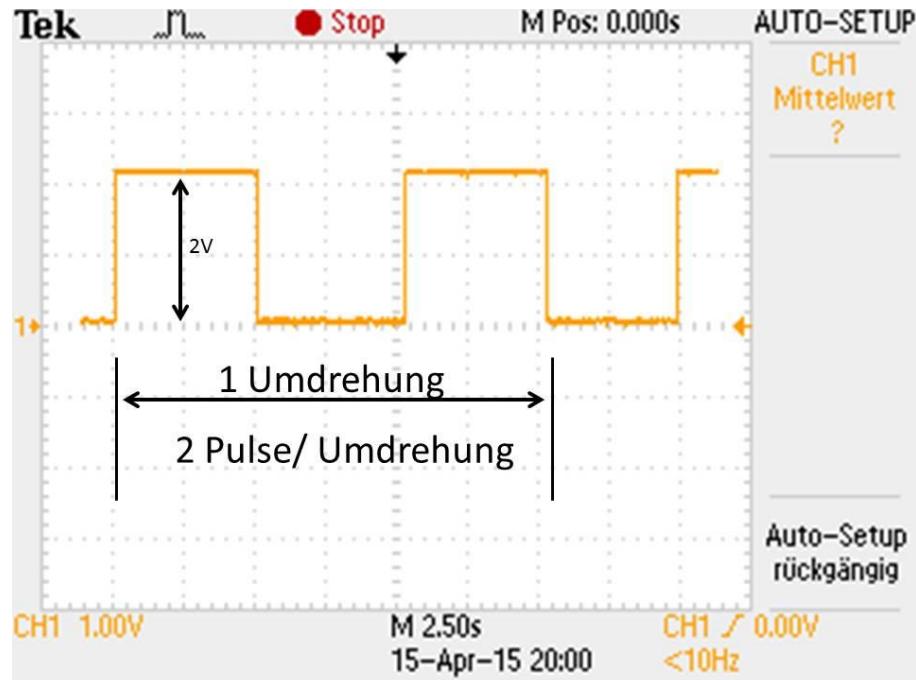


Abbildung 4: Tachosignal

Das Tachosignal wird mit der 37-Pin-Karte PCI-6221 eingelesen. Zur weiteren Bearbeitung wird dieses im Programm umgerechnet. Die Drehzahl kann über die positive Pulsbreite oder über die Frequenz bestimmt werden. Letzteres wird im weiteren Verlauf der Arbeit in LabVIEW (s. Kapitel 6.1) eingelesen. Folgende Umrechnung muss durchgeführt werden, um die Drehzahl in Umdrehungen pro Minute zu bekommen (siehe Gl. (1)):

$$D \text{ [U/min]} = \frac{f \text{ [Hz]} \cdot 60 \text{ [s/min]}}{2} \quad (1)$$

D = berechnete Drehzahl

f = gemessene Frequenz

Eine Division durch zwei muss aufgrund der zwei Impulse pro Umdrehung durchgeführt werden. Mit der Umrechnung kann nun die Regelgröße (Ist-Drehzahl) bestimmt werden.

Das PWM-Signal zum Ansteuern des Lüfters liegt im kHz-Bereich. Wegen der Trägheit des Motors und des Propellers reichen Frequenzen ab 1 kHz aus. Diese liegen aber im hörbaren Bereich des Menschen und machen sich durch ein leises Fiepen bemerkbar. Dieser Effekt wird durch die Spulen in dem Motor erzeugt und lässt sich durch Frequenzerhöhung verhindern. Das Signal wird mit 25 kHz erzeugt, da dieses nicht mehr wahrnehmbar ist.

2.2 Ultraschallsensor



Abbildung 5: Ultraschallsensor HC-SR04 (Quelle: [3])

Zur Entfernungsmessung des Balles im Plexiglasrohr wird das Ultraschallmodul HC-SR04 verwendet (s. Abbildung 5). Der Sensor misst in einem Bereich von ca. 2 cm bis 3 m mit einer Auflösung von 3 mm. Das Modul benötigt eine Versorgungsspannung von 5 V DC bei einer Stromaufnahme von < 2 mA. Zur Messung des Abstandes benötigt man ein Trigger²-Signal (Auslösesignal) mit einer fallenden Flanke (TTL-Pegel)³. Nach dem Auslösen misst das Modul eigenständig die Entfernung und wandelt diese in ein PWM-Signal um. Am Echo-Pin wird das Ausgangssignal ausgelesen. Ein Messintervall hat eine Dauer von 20 ms. Somit können 50 Messungen pro Sekunde durchgeführt werden.

² Eine Schaltung, die bei einem auslösenden Ereignis einen Impuls erzeugt.

³ Transistor-Transistor-Logik: definierte Spannungswerte z.B. logisch „0“ $\leq 0,8\text{V}$ und logisch „1“ $\geq 2\text{V}$

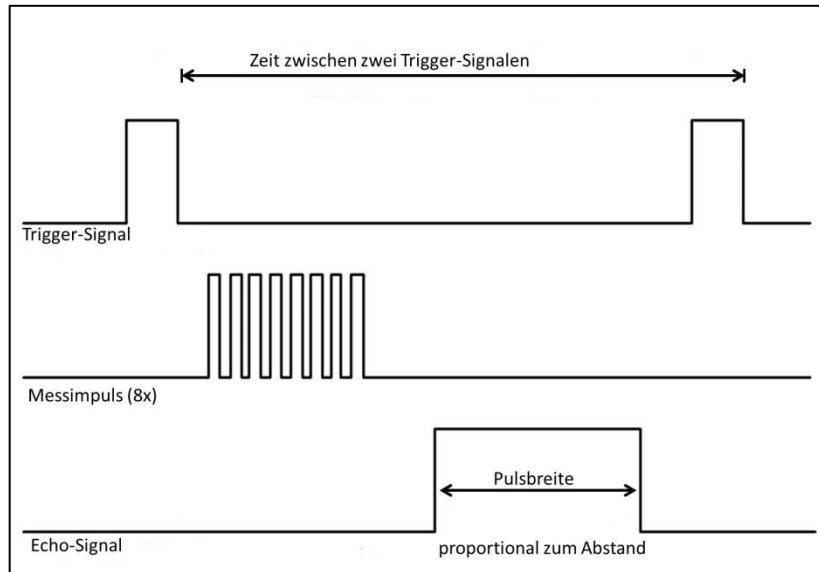


Abbildung 6: Funktionsprinzip vom HC-SR04

In Abbildung 6 ist das Messprinzip des Sensors graphisch dargestellt. Ein Messzyklus wird durch eine fallende Flanke am Trigger-Eingang gestartet. Das Trigger-Signal muss für mindestens 10 µs anstehen um den Messvorgang zu initialisieren. Daraufhin sendet das Modul nach ca. 250 µs achtmal ein 40 kHz Ultraschallsignal für die Dauer von 200 µs. Die Laufzeitdauer des Ultraschallsignals zum Ball wird genutzt, um die Entfernung zu bestimmen. Entsprechend der daraus resultierenden Entfernung des Balles wird ein High-Pegel am Echo-Pin-Ausgang gesetzt. Dieses High-Pegel-Signal mit der erzeugten Pulsbreite ist proportional zu der Entfernung des Objektes. Diese wird mit der PCI-6221 Datenerfassungskarte eingelesen und die Entfernung im Programm berechnet.

Für eine kontinuierliche Messung wird ein Rechtecksignal mit einer Frequenz ≤ 50 Hz (20 ms) am Trigger-Eingang angelegt. Bei einer Frequenz von z.B. 40 Hz beträgt das Intervall 25 ms, welches 40 Messungen in der Sekunde entspricht.

Als Ultraschall wird der Schall im Frequenzbereich zwischen 16 kHz und 1 GHz bezeichnet. Die Schallgeschwindigkeit C_{Luft} ist temperaturabhängig und kann näherungsweise im Bereich von -20°C bis +40°C mit folgender Gleichung berechnet werden:

$$C_{Luft} [\text{m/s}] \approx (331,5 + \frac{0,6 \cdot \vartheta}{^{\circ}\text{C}}) \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (2)$$

C_{Luft} = berechnete Schallgeschwindigkeit

335,5 m/s = Schallgeschwindigkeit bei 0°C

0,6 = Temperaturkoeffizient

ϑ = Umgebungstemperatur in °C

Bei einer Raumtemperatur von 20°C ergibt sich also eine Schallgeschwindigkeit von 343,5 m/s. Dieser Wert wird im weiteren Projekt unabhängig von der Temperaturänderung als konstant und ohne Fehler angenommen.

Mit der Schallgeschwindigkeit und der gemessenen Pulsbreite wird nun die Entfernung mit folgender Gleichung berechnet:

$$s[m] = \frac{t[s] \cdot C_{Luft}[\text{m/s}]}{2} \quad (3)$$

s = berechnete Strecke

t = gemessene Pulsbreite

C_{Luft} = konstante Schallgeschwindigkeit

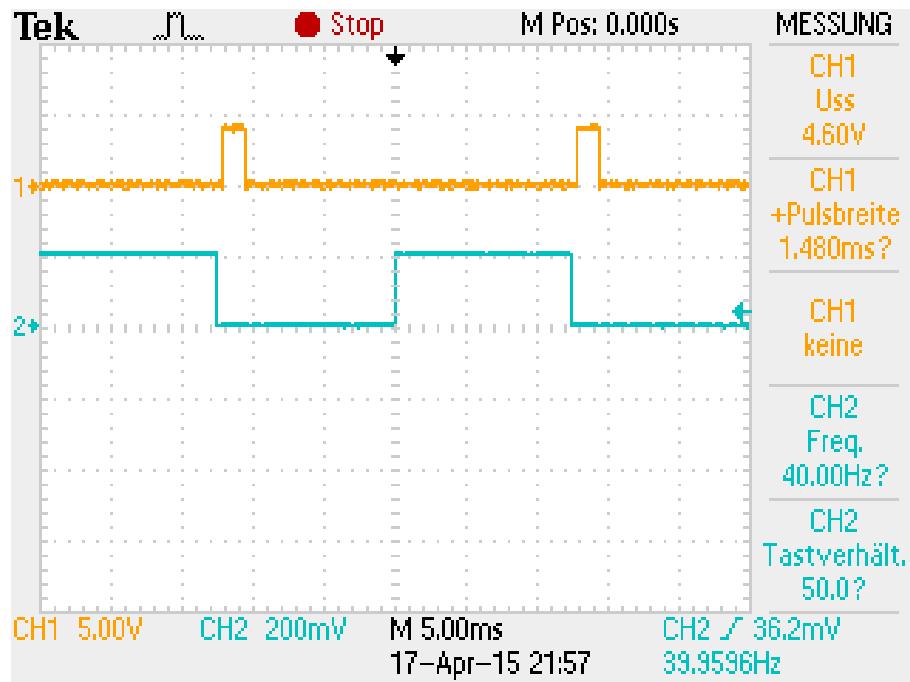


Abbildung 7: Aufnahme mit dem Oszilloskop des Trigger-und Echo-Signals

Die Abbildung 7 stellt das zuvor theoretisch betrachtete Messprinzip mit einem Oszilloskop graphisch dar. Das Echo-Signal ist in orange und das Trigger-Signal in grün dargestellt.

2.3 NI PCI-6221 (37 Pin)

Die Datenerfassungskarte PCI-6221 mit 37 Pins von National Instrument ist eine PC-Karte für den PCI-Steckplatz des Computers. Mit dieser ist es möglich mit elektrischen

Komponenten außerhalb des Computers zu interagieren. Es können analoge sowie digitale Signale eingelesen bzw. geschrieben werden. Mit der Software LabVIEW (s. Kapitel 6) ist eine schnelle Erfassung, Analyse und Darstellung der Daten möglich.



Abbildung 8: 37-Pin PCI-6221 Datenerfassungskarte (Quelle: [4])

Abbildung 8 zeigt die verwendete PCI-6221 Datenerfassungskarte.

Dem Datenblatt (s. Anhang 9.5) wurden u.a. folgende technische Daten entnommen:

- 16 analoge Eingänge mit je 16-Bit Auflösung und 250 kS/s Abtastrate. Mit diesen Eingängen werden analoge Eingangssignale über einen A/D-Wandler in den Computer eingelesen. Die 16-Bit Auflösung kann gleichmäßig auf eines der Spannungsintervalle (± 10 , ± 5 , ± 1 , $\pm 0,2$) V genutzt werden.
- 2 analoge Ausgänge mit 16-Bit Auflösung und 833 kS/s Änderungsrate. Über diese Ausgänge können digital erzeugte Signale über einen D/A-Wandler als analoge Signale ausgegeben werden. Die 16-Bit Auflösung ist nur auf das Spannungsintervall ± 10 V anwendbar.
- 10 Digital-I/O-Kanäle mit 32-Bit Auflösung und 1 MHz Taktfrequenz. Der Low-Pegel beträgt 0,8 V und der High-Pegel 5,25 V

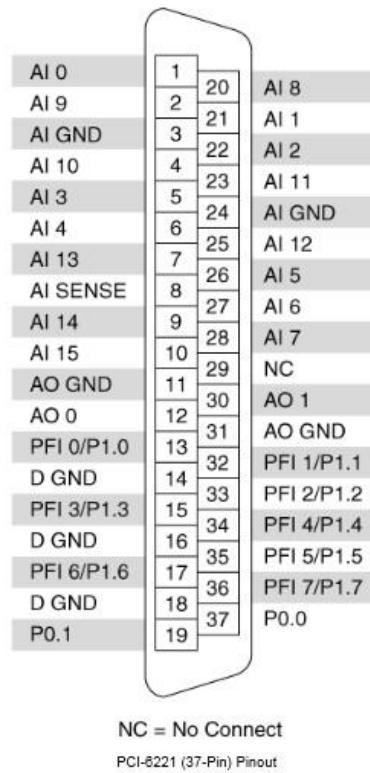


Abbildung 9: 37-Pin-Sub-D-Anschluss der PCI-6221 Karte (Quelle: [5])

Die Abbildung 9 zeigt die Anschluss-Pin-Belegung am 37-Pin-Sub-D-Anschluss der Karte. Die Pinbelegung ist wie folgt:

- AO 0: Wird verwendet, um das Trigger-Signal für das Ultraschallmodul zu erzeugen
- AO 1: Wird verwendet, um das PWM-Signal für den Lüfter zu erzeugen
- PFI 1: Wird verwendet, um das Echo-Signal des Ultraschall-Messmodules einzulesen
- PFI 4: Wird verwendet um das Tacho-Signal des Lüfters einzulesen
- P1.0: Diode 0
- P1.2: Diode 1
- P1.3: Diode 2
- P1.5: Diode 3
- P1.6: Diode 4
- P1.7: Diode 5

Die anderen Pin-Anschlüsse wurden in dieser Arbeit nicht verwendet.

2.4 Platine

Auf der Platine (s. Abbildung 10) sind die Verbindungsanschlüsse für den Ultraschallsensor (JP1) und der Anschluss für den Lüfter (JP2) dargestellt. In der Mitte der schematischen Darstellung erkennt man die Spannungsstabilisierung mit dem linearen Festspannungsregler 7805. Die eingangsseitigen Kondensatoren C1, C3 (12 V gegen GND⁴), sowie ausgangsseitigen C2 und C4 (5 V gegen GND) glätten allesamt die Spannung und sorgen so für eine störungsfreie, konstante Gleichspannung von 5 V. Diese Spannung versorgt den Ultraschallsensor und sorgt für das Spannungsniveau des Tachosignals. Des Weiteren sind acht LEDs zur freien Verfügung verbaut worden.

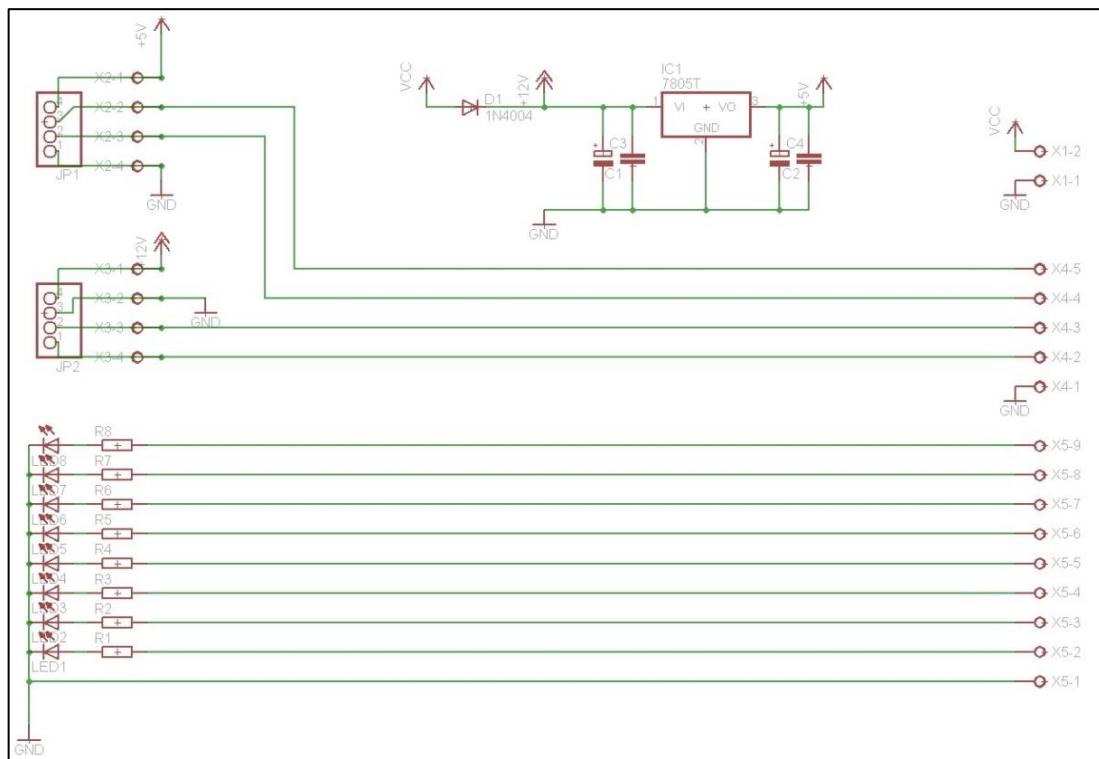


Abbildung 10: Schematische Darstellung der Platine

⁴ Als Masse (engl. chassis ground, abgekürzt GND) wird der 0 Volt Bezugspotentialpunkt bezeichnet.

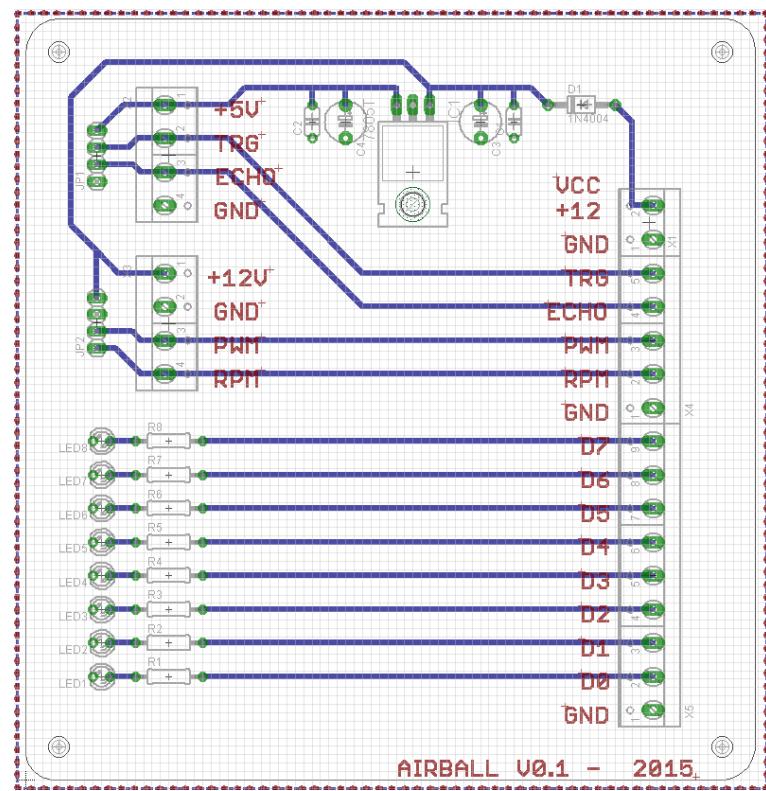


Abbildung 11: Platinen-Layout

Zum Platinenentwurf wurde das Programm Eagle verwendet. Eagle ist eine Software zum Design von Platten.

Die Software besteht aus einem Schaltplan-Editor und einem Layout-Editor. Mit dem Schaltplan-Editor wird schematisch der Schaltplan gezeichnet. Im Layout-Editor werden die Leiterbahnen sowie die einzelnen Komponenten für die Plattenfertigung entworfen. In Abbildung 11 ist das Platinenlayout dargestellt.

2.5 Optimierung

Zu Beginn des Projektes war das Objekt nicht stabil im Luftstrom.

Der Hintergrund ist, dass der Ball im Plexiglasrohr in einer fast konstanten Höhe schwebt, wenn die Luftwiderstandskraft, die auf diesen wirkt, genau so groß ist wie die Gewichtskraft. Die Luftwiderstandskraft ist unter anderem abhängig von der Form der Balloberfläche, sowie von der Geschwindigkeit der anströmenden Luft. Das Objekt bleibt stabil, wenn dieses gleichmäßig vom Luftstrom umströmt wird. Je näher er am Objekt vorbei strömt, desto schneller wir der Luftstrom. Dabei entsteht um das Objekt ein Druckunterschied, der dieses im Luftstrom hält. Wenn das Objekt anfängt zu

rotieren, verändert es die Strömungsgeschwindigkeit um dieses Objekt im Luftstrom. Diese asymmetrische Umströmung wirkt sich negativ auf die Stabilität aus.

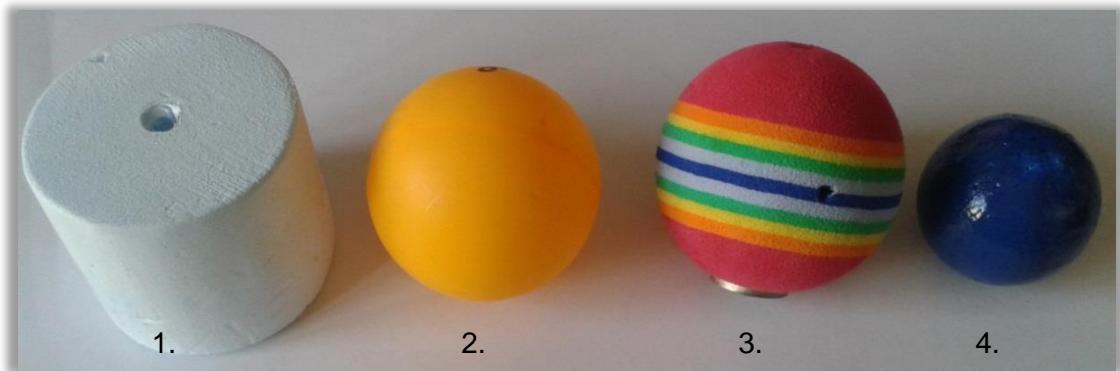


Abbildung 12: Die verschiedenen Objekte

Die Abbildung 12 zeigt die verschiedenen Objekte, die auf Stabilität im Luftstrom getestet wurden. Das stabilste Verhalten zeigte Objekt Nummer 3 aufgrund seiner gleichmäßigen Oberfläche und wurde für die regelungstechnische Anwendung ausgewählt. Dieser Ball wurde mittig mit einer Schraube beschwert um eine höhere Gewichtskraft zu erzielen. Dadurch ist eine höhere Geschwindigkeit des Luftstromes nötig, welche dazu führt, dass der Ball stabil bleibt. Der veränderte Schwerpunkt unterdrückt zusätzlich die Rotation des Balles und verhindert die asymmetrische Umströmung.

Die eingesaugte Luft wird im Gehäuse verwirbelt, so dass diese nicht turbulenzfrei und ohne konstante Strömungsgeschwindigkeit in das Rohr geleitet wird (s. Abbildung 13). Durch die sich ständig ändernde Luftströmung und die daraus resultierenden Druckunterschiede ist eine nahezu stabile Höhe des Balles nicht zu realisieren. Zur Optimierung wurde ein Stoff zwischen dem Gehäuse und dem Plexiglasrohr eingebaut, um eine laminare Strömung zu erzielen. Dazu wurden verschiedene Stoffe mit unterschiedlichen Strukturen getestet.

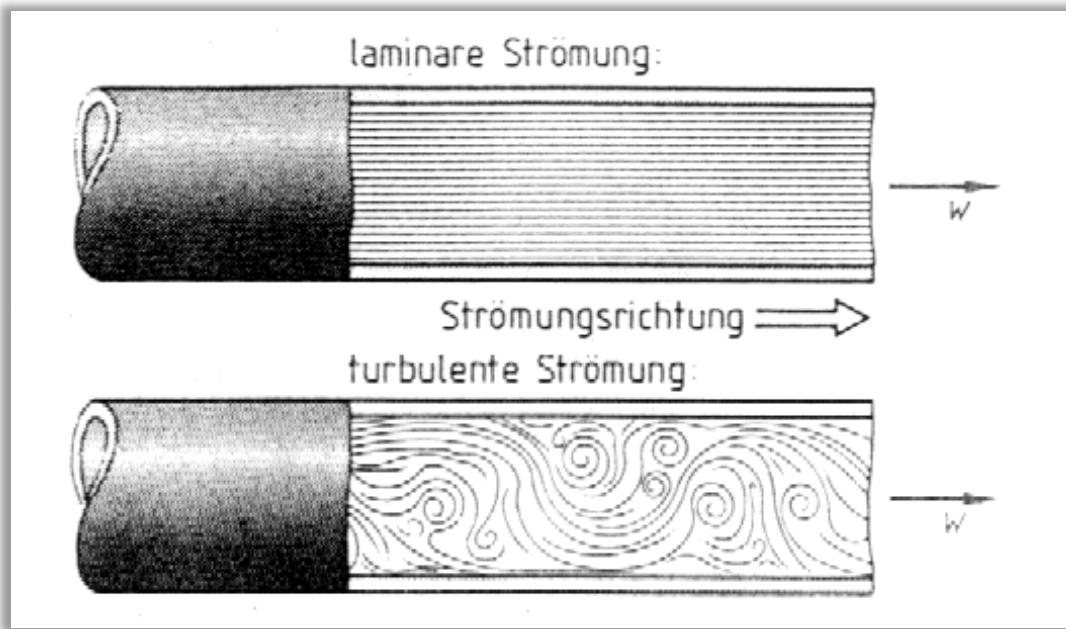


Abbildung 13: laminare-und turbulente Luftströmung (Quelle: [6])

Des Weiteren wurden diverse Verdrahtungsfehler sowie ein Lötfehler auf der Unterseite der Platine beseitigt. Die Fehler führten dazu, dass die Verbindungsanschlüsse nicht genutzt werden konnten. Die Pin-Belegung wurde überarbeitet und ein Pull-Up-Widerstand hinzugefügt, so dass die Drehzahl über einen Zähler eingelesen werden konnte. Außerdem wurden die Sensorleitungen außerhalb des Rohres verlegt, damit der Luftstrom durch diese nicht beeinflusst wird. Die freien digitalen Eingänge wurden mit den bereits vorhandenen LEDs verbunden.

3 Theoretische Grundlagen

3.1 PWM-Signal

Der Begriff PWM steht für Puls-Weiten-Modulation (engl. pulse-width-modulation). Das PWM-Signal ist ein Rechtecksignal mit konstanter Frequenz, bei der eine technische Größe (elektrische Spannung) zwischen zwei verschiedenen Spannungspegeln oszilliert. Dabei wird das Verhältnis zwischen Ein- und Ausschaltzeit zur Gesamtperiodendauer bei konstanter Frequenz variiert. Das Verhältnis zwischen der Einschaltzeit t_{ein} und der Periodendauer T ($T = t_{ein} + t_{aus}$) wird als Tastverhältnis (engl. Duty Cycle) bezeichnet.

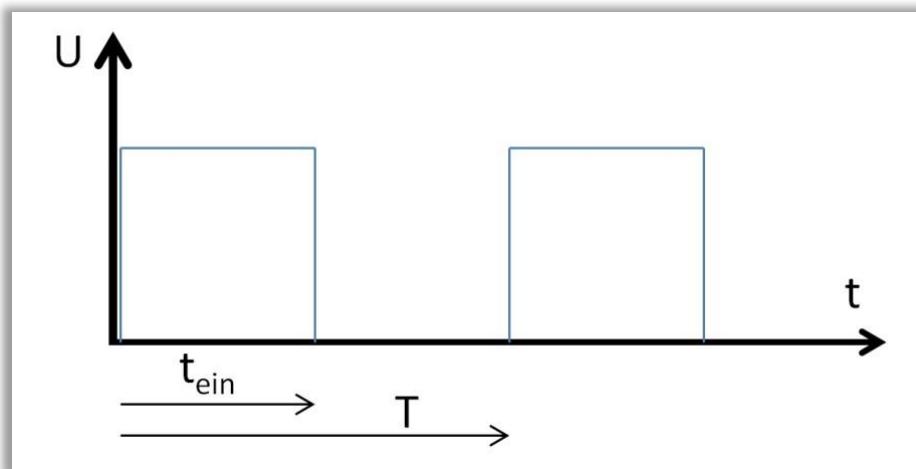


Abbildung 14: Spannungszeitverlauf eines Pulsweitenmodulierten Signals mit Tastverhältnis 0,5

Die Abbildung 14 zeigt ein PWM-Signal mit einem Tastverhältnis von 50%.

3.2 Regelungstechnik

3.2.1 Steuerung

Bei der Steuerung eines Prozesses wird der Istwert anhand der Stellgröße verändert. Liegt ein offener Wirkungsablauf vor, d.h. es findet keine fortlaufende Rückführung der Prozessausgangsgröße (Istwert) auf die Prozesseingangsgröße (Sollwert) statt, handelt es sich um eine Steuerung. Dabei kann nur auf bekannte Störgrößen reagiert werden, um diese durch geeignete Maßnahmen zu kompensieren. Die Steuerung ist schnell, denn eine Änderung der Führungsgröße bewirkt eine sofortige Änderung des

Istwertes. Der Prozessausgangswert kann nicht instabil werden, da immer eine zeitlich konstante Stellgröße angenommen wird.

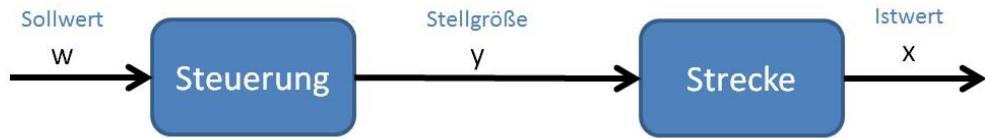


Abbildung 15: Blockschaltbild einer Steuerkette

Die Steuerung ist nach DIN IEC 60050-351 wie folgt definiert:

„Das Steuern, die Steuerung, ist ein Vorgang in einem System, bei dem eine oder mehrere Größen als Eingangsgrößen, andere als Ausgangsgrößen aufgrund der dem System eigentümlichen Gesetzmäßigkeiten beeinflussen. Kennzeichen für das Steuern ist der offene Wirkungsweg, oder ein geschlossener Wirkungsweg, bei dem durch die Eingangsgrößen beeinflusste Ausgangsgröße nicht fortlaufend und nicht wieder über dieselben Eingangsgrößen auf sich selbst wirken (“Offene Wirkungskette”).“

3.2.2 Regelung

Die Hauptaufgabe der Regelung besteht darin, eine bestimmte Prozessgröße (Regelgröße, Istwert) unabhängig von auftretenden Störungen auf einen vorgegebenen Führungswert (Sollwert) zu bringen. Der Führungswert kann dabei zeitlich konstant oder auch veränderlich sein.

Die Regelung ist nach DIN IEC 60050-351 wie folgt definiert:

„Vorgang, bei dem fortlaufend eine variable Größe, die Regelgröße erfasst, mit einer anderen variablen Größe, der Führungsgröße, verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird. Kennzeichen für das Regeln ist der geschlossene Wirkungsablauf, bei dem die Regelgröße im Wirkungsweg des Regelkreises fortlaufend sich selbst beeinflusst.“

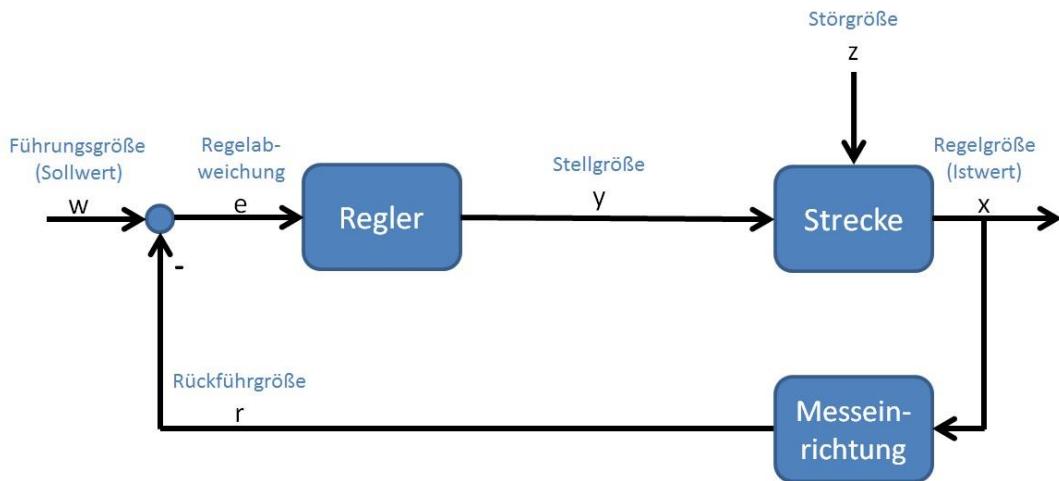


Abbildung 16: Allgemeine Regelkreisstruktur

In Abbildung 16 ist der Ablauf einer detaillierten Regelung dargestellt. Bei der Regelung eines Prozesses wird der tatsächliche Wert des Regelstreckenausgangs, also die Regelgröße (Istwert), fortlaufend über eine Messeinrichtung (z.B. Sensor) zurückgeführt. Dabei wird die Regelgröße ständig mit der Führungsgröße (Sollwert) verglichen. Es ist wichtig, dass eine negative Rückkopplung (Gegenkopplung) der Regelgröße mit der Führungsgröße auf den Eingang des Reglers stattfindet. Die Regeldifferenz (Regelabweichung) ist die Differenz zwischen der Führungsgröße und der Regelgröße und wird vom Regler genutzt um eine neue Stellgröße zu berechnen. Diese Stellgröße wirkt auf die Regelstrecke ein und bewirkt unter Einfluss der Störgröße eine neue Regelgröße. Störgrößen bewirken eine nicht beeinflussbare Änderung der Regelgröße. Um die einwirkenden Störgrößen auszugleichen und die Annäherung der Regelgröße an die Führungsgröße anzupassen, ist eine permanente Regelung notwendig. Störgrößen sind beispielsweise Laständerungen oder Reibung bei Motoren, da diese Einfluss auf die gewünschte Drehzahl haben. Der große Vorteil eines geschlossenen Regelkreises zur Steuerung ist, dass unbekannte Störgrößen gut ausgeregelt werden können. Ein Regelkreis kann allerdings instabil werden und ist im Vergleich zur Steuerung langsamer.

3.2.3 Kaskadenregelung

Die Kaskadenregelung (s. Abbildung 17) wird oft auch als mehrschleifige Regelung bezeichnet. Charakteristisches Merkmal der Kaskadenregelung ist, dass die Stellgröße des äußeren Regelkreises die Führungsgröße des inneren Regelkreises bildet. Bei der Kaskadenregelung wird somit der reale Prozess in eine Anzahl von in Reihe geschalte-

ten Einzelprozessen aufgeteilt. Nach jeder Teilstrecke wird eine Zwischenregelgröße gemessen und einem Teilregler zugeführt. So entsteht für jede Zwischengröße des Prozesses ein eigener Regelkreis. Durch diese verschachtelte Struktur spricht man auch von unterlagerten Regelkreisen. Der Vorteil einer solchen Regelstruktur ist, dass Störungen in den unterlagerten Regelkreisen ausgeregelt werden, bevor sie sich in den überlagerten Regelkreis auswirken können. Der Nachteil ist der erhöhte Aufwand an Sensorik und Reglern. Eine Voraussetzung für die Funktionsfähigkeit der Kaskadenregelung ist die Erfassung der Teilprozesse und dass der unterlagerte Regelkreis schneller als die überlagerten Regelkreise reagiert.

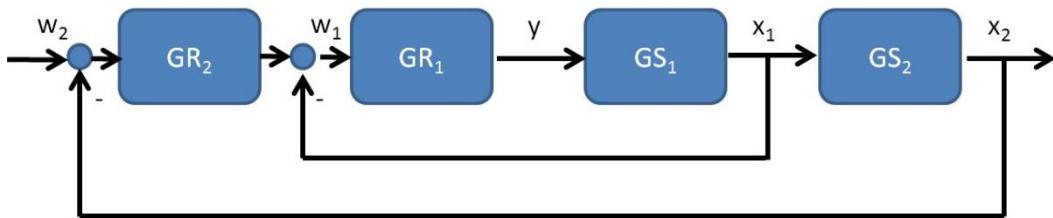


Abbildung 17: Grundstruktur einer Kaskadenregelung

3.2.4 Anregungsfunktion und Systemantwort

In der experimentellen (empirischen) Regelungstechnik werden zur Identifikation der Übertragungseigenschaften eines Systems häufig spezielle, leicht zu erzeugende Anregungsfunktionen verwendet. Das System wird mit einem Testsignal angeregt und die zeitliche Ausgangsfunktion aufgezeichnet. Man bezeichnet die zeitliche Ausgangsfunktion des Systems als Systemantwort, die man je nach verwendetem Eingangssignal misst (s. Abbildung 18). Aus den gewonnenen Erkenntnissen des zeitlichen Systemverhaltens kann eine vollständige Beschreibung der Strecke durchgeführt werden. Im Wesentlichen werden vier Anregungsfunktionen als Eingangsfunktionen genutzt.

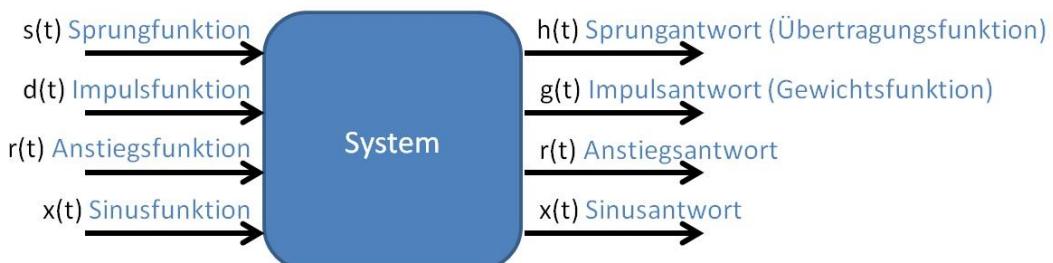


Abbildung 18: Ein- und Ausgangsfunktionen einer Regelstrecke

Die Sprungfunktion ist in der Regelungstechnik die am häufigsten angewandte Anregungsfunktion. Sie wird folgendermaßen definiert (Einheitssprung):

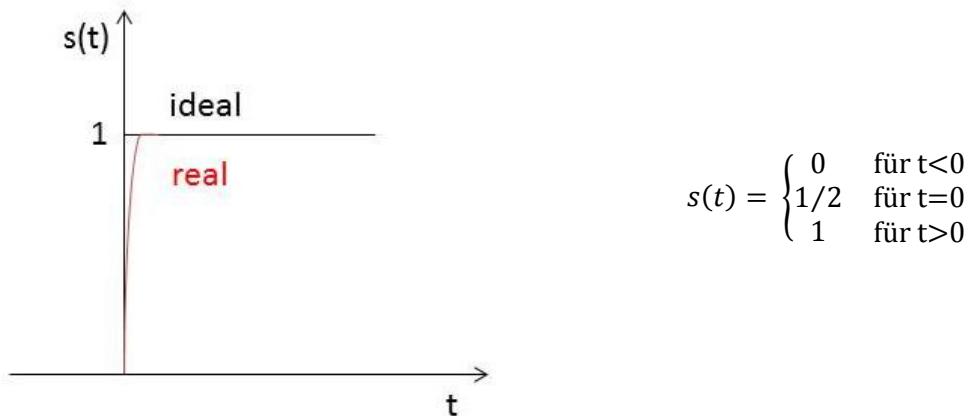


Abbildung 19: Einheitssprung

Die Sprungfunktion wurde zur Identifikation der Systeme gewählt, da diese die aussagekräftigsten Parameter liefert. Mit einer sprungartigen Eingangssignaländerung wird das zeitliche Übertragungsverhalten des Systems ausgegeben und bewertet. Diese Systemantwort charakterisiert die Regelstrecke.

3.2.5 Regelstrecken

In der Regelungstechnik wird eine zu regelnde Strecke durch ihr dynamisches Verhalten klassifiziert. Die Sprungantwort zeigt anschaulich, dass viele Systeme ein ähnliches Verhalten haben. Diese werden dann in verschiedene Streckentypen unterteilt, anhand dessen der zeitliche Aufwand für eine Regelungstechnische Aufgabe abzuschätzen ist.

Man unterscheidet folgende Streckentypen:

- Proportionale Regelstrecken (Strecken mit Ausgleich)
z.B. P-Strecke, PT_1 -, PT_2 -, PT_n -Strecken.
Diese streben einen neuen Endwert an.
- Integrierende Strecken (Strecken ohne Ausgleich)
z.B. I-Strecke, IT_1 -Strecke, I^2 -Strecken.
Sie erreichen keinen Gleichgewichtszustand.
- Spezielle Strecken
z.B. T_t -Strecken.
Diese enthalten Verzögerungen, sogenannte Totzeiten.

Regelstrecken, die eine Totzeit enthalten, unterscheiden sich in ihrem Zeitverhalten zu anderen Regelstrecken. Die Zeitspanne, die vergeht bis das System reagiert, wird als Totzeit T_t bezeichnet. Das Eingangssignal erscheint nach der Totzeit am Ausgang. Dieses ist bis auf die Zeitverschiebung gleich. Somit verhält sich das Totzeitglied wie ein P-Glied mit der Verstärkung eins. Totzeitbehaftete Systeme sind schwerer zu regeln und neigen zu instabilem Verhalten. Dies tritt bei allen Regelstrecken auf, die Transportgänge oder Laufzeiten von Signalen beinhalten.

Im Folgenden werden die in der Arbeit enthaltenen Strecken näher betrachtet.

3.2.6 PT_1 -Strecke

Die proportionale Strecke mit Verzögerungsglied 1. Ordnung (s. Abbildung 20) folgt nicht sofort auf ein Eingangssignal, sondern erreicht mit einer gewissen Verzögerung den stationären Endwert. Die Streckenverstärkung ist als $K_s = \Delta X_a / \Delta X_e$ definiert. Die Systemzeitkonstante T_1 wird bei Erreichen von 63% des stationären Endwertes abgelesen.

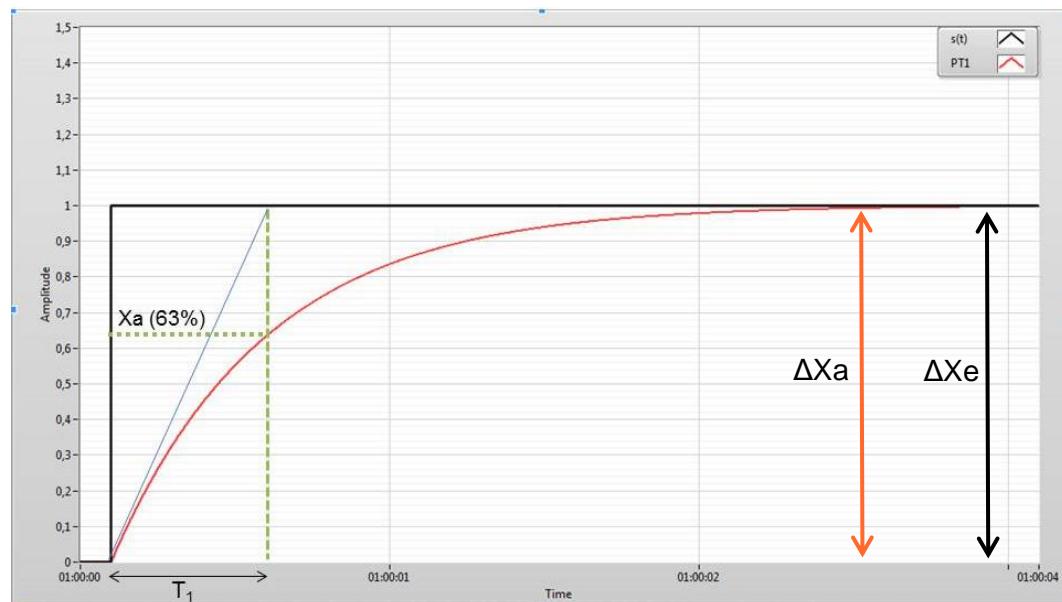


Abbildung 20: Sprungantwort einer PT_1 -Strecke

Die Übertragungsfunktion der PT_1 -Strecke ist in Gleichung (4) dargestellt:

$$G(s) = \frac{X_a(s)}{X_e(s)} = \frac{K_s}{1 + T_1 \cdot s} \quad (4)$$

Diese weist keine Nullstellen und eine Polstelle bei $s_1 = -1/T_1$ auf. Die Polstellen sind Nullstellen des Nennerpolynoms und sind kennzeichnend für die Trägheit des Übertragungselements. Diese werden beim Reglerentwurf in Kapitel 5 kompensiert.

3.2.7 PT₂-Strecke

Die proportionale Strecke mit Verzögerungsgliedern 2. Ordnung enthält zwei Energiespeicher. Nach der Art dieser Speicher werden sie in nichtschwingungsfähige und schwingungsfähige Regelstrecken unterschieden. Nichtschwingungsfähige Regelstrecken entstehen, wenn zwei Energiespeicher gleiches physikalisches Verhalten haben. Dies könnten z.B. zwei nachgeschaltete PT₁-Strecken sein. Die Gleichung(5) zeigt das allgemeine nichtschwingungsfähige Übertragungsglied eines PT₂-Systems.

$$G_S(s) = \frac{X_a(s)}{X_e(s)} = \frac{K_S}{(1+T_1 \cdot s) \cdot (1+T_2 \cdot s)} = \frac{K_S}{1 + (T_1 + T_2) \cdot s + T_1 \cdot T_2 \cdot s^2} \quad (5)$$

Schwingungsfähige Regelstrecken entstehen, wenn zwei unterschiedliche wirksame Energiespeicher zusammengeschaltet werden z.B. ein RCL-Glied. Diese können nur gedämpfte Schwingungen ausführen, da die Energie durch die Dämpfung aus dem System entnommen wird. Je größer die Dämpfung eines Systems, desto kleiner die Schwingungen. Bei einer Dämpfung $D \geq 1$ treten auch bei zwei unterschiedlichen Energiespeichersystemen keine Schwingungen auf. Die Kennkreisfrequenz ist die Eigenkreisfrequenz ω_0 des ungedämpften Systems und existiert wenn die Dämpfung $0 < D < 1$ ist. Die Gleichung (6) zeigt das allgemeine schwingungsfähige Übertragungsglied eines PT₂-Systems.

$$G(s) = \frac{X_a(s)}{X_e(s)} = \frac{K_S \cdot \omega_0^2}{s^2 + 2 \cdot D \cdot \omega_0 \cdot s + \omega_0^2} \quad (6)$$

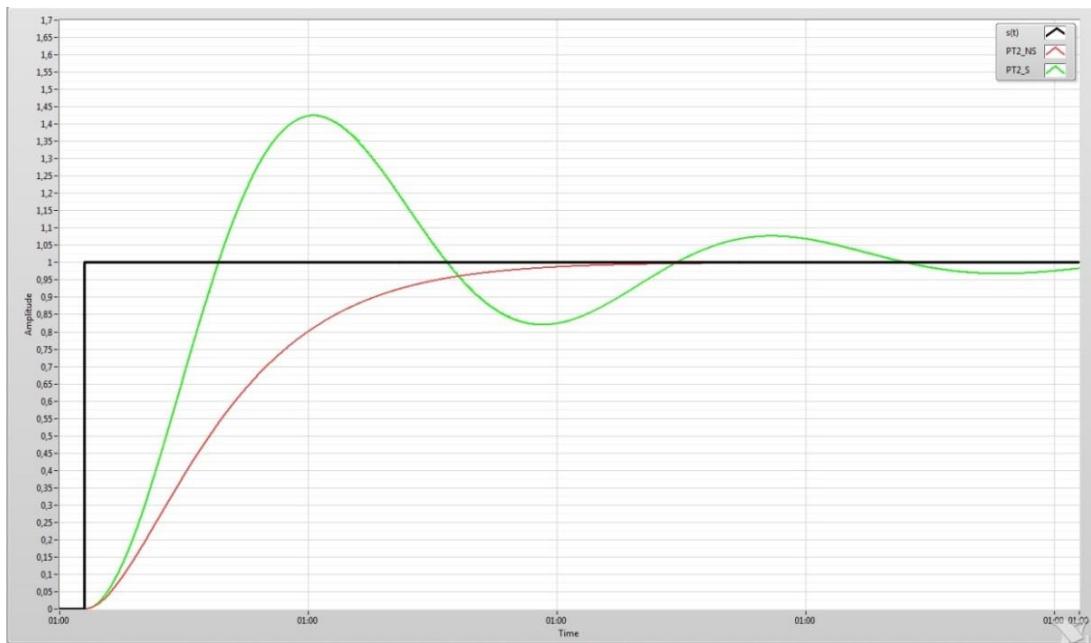


Abbildung 21: Sprungantwort von schwingfähigen (grün) und nichtschwingfähigen (rot) PT₂-Regelstrecken

Die Abbildung zeigt zwei PT₂-Strecken die schwing- und nichtschwingfähig sind.

3.2.8 PID-Regler

Der Regler hat die Aufgabe, die Regelgröße (Rückführgröße) zu messen, sie mit der Führungsgröße zu vergleichen und die Stellgröße zu verändern. Die Stellgröße ist so zu verändern, dass die Regelabweichung minimal wird oder idealerweise dem Sollwert entspricht.

Der Begriff PID-Regler steht für Proportional-Integral-Differential-Regler. Die Stellgröße des Reglers wird somit aus einem proportionalen, integralen sowie differentialen Anteil gebildet. Diese können sowohl aus einer Reihen- oder Parallelstruktur bestehen. Der PID-Regler beinhaltet eine Vielzahl von den verschiedenen Reglertypen (P-Regler, I-Regler, PI-Regler, PD-Regler und PID-Regler), die je nach vorhandener Strecke ausgewählt werden.

Der Einfluss des I-Anteils wird durch T_N festgelegt. T_N wird hierbei als Integral oder Nachstellzeit bezeichnet. T_V wird als Differential oder Vorhaltezeit bezeichnet und bestimmt den Einfluss des D-Anteils. Die Reglerstruktur wird aus den Parametern K_R , T_N und T_V zusammengesetzt.

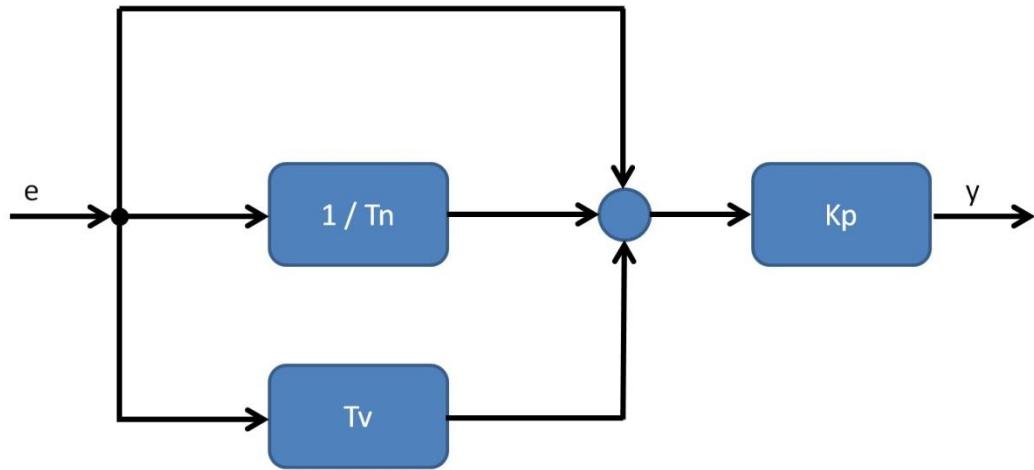


Abbildung 22: Struktur des PID-Reglers

Die Gleichung (7) zeigt die Übertragungsfunktion des Reglers:

$$G_{\text{PID}}(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D \cdot s = K_P \cdot \left(1 + \frac{1}{T_N \cdot s} + T_V \cdot s\right) \quad (7)$$

mit $K_I = K_P/T_N$ und $K_D = K_P \cdot T_V$.

Die Abbildung 22 zeigt die parallele Struktur, nach dem sich ein PID-Regler zusammensetzt. Mit diesen drei Parametern wird der Regler eingestellt.

Der P-Anteil hilft bei einer Regelabweichung schnell zu reagieren, kann diese aber nicht vollständig kompensieren. Dazu wird der I-Anteil zusätzlich einbezogen. Dieser integriert die Regeldifferenz und verändert die Stellgröße solange, bis keine Abweichung mehr vorliegt. Damit der Regler schon bei anstehenden Veränderungen reagieren kann, bewertet der D-Anteil die Regelabweichung und so deren Änderungsgeschwindigkeit. Da die PID-Regler alle Vorteile der einfachen Reglertypen vereinigen, werden diese bevorzugt eingesetzt.

3.2.9 Zweipunktregler

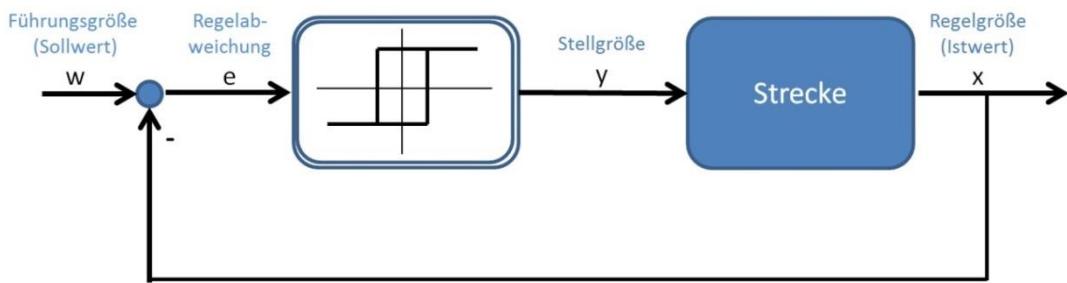


Abbildung 23: Regelkreis mit einem Zweipunktregler

Der Zweipunktregler wird oft auch als schaltender Regler oder unstetiger Regler bezeichnet. Die Stellgröße unstetiger Regler nimmt nur diskrete Ausgangssignalzustände an. Bei Signalzustand „Ein“ wird die Stellgröße auf y_{\max} und bei Signalzustand „Aus“ auf y_{\min} gesetzt. Zwischen den beiden Schaltschwellen Oberer-Trigger-Punkt und Unterer-Trigger-Punkt entsteht eine Hysterese. Diese kann durch variieren der Schaltschwellen verändert werden. Die Verringerung der Hysterese führt häufig zum dauernden Ein- und Ausschalten der Energiezufuhr und kann zum Verschleiß eines mechanischen Stellausgangs führen. Eine typische Anwendung ist die Temperaturregelung beim Bügeleisen. Der Zweipunktregler eignet sich besonders zur Regelung von Strecken mit großen Zeitkonstanten, wie sie vor allem bei Temperatur und Druck auftreten. Der Vorteil dieses Reglers ist, dass sie aufgrund des einfachen Aufbaus relativ günstig sind.

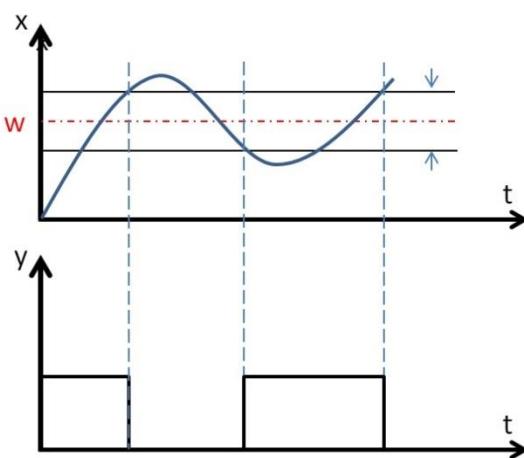


Abbildung 24: Funktionsdarstellung des Zweipunktreglers

Die Abbildung 24 zeigt den Verlauf der Regelgröße, der Stellgröße und die Hysterese. Die Stellgröße ist solange eingeschaltet bis die obere Schaltschwelle erreicht ist. Beim Überschreiten dieser wird die Stellgröße ausgeschaltet. Sobald die Regelgröße die untere Schaltschwelle unterschreitet, wird die Stellgröße eingeschaltet. Dieser Vorgang läuft periodisch ab.

3.3 Echtzeit

Der Begriff Echtzeit (engl.: real-time) ist bei Regelungssystemen ein wichtiger Aspekt, da hier eine verzögerte Programmausführung ein Sicherheitsrisiko darstellen kann.

Die Echtzeit ist nach DIN 44300 wie folgt definiert:

„Unter Echtzeit versteht man den Betrieb eines Rechensystems, bei dem Programme zur Verarbeitung anfallender Daten ständig betriebsbereit sind, derart, dass die Verarbeitungsergebnisse innerhalb einer vorgegebenen Zeitspanne verfügbar sind. Die Daten können je nach Anwendungsfall nach einer zeitlich zufälligen Verteilung oder zu vorherbestimmten Zeitpunkten anfallen.“

3.3.1 Echtzeitbetriebssysteme

Ein Betriebssystem übernimmt die Verwaltung der Hardware-Ressourcen eines Computers und regelt die Anwendungen, die auf diesem ausgeführt werden. Ein Echtzeitbetriebssystem trägt dieselben Aufgaben, kann diese aber mit einem präziseren Timing und mit einer hohen Zuverlässigkeit ausführen und abarbeiten. Ein Betriebssystem ist ein Echtzeitbetriebssystem, wenn es zur Ausführung anfallender Prozesse in der Lage ist diese in einer gewissen Zeitspanne abzuarbeiten. Dabei darf die Zeitspanne trotz zusätzlicher Prozesse nicht überschritten werden. Echtzeitbetriebssysteme, die eine maximale Zeitspanne zur Abarbeitung dieser Prozesse definitiv garantieren können, werden als „harte“ Echtzeitsysteme bezeichnet. Als „weiche“ Echtzeitsysteme werden solche bezeichnet, die die Einhaltung der maximalen Zeitspanne nicht garantierten können, aber noch im vorgegebenen Toleranzbereich liegen. Entscheidend ist, dass ein Echtzeitbetriebssystem ermöglicht, ein Programm zu priorisieren, das mit einem äußerst konsistenten Timing zuverlässig ausgeführt wird.

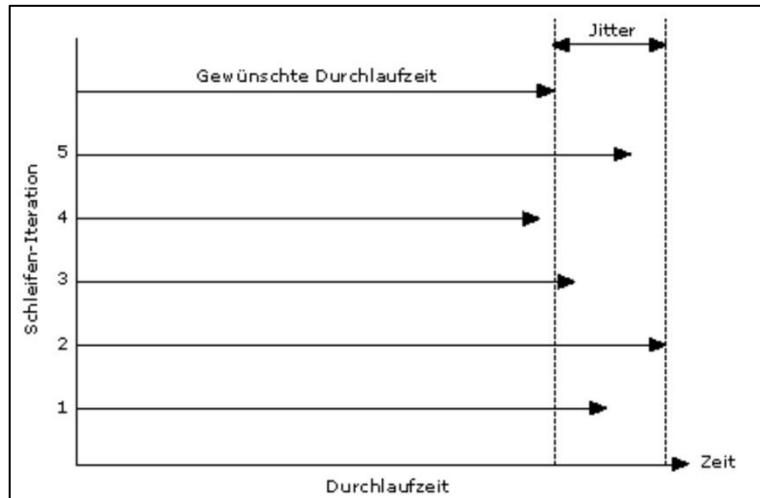


Abbildung 25: Jitter

Bei allen Echtzeitsystemen gibt es eine Abweichung von der gewünschten Schleifenzykluszeit, die als Jitter bezeichnet wird (s. Abbildung 25). Dieser Fehleranteil ist bei Echtzeitzeitsystemen weitgehend minimal.

3.3.2 Allgemeines Betriebssystem

Betriebssysteme wie Microsoft Windows, Mac Os oder Linux werden als allgemeine Betriebssysteme bezeichnet. Diese sind gut für die Entwicklung und Ausführung nichtkritischer Mess-, Steuer-und Regelanwendungen. Im Vergleich zu Echtzeitsystemen sind sie nicht für die Ausführung von Anwendungen optimiert, die ein präzises Timing und hohe Zuverlässigkeit erfordern. Diese Systeme können keinen Determinismus garantieren. Determinismus liegt vor, wenn eine auf einem harten Echtzeitbetriebssystem ausgeführte Anwendung ihr Timing innerhalb eines bestimmten Toleranzbereiches sicherstellen kann.

4 Identifikation der Regelstrecken

In diesem Abschnitt ist die Identifikation der Regelstrecke beschrieben. Als Regelstrecke wird die Übertragungsfunktion des Lüfters und des Balles definiert. Für den Entwurf von Reglern für ein System ist es notwendig, die Parameter der Regelstrecke genau zu identifizieren. Im ersten Abschnitt werden zwei Vorgehensweisen und anschließend die Identifikation beschrieben.

Eine theoretische Methode ist das Aufstellen eines mathematischen Modells über Differentialgleichungen. Dieses beschreibt möglichst genau das zeitliche Verhalten der Regelstrecke. In dieses Modell gehen die wichtigsten physikalischen Größen ein. Je genauer die bekannten Werte sind, desto genauer können regelungstechnische Parameter aus dem Modell berechnet werden. Anschließend wird die Differentialgleichung mittels der Laplace-Transformation in den Bildbereich überführt. Somit ist die Übertragungsfunktion nicht mehr von der Zeit t abhängig sondern von dem Laplaceoperator s . Vorteil der Laplace-Transformation ist, dass Differential- und Integralausdrücke in algebraische Ausdrücke umgewandelt werden. Diese können dadurch einfacher gelöst werden. Als Übertragungsfunktion $G(s)$ wird das Verhältnis der Ausgangsgröße $X_a(s)$ zur Eingangsgröße $X_e(s)$ im Bildbereich definiert. Ein großer Vorteil der analytischen Berechnung der Parameter ist es, dass das zu regelnde System noch nicht existieren muss. Diese Vorgehensweise setzt jedoch das Kennen der physikalischen Parameter voraus. Ein Nachteil ist, dass diese bei komplexen Regelstrecken nicht immer bekannt sind und der mathematische Aufwand sehr hoch ist.

Eine andere Methode für die Identifikation von Regelstrecken ist die experimentelle (empirische) Systemidentifikation nach der Sprungantwort. Bei dieser Modellbildung muss das zu regelnde System vorhanden sein. Anders als bei der ersten Modellbildung wird das System als Black-Box angesehen. Das bedeutet, dass die physikalischen Gesetzmäßigkeiten nicht betrachtet werden müssen. Der Vorteil ist, dass diese Methode schneller, günstiger und im Allgemeinen zu gleichen Ergebnissen führt. Das System wird mit einem Eingangssignal (Sprung, Rampe, Impuls etc.) angeregt und die Systemantwort aufgezeichnet. Aus dem zeitlichen Verhalten der Sprungantwort werden die Kennwerte bestimmt, die dann in das einfache Modell eingetragen werden können. Je genauer die Messwerte, desto genauer die daraus resultierenden Streckenparameter [7].

4.1.1 Regelstrecke des Lüfters

Für die Identifikation der Regelstrecke des Lüfters wird eine Sprungänderung der Eingangsgröße durchgeführt. Die aufgezeichnete Systemantwort des Lüfters ist in Abbildung 26 dargestellt.

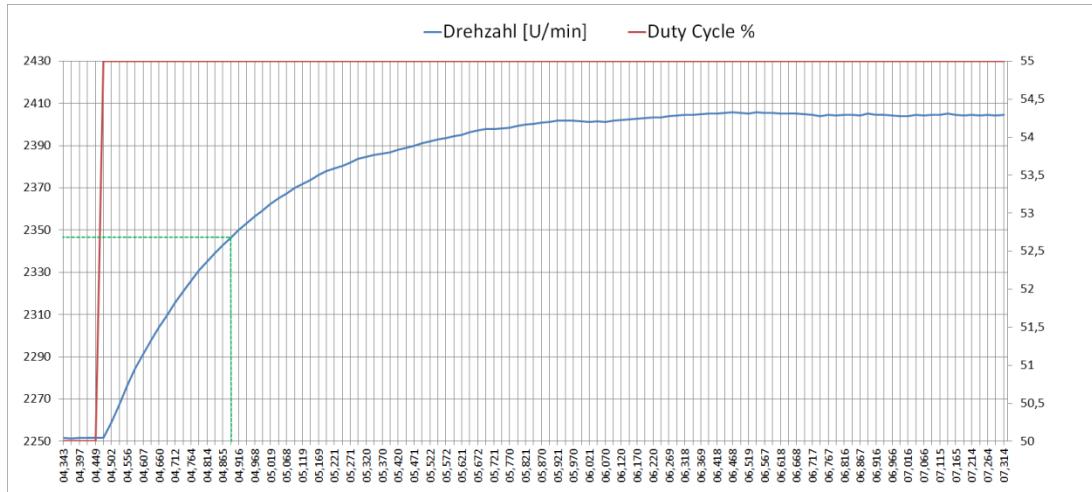


Abbildung 26: Sprungantwort des Lüfters

Der Verlauf der Strecke zeigt ein PT_1 -Verhalten mit einer Totzeit T_t . Die Parameter der Regelstrecke werden aus der Abbildung 26 graphisch, wie in Kapitel 3.2.6 beschrieben, abgelesen. Dabei beträgt $\Delta X_a = 145 \text{ U/min}$ und $\Delta X_e = 5 \%$. Die Streckenzeitzkonstante T_1 wird bei ca. 2345 U/min abgelesen.

$$K_S = 29$$

$$T_1 = 0,39 \text{ Sek.}$$

$$T_t = 0,03 \text{ Sek.}$$

Daraus ergibt sich die folgende Übertragungsfunktion:

$$G_S(s) = \frac{X_a(s)}{X_e(s)} = e^{-T_t s} \cdot \frac{K_S}{1+T_1 s} \quad (8)$$

Die Übertragungsfunktion des Lüfters ergibt sich dann wie folgt:

$$G_S(s) = e^{-0,03 s} \cdot \frac{29}{1+0,39 s} \quad (9)$$

Für den Entwurf der Regelparameter wird diese Übertragungsfunktion verwendet.

4.1.2 Regelstrecke des Balles

Für die Identifikation der Regelstrecke des Balles wird sprungartig die Drehzahl verstellt und die Systemantwort aufgezeichnet.

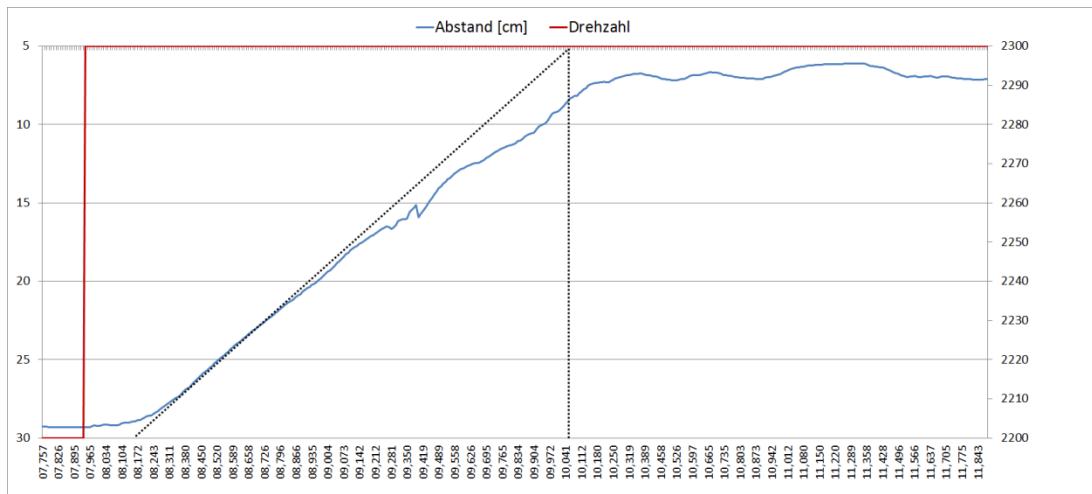


Abbildung 27: Sprungantwort des Balles

Die Abbildung 27 zeigt die Regelstrecke des Balles. Der Verlauf der Strecke zeigt ein nichtschwingendes PT_2 -Verhalten. Die Parameter der Regelstrecke können durch das Wendetangentenverfahren (s. Abbildung 28) ermittelt werden. Dieses Verfahren ist nur für nichtschwingungsfähige Regelstrecken anwendbar. Der Vorteil dieser Identifikationsmethode ist die einfache Realisierung. Der Nachteil des Verfahrens ist die Fehleranfälligkeit, da der Wendepunkt sowie die Steigung der Wendetangente graphisch ermittelt werden. Die graphische Ermittlung führt zu Ungenauigkeiten beim Ergebnis.

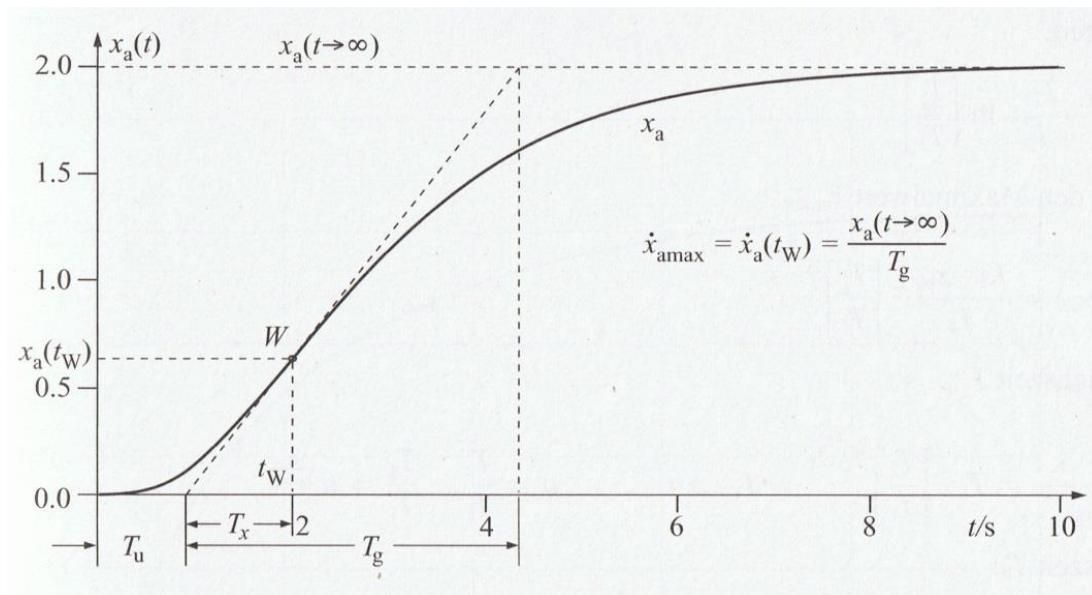


Abbildung 28: Kenngrößen der Sprungantwort für das Wendetangentenverfahren (Quelle: [7])

Regelstrecken mit mehreren Verzögerungselementen liefern eine Sprungantwortfunktion ohne Überschwingen. Diese Funktion besitzt einen Wendepunkt, welcher den maximalen Anstieg der Sprungantwortfunktion kennzeichnet. Die Tangente wird im Wendepunkt angelegt und erzeugt dabei einen Schnittpunkt auf der Zeitachse. Die Zeit

bis zum Schnittpunkt wird als Verzugszeit T_u bezeichnet. Der Schnittpunkt der Tangente mit dem stationären Wert der Sprungantwort wird auf die Zeitachse projiziert. Das Zeitintervall zwischen den Schnittpunkten wird als Ausgleichszeit T_g bezeichnet. Die Streckenverstärkung wird aus dem stationären Wert der Sprungantwort ΔX_a und der Sprunghöhe der Eingangsgröße ΔX_e bestimmt. Mit diesen experimentell ermittelten Werten werden die Zeitkonstanten der Übertragungsfunktion berechnet.

Die Abbildung 29 zeigt die Vorgehensweise und die Entscheidungskriterien des Verfahrens.

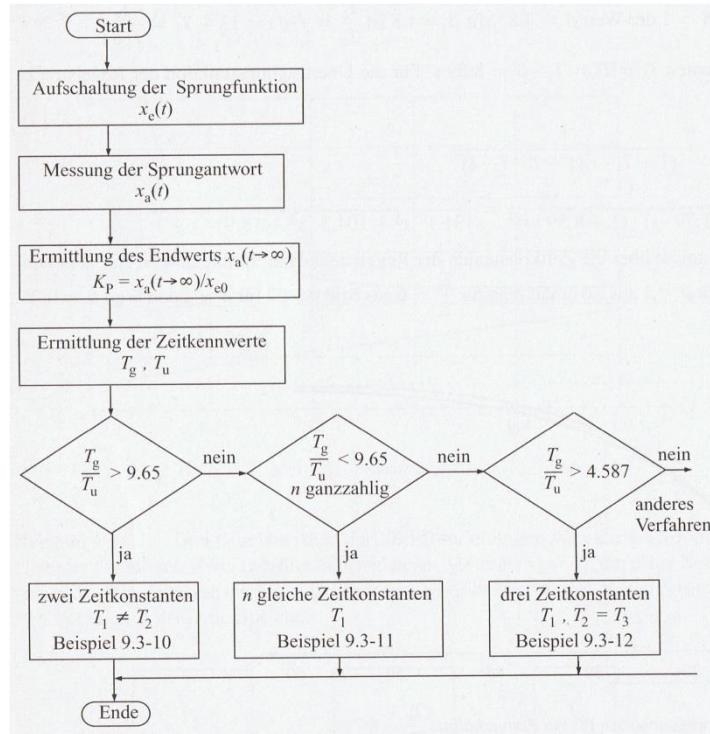


Abbildung 29: Vorgehensweise und Entscheidungsablauf beim Wendetangentenverfahren (Quelle: [7])

Eine PT₂-Strecke mit zwei unterschiedlichen Zeitkonstanten liegt vor, wenn das Verhältnis $T_g/T_u > 9,65$ beträgt. Ist dies nicht der Fall, kann man ein Übertragungselement mit mehreren gleichen Zeitkonstanten bestimmen. Für den Fall, dass das Zeitverhältnis $T_g/T_u > 4,587$ ist, kann die Übertragungsfunktion der Regelstrecke mit drei Verzögerungszeitkonstanten angenähert werden. Dazu muss die Voraussetzung erfüllt sein, dass zwei von drei Zeitkonstanten gleich sind. Für die Identifikation mit dem Wendetangentenverfahren sind für jeden Entscheidungsablauf verschiedene Vorgehensweisen erforderlich. Nachstehend wird der erste Entscheidungsablauf (zwei Zeitkonstanten) beschrieben.

Die Verzugszeit und die Ausgleichszeit wurden graphisch aus der Abbildung 27 abgelesen.

$$\frac{T_g}{T_u} = \frac{2,324}{0,191} = 12,1675 > 9,6491 \quad (10)$$

Das berechnete Verhältnis zeigt, dass eine Übertragungsfunktion mit zwei unterschiedlichen Zeitkonstanten vorliegt. Zur Bestimmung der zwei Zeitkonstanten werden folgende Schritte durchgeführt:

Aus dem Kehrwert, also T_u/T_g , wird das Zeitkonstantenverhältnis $\alpha = T_2/T_1$ bestimmt.

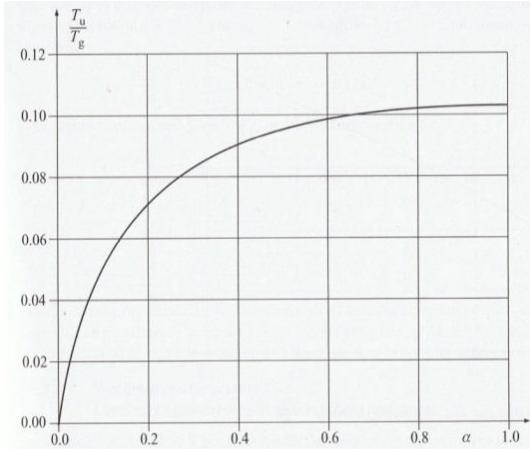


Abbildung 30: T_u/T_g in Abhängigkeit $\alpha = T_2/T_1$ (Quelle: [7])

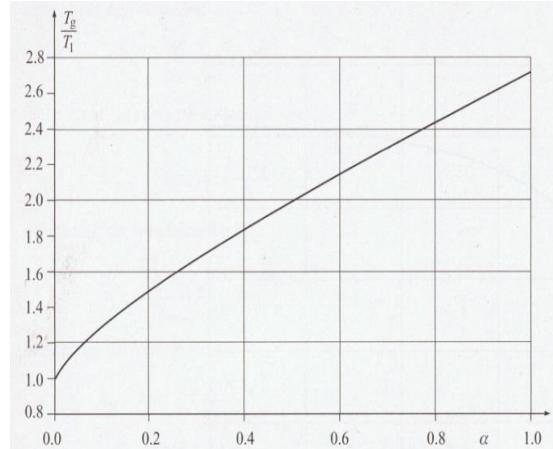


Abbildung 31: T_g/T_l in Abhängigkeit vom Zeitkonstantenverhältnis $\alpha = T_2/T_1$ (Quelle: [7])

Dazu wird in Abbildung 30 bei $T_u/T_g = 0,082185$ das Zeitkonstantenverhältnis $\alpha \approx 0,3$ abgelesen. Daraus kann nun das Verhältnis T_g/T_1 unter Verwendung von α aus der Abbildung 31 entnommen werden. Das Verhältnis T_g/T_1 beträgt $\approx 1,7$. Mit diesen Parametern werden die Zeitkonstanten T_1 und T_2 wie folgt berechnet:

$$T_1 = \frac{T_g}{1,7} = \frac{2,324}{1,7} = 1,3671 \quad (11)$$

$$T_2 = \alpha \cdot T_1 = 0,3 \cdot 1,3671 = 0,4101 \quad (12)$$

Die Übertragungsfunktion sieht dann wie folgt aus:

$$G_s(s) = \frac{X_a(s)}{X_e(s)} = \frac{K_S}{(1+T_1 \cdot s) \cdot (1+T_2 \cdot s)} = \frac{0,31}{(1+1,3671 \cdot s) \cdot (1+0,4101 \cdot s)} \quad (13)$$

Diese PT_2 -Strecke aus zwei PT_1 -Strecken mit unterschiedlichen Zeitkonstanten stellt die Systemantwort mathematisch dar. Für den Entwurf der Reglerparameter wird diese Übertragungsfunktion verwendet.

5 Reglerentwurf

Die Pol-/Nullstellenkompensation oder auch dynamische Kompensation wird häufig bei der Auslegung einfacher Regler angewendet. Dabei wird der Regler passend zu der Regelstrecke ausgewählt. Der Regler enthält Terme der Form $(1+T_R \cdot s)$ im Zähler der Übertragungsfunktion und die Strecke Terme der Form $(1+T_S \cdot s)$ im Nenner der Übertragungsfunktion. Durch geeignete Parametrierung der Reglerzeitkonstanten ($T_R = T_S$) vereinfacht sich die Gleichung der Regelstrecken für weitere Berechnungen. Mit den passenden Reglerparametern wird der Pol der Regelstrecke bei $s_{p1} = -1/T_S$ durch eine Nullstelle des Reglers bei $s_{n1} = -1/T_R$ kompensiert. Mit T_R wird jeweils die größte Zeitkonstante der Regelstrecke kompensiert. Dabei weist der offene Regelkreis ($G_O = G_R \cdot G_S$) nach der Kompensation ein I-Verhalten ($G_O = K_I/s$) auf. Durch die Rückführung des geschlossenen Regelkreises kommt ein PT₁-Verhalten zustande. Dessen Zeitkonstante wird durch die freie Reglerverstärkung verändert. Dies wird anhand der Reglerentwürfe für die vorhandenen Regelstrecken nachstehend näher betrachtet [8].

5.1 Reglerentwurf für die PT₁-Strecke unter Vernachlässigung der Totzeit

Betrachtet wird die Streckenübertragungsfunktion $G_S(s)$ aus der Gleichung (8) ohne Totzeitelement da $T_t \ll T_S$:

$$G_S(s) = \frac{X_a(s)}{X_e(s)} = \frac{K_S}{1+T_S \cdot s} = \frac{29}{1+0,39 \cdot s} \quad (14)$$

Diese soll mit einem klassischen PI-Regler geregelt werden:

$$G_R(s) = \frac{X_a(s)}{X_e(s)} = K_P + \frac{K_I}{s} = K_P + \frac{K_P}{T_N \cdot s} = \frac{K_P \cdot (1 + T_N \cdot s)}{T_N \cdot s} \quad (15)$$

Die Nachstellzeit wird wie folgt gebildet: $T_N = K_P/K_I$.

Für die Bedingung $G_O(s) = G_R \cdot G_S = K_I/s$ wird zunächst die Übertragungsfunktion des offenen Regelkreises betrachtet:

$$G_O(s) = G_R(s) \cdot G_S(s) = \frac{K_P \cdot (1 + T_N \cdot s)}{T_N \cdot s} \cdot \frac{K_S}{1 + T_S \cdot s} \quad (16)$$

In der offenen Übertragungsfunktion sieht man im Zähler der Strecke und im Nenner des Reglers den Term $(1+T \cdot s)$. Zum Verbessern des Regelverhaltens wird die Zeitkon-

stante der Strecke T_S durch Gleichsetzen der Nachstellzeit des Reglers $T_N = T_S$ kompensiert. Diese Zeitkonstanten können nun gekürzt werden.

$$G_O(s) = \frac{K_P \cdot (1+T_S \cdot s)}{T_N \cdot s} \cdot \frac{K_S}{1+T_S \cdot s} = \frac{K_P \cdot K_S}{T_N \cdot s} = \frac{K_I}{s} \quad (17)$$

Die offene Übertragungsfunktion zeigt ein I-Verhalten ($K_I = K_R \cdot K_S / T_N$). Somit ist die Bedingung erfüllt.

Der geschlossene Regelkreis ergibt sich dementsprechend wie folgt:

$$G(s) = \frac{G_O(s)}{1+G_O(s)} = \frac{\frac{K_I}{s}}{1+\frac{K_I}{s}} = \frac{1}{1+\frac{1}{K_I} \cdot s} = \frac{1}{1+T_{RK} \cdot s} \quad (18)$$

Der geschlossene Regelkreis zeigt ein PT_1 -Verhalten, welches nun durch die neue Zeitkonstante T_{RK} des Reglers gebildet wird.

$$T_{RK} = \frac{1}{K_I} = \frac{T_N}{K_R \cdot K_S} \Rightarrow K_R = \frac{T_N}{T_{RK} \cdot K_S} \quad (19)$$

Diese kann durch den noch freien Regelparameter K_R eingestellt werden. Die Parameter des PI-Reglers für die PT_1 -Strecke lauten wie folgt:

T_{RK}	K_R	T_N
0,39	0,03448	0,39
0,1	0,13448	
0,05	0,26896	

Tabelle 1: PI-Reglerparameter für die PT_1 -Strecke

In der Tabelle 1 sind die PI-Reglerparameter dargestellt. Die Nachstellzeit des Reglers wird gleich der Streckenzeitzkonstante des Lüfters eingestellt. Die Reglerverstärkung wird nach der Gleichung (19) berechnet. Die neue Zeitkonstante T_{RK} des geschlossenen Regelkreises wird zunächst gleich der Streckenzeitzkonstante gesetzt und schrittweise verkleinert, was zu Erhöhung der Reglerverstärkung führt.

5.2 Reglerentwurf für die PT_2 -Strecke

Betrachtet wird die Streckenübertragungsfunktion des Balles $G_S(s)$ aus der Gleichung (13):

$$G_S(s) = \frac{X_a(s)}{X_e(s)} = \frac{K_S}{(1+T_1 \cdot s) \cdot (1+T_2 \cdot s)} = \frac{K_S}{1+T_1^* \cdot s + T_2^* \cdot s^2} \quad (20)$$

Mit $T_1^* = T_1 + T_2$ und $T_2^* = T_1 \cdot T_2$.

Diese soll mit einem klassischen PID-Regler (s. Kapitel 3.2.8) geregelt werden:

$$G_R(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D \cdot s = K_P \cdot \left(1 + \frac{1}{T_N \cdot s} + T_V \cdot s\right) = K_P \cdot \frac{(1+T_N \cdot s + T_N \cdot T_V \cdot s^2)}{T_N \cdot s} \quad (21)$$

Die Reglerparameter sollen wieder so ausgelegt werden, dass die Bedingung $G_O(s) = G_R \cdot G_S = K_I / s$ erfüllt wird. Zunächst wird die Übertragungsfunktion des offenen Regelkreises betrachtet:

$$G_O(s) = G_R(s) \cdot G_S(s) = K_P \cdot \frac{(1+T_N \cdot s + T_N \cdot T_V \cdot s^2)}{T_N \cdot s} \cdot \frac{K_S}{1 + T_1^* \cdot s + T_2^* \cdot s^2} \quad (22)$$

Durch den Vergleich des Zählers des Reglers mit dem Nenner der Strecke erhält man:

$$T_N = T_1^* \text{ und } T_N \cdot T_V = T_2^*$$

Zur Polstellenkompensation der Strecke mit den Reglernullstellen muss man die Nachstell- und Vorhaltezeit entsprechend auswählen:

$$T_N = T_1^* = T_1 + T_2 \text{ und } T_V = T_2^* = T_1 \cdot T_2 / T_N$$

$$G_O(s) = G_R(s) \cdot G_S(s) = K_P \cdot \frac{(1+T_1^* + T_2^* \cdot s^2)}{T_N \cdot s} \cdot \frac{K_S}{1+T_1^* + T_2^* \cdot s^2} = \frac{K_P \cdot K_S}{T_N \cdot s} = \frac{K_I}{s} \quad (23)$$

Durch die passende Auswahl der Nachstell- und der Vorhaltezeit werden die zwei Streckenzzeitkonstanten kompensiert. Diese Zeitkonstanten können nun gekürzt werden. Die offene Übertragungsfunktion zeigt auch hier nach der Kompensation ein I-Verhalten. Der geschlossene Regelkreis ergibt wieder ein PT1-Verhalten (s. Gleichung (18)). Die Parameter des PID-Reglers lauten wie folgt:

T_{RK}	K_R	T_V	T_N
1,7772	3,2258		
1	5,7329	0,3154	1,7772
0,5	11,4658		

Tabelle 2: PID-Reglerparameter für die PT_2 -Strecke

In der Tabelle 2 sind die PID-Reglerparameter dargestellt. Die Nachstellzeit des Reglers wird gleich $T_N = T_1^* = T_1 + T_2$ und die Vorhaltezeit gleich $T_V = T_2^* = T_1 \cdot T_2 / T_N$ eingesetzt. Die Reglerverstärkung wird nach der Gleichung (19) berechnet. Die neue

Zeitkonstante T_{RK} des geschlossenen Regelkreises wird zunächst der Nachstellzeit gleichgesetzt und schrittweise verkleinert, was zu Erhöhung der Reglerverstärkung führt.

5.3 Empirischer Reglerentwurf

Bei den empirischen Einstellregeln wird der erhebliche mathematische Aufwand, der für die Bestimmung der Reglerparameter benötigt wird, vermieden. Einstellverfahren wie z.B. nach Ziegler und Nichols oder nach Chien, Hrones und Reswick, gehen von experimentell ermittelten Kenngrößen der Regelstrecke aus. Das Verfahren nach Chien, Hrones und Reswick wertet die Kenngrößen der Sprungantwort der nicht-schwingungsfähigen Regelstrecke nach dem Wendetangentenverfahren (s. Abbildung 28) aus. Die Einstellregeln gelten für Strecken höherer Ordnung (mind. PT_2), dessen Zeitkonstanten nicht bekannt sind. Diese Einstellregeln sind anwendbar wenn $T_g / T_u > 3$ ist. Mit der proportionalen Streckenverstärkung K_S , der Verzugszeit T_u und der Ausgleichszeit T_g kann man die unterschiedlichen Parameter für ein günstiges Führungs- bzw. Störverhalten, sowie für ein aperiodisches oder ein einschwingendes Verhalten auswählen (s. Abbildung 32).

		Aperiodischer Einschwingvorgang kürzester Dauer		Kleinste Schwingungsdauer mit 20 % Überschwingen	
Regler		Führung	Störung	Führung	Störung
P	K_P	$0,3 \cdot \frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$	$0,3 \cdot \frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$	$0,7 \cdot \frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$	$0,7 \cdot \frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$
PI	K_P	$0,35 \cdot \frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$	$0,6 \cdot \frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$	$0,6 \cdot \frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$	$0,7 \cdot \frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$
	T_N	$1,2 T_g$	$4 T_u$	T_g	$2,3 T_u$
PID	K_P	$0,6 \cdot \frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$	$0,95 \cdot \frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$	$0,95 \cdot \frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$	$1,2 \cdot \frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$
	T_N	T_g	$2,4 T_u$	$1,35 T_g$	$2 T_u$
	T_V	$0,5 T_u$	$0,42 T_u$	$0,47 T_u$	$0,42 T_u$

Abbildung 32: Einstellregeln nach Chien, Hrones und Reswick

Die Einstellregeln für die Strecke des Lüfters sind aufgrund der niedrigen Streckenordnung (PT_1) nicht geeignet. Deshalb werden die Reglerparameter nur für die Strecke des Balles ermittelt. Die Regelstreckenparameter des Balles wurden aus der Abbildung 27 entnommen und lauten wie folgt:

$$\begin{aligned}K_S &= 0,31 \\T_u &= 0,191 \text{ Sek.} \\T_g &= 2,324 \text{ Sek.}\end{aligned}$$

In der Tabelle 3 sind die Reglerparameter für die entsprechende Auswahl des Reglers berechnet:

		Aperiodischer Einschwingvorgang kürzester Dauer		Kleinste Schwingungsdauer mit 20% Überschwingen	
Regler		Führung	Störung	Führung	Störung
P	K_P	11,7750	11,7750	27,4750	27,4750
PI	K_P	13,7375	23,55	23,550076	27,4750
	T_N	2,7888	0,764	2,324	0,4393
PID	K_P	23,5500	37,2876	37,2876	47,1001
	T_N	2,324	0,4584	3,1374	0,382
	T_V	0,0955	0,08022	0,08977	0,08022

Tabelle 3: Empirische Reglerparameter nach Chien, Hrones und Reswick für die PT_2 -Strecke

5.4 Zweipunktregler Einstellungen

Die Einstellparameter des Zweipunktreglers werden experimentell ermittelt. Unter Vernachlässigung der Hysterese wird zunächst die Stellgröße (Drehzahl) eingestellt. Die Ausgangssignalzustände „Ein“ (Ball schwebt oben) und „Aus“ (Ball schwebt unten) werden an die Strecke angepasst. Bei einer zu kleinen Stellleistung wird der Sollwert gar nicht oder langsam erreicht, so dass eine bleibende Regelabweichung entsteht. Als Stellleistung wird die Stellgrößendifferenz zwischen y_{\max} und y_{\min} bezeichnet. Ist die Stellleistung zu groß, steigt die Regelgröße (Ball) zu steil an und der Sollwert wird überschritten. Dadurch kommt es zu starkem Überschwingen. Danach wird die Hysterese eingestellt. Die obere und untere Schaltschwelle kann separat eingestellt werden. Diese werden programmtechnisch so eingestellt, dass eine möglichst geringe Schaltfrequenz entsteht. Dadurch wird die Ein- und Ausschaltdauer größer und die mechanische Belastung wird verringert. Die Schwankungsbreite der Regelgröße zwischen der Hysterese soll dabei möglichst klein sein, damit die Regelabweichung gering bleibt.

Einstellparameter des Zweipunktreglers:

Stellwert y_{\max}	2300 U/min
Stellwert y_{\min}	2200 U/min
Obere Schaltschwelle	$w + 1$
Untere Schaltschwelle	$w - 1$

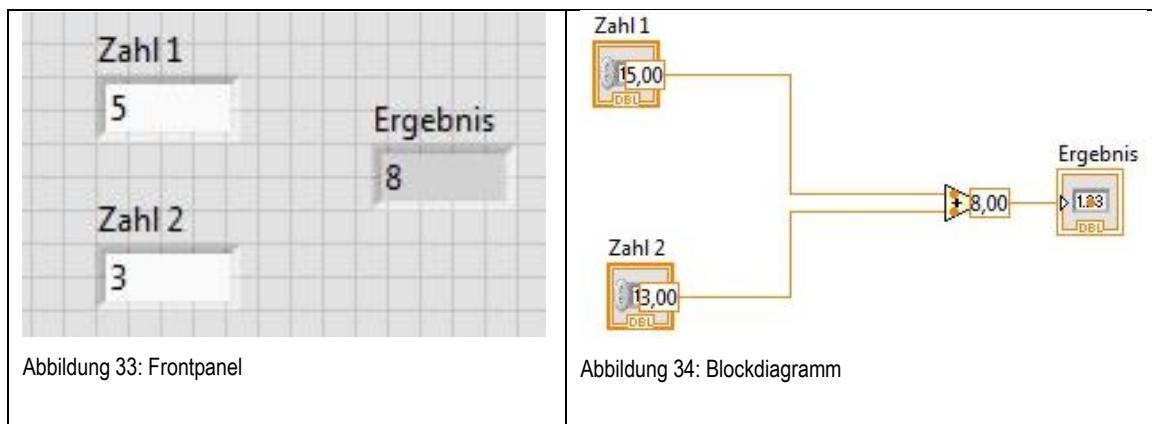
Tabelle 4: Parametereinstellungen des Zweipunktreglers für die PT₂-Strecke

In der Tabelle 1 sind die Einstellparameter des Zweipunktreglers für die Regelstrecke des Balles dargestellt. Diese wurden experimentell an die Strecke angepasst.

6 LabVIEW

Das Programm LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) ist eine Software, in der man graphisch programmiert. Diese ermöglicht das Programmieren mit Symbolen anstelle von Textzeilen (z.B. C++/ Java). LabVIEW-Programme werden als VIs (Virtuelle Instrumente) bezeichnet. Damit ist es möglich, Messinstrumente wie Oszilloskope oder Multimeter virtuell nach zu programmieren. Diese imitieren das Aussehen und Verhalten realer Instrumente.

LabVIEW enthält eine Vielzahl von Werkzeugen zur Erfassung, Analyse, Darstellung und Speicherung von Daten. Beim Programmierstart in LabVIEW öffnen sich zwei Darstellungsfenster. In dem ersten Fenster erstellt man mit Bedien- und Anzeigeelementen eine Benutzeroberfläche, die als Frontpanel bezeichnet wird. In dieser können z.B. Drehknöpfe, LEDs oder Graphen dargestellt werden. In dem zweiten Fenster, das als Blockdiagramm bezeichnet wird, befindet sich der Programmcode zur Steuerung der Frontpanel-Objekte.



Ein Beispiel für die Datenflussprogrammierung einer einfachen Addition ist in Abbildung 33 und in Abbildung 34 dargestellt. Im Frontpanel können zwei Variablen eingegeben werden, die dann addiert werden. Das Ergebnis der Addition wird dann unter Ergebnis auf dem Frontpanel angezeigt. Im Blockdiagramm ist der grafische Programmcode sichtbar. Zahl 1 und Zahl 2 bilden die sogenannten Datenquellen. Die über Drähte verbundene Summierstelle wird als Knoten bezeichnet. Sobald Informationen von beiden Variablen vorliegen wird die Rechenoperation ausgeführt und zum Ergebnis weitergeleitet. Das Ergebnis erhält den berechneten Wert und stellt es auf dem Frontpanel dar. Dieses wird als Datensenke bezeichnet, da es die Daten aufnimmt [5].

Das vollständige Programm wurde in drei separate Schleifen aufgeteilt, um die Iterationszeit gering zu halten. Diese werden im folgenden Abschnitt näher erläutert. Mit einem zusätzlichen Timer-Baustein wird die seit dem Start abgelaufene Zeit in Millisekunden bei jedem Durchlauf protokolliert. Somit wird die Periodendauer und daraus die tatsächliche Zeit/ Frequenz der Schleifeniteration ermittelt.

6.1 Einlesen der Drehzahl

Die Abbildung 35 zeigt den Programmausschnitt, in dem die Drehzahlerfassung über der Frequenz des Tachosignals programmtechnisch realisiert worden ist.

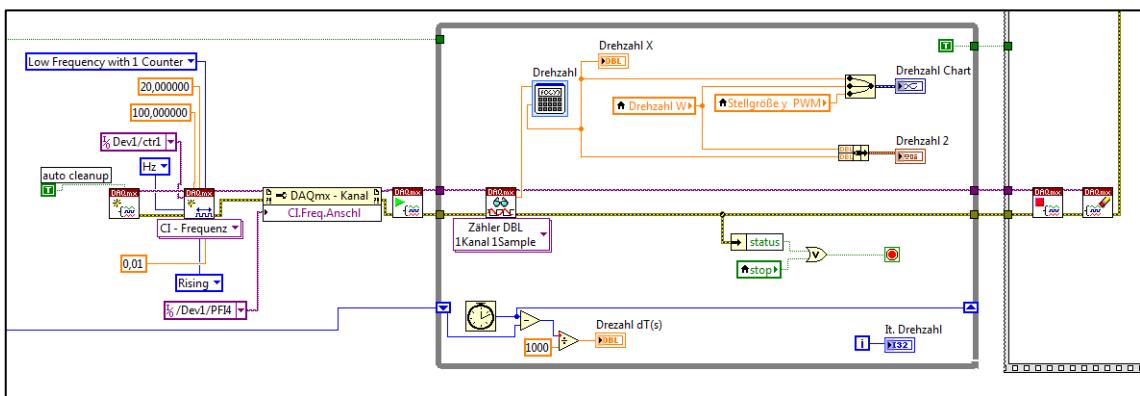


Abbildung 35: Blockdiagrammausschnitt: Einlesen der Drehzahl

Mit der Verwendung der DAQmx-Bausteine (VIs) wird zunächst die Initialisierung und Festlegung der Messmethode ausgewählt. Der Begriff DAQ steht für Data AcQuisition (Datenerfassung). Zuerst wird der Messbereich, der Zähler (Counter 1) sowie der physikalische Eingangsanschluss des Zählers (PFI 4) festgelegt. Die Frequenz des Tachosignals wird mit einem „DAQmx-Lesen(VI“ in der Schleife eingelesen. Die While-Schleife wird solange zyklisch ausgeführt, bis der Stopp-Button auf dem Frontpanel betätigt wird. Während der Schleifeniteration wird lediglich der Baustein „DAQmx-Lesen“ aufgerufen, der die Frequenz ausliest und ausgibt. Dabei ist die Schleifeniterationszeit nicht kontinuierlich, sondern wird auf Anforderung ausgeführt und ist somit abhängig von dem eingelesenen Signal. Das bedeutet je schneller die eingelesene Frequenz des Tachosignals ist, desto kleiner ist die Schleifeniterationszeit. Die Periodendauer stellt sich dabei im 20 ms bis 80 ms Bereich ein. In der Schleife wird außerdem mittels des Bausteins „Formel-VI“ die Drehzahl mit der Gleichung (1) berechnet. Diese wird über ein Signalverlaufsdiagramm auf dem Frontpanel dargestellt.

6.2 Einlesen des Abstandes

Die Abbildung 36 zeigt den Programmausschnitt, in dem der Abstand über die Impulsbreite des Echo-Signals erfasst wird.

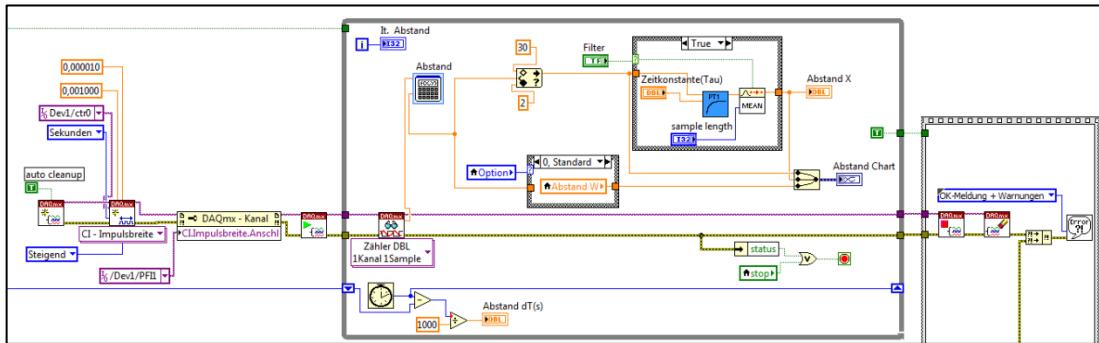


Abbildung 36: Blockdiagrammausschnitt: zum Einlesen des Abstandes

Das Einlesen der Pulsbreite wurde auch unter Verwendung der DAQmx-Bausteine (VIs) realisiert. Zunächst findet auch hier die Initialisierung und Festlegung der Messmethode statt. Der Messbereich, der Zähler (Counter 0) sowie der physikalische Eingangsanschluss des Zählers (PFI 1) werden festgelegt. Die Pulsbreite des Echo-Signals wird mit dem „DAQmx-Lesen(VI“ in der While-Schleife eingelesen. Diese wird zyklisch ausgeführt und durch Betätigung des Stopp-Buttons auf dem Frontpanel beendet. Der Baustein „DAQmx-Lesen“ gibt die Pulsbreite in Sekunden aus. Die Iterationszeit der Schleife wird nicht kontinuierlich, sondern abhängig von dem Echo-Signal auf Anforderung ausgeführt. Deshalb ist die Periodendauer der Schleife nicht konstant und wird mit ca. 10 ms ausgeführt. Der Abstand des Balles wird mittels des Bausteins „Formel-VI“ nach der Gleichung (3) berechnet. Das Signal des Sensors enthält höhere Frequenzanteile, die ein leichtes Rauschen bewirken, welches sich negativ auf die Regelung auswirkt. Zum Glätten des Signals wurde ein PT_1 -Filter sowie ein Baustein, der den gleitenden Mittelwert bildet, nachgeschaltet. Diese können über das Frontpanel parametriert werden. Der Signalverlauf wird bei zu hohen Einstellwerten verzögert. Der Abstand des Balles wird über ein separates Signalverlaufsdiagramm auf dem Frontpanel dargestellt.

6.3 Erzeugung des PWM-Signals

Die Drehzahl des Lüfters wird über das PWM-Signal verstellt. Zur Erzeugung des Signals gibt es zwei verschiedene Möglichkeiten. Bei der ersten Möglichkeit wird das Signal mit einem digitalen Zählerausgang erzeugt. Die Datenerfassungskarte hat

hardwarebedingt nur zwei Zähler zu Verfügung. Diese sind jedoch zum Einlesen des Echo- und Tacho-Signals verwendet worden. Deshalb wird das Signal mit der zweiten Methode über einen Analogausgang realisiert.

Das PWM-Signal wurde unter Verwendung des DAQ-Assistenten (Express-VI) mit dem „Signal Simulieren“-Baustein erzeugt (s. Abbildung 37).

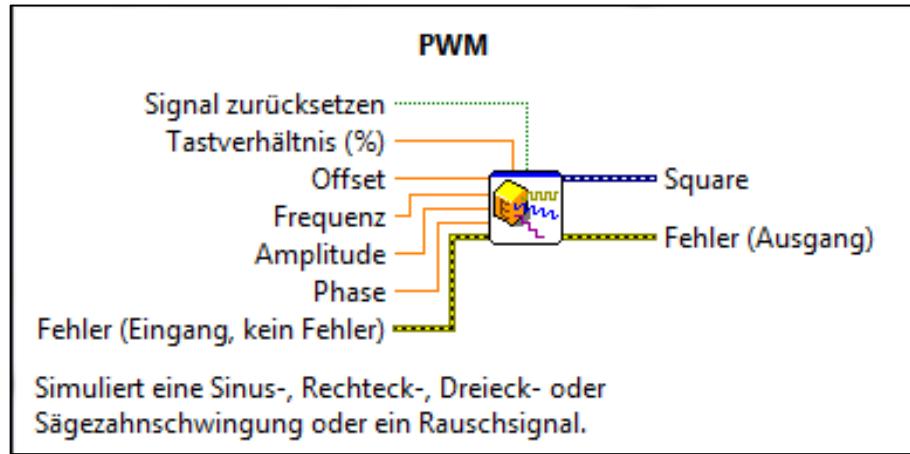


Abbildung 37: Express-VI Signal-Simulieren

Express-VI sind konfigurierbare Bausteine die von National Instruments bereitgestellt werden, um Erstellung von Programmen zu vereinfachen. Der Nachteil ist, dass die Eigenschaften des Programms nicht mehr direkt ersichtlich sind. Dazu können diese in SubVIs (Unterprogramme) umgewandelt werden, um in den Programmcode einzusehen. Das Konfigurationsdialogfeld ist in Abbildung 38 dargestellt.

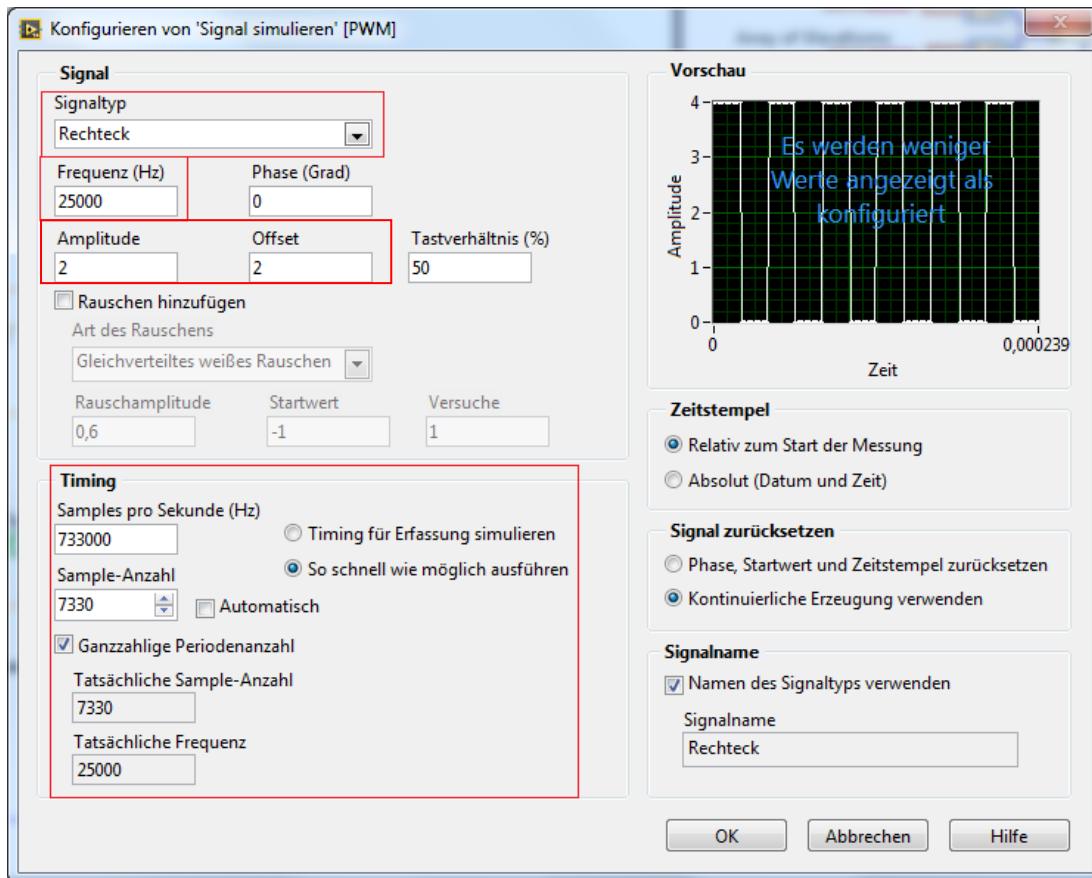


Abbildung 38: Signal-Simulieren Konfigurationsdialogfeld

Das Konfigurationsdialogfenster wurde wie folgt konfiguriert:

In dem Parameterfeld „Signal“ wird der Signaltyp ausgewählt. Für das PWM-Signal wurde als Typ „Rechteck“ mit einer Frequenz von 25 kHz (s. Kapitel 2.1) ausgewählt. Weitere Einstellmöglichkeiten des Signaltyps sind z.B. Sinus, Dreieck, Sägezahn. Um ein Spannungsniveau des PWM-Signals von z.B. 4 V zu erzeugen, wird die Amplitude sowie der Offset auf 2 V gesetzt. Ohne die Aufschaltung des Offsets wird eine Wechselspannung von ± 2 V erzeugt. In dem Parameterfeld „Timing“ werden die Samples pro Sekunde (Abtastfrequenz) sowie die Sample-Anzahl eingeben. Für möglichst viele Einstellschritte des PWM-Signals muss eine hohe Abtastfrequenz gewählt werden. Dabei ist zu beachten, dass die „Abtastfrequenz“ maximal der Änderungsrate des Analogausgangs der jeweiligen Datenerfassungskarte entspricht. Bei Verwendung zweier Analogausgänge beträgt die maximale Änderungsrate nicht mehr 833kS/s, sondern 740kS/s.

$$\text{Samples pro Periode} = \frac{\text{Abtastfrequenz}}{\text{Frequenz}} \quad (24)$$

Nach der Gleichung (24) wird die Sample-Anzahl (Abtastpunkte) berechnet. Die Anzahl der Samples besagt, wie viele Datenpunkte zum Erzeugen des Signals für eine Periode entstehen. Die Datenpunkte bestimmen die Anzahl der Einstellmöglichkeiten des PWM-Signals.

Wenn das simulierte Signal 25 kHz beträgt und eine Abtastfrequenz von 800.000 Samples pro Sekunde (Hz) ausgewählt wird, ergibt das 32 Abtastpunkte, sowie 32 Einstellmöglichkeiten. Aus dem Kehrwert dessen erhält man die Schrittweite des Tastverhältnisses.

In Abhängigkeit von der Abtastfrequenz können bei der Berechnung ungerade Werte entstehen, welche zu einstellbaren Zwischenschritten führen. Dies wird in Kapitel 7.4 näher erläutert. Für die Regelung und die Einstellung der Drehzahl ist dies zum Vorteil, weil sich dadurch mehr Einstellschritte ergeben.

Zum Erzeugen des Signals muss die Sample-Anzahl das fünf- bis zehnfache einer Periode betragen. Für das beschriebene Beispiel sind es 320 Samples. Im Eingabebereich „Sample-Anzahl“ wird der Wert bei der Auswahl „Automatisch“ auf 1/10 von dem Wert „Sample pro Sekunde (Hz)“ gesetzt. Dies führt dazu, dass ein viel zu hoher Wert eingestellt wird, welcher sich negativ auf die Iterationszeit der Hauptschleife auswirkt. Dadurch beträgt die Iterationszeit ca. 100 ms. Die manuelle Umstellung auf 1/100 reduziert dies auf ca. 10 ms. Die Auswahl von zu niedrigen Sample-Anzahl-Werten führt zu Fehlern in der Programmausführung. Durch die Reduzierung der Iterationszeit wird die Hauptschleife schneller ausgeführt. Eine zu große Totzeit durch das Programm wird hiermit verringert.

6.4 PID-Regler als Express-VI

Ein PID-Regler-Baustein ist in LabVIEW vorhanden und muss nicht selbst erstellt werden. Die Abbildung 39 zeigt den Baustein im Blockdiagramm. Dieser wird mit den entsprechenden Datenquellen verdrahtet. Der PID-Regler ist unter Verwendung des PID-Algorithmus wie in Kapitel 3.2.8 aufgebaut und ist für alle regelungstechnischen Anwendung benutzbar.

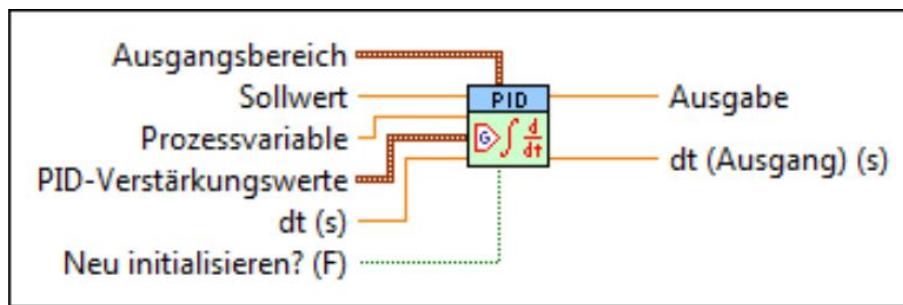


Abbildung 39: PID-Regler, Blockdiagramm

Die Einstellung des Reglers wird im Frontpanel durchgeführt. Die Abbildung 40 zeigt die einstellbaren Parameter. Die Stellgröße wird unter „Ausgangsbereich“ angepasst. In dem PID-Verstärkungswerte-Fenster wird die proportionale Verstärkung, die Nachstellzeit und die Vorhaltezeit des Reglers parametriert. Die Zeiten werden dabei in Minuten angegeben. Unter dt (s) wird das Intervall in Sekunden angegeben, in dem das VI aufgerufen wird. Wenn dt (s) kleiner oder gleich null ist, wird dieser Wert automatisch berechnet.

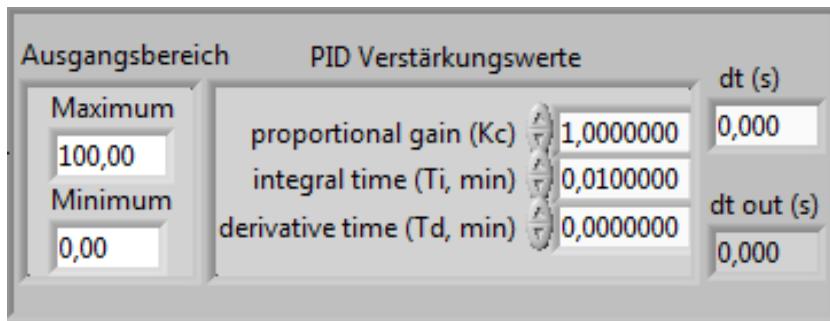


Abbildung 40: PID-Regler, Frontpanel

6.5 Zweipunktregler als SubVI

Ein Zweipunktregler-Baustein ist in LabVIEW nicht vorhanden und musste selbst erstellt werden. Die Abbildung 41 zeigt den erstellten SubVI-Baustein im Blockdiagramm. Als SubVI's werden Unterprogramme in LabVIEW bezeichnet. Diese enthalten den Programmcode und werden mit den entsprechenden Datenquellen verdrahtet. Der Zweipunktregler ist wie in Kapitel 3.2.9 beschrieben aufgebaut und ist für alle Regelungstechnischen Anwendungen benutzbar.

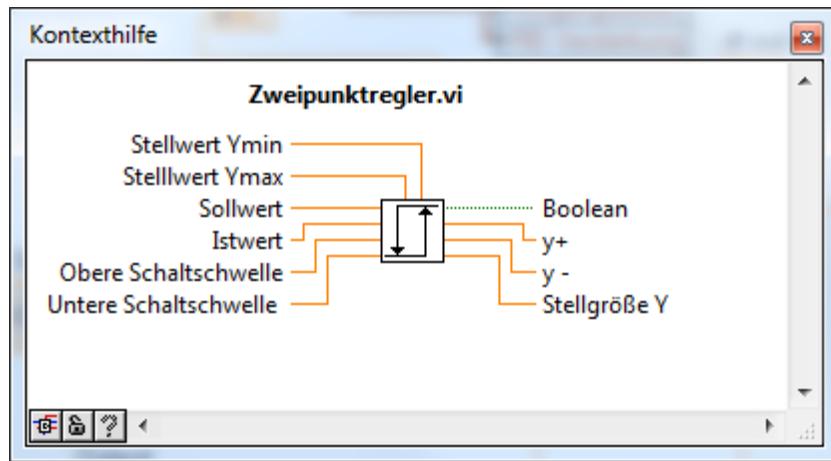


Abbildung 41: Zweipunktregler, Blockdiagramm

Die Einstellung des Reglers wird im Frontpanel durchgeführt. Die Abbildung 42 zeigt die einstellbaren Parameter. Bei Signalzustand „Ein“ wird die Stellgröße y_{\max} und bei Signalzustand „Aus“ die Stellgröße y_{\min} angepasst. Die beiden Schaltschwellen der Hysterese können unter OTP (Oberer-Trigger-Punkt) und UTP (Unterer-Trigger-Punkt) parametriert werden. Die Parametrierung kann auch im laufenden Betrieb jeweils an die Regelstrecke angepasst werden.

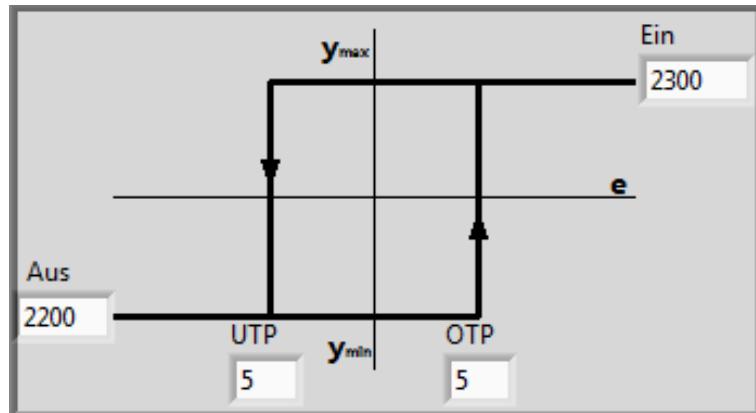


Abbildung 42: Zweipunktregler, Frontpanel

6.6 Gesamtprogramm

Die Abbildung 43 zeigt das gesamte Blockdiagrammfenster des Programms.

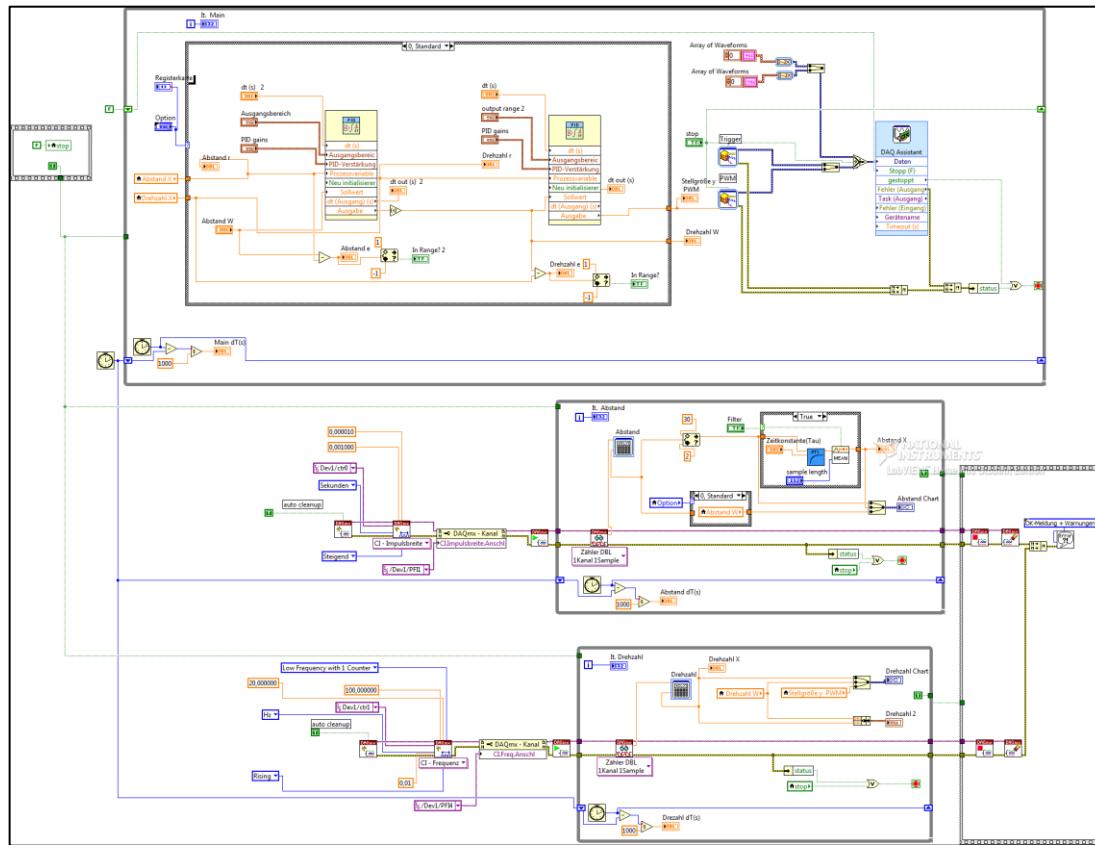


Abbildung 43: Blockdiagramm des gesamten Programms

Oben im Bild erkennt man die Hauptschleife. Die auswählbaren Regelstrukturen auf dem Frontpanel sind im Blockdiagramm in der jeweiligen Case-Struktur realisiert. Außerdem erfolgt hier die Erzeugung und die Ausgabe des PWM-Signals sowie des Trigger-Signals. Darunter erkennt man jeweils die While-Schleifen zum Einlesen der Lüfterdrehzahl und des Ballabstandes.

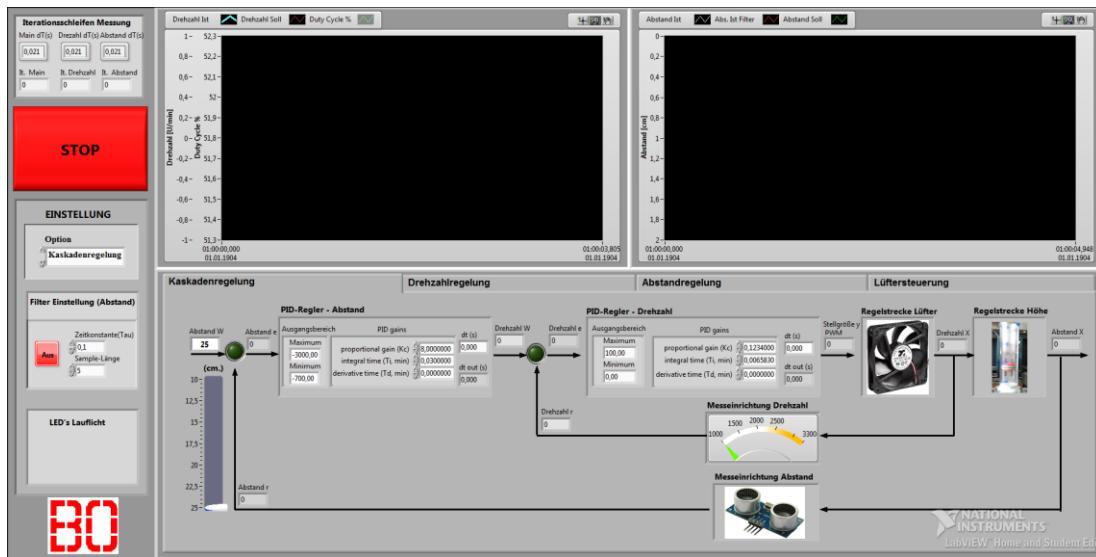


Abbildung 44: Frontpanel des gesamten Programms

Die Abbildung 44 zeigt das Frontpanel des Programms. Dargestellt ist hier die Kaskadenregelung (s. Kapitel 3.2.3) mit der entsprechenden Regelstruktur. Oben im Bild erkennt man die Signalverlaufsdiagramme, in denen die jeweilige Messgröße grafisch dargestellt wird. Oben links sind die jeweiligen Schleifeniterationszeiten dargestellt. Die verschiedenen Regelungen und die Lüftersteuerung können über das Feld „Einstellungen Option“ während der Programmausführung ausgewählt werden. Zusätzlich kann unter „Einstellungen Filter“ der PT_1 -Filter und der gleitende Mittelwert parametriert werden. Mit Betätigen des Stop-Buttons wird das ganze Programm beendet. Die Abbildung 44 ist zur besseren Übersicht im Anhang 9.1 beigefügt.

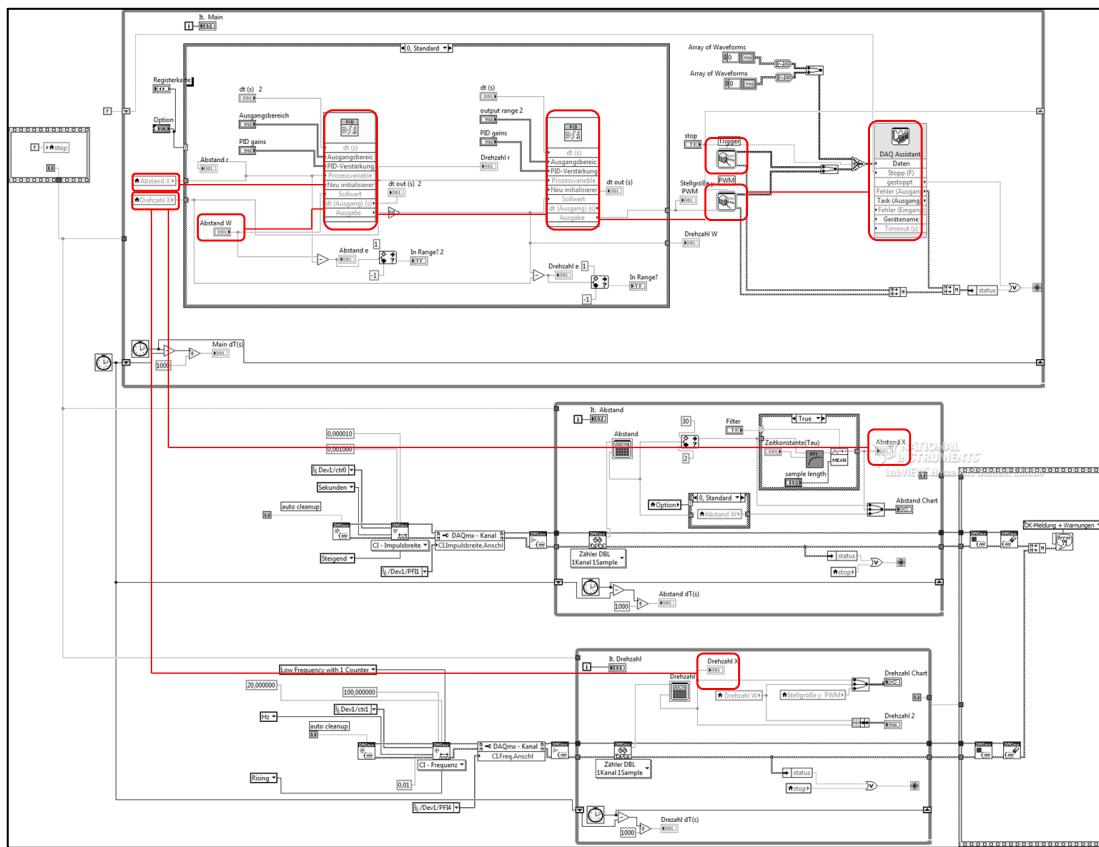


Abbildung 45: Blockdiagramm: Kaskadenregelung

Die Abbildung 45 zeigt die Kaskadenregelung im Blockdiagramm des Gesamtprogramms. Rot hervorgehoben ist die Reglerstruktur sowie die wichtigsten Bausteine wie z.B. Regelgröße, Führungsgröße, PID-Regler, Signal-Simulieren-VI, Analogausgabe. Die Abbildung 45 ist zur besseren Übersicht im Anhang 9.2 beigefügt.

7 Ergebnisse

7.1 Vergleich der Lüfterregelung

Die Regelstrecke des Lüfters wurde in Kap. 4.1.1 identifiziert. Basierend auf dieser Regelstrecke wurde nach der Pol-/Nullstellenkompensation der PI-Regler entworfen. Die berechneten Reglerparameter in Kap.5.1 werden nun anhand des geschlossenen Regelkreises verglichen.

Nachstehend sind die Sprungantworten des geschlossenen Regelkreises mit unterschiedlichen Verstärkungsparametern dargestellt.

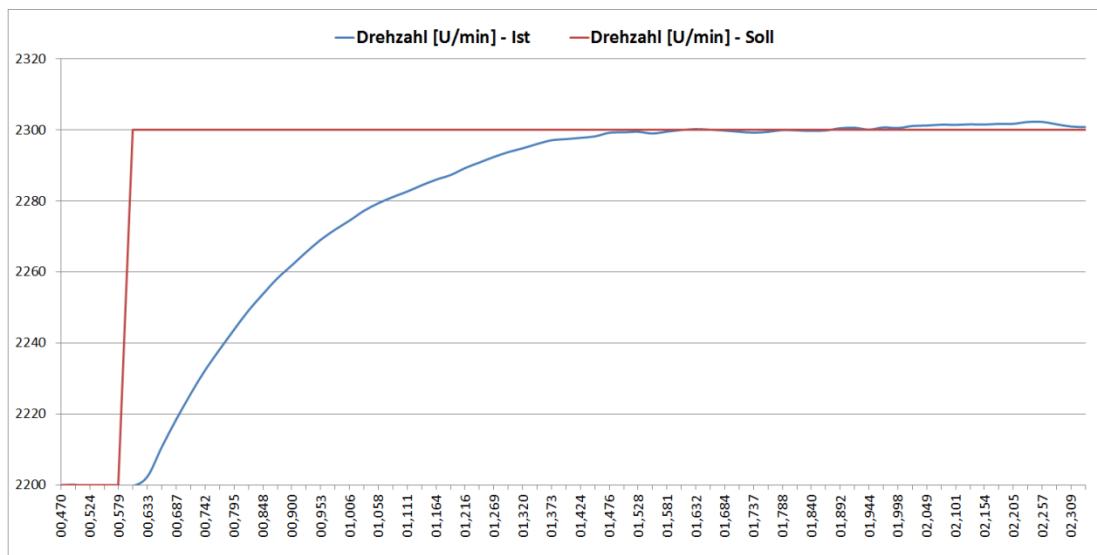
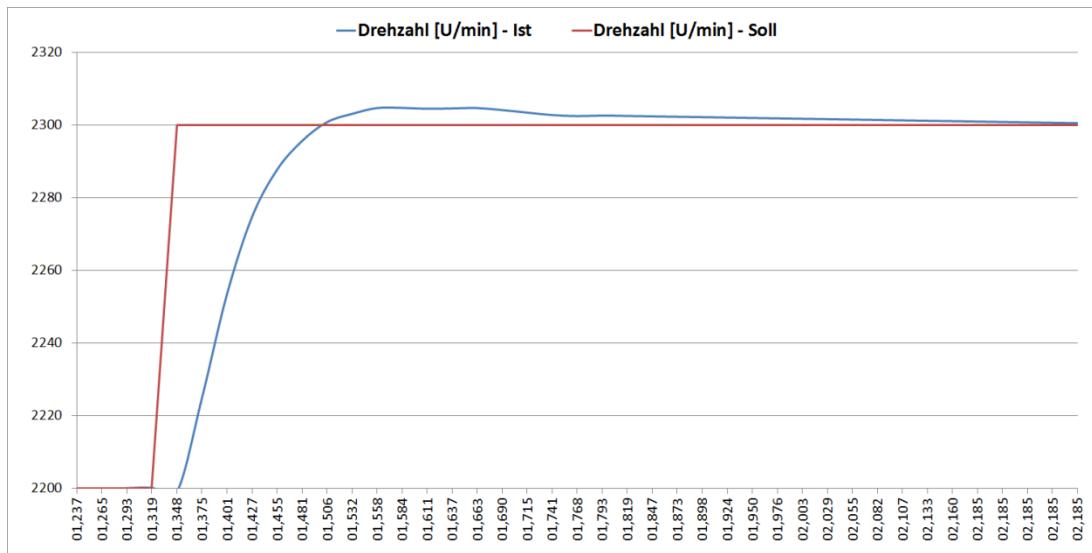


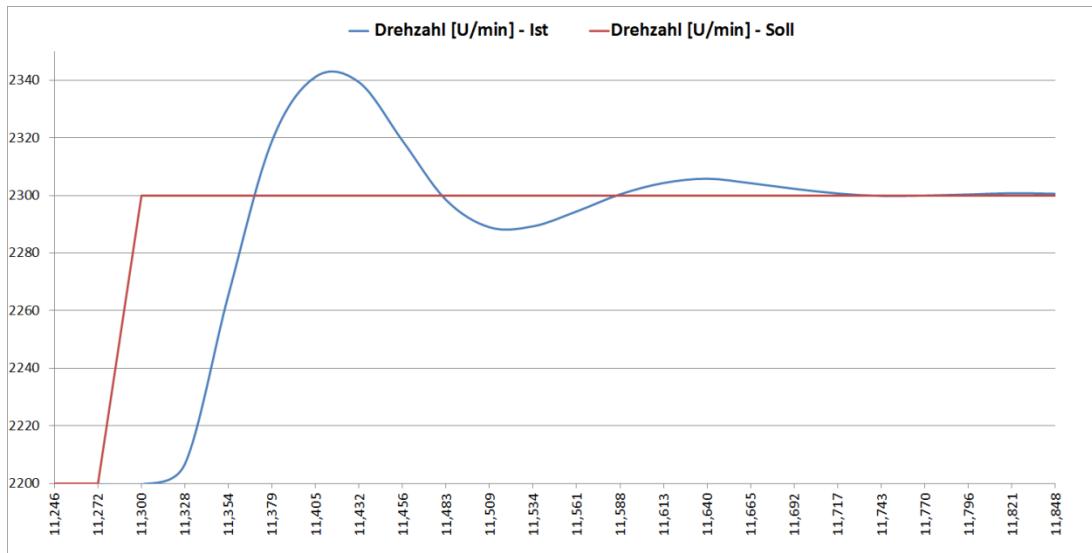
Abbildung 46: Sprungantwort des geschlossenen Regelkreises des Lüfters ($K_R=0,03448$; $T_N=0,39$)

Bei einer sprungartigen Änderung der Führungsgröße zeigt der Verlauf der Regelgröße wieder ein PT_1 -Verhalten (s. Abbildung 46). Bei einem Verstärkungswert von $K_R = 0,03448$ erreicht die Regelgröße langsam und ohne Überschwingen den neuen Sollwert nach ca. 0,897 Sekunden. Die Regelabweichung ist dabei minimal.

In der Abbildung 47 ist der Verlauf der Regelgröße mit der Verstärkung von $K_R = 0,13448$ dargestellt. Die Anstiegszeit des Systems ist kürzer, wodurch sich der Sollwert nach ca. 0,158 Sekunden einstellt. Das System wird ca. sechs Mal schneller ausgeregelt und führt zum leichten Überschwingen. Eine bleibende Regeldifferenz stellt sich nicht ein.

Abbildung 47: Sprungantwort des geschlossenen Regelkreises des Lüfters ($K_R=0,13448$; $T_N=0,39$)

In der Abbildung 48 ist der Verlauf der Regelgröße mit der Verstärkung von $K_R = 0,26896$ dargestellt. Durch die zu hohe Verstärkung schwingt die Regelgröße deutlich über den Vorgabewert und nähert sich dann dem Sollwert. Das System wird nach ca. 0,288 Sekunden ohne bleibende Regelabweichung ausgeregelt.

Abbildung 48: Sprungantwort des geschlossenen Regelkreises des Lüfters ($K_R=0,26896$; $T_N=0,39$)

Die Pol-/ Nullstellenkompensation liefert bei der Regelstrecke des Lüfters gute Ergebnisse. Die Führungsgröße wird schnell erreicht, keine zu hohe Überschwingung und keine Regelabweichung. Weil die Streckenübertragungsfunktionswerte jedoch graphisch abgelesen wurden und diese fehlerbehaftet sind, kann die Zeitkonstante der Strecke deshalb nicht genau kompensiert werden. Dennoch erhält man ein gutes Einschwingverhalten der Regelgröße. Durch Verkleinerung der neuen Zeitkonstante

T_{RK} wird die Verstärkung des Reglers größer und das System schneller. Ab dem Verstärkungsfaktor von ca. 0,5 führt dies zum instabilen Verhalten. Ausgehend von den drei berechneten Werten (s. Tabelle 1) zeigte sich bei dem Verstärkungswert von $K_R = 0,13448$ das optimalste Systemverhalten. Durch das Experimentieren mit verschiedenen Verstärkungswerten, wurde das System mit dem Verstärkungswert von $K_R = 0,1734$ weiter optimiert.

7.2 Vergleich der Ballregelung

Eine Kaskadenregelung wurde aufgebaut um den realen Prozess in Reihe geschaltete Einzelprozesse aufzuteilen. Dadurch kann die Regelstrecke des Balles separat betrachtet werden. Der drehzahlunterlagerte Regelkreis wurde, wie in Kapitel 7.1 beschrieben, parametriert.

Die Regelstrecke des Balles wurde in Kap. 4.1.2 identifiziert. Basierend auf dieser Regelstrecke wurden PID-Regler nach der Pol/Nullstellenkompensation und nach der empirischen Methode entworfen. Diese entworfenen Parameter werden nun anhand des geschlossenen Regelkreises verglichen. Außerdem wird das Verhalten mit einem Zweipunktregler betrachtet.

Kompensationsregler

Die Sprungantwort des geschlossenen Regelkreises ist in der Abbildung 49 dargestellt. Der Regler wurde nach den Pol/Nullstellenkompensation-Parametern eingestellt (s. Kapitel 5.2).

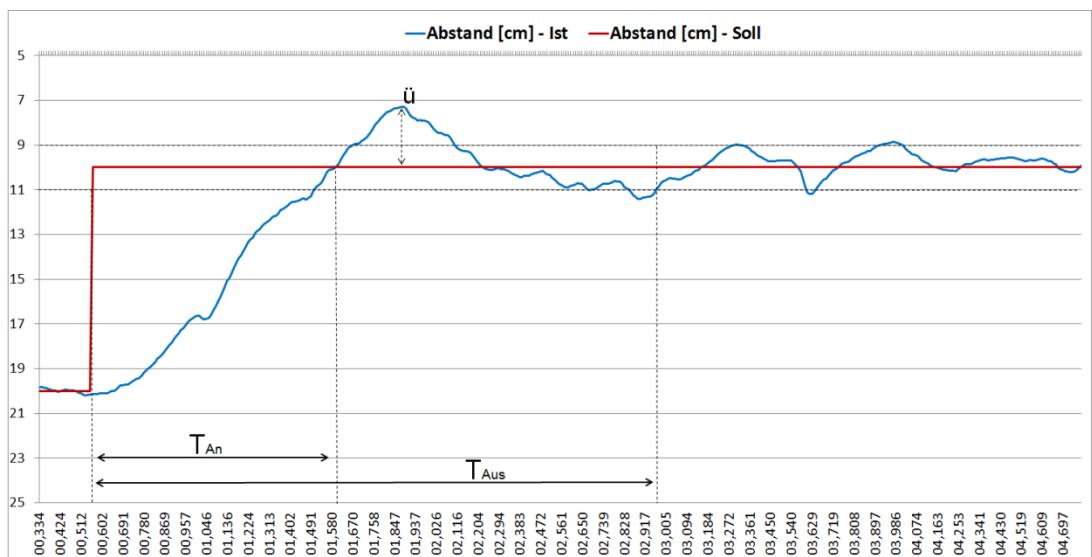


Abbildung 49: Sprungantwort des geschlossenen Regelkreises des Balles mit Pol/Nullstellenkompensation

Der geschlossene Regelkreis mit den verwendeten Parametern

$K_R = 11,4658$ $T_N = 1,7772$ und $T_V = 0,3154$ ist in Abbildung 49 dargestellt.

Bei einer sprungartigen Änderung der Führungsgröße zeigt der Verlauf der Regelgröße ein PT_2 -Verhalten. Die Regelgröße steigt erst nach einer kurzen Verzögerung sehr schnell an, schwingt mit einer Überschwingweite⁵ von ca. $\ddot{u} = 27\%$ über den Vorgabewert und nähert sich dann dem Sollwert. Die Anregelzeit⁶ beträgt ca. 1,048 Sekunden und das System wird nach ca. 2,415 Sekunden ausgeregelt⁷. Eine minimale Regelabweichung bleibt bestehen.

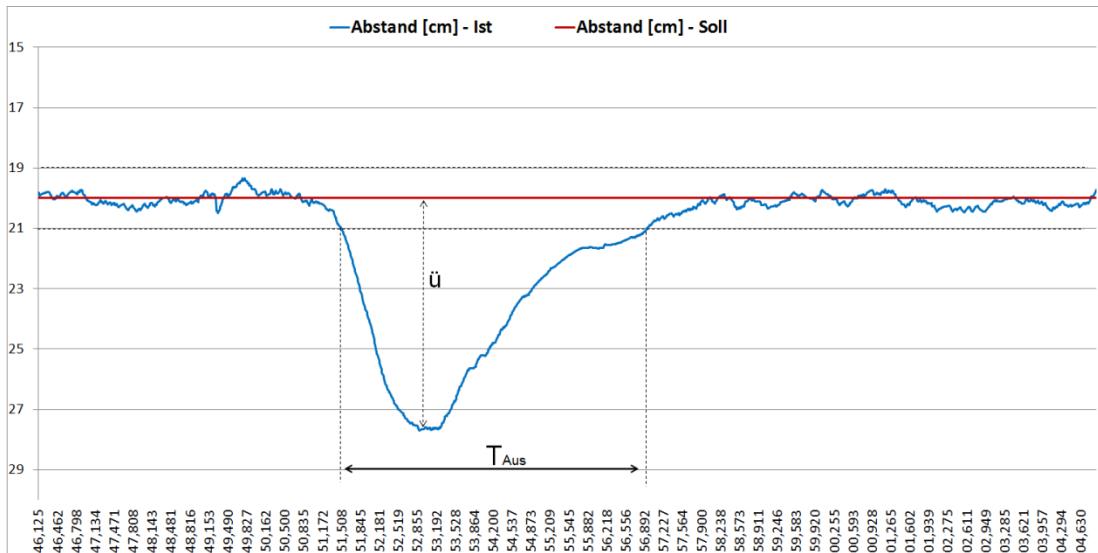


Abbildung 50: Einschwingvorgang der Regelgröße nach Auftreten der Störgröße mit Pol-/Nullstellenkompensation

Das Störverhalten des geschlossenen Regelkreises ist in der Abbildung 50 dargestellt. Nach Einwirkung einer konstanten Störgröße (Veränderung der Luftströmung) auf die Strecke des Balles, sinkt die Regelgröße sehr schnell ab. Die Unterschwingweite beträgt dabei ca. $\ddot{u} = 37,5\%$. Die Störgröße wird nach ca. 5,472 Sekunden ausgeregelt ($\varepsilon = \pm 5\%$) und eine minimale Regeldifferenz stellt sich ein.

Nach der Kompensation der Zeitkonstanten der Regelstrecke sollte der geschlossene Regelkreis ein PT_1 -Verhalten aufweisen. Dieser weist jedoch ein PT_2 -Verhalten auf. Daraus kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die Regelstrecke des Balles einer höheren Ordnung entsprechen muss.

Mit der Pol-/ Nullstellenkompensation werden nur zwei bekannte Zeitkonstanten kompensiert. Bei Strecken höherer Ordnung müssen alle Zeitkonstanten bekannt sein um jeweils die zwei größten davon mit der Pol-/Nullstellenkompensation kompensieren

⁵ Maximales Überschwingen bezogen auf den Sollwert

⁶ Regelgröße erreicht nach einem Sprung der Führungsgröße zum ersten Mal den Sollwert

⁷ Regelgröße verbleibt innerhalb des Fehlerbandes ($\varepsilon = \pm 10\%$)

zu können. Der Reglerentwurf für Strecken höherer Ordnung muss deshalb neu betrachtet und ausgelegt werden.

Obwohl der Regler für eine PT_2 -Strecke ausgelegt wurde, stellt sich ein Übergang vom alten zum neuen stationären Sollwert ein. Der Regelkreis ist dabei immer stabil und die Regelabweichung weitgehend minimal. Störgrößen werden jedoch nach einer starken Unterschwingweite nur langsam ausgeregelt.

Empirische Einstellregeln

Die Sprungantwort des geschlossenen Regelkreises ist in der Abbildung 51 dargestellt. Der Regler wurde nach den Einstellregeln der empirischen Methode eingestellt (s. Kapitel 5.3).

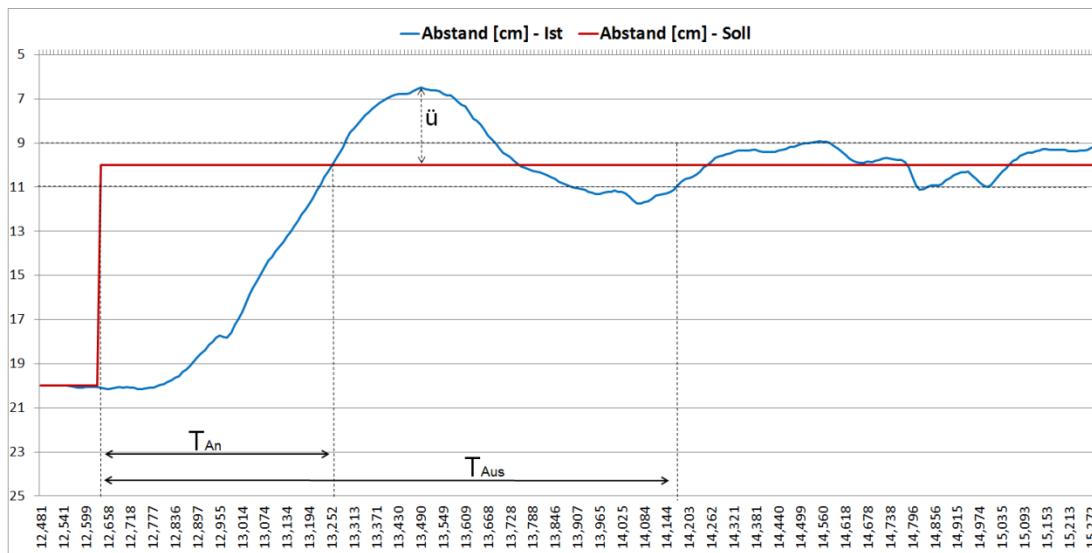


Abbildung 51: Sprungantwort des geschlossenen Regelkreises des Balles mit Empirischen Einstellparametern

Der geschlossene Regelkreis mit den verwendeten Parametern

$K_R = 23,55$, $T_N = 2,324$, $T_V = 0,0955$ ist in Abbildung 51 dargestellt.

Bei einer sprungartigen Änderung der Führungsgröße stellt sich die Regelgröße nach einer kurzen Verzögerung schnell und mit einer Überschwingweite von ca. $\ddot{u} = 35\%$ ein. Die Anregelzeit beträgt ca. 0,622 Sekunden und das System wird nach ca. 1,543 Sekunden ausgeregelt. Eine minimale Regelabweichung bleibt bestehen.

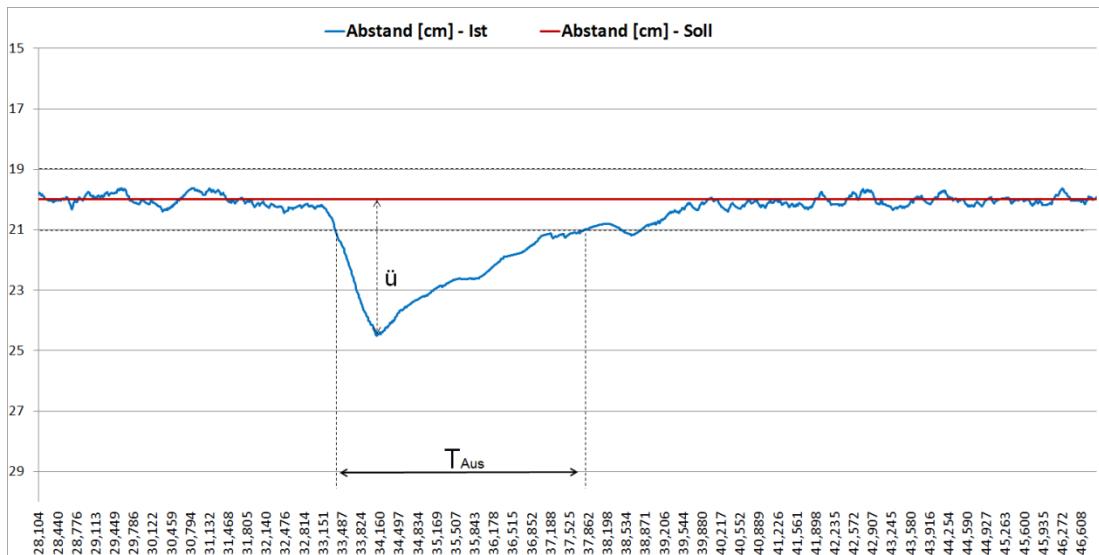


Abbildung 52: Einschwingvorgang der Regelgröße nach Auftreten der Störgröße mit Empirischen Einstellparametern

Das Störverhalten des geschlossenen Regelkreises ist in der Abbildung 52 dargestellt. Nach Einwirkung einer konstanten Störgröße (Veränderung der Luftströmung) auf die Strecke des Balles sinkt die Regelgröße sehr schnell ab. Die Unterschwingweite beträgt dabei ca. $\ddot{U} = 22,2\%$. Die Störgröße wird nach ca. 4,384 Sekunden ausgeregelt und eine minimale Regeldifferenz stellt sich ein.

Obwohl die Auslegung für einen aperiodischen Einschwingvorgang mit Führungsverhalten in kürzester Dauer erfolgt, zeigt das Ergebnis, dass die Regelgröße dennoch stark überschwingt. Im Vergleich zur Auslegung nach der Pol-/Nullstellenkompensation ist die An- und Ausregelzeit kürzer, aber das Führungsverhalten durch das deutliche Überschwingen schlechter geworden. Störgrößen werden jedoch mit einer niedrigeren Unterschwingweite und in einer kürzeren Zeit ausgeregelt. Durch Verkleinern der viel zu hohen Reglerverstärkung kann dennoch ein ausreichendes Regelverhalten erzielt werden. Obwohl die Parameter K_S , T_u und T_g die Regelstrecke nur ungenügend beschreiben, kann für das System mit wenig Aufwand ein entsprechender Regler entworfen werden.

Zweipunktregler

In der Abbildung 53 sieht man das Regelverhalten mit einer Zweipunktregelung.

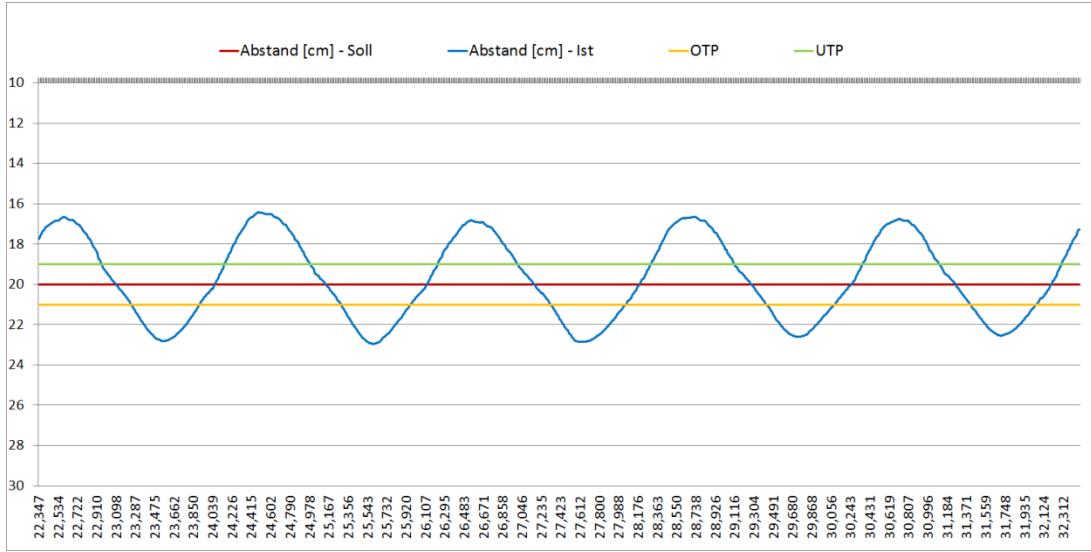


Abbildung 53: Regelung mit Zweipunktregler

Der geschlossene Regelkreis mit den verwendeten Parametern

$W = 20 \text{ cm}$, $\text{OTP} = 21 \text{ cm}$, $\text{UTP} = 19 \text{ cm}$ ist in Abbildung 53 dargestellt.

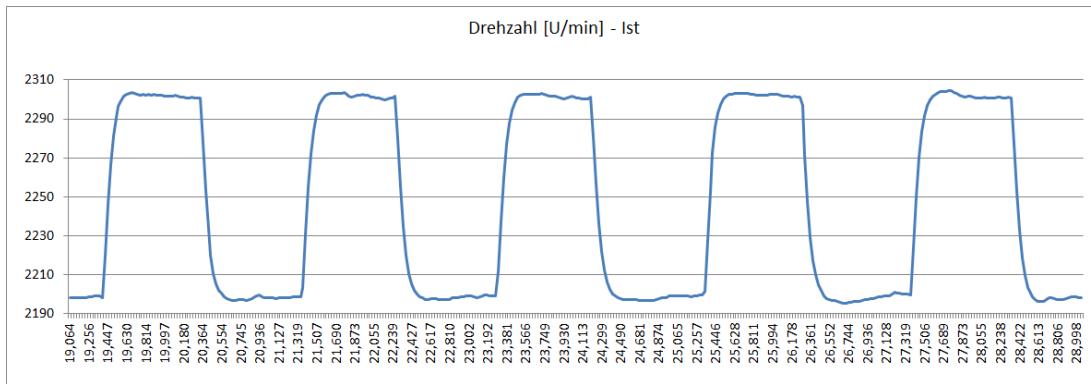


Abbildung 54: Zeitlicher Verlauf der Stellgröße

Die Stellwerteinstellungen des Reglers sind mit $y_{\max} = 2300 \text{ U/min}$ und

$y_{\min} = 2200 \text{ U/min}$ parametriert. Der zeitliche Verlauf der Stellgröße ist in Abbildung 54 dargestellt.

Die Regelgröße steigt exponentiell an bis die obere Schaltschwelle erreicht ist. Wenn die obere Schaltschwelle erreicht ist, schaltet der Regler ab (Stellwert y_{\min}). Wegen der Trägheit des Balles steigt die Regelgröße noch weiter an und überschreitet die obere Schaltschwelle. Nach dieser Verzögerungszeit fällt der Ball und die Regelgröße nimmt

ab, bis die untere Schaltschwelle erreicht ist. In diesem Zeitpunkt schaltet der Regler wieder ein (Stellwert y_{\max}). Wegen der Trägheit des Balles sinkt die Regelgröße währenddessen noch weiter ab und unterschreitet die untere Schaltschwelle. Nach einer gewissen Zeit steigt diese wieder exponentiell an bis die obere Schaltschwelle wieder erreicht wird und der Regler abschaltet. Es ergibt sich ein periodischer Verlauf. Die Einknicke in dem dargestellten Diagramm, kommen durch die auftretenden Schwankungen des Balles im Luftstrom.

Die Regelgröße schwankt um den Sollwert. Der Sollwert wird somit relativ ungenau eingehalten. Die Regelabweichung kann durch eine kleinere Hysterese verringert werden. Die Schwankungsbreite wird dadurch kleiner, welche jedoch zu einer höheren Schalfrequenz führt. Mit der Anpassung der Stellgröße kann eine zusätzliche Minimierung der Abweichung erzielt werden. Dadurch kann es aber möglich sein, dass ein neuer Sollwert nicht erreicht werden kann. Das Verhalten der Regelstrecke spielt dabei eine wichtige Rolle. Der Zweipunktregler verhält sich bei der Regelstrecke des Balles ähnlich wie ein P-Regler. Im Vergleich zum PID-Regler weist dieser jedoch eine größere Schalthäufigkeit auf. Dies wirkt sich negativ auf die Lebensdauer des Lüfters aus.

Der Zweipunktregler ist für diese Regelstrecke ungeeignet, aufgrund der kleineren Zeitkonstante der Regelstrecke. Dies hat zu folge, dass der Lüfter viel zu häufig Ein- und Ausgeschaltet wird. Durch die große Schwankungsbreite, hohe Schalfrequenz sowie eine hohe Regelabweichung ist der Zweipunktregler für diese Regelstrecke ungünstig.

7.3 LabVIEW

Die Realisierung einer Echtzeitregelung mit LabVIEW erfordert eine echtzeitfähige Mess- und Steuerkarte der Firma National Instruments. Zusätzlich muss das Real-Time-Modul installiert sein. In dieser Arbeit lag die Version 14.0 für das allgemeine Betriebssystem von Microsoft Windows sowie eine nichtechtzeitfähige Datenerfassungskarte (PCI-6221) von National Instruments vor.

LabVIEW nutzt die Multithreading-Technologie. Diese ermöglicht eine simultane Verarbeitung verschiedener Prozesse. Die Aufteilung dieser auf die Prozesskerne übernimmt LabVIEW automatisch. Der Vorteil ist, dass sich Ereignisse wie Mausklicks, Tastatureingaben oder andere computerinterne Prozesse nicht negativ auf die Ausführung rechenintensiver Programmteile auswirken. Für Steuer- und Regelanwendungen

ist es wichtig, dass eine konsistente und zuverlässige Ausführung von Regelschleifen stattfindet. Durch die Aufteilung der Prozesse ist die Ausführung einer Regelschleife möglich, ohne dass andere gleichzeitig ausgeführte Prozesse die Regelschleife unterbrechen.

Dadurch war es möglich auf dem vorhandenen Computer mit einem allgemeinen Betriebssystem und einer nichtzeitfähigen Datenerfassungskarte eine Regelanwendung durchzuführen.

7.4 Probleme

In diesem Abschnitt werden die Probleme, die beim Realisieren der Arbeit auftraten, erläutert.

Der Versuchsaufbau beim Projektstart führte zu keiner optimalen Regelung, weil der Ball nicht stabil im Luftstrom war. Nach der Optimierung wie in Kapitel 2.5 beschrieben wurde das System stabiler, jedoch haben Störgrößen, die den Luftstrom verändern, immer noch großen Einfluss auf die Regelgröße. Für eine störungsfreie Regelung wäre eine neue Konstruktion des Gehäuses notwendig. Dies wurde nicht umgesetzt, da es nicht Ziel der Arbeit war.

Beim Erzeugen des PWM-Signals, wie in Kapitel 6.3 beschrieben, sind Zwischenschritte entstanden. In Abhängigkeit von der Abtastfrequenz können bei der Berechnung ungerade Werte entstehen, welche zu einstellbaren Zwischenschritten führen. Wenn das simulierte Signal 25 kHz beträgt und eine Abtastfrequenz von 740.000 Samples pro Sekunde (Hz) ausgewählt wird, ergibt dies 29,6 Einstellmöglichkeiten. Aus dem Kehrwert dessen erhält man die Schrittweite 0,03378 [...] für das Tastverhältnis. Die Einstellweite stimmt nicht mit der Schrittweite überein. Es entstehen Zwischenschritte, die nicht erfasst werden können und theoretisch nicht vorhanden sind. Eine Anfrage bei National Instruments konnte keine klärende Antwort bringen. Dies wurde nicht weiter untersucht, da es den zeitlichen Rahmen gesprengt hätte.

Ein weiteres Problem entstand durch die Auswahl der automatischen Sample-Anzahl im „Signal-Simulieren Konfigurationsdialogfeld“. Dadurch wurde die Iterationszeit der Hauptschleife auf ca. 100 ms verändert. Dies führte dazu, dass eine Totzeit durch das System entstand. Durch die fehlende Angabe der Iterationszeit war diese Ausführungsverzögerung nicht feststellbar. Erst anhand der selbstgebauten Zeitmessung konnte dies festgestellt werden. Nach systematischem Vorgehen wurde die Systemverzögerungseinstellung ermittelt. Die Einstellung wurde so gewählt, dass die Schleife-

niterationszeit ca. 10 ms betrug. Weitere Untersuchungen wurden nicht mehr durchgeführt, da es über den Rahmen dieser Arbeit hinausgehen würde.

Des Weiteren wurde der Analogausgang nach Beenden des Programms nicht immer auf 0 V zurückgesetzt. Demzufolge wurde das PWM-Signal mit einem Tastverhältnis von eins weiter ausgegeben. Dies führte dazu, dass sich der Lüfter mit voller Drehzahl drehte. Da die Ballhöhe mechanisch begrenzt wurde, zog dies keine Folgen nach sich. Ein anderes reales System könnte jedoch so beschädigt oder zerstört werden. Auch durch eine Anfrage bei National Instruments konnte der Fehler nicht behoben werden. Zwar wurde ein überarbeitetes Programm zugeschickt, welches die Ausgangsignalwerte auf null initialisiert, jedoch trat der Fehler weiterhin auf. Dieser konnte erst durch Hinzufügen eines Schieberegisters beseitig werden. Das Programm wurde somit erst in der nächsten Iteration mit den zurückgesetzten Werten beendet.

8 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde die Höhenregelung mit dem Programm LabVIEW beschrieben. Dazu wurden die Komponenten des existierenden Versuchsaufbaus genau analysiert, um die Schwachstellen zu erfassen, ggf. zu beseitigen und so die Konstruktion effektiv zu nutzen. Für die Regelung des Lüfters und des Balles mussten zuerst die Regelstrecken erfasst werden. Dabei ergab sich, dass diese mathematisch sehr schwierig zu beschreiben wären. Deshalb wurden die Regelstrecken über die experimentelle Identifikationsmethode ermittelt. Dazu wurde der reale Prozess in Einzelprozesse aufgeteilt, um die beiden Regelstrecken separat betrachten zu können. Dabei ergab sich, dass der Lüfter ein PT1-Verhalten aufwies.

Das System beinhaltete eine Totzeit, die in einer kleinen Größenordnung als die Streckenzeitzkonstante war. Für den Reglerentwurf wurde diese aufgrund der minimalen Auswirkung nicht näher betrachtet.

Bei der Regelstrecke des Balles erwies sich diese als eine PT2-Strecke. Für den Reglerentwurf mit der Pol-/ Nullstellenkompensation mussten die Zeitkonstanten bekannt sein. Dazu wurde das Wendetangentenverfahren angewandt. Damit konnten die Zeitkonstanten ermittelt werden.

Zu beiden Regelstrecken wurden je ein Regler nach der Pol-/Nullstellenkompensation entworfen. Zusätzlich wurde zur der Ballregelstrecke ein empirischer Regler nach Chien, Hrones und Reswick entworfen sowie ein Zweipunktregler. Dabei ergab sich, dass der Zweipunktregler für diese Regelstrecke durch die große Schwankungsbreite und hohe Regelabweichung ungeeignet war.

Der geschlossene Regelkreis des Lüfters zeigte wie erwartet wieder ein PT₁-Verhalten, welches durch die neue Zeitkonstante eingestellt werden konnte.

Andererseits musste festgestellt werden, dass bei dem geregelten Regelkreis des Balles, abweichend von dem theoretischen Reglerentwurf, kein PT₁-Verhalten vorlag. Daraus konnte die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die Regelstrecke des Balles einer höheren Ordnung (z.B. PT₃) entsprechen muss. Abschließend kann festgestellt werden, dass die reale Regelstrecke von der theoretischen Betrachtung abweicht. Dabei ergab sich jedoch, dass die Pol-/Nullstellenkompensation gute Ergebnisse lieferte, auch wenn die Streckenpole nicht exakt kompensiert werden konnten. Man erhält dennoch ein schnelles Einschwingverhalten der Regelgröße ohne große Überschwingung sowie keine bleibende Regelabweichung.

Mit den Empirischen Einstellregeln können mit wenig Aufwand ausreichende Ergebnisse erzielt werden. Das konnte anhand der Vergleiche in dem Kapitel 7.2 gezeigt werden. Beide Verfahren zeigten jedoch eine hohe Unterschwingweite und ein langsames Einschwingverhalten nach Auftreten einer Störgröße.

Zur Realisierung der Regelung wurde ein Programm in LabVIEW entwickelt. Dabei ergaben sich Probleme, wie in Kapitel 7.4 beschrieben, die jedoch behoben werden konnten. Was die Realisierung der Regelung betrifft, so konnte die Funktionsfähigkeit anhand des geschriebenen Programms gezeigt werden. Andererseits musste festgestellt werden, dass die Programmierung bei komplexeren Programmstrukturen viel Einarbeitungszeit erfordert. Für einen Praktikumsversuch sollte dies berücksichtigt und daher die Verwendung von Express-VI bevorzugt werden.

Insgesamt lässt sich hieraus der Schluss ziehen, dass die Regelung mit LabVIEW wie gewollt realisiert werden konnte.

Weiteres Entwicklungspotential steckt in der Konstruktion des Versuches. Hier könnte der Lüfter direkt unter dem Plexiglasrohr positioniert werden. Des Weiteren könnten der Lüfter sowie der Sensor durch exaktere Komponenten ausgetauscht werden. Zusätzlich könnte die Regelung unter Verwendung einer Echtzeitkarte und mit einem anderen Programm sowie mit der Fuzzy-Regelung getestet werden.

Literatur- und Quellenverzeichnis

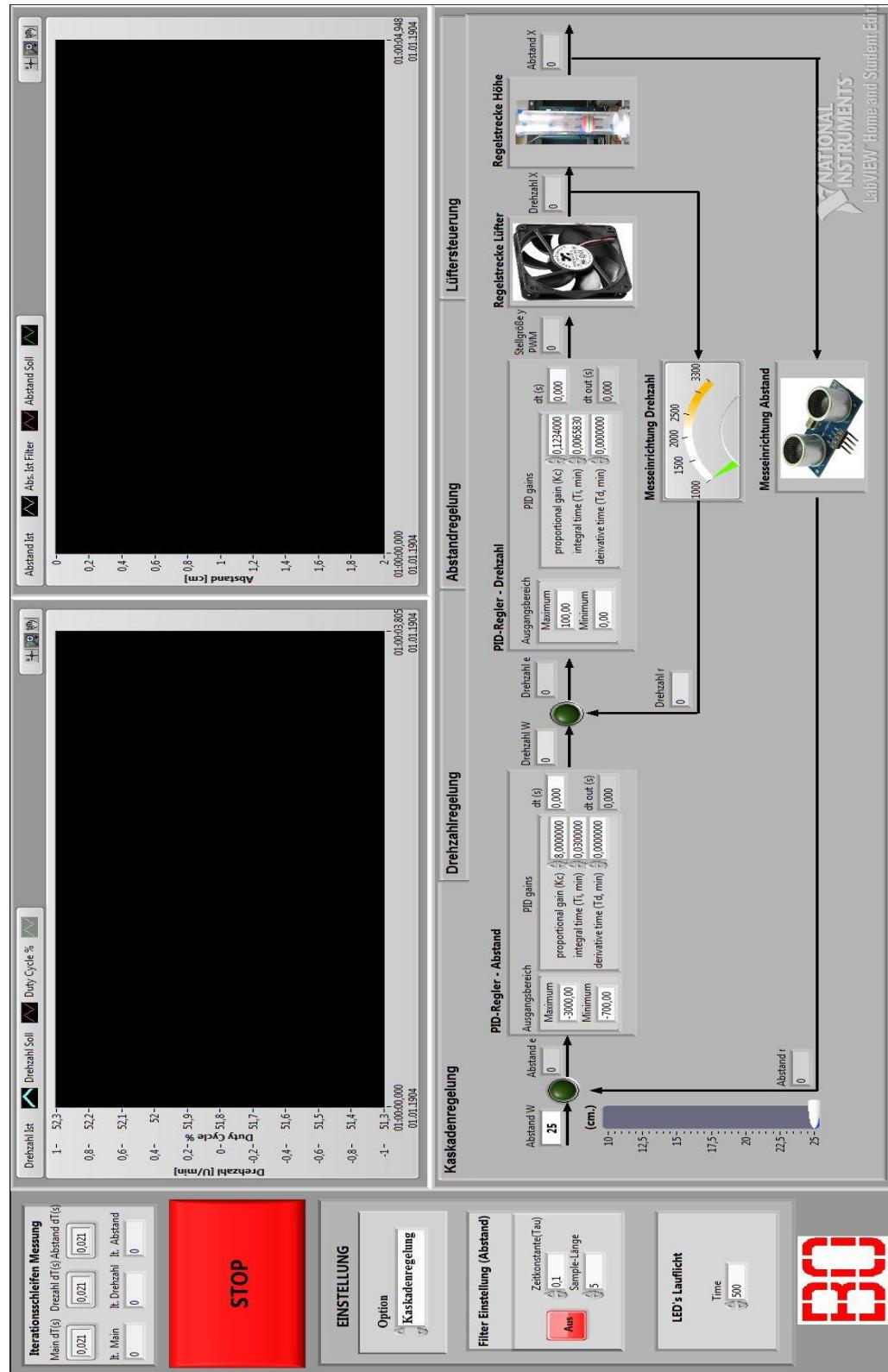
- [1] „www.europeanthermodynamics.com,“ [Online]. Available:
<http://www.europeanthermodynamics.com/products/fans/axial-fans>.
[Zugriff am 14 08 2015].
- [2] „www.elektronik-kompendium.de,“ [Online]. Available:
<http://www.elektronik-kompendium.de/sites/com/1503111.htm>.
[Zugriff am 27 7 2015].
- [3] „www.letsmakerobots.com,“ [Online]. Available:
http://letsmakerobots.com/files/field_primary_image/HC-SR04-lg.jpg?__Sectio?.
[Zugriff am 2015 7 27].
- [4] „<http://germany.ni.com/>,“ [Online]. Available:
http://sine.ni.com/images/products/us/050621_pci6221_l.gif.
[Zugriff am 2015 07 27].
- [5] J. Rahman, LabVIEW für Studenten, Pearson Studium, 2004.
- [6] „www.haustechnikdialog.de,“ [Online]. Available:
<http://www.haustechnikdialog.de/SHKwissen/Images/laminar-turbulent-MFink.jpg>.
[Zugriff am 2015 08 03].
- [7] W. Lutz, Taschenbuch der Regelungstechnik, 6. erweiterte Auflage, Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch, 2005.
- [8] G. Schulz, Regelungstechnik 1, 2 Auflage - Lineare und Nichtlineare Regelung, Rechnergestützter Reglerentwurf, Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2004.
- [9] B. P. Friedrich Plötzeneder, Praxiseinstieg LabVIEW, Franzis Verlag GmbH, 2013.
- [10] E. M. Wolfgang Georgi, Einführung in LabVIEW, Fachbuchverlag Leipzig, 2009.

Anhang

9 Anhang

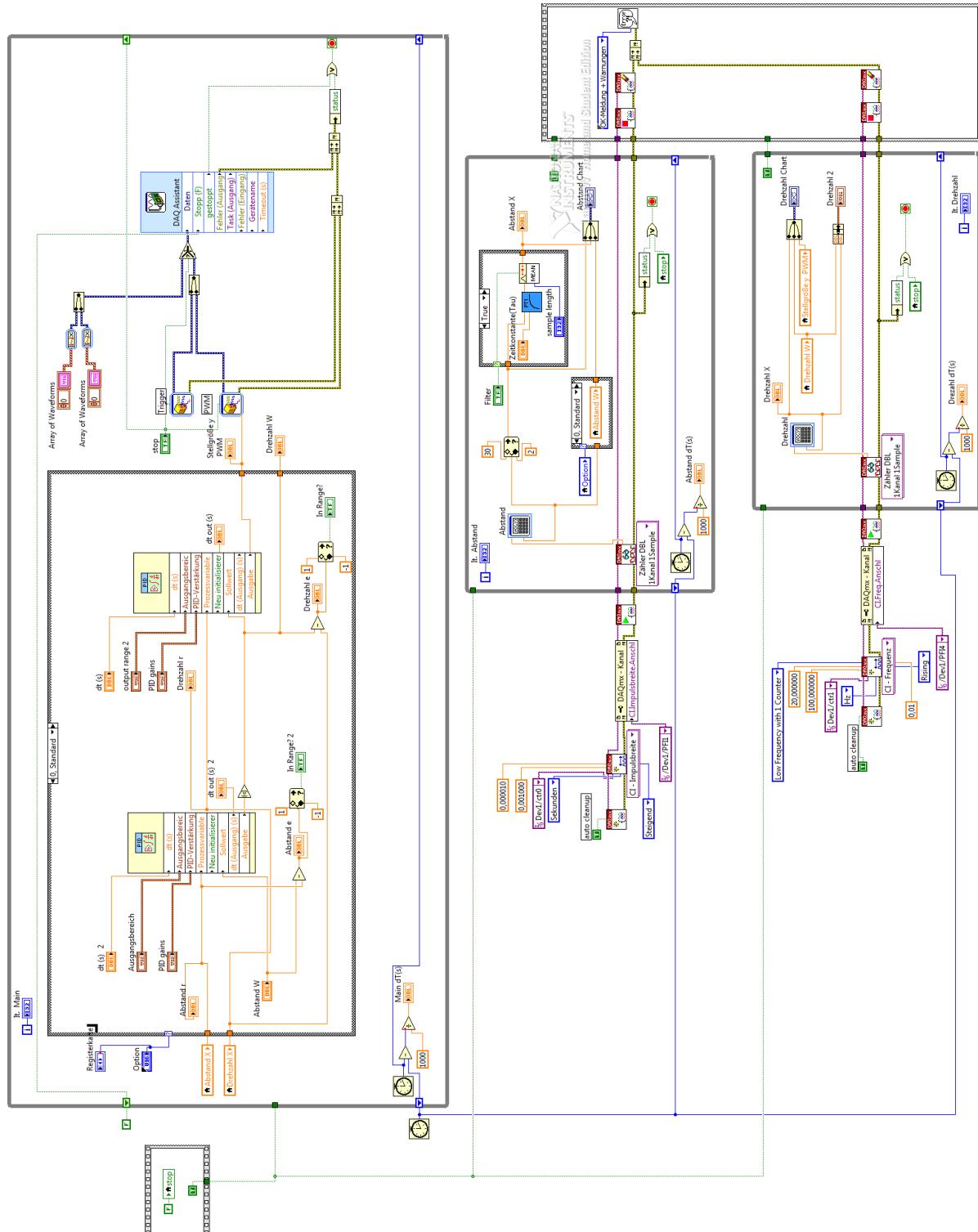
Der Anhang und das Gesamtprogramm ist in elektronischer Form auf einer CD dieser Arbeit beiliegt.

9.1 Gesamtprogramm: Frontpanel



Anhang

9.2 Gesamtprogramm: Blockdiagramm



Der Anhang und das Gesamtprogramm ist in elektronischer Form auf einer CD dieser Arbeit beiliegt.

9.3 Lüfter Datenblatt



European Thermodynamics Limited
Intelligent Thermal Management

DC fan – 120x120x25mm Series

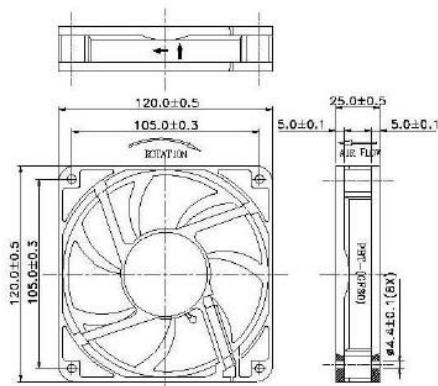
Technical options:

- Frequency generator (tachometer output)
- Temperature / speed control
- Locked wire, fan failure output
- Pulse width modulation
- IP coating

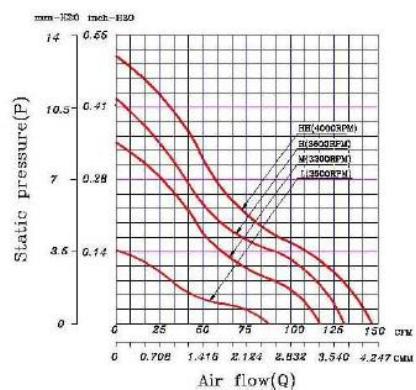
120 x 120 x 25 mm Series

Rev III

Dimensions



Performance Curves



* All fans are with electronic protection against reverse polarity. The fan only operates when the polarity is correct.



European Thermodynamics Limited
Intelligent Thermal Management

Brushless DC Motor	Bearing Types
Housing: PBT 94V0	CeraDyna A (partial ceramic)
Impeller: PBT 94V0	CeraDyna C (full ceramic)
Weight: 200g	Ball bearing
Impedance protected	Sleeve
Lead wire UL 1007 AWG	1 Ball – 1 Sleeve

Specifications:

Model	Rated Voltage (VDC)	Rated Current (Amp)	Input Power (Watts)	Nominal Speed (RPM)	Airflow (CFM)	Static Pressure (inch-H2O)	Noise Level (dBA)
FD1212-AP2XXE	12	0.85	10.2	4000	146.97	0.51	52.2
FD1212-A02XXE	12	0.85	10.2	4000	146.97	0.51	52.2
FD1212-A12XXE	12	0.67	8.04	3600	131.03	0.43	49.9
FD1212-A22XXE	12	0.45	5.4	3200	117.05	0.35	48.3
FD1212-A32XXE	12	0.29	3.48	2500	87.8	0.14	42
FD2412-AP2XXE	24	0.47	11.28	4000	146.97	0.51	52.2
FD2412-A02XXE	24	0.47	11.28	4000	146.97	0.51	52.2
FD2412-A12XXE	24	0.33	7.92	3600	131.03	0.43	49.9
FD2412-A22XXE	24	0.27	6.48	3200	117.05	0.35	48.3
FD2412-A32XXE	24	0.17	4.08	2500	87.8	0.14	42

How to read the DC Fan part number									ACT-RX Technology Corporation						
FD	05	25	-	A	1	0	1	1	1	A					
Model FD: DC Fan FW: DC Blower FH: High Performance DC Fan		Frame Dimension 25: 25x25 mm 30: 30x30 mm 35: 35x35 mm 40: 40x40 mm 45: 45x45 mm 50: 50x50 mm or 51x51 mm		Fan Speed 0: Super High 1: High 2: Medium 3: Low 4: Super Low P: PWM	Fan Revision 0: Rev. 1 1: Rev. 2 2: Rev. 3 3: Rev. 4 4: Rev. 5 5: Rev. 6 6: Rev. 7 7: Rev. 8		Connector 0: 4 pin daisy Chain 1: Lead wire 2: 2 pin 3: 3 pin 4: 4 pin 5: 6 pin 9: Other		Frame Thickness A: 10 mm B: 12 mm C: 15 mm D: 20 mm E: 25 mm F: 33 mm G: 38 mm M: 28 mm N: 17 mm H: 22 mm J: 09 mm						
Voltage 05: 5VDC 12: 12VDC 24: 24VDC 48: 48VDC				Bearing A: CeraDyna A C: CeraDyna C B: 1-Ball-1-Sleeve D: 2-Ball S: Sleeve				Protection/Function 1: Polarity protection (PP) 3: PP+3rd wire FG (Frequency Generator output) 4: PP+AR (Auto Restart) 5: PP+AR+3rd wire FG 6: PP+AR+3rd wire TC (Temperature Control) 7: PP+AR+3rd wire RD (Rotation Detection) 8: PP+AR+PWM (Pulse Width Modulation)							

9.4 Ultraschallsensor Datenblatt

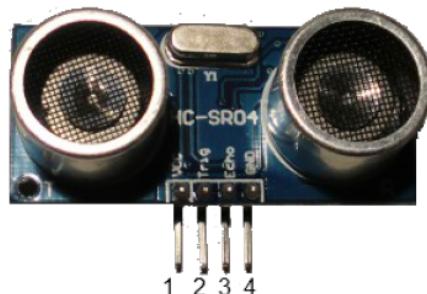
Ultraschall Messmodul HC-SR04

KT-elektronic

Beschreibung:

Das Ultraschall Modul HC-SR04 eignet sich zur Entfernungsmessung im Bereich zwischen 2cm und ca. 3m mit einer Auflösung von 3mm. Es benötigt nur eine einfache Versorgungsspannung von 5V bei einer Stromaufnahme von <2mA. Nach Triggerung mit einer fallenden Flanke (TTL - Pegel) misst das Modul selbstständig die Entfernung und wandelt diese in ein PWM Signal welches am Ausgang zur Verfügung steht. Ein Messintervall hat eine Dauer von 20ms. Es können also 50 Messungen pro Sekunde durchgeführt werden.

Anwendungsbereiche: Hinderniserkennung, Entfernungs-
messung, Füllstandanzeiger, Industrieanwendungen.



Pinbeschreibung:

- 1: VCC, Versorgungsspannung 5V
- 2: Triggereingang, TTL-Pegel
- 3: Echo, Ausgang Messergebnis, TTL-Pegel
- 4: GND, 0V

Power Supply	VCC +5V +-10%, GND 0V
Signal Level (Trigger, Echo)	TTL Pegel ($L < 1,0V$)
messbare Distanz	2cm - ca. 300cm
Messintervall	0,3cm
Messungen pro Sekunde	maximal 50
Abmessungen (l, b, t) mm	45 x 21 x 18

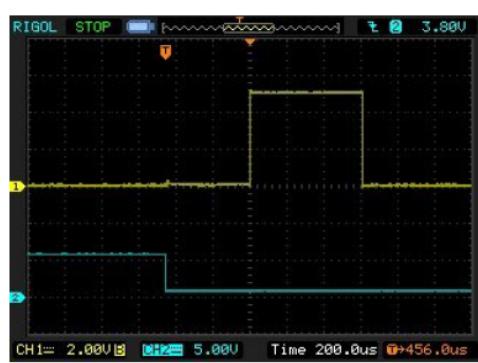
Anwendung:

Das Auslösen eines Messzyklus geschieht durch eine fallende Flanke am Triggereingang (Pin 2) für mindestens 10µs. Das Modul sendet darauf nach ca. 250µs ein 40 kHz Burst-Signal für die Dauer von 200µs. Danach geht der Ausgang (Echo, Pin 3) sofort auf H-Pegel und das Modul wartet auf den Empfang des Echos. Wird dieses detektiert fällt der Ausgang auf L-Pegel. 20ms nach Triggerung kann eine weitere Messung stattfinden. Wird kein Echo detektiert verweilt der Ausgang für insgesamt 200ms auf H-Pegel und zeigt so die erfolglose Messung an. Danach wartet das Modul auf die nächste fallende Flanke am Triggereingang und die Messung beginnt neu. Die besten Messergebnisse ergeben sich bei Reflexion an glatten, ebenen Flächen. Bei Distanzen bis 1m ist das Material der Fläche recht unkritisch. Der Winkel zum Objekt kann bei kurzen Distanzen von unter 1m bis etwa 45° betragen. Auch recht dünne Objekte werden zuverlässig erkannt. Ein normaler Kugelschreiber z.B. lässt sich bis auf eine Distanz von ca. 30cm sicher erfassen. Bei der maximalen Distanz von 3m muss schon genau gezielt werden und es sollten keine anderen Gegenstände in ähnlicher Entfernung im Sendekegel von 15° vorhanden sein.

Ultraschall Messmodul HC-SR04

Single Shot Modus:

Im folgenden ist eine einzelne Messung zu sehen. Kanal 2 ist das Triggersignal, Kanal 1 der Ausgang. Die Laufzeit des Ultraschall-Burst beträgt bei dieser Messung etwa 600 μ s (200 μ s/Div). Die angezeigte Zeit von 456 μ s setzt sich aus dem 250 μ s Delay nach Triggerung und dem anschließenden 200 μ s Burst zusammen.



Auswertung der Messung:

Für die Berechnung der Entfernung zum Messobjekt wird nun die Schallgeschwindigkeit in Luft von 343m/S (bei 20°C) herangezogen.
343m/S entsprechen 34,3cm pro Millisekunde (ms)
Daraus ergibt sich für dieses Beispiel bei 600 μ s (0,6ms):

34,3cm x 0,6ms eine Laufstrecke von 20,6cm die das Signal zurückgelegt hat.

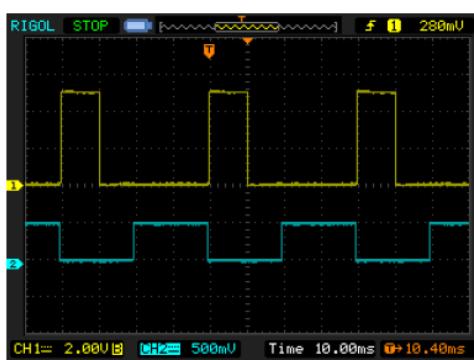
Da es sich um ein Echo handelt wird die Strecke zwei mal durchlaufen, weshalb wir den Wert halbieren müssen.

$$20,6\text{cm} / 2 = 10,3\text{cm Abstand zum Messobjekt.}$$

Kontinuierliche Messung:

Es besteht die Möglichkeit eine permanente Messung durchzuführen. Da das Modul auf die fallende Flanke des Triggereingangs reagiert ist es nicht nötig ein kurzes Triggersignal zu erzeugen. Es genügt ein Rechtecksignal mit einer Frequenz kleiner 50Hz (20mS Intervall) an den Triggereingang anzulegen um eine dauernde Messung durchzuführen.

Auf Kanal 2 liegt wieder der Triggereingang, das Rechtecksignal hat eine Frequenz von 25Hz die Amplitude beträgt 5V (Tastkopf 1:10).



Auswertung der Messung:

Bei dieser Messung beträgt das Intervall 40ms was 25 Messungen in der Sekunde entspricht. Das Messobjekt ist ca.180cm entfernt. Das Oszilloskop triggert diesmal auf die steigende Flanke von Kanal 1 und misst die Zeit bis zur Mittellinie. Die gemessene Laufzeit beträgt 10,4ms. Daraus ergibt sich eine Entfernung von:

$$10,4\text{ms} \times 34,3\text{cm} / 2 = 178,3\text{cm}$$

Eine weitere Messung mit einer Zeitbasis von 1ms/Div um die Messgenauigkeit zu erhöhen (ohne Bild) ergab eine Zeit von 10,56ms was einer Entfernung von 181cm entspricht. Die tatsächliche Entfernung betrug bei dieser Messung 182,5cm was eine Genauigkeit von besser 1% ergibt.

Ultraschall Messmodul HC-SR04

Messgenauigkeit:

Die systembedingte Messgenauigkeit beträgt ca. 3mm und hängt mit der internen Abtastrate des Moduls zusammen. Ein weiterer Faktor ist die Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit in Luft. Näherungsweise kann man die Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Temperatur im Bereich von -20°C bis +40°C mit folgender Formel berechnen:

$$c_{\text{Luft}} \approx (331,5 + 0,6 \vartheta / ^\circ \text{C}) \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Theta = Umgebungstemperatur in °C

Für 20°C Raumtemperatur ergibt sich also: $c = 331,5 + (0,6 \times 20) = 343,5 \text{ m/s}$.

Die folgende Tabelle enthält einige Werte die rechnerisch für die Laufzeit zu erwarten sind:

Entfernung zum Objekt [cm]	Laufzeit [ms] bei 20°C	Laufzeit [ms] bei 0°C
2	0,117	0,121
10	0,583	0,603
50	2,915	3,017
100	5,831	6,033
200	11,662	12,066
300 (max. Dist.)	17,492	18,100

Es zeigt sich das bei 20°C Temperaturdifferenz ein Fehler von 3,4% entsteht. Bei der Verwendung im Freien und Messung von größeren Distanzen wäre also zu überlegen ob eine Temperaturkompensation sinnvoll ist.

9.5 NI-PCI-6221 (37 Pin) Datenblatt



Technical Sales
(866) 531-6285
orders@ni.com

[Requirements and Compatibility](#) | [Ordering Information](#) | [Detailed Specifications](#) | [Pinouts/Front Panel Connections](#)
 For user manuals and dimensional drawings, visit the product page resource tab on ni.com.

Last Revised: 2014-11-06 07:14:39.0

Low-Cost M Series Multifunction Data Acquisition - 16-Bit, 250 kS/s, up to 80 Analog Inputs





- NI recommends high-speed M Series (NI 625x) for 5X faster sampling rates, high-accuracy M Series (NI 628x) for 4X higher resolution, or industrial M Series (NI 623x) for 60 VDC isolation and superior noise rejection
- 16, 32, or 80 analog inputs at 16 bits, 250 kS/s
- Up to 4 analog outputs at 16 bits, 833 kS/s (6 µs full-scale settling time)
- Programmable input range ($\pm 10, \pm 5, \pm 1, \pm 0.2$ V) per channel
- Up to 48 TTL/CMOS digital I/O lines (up to 32 hardware-timed at 1 MHz)
- Two 32-bit, 80 MHz counter/timers
- Digital triggering
- X1, X2, or X4 quadrature encoder inputs

Overview

NI M Series low-cost multifunction data acquisition (DAQ) devices provide optimized functionality for cost-sensitive applications. They have up to 80 analog inputs, 48 digital I/O lines, four analog outputs, two counter/timers, and digital triggering. Low-cost M Series devices have a one-year calibration interval. For better accuracy, faster speeds, and an extended two-year calibration service, consider high-speed and high-accuracy M Series devices.

[Back to Top](#)

Requirements and Compatibility

OS Information	Driver Information	Software Compatibility
▪ Linux®	▪ NI-DAQmx	▪ ANSI C
▪ Mac OS X	▪ NI-DAQmx Base	▪ LabVIEW
▪ Windows 2000/XP		▪ LabWindows/CVI
▪ Windows 7		▪ Measurement Studio
▪ Windows Vista x64/x86		▪ SignalExpress
		▪ Visual Basic
		▪ Visual Studio .NET

[Back to Top](#)

Comparison Tables

Family	Bus	Analog Inputs	Analog Input Resolution (bits)	Analog Outputs (AO)	AO Resolution (bits)	Max AO Rate (kS/S)	AO Range (V)	Digital I/O	Correlated (clocked) DIO
NI 6220	PCI, PXI	16	16	-	-	-	-	24	8, up to 1 MHz
NI 6221	PCI, PXI, USB	16	16	2	16	833	± 10	24	8, up to 1 MHz
NI 6221 (37-pin)	PCI	16	16	2	16	833	± 10	10	2, up to 1 MHz
NI 6224	PCI, PXI	32	16	-	-	-	-	48	32, up to 1 MHz

1/19

[www.ni.com](#)

Technical Support

Get answers to your technical questions using the following National Instruments resources.

- **Support** - Visit ni.com/support to access the NI KnowledgeBase, example programs, and tutorials or to contact our applications engineers who are located in NI sales offices around the world and speak the local language.
- **Discussion Forums** - Visit forums.ni.com for a diverse set of discussion boards on topics you care about.
- **Online Community** - Visit community.ni.com to find, contribute, or collaborate on customer-contributed technical content with users like you.

Repair

While you may never need your hardware repaired, NI understands that unexpected events may lead to necessary repairs. NI offers repair services performed by highly trained technicians who quickly return your device with the guarantee that it will perform to factory specifications. For more information, visit ni.com/repair.

Training and Certifications

The NI training and certification program delivers the fastest, most certain route to increased proficiency and productivity using NI software and hardware. Training builds the skills to more efficiently develop robust, maintainable applications, while certification validates your knowledge and ability.

- **Classroom training in cities worldwide** - the most comprehensive hands-on training taught by engineers.
- **On-site training at your facility** - an excellent option to train multiple employees at the same time.
- **Online instructor-led training** - lower-cost, remote training if classroom or on-site courses are not possible.
- **Course kits** - lowest-cost, self-paced training that you can use as reference guides.
- **Training memberships and training credits** - to buy now and schedule training later.

Visit ni.com/training for more information.

Extended Warranty

NI offers options for extending the standard product warranty to meet the life-cycle requirements of your project. In addition, because NI understands that your requirements may change, the extended warranty is flexible in length and easily renewed. For more information, visit ni.com/warranty.

OEM

NI offers design-in consulting and product integration assistance if you need NI products for OEM applications. For information about special pricing and services for OEM customers, visit ni.com/oem.

Alliance

Our Professional Services Team is comprised of NI applications engineers, NI Consulting Services, and a worldwide National Instruments Alliance Partner program of more than 700 independent consultants and integrators. Services range from start-up assistance to turnkey system integration. Visit ni.com/alliance.

[Back to Top](#)

Detailed Specifications

Specifications listed below are typical at 25 °C unless otherwise noted. Refer to the *M Series User Manual* for more information about NI 622x devices.

Analog Input

Number of channels

NI 6220/6221	8 differential or 16 single ended
--------------	-----------------------------------

NI 6224/6229	16 differential or 32 single ended
--------------	------------------------------------

NI 6225	40 differential or 80 single ended
---------	------------------------------------

ADC resolution

16 bits	
---------	--

DNL

No missing codes guaranteed	
-----------------------------	--

INL

Refer to the <i>AI Absolute Accuracy Table</i>	
--	--

Sampling rate

Maximum	250 kS/s single channel, 250 kS/s multi-channel (aggregate)
---------	--

Minimum	No minimum
---------	------------

Timing accuracy

50 ppm of sample rate	
-----------------------	--

Timing resolution

50 ns	
-------	--

Input coupling

DC	
----	--

Input range

±10 V, ±5 V, ±1 V, ±0.2 V	
---------------------------	--

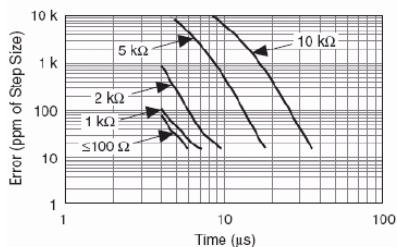
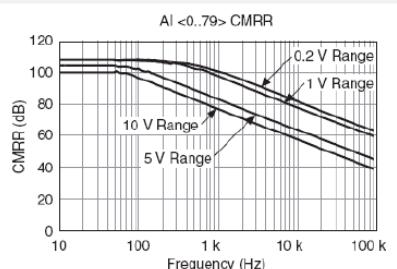
Maximum working voltage for analog inputs (signal + common mode)

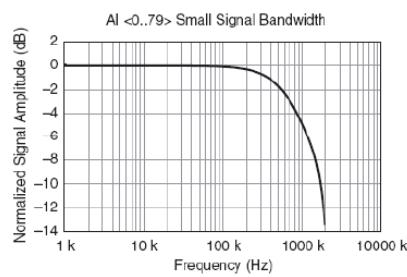
±11 V of AI GND	
-----------------	--

CMRR (DC to 60 Hz)

92 dB	
-------	--

Anhang

Input impedance	
Device on	
AI+ to AI GND	>10 GΩ in parallel with 100 pF
AI- to AI GND	>10 GΩ in parallel with 100 pF
Device off	
AI+ to AI GND	820 Ω
AI- to AI GND	820 Ω
Input bias current	±100 pA
Crosstalk (at 100 kHz)	
Adjacent channels	-75 dB
Non-adjacent channels	-90 dB ¹
Small signal bandwidth (-3 dB)	700 kHz
Input FIFO size	4,095 samples
Scan list memory	4,095 entries
Data transfers	
PCI/PXI devices	DMA (scatter-gather), interrupts, programmed I/O
USB devices	USB Signal Stream, programmed I/O
Overtoltage protection (AI <0..79>, AI SENSE, AI SENSE 2)	
Device on	±25 V for up to two AI pins
Device off	±15 V for up to two AI pins
Input current during overvoltage condition	±20 mA max/AI pin
<small>¹ For USB-6225 devices, channel AI <0..15> crosstalk to channel AI <64..79> is -71 dB; applies to channels with 64-channel separation, for example, AI (x) and AI (x + 64).</small>	
Settling Time for Multichannel Measurements	
Accuracy, full scale step, all ranges	
±90 ppm of step (±6 LSB)	4 µs convert interval
±30 ppm of step (±2 LSB)	5 µs convert interval
±15 ppm of step (±1 LSB)	7 µs convert interval
Typical Performance Graphs	
Settling Error Versus Time for Different Source Impedances	
AI <0..79> CMRR	
5/19	
www.ni.com	

**Analog Output****Number of channels**

NI 6220/6224	0
NI 6221/6225	2
NI 6229	4

DAC resolution	16 bits
----------------	---------

DNL	±1 LSB
-----	--------

Monotonicity	16 bit guaranteed
--------------	-------------------

Maximum update rate

1 channel	833 kS/s
2 channels	740 kS/s per channel
3 channels	666 kS/s per channel
4 channels	625 kS/s per channel

Timing accuracy	50 ppm of sample rate
-----------------	-----------------------

Timing resolution	50 ns
-------------------	-------

Output range	±10 V
--------------	-------

Output coupling	DC
-----------------	----

Output impedance	0.2 Ω
------------------	-------

Output current drive	±5 mA
----------------------	-------

Overdrive protection	±25 V
----------------------	-------

Overdrive current	10 mA
-------------------	-------

Power-on state	±20 mV ²
----------------	---------------------

Power-on glitch	400 mV for 200 ms
-----------------	-------------------

Output FIFO size	8,191 samples shared among channels used
------------------	--

Data transfers

PCI/PXI devices	DMA (scatter-gather), interrupts, programmed I/O
-----------------	--

USB devices	USB Signal Stream, programmed I/O
-------------	-----------------------------------

AO waveform modes:

- Non-periodic waveform
- Periodic waveform regeneration mode from onboard FIFO
- Periodic waveform regeneration from host buffer including dynamic update

Settling time, full scale step 15 ppm (1 LSB)	6 μs
---	------

Slew rate	15 V/μs
-----------	---------

Glitch energy

Magnitude	100 mV
-----------	--------

Duration	2.6 μs
----------	--------

Anhang

² For all USB-6221/6229 Screw Terminal devices, when powered on, the analog output signal is not defined until after USB configuration is complete.

Calibration (AI and AO)

Recommended warm-up time 15 minutes

Calibration interval 1 year

AI Absolute Accuracy Table

Nominal Range		Residual Gain Error (ppm of Reading)	Gain Tempco (ppm/°C)	Reference Tempco	Residual Offset Error (ppm of Range)	Offset Tempco (ppm of Range/°C)	INL Error (ppm of Range)	Random Noise, σ (μVrms)	Absolute Accuracy at Full Scale ¹ (μV)	Sensitivity ² (μV)
Positive Full Scale	Negative Full Scale									
10	-10	75	25	5	20	57	76	244	3,100	97.6
5	-5	85	25	5	20	60	76	122	1,620	48.8
1	-1	95	25	5	25	79	76	30	360	12.0
0.2	-0.2	135	25	5	80	175	76	13	112	5.2

AbsoluteAccuracy = Reading · (GainError) + Range · (OffsetError) + NoiseUncertainty

GainError = ResidualAIGainError + GainTempco · (TempChangeFromLastInternalCal) + ReferenceTempco · (TempChangeFromLastExternalCal)

OffsetError = ResidualAIOffsetError + OffsetTempco · (TempChangeFromLastInternalCal) + INL_Error

$$\text{NoiseUncertainty} = \frac{\text{RandomNoise} \cdot 3}{\sqrt{100}} \quad \text{For a coverage factor of } 3\sigma \text{ and averaging 100 points.}$$

¹ Absolute accuracy at full scale on the analog input channels is determined using the following assumptions:

TempChangeFromLastExternalCal = 10 °C

TempChangeFromLastInternalCal = 1 °C

number_of_readings = 100

CoverageFactor = 3 σ

For example, on the 10 V range, the absolute accuracy at full scale is as follows:

GainError = 75 ppm + 25 ppm · 1 + 5 ppm · 10 GainError = 150 ppm

OffsetError = 20 ppm + 57 ppm · 1 + 76 ppm OffsetError = 153 ppm

$$\text{NoiseUncertainty} = \frac{244 \mu\text{V} \cdot 3}{\sqrt{100}} \quad \text{NoiseUncertainty} = 73 \mu\text{V}$$

AbsoluteAccuracy = 10 V · (GainError) + 10 V · (OffsetError) + NoiseUncertainty AbsoluteAccuracy = 3,100 μV

² Sensitivity is the smallest voltage change that can be detected. It is a function of noise.

Accuracies listed are valid for up to one year from the device external calibration.

AO Absolute Accuracy Table

Nominal Range		Residual Gain Error (ppm of Reading)	Gain Tempco (ppm/°C)	Reference Tempco	Residual Offset Error (ppm of Range)	Offset Tempco (ppm of Range/°C)	INL Error (ppm of Range)	Absolute Accuracy at Full Scale ¹ (μV)
Positive Full Scale	Negative Full Scale							
10	-10	90	10	5	40	5	128	3,230

¹ Absolute Accuracy at full scale numbers is valid immediately following internal calibration and assumes the device is operating within 10 °C of the last external calibration. Accuracies listed are valid for up to one year from the device external calibration.

AbsoluteAccuracy = OutputValue · (GainError) + Range · (OffsetError)

GainError = ResidualGainError + GainTempco · (TempChangeFromLastInternalCal) + ReferenceTempco · (TempChangeFromLastExternalCal)

OffsetError = ResidualOffsetError + AOOFFSETTempco · (TempChangeFromLastInternalCal) + INL_Error

Digital I/O/PFI

Static Characteristics

Number of channels

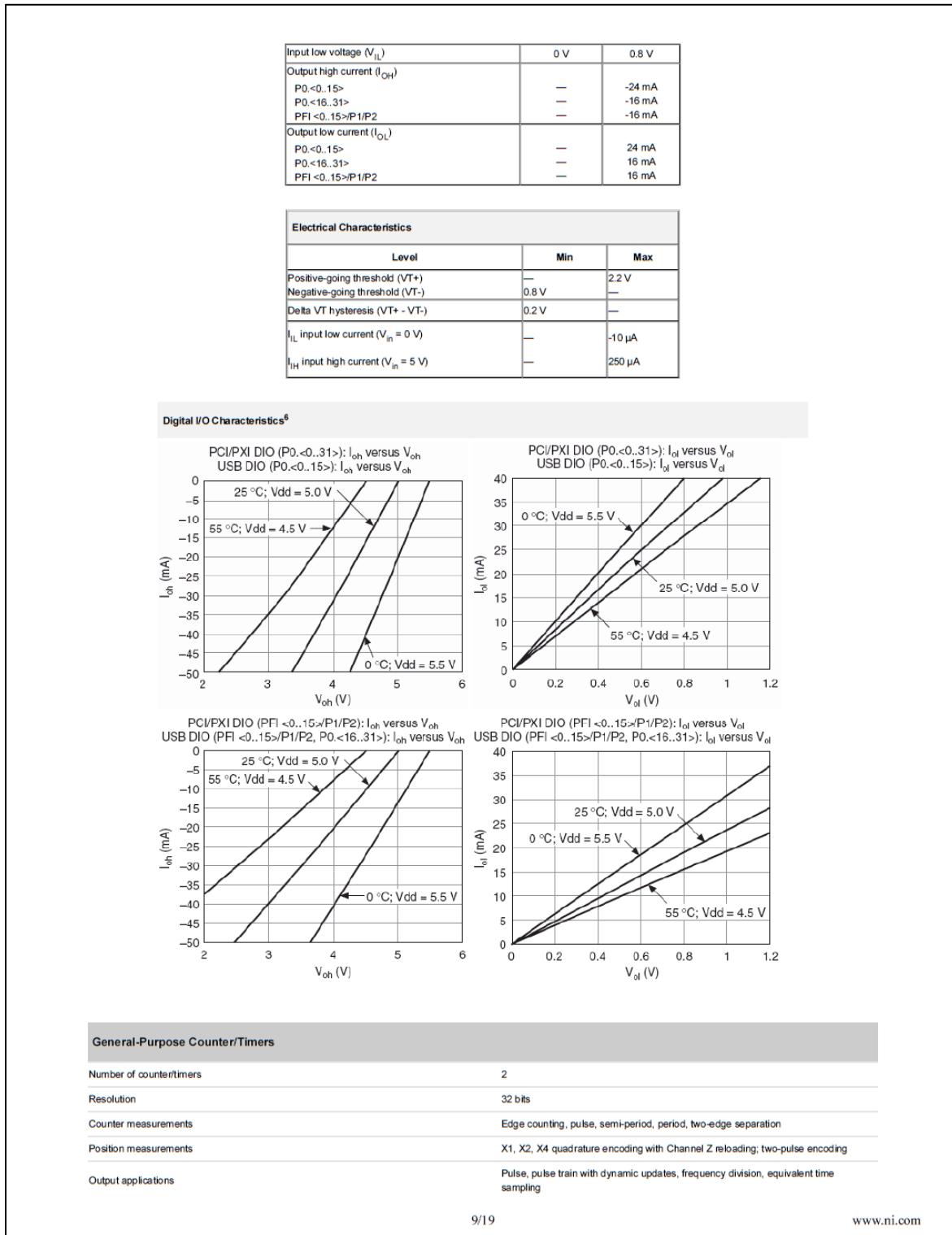
7/19

www.ni.com

Anhang

NI 6220/6221 (68-pin)/6225	24 total 8 (P0.<0..7>) 16 (PFI <0..7>/P1, PFI <8..15>/P2)	
PCI-6221 (37-pin)	10 total 2 (P0.<0, 1>) 8 (PFI <0..7>/P1)	
NI 6224/6229	48 total 32 (P0.<0..31>) 16 (PFI <0..7>/P1, PFI <8..15>/P2)	
Ground reference	D GND	
Direction control	Each terminal individually programmable as input or output	
Pull-down resistor	50 kΩ typical, 20 kΩ minimum	
Input voltage protection ³	±20 V on up to two pins	
³ Stresses beyond those listed under <i>Input voltage protection</i> may cause permanent damage to the device.		
Waveform Characteristics (Port 0 Only)		
Terminals used		
NI 6220/6221 (68-pin)/6225	Port 0 (P0.<0..7>)	
PCI-6221 (37-pin)	Port 0 (P0.<0, 1>)	
NI 6224/6229	Port 0 (P0.<0..31>)	
Port/sample size		
NI 6220/6221 (68-pin)/6225	Up to 8 bits	
PCI-6221 (37-pin)	Up to 2 bits	
NI 6224/6229	Up to 32 bits	
Waveform generation (DO) FIFO	2,047 samples	
Waveform acquisition (DI) FIFO	2,047 samples	
DI or DO Sample Clock frequency ⁴	0 to 1 MHz	
Data transfers		
PCI/PXI devices	DMA (scatter-gather), interrupts, programmed I/O	
USB devices	USB Signal Stream, programmed I/O	
DO or DI Sample Clock source ⁵	Any PFI, RTSI, AI Sample or Convert Clock, AO Sample Clock, Ctr n Internal Output, and many other signals	
⁴ Performance can be dependent on bus latency and volume of bus activity.		
⁵ The digital subsystem does not have its own dedicated internal timing engine. Therefore, a sample clock must be provided from another subsystem on the device or an external source.		
PFI/Port 1/Port 2 Functionality⁶		
Functionality	Static digital input, static digital output, timing input, timing output	
Timing output sources	Many AI, AO, counter, DI, DO timing signals	
Debounce filter settings	125 ns, 6,425 µs, 2.56 ms, disable; high and low transitions; selectable per input	
⁶ Port 2 is not available on PCI-6221 (37-pin) devices.		
Recommended Operation Conditions, PCI/PXI Devices		
Level	Min	Max
Input high voltage (V_{IH})	2.2 V	5.25 V
Input low voltage (V_{IL})	0 V	0.8 V
Output high current (I_{OH}) P0.<0..31> PFI <0..15>/P1/P2	—	-24 mA -16 mA
Output low current (I_{OL}) P0.<0..31> PFI <0..15>/P1/P2	—	24 mA 16 mA
Recommended Operation Conditions, USB Devices		
Level	Min	Max
Input high voltage (V_{IH})	2.2 V	5.25 V

Anhang



Anhang

Internal base clocks	80 MHz, 20 MHz, 0.1 MHz
External base clock frequency	0 MHz to 20 MHz
Base clock accuracy	50 ppm
Inputs	Gate, Source, HW_Arm, Aux, A, B, Z, Up_Down
Routing options for inputs	Any PFI, RTSI, PXI_TRIGGER, PXI_STAR, analog trigger, many internal signals
FIFO	2 samples
Data transfers	
PCI/PCIe/PXI/PXIe devices	Dedicated scatter-gather DMA controller for each counter/timer; interrupts, programmed I/O
USB devices	USB Signal Stream, programmed I/O
Frequency Generator	
Number of channels	1
Base clocks	10 MHz, 100 kHz
Divisors	1 to 16
Base clock accuracy	50 ppm
Output can be available on any PFI or RTSI terminal.	
Phase-Locked Loop (PLL)	
Number of PLLs	1
Reference signal	PXI_STAR, PXI_CLK10, RTSI <0..7>
Output of PLL	80 MHz Timebase; other signals derived from 80 MHz Timebase including 20 MHz and 100 kHz Timebases
External Digital Triggers	
Source	Any PFI, RTSI, PXI_TRIGGER, PXI_STAR
Polarity	Software-selectable for most signals
Analog input function	Start Trigger, Reference Trigger, Pause Trigger, Sample Clock, Convert Clock, Sample Clock Timebase
Analog output function	Start Trigger, Pause Trigger, Sample Clock, Sample Clock Timebase
Counter/timer functions	Gate, Source, HW_Arm, Aux, A, B, Z, Up_Down
Digital waveform generation (DO) function	Sample Clock
Digital waveform acquisition (DI) function	Sample Clock
Device-To-Device Trigger Bus	
PCI/PCIe devices	RTSI <0..7> ⁷
PXI/PXIe devices	PXI_TRIGGER <0..7>, PXI_STAR
USB devices	None
Output selections	10 MHz Clock; frequency generator output; many internal signals
Debounce filter settings	125 ns, 6.425 µs, 2.56 ms, disable; high and low transitions; selectable per input
⁷ In other sections of this document, <i>RTSI</i> refers to RTSI <0..7> for PCI devices or PXI_TRIGGER <0..7> for PXI devices.	
Bus Interface	
PCI/PXI devices	3.3 V or 5 V signal environment
USB devices	USB 2.0 Hi-Speed or full-speed ⁸
DMA channels (PCI/PXI devices)	6, analog input, analog output, digital input, digital output, counter/timer 0, counter/timer 1
USB Signal Stream (USB devices)	4, can be used for analog input, analog output, digital input, digital output, counter/timer 0, counter/timer 1
All PXI-625x devices support one of the following features:	
• May be installed in PXI Express hybrid slots	

Anhang

* Or, may be used to control SCXI in PXI/SCXI combo chassis

⁸ If you are using a USB M Series device in full-speed mode, device performance will be lower and you will not be able to achieve maximum sampling/update rates.

M Series Device	M Series Part Number	SCXI Control in PXI/SCXI Combo Chassis	PXI Express Hybrid Slot Compatible
PXI-6220	191332B-04	No	Yes
PXI-6221	191332B-03	No	Yes
	191332B-13	Yes	No
PXI-6224	191332B-02	No	Yes
PXI-6225	192227A-01	No	Yes
PXI-6229	191332B-01	No	Yes
	191332B-11	Yes	No
Earlier versions of PXI-6220/6221/6224/6229	191332A-0x	Yes	No

Power Requirements

Current draw from bus during no-load condition⁹

PCI/PXI devices

+5 V	0.02 A ¹⁰
+3.3 V	0.25 A ¹⁰
+12 V	0.15 A

Current draw from bus during AI and AO overvoltage condition⁹

PCI/PXI devices

+5 V	0.02 A ¹⁰
+3.3 V	0.25 A ¹⁰
+12 V	0.25 A

 Caution USB-622x devices must be powered with NI offered AC adapter or a National Electric Code (NEC) Class 2 DC source that meets the power requirements for the device and has appropriate safety certification marks for country of use.

USB power supply requirements 11 to 30 VDC, 20 W, locking or non-locking power jack with 0.080" diameter center pin, 5/16-32 thread for locking collars

⁹ Does not include P0/PFI/P1/P2 and +5 V terminals.

¹⁰ PCI-6221 (37-pin) devices do not use +3.3 V from the bus. The 3.3 V current draw, shown in the Power Requirements section, comes from the +5 V instead.

Power Limits

 Caution Exceeding the power limits may cause unpredictable behavior by the device and/or PC/chassis.

PCI devices

+5 V terminal (connector 0)	1 A max ¹¹
+5 V terminal (connector 1)	1 A max ¹¹

PXI devices

+5 V terminal (connector 0)	1 A max ¹¹
+5 V terminal (connector 1)	1 A max ¹¹
P0/PFI/P1/P2 and +5 V terminals combined	2 A max

USB devices

+5 V terminal	1 A max ¹¹
P0/PFI/P1/P2 and +5 V terminals combined	2 A max
Power supply fuse	2 A, 250 V

¹¹ Has a self-resetting fuse that opens when current exceeds this specification.

Physical Requirements

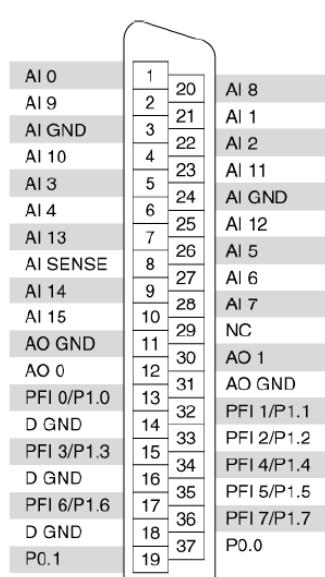
Printed circuit board dimensions

PCI-6220/6221/6224/6225/6229	9.7 x 15.5 cm (3.8 x 6.1 in.)
PXI-6220/6221/6224/6225/6229	Standard 3U PXI

Anhang

Enclosure dimensions (includes connectors)	
USB-6221/6225/6229 Screw Terminal	26.67 x 17.09 x 4.45 cm (10.5 x 6.73 x 1.75 in.)
USB-6221/6229 BNC	28.6 x 17 x 6.9 cm (11.25 x 6.7 x 2.7 in.)
USB-6225 Mass Termination	18.8 x 17.09 x 4.45 cm (7.4 x 6.73 x 1.75 in.)
USB-6221/6225/6229 OEM	Refer to the <i>NI USB-622x/625x OEM User Guide</i>
Weight	
PCI-6220	91 g (3.2 oz)
PCI-6221 (68-pin)	92 g (3.2 oz)
PCI-6221 (37-pin)	95 g (3.3 oz)
PCI-6224	99 g (3.5 oz)
PCI-6225	103 g (3.6 oz)
PCI-6229	101 g (3.5 oz)
PXI-6220	158 g (5.5 oz)
PXI-6221	162 g (5.7 oz)
PXI-6224	170 g (5.9 oz)
PXI-6225	174 g (6.1 oz)
PXI-6229	171 g (6.0 oz)
USB-6221 Screw Terminal	1.2 kg (2 lb 10 oz)
USB-6225/6229 Screw Terminal	1.24 kg (2 lb 11 oz)
USB-6225 Mass Termination	907 g (2 lb)
USB-6221 OEM	131 g (4.6 oz)
USB-6225/6229 OEM	162 g (5.7 oz)
I/O connector	
PCI/PXI-6220/6221 (68-pin)	1 68-pin VHDCI
PCI/PXI-6224/6225/6229	2 68-pin VHDCI
PCI-6221 (37-pin)	1 37-pin D-SUB
USB-6221 Screw Terminal	64 screw terminals
USB-6225/6229 Screw Terminal	128 screw terminals
USB-6221 BNC	21 BNCs and 30 screw terminals
USB-6229 BNC	32 BNCs and 60 screw terminals
USB-6225 Mass Termination	2 68-pin SCSI
USB-6221/6225/6229 Screw Terminal/ USB-6221/6229 BNC screw terminal wiring	16-28 AWG
Maximum Working Voltage ¹²	
NI 6220/6221/6224/6225/6229 channel-to-earth	11 V, Measurement Category I
 Caution	Do not use for measurements within Categories II, III, or IV.
¹² Maximum working voltage refers to the signal voltage plus the common-mode voltage.	
Environmental	
Operating temperature	
PCI/PXI devices	0 to 55 °C
USB devices	0 to 45 °C
Storage temperature	
	-20 to 70 °C
Humidity	
	10 to 90% RH, noncondensing
Maximum altitude	
	2,000 m
Pollution Degree (indoor use only)	
	2
Shock and Vibration (PXI Devices Only)	
12/19	
www.ni.com	

Operational shock	30 g peak, half-sine, 11 ms pulse (Tested in accordance with IEC-60068-2-27. Test profile developed in accordance with MIL-PRF-28800F.)
Random vibration	
Operating	5 to 500 Hz, 0.3 g _{rms}
Nonoperating	5 to 500 Hz, 2.4 g _{rms} (Tested in accordance with IEC-60068-2-64. Nonoperating test profile exceeds the requirements of MIL-PRF-28800F, Class 3.)
Safety	
This product is designed to meet the requirements of the following standards of safety for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use:	
<ul style="list-style-type: none"> • IEC 61010-1, EN 61010-1 • UL 61010-1, CSA 61010-1 	
 Note For UL and other safety certifications, refer to the product label or visit ni.com/certification, search by model number or product line, and click the appropriate link in the Certification column.	
Electromagnetic Compatibility	
This product is designed to meet the requirements of the following standards of EMC for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use:	
<ul style="list-style-type: none"> • EN 61326 EMC requirements; Minimum Immunity • EN 55011 Emissions; Group 1, Class A • CE, C-Tick, ICES, and FCC Part 15 Emissions; Class A 	
 Note For EMC compliance, operate this device with shielded cables.	
CE Compliance	
This product meets the essential requirements of applicable European Directives, as amended for CE marking, as follows:	
<ul style="list-style-type: none"> • 73/23/EEC; Low-Voltage Directive (safety) • 89/336/EEC; Electromagnetic Compatibility Directive (EMC) 	
 Note Refer to the Declaration of Conformity (DoC) for this product for any additional regulatory compliance information. To obtain the DoC for this product, visit ni.com/certification, search by model number or product line, and click the appropriate link in the Certification column.	
Environmental Management	
National Instruments is committed to designing and manufacturing products in an environmentally responsible manner. NI recognizes that eliminating certain hazardous substances from our products is beneficial not only to the environment but also to NI customers.	
For additional environmental information, refer to the NI and the Environment Web page at ni.com/environment. This page contains the environmental regulations and directives with which NI complies, as well as other environmental information not included in this document.	
Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)	
 At the end of their life cycle, all products must be sent to a WEEE recycling center. For more information about WEEE recycling centers and National Instruments WEEE initiatives, visit ni.com/environment/weee.htm.	
电子信息产品污染控制管理办法（中国 RoHS）	
 中国客户 National Instruments 符合中国电子信息产品中限制使用某些有害物质指令 (RoHS)。 关于 National Instruments 中国 RoHS 合规性信息, 请登录 ni.com/environment/rohs_china. (For information about China RoHS compliance, go to ni.com/environment/rohs_china.)	
Back to Top	
13/19	
www.ni.com	



NC = No Connect

PCI-6221 (37-Pin) Pinout