



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Department Maschinenbau und Produktion

Entwicklung eines regelungstechnischen Experimentiersystems für den Einsatz in der Berufsausbildung für Elektroniker/-in für luftfahrttechnische Systeme

Bachelorarbeit

Zur Erlangung des akademischen Grades des
Bachelor of Engineering

Vorgelegt an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg
bei Prof. Dr.-Ing. W. Schulz (1. Prüfer) und Prof. Dr.-Ing. S. Wiesemann (2. Prüfer)

von Timo Richters
Hamburg, 29.02.2012
Matr. Nr.: 1856742

Betreuender Betrieb:



A u f g a b e n s t e l l u n g

für die Bachelorthesis

von Herrn

Timo Richters

Matrikel-Nummer:

1856742

Thema:

**Entwicklung eines regelungstechnischen
Experimentiersystems für den Einsatz in der
Berufsausbildung für Elektroniker/-in für
luftfahrttechnische Systeme**

Schwerpunkte:

Entwicklung einer Regelstrecke mit Bezug auf eine techni-
sche Anwendung in einem Passagierflugzeug

Optional: Bau und Test des Experimentiersystems

Inhalt

| | |
|---|-----|
| Formelzeichen | IV |
| Abbildungsverzeichnis | V |
| Tabellenverzeichnis | VII |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Ziel der Arbeit..... | 1 |
| 1.2 Inhalt der Arbeit..... | 2 |
| 2 Grundlagen der Regelungstechnik..... | 1 |
| 2.1 Analoge Regler | 3 |
| 2.2 Digitale Regler | 3 |
| 2.3 Testfunktionen | 4 |
| 2.4 Einteilung von Reglern | 5 |
| 2.5 Unstetige Regler | 6 |
| 2.6 Stetige Regler..... | 6 |
| 2.6.1 Proportional Regler | 7 |
| 2.6.2 Integral Regler | 8 |
| 2.6.3 Differential Regler..... | 9 |
| 2.6.4 Kombinationen von Regelgliedern..... | 11 |
| 2.7 Realisierung von Reglern..... | 12 |
| 2.8 Eigenschaften unterschiedlicher Regelstrecken..... | 14 |
| 2.9 Vergleich von Reglern an einer Regelstrecke..... | 21 |
| 3 Entwicklung des Regelkreises | 23 |
| 3.1 Anforderungen an die Regelstrecke..... | 23 |
| 3.2 Auswahl der Regelstrecke..... | 24 |
| 3.3 Entwicklung der Lichtregelstrecke | 28 |
| 3.3.1 Stellglied, Istwertaufnahme und Messumformer..... | 28 |
| 3.3.2 Versuch zur Ermittlung der Sprungantwort..... | 30 |
| 3.4 Entwicklung der Temperaturregelstrecke | 35 |
| 3.4.1 Stellglied, Istwertaufnahme und Messumformer..... | 35 |
| 3.4.2 Versuch zur Ermittlung der Sprungantwort..... | 37 |

| | | |
|--------|--|----|
| 3.5 | Anforderungen an den Regler | 42 |
| 3.6 | Spannungsversorgung | 43 |
| 3.7 | Grundsaltungen der Operationsverstärker..... | 45 |
| 3.7.1 | Zweipunkt Regler | 45 |
| 3.7.2 | Spannungsfolger | 46 |
| 3.7.3 | Invertierender Verstärker (P-Regler)..... | 47 |
| 3.7.4 | Integrator (I-Regler) | 48 |
| 3.7.5 | Differenzierer (D-Regler) | 49 |
| 3.8 | Sollwertgeber | 50 |
| 3.9 | Vergleicher..... | 51 |
| 3.10 | Sprungfrage..... | 52 |
| 3.11 | Praktische Einstellregeln..... | 53 |
| 3.11.1 | Einstellregeln nach Ziegler und Nichols | 54 |
| 3.11.2 | Einstellregeln nach Chien, Hrones, Reswick..... | 57 |
| 4 | Simulation des Regelkreises | 61 |
| 4.1 | Aufstellen der Übertragungsfunktion der Temperaturregelstrecke | 62 |
| 4.2 | Ermittlung der Einstellbereiche | 66 |
| 5 | Vorbereitung des praktischen Aufbau des Regelkreises | 72 |
| 5.1 | Dimensionierung der Reglerelemente..... | 72 |
| 5.2 | Gesamtschaltplan des Regelkreises | 75 |
| 6 | Zusammenfassung und Ausblick..... | 77 |
| 7 | Literaturverzeichnis | 78 |
| | Anhang | 80 |

Formelzeichen

| Formelzeichen | Beschreibung | Einheit |
|---------------|----------------------------|--------------------|
| C | Kapazität | F |
| D | Dämpfung | - |
| e | Regelabweichung | V |
| G | Übertragungsfunktion | - |
| I | Elektrischer Strom | A |
| K_D | Differentialbeiwert | s |
| K_I | Integrierbeiwert | 1/s |
| K_P | Proportionalitätsbeiwert | [V/V] |
| P | Leistung | W |
| R | Elektrischer Widerstand | Ω |
| r | Rückführgröße (Istwert) | V |
| s | Laplace-Operator | - |
| T | Temperatur | $^{\circ}\text{C}$ |
| t | Zeit | s |
| T_g | Ausgleichszeit | s |
| T_I | Integrationszeitkonstante | s |
| T_N | Nachstellzeit | s |
| T_t | Totzeit | s |
| T_u | Verzugszeit | s |
| T_V | Vorhaltezeit | s |
| U | Elektrische Spannung | V |
| U_B | Betriebsspannung | V |
| V | Verstärkung | - |
| w | Führungsgröße (Sollwert) | V |
| x | Regelgröße | - |
| y | Stellgröße | V |
| z | Störgröße | - |
| α | Temperaturkoeffizient | 1/K |
| Λ | Schwierigkeit der Regelung | - |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 2.1: Blockschaltbild eines Regelkreises | 1 |
| Abbildung 2.2: Digitaler Regelkreis..... | 4 |
| Abbildung 2.3: Einteilung von Reglern..... | 5 |
| Abbildung 2.4: Sprungantwort P-Regler | 7 |
| Abbildung 2.5: P-Regler im Blockschaltplan..... | 7 |
| Abbildung 2.6: Sprungantwort I-Regler | 8 |
| Abbildung 2.7: I-Regler im Blockschaltplan..... | 8 |
| Abbildung 2.8: Sprungantwort D-Regler | 9 |
| Abbildung 2.9: Anstiegsantwort D-Regler | 10 |
| Abbildung 2.10: D-Regler im Blockschaltplan | 10 |
| Abbildung 2.11: Sprungantwort PID-Regler..... | 11 |
| Abbildung 2.12: Arduino Uno..... | 13 |
| Abbildung 2.13: Arduino Software Oberfläche | 13 |
| Abbildung 2.14: Gedämpfte Systeme..... | 15 |
| Abbildung 2.15: Schwingende Systeme | 16 |
| Abbildung 2.16: Sprungantwort PT_1 -Glied | 17 |
| Abbildung 2.17: PT_1 -Glied im Blockschaltplan..... | 17 |
| Abbildung 2.18: Sprungantwort PT_n -Glieder | 18 |
| Abbildung 2.19: Sprungantwort Totzeitglied | 19 |
| Abbildung 2.20: Totzeitglied im Blockschaltplan..... | 19 |
| Abbildung 2.21: Sprungantworten IT_n -Glieder | 20 |
| Abbildung 2.22: Vergleich der Regler in einem Regelkreis | 21 |
| Abbildung 3.1: Schaltplan Lichtregelstrecke | 29 |
| Abbildung 3.2: Test-Lichtregelstrecke | 30 |
| Abbildung 3.3: Sprungantwort Lichtregelstrecke Lampe Ein..... | 32 |
| Abbildung 3.4: Sprungantwort Lichtregelstrecke Lampe Aus | 32 |
| Abbildung 3.5: Grafische Ermittlung der Verzugszeit und Ausgleichszeit | 33 |
| Abbildung 3.6: Kennlinie PT100 und PT50..... | 35 |
| Abbildung 3.7: Schaltplan Temperaturregelstrecke | 37 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 3.8: Schematische Darstellung des Messaufbaus | 38 |
| Abbildung 3.9: Sprungantwort der Temperaturregelstrecke | 39 |
| Abbildung 3.10: Ermittlung der Streckenzeitkonstante | 40 |
| Abbildung 3.11: Wendetangente Temperaturregelstrecke | 41 |
| Abbildung 3.12: Spannungsbegrenzung..... | 43 |
| Abbildung 3.14: Beispiel Spannungsversorgung ICs..... | 44 |
| Abbildung 3.15: Invertierender Schmitt-Trigger Schaltung..... | 45 |
| Abbildung 3.16: Hysterese des Zweipunktreglers..... | 46 |
| Abbildung 3.17: Spannungsfolger..... | 46 |
| Abbildung 3.18: Invertierender Verstärker | 47 |
| Abbildung 3.19: Integrator | 48 |
| Abbildung 3.20: Differenzierer | 49 |
| Abbildung 3.21: Sollwertgeber | 50 |
| Abbildung 3.22: Vergleicher | 51 |
| Abbildung 3.23: Sprungfrage | 52 |
| Abbildung 3.24: $K_{PR\ krit}$ nach Ziegler und Nichols..... | 54 |
| Abbildung 3.25: Approximierte PT_1 Strecke | 55 |
| Abbildung 3.26: Fallunterscheidung nach Chien, Hrones, Reswick..... | 58 |
| Abbildung 4.1: Zusammenhang zwischen T_a/T_b und T_u/T_g | 63 |
| Abbildung 4.2: Blockschaltbild Sprungantwortsimulation | 65 |
| Abbildung 4.3: Sprungantworten Temperaturregelstreckensimulation..... | 65 |
| Abbildung 4.4: Simulink Modell Temperaturregelstrecke..... | 67 |
| Abbildung 4.5: Sprungantwort Regelkreis mit Zweipunktregler | 68 |
| Abbildung 4.6: Sprungantworten Regelkreis mit P-Regler..... | 69 |
| Abbildung 4.7: Sprungantwort Regelkreis mit PID-Regler | 70 |
| Abbildung 5.1: Spannungsversorgung der ICs..... | 75 |
| Abbildung 5.2: Schaltplan Reglerplatine | 76 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 1: Eignung von Reglern..... | 22 |
| Tabelle 2: Bewertung der Regelstrecken..... | 27 |
| Tabelle 3: Einstellregeln nach Ziegler und Nichols Variante 1..... | 55 |
| Tabelle 4: Einstellregeln nach Ziegler und Nichols Variante 2..... | 55 |
| Tabelle 5: Beiwerte Lichtregelstrecke nach Ziegler und Nichols | 56 |
| Tabelle 6: Beiwerte Temperaturregelstrecke nach Ziegler und Nichols | 57 |
| Tabelle 7: Einstellregeln nach Chien, Hrones, Reswick | 58 |
| Tabelle 8: Beiwerte Lichtregelstrecke nach Chien, Hrones, Reswick | 59 |
| Tabelle 9: Beiwerte Temperaturregelstrecke nach Chien, Hrones, Reswick | 59 |
| Tabelle 10: Faktor c in Abhängigkeit von T_a/T_b | 64 |

1 Einleitung

Diese Bachelorarbeit wurde im Wintersemester 2011/12 in der Berufsausbildung der Airbus Operations GmbH angefertigt. Das Thema Regelungstechnik ist Bestandteil der Ausbildung der Elektroniker für Luftfahrttechnische Systeme. Bisher wird dieses Thema in der Berufsschule und in einem einwöchigen Lehrgang theoretisch behandelt. Der Praxisanteil besteht lediglich darin, einen PID-Regler auf eine Platine zu löten. Da aber kein kompletter Regelkreis praktisch aufgebaut wird, fehlt es den Auszubildenden oftmals an Verständnis für die Zusammenhänge in einem Regelkreis und die Auswirkungen einer guten bzw. schlechten Regelung. Anhand eines vollständig aufgebauten, einstellbaren Regelkreises könnten die Auszubildenden selbstständig das im Lehrgang vermittelte Wissen anwenden, die Auswirkungen verschiedener Regler auf eine Regelstrecke testen, Sprungantworten aufnehmen und die Reaktion der Regelung auf Störgrößen feststellen. Dies würde das Verständnis für die Regelungstechnik weiter vertiefen und die Auszubildenden näher an die Praxis führen. Die Anforderungen an das zu entwickelnde Experimentiersystem wurden in Zusammenarbeit mit der Berufsausbildung erstellt, um einen optimalen Nutzen zu erzielen. Des Weiteren wird angestrebt, die in dieser Arbeit zu erarbeitende Vorgehensweise in vereinfachter Version als Projektarbeit in das Ausbildungskonzept zu übernehmen.

1.1 Ziel der Arbeit

Ziel dieser Bachelorarbeit ist es ein Experimentiersystem zum Thema Regelungstechnik für Auszubildende des Berufes des Elektronikers für Luftfahrttechnische Systeme zu entwickeln. Anhand dieses Experimentiersystems sollen die Auszubildenden die zuvor in einem Lehrgang vermittelten Grundlagen der Regelungstechnik praktisch anwenden und nachvollziehen können, sowohl durch eigenes Ausprobieren als auch durch Demonstration des Trainers.

1.2 Inhalt der Arbeit

Zu Beginn der Arbeit erfolgt eine Einführung in das Wissensgebiet, die Grundlagen der Regelungstechnik. Anschließend wird der Regelkreis des Experimentiersystems Schritt für Schritt entwickelt. Ein Regelkreis wird immer auf die zu regelnde Strecke ausgelegt, deshalb wird im ersten Schritt nach den Anforderungen an die Regelstrecke eine Auswahl aus verschiedenen Regelstrecken getroffen. Nach dieser Auswahl werden praktische Versuche zu den Regelstrecken gemacht, um zu bestätigen, dass sie die Anforderungen erfüllen und um Kennwerte zu ermitteln. Danach folgt, basierend auf den Ergebnissen der praktischen Versuche, die Auslegung des Reglers, welche die schaltungstechnische Umsetzung und die Ermittlung der Einstellbereiche nach praktischen Einstellregeln beinhaltet. Die Einstellbereiche spielen hierbei eine tragende Rolle, da sie für das später zu erreichende Verhalten des Regelkreises verantwortlich sind. Sind Regelstrecke und Regler ausgelegt, erfolgt die Simulation des kompletten Regelkreises in einem Simulationsprogramm (hier: Matlab Simulink). Anhand der Simulation werden die ermittelten Einstellbereiche der Regler getestet und die maximalen Einstellwerte festgelegt. Ist die Simulation abgeschlossen, wird die Reglerschaltung dimensioniert. Zum Abschluss wird der Gesamtschaltplan erstellt. Aus diesem kann dann das Experimentiersystem praktisch aufgebaut werden.

2 Grundlagen der Regelungstechnik

Der Name „Regelkreis“ beinhaltet bereits die charakteristische Eigenschaft einer Regelung. Im Gegensatz zu einer Steuerung wird bei einer Regelung der Istwert ständig rückgeführt und aus der Differenz zum vorgegebenen Sollwert die Regelabweichung bestimmt. Durch diese Rückführung entsteht der typische Regelkreis (siehe Abbildung 2.1) und damit eine Unabhängigkeit der Regelgröße von auftretenden Störgrößen. Dies gilt natürlich nur für einen gewissen Bereich und für einen optimal eingestellten Regler. Zur Umsetzung einer Regelung gibt es verschiedene mechanische, elektronische, hydraulische, pneumatische und biologische Möglichkeiten. Im Hinblick auf das oben erwähnte Anwendungsgebiet, wird im Folgenden die elektronische Regelung im Vordergrund stehen.

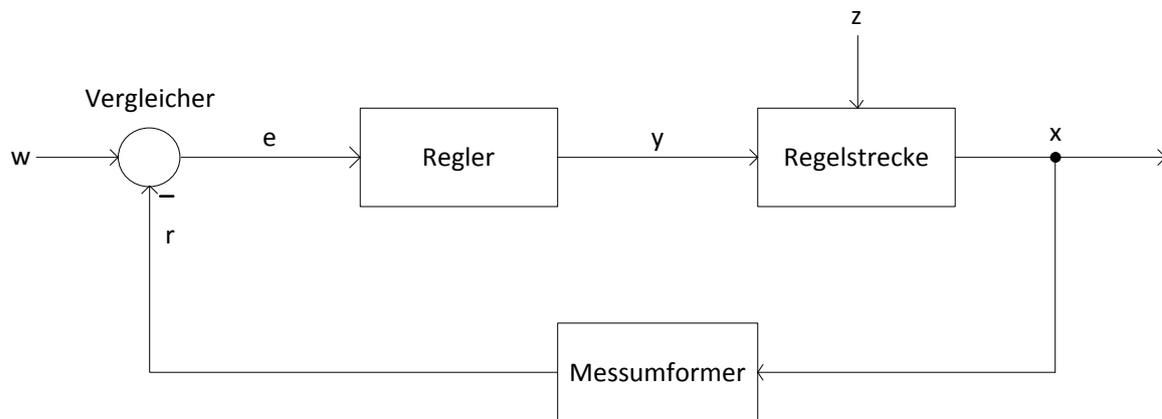


Abbildung 2.1: Blockschaltbild eines Regelkreises

Abbildung 2.1 zeigt ein Blockschaltbild eines einfachen Regelkreises. Die Bezeichnung der einzelnen Größen des Regelkreises wird nach (Schulz, 2010) vorgenommen:

Regelgröße x

Die Regelgröße, auch Istwert genannt, ist das eigentliche Ziel der Regelung. Sie gilt es konstant auf den vorgegebenen Wert zu halten bzw. sich möglichst schnell und genau an diesen anzupassen.

Rückführgröße r

Die Rückführgröße ist proportional zur Regelgröße und wird vor dem Regler mit der Führungsgröße verglichen. Die Differenz aus Führungsgröße und Rückführgröße bildet die Regelabweichung e .

Führungsgröße w

Die Führungsgröße, auch Sollwert genannt, gibt den zu erreichenden Wert für die Regelgröße vor.

Regelabweichung e

Die Regelabweichung ist die Differenz aus Führungsgröße und Rückführgröße. Im Idealfall stimmt die Regelgröße und somit die Rückführgröße mit der Führungsgröße überein und die Regelabweichung ist null. Ziel der Regelung ist es die Regelabweichung zu minimieren.

Stellgröße y

Die Stellgröße ist die vom Regler aus der Regeldifferenz abgeleitete Größe, die eine Änderung der Regelgröße über ein Stellglied bewirkt.

Störgröße z

Die Störgröße beeinflusst die Regelstrecke negativ und entfernt die Regelgröße von der Führungsgröße. Ihre Existenz ist der Grund für eine Festwertregelung, ansonsten würde eine Steuerung ausreichen.

In der Praxis ist die Regelstrecke meist vorgeben. Es handelt sich um ein bestimmtes System bei dem die Regelgröße, auch bei Einwirkung einer Störgröße, konstant gehalten werden soll. Z.B. die Temperatur in einem Raum beim Öffnen eines Fensters. Diese Regelgröße wird durch eine Führungsgröße vorgegeben, im Fall der Temperaturregelung z.B. 21 °C. Ziel der Regelung ist es die Differenz aus Regelgröße und Führungsgröße zu minimieren.

Entscheidender Punkt der Regelung ist der ständige Vergleich zwischen Soll- und Istwert, deshalb wird die Regelgröße ständig rückgeführt. Dabei wird die Regelgröße ggf. durch einen Messumformer in eine andere physikalische Größe umgewandelt, z.B. eine Temperatur in eine elektrische Spannung. Diese Rückführgröße wird im Vergleich mit der Führungsgröße verglichen und aus den beiden Werten wird die Regeldifferenz $e = w - r$ gebildet. Der Regler verarbeitet diese Regeldifferenz je nach Art des Reglers und gibt die Stellgröße aus. Diese Stellgröße soll einer weiteren Veränderung der Regelgröße entgegenwirken. Je nach Verhalten der Regelstrecke müssen verschiedene Regler eingesetzt werden, da Regelstrecken unterschiedlich auf die vorgeschalteten Regler reagieren. Eine Einteilung und Beschreibung dieser Regler und Regelstrecken sowie deren Umsetzungsmöglichkeiten erfolgen in diesem Kapitel.

2.1 Analoge Regler

Analoge Regler verarbeiten analoge, nichtdiskrete Signale, z.B. elektrische Ströme und Spannungen. Heutzutage werden analoge Regler über sog. Operationsverstärker¹ (Abk. OP) realisiert. Diese Operationsverstärker können mit elektronischen Widerständen und Kondensatoren derart beschaltet werden, so dass die grundlegenden Regelelemente und weitere Schaltungen erstellt werden können. Diese Schaltungen werden in Kapitel 3.7 genauer beschrieben. Der Vorteil gegenüber einer digitalen Schaltung ist die Transparenz des analogen Systems. Mit einem einfachen Schaltplan kann die Regelung vollständig nachvollzogen werden. Dafür sind lediglich Grundkenntnisse der Operationsverstärker-Technik erforderlich.

2.2 Digitale Regler

Digitale Regler werden mit digitalen Signalen versorgt. Da die zu regelnde Strecke in aller Regel analoge Signale ausgibt und aufnimmt, werden diese meist in einem Analog-Digital-Umwandler (ADU) in digitale Signale umgewandelt. Diese Signale werden dann in programmierbaren Mikrocontrollern verarbeitet. In diesem Mikrocontroller ist das Programm zur Regelung eingespeichert. Das hat den Vorteil, dass für eine Änderung des Regelverhaltens keine Bauteile ein- bzw. ausgebaut werden müssen, sondern man kann das Programm per Software beliebig ändern und in den Mikrocontroller einspeichern. Innerhalb des Mikrocontrollers werden die Signale mit einer bestimmten Taktzeit verarbeitet. Diese wirkt wie eine Verzögerung. Ist die Taktzeit wesentlich kleiner als die Reaktionszeit der Strecke so kann sie vernachlässigt werden. Bei sehr schnellen Regelstrecken muss allerdings die Zeitverzögerung der Taktzeit berücksichtigt werden. Ist die Stellgröße berechnet wird sie digital ausgegeben und über einen Digital-Analog-Umwandler (DAU) wieder in ein analoges Signal gewandelt und an das Stellglied der Regelstrecke gegeben. Abbildung 2.2 zeigt das Blockschaltbild eines digitalen Regelkreises mit analoger Regelstrecke. Der Bereich in dem die Signale digital sind ist gestrichelt eingezeichnet.

Digitale Regler sind für Einsteiger allerdings wenig transparent und anschaulich. Ohne genaue Kenntnisse der Programmierung und/oder der geeigneten Schnittstelle hat man keinerlei Möglichkeiten Parameter zu ändern. In der Praxis allerdings finden digitale Regler aufgrund ihrer Vielfalt und der sinkenden Preise für Mikrocontroller immer häufiger Anwendung.

¹ Operationsverstärker: Elektronischer Verstärker

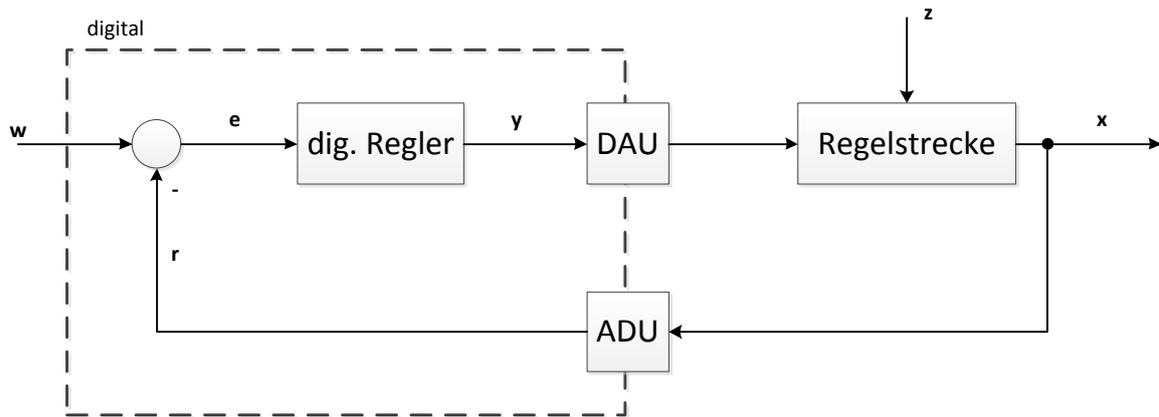


Abbildung 2.2: Digitaler Regelkreis

2.3 Testfunktionen

Mit einer Testfunktion lassen sich verschiedene Komponenten im Regelkreis, Übertragungsglieder genannt, charakterisieren. Der Begriff Übertragungsglieder beschreibt allgemein ein Teilsystem in einem Regelkreis bei dem der Ausgang über eine sog. Übertragungsfunktion mit dem Eingang im Verhältnis steht. Dies kann z.B. ein Regler, eine Regelstrecke oder ein Messumformer sein. Zum Testen dieser Übertragungsglieder gibt es verschiedene Funktionen aus deren Reaktionen auf das Verhalten geschlossen werden kann:

- Sprungfunktion
- Anstiegsfunktion
- Impulsfunktion
- Sinusfunktion

Die gängigste Testfunktion ist die Sprungfunktion. Diese wird meist eingesetzt, um das Verhalten eines Übertragungsgliedes festzustellen. Dabei wird auf den Eingang des Übertragungsgliedes ein sprungförmiges Signal geschaltet, die Sprungfrage. Eingang und Ausgang des Übertragungsgliedes sollten sich zu diesem Zeitpunkt in einem stationären Ruhezustand befinden. Durch Messung des Ausgangssignals, der Sprungantwort, können Rückschlüsse auf das Verhalten des Übertragungsgliedes geschlossen werden. Bei einigen Übertragungsgliedern kann es erforderlich sein, andere Testfunktionen als die Sprungfunktion zu benutzen. Beispielsweise reagiert ein Differential Glied (siehe Kapitel 2.6.3) auf eine Sprungfrage mit einem theoretisch unendlich hohen Ausgangsimpuls, welcher keine Rückschlüsse auf Kennwerte zulässt. Auf das Verhalten der verschiedenen Übertragungsglieder, speziell im Hinblick auf den Einsatz als Regler, wird ab Kapitel 2.6 eingegangen.

2.4 Einteilung von Reglern

Eine grundlegende Einteilung von Reglern geschieht nach stetigen und unstetigen Verhalten (siehe Abbildung 2.3). Diese werden in den folgenden Kapiteln beschrieben. Für die Umsetzung der Aufgabenstellung werden nur die gängigen Grundformen der stetigen Regler und ihre Kombinationen verwendet.

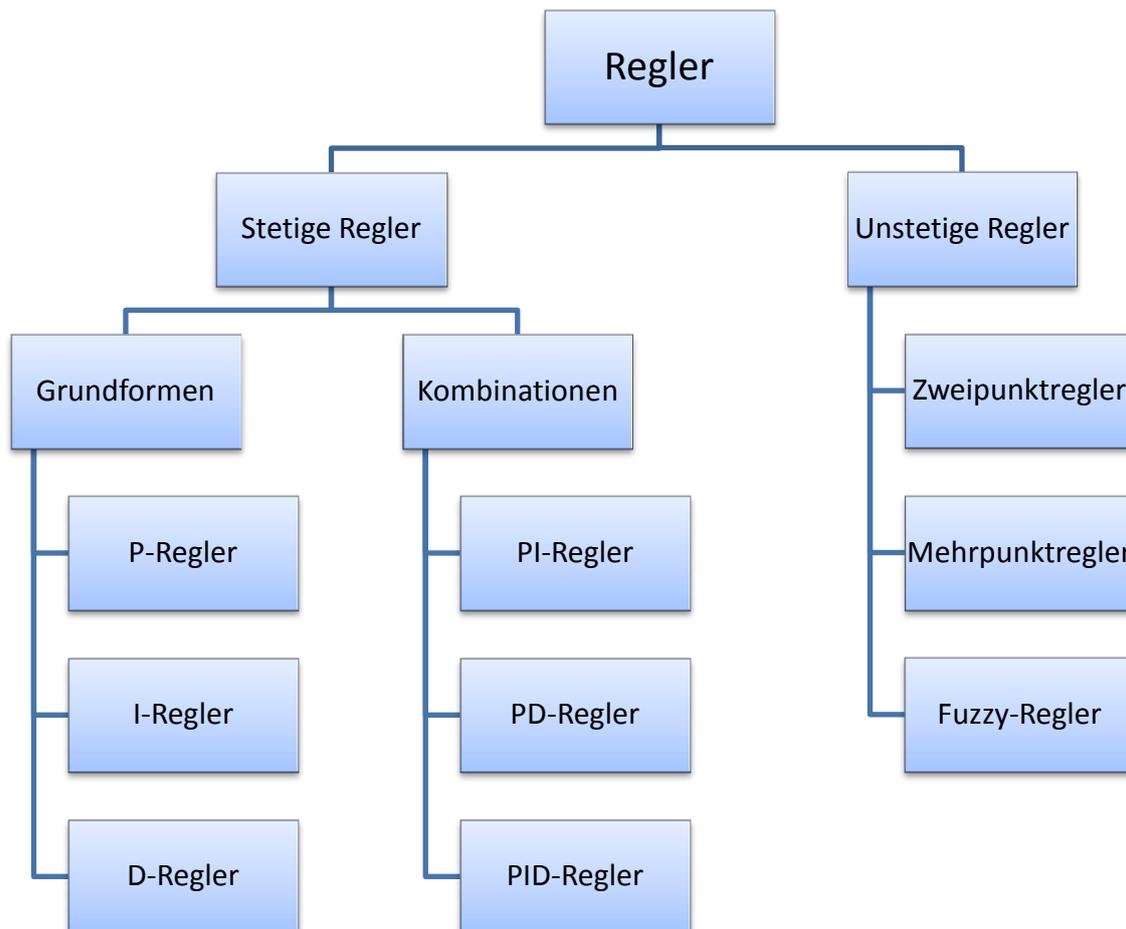


Abbildung 2.3: Einteilung von Reglern

2.5 Unstetige Regler

Ein unstetiges Regelement kann nur bestimmte diskrete Werte bzw. Zustände annehmen, z.B. „An“ und „Aus“. Dies ist dann ein sog. Zweipunktregler, da er nur zwei feste Zustände annehmen kann. Alle Werte zwischen diesen Punkten können nicht eingestellt werden. Bei z.B. einer Wasserstandregelung entspricht dies also einem voll geöffneten Ventil („An“) und einem geschlossenen Ventil („Aus“). Eine geringe Öffnung des Ventils zwischen diesen Extrema ist nicht möglich. Es ist also nicht ganz einfach einen bestimmten Wasserstand mit dieser Art der Regelung zu erreichen, geschweige denn auf Störgrößen einzuwirken.

Eine etwas genauere Regelung kann durch einen Dreipunktregler realisiert werden. Dieser kennt drei Zustände, im Falle der Wasserstandregelung z.B.: Ventil auf – Ventil halb auf – Ventil geschlossen. Bei einem Motor könnten die Zustände auch Rechtslauf – Aus – Linkslauf sein. Die Regelung einer gewünschten Drehzahl ist damit allerdings nicht möglich.

Fuzzy²-Regler basieren auf der Fuzzylogik, deren Schwerpunkt eine umgangssprachliche Beschreibung von Systemen und Zuständen ist. Beispielsweise wird bei einer Temperaturregelung mit einem Fuzzy-Regler nicht mit Temperaturwerten gearbeitet, sondern mit umgangssprachlichen Ausdrücken wie „kalt“, „warm“ und „heiß“.

2.6 Stetige Regler

Ein stetiger Regler kann theoretisch jeden beliebigen Wert annehmen, in der Praxis ist dieser Bereich aber durch konstruktive Maßnahmen bzw. die Energieversorgung begrenzt. Beispielsweise kann ein Operationsverstärker an seinem Ausgang maximal die eigene Versorgungsspannung ausgeben. Die im Folgenden beschriebenen Regler sind stetige Regler.

² Fuzzy: verwischt, verschwommen

2.6.1 Proportional Regler

Der Proportional Regler (auch P-Regler genannt) hat, wie sein Name schon verrät, ein proportionales Verhalten. Das heißt, der Eingangswert y_e wird mit einem bestimmten Faktor K_P verstärkt am Ausgang x_a ausgegeben. Je größer der Wert für K_P , desto größer die Verstärkung. Es sind auch Faktoren kleiner 1 möglich. Es gilt:

$$x_a = K_P \cdot y_e \quad (1)$$

Ein hoher Verstärkungsfaktor hat bei einem P-Regler eine sehr schnelle Regelung zur Folge, da bereits kleine Änderungen am Eingang eine große Änderung des Ausgangs zu Folge haben. Allerdings ist am Ausgang nur dann eine Stellgröße vorhanden, solange eine Regelabweichung existiert. Wäre diese null, so wäre auch der Ausgang null und die Regelstrecke wird nicht mehr angesteuert. Deshalb gibt es bei reinen P-Reglern stets eine bleibende Regelabweichung e_{bl} . Außerdem kann der Verstärkungsfaktor K_P nicht beliebig hoch gewählt werden, da die hohe Verstärkung zwar eine sehr schnelle Regelung, aber auch eine starke Neigung zum Aufschwingen der Regelstrecke zur Folge hat. Die Sprungantwort eines P-Reglers ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Abbildung 2.5 zeigt die Darstellung im Blockschaltplan.

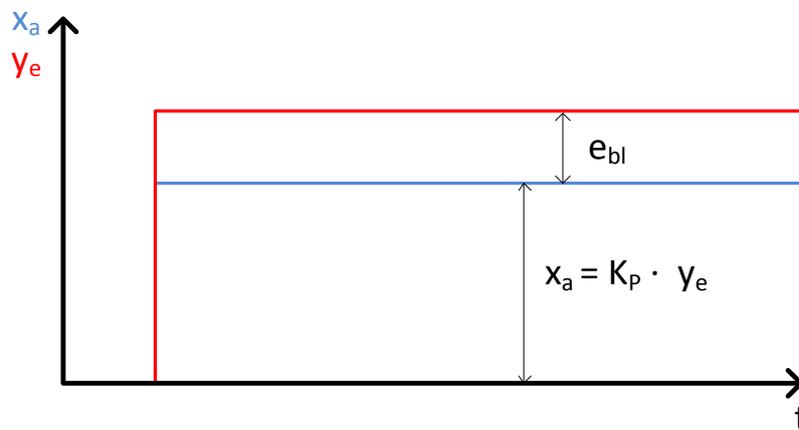


Abbildung 2.4: Sprungantwort P-Regler

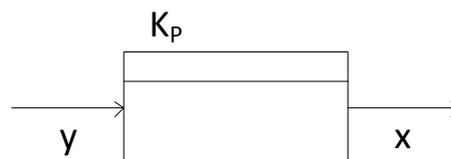


Abbildung 2.5: P-Regler im Blockschaltplan

2.6.2 Integral Regler

Bei einem Integral Regler (auch I-Regler genannt) ist die Änderungsgeschwindigkeit des Ausgangs von der Höhe des Eingangswertes abhängig. Ein konstantes Eingangssignal bewirkt also einen proportionalen Anstieg des Ausgangssignals. Dies hat zur Folge dass beim I-Regler, anders als beim P-Regler, keine bleibende Regelabweichung vorhanden ist, da das Ausgangssignal so lange ansteigt bzw. sinkt bis keine Regeldifferenz mehr vorhanden ist. Allerdings ist die Reaktionszeit gegenüber dem P-Regler sehr gering. Für den Fall eines sprunghaften Eingangssignals gilt:

$$x_a = K_I \cdot \Delta y_e \cdot t, \tag{2}$$

wobei der Integrierbeiwert

$$K_I = \frac{1}{T_I} \tag{3}$$

und T_I die Zeit ist, die die Ausgangsgröße benötigt um den Wert der Eingangsgröße zu erreichen. Je größer also K_I , desto steiler der Anstieg der Ausgangsgröße bei sprunghafter Eingangsgröße. In der Praxis darf dieser Wert wie auch beim P-Regler aber nicht zu groß gewählt werden, da sonst die Schwingneigung stark zunimmt. Der I-Regler ist also ein langsamer, aber genauer Regler. Die Sprungantwort des I-Reglers ist in Abbildung 2.6 dargestellt. Abbildung 2.7 zeigt die Darstellung im Blockschartplan.

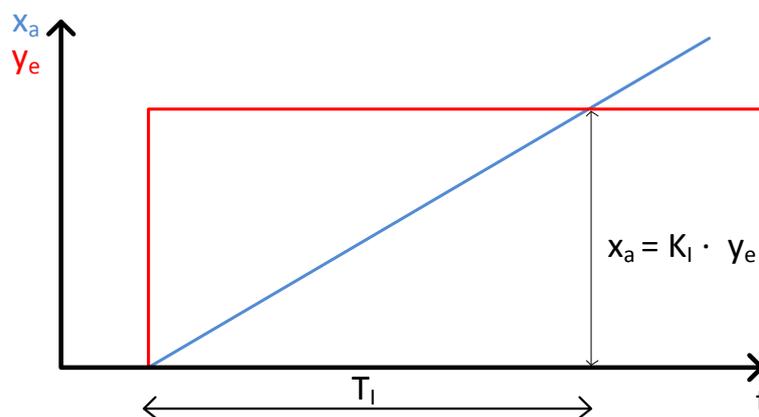


Abbildung 2.6: Sprungantwort I-Regler

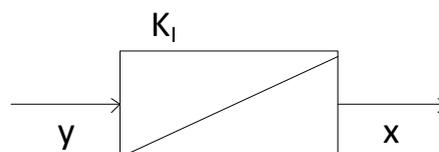


Abbildung 2.7: I-Regler im Blockschartplan

2.6.3 Differential Regler

Der Ausgang des Differential Reglers (auch D-Regler genannt) ist von der Änderungsgeschwindigkeit des Eingangssignals abhängig. Ein sprunghaftes Eingangssignal an einem D-Regler hat also einen theoretisch unendlich großen Nadelimpuls am Ausgang und somit eine sehr schnelle Beeinflussung der Regelstrecke zur Folge (siehe Abbildung 2.8). Dieser Impuls wird durch konstruktive bzw. energietechnische Randbedingungen begrenzt bzw. verzögert. Ein konstanter Anstieg des Eingangssignals bewirkt demnach ein konstantes Ausgangssignal. Es gilt:

$$x_a = K_D \cdot \frac{\Delta y_e}{\Delta t} . \quad (4)$$

K_D ist hierbei der Differentialbeiwert, dieser kann aus der Anstiegsantwort ermittelt werden (siehe Abbildung 2.9).

Ein D-Regler ist in der Praxis nicht alleine einsetzbar, da ein Ausgangssignal nur vorhanden ist solange sich die Eingangsgröße ändert. Eine konstante Störgröße wird also nicht ausgeregelt. Er wird deshalb meist in Kombination mit einem P- bzw. einem PI-Regler eingesetzt. Abbildung 2.10 zeigt die Darstellung im Blockschaltplan.

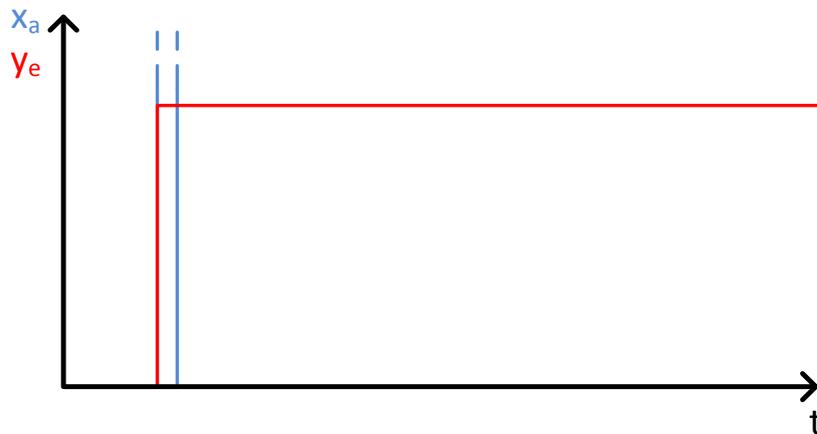


Abbildung 2.8: Sprungantwort D-Regler

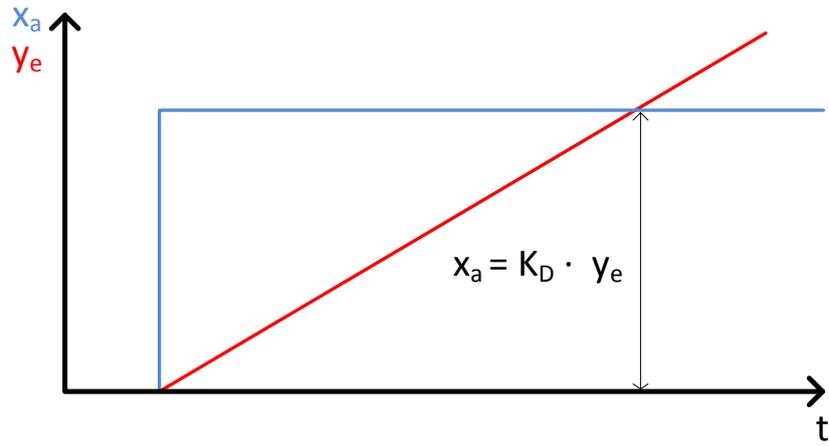


Abbildung 2.9: Anstiegsantwort D-Regler

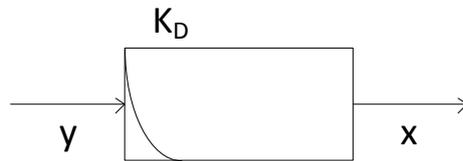


Abbildung 2.10: D-Regler im Blockschatplan

2.6.4 Kombinationen von Regelgliedern

Alle drei genannten Grundregler (P-, I- und D-Regler) können parallel geschaltet neue Übertragungsglieder bilden und damit eine bessere und schnellere Regelung gewährleisten. Beispielsweise bildet die Kombination aus einem schnellen P-Regler, der eine bleibende Regelabweichung aufweist und einem langsamen I-Regler, der die bleibende Regelabweichung ausgleicht, einen schnellen PI-Regler ohne bleibende Regelabweichung. Die Vorteile der einzelnen Übertragungsglieder können hier also gemeinsam genutzt und die Nachteile ausgeglichen werden. Wann welche Kombination der Übertragungsglieder eingesetzt wird, ist abhängig von der zu regelnden Strecke. Je nach Verhalten der Regelstrecke kann ein anderer Regler erforderlich sein. Eine grundlegende Eignung von Reglern für bestimmte Regelstrecken kann in Kapitel 2.9 gefunden werden. Letztendlich ist die Einstellung der Reglerbeiwerte entscheidend für eine gute Regelung.

Die parallele Kombination von einem P-, I- und einem D-Regler bildet einen PID-Regler. Dieser addiert die Regeleigenschaften der drei Regleranteile nach

$$x_a = K_P \cdot y_e + K_I \cdot \Delta y_e \cdot t + K_D \cdot \frac{\Delta y_e}{\Delta t}. \quad (5)$$

Diese Kombination erfordert eine genaue Einstellung der Beiwerte, ermöglicht dann aber eine sehr schnelle und exakte Regelung. Die Sprungantwort eines PID-Reglers (Abbildung 2.11) zeigt deutlich die zusammengesetzten Anteile des P-, I- und D-Reglers. Die blau gestrichelte Darstellung ist eine Idealisierung, da regelungstechnische Aufbauten grundsätzlich mit Verlusten bzw. kleinen Verzögerungen behaftet sind. In der Praxis haben diese allerdings meist keinen bedeutenden Einfluss auf die Regelung und können deshalb vernachlässigt werden.

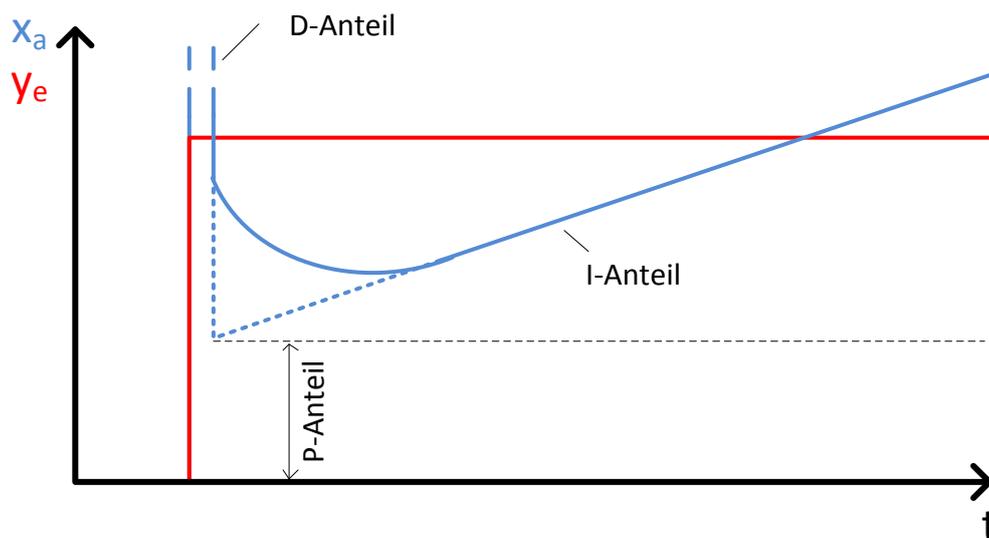


Abbildung 2.11: Sprungantwort PID-Regler

2.7 Realisierung von Reglern

Bei dem Aufbau des Reglers stellt sich zunächst die Frage, ob das System digital oder analog realisiert wird. Die Umsetzung eines analogen Reglers geschieht meist mit Operationsverstärkern. Wie bereits in Kapitel 2.1 beschrieben können Operationsverstärker durch eine entsprechende Beschaltung mit Widerständen und Kondensatoren als P-, I- und D-Reglern aufgebaut werden. Außerdem dienen die Operationsverstärker als Vergleicher, Spannungsfolger und Zweipunktregler (siehe Kapitel 3.7). Die analoge Umsetzung ermöglicht in Bezug auf die Anwendung mit Auszubildenden einen anschaulichen, verständlichen Schaltplan zur didaktischen Vertiefung der Inhalte vorangegangener Lehrgänge. Damit wird ein besseres Verständnis der Regelungsvorgänge ermöglicht. Die Beiwerte der Regler können leicht über z.B. ein Potentiometer³ verändert werden.

Ein digitaler Regler verarbeitet die analogen Messsignale nicht mit Operationsverstärkern, sondern die Stellgröße wird mit einem Mikrocontroller errechnet und ausgegeben. Dafür wird das digitale Eingangssignal mit Hilfe eines Analog-Digital-Umwandlers in ein binäres Signal umgewandelt. Der Sollwert kann direkt digital vorgegeben werden, oder muss von analog nach digital umgewandelt werden. Die errechnete Stellgröße muss dann bei einer analogen Regelstrecke anschließend wieder in ein analoges Signal mit Hilfe eines Digital-Analog-Umwandlers umgewandelt werden. Funktionell gibt es keinen wesentlichen Unterschied zwischen einem digitalen und einem analogen Regler. Der digitale Regler hat aber den großen Vorteil, dass die Programmierung der Regelung ohne Eingriff in die Hardware geändert werden kann. Über eine Programmierschnittstelle können jederzeit alle Parameter oder die komplette Programmierung angepasst werden. Bei Software Programmen mit integrierter grafischer Benutzeroberfläche kann die Regelung direkt vom Anwender mit Hilfe eines Computers beeinflusst werden.

Eine Möglichkeit der verhältnismäßig einfachen digitalen Umsetzung ist die Anwendung der Arduino-Plattform (siehe Abbildung 2.12). Der Hersteller „Smart Projects“ aus Italien erfand diese Open-Source-Plattform um insbesondere Einsteigern einen leichten Zugang zu Mikrocontrollern zu ermöglichen. Herzstück der Plattform ist ein auf der Maschinsprache Assembler basierender Atmel ATmega AVR Mikrocontroller. Über digitale Ein- und Ausgänge, von denen einige auch analoge Signale verarbeiten können, kann dann der Mikrocontroller die Daten einlesen und ausgeben. Über eine stetig wachsende Palette an Zusatzmodulen, sog. „Shields“, kann die Plattform nahezu beliebig mit Sensoren, Aktoren, Funkmodulen, Ausgabetreibern etc. erweitert werden.

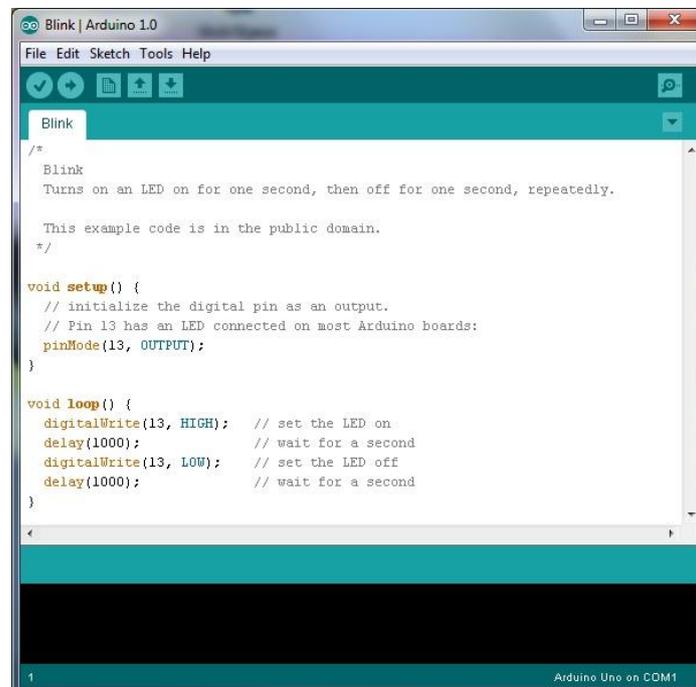
³ Potentiometer: Einstellbarer elektrischer Widerstand



Abbildung 2.12: Arduino Uno

Quelle: http://arduino.cc/en/uploads/Main/ArduinoUno_R3_Front.jpg (Letzter Zugriff: 24.01.12)

Die zugehörige Arduino IDE⁴, eine eigens entwickelte Software, basiert auf der IDE von Processing. Processing ist eine objektorientierte Programmiersprache die für Anwendungen im Bereich Grafik und Simulation entwickelt wurde. Die Sprache kann als einfache Version der Programmiersprache Java gesehen werden, ist also stark an C/C++ angelehnt. In der Arduino IDE sind ein eigener Editor und ein Compiler integriert. Die Abbildung 2.13 zeigt ein Beispiel eines einfachen Programms in der Oberfläche der Arduino Software, welches eine LED blinken lässt.



⁴ IDE: Integrated Development Environment = Integrierte Entwicklungsumgebung

Die Kommunikation des ATmega mit dem Computer erfolgt über eine serielle Schnittstelle, bei neueren Modellen dieser Plattform via USB, Bluetooth oder ZigBee⁵.

Der große Nachteil der digitalen Umsetzung, bezogen auf das Anwendungsgebiet als Lehrmittel, ist allerdings die geringe Transparenz eines digitalen Systems. Die Auszubildenden müssten bereits Vorkenntnisse im Bereich der Mikrocontrollerprogrammierung haben, um das System und damit die Regelung verstehen und eigenständig beeinflussen zu können. Dieses Themengebiet wird in der Ausbildung meistens nicht umfassend genug behandelt um die Programmierung im Rahmen des Lehrgangs verstehen zu können. Um zumindest die Bedienung zu veranschaulichen, müsste z.B. eine Oberfläche entwickelt werden, über die mittels grafischer Bedienelemente oder Eingabefelder die erforderlichen Werte verändert werden können.

2.8 Eigenschaften unterschiedlicher Regelstrecken

Die Regelstrecke enthält die Regelgröße und ist damit die Grundlage für die Regelung. Anhand des Verhaltens der Regelstrecke muss der Regler ausgelegt und eingestellt werden. Regelstrecken weisen wie auch die Regler ein P-, I- oder D-Verhalten, bzw. Kombinationen davon, auf. Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich lineare Regelstrecken behandelt, da nichtlineare Systeme meist nur sehr aufwendig zu berechnen sind und der Anwendung als anschauliches Experimentiersystem nicht dienen würden.

So gut wie alle realen Regelstrecken sind mit mehr oder weniger großen Verzögerungen und/oder Totzeiten behaftet (Regler sind in der Praxis ebenfalls verzögert, allerdings sind die Verzögerungen im Vergleich mit der Regelstrecke meist sehr gering). Verzögerungen in Regelgliedern entstehen durch Speicher oder Massen, beispielsweise in einem Kondensator (Ladezeit) oder einer trägen Schwungmasse (Massenträgheit) an einem Motor. Diese verursachen einen Zeitunterschied zwischen Eingangssignaländerung und Ausgangssignaländerung. Die Anzahl der Massen bzw. Speicher entspricht der Ordnung. Ist in dem Übertragungsglied nur eine Masse bzw. nur ein Energiespeicher vorhanden, so handelt es sich um eine Verzögerung 1. Ordnung. Bei einem Verzögerungsglied 2. Ordnung sind zwei Massen bzw. Energiespeicher vorhanden usw. Sind zwei oder mehr Speicher in einem Übertragungsglied vorhanden besteht die Möglichkeit, dass die Energie zwischen ihnen hin und her pendelt und das System somit schwingt.

⁵ ZigBee: Funknetz-Standard, für Verbindungen von 10 m – 100 m

Dabei gibt es nach (Schulz, 2010) folgende Einteilung des Schwingverhaltens in Abhängigkeit der Dämpfung D :

- Stark gedämpftes System $D > 1$
- Aperiodischer Grenzfall $D = 1$
- Schwach gedämpftes System $0 < D < 1$
- Dauerschwingung $D = 0$
- Instabiles System $D < 0$

Diese Verhaltensweisen sind in Abbildung 2.14 (Gedämpfte Systeme) und Abbildung 2.15 (Schwingende Systeme) grafisch dargestellt, jeweils als Sprungantwort einer Sprungfrage von 0 auf 1 bei $t = 0$ s

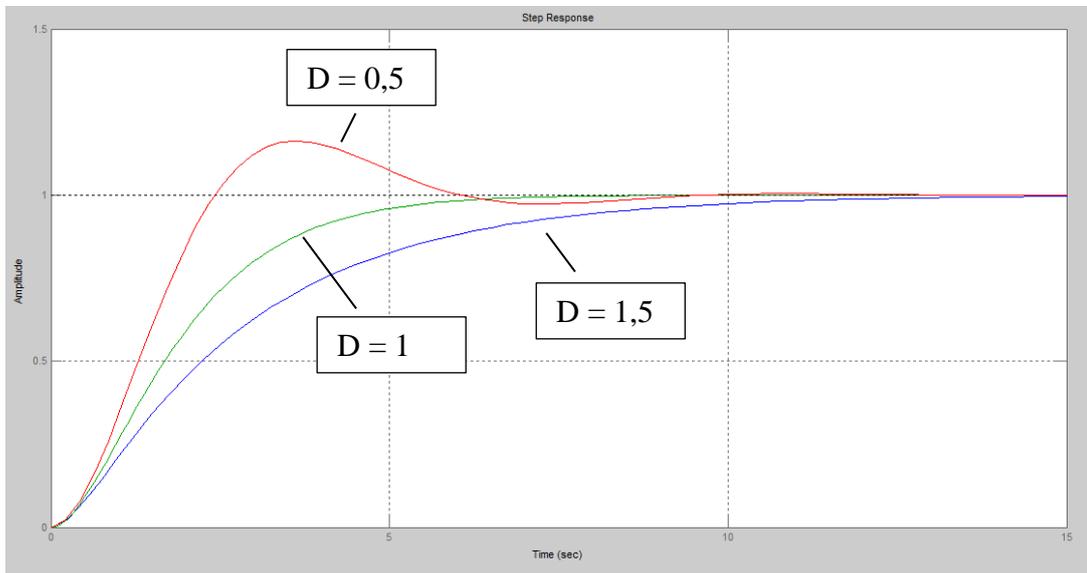


Abbildung 2.14: Gedämpfte Systeme

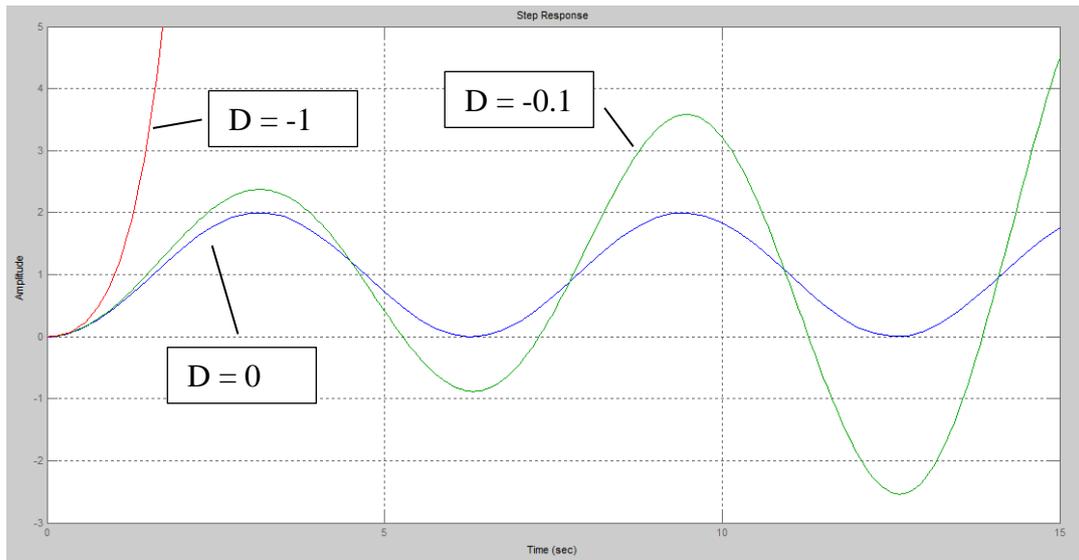


Abbildung 2.15: Schwingende Systeme

Schwingungen sind in der Praxis meist nicht erwünscht. Gerade ein aufschwingendes Verhalten kann zur Zerstörung der Regelstrecke führen. Durch entsprechende Auslegung des Reglers können diese Schwingungen vermieden werden. Ob und wie viel ein System Überschwingen darf ist stark abhängig von der Anwendung. Bei einer gewöhnlichen Raumtemperaturregelung ist es durchaus tolerierbar dass die Temperatur um einige Prozent über den Sollwert schwingt, sofern sie den Sollwert dadurch schneller erreicht. Bei einer Dreh- oder Fräsmaschine wäre ein minimales Überschwingen allerdings fatal, da der Materialabtrag zu groß wäre und oftmals eine Genauigkeit von wenigen Millimeterbruchteilen eingehalten werden muss.

Regelstrecken werden außerdem in ihrem Ausgleichverhalten unterschieden. Es gibt Strecken mit Ausgleich und ohne Ausgleich. Strecken mit Ausgleich erreichen nach einer gewissen Zeit einen konstanten Endwert, bei Strecken ohne Ausgleich steigt die Regelgröße theoretisch ständig an. Regelstrecken ohne Ausgleich sind IT_x -Strecken, besitzen also ein integrales Verhalten (I), ggf. mit Verzögerung (T) mit einer Ordnung (x). Regelstrecken mit Ausgleich sind PT_x Strecken, wobei das P für Proportional steht. Im Folgenden sind einige typische Regelstrecken und deren Sprungantworten kurz erläutert.

PT_0 -Glied

Bei einem PT_0 -Glied handelt es sich um ein P-Glied ohne Verzögerung. Die Sprungantwort ist bereits in Kapitel 2.6.1 in Abbildung 2.4 dargestellt. Solch ein Verhalten kommt in der Realität nicht vor, da alle Regelstrecken grundsätzlich mit einer Verzögerung behaftet sind. Diese sind allerdings manchmal so klein, dass sie bei gewissen Anwendungen vernachlässigt werden können. Beispielsweise kann der Ausgang eines gewöhnlichen Opera-

tionsverstärkers, z.B. LM741⁶, bei einem Sprung am Eingang die Ausgangsspannung nicht sofort ausgegeben, sondern sie steigt mit einer sog. „Slew Rate“ von 0,5 V/μs an (siehe Anhang III). Ein Sprung der Ausgangsspannung auf 10 V dauert dementsprechend 20 μs. Im normalen Niederfrequenzbetrieb fällt diese Zeitverzögerung nicht auf. Handelt es sich allerdings um Anwendungen im Hochfrequenzbereich muss diese „Slew Rate“ beachtet werden und ggf. ein schnellerer Operationsverstärker gewählt werden.

PT₁-Glieder

Eine typische Sprungantwort eines PT₁-Gliedes ist in Abbildung 2.16 zu sehen. Abbildung 2.17 zeigt die Darstellung im Blockschaltplan.

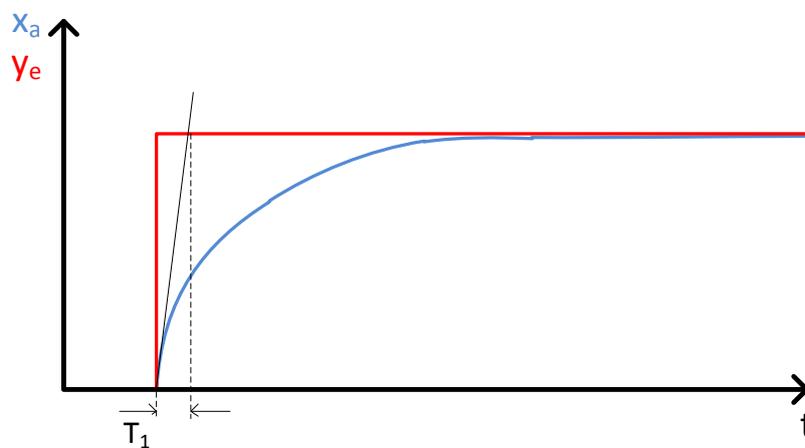


Abbildung 2.16: Sprungantwort PT₁-Glieder

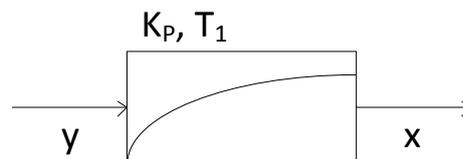


Abbildung 2.17: PT₁-Glieder im Blockschaltplan

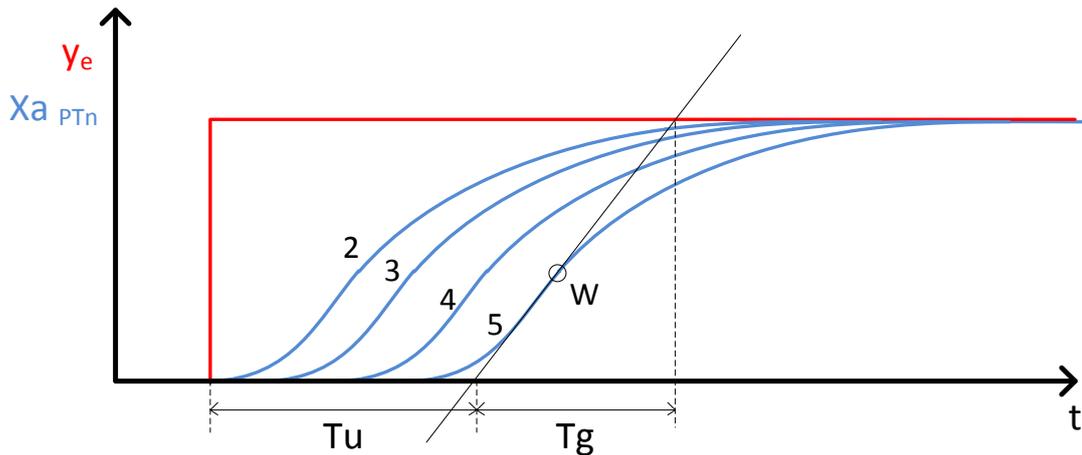
Dieser Verlauf tritt z.B. bei einem RC-Glied⁷ auf, bei dem der Kondensator der Energiespeicher ist. Wird eine Spannung an den Kondensator gelegt (Sprungfrage), lädt sich dieser langsam auf. Dadurch entsteht eine typische Ladekurve. Aus dieser Sprungantwort kann durch Einzeichnen der Kurventangente im Startpunkt die charakteristische Zeitkonstante T₁ grafisch bestimmt werden. Diese Zeitkonstante dient in verschiedenen Verfahren zur Auslegung des Reglers, da die Beiwerte des Reglers von der Zeitkonstante der Strecke abhängig sind.

⁶ IC mit einem integrierten Operationsverstärker

⁷ RC-Glied: Elektronische Schaltung aus Widerstand (R) und Kondensator (C)

PT_n-Glieder

Ein PT_n-Verhalten (Abbildung 2.18) zeichnet sich dadurch aus, dass die Ausgangsgröße nicht sofort ansteigt, sondern mit einer waagerechten Tangente beginnt und im Kurvenverlauf einen Wendepunkt aufweist. In der Praxis kommen Regelstrecken mit 2. Ordnung und höher am häufigsten vor. Ein PT_n-Glieder gleich einer Hintereinanderschaltung von n PT₁-Gliedern.

Abbildung 2.18: Sprungantwort PT_n-Glieder

Verzögerungsglieder höherer Ordnung zeigen einen ähnlichen Kurvenverlauf wie ein PT₂-Glieder, allerdings beginnt die Steigung immer später und der Endwert wird ebenfalls später erreicht. Durch Einzeichnen der Wendetangente sind die charakteristischen Kennwerte (Verzugszeit T_u und Ausgleichszeit T_g) auch hier grafisch zu ermitteln (nach (Böther, et al., 1990 S. 356)).

PT_t-Glieder (Totzeit-Glieder)

Bei Totzeit-Gliedern erscheint die Eingangsgröße erst nach einer gewissen Zeit T_t am Ausgang. Wird z.B. ein leeres Förderband mit 10 m Länge und einer Fördergeschwindigkeit von 1 m/s am Anfang mit Schüttgut beladen, so stellt der Sensor am Ende des Förderbandes das Schüttgut erst 10 s später fest. Dies erschwert eine Regelung enorm, da eine Änderung der Regelgröße erst nach einer Totzeit von 10 s festgestellt wird. Eine Sprungantwort für ein PT_t-Glieder ist in Abbildung 2.19 dargestellt. Abbildung 2.20 zeigt die Darstellung eines Totzeitgliedes im Blockschaltplan.

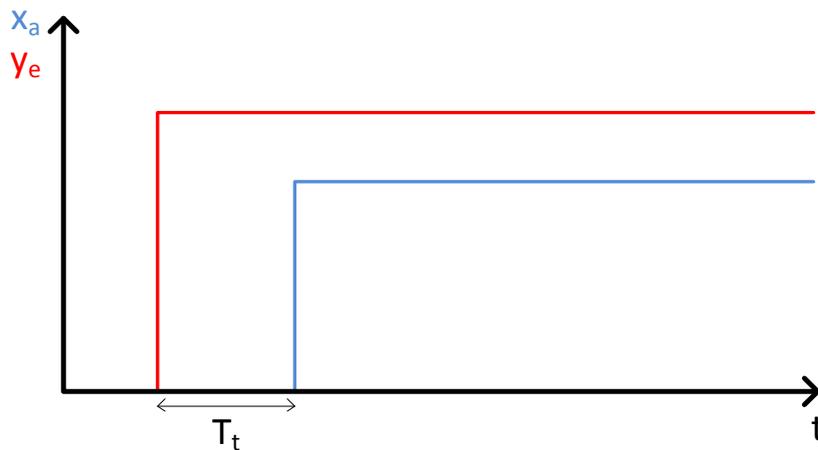


Abbildung 2.19: Sprungantwort Totzeitglied

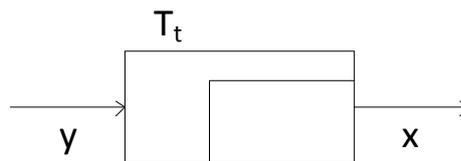


Abbildung 2.20: Totzeitglied im Blockschaltplan

IT₁-Glieder

Ein I-Glied ohne Verzögerung wurde bereits in Kapitel 2.6.2 behandelt. I-Glieder mit Verzögerung 0., 1. bzw. 2. Ordnung zeigen folgende Sprungantworten:

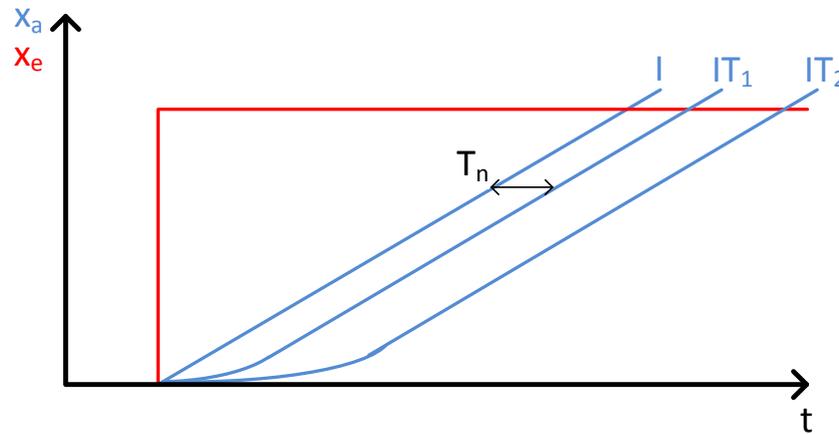


Abbildung 2.21: Sprungantworten IT_n-Glieder

Die Sprungantwort des IT₁-Gliedes ist gegenüber dem reinen I-Glied zeitversetzt und steigt mit einer leichten Kurve an. Eine höhere Ordnung bewirkt eine weitere Verschiebung nach rechts. Die Zeit T_n , die zwischen der verzögerten I-Kurve und der nicht verzögerten I-Kurve liegt, ist die sog. Nachstellzeit. Ein IT_n-Glieder gleicht einer Hintereinanderschaltung eines I-Gliedes und n PT₁-Gliedern.

2.9 Vergleich von Reglern an einer Regelstrecke

Da nun die Eigenschaften von verschiedenen Reglern und Regelstrecken im Einzelnen erläutert wurden, wird hier nun ein Blick auf die Auswirkungen verschiedener Regler auf eine Regelstrecke im kompletten Regelkreis geworfen. Abbildung 2.22 zeigt den Vergleich verschiedener Regler an einer Regelstrecke mit PT_2 -Verhalten, jeweils bei einer Sprungfrage von 0 auf 1.

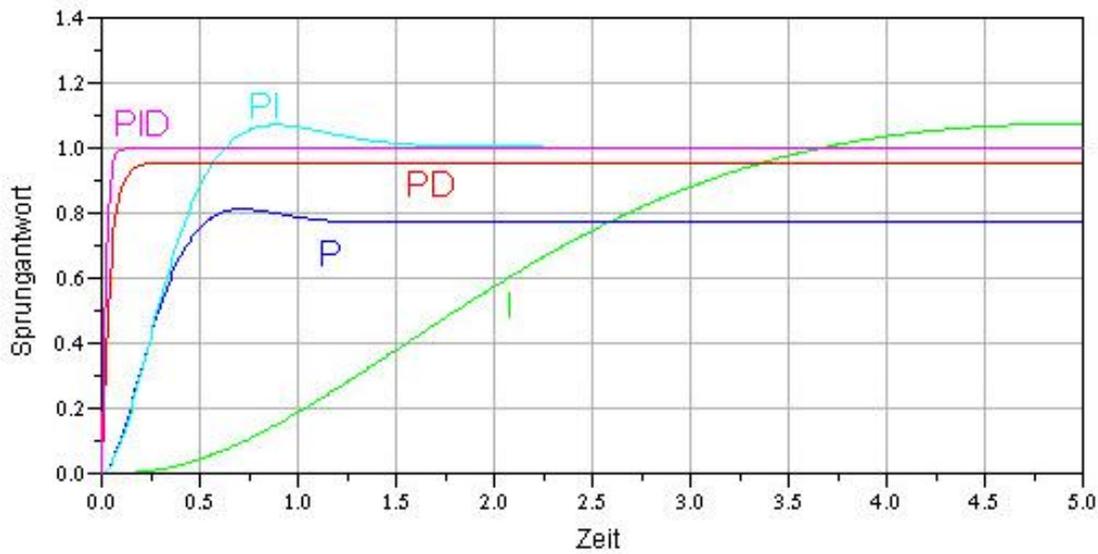


Abbildung 2.22: Vergleich der Regler in einem Regelkreis

Quelle: <http://www.roboternetz.de/wiki/uploads/Main/vergleich.gif> (Letzter Zugriff: 13.02.12)

Gut zu sehen ist der grundsätzliche Unterschied zwischen P- und I-Regler. Der P-Regler kommt dem Sollwert schnell nahe. Allerdings ist immer eine bleibende Regelabweichung vorhanden. Ein reiner I-Regler ist sehr langsam, würde aber nach einiger Zeit den Sollwert erreichen und hätte somit keine bleibende Regelabweichung. Die Kombination von P- und I-Regler ist zwar langsamer als der P-Regler und schwingt anfangs etwas über den Sollwert, hat aber keine bleibende Regelabweichung. Erst die Kombination von allen drei Reglern (PID) erreicht den Sollwert sehr schnell ohne über zu schwingen und ohne bleibende Regelabweichung

Dieser Vergleich zeigt nur die wesentlichen Unterschiede zwischen den Reglerkombinationen. In der Praxis allerdings spielen die Einstellungen der Regler und die Eigenschaften und Anforderungen der Strecke auch eine große Rolle. Für einige Anwendungen, wie z.B. eine Fräsmaschine, ist ein Überschwingen unter allen Umständen zu vermeiden.

Dieser Vergleich zeigt, dass nicht jeder Regler für jede Regelstrecke geeignet ist. Eine grobe Einteilung der Regler für bestimmte Regelstrecken ist in Tabelle 1 dargestellt (nach (Brechmann, et al., 2006 S. 302)). Anhand dieser Tabelle kann eine erste Einschätzung der

Eignung eines Reglers vorgenommen werden. Gut zu erkennen ist z.B., dass der PI-Regler für fast alle Regelstrecken geeignet ist, der PD-Regler allerdings nur für Strecken mit I-Anteil und Verzögerung. Neben der Auswahl ist natürlich nach wie vor die Einstellung der Reglerparameter für die Güte der Regelung maßgeblich.

| Strecke | | Regler | | | | | |
|------------|--------|----------------------|------------|--------------|----|-----|----------------|
| | | P | I | PI | PD | PID | 2-Punkt-Regler |
| P-Strecken | P_0 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| | PT_1 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| | PT_2 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| | PT_T | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| I-Strecken | I_0 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| | IT_1 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| | IT_t | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| | | ■ besonders geeignet | ■ geeignet | ■ ungeeignet | | | |

Tabelle 1: Eignung von Reglern

3 Entwicklung des Regelkreises

Da nun die Grundlagen der Regelungstechnik erläutert wurden kann nun der Regelkreis für das Experimentiersystem entwickelt werden. Bei der Entwicklung des Regelkreises spielt die Regelstrecke eine tragende Rolle. Erst wenn die Regelstrecke bekannt ist, kann der Regler dafür ausgelegt werden. Deshalb folgt nach den Anforderungen an die Regelstrecke zunächst ein Auswahlverfahren, in dem ermittelt wird welche Regelstrecke am besten für die Anwendung im Experimentiersystem geeignet ist. Die ausgewählte Regelstrecke wird dann im praktischen Versuch getestet und deren Sprungantwort aufgenommen. Anhand der Sprungantwort können das Verhalten, die charakteristischen Kennwerte sowie die Güte der Regelbarkeit der Strecke ermittelt werden. Anschließend folgt die Entwicklung und Auslegung der anderen Regelkreiselemente wie Regler, Vergleicher, Sollwertgeber usw. Bei der Auslegung des Reglers spielt der Einstellbereich der Reglerbeiwerte eine tragende Rolle. Dieser Bereich ist ausschlaggebend für die späteren Einstellmöglichkeiten und somit für die erzielbaren Effekte der Regelung.

In Kapitel 2.7 wurden die Möglichkeiten der analogen bzw. digitalen Realisierung des Reglers und deren Vor- und Nachteile erläutert. Es ist nicht das Ziel eine möglichst schnelle, genaue und kompakte Regelung zu entwickeln, sondern ein transparentes Experimentiersystem an dem die Auszubildenden selbstständig arbeiten können. Bei Bedarf kann dann die Schaltung des Regelkreises mit den Auszubildenden besprochen werden, so dass sie keine sog. Black Box⁸ bedienen müssen. Zudem kann dann auch auf eine PC-Schnittstelle und eine Programmierung verzichtet und die in der Ausbildungswerkstatt zur Verfügung stehenden Mittel zur Umsetzung genutzt werden. Basierend auf den genannten Gründen wird das Experimentiersystem im Rahmen dieser Arbeit analog mit Hilfe von Operationsverstärkerschaltungen umgesetzt.

3.1 Anforderungen an die Regelstrecke

Die folgenden Anforderungen wurden in Zusammenarbeit mit der Berufsausbildung erarbeitet.

Anhand der auszuwählenden Regelstrecke soll das Verhalten der verschiedenen Regler anschaulich vermittelt werden. Da das Experimentiersystem für die Ausbildung der Elektroniker für luftfahrttechnische Systeme entwickelt wird, soll die Regelstrecke einer Anwendung aus einem Passagierflugzeug ähneln. Diese Regelstrecke soll, getrennt von dem Regler, in einem eigenen separaten Modul aufgebaut werden, so dass sie ggf. gegen andere

⁸ Black Box: Geschlossenes System mit vernachlässigbaren Innenaufbau, es interessieren nur Ein- und Ausgänge

Regelstrecken ausgetauscht werden kann. Dafür müssen die Eingangs- und Ausgangsparameter so angepasst werden, dass weitere Strecken darauf ausgelegt werden können.

Um ungewollte Auswirkungen von Extremwerten zu vermeiden soll es sich bei der Regelstrecke um eine Strecke mit Ausgleich handeln. Das heißt, dass sich bei Änderung der Stellgröße ein neuer Gleichgewichtszustand einstellt. Außerdem soll der Regelkreis so ausgelegt sein, dass durch verschiedene Einstellungen der Reglerbeiwerte sowohl eine gute und schnelle Regelung als auch eine schlechte, z.B. schwingende Regelung erreicht werden kann. Den Auszubildenden sollen anhand des Experimentiersystems die typischen Eigenschaften einer guten und einer schlechten Regelung gezeigt werden können. Als Regler kommt ein PID Regler mit abschaltbaren Komponenten zum Einsatz, so dass auch andere Reglerkombinationen wie P- und PI-Regler einstellbar sind.

Der Bezug zu einer Anwendung im Passagierflugzeug soll später vor allem durch eine Visualisierung der Regelstrecke entstehen. Die Regelstrecke an sich soll einfach und überschaubar gehalten sein, damit die regelungstechnischen Vorgänge gut zu erläutern sind.

Die Aufnahme der Regelgröße soll mit Hilfe eines Oszilloskops geschehen, da darauf die Signalverläufe sehr gut dargestellt werden können. Die Regelgröße darf sich nicht so schnell ändern dass der Vorgang der Regelung nur mit Messinstrumenten messbar ist, sondern er soll auch durch bloßes Sehen/Hören erkennbar sein. Dies erfordert zeitliche Verzögerungen in der Regelstrecke. Allerdings soll die Messung mit verschiedenen Parametern mehrfach wiederholt werden können, der Regelvorgang sollte also nach einigen Sekunden abgeschlossen sein. Optional ist eine weitere, langsame Regelstrecke zu entwickeln an der die Messwerte in bestimmten Zeitschritten abgelesen werden können und daraus ein entsprechendes Diagramm erstellt werden kann. Der Regelvorgang sollte dabei mehrere Minuten in Anspruch nehmen.

Des Weiteren soll die Spannungsversorgung der Regelstrecke nicht mehr als ± 20 V DC betragen um sie an einem gewöhnlichen Labornetzteil betreiben zu können. Die physikalischen Werte dürfen selbstverständlich keine Werte überschreiten die für den Bediener gefährlich werden könnten. Um diese Anforderungen zu erfüllen ist es notwendig, einige in Frage kommenden Regelstrecken zu diskutieren und anschließend die am besten geeignete auszuwählen.

3.2 Auswahl der Regelstrecke

Im Folgenden sind einige typische Regelstrecken mit Anlehnung an eine Anwendung im Passagierflugzeug und ihre Eigenschaften vorgestellt. Aus ihnen werden mit Hilfe eines Bewertungsverfahrens eine (optional zwei) ausgewählt, um die gestellten Anforderungen zu erfüllen.

Kabinentemperaturregelung

Als Anwendung der Temperaturregelung liegt die Kabinentemperatur nahe. Diese liegt meist im Bereich der normalen Raumtemperatur und könnte somit ohne große Heizleistungen in einem Modell realisiert werden. Die Erwärmung des Volumens könnte z.B. durch einen elektrischen Leistungswiderstand oder ein Peltier Element⁹ geschehen. Als Störgröße könnte eine Öffnung im Rumpf bzw. ein Lüfter dienen. Die Leistungsaufnahme kann relativ gering gehalten werden, sofern kein zu großes zu beheizendes Volumen genutzt wird. Eine Wiederholung der Messungen nimmt allerdings Zeit in Anspruch, da es einige Minuten dauert bis die Temperatur nach einer Erwärmung wieder auf Raumtemperatur gesunken ist.

Turbinendrehzahlregelung

Der Antrieb einer Modellturbine könnte einfach über einen Gleichstrommotor realisiert werden. Die Drehzahl liegt dabei dann natürlich weit unterhalb der nominalen Drehzahlen einer realen Turbine (ca. 10.000 1/min) um das Verletzungspotential, die Leistungsaufnahme und den Aufwand der Messung zu minimieren. Somit wird auch der Aufbau auf eine geometrisch akzeptable Größe reduziert. Als Störgröße dient eine zuschaltbare mechanische/magnetische Last. Nachteil der Drehzahlregelung ist, dass diese im Normalfall sehr schnell vonstattengeht, die Drehzahländerung in kleinen Bereichen also evtl. nicht optisch zu erkennen ist.

Lichtregelung

Die Regelung einer Lichtintensität stellt eine einfache Regelstrecke dar und könnte z.B. zur Regelung der Kabinenhelligkeit dienen. Die quantitative Aufnahme des Istwertes ist zwar etwas komplizierter, allerdings könnte diese Regelstrecke gut verwendet werden, um einen qualitativen Eindruck von der Auswirkung einzelner Regler zu bekommen. Eine Glühlampe als Leuchtmittel könnte träge genug sein, um ein eventuelles Schwingen bei schlecht eingestellten Reglern sichtbar zu machen. Die Störgröße ist verhältnismäßig einfach einzubringen indem man z.B. eine weitere externe Lichtquelle hinzuschaltet bzw. den Lichtsensor abdunkelt.

⁹ Peltier-Element: Elektrothermischer Wandler der durch einen elek. Stromfluss eine Temperaturdifferenz (oder umgekehrt) zwischen zwei Oberflächen erzeugt

Flüssigkeitsstandregelung

Ein Anwendungsgebiet der Flüssigkeitsstandregelung wäre das Betanken des Flugzeugs mit Kerosin oder das Auffüllen der Frischwassertanks. Dies ist sehr anschaulich, da man den Flüssigkeitsstand direkt an einer Skala o.ä. ablesen könnte. Die Zeit die zum Ändern des Füllstandes benötigt wird könnte über verschieden große Wasserreservoirs oder die Dimensionierung der Pumpe beeinflusst werden. Lediglich der Aufbau gestaltet sich als schwierig da mit dem Wasser in diesem Fall Gewicht, Gefäße und Pumpen einhergehen.

Druckregelung

Ebenso wie die Temperatur in der Flugzeugkabine muss auch der Druck geregelt und während der verschiedenen Flugphasen konstant gehalten werden. Eine Druckregelung erfordert allerdings auch in einem Experimentiersystem druckdichte Gehäuse, Pumpen und Messgeräte. Dies bedeutet eine wesentliche Erhöhung des Aufwandes. Die Störgröße könnte durch eine Öffnung in der Modellkabine eintreten. Diese müsste allerdings genau dimensioniert sein damit der Druckabfall nicht zu groß ist.

Positionsregelung

Für eine Positionsregelung dient z.B. die Stellung einer Flügelklappe an einer Modelltragfläche. Die Klappenstellung kann durch einen Sollwert auf einen gewissen Winkel eingestellt werden. Als Störgröße könnte die Klappe durch ein Gewicht, welches den Luftdruck simuliert, belastet werden. Vorteil dieser Positionsregelung ist, dass man das Ergebnis der Regelung sofort visuell erkennen kann und z.B. ein Schwingen oder eine bleibende Regelabweichung an einer Winkelskala ablesen könnte.

Aus den Anforderungen und den vorhergegangenen Beschreibungen der Regelstrecken werden für die Auswahl folgende Kriterien festgelegt.

- Anschaulichkeit, mit Flugzeugbezug
- Kleine Baugröße
- Geringer Herstellungsaufwand
- Geringer Materialaufwand
- Stabiles Verhalten
- Einfache Umwandlung physikalischer Größen
- Wiederholbarkeit
- Messreihe manuell erstellbar (optional)

Die Wertung reicht von ++ (sehr gut geeignet) bis zu -- (ungeeignet). Wertungen mit -- schließen den Einsatz der Regelstrecke kategorisch aus.

| Kriterien | Regelstrecke | | | | | |
|--|--------------|----------|----------|-------------------|----------|----------|
| | Temperatur | Drehzahl | Licht | Flüssigkeitsstand | Druck | Position |
| Anschaulichkeit, mit Flugzeugbezug | ++ | ++ | + | 0 | + | ++ |
| Kleine Baugröße | + | ++ | ++ | - | - | + |
| Geringer Herstellungsaufwand | ++ | + | ++ | - | - | 0 |
| Geringer Materialaufwand | + | + | ++ | - | - | 0 |
| Stabiles Verhalten | + | + | + | + | + | + |
| Einfache Umwandlung physik. Größen | + | 0 | + | - | - | + |
| Wiederholbarkeit | 0 | ++ | ++ | 0 | 0 | ++ |
| Messreihe manuell erstellbar (optional) | ++ | - | - | + | - | - |
| Platzierung | 2 | 3 | 1 | 5 | 6 | 4 |
| ++ = sehr gut geeignet; + = gut geeignet; 0 = einigermaßen geeignet; - = weniger geeignet; -- = ungeeignet | | | | | | |

Tabelle 2: Bewertung der Regelstrecken

Die Auswertung zeigt dass die Lichtregelstrecke den Anforderungen am besten entspricht. Die Lichtregelstrecke reagiert verhältnismäßig schnell und die Regelgröße ist direkt wahrnehmbar, so dass sich diese Strecke gut für die Demonstration verschiedener Regeleffekte eignet.

Ebenfalls gut geeignet wäre die Temperaturregelstrecke, da an ihr das zeitliche Verhalten gut durch die Aufnahme einzelner Messwerte ermittelt werden kann. Ihr Verhalten kann so ausgelegt werden, dass die gewünschte Temperatur in dem Zeitraum von einigen Minuten erreicht wird. Dies würde die optionale Anforderung der manuellen Diagrammerstellung erfüllen.

Die Lichtregelstrecke erfüllt zwar alle grundlegenden Anforderungen, in Kombination mit der Temperaturregelstrecke würde aber auch die optionale Anforderung erfüllt werden. Deshalb werden für das Experimentiersystem sowohl die Licht- als auch die Temperaturregelstrecke entwickelt.

3.3 Entwicklung der Lichtregelstrecke

3.3.1 Stellglied, Istwertaufnahme und Messumformer

Die Lichtregelstrecke besteht aus einer Glühlampe (12 V/5 W) mit Leistungstreiber, einem Lichtsensor und einem Messumformer. Anstatt einer Glühlampe könnte auch eine LED eingesetzt werden, allerdings ist die Regelung der Helligkeit einer LED aufgrund ihrer nicht geraden Kennlinie bzw. des kleinen Arbeitsbereiches nicht ohne schaltungstechnischen Aufwand zu realisieren. Eine Glühlampe hat eine annähernd gerade Kennlinie, bezogen das Verhältnis von Spannung zu Helligkeit und kann deshalb einfacher geregelt werden. Als Lichtsensor wird ein lichtabhängiger Widerstand (LDR¹⁰) verwendet. Da dieser nur seinen Widerstand in Abhängigkeit der Lichtmenge ändert, ist noch ein Messumformer erforderlich. Der Widerstandswert des LDR wird mit Hilfe des Messumformers in eine elektrische Spannung von 0 V – 10 V umgewandelt. Da die Lichtregelstrecke am gleichen Regler wie auch die Temperaturregelstrecke betrieben werden soll, sollen die Messumformer beider Regelstrecken einen Messbereich von 0 V – 10 V haben. Um den Einfluss der Umgebungshelligkeit zu reduzieren wird der LDR mit einem Gehäuse nach oben sowie zu drei Seiten abgedeckt. An der offenen Seite befindet sich die Glühlampe. Der Widerstand bei ausgeschalteter Glühlampe, ausgeschalteter Laborbeleuchtung und Tageslichteinfall beträgt:

$$R_{LDR,AUS} = 1 \text{ k}\Omega$$

Der Widerstand bei gleichen Umgebungsbedingungen, aber eingeschalteter Glühlampe (10 V) beträgt:

$$R_{LDR,EIN} = 287 \Omega$$

Dieser Widerstand ist natürlich trotz Abdeckung ein wenig vom Standort der Regelstrecke und der vorherrschenden Umgebungshelligkeit abhängig. Deshalb sollte der Messbereich mit diesen ermittelten Widerständen nicht komplett ausgereizt werden, sondern noch Spielraum offen lassen. Der Messumformer wird so ausgelegt, dass die oben genannten Widerstandswerte in eine Spannung von 2 V – 8 V umgewandelt werden. Diesen Zweck erfüllt ein einfacher Messumformer mit einem Operationsverstärker (siehe Abbildung 3.1). Um stabile Ausgangswerte trotz schwankender Versorgungsspannung sicherzustellen ist es notwendig den Messumformer mit einer konstanten Spannung zu versorgen. Näheres dazu in Kapitel 3.6. Die Widerstände wurden online nach (Gemmel) berechnet.

Da der Ausgang des Reglers nur einen geringen Strom von ca. 25 mA liefern kann (siehe Anhang III), ist ein Leistungstreiber für die Glühlampe erforderlich. Diese benötigt bei voller Leistung einen maximalen Strom von

¹⁰ LDR: Light Dependent Resistor = Lichtabhängiger Widerstand, Fotowiderstand

3.3.2 Versuch zur Ermittlung der Sprungantwort

3.3.2.1 Ziel und Zweck des Versuchs

Ziel des Versuches ist es, die Sprungantwort einer Lichtregelstrecke aufzunehmen, um daraus auf das Verhalten der Regelstrecke und die charakteristischen Kennwerte schließen zu können. Dies ist erforderlich, um anschließend den Regler für diese Regelstrecke auslegen zu können.

3.3.2.2 Aufbau

Zur Aufzeichnung der Sprungantwort wurde eine Platine (siehe Abbildung 3.2), mit der Glühlampe (PKW-Bremslicht-Glühlampe, 12 V/5 W) und deren Treiber (TDA2030) nach dem Schaltplan in Abbildung 3.1 verwendet. Auf einem Steckbrett wurde die Messschaltung zur Istwertaufnahme inkl. LDR aufgebaut. Einige der Widerstandswerte wurden geringfügig abgeändert, da die errechneten Werte nicht vorrätig waren. Der LDR ändert seinen Widerstand in Abhängigkeit von der Lichtmenge die auf seine Oberfläche trifft. Um den Einfluss der Umgebungshelligkeit möglichst gering zu halten ist der LDR nach oben und zu drei Seiten abgedeckt. In Reihe zur Glühlampe wird ein Schalter geschaltet um diese manuell Ein- und Ausschalten zu können. Die Spannung und der Strom der Glühlampe werden mit Spannungs- bzw. Strommessgeräten gemessen um die Leistung bestimmen zu können. Die Messung wird bei ausgeschalteter Laborbeleuchtung und Tageslichteinfall durch die Fenster durchgeführt. Die Umgebungshelligkeit entsprach subjektiv der durchschnittlichen Helligkeit im Laborraum. Durch die Abdeckung des LDR wird der Umgebungseinfluss aber gering gehalten.

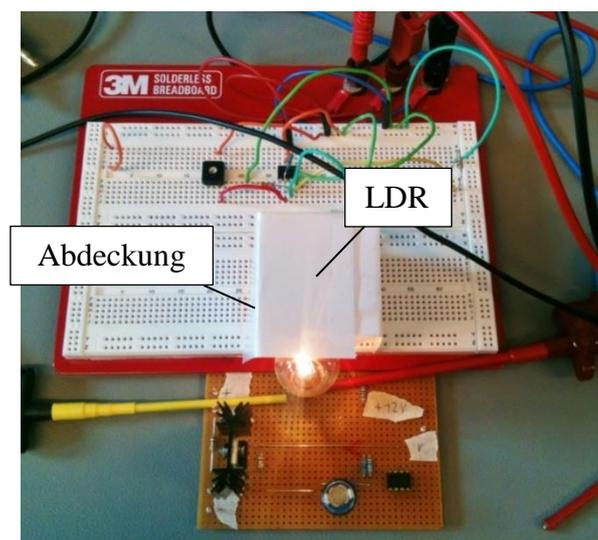


Abbildung 3.2: Test-Lichtregelstrecke

3.3.2.3 Durchführung

Zur Aufzeichnung der Sprungantwort wird die Stellgröße y des Versuchsaufbaus der Regelstrecke mit einem Spannungssprung von 0 V auf 10 V beschaltet. Die Helligkeit wird mit Hilfe des LDR und der zugehörigen Messschaltung gemessen. Die Ausgangsspannung der Messschaltung wird mit einem Speicheroszilloskop aufgezeichnet. Anschließend wird die Sprungantwort ausgewertet.

3.3.2.4 Ergebnis

Die Regelstrecke zeigt beim Einschalten der Glühlampe ein PT_2 Verhalten (siehe Abbildung 3.3). Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Drahtwendel der Glühlampe träge auf den Spannungssprung reagiert bzw. nicht sofort zu glühen beginnt. Außerdem besitzt der LDR eine gewisse Trägheit und ändert seinen Widerstand deshalb nicht sofort. Die Trägheit des LDR ist dabei wesentlich größer als die der Glühlampe, dies zeigt die Sprungantwort der Lichtregelstrecke beim Ausschalten der Lampe, siehe Abbildung 3.4. Beim Ausschalten der Lampe kann die Verzögerung durch das Abkühlen der Glühwendel vernachlässigt werden. Die Verzögerung des LDR macht die Regelung etwas schwieriger, da die eigentliche Regelgröße, die Lichtintensität, zwar schnell verändert werden kann, der Messsensor (der LDR) diese Änderung aber nicht schnell genug messen kann. Abhilfe würde hier eine lichtempfindliche Diode schaffen, da diese wesentlich schneller auf Helligkeitsänderungen reagiert. Allerdings ist dieses träge Verhalten in diesem Anwendungsfall durchaus gewollt, da hierdurch z.B. Schwingungen der Regelgröße besser gezeigt und aufgrund der Trägheit auch optisch wahrgenommen werden können.

Die Verzerrung zu Beginn der Sprungfrage ist auf das Prellen des Schalters zurückzuführen. Mechanische Schalter haben den Nachteil, dass sie beim Schließen an der Kontaktstelle mehrfach aufprallen bis sie zur Ruhe kommen. Ein zwischengeschaltetes RS-Flip-Flop¹¹ würde hierfür Abhilfe schaffen. Es speichert den ersten Spannungssprung und hält diese Spannung aufrecht bis es zurückgesetzt wird. Allerdings hat diese kurze, hochfrequente Schwingung (ca. 1 kHz) keinen gravierenden Einfluss auf die Messung, da der Glühdraht der Lampe zu träge ist um darauf mit einer durch den LDR messbaren Helligkeitsänderung zu reagieren. Dies wurde in einem Nebenversuch, bei dem die Glühlampe mit einer Frequenz von 1 kHz beschaltet wurde, getestet.

¹¹ Digitales, bistabiles Speicherelement

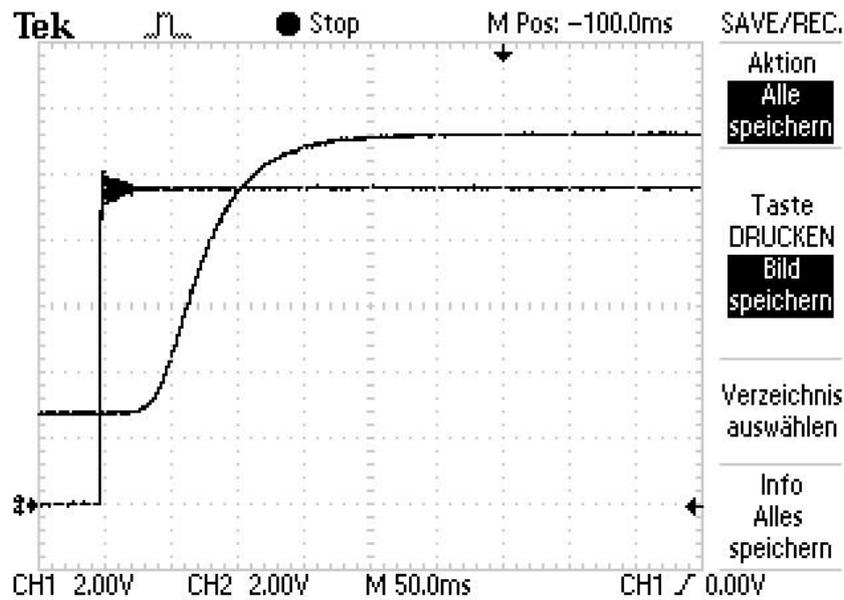


Abbildung 3.3: Sprungantwort Lichtregelstrecke Lampe Ein

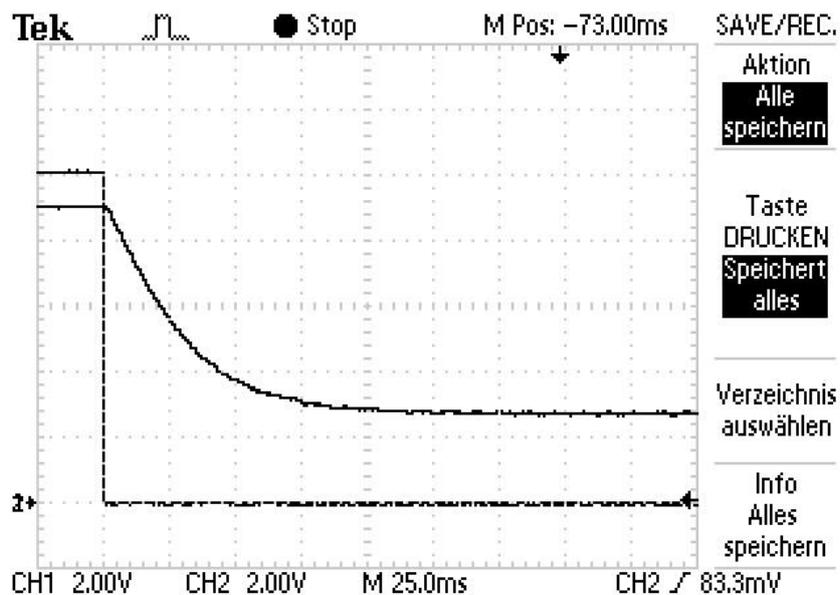


Abbildung 3.4: Sprungantwort Lichtregelstrecke Lampe Aus

Die Zeit, die das Licht vom Glühdraht zum LDR benötigt kann vernachlässigt werden. Die Graphen wurden mit einem digitalen Speicheroszilloskop erstellt.

Aus der Sprungantwort kann durch Einzeichnen der Tangente im Wendepunkt (Prinzip siehe Abbildung 3.5) die Verzugszeit T_u und die Ausgleichszeit T_g ermittelt werden. Die grafische Ermittlung dieser Werte ist allerdings nicht exakt, da der Wendepunkt der Kennlinie nicht genau zu bestimmen ist. Um eine möglichst hohe Genauigkeit zu erzielen wurde nicht das Abbild des Oszilloskopbildschirms, sondern ein Excel-Diagramm aus den Mess-

daten des Oszilloskops verwendet (siehe Anhang IX). Das Ergebnis ist dadurch hinreichend genau, um eine Aussage über die Regelbarkeit der Regelstrecke machen zu können.

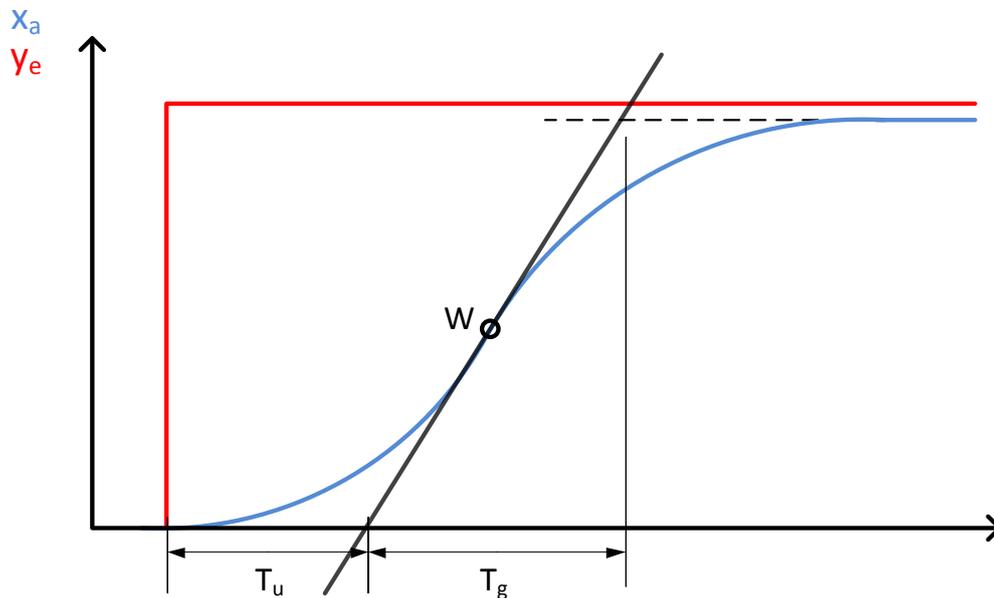


Abbildung 3.5: Grafische Ermittlung der Verzugszeit und Ausgleichszeit

Die grafische Ermittlung ergab folgende Werte für T_u und T_g :

$$T_u = 30 \text{ ms}$$

$$T_g = 70 \text{ ms}$$

Der Quotient aus der Verzugszeit und der Ausgleichszeit beschreibt die Schwierigkeit der Regelbarkeit einer Regelstrecke und wird mit Λ bezeichnet. Nach (Elpers, et al., 1998 S. 602) gilt:

$$\frac{T_u}{T_g} < 0,1 \quad \text{gut regelbar}$$

$$\frac{T_u}{T_g} \approx 0,166 \quad \text{noch regelbar}$$

$$\frac{T_u}{T_g} > 0,33 \quad \text{schwierig regelbar}$$

$$\frac{T_u}{T_g} = 1 \quad \text{kaum regelbar}$$

Aus der grafischen Auswertung der Messung ergibt sich also für die Regelbarkeit

$$\Lambda = \frac{T_u}{T_g} = \frac{30 \text{ s}}{70 \text{ s}} = 0,43. \quad (7)$$

Damit ist die Strecke nach (Elpers, et al., 1998 S. 602) nur schwierig regelbar. Für die Anwendung als Anschauungsmittel ist diese Güte der Regelbarkeit zufriedenstellend, da das Ziel ja nicht nur darin besteht eine möglichst gute Regelung zu erreichen, sondern auch ein schlechtes Regelverhalten, z.B. durch Fehleinstellungen, darstellen zu können. Eine endgültige Aussage über die Güte der Regelung kann erst in einem praktischen Versuch mit dem kompletten Regelkreis gemacht werden.

Die Verstärkung der Lichtregelstrecke beträgt

$$K_{PS} = \frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{8 \text{ V}}{9,5 \text{ V}} = 0,84 \frac{\text{V}}{\text{V}}. \quad (8)$$

Nachdem nun das Verhalten und die charakteristischen Kennwerte der Lichtregelstrecke bekannt sind, wird die Temperaturregelstrecke untersucht.

3.4 Entwicklung der Temperaturregelstrecke

3.4.1 Stellglied, Istwertaufnahme und Messumformer

Eine einfache und kostengünstige Lösung zur Messung der Temperatur ist der Einsatz eines einfachen temperaturabhängigen Widerstandes mit PTC (positiver Temperaturkoeffizient) oder NTC (negativer Temperaturkoeffizient) Verhalten. Diese Widerstände ändern ihre Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur. Der Nachteil besteht allerdings in der nichtlinearen Kennlinie. Für die Messung der Temperaturregelstrecke ist aber ein möglichst linearer Kennlinienverlauf erforderlich, um Messfehler zu minimieren. Deshalb wird ein sog. PT100 eingesetzt. Dieser Platin-Widerstand hat einen Temperaturmessbereich von $-100\text{ °C} - +800\text{ °C}$, im Bereich von $0\text{ °C} - 100\text{ °C}$ ist die Kennlinie annähernd gerade (siehe Abbildung 3.6). Die Zahl „100“ im Namen steht für den Nennwiderstand von $100\ \Omega$ bei einer Temperatur von 0 °C . Diese Art von temperaturabhängigen Widerständen hat den weiteren Vorteil, dass ein PT100 gegen jeden anderen PT100 ausgetauscht werden kann, da der Nennwiderstand im Gegensatz zu gewöhnlichen NTC oder PTC Widerständen immer gleich ist. Als Arbeitsbereich der Temperaturregelstrecke wird der Bereich von $15\text{ °C} - 50\text{ °C}$ festgelegt. Dies gewährleistet einen ausreichend großen Arbeitsbereich. Eine Gefahr durch Verbrennung besteht bei einer Temperatur von 51 °C bei metallischen Oberflächen erst nach einer Minute (siehe (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin)). Trotzdem sollte bei der Auswahl des Gehäuses darauf geachtet werden, dass diese Temperatur nicht an der Gehäuseoberfläche erreicht wird.

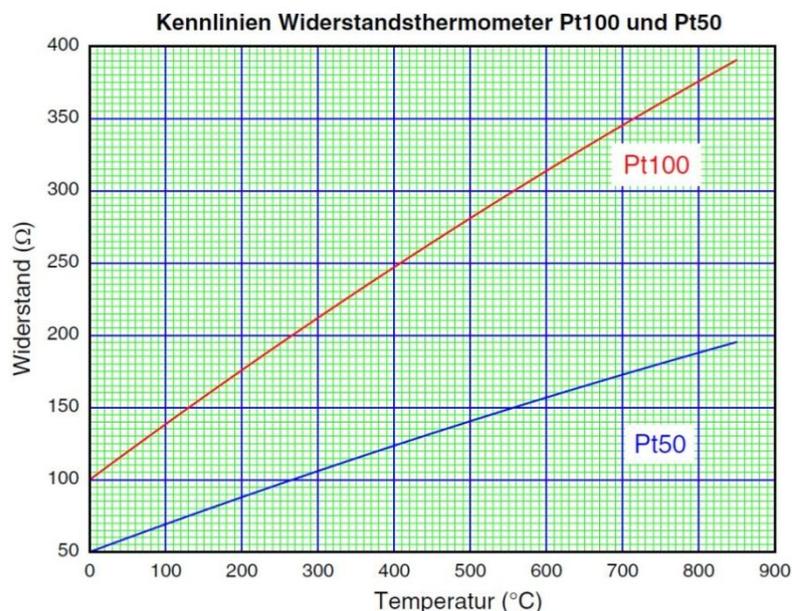


Abbildung 3.6: Kennlinie PT100 und PT50

Quelle: http://grundpraktikum.physik.uni-saarland.de/scripts/Platin_Widerstandsthermometer.pdf

Der Widerstand eines PT100 bei einer bestimmten Temperatur berechnet sich im genannten Bereich zwischen 0 °C und 100 °C nach (Böther, et al., 1990 S. 93) zu

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T), \quad (9)$$

wobei R_0 der Widerstand bei 0 °C und α der mittlere Temperaturkoeffizient von Platin zwischen 0 °C und 100 °C ist. Für einen PT100 gilt nach (Böther, et al., 1990 S. 94):

$$R_0 = 100 \, \Omega$$

$$\alpha = 0,00385 \, \frac{1}{K}$$

Damit ergibt sich ein Widerstand bei einer Temperatur von $T = 15 \, ^\circ\text{C}$ von

$$R_{15} = 100 \, \Omega \cdot \left(1 + 0,00385 \, \frac{1}{K} \cdot 15 \, ^\circ\text{C}\right) = 105,8 \, \Omega \quad (10)$$

Da die Regelstrecke wegen Verletzungsgefahr durch Verbrennung eine Temperatur von 50 °C nicht überschreiten sollte, wird der Messbereich ebenfalls auf 50 °C begrenzt. Der Widerstand für diese Temperatur wird also ebenfalls berechnet:

$$R_{50} = 100 \, \Omega \cdot \left(1 + 0,00385 \, \frac{1}{K} \cdot 50 \, ^\circ\text{C}\right) = 119,25 \, \Omega \quad (11)$$

Der Widerstand ändert sich also im gegebenen Temperaturbereich von 15 °C – 50 °C von 105,8 Ω – 119,25 Ω . Dementsprechend soll der Messumformer eine Spannung von 0 V – 10 V ausgeben. Dazu wird die gleiche Messumformerschaltung wie auch schon bei der Lichtregelstrecke verwendet (siehe Abbildung 3.7). Die Widerstände des Messumformers wurden ebenfalls online nach (Gemmel) berechnet.

Die Wärme im Messraum wird hier mit einem Leistungswiderstand erzeugt. Ein Leistungs- oder Heizwiderstand ist ein niederohmiger elektrischer Widerstand, bei dem eine hohe Verlustleistung zulässig ist. Alternativ könnte mit einem Peltier-Element erwärmt und sogar auch gekühlt werden. Allerdings hat ein Peltier-Element einen sehr schlechten Wirkungsgrad und erfordert dadurch eine sehr hohe Leistung (siehe (Quick-Ohm Küpper & Co. GmbH)). Aus diesem Grund wird zur Erwärmung des Messraumes ein Leistungswiderstand mit einer Leistung von 10 W eingesetzt. Vorversuche mit unterschiedlichen Leistungen und Messraumgrößen ergaben, dass eine Leistung von ca. 5 W benötigt wird um ein Volumen von 200 cm³ in einer Zeit von 15 min auf eine Temperatur von 50 °C zu erwärmen. Damit wären die Anforderungen an die Regelstrecke abgedeckt.

Der Leistungsteil zur Versorgung des Leistungswiderstandes ist ähnlich wie bei der Lichtregelstrecke aufgebaut. Hier allerdings hat der Leistungs-Operationsverstärker TDA2030 einen Verstärkungsfaktor von $V = 0,4$, da die Spannung am Leistungswiderstand bei einer

maximalen Stellgröße von 10 V nur 4 V betragen darf. Diese Spannung erzeugt am Leistungswiderstand mit $R_{\text{Heiz}} = 3 \Omega$ eine Leistung von

$$P = \frac{U^2}{R_{\text{Heiz}}} = \frac{(4 \text{ V})^2}{3 \Omega} = 5,3 \text{ W} . \quad (12)$$

Damit sollte eine Temperatur von ca. 50 °C im Messraum erreicht werden. Die Aufwärmzeit kann später noch durch Veränderung der Messraumgröße angepasst werden.

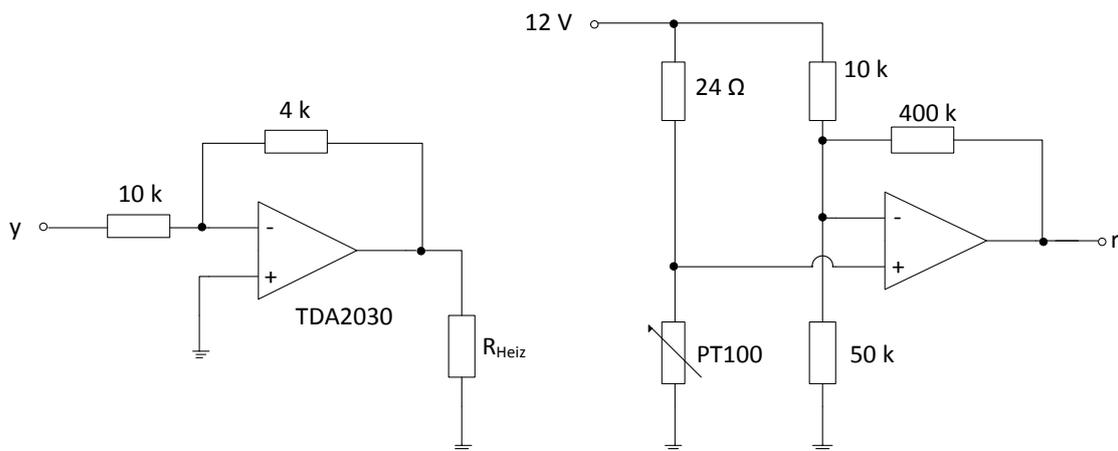


Abbildung 3.7: Schaltplan Temperaturregelstrecke

3.4.2 Versuch zur Ermittlung der Sprungantwort

3.4.2.1 Ziel und Zweck des Versuchs

Ziel des Versuches ist es die Sprungantwort einer Temperaturregelstrecke aufzunehmen um daraus auf das Verhalten der Regelstrecke schließen zu können. Dies ist erforderlich um anschließend den Regler für diese Regelstrecke auslegen zu können.

3.4.2.2 Aufbau

Die Luft in einem Gehäuse wird mit einem Leistungswiderstand erwärmt und der Widerstand in Abhängigkeit der Temperatur mit Hilfe eines PT100 gemessen. Dieser Widerstand wird dann mit der Messumformerschaltung aus Kapitel 3.4.1 in eine Spannung umgewandelt. Die zu messende Regelstrecke ist ein Kunststoffgehäuse mit Metalltrennwänden die mit einem Abstand von 16 cm oder weniger eingebaut werden können. Aufgrund der Ergebnisse der vorhergegangenen Versuche beträgt der Abstand zwischen den Trennwänden 2,7 cm. Damit beträgt das zu erwärmende Luftvolumen 215 cm³. In beiden

Trennwänden befinden sich Bohrungen um den Leistungswiderstand und den PT100 einzuführen. Diese Bohrungen werden beim Versuch abgedichtet. Abbildung 3.8 zeigt den schematischen Messaufbau.

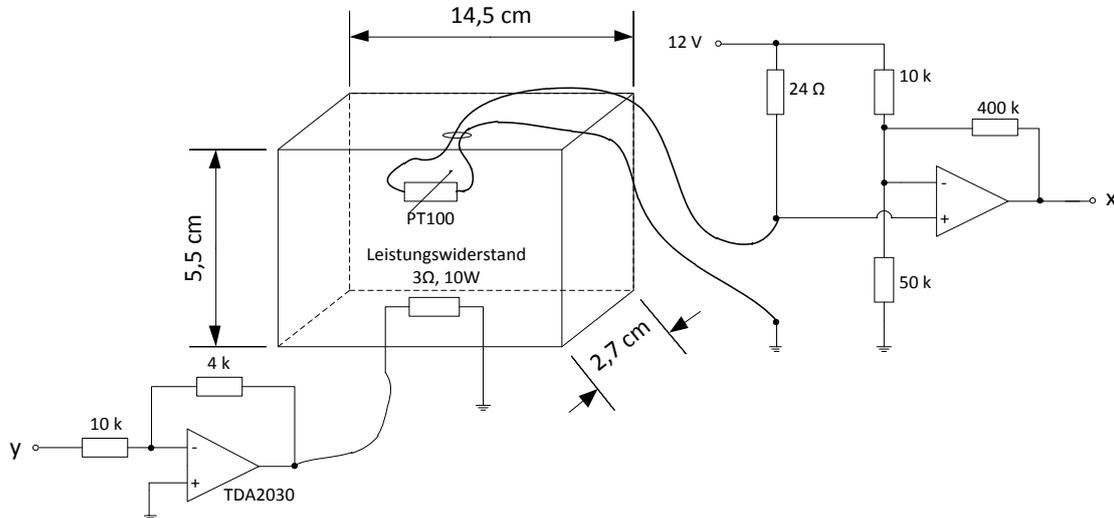


Abbildung 3.8: Schematische Darstellung des Messaufbaus

3.4.2.3 Durchführung

Zur Bestimmung der Sprungantwort dieser Regelstrecke wird das Stellglied, nachdem die Temperatur in dem Gehäuse einen konstanten Wert (Raumtemperatur von 21 °C) angenommen hat, an eine Spannung von 10 V gelegt. Das Stellglied, der TDA2030, gibt eine Spannung von

$$U_{Stell} = U \cdot V = 10 \text{ V} \cdot 0,4 = 4 \text{ V} \quad (13)$$

aus. Dadurch fließt ein Strom von 1,3 A durch den Leistungswiderstand, der somit eine Leistung von 5,3 W in Form von Wärme an die Umgebungsluft abgibt.

Zum Zeitpunkt $t_0 = 0 \text{ s}$ wird die Spannungsversorgung eingeschaltet und der Leistungswiderstand beginnt sich zu erwärmen. Alle 10 s wird die Ausgangsspannung am Messumformer gemessen und in eine vorgefertigte Excel-Tabelle eingetragen. Es wird so lange gemessen bis sich eine annähernd konstante Temperatur bzw. Spannung einstellt. Aus den Messwerten ergibt sich dann der Verlauf der Sprungantwort der Regelstrecke.

3.4.2.4 Ergebnis

Nach einer Messzeit von 16,5 min. stellt sich eine konstante Temperatur von 50 °C ein. Dies zeigt dass mit diesem Stellglied und diesem Leistungswiderstand bei einem maximalen Sollwert von 10 V die Temperatur von 50 °C nicht überschritten wird.

Der qualitative Verlauf der Kennlinie zeigt ein nicht eindeutiges Verhalten der Regelstrecke. Den Messwerten zu Folge blieb die Temperatur im Messraum in den ersten 10 s konstant. Dies spricht für das erwartete PT_2 Verhalten, da die Tangente zu Beginn waagrecht verläuft. Auf dem Diagramm allerdings ist der Wendepunkt nicht genau auszumachen. Deshalb könnte die Strecke im Folgenden näherungsweise auch wie eine PT_1 Strecke mit einer Totzeit von 10 s behandelt werden. Da zum jetzigen Zeitpunkt das Verhalten noch nicht eindeutig bestimmt werden kann, wird mit beiden Varianten weiter gearbeitet.

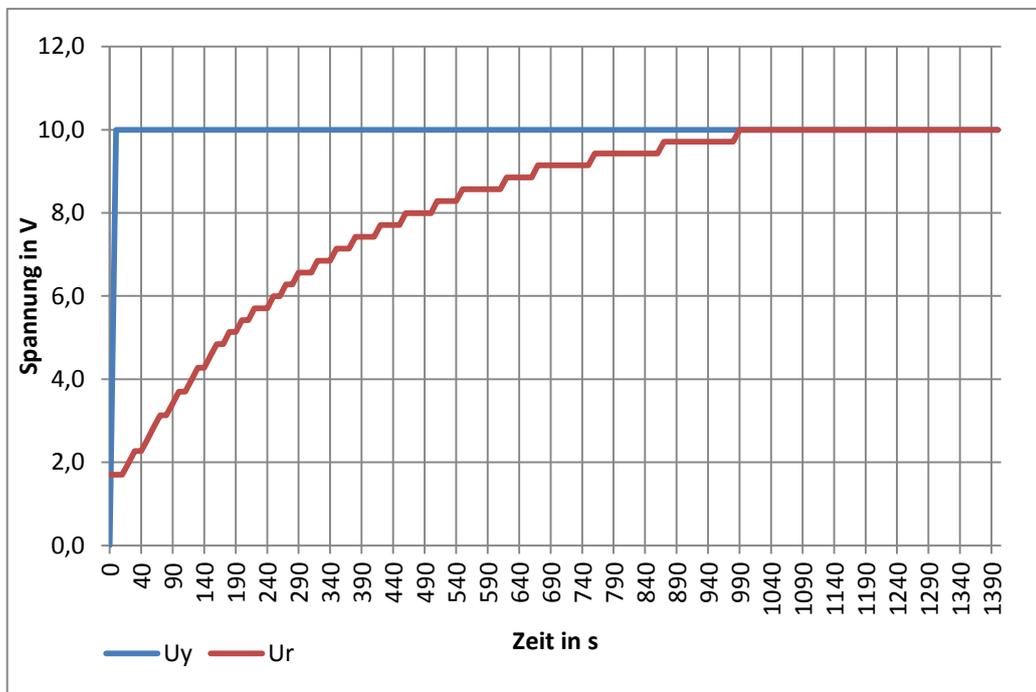


Abbildung 3.9: Sprungantwort der Temperaturregelstrecke

Variante 1: PT_1 mit Totzeit

Durch Einzeichnen der Tangente am Start der Sprungantwort kann die Zeitkonstante T_1 der Strecke ermittelt werden (siehe auch Kapitel 2.8):

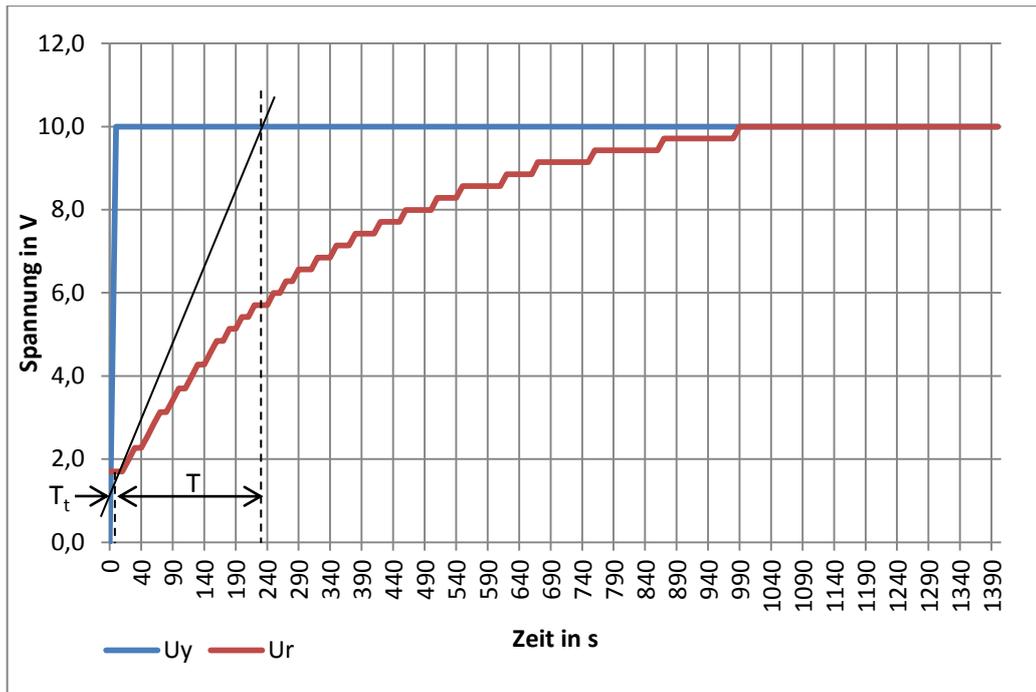


Abbildung 3.10: Ermittlung der Streckenzeitkonstante

Die grafische Ermittlung (vorgenommen in Excel) der Zeitkonstante ergibt:

$$T_1 = T - T_t = 230 \text{ s} - 10 \text{ s} = 220 \text{ s} \quad (14)$$

$$T_t = 10 \text{ s}$$

Variante 2: PT₂ - Verhalten

Um Aussagen über ein PT₂-Verhalten machen zu können, wird der Wendepunkt geschätzt und die Wendetangente eingezeichnet (siehe Abbildung 3.11). Daraus lassen sich die charakteristischen Kennwerte bestimmen:

$$T_u = 10 \text{ s}$$

$$T_g = 100 \text{ s}$$

Somit ist das Maß für die Schwierigkeit

$$\Lambda = \frac{T_u}{T_g} = \frac{20}{100} = 0,1, \quad (15)$$

was nach (Elpers, et al., 1998 S. 602) eine gute Regelbarkeit bedeutet.

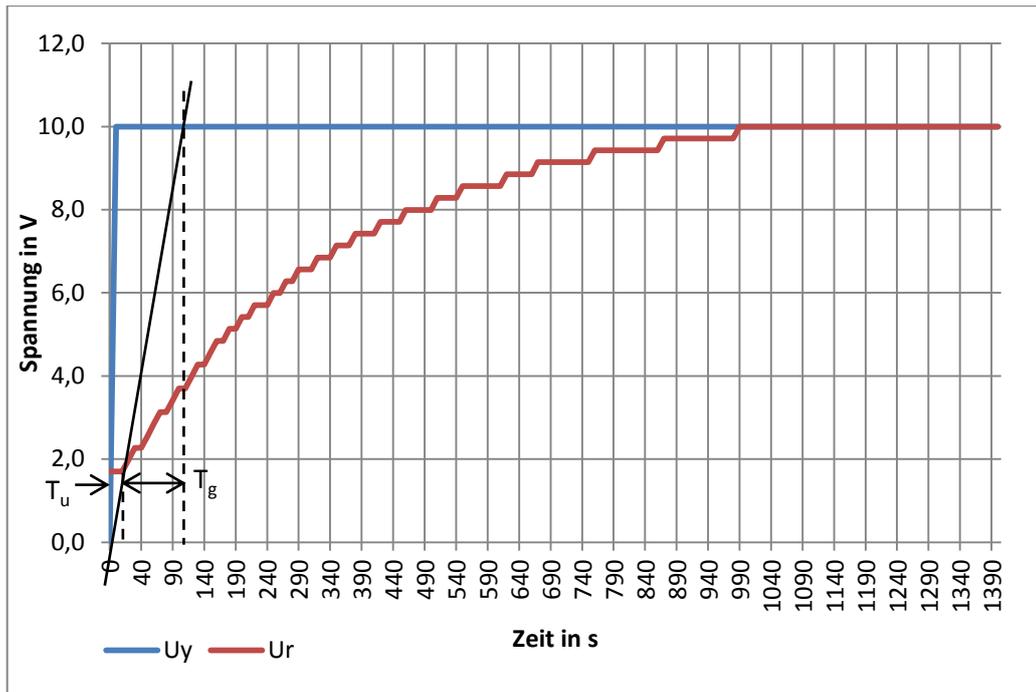


Abbildung 3.11: Wendetangente Temperaturregelstrecke

Insofern könnte diese Regelstrecke in der Anwendung als Experimentiersystem dazu dienen einen Regler möglichst gut für die Regelstrecke auszulegen und manuelle Messprotokolle durch ablesen von Spannungswerten in Abhängigkeit der Zeit zu erstellen. Die Lichtregelstrecke eignet sich dagegen für kurze Demonstrationen von nicht erwünschten Effekten.

Die Verstärkung der Temperaturregelstrecke beträgt

$$K_{PS} = \frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{8,3 \text{ V}}{10 \text{ V}} = 0,83 \frac{\text{V}}{\text{V}}. \quad (16)$$

Idealerweise müsste die Verstärkung der Strecke $K_{PS} = 1$ betragen, da die Schaltung so ausgelegt ist, dass eine Spannungsänderung von 10 V am Stellglied eine Spannungsänderung von 10 V am Ausgang des Messumformers hervorruft. Da die Temperatur in diesen Versuch allerdings schon einen Wert über dem Anfang des Messbereichs hatte, errechnet sich daraus die oben genannte Verstärkung. Deshalb wird später mit der Verstärkung

$$K_{PS} = 1$$

weitergerechnet.

Da nun die Eigenschaften und Parameter der Regelstrecken bekannt sind kann der Regler für diese Strecken entwickelt werden.

3.5 Anforderungen an den Regler

Um das Regelverhalten der drei Grundregler (P-, I- und D-Regler) und deren Kombinationen darstellen und vermitteln zu können wird ein PID Regler eingesetzt. Durch Schalter können die einzelnen Regler zu- bzw. abgeschaltet werden. Die Beiwerte der Regler sollen in einem zu ermittelnden Bereich manuell einstellbar sein um deren Auswirkungen demonstrieren zu können. Außerdem haben die Auszubildenden die Möglichkeit durch eigene Versuche und Rechnungen den Regler optimal einzustellen. Allerdings soll der Bereich so ausgeweitet sein dass auch Fehleinstellungen, die z.B. zum Schwingen der Regelstrecke führen, einstellbar sind. Dabei muss der Einstellbereich so gewählt werden, dass die Reglerbeiwerte in einem noch sinnvollen Bereich möglichst präzise eingestellt werden können.

Außerdem soll ein Zweipunktregler implementiert werden, um auch diese einfache Form der Regelung demonstrieren zu können und anschließend entscheidende Verbesserungen durch z.B. den PID Regler zu erzielen. Der Regler wird, wie auch die jeweiligen Regelstrecken, ein eigenes Modul darstellen. Dies ermöglicht später eine Entwicklung weiterer Regelstrecken die dann ebenfalls mit dem Reglermodul geregelt werden können.

3.6 Spannungsversorgung

Die Spannungsversorgung des Regelkreises geschieht durch ein Labornetzteil mit $\pm 12\text{ V}/2\text{ A}$. Die Spannungsversorgung für die Operationsverstärker muss so dimensioniert werden, dass sie eine Ausgangsspannung von $-10\text{ V} - +10\text{ V}$ ausgeben können. Die Operationsverstärker des Reglers sollen auch bei hohen Verstärkungsfaktoren keine höhere Spannung als $\pm 10\text{ V}$ ausgeben, damit die Stellgröße nicht größer als der Sollwert wird und die Regelstrecken nicht überlastet werden. Ein Operationsverstärker hat allerdings immer einen internen Spannungsabfall. Dieser wurde beim LM741 mit $U_{\text{intern}} = 0,6\text{ V}$ gemessen. Dementsprechend würden die Operationsverstärker eine maximale Spannung von $\pm 11,4\text{ V}$ ausgeben. Um die Ausgangsspannung auf $\pm 10\text{ V}$ zu begrenzen werden zwei Zener-Dioden (Z9V3) entgegengesetzt an den Ausgang geschaltet. In Sperrrichtung fallen an der Zener-Diode $9,3\text{ V}$ ab, in Durchlassrichtung $0,7\text{ V}$. Dementsprechend fallen über beide Dioden, je nach Polarität des Ausgangssignals, $\pm 10\text{ V}$ ab. In Abbildung 3.12 ist die Schaltung beispielhaft dargestellt.

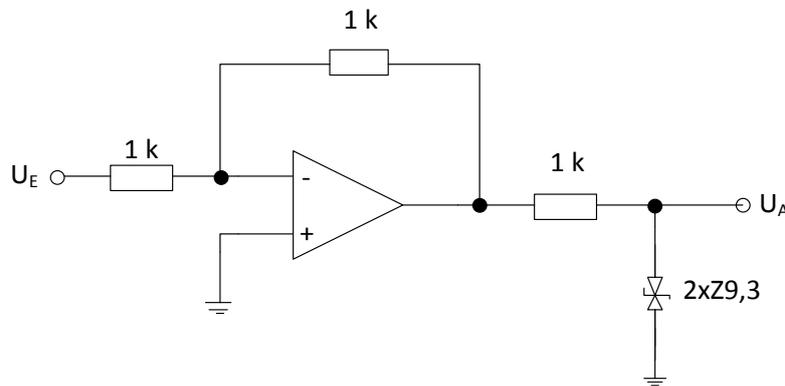


Abbildung 3.12: Spannungsbegrenzung

Da die Ausgangsspannungen des Sollwertgebers und der Messumformer direkt von der Versorgungsspannung des Experimentiersystems abhängen, ist es im späteren Betrieb wichtig die Versorgungsspannung von $\pm 12\text{ V}$ exakt einzustellen. Alternativ könnten zwei Festspannungsregler (z.B. LM7812 für $+12\text{ V}$ und LM7912 für -12 V) die Versorgungsspannung auf $\pm 12\text{ V}$ feststellen. Dafür wäre allerdings eine Versorgungsspannung von min. $\pm 15\text{ V}$ erforderlich.

Das Stellglied wird bei beiden Regelstrecken durch jeweils einen TDA2030 realisiert. Aufgrund der hohen auftretenden Leistungen muss der TDA2030 mit einem Kühlkörper versehen werden. Da die Glühlampe bzw. der Leistungswiderstand polaritätsunabhängig betrieben werden können, wird der TDA2030 nur unipolar versorgt. Dies verhindert eine Versorgung des Leistungswiderstandes bzw. der Glühlampe wenn der Sollwert kleiner als der Istwert ist. In Abbildung 3.13 ist beispielhaft die Spannungsversorgung des TDA2030 und des LM741 dargestellt. Zwischen positiver Spannung und Masse ist jeweils ein Stütz-

kondensator mit einer Kapazität von $10\ \mu\text{F}$ geschaltet, um eventuelle Schwankungen der Spannungsversorgung, hervorgerufen durch plötzliche Stromänderungen, auszugleichen.

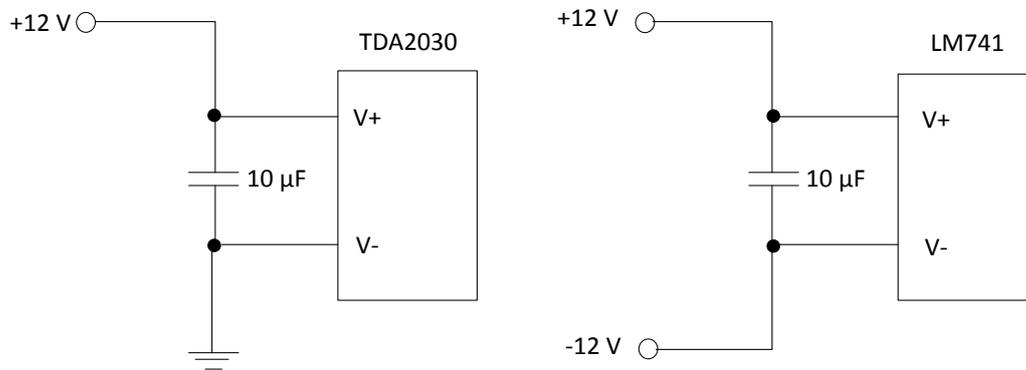


Abbildung 3.13: Beispiel Spannungsversorgung ICs

Nachdem die Regelstrecken, die Anforderungen und die Rahmenbedingungen des Regelkreises bekannt sind, können nun die übrigen Regelkreiselemente beschrieben und dimensioniert werden.

3.7 Grundsaltungen der Operationsverstärker

Die analoge Umsetzung des Regelkreises erfolgt mit Hilfe von Operationsverstärkern. Die verschiedenen Regler (P-, I-, D,- und Zweipunktregler) und andere Elemente des Regelkreises können durch eine einfache Beschaltung der Operationsverstärker realisiert werden.

3.7.1 Zweipunkt Regler

Die Realisierung des Zweipunkt Reglers geschieht mit Hilfe eines sog. Schmitt-Triggers mit Schalthysterese. Diese Schaltung kann durch eine einfache Beschaltung eines Operationsverstärkers mit Mitkopplung aufgebaut werden (Abbildung 3.14).

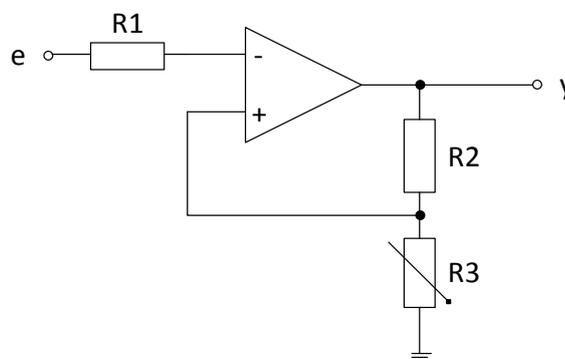


Abbildung 3.14: Invertierender Schmitt-Trigger Schaltung

Der Operationsverstärker fungiert in dieser Beschaltung als invertierender Schmitt-Trigger mit einstellbarer Hysterese. Zur Einstellung dieser Hysterese kann das Potentiometer R3 verwendet werden.

Die Schwellspannungen lassen sich nach folgenden Gleichungen nach (Schmidt-Walter S. 11) berechnen:

$$U_{e\text{ ein}} = -\frac{R_3}{R_2 + R_3} \cdot U_{y\text{ max}} \quad (17)$$

$$U_{e\text{ aus}} = +\frac{R_3}{R_2 + R_3} \cdot U_{y\text{ max}} \quad (18)$$

Die damit zu ermittelnden Spannungen sind in der Abbildung 3.15 qualitativ dargestellt. Die Ausgangsspannungen $\pm U_{y \max}$ sind durch die Versorgungsspannung des Operationsverstärkers auf +11,4 V und -11,4 V begrenzt. Die Kennlinie für U_y kennzeichnet die Spannung am Ausgang des Schmitt-Triggers. Die Schalthysterese ist durch die gestrichelten Linien dargestellt.

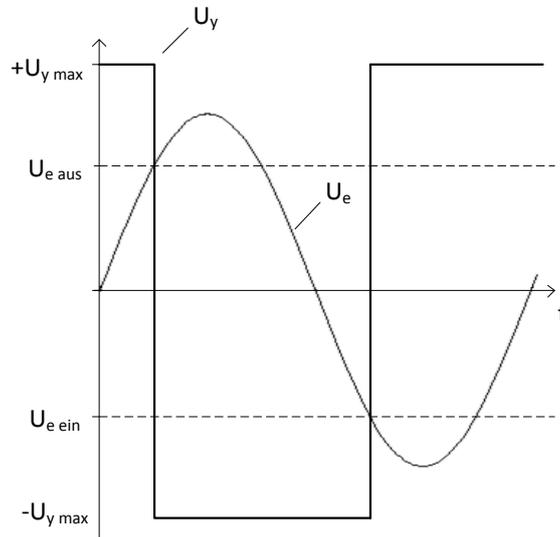


Abbildung 3.15: Hysterese des Zweipunktreglers

3.7.2 Spannungsfolger

Ein Spannungsfolger (Abbildung 3.16), auch Impedanzwandler genannt, wird üblicherweise vor den Ausgang einer Schaltung geschaltet. Er hat die Aufgabe den evtl. hohen Ausgangswiderstand einer Schaltung zu kompensieren. Der Ausgang dieser Operationsverstärkerschaltung ist sehr niederohmig, der Eingang ist hochohmig. Durch den niedrigen Ausgangswiderstand kann die Schaltung stärker belastet werden, ohne dass das Signal einbricht. Die Verstärkung der Spannung beträgt $V = 1$. Ein Operationsverstärker verstärkt nur dann, wenn eine Spannungsdifferenz zwischen den beiden Eingängen besteht. Ist die Spannung am nicht-invertierenden Eingang (+) größer als am invertierenden Eingang (-), so wird am Ausgang eine positiver Spannung mit der Verstärkung $V = 1$ ausgegeben. Umgekehrt ist die Ausgangsspannung negativ.

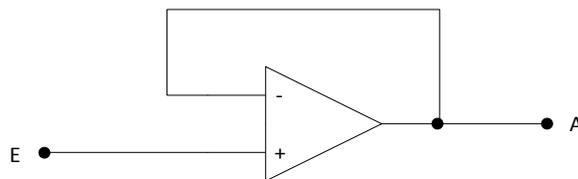


Abbildung 3.16: Spannungsfolger

3.7.3 Invertierender Verstärker (P-Regler)

Der Proportionalbeiwert eines invertierenden Verstärkers wird durch das Widerstandsverhältnis R_2 zu R_1 bestimmt und beträgt

$$K_P = -\frac{U_A}{U_E} = -\frac{R_2}{R_1} . \quad (19)$$

Die Funktionsweise ähnelt der des Spannungsfolgers (siehe 3.7.2), nur dass hierbei größere Verstärkungen als 1 möglich sind und der Ausgang zusätzlich negiert bzw. um 180° phasengedreht ist.

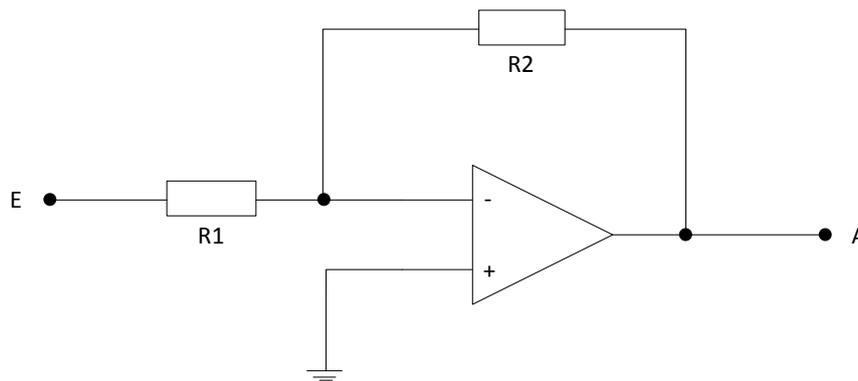


Abbildung 3.17: Invertierender Verstärker

3.7.4 Integrator (I-Regler)

Beim Integrator befindet sich in der Rückkopplung des Operationsverstärkers ein Kondensator. Dieser sorgt dafür dass sich die Spannung am Ausgang innerhalb des Arbeitsbereiches stetig verändert, auch wenn die Spannung am Eingang konstant ist. Die Ausgangsspannung berechnet sich nach (Böther, et al., 1990) zu

$$U_A = -(K_I \cdot U_E \cdot t + U_{Anf}), \quad (20)$$

mit dem Integrierbeiwert

$$K_I = \frac{1}{R_1 \cdot C_1} \quad (21)$$

und U_A = Anfangsspannung am Ausgang infolge Ladung des Kondensators.

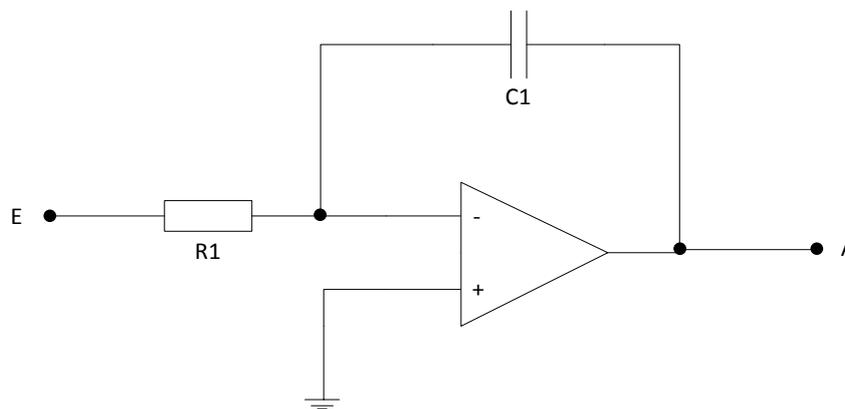


Abbildung 3.18: Integrator

3.7.5 Differenzierer (D-Regler)

Beim Differenzierer liegt der Kondensator nicht mehr in der Rückkopplung, sondern der Widerstand. Die Höhe der Spannung am Ausgang des Differenzierers ist abhängig von der Änderungsgeschwindigkeit des Eingangs. Demzufolge erzeugt ein Sprung am Eingang einen sehr kurzen Nadelimpuls am Ausgang, dessen Amplitude von der Betriebsspannung begrenzt wird. Eine Anstiegsfrage am Eingang erzeugt eine konstante Anstiegsantwort. Der Differentialbeiwert K_D ist dabei verantwortlich für die Höhe der Ausgangsspannung der Anstiegsantwort.

$$U_A = K_D \cdot \frac{\Delta U_E}{\Delta t} \quad (22)$$

$$K_D = R_1 \cdot C_1 \quad (23)$$

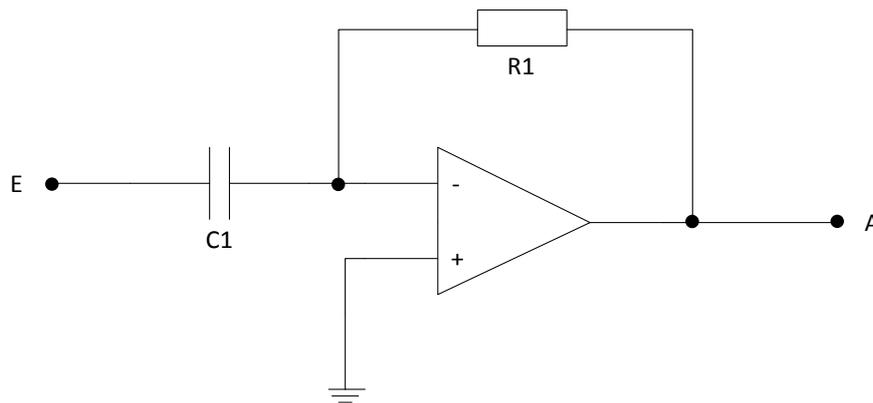


Abbildung 3.19: Differenzierer

3.8 Sollwertgeber

Der Sollwert kann ähnlich wie der Messumformer über einen einfachen Spannungsteiler mit nachgeschalteten Operationsverstärker realisiert werden. Die Ausgangsspannung des Sollwertgebers ist im Bereich von 0 V - 10 V einstellbar. Dies entspricht dem Temperaturbereich in dem die Temperaturregelstrecke arbeiten soll bzw. der Leistung der Glühlampe der Lichtregelstrecke. Der Spannungsteiler und damit der Sollwert wird über ein Potentiometer beeinflusst (siehe Abbildung 3.20). Die Berechnung der Widerstände erfolgt nach (Gemmel).

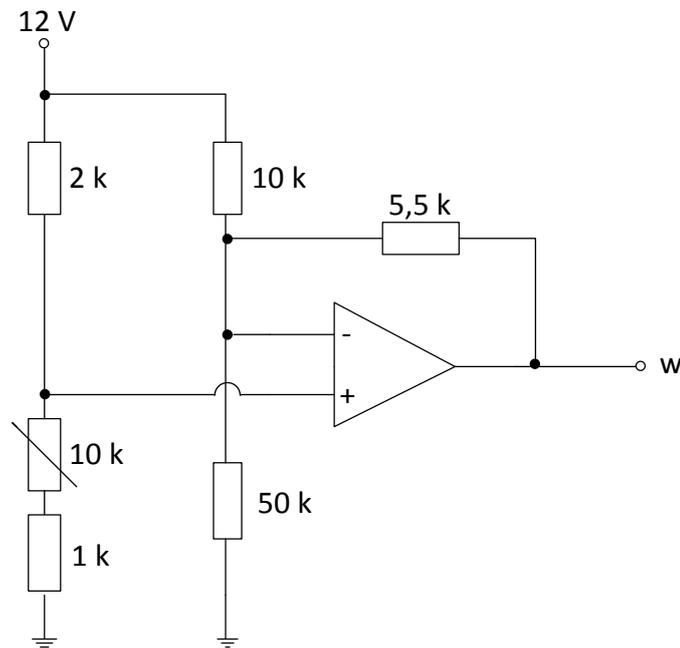


Abbildung 3.20: Sollwertgeber

3.9 Vergleichler

Die Aufgabe des Vergleichlers ist bereits in Kapitel 2 kurz beschrieben. Die Realisierung erfolgt durch die Beschaltung eines Operationsverstärkers als Addierer (siehe Abbildung 3.21). Hierbei hat der Operationsverstärker mehrere Zugänge deren Spannungen addiert werden und ggf. verstärkt werden. Deshalb ist es wichtig dass die Rückführgröße negiert an den Eingang des Operationsverstärkers geschaltet wird, da aus Sollwert und Istwert die Differenz gebildet werden soll. Die Negierung kann z.B. durch einen vorgeschalteten invertierenden Operationsverstärker (siehe Kapitel 0) mit der Verstärkung $V = 1$ erreicht werden, sofern sie nicht schon negiert vom Messumformer ausgegeben wird. Am Eingang des Vergleichlers liegt ebenfalls der Sollwert w in Form einer elektrischen Spannung von $0\text{ V} - 10\text{ V}$. Ist der Istwert kleiner als der Sollwert, gibt der Operationsverstärker eine negative Spannung nach der Gleichung

$$e = -(w - x) \quad (24)$$

aus. Dies ist die Regeldifferenz e . Diese wird an den Regler weitergeleitet. Da die addierten Spannungen nicht verstärkt werden sollen, werden alle Widerstände gleich groß gewählt:

$$R_1 = R_2 = R_3 = 10\text{ k}\Omega$$

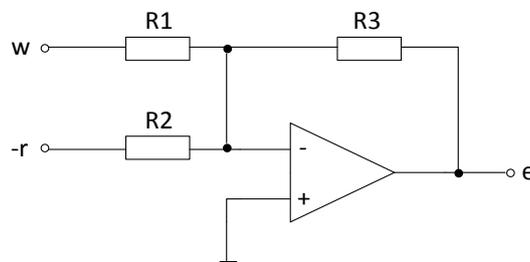


Abbildung 3.21: Vergleichler

3.10 Sprungfrage

Mit der Schaltung in Abbildung 3.22 kann eine Sprungfrage von 0 V – 10 V auf eine Additionsstelle vor der Regelstrecke gegeben werden, um die Charakteristik der Regelstrecken feststellen zu können. Um eine Sprungantwort aufzunehmen müssen alle drei Regelelemente über Schalter abgeschaltet werden. Der Operationsverstärker ist wie auch beim Vergleichler als Addierer mit der Verstärkung $V = 1$ geschaltet.

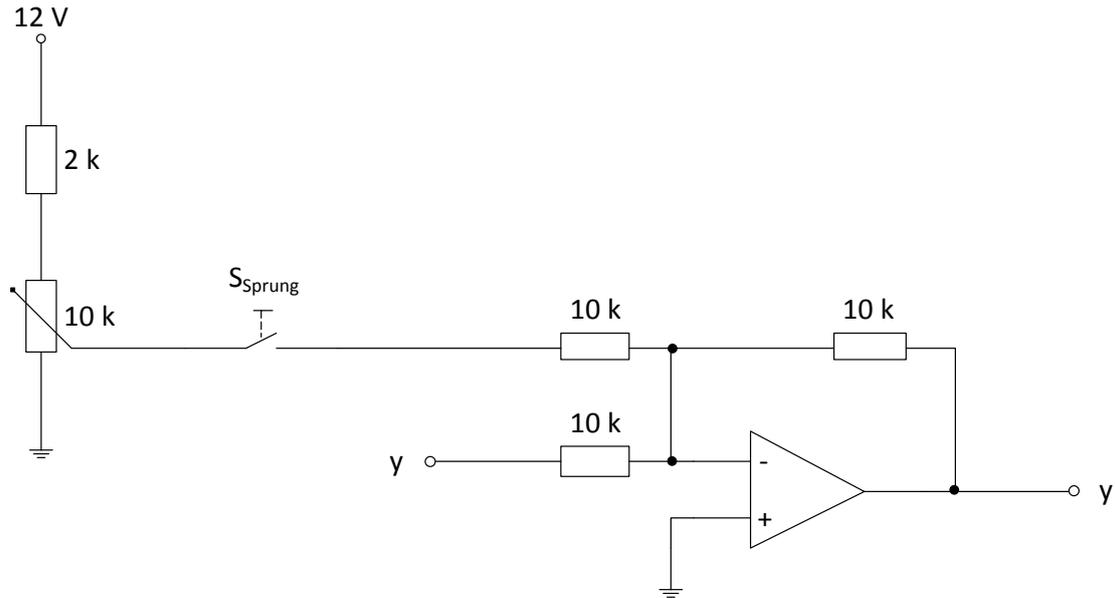


Abbildung 3.22: Sprungfrage

3.11 Praktische Einstellregeln

Nachdem nun die Grundsaltungen der Regler bekannt sind, müssen die Widerstände und Kondensatoren entsprechend der Einstellbereiche der Regler ausgelegt werden. Zuvor muss allerdings erst der optimale Einstellbereich ermittelt werden, um beide Regelstrecken sowohl gut als auch schlecht regeln zu können (siehe Anforderungen in Kapitel 3.5). Die Auslegung des PID-Reglers nach Einstellregeln bietet eine ausreichende Genauigkeit, um die Regelstrecken gut zu regeln. Um aber auch ungewünschte Effekte demonstrieren zu können, müssen die eingestellten Werte so weit verändert werden können, dass das System vom Optimum abweicht. Dieser Einstellbereich muss dann für die jeweiligen Regler und deren Kombinationen sowie für die verschiedenen Regelstrecken gelten. Da beide Regelstrecken zwar ein PT_2 Verhalten haben, allerdings vollkommen unterschiedliche Verzugs- bzw. Ausgleichszeiten haben, gelten jeweils auch andere Werte für die optimale Reglereinstellung. Der Minimalwert der Beiwerte steht bereits fest. Die Beiwerte sollen alle auf null eingestellt werden können, um auch kleinste Einflüsse zeigen zu können. Es gilt daher die maximale Einstellung der Beiwerte festzulegen.

Eine Möglichkeit besteht darin, die Kennwerte, z.B. Verzugs- und Ausgleichszeiten, beider Strecken zu ermitteln und nach Einstellregeln den PID-Regler für beide Strecken auszulegen. Somit wird sich ein bestimmter Bereich ergeben, in dem die Beiwerte einstellbar sein müssen, um ein annähernd optimales Regelverhalten für beide Strecken zu erzielen. Diese Werte werden dann so weit erhöht, dass auch eine schlechte Einstellung des Reglers möglich ist, da bei zu hohen Beiwerten Effekte wie z.B. das Überschwingen der Regelgröße auftreten.

Die zweite Möglichkeit ist, die Beiwerte in einem großen Bereich einstellbar zu machen und die Beiwerte empirisch zu ermitteln. Bei einer empirischen Ermittlung ist es erforderlich, den Regelkreis praktisch aufzubauen oder zu simulieren und einen vorher frei gewählten Einstellbereich der Regler zu testen. Werden alle Anforderungen erfüllt, können diese Einstellungen übernommen werden. Ist dies nicht der Fall, werden die Werte so lange angepasst, bis die Anforderungen erfüllt sind.

Im Folgenden kommen zwei praktische Einstellregeln zur Bestimmung der optimalen Einstellung zur Anwendung. Zum einen das Verfahren nach Ziegler und Nichols und zum anderen das Verfahren nach Chien, Hrones und Reswick. Es gibt noch eine Vielzahl anderer Einstellregeln, die hier verwendet werden aber in der Literatur am häufigsten erwähnt und beschrieben. Beide Verfahren haben einen unterschiedlichen Ansatz und geben die Beiwerte unter anderen Gesichtspunkten der Regelung aus. Näheres wird in den entsprechenden Verfahren erläutert. Aus diesen Verfahren wird der jeweils höhere Beiwert entnommen. Dieser wird dann anschließend in einer Simulation verifiziert. Die maximalen Einstellwerte werden ebenfalls in der Simulation durch Versuchen ermittelt.

3.11.1 Einstellregeln nach Ziegler und Nichols

Ein Verfahren zur praktischen Einstellung ist das Einstellverfahren nach Ziegler und Nichols. Die Schwingfähigkeit des Regelkreises ist Voraussetzung für die Anwendung. Außerdem muss der Regelkreis für ein nicht-ideales Verhalten ausgelegt sein, d.h. er darf im schwingenden Zustand nicht zerstört werden. Die Streckenparameter müssen für dieses Verfahren nicht bekannt sein. Das Verfahren verwendet Werte der Stabilitätsgrenze.

Bei dem Verfahren nach Ziegler und Nichols gibt es zwei Möglichkeiten der Durchführung (siehe (Schulz, 2010)). Bei der ersten Variante wird die Regelstrecke an einen reinen P-Regler geschaltet. Die Verstärkung des Reglers wird auf $K_{PR} = 1$ eingestellt. Sollten weitere Regler parallel geschaltet sein wird K_{IR} sehr groß gewählt und K_{DR} sehr klein. Dies entspricht einer Deaktivierung der beiden Regler. Dann wird der Proportionalbeiwert K_{PR} so lange erhöht bis der Regelkreis in eine Dauerschwingung übergeht (siehe Abbildung 3.23). Dieser eingestellte Wert für K_{PR} ist dann $K_{PR,krit}$. Zusätzlich wird die kritische Periodendauer T_{krit} der Schwingung abgelesen. Über eine Tabelle (siehe Tabelle 3) können dann die Werte für den Proportionalbeiwert, die Nachstellzeit T_{NR} und die Vorhaltezeit T_{VR} errechnet werden. Aus der Nachstellzeit und der Vorhaltezeit können jeweils K_{IR} und K_{DR} errechnet werden. Für K_{IR} gilt:

$$K_I = \frac{1}{T_{NR}} . \quad (25)$$

Und für K_D gilt:

$$K_D = T_{VR} . \quad (26)$$

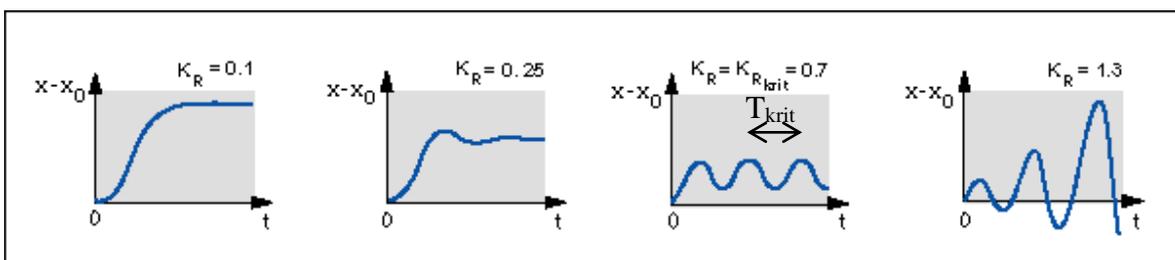


Abbildung 3.23: $K_{PR,krit}$ nach Ziegler und Nichols

Quelle:

<http://www.chemgapedia.de/vsengine/media/vsc/de/ch/7/tc/regelung/grundlagen/regparam/bilder/znschwing.gif> (Letzter Zugriff: 03.02.12)

| Regeleinrichtung | K_{PR} [s/s] | T_{NR} [s] | T_{VR} [s] |
|------------------|---------------------------|-----------------------|------------------------|
| P | $0,5 \cdot K_{PR\ krit}$ | (∞) | (0) |
| PI | $0,45 \cdot K_{PR\ krit}$ | $0,83 \cdot T_{krit}$ | (0) |
| PID | $0,6 \cdot K_{PR\ krit}$ | $0,5 \cdot T_{krit}$ | $0,125 \cdot T_{krit}$ |

Tabelle 3: Einstellregeln nach Ziegler und Nichols Variante 1

Bei der zweiten Variante wird die Sprungantwort der PT_2 Regelstrecke durch eine PT_1 Strecke grafisch approximiert. Der Kurvenverlauf wird von rechts kommend ab dem Wendepunkt weiter nach unten zur x-Achse fortgeführt. Für diese PT_1 Strecke werden dann die Zeitkonstante T_1 und die Totzeit T_t bestimmt (siehe Abbildung 3.24). Anschließend werden die Beiwerte nach Tabelle 4 berechnet.

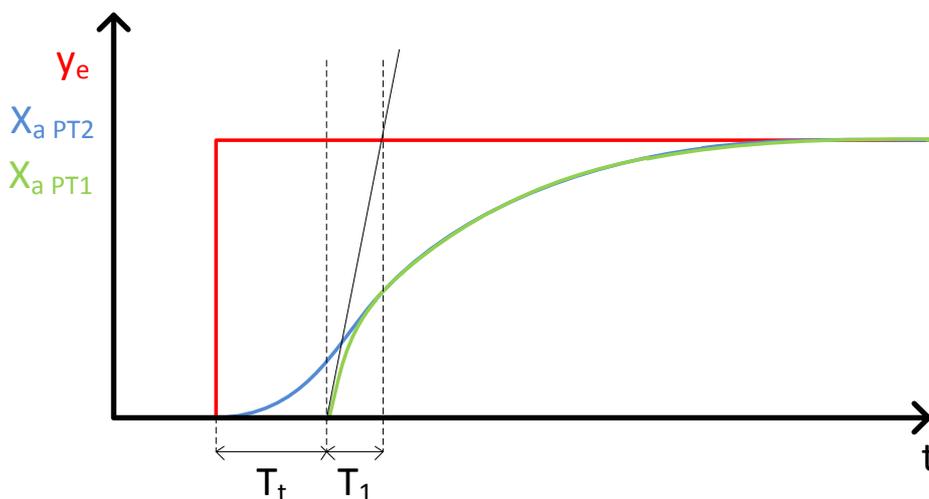


Abbildung 3.24: Approximierte PT_1 Strecke

| Regeleinrichtung | K_{PR} [s/s] | T_{NR} [s] | T_{VR} [s] |
|------------------|--|-----------------|-----------------|
| P | $\frac{T_1}{T_t}$ | (∞) | (0) |
| PI | $\frac{0,9 \cdot T_1}{T_t \cdot K_{PS}}$ | $3,3 \cdot T_t$ | (0) |
| PID | $\frac{1,2 \cdot T_1}{T_t \cdot K_{PS}}$ | $2 \cdot T_t$ | $0,5 \cdot T_t$ |

Tabelle 4: Einstellregeln nach Ziegler und Nichols Variante 2

Beide Verfahren sind hauptsächlich zum Ausregeln von Störeinflüssen geeignet. Durch die relativ schlechte Dämpfung kann der Regelkreis instabil werden, ein Überschwingen über den Sollwert ist meistens nicht zu vermeiden.

Anwendung von Ziegler/Nichols-Verfahren auf die Lichtregelstrecke

Da an der Versuchsregelstrecke die geforderte Schwingung aus Variante 1 nicht genau eingestellt werden konnte, wird an dieser Stelle die Variante 2 zur Ermittlung der Beiwerte genutzt. Die Werte für die Ersatz-PT₁-Strecke,

$$T_1 = 50 \text{ ms}$$

und

$$T_t = 30 \text{ ms} ,$$

wurden grafisch aus der Sprungantwort der Lichtregelstrecke ermittelt (siehe Anhang VIII). Die Verstärkung der Lichtregelstrecke ist

$$K_{PS} = 0,84 .$$

Mit diesen Werten können nun die Beiwerte nach Tabelle 4 berechnet werden. Demnach ergeben sich folgende Werte (T_{NR} und T_{VR} wurden bereits in K_{IR} und K_{DR} umgerechnet):

| Regeleinrichtung | K_{PR} [V/V] | K_{IR} [1/s] | K_{DR} [s] |
|------------------|----------------|----------------|--------------|
| P | 2,0 | (∞) | (0) |
| PI | 1,8 | 10,1 | (0) |
| PID | 2,4 | 16,7 | 0,015 |

Tabelle 5: Beiwerte Lichtregelstrecke nach Ziegler und Nichols

Diese errechneten Werte sind nur Richtwerte für die Reglereinstellung und müssen ggf. noch im praktischen Versuch angepasst werden, um die optimale Einstellung zu erhalten.

Anwendung von Ziegler/Nichols-Verfahren auf die Temperaturregelstrecke

Von der Temperaturregelstrecke wurden die Werte für

$$T_1 = 220 \text{ s}$$

und

$$T_t = 10 \text{ s}$$

schon bei der Messung in Kapitel 3.4.2.4. ermittelt. Die Verstärkung der Regelstrecke ist

$$K_{PS} = 1.$$

Daraus ergeben sich folgende Werte nach Ziegler und Nichols:

| Regeleinrichtung | K_{PR} [V/V] | K_{IR} [1/s] | K_{DR} [s] |
|------------------|----------------|----------------|--------------|
| P | 22,0 | (∞) | (0) |
| PI | 19,8 | 0,03 | (0) |
| PID | 26,4 | 0,05 | 5,0 |

Tabelle 6: Beiwerte Temperaturregelstrecke nach Ziegler und Nichols

3.11.2 Einstellregeln nach Chien, Hrones, Reswick

Das Einstellverfahren nach Chien, Hrones, Reswick gilt als etwas genauer als nach Ziegler und Nichols. Es wird zwischen Führungs- und Störverhalten unterschieden. Das heißt, die Regelung kann auf eine Änderung der Führungsgröße bzw. auf eine Änderung der Störgröße optimal ausgelegt werden. Außerdem können die Werte für einen gedämpft einschwingenden Regelvorgang mit ca. 20 % Überschwingen (Fall 1) und für ein aperiodisches Regelverhalten ohne Überschwingen (Fall 2) ermittelt werden (siehe Abbildung 3.25). Von der Regelstrecke müssen dazu K_{PS} , T_u und T_g bekannt sein. Diese Werte können auf die gleiche Weise wie bei Ziegler und Nichols ermittelt werden.

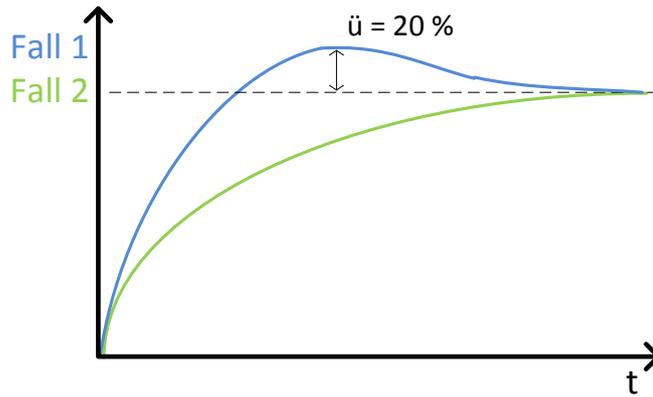


Abbildung 3.25: Fallunterscheidung nach Chien, Hrones, Reswick

Anwendung von Chien, Hrones, Reswick-Verfahren auf die Lichtregelstrecke

Anhand der Einstellregeln nach Chien, Hrones, Reswick können die ermittelten Werte aus dem Verfahren von Ziegler und Nichols überprüft werden. Außerdem können weitere Werte für z.B. ein gutes Führungsverhalten mit und ohne Überschwingen ermittelt werden. Die Werte für T_u und T_g der Lichtregelstrecke wurden bereits in Kapitel 3.3.2.4 ermittelt:

$$T_u = 30 \text{ ms}$$

$$T_g = 70 \text{ ms}.$$

Damit können die Beiwerte nach Tabelle 7 nach (Schulz, 2010) ermittelt werden:

| Regeleinrichtung | | Führungsverhalten | | Störverhalten | |
|------------------|----------------|---|---|--|---|
| | | 1 | 2 | 1 | 2 |
| P | $K_{PR} [V/V]$ | $\frac{0,7}{K_{PS}} \cdot \frac{T_g}{T_u}$ | $\frac{0,3}{K_{PS}} \cdot \frac{T_g}{T_u}$ | $\frac{0,7}{K_{PS}} \cdot \frac{T_g}{T_u}$ | $\frac{0,3}{K_{PS}} \cdot \frac{T_g}{T_u}$ |
| | $T_{NR} [s]$ | T_g | $1,2 \cdot T_g$ | $2,3 \cdot T_g$ | $4 \cdot T_g$ |
| PI | $K_{PR} [V/V]$ | $\frac{0,6}{K_{PS}} \cdot \frac{T_g}{T_u}$ | $\frac{0,35}{K_{PS}} \cdot \frac{T_g}{T_u}$ | $\frac{0,7}{K_{PS}} \cdot \frac{T_g}{T_u}$ | $\frac{0,6}{K_{PS}} \cdot \frac{T_g}{T_u}$ |
| | $T_{NR} [s]$ | T_g | $1,2 \cdot T_g$ | $2,3 \cdot T_g$ | $4 \cdot T_g$ |
| | $T_{VR} [s]$ | $0,47 \cdot T_u$ | $0,5 \cdot T_u$ | $0,42 \cdot T_u$ | $0,42 \cdot T_u$ |
| PID | $K_{PR} [V/V]$ | $\frac{0,95}{K_{PS}} \cdot \frac{T_g}{T_u}$ | $\frac{0,6}{K_{PS}} \cdot \frac{T_g}{T_u}$ | $\frac{1,2}{K_{PS}} \cdot \frac{T_g}{T_u}$ | $\frac{0,95}{K_{PS}} \cdot \frac{T_g}{T_u}$ |
| | $T_{NR} [s]$ | $1,35 \cdot T_g$ | T_g | $2 \cdot T_u$ | $2,4 \cdot T_u$ |
| | $T_{VR} [s]$ | $0,47 \cdot T_u$ | $0,5 \cdot T_u$ | $0,42 \cdot T_u$ | $0,42 \cdot T_u$ |

Tabelle 7: Einstellregeln nach Chien, Hrones, Reswick

Damit ergeben sich folgende Werte für die Einstellung der Lichtregelstrecke (Tabelle 8). Die Werte für T_{NR} und T_{VR} wurden direkt in K_{IR} und K_{DR} umgerechnet (siehe Kapitel 3.11.1).

| Regeleinrichtung | | Führungsverhalten | | Störverhalten | |
|------------------|----------------|-------------------|------|---------------|------|
| | | 1 | 2 | 1 | 2 |
| P | K_{PR} [V/V] | 1,9 | 0,8 | 1,9 | 0,8 |
| | K_{PR} [V/V] | 1,7 | 1,0 | 1,9 | 0,3 |
| PI | K_{IR} [1/s] | 14,3 | 11,9 | 6,2 | 3,6 |
| | K_{PR} [V/V] | 2,6 | 1,7 | 3,3 | 2,6 |
| PID | K_{IR} [1/s] | 10,6 | 14,3 | 16,7 | 13,9 |
| | K_{DR} [s] | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,01 |

Tabelle 8: Beiwerte Lichtregelstrecke nach Chien, Hrones, Reswick

Anwendung von Chien, Hrones, Reswick-Verfahren auf die Temperaturregelstrecke

Die Werte für T_u und T_g wurden bereits in Kapitel 3.4.2.4 ermittelt:

$$T_u = 10 \text{ s}$$

$$T_g = 100 \text{ s} .$$

Damit ergeben sich folgende Werte (Tabelle 9):

| Regeleinrichtung | | Führungsverhalten | | Störverhalten | |
|------------------|----------|-------------------|------|---------------|-------|
| | | 1 | 2 | 1 | 2 |
| P | K_{PR} | 7,0 | 3,0 | 7,0 | 3,0 |
| | K_{PR} | 6,0 | 3,5 | 7,0 | 0,06 |
| PI | K_{IR} | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| | K_{PR} | 9,5 | 6,0 | 12,0 | 9,5 |
| PID | K_{IR} | 0,01 | 0,01 | 0,05 | 0,042 |
| | K_{DR} | 4,7 | 5,0 | 4,2 | 4,2 |

Tabelle 9: Beiwerte Temperaturregelstrecke nach Chien, Hrones, Reswick

Die ermittelten Werte gelten für eine annähernd optimale Einstellung der Regler für die Regelstrecken. Die Anwendung der Einstellregeln ergibt, dass der Einstellbereich der Beiwerte sehr groß gewählt werden muss. Für die Lichtregelstrecke bewegen sich die Beiwerte im Bereich von 0 – 17 und für die Temperaturregelstrecke im Bereich von 0 – 27. Teilweise müssen aber auch Werte im Bereich von 0 – 1 genau eingestellt werden können. Dementsprechend wäre eine genaue Einstellung über ein lineares Potentiometer kaum möglich. Als Lösung würde ein logarithmisches Potentiometer oder eine Faktor-Schaltung dienen mit der man einen Einstellbereich von 0 – 1 mit einem Faktor skalieren kann. So könnten die Beiwerte problemlos in einem Bereich von 0 – 100 genau eingestellt werden und bei Bedarf sogar auf einen noch größeren Bereich erweitert werden. Die Entscheidung zur Umsetzung wird nach Feststellung des Einstellbereichs getroffen.

Da anhand der Regelstrecken auch eine schlechte Regelung bei falscher Einstellung durch zu hohe oder zu niedrige Beiwerte des Reglers gezeigt werden sollen, ist es notwendig die maximal möglichen einstellbaren Beiwerte höher als die optimalen Beiwerte zu wählen. Die Einstellbereiche könnten in einer Simulation oder in praktischen Versuch empirisch ermittelt werden. An dieser Stelle ist es einfacher und schneller den Regelkreis anhand der bisher ermittelten Kennwerte zu simulieren. Die daraus ermittelten Werte können dann praktisch umgesetzt werden. Als Grundlage für die Simulation dienen die Einstellwerte, die anhand der praktischen Einstellregeln ermittelt wurden. Diese werden dann soweit erhöht, bis die Regelgröße schwingt. Die so ermittelten Werte ergeben den Einstellbereich.

4 Simulation des Regelkreises

Zur Simulation des Regelkreises wird die Software MATLAB bzw. Simulink der Firma „The MathWorks“ verwendet. Innerhalb von Simulink ist es möglich einzelne grafische Funktionsblöcke zu platzieren und miteinander zu verbinden. Dafür steht eine Bibliothek mit verschiedensten Funktionsblöcken zur Verfügung. Die Blöcke werden untereinander mit gerichteten Verbindungslinien verbunden. Somit ist es möglich den kompletten Regelkreis aus einzelnen Blöcken aufzubauen und zu testen. Sämtliche Strecken- und Reglerparameter können angepasst werden. Für die numerische Simulation stehen verschiedene sog. „Solver“ zur Verfügung. Bei dieser Simulation wird der Solver „ode45“¹² mit einer maximalen Schrittweite von 0,01 verwendet. Das Verfahren beruht auf dem Runge-Kutta-Verfahren¹³, siehe (Dankert). Die 45 steht für das Rechnen jedes Integrationsschrittes mit einer Formel 4. Ordnung und einer Formel 5. Ordnung (Dormand-Prince-Formelpaar, siehe (Dankert)).

Ziel der Simulation ist es, die zuvor ermittelten optimalen Beiwerte nach den praktischen Einstellregeln zu überprüfen und die Maximalwerte der Beiwerte zu ermitteln. Dadurch können die Einstellbereiche der Beiwerte final festgelegt werden. Da die Temperaturregelstrecke, basierend auf den Einstellregeln, wesentlich höhere Beiwerte für den P- und D-Regler als die Lichtregelstrecke benötigt, wird diese simuliert. Der maximale Beiwert für den I-Regler wird durch die Lichtregelstrecke bestimmt. Die Lichtregelstrecke konnte allerdings nicht simuliert werden, da auch durch Anwendung verschiedener Verfahren die erforderlichen Werte für die Aufstellung der Übertragungsfunktion (T_1 und T_2) nicht ermittelt werden konnten.

¹² ode: Ordinary Differential Equation = Gewöhnliche Differentialgleichung

¹³ Verfahren zur Lösung numerischer Anfangswertprobleme

4.1 Aufstellen der Übertragungsfunktion der Temperaturregelstrecke

Die Regelstrecke wird in Matlab und Simulink in Form einer Übertragungsfunktion dargestellt. Eine Übertragungsfunktion beschreibt das Verhalten der Ausgangsgröße gegenüber der Eingangsgröße eines linearen, zeitinvarianten Systems. Eine Übertragungsfunktion kann sowohl für die Regelstrecke, als auch für den Regler bzw. den kompletten Regelkreis erstellt werden. Ein Beispiel für eine Übertragungsfunktion eines P-Reglers lautet mit a als Ausgangssignal und e als Eingangssignal:

$$G_{(t)} = \frac{a_{(t)}}{e_{(t)}} = K_{PR} . \quad (27)$$

K_{PR} ist in diesem Fall der Verstärkungsfaktor des P-Reglers. Bei komplizierteren Übertragungsgliedern wird die Übertragungsfunktion aus der Differentialgleichung des Übertragungsgliedes mit Hilfe der Laplace- bzw. der Fouriertransformation ermittelt. Die Herleitung und einige Beispiele sind in (Schulz, 2010) zu finden.

Das Verhalten der Temperaturregelstrecke wurde im praktischen Versuch als PT_2 Verhalten ermittelt, allerdings konnte die Wendetangente und somit die charakteristischen Kennwerte nicht genau bestimmt werden. Deshalb wurde die Strecke als ein PT_1 -Glied mit Totzeit angenommen. Zur Absicherung werden vor der eigentlichen Simulation des Regelkreises die Sprungantworten beider Varianten aufgenommen und dann die genauere Variante in den Regelkreis eingesetzt.

Die Übertragungsfunktion eines allgemeinen PT_1 Gliedes lautet nach (Schulz, 2010):

$$G_{(s)} = \frac{K_{PS}}{T_1 \cdot s + 1} \quad (28)$$

mit s als Laplace-Operator. Dies wäre nun die Übertragungsfunktion für die PT_1 -Version der Temperaturregelstrecke (ohne Verzögerung). Wird T_1 eingesetzt, ergibt die Übertragungsfunktion:

$$G_{(s)} = \frac{1}{220 \cdot s + 1} \quad (29)$$

Hinzu kommt noch die Verzögerung durch die Totzeit. Diese wird in Simulink durch einen weiteren Funktionsblock dargestellt.

Die Hintereinanderschaltung zweier PT_1 Glieder ergibt ein PT_2 Glied mit der Übertragungsfunktion

$$G(s) = \frac{K_{PS1}}{T_1 \cdot s + 1} \cdot \frac{K_{PS2}}{T_2 \cdot s + 1} \quad (30)$$

$$G(s) = \frac{K_{PSges}}{T_1 \cdot T_2 \cdot s^2 + (T_1 + T_2)s + 1} \quad (31)$$

Die Zeitkonstanten können aus der Sprungantwort der einzelnen PT₁ Glieder ermittelt werden. Für die PT₂-Übertragungsfunktion der Temperaturregelstrecke müssen die Werte für T₁, T₂ und K_{PS} rechnerisch ermittelt werden. Die Verstärkung sowie die Verzugs- und Ausgleichszeit wurde bereits in Kapitel 3.4.2.4 zu

$$K_{PS} = 1$$

$$T_u = 10 \text{ s}$$

$$T_g = 100 \text{ s}$$

berechnet. Die Berechnung von T₁ und T₂ wird nach (Böther, et al., 1990 S. 357-358) im Folgenden beschrieben:

Zuerst wird das Verhältnis von Verzugszeit zu Ausgleichzeit, der Verzugszeitanteil berechnet:

$$\frac{T_u}{T_g} = \frac{10 \text{ s}}{100 \text{ s}} = 0,1 \quad (32)$$

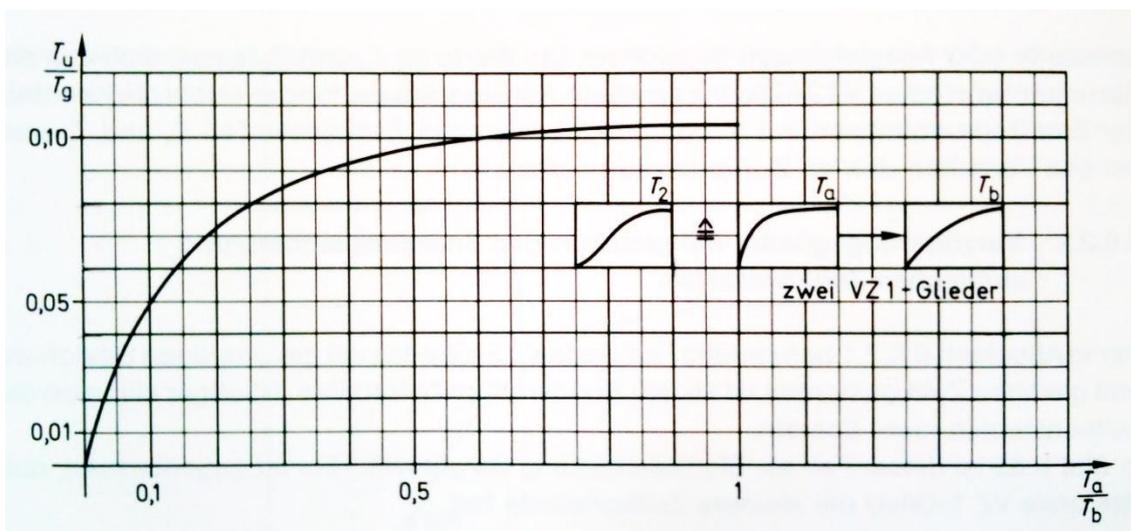


Abbildung 4.1: Zusammenhang zwischen T_a/T_b und T_u/T_g

Quelle: (Böther, et al., 1990 S. 358))

Mit diesem Wert kann aus Abbildung 4.1 das Verhältnis von T_a zu T_b ($T_a = T_1$ und $T_b = T_2$) bestimmt werden:

$$\frac{T_a}{T_b} = 0,6 . \quad (33)$$

Aus diesem Verhältnis lassen sich T_a und T_b mit Hilfe des Faktors c bestimmen. Dieser Faktor ist von dem Verhältnis T_a/T_b abhängig und kann aus Tabelle 10 ermittelt werden.

| | | | | | | | | | | | |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| T_a/T_b | 0,05 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,0 |
| c | 0,75 | 0,63 | 0,53 | 0,47 | 0,42 | 0,39 | 0,36 | 0,34 | 0,32 | 0,30 | 0,28 |

Tabelle 10: Faktor c in Abhängigkeit von T_a/T_b

Daraus ergibt sich:

$$c = 0,36 .$$

Für T_a gilt:

$$T_a = \frac{T_u}{c} = \frac{10 \text{ s}}{0,36} = 27,8 \text{ s} . \quad (34)$$

Und für T_b gilt:

$$T_b = T_g - T_a = 100 \text{ s} - 27,8 \text{ s} = 72,2 \text{ s} . \quad (35)$$

Daraus ergibt sich die Übertragungsfunktion für die Temperaturregelstrecke

$$G_{(s)} = \frac{1}{2007,16 \cdot s^2 + 100 \cdot s + 1} . \quad (36)$$

Nun kann die Ausgabe einer Sprungantwort in einem Matlab Simulink simuliert werden. Das folgende Blockschaltbild in Abbildung 4.2 gibt jeweils die Sprungantworten für die Temperaturregelstrecke mit PT_1 -Verhalten und Totzeit sowie mit PT_2 -Verhalten aus. Die Parameter für die Verstärkung und die Zeitkonstanten sind in den Funktionsblöcken PT_1 und PT_2 einstellbar. Das Blockschaltbild ist in Abbildung 4.2 dargestellt.

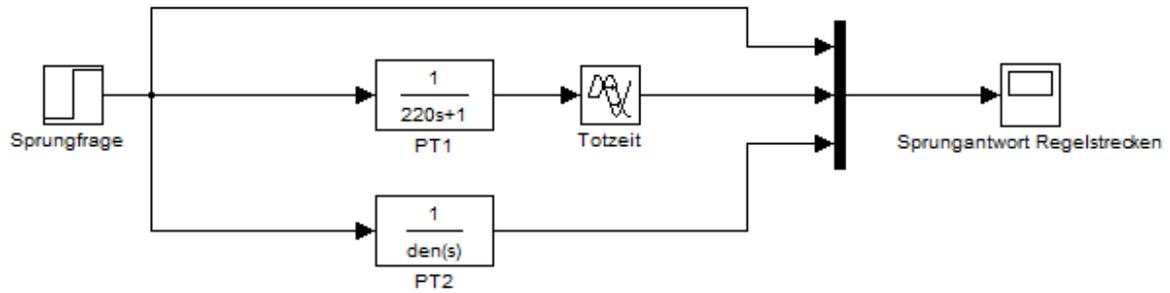


Abbildung 4.2: Blockschaltbild Sprungantwortsimulation

Abbildung 4.3 zeigt die Ausgabe des Programmes. Die blaue Sprungantwort ist die der PT_2 -Übertragungsfunktion. Die magentafarbene Kurve zeigt die Sprungantwort der PT_1 -Übertragungsfunktion mit Totzeit. Die Darstellung zeigt, dass der Verlauf der Sprungantwort der PT_1 -Übertragungsfunktion mit Totzeit sehr viel stärker der im praktischen Versuch ermittelten Sprungantwort ähnelt, als die in blau dargestellte Sprungantwort der PT_2 -Übertragungsfunktion. Das gleiche gilt auch für die Erreichung des Endwertes (Simulation: ca. 1100 s, praktischer Versuch: ca. 1000 s). Unter der Annahme dass eine PT_2 -Strecke schon bei kleineren Verstärkungen eher zum Schwingen neigt als eine PT_1 -Strecke, sollten die mit der PT_1 -Strecke ermittelten Maximalwerte sicher ausreichen die reale Strecke zum Schwingen zu bringen.

Aus diesen Gründen wird im Weiteren mit der angenäherten Sprungantwort der PT_1 -Temperaturregelstrecke mit Totzeit gearbeitet.

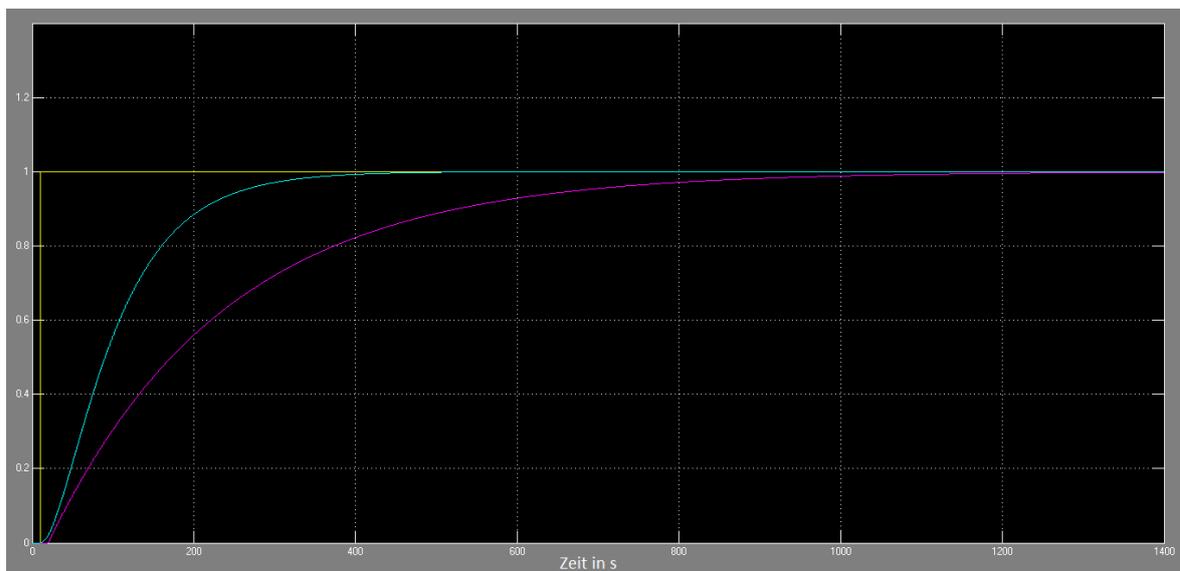


Abbildung 4.3: Sprungantworten Temperaturregelstreckensimulation

4.2 Ermittlung der Einstellbereiche

Da nun die PT_1 -Übertragungsfunktion mit Totzeit der Temperaturregelstrecke als ausreichend genau erklärt wurde, kann diese nun in den Regelkreis integriert werden. Dieser Regelkreis wird in Matlab Simulink mit Funktionsblöcken aufgebaut, die aus einer Bibliothek ausgewählt werden können.

Der komplette Regelkreis ist in Abbildung 4.4 dargestellt. Der Regler (3) wird mit Hilfe von drei Übertragungsfunktionen aufgebaut. Die Übertragungsfunktionen lauten für den P-Regler

$$G_{(s)} = K_{PR} , \quad (37)$$

für den I-Regler

$$G_{(s)} = \frac{K_{IR}}{s} \quad (38)$$

und für den D-Regler

$$G_{(s)} = K_{DR} \cdot s \quad (39)$$

Für den Zweipunktregler existiert in Simulink ein eigener Baustein, bei dem die Hysterese eingestellt werden kann. Über Verknüpfungen (4) und einen Wahlschalter (5) können die gewünschten Reglerkombinationen ausgewählt werden. Der Ausgang des Reglers geht über eine Begrenzung (6), welche den Ausgang des Reglers auf 10 (respektive 10 V im realen Regelkreis) begrenzt, auf eine Additionsstelle (7). Bei Bedarf kann dort eine Störgröße (8) zeitverzögert zugeschaltet werden. Dahinter folgt die Regelstrecke (9). Die Regelgröße wird auf den Vergleichler (2) zurückgeführt. Über einen Mux-Block (10) werden die Sprungfrage (1), die Störgröße und die Regelgröße an ein Scope (11) gegeben.

Mit diesem Regelkreis können nun die in Kapitel 3.11 ermittelten Einstellbereiche simuliert werden. Dafür wird die Strecke an die verschiedenen Reglerkombinationen geschaltet und jeweils der nach den Einstellregeln ermittelte Optimalwert eingestellt. Es wird, ausgehend vom Optimalwert, der jeweilige Beiwert in mehreren Schritten erhöht, um das sichere Erreichen einer Schwingung zu erzielen. Zusätzlich wird zu Vergleichszwecken ein Wert unterhalb des Optimalwertes eingestellt.

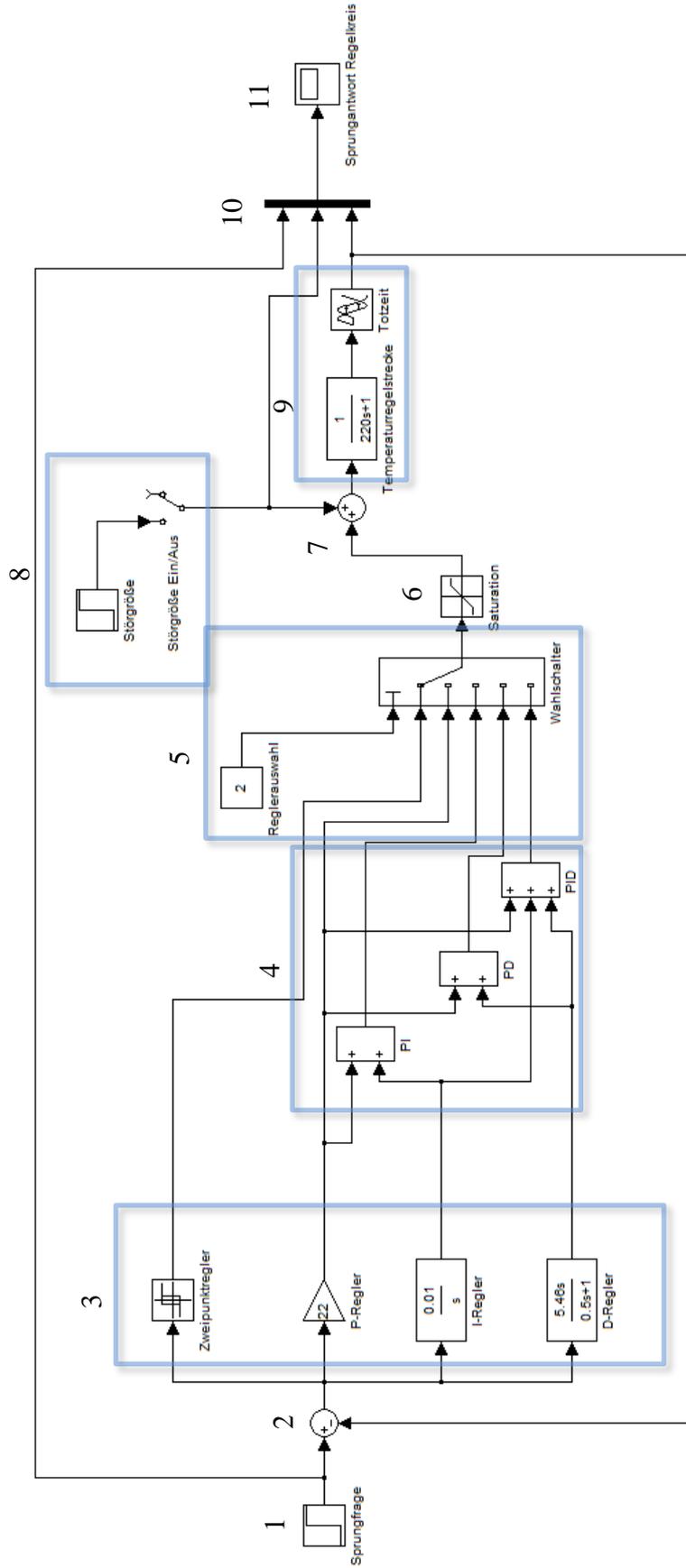


Abbildung 4.4: Simulink Modell Temperaturregelstrecke-

Regelung mit Zweipunktregler

Nachdem der Regelkreis in Simulink komplett aufgebaut ist, wird zunächst der Zweipunktregler zur Regelung der Strecke aufgeschaltet. Der Sollwert wird durch einen Sprung von 0 auf 1 gesetzt, dies entspricht einem Sprung von $\Delta w = 1 \text{ V}$ bzw. eine Solltemperaturerhöhung von $3,5 \text{ °C}$ ($0 \text{ V} - 10 \text{ V} \triangleq 15 \text{ °C} - 50 \text{ °C}$). Eine Hysterese des Zweipunktreglers von $\pm 1 \text{ V}$ würde eine Temperaturhysterese von $\pm 3,5 \text{ °C}$ bedeuten und ist damit ausreichend um die Funktion eines Zweipunktreglers anschaulich demonstrieren zu können.

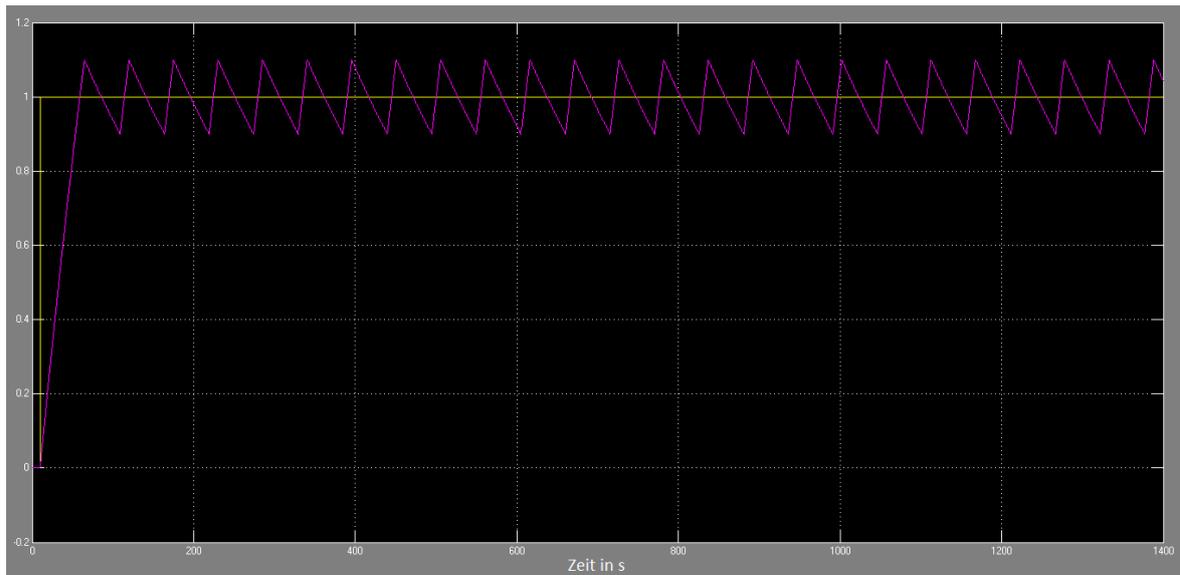


Abbildung 4.5: Sprungantwort Regelkreis mit Zweipunktregler

Regelung mit P-Regler

In

Abbildung 4.6 sind die Sprungantwort der Regelung mit dem P-Regler bei verschiedenen Parametern dargestellt. Die magentafarbene Kurve zeigt die Sprungantwort mit $K_{PR} = 9,5$ (Optimale Einstellung nach Chien, Hrones, Reswick Führungsverhalten Fall 1), die blaue mit $K_{PR} = 26,4$ (Optimale Einstellung nach Ziegler und Nichols) und die rote mit $K_{PR} = 40$. In der Simulation sind alle Größen einheitenlos dargestellt. In der Praxis ist die Einheit von $K_{PR} [\text{V/V}]$. Je größer K_{PR} gewählt wird, desto weiter schwingt die Regelgröße über und desto geringer wird die bleibende Regelabweichung. Allerdings geht die Regelgröße schon ab einer Verstärkung von $K_{PR} = 35$ langsam in eine Dauerschwingung über. Demnach würde für einen reinen P-Regler ein Einstellbereich von

$$K_{PR} = 0 - 50$$

sicher ausreichen, um eine gute und schlechte Regelung zu ermöglichen.

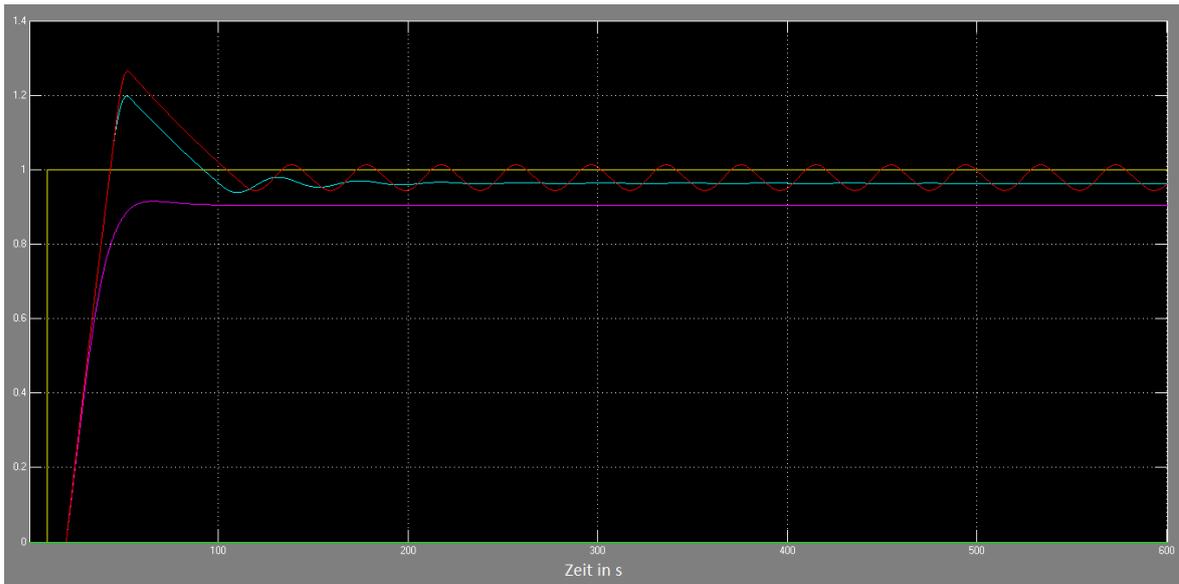


Abbildung 4.6: Sprungantworten Regelkreis mit P-Regler

Regelung mit PI-Regler

Da die Übertragungsfunktion der Lichtregelstrecke, die den maximalen Integral Beiwert bestimmt, nicht ermittelt werden konnte, wird der Einstellbereich des Integral Beiwerts deshalb durch Aufrundung des doppelten maximalen Wertes aus den praktischen Einstellregeln zu

$$K_{IR \max} = K_{IR} \cdot 2 = 16,7 \frac{1}{s} \cdot 2 = 33,4 \frac{1}{s} \approx 40 \frac{1}{s} \quad (40)$$

festgelegt. Damit ist ein genügend großer Einstellbereich abgedeckt.

Regelung mit PID-Regler

Die Beiwerte für P- und I-Regler werden nach Chien, Hrones, Reswick auf ein gutes Führungsverhalten mit 20 % Überschwingung (Fall 1) eingestellt. Dies ergibt:

$$K_{PR} = 9,5$$

und

$$K_{IR} = 0,01 \frac{1}{s}$$

Der Beiwert des D-Reglers wurde auf $K_{DR} = 1$ s (magenta), $K_{DR} = 4,7$ s (blau) und $K_{DR} = 10$ s (rot) eingestellt. Da die Veränderung des D-Regler Beiwertes keinen starken Einfluss auf die Regelung hat, wird der errechnete Optimalwert von $K_{DR} = 4,7$ s verdoppelt und aufgerundet. Dies ergibt

$$K_{DR\ max} = 10 \text{ s} .$$

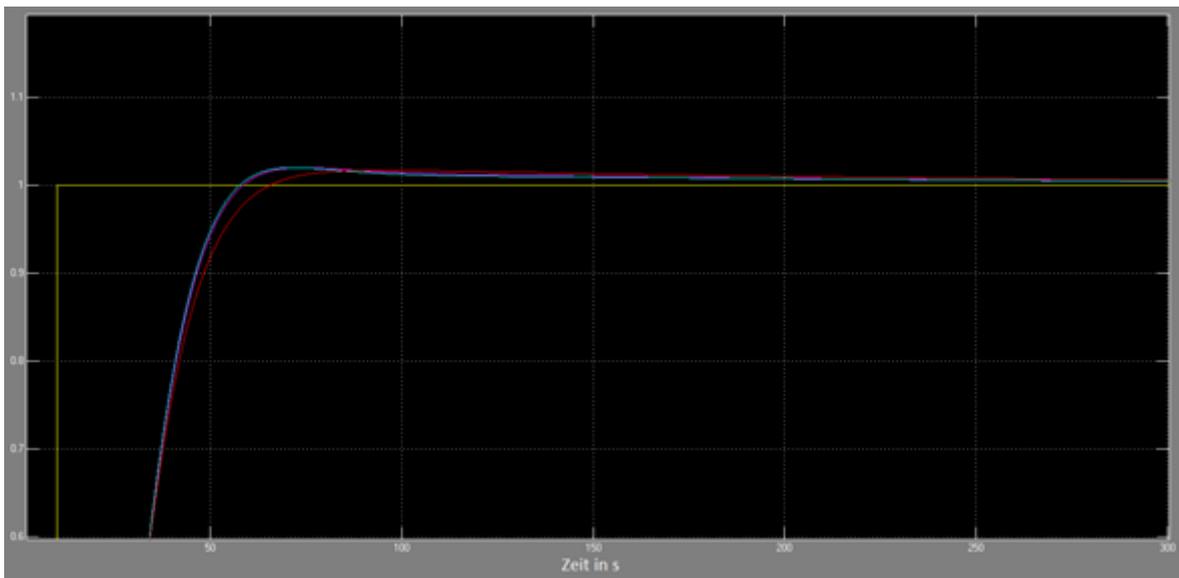


Abbildung 4.7: Sprungantwort Regelkreis mit PID-Regler

Zusammenfassung der Simulationsergebnisse

Anhand der Auswertung der praktischen Einstellregeln und der Simulation werden die Einstellbereiche wie folgt festgelegt:

$$\text{Hysterese}_{ZP} = \pm 1 \text{ V}$$

$$K_{PR} = 0 - 50 \text{ V/V}$$

$$K_{IR} = 0 - 40 \frac{1}{\text{s}}$$

$$K_{DR} = 0 - 10 \text{ s}$$

Diese Einstellbereiche müssen nun über die Auslegung der Widerstände und Kondensatoren in den Operationsverstärkerschaltungen aus Kapitel 3.7 realisiert werden. Dies wird im folgenden Kapitel im Rahmen der „Vorbereitung des praktischen Aufbaus“ beschrieben.

Die Simulation zeigte außerdem, dass die durch Einstellregeln ermittelten Beiwerte sehr genau sind und, zumindest in der Simulation, keine weitere Anpassung erfordern. Bei dem letztendlich praktisch aufgebauten Regelkreis ist aber ggf. noch eine Anpassung erforderlich, um eine optimale Regelung zu erzielen, da die simulierte Regelstrecke nur einer Näherung entspricht.

5 Vorbereitung des praktischen Aufbau des Regelkreises

Da die Schaltungen für die Regelkreiselemente und die Einstellbereiche des Reglers nun ermittelt sind, müssen nun die Bauteile des Reglers dimensioniert werden. Anschließend werden die einzelnen Schaltungen der Regelkreiselemente zu einem Gesamtschaltplan zusammengefügt. Nach diesem Schaltplan kann dann das Experimentiersystem aufgebaut und betrieben werden.

Die oben genannten Einstellbereiche werden durch logarithmische Potentiometer, die im Folgenden berechnet werden, eingestellt. Dies gewährleistet eine ausreichend genaue Einstellmöglichkeit.

5.1 Dimensionierung der Reglerelemente

Für die folgenden Berechnungen sind der besseren Zuordnung halber die Bezeichnungen der Widerstände und Kondensatoren aus den jeweiligen Schaltplänen in den entsprechenden Kapiteln (3.7.1 - 3.7.5) übernommen worden.

Die festgelegten Einstellbereiche der Regler sind:

$$\text{Hysterese}_{ZP} = \pm 1 \text{ V}$$

$$K_{PR} = 0 - 50 \text{ V/V}$$

$$K_{IR} = 0 - 40 \frac{1}{\text{s}}$$

$$K_{DR} = 0 - 10 \text{ s}$$

Berechnung des Zweipunktreglers

Die Formeln für die Schalthysterese sind:

$$U_{e \text{ ein}} = - \frac{R_3}{R_2 + R_3} \cdot U_{y \text{ max}} \quad (41)$$

$$U_{e \text{ aus}} = + \frac{R_3}{R_2 + R_3} \cdot U_{y \text{ max}} \quad (42)$$

Die Schaltgrenze für das Ein- bzw. Ausschalten sind:

$$U_{e\text{ ein}} = -1\text{ V}$$

$$U_{e\text{ aus}} = +1\text{ V}$$

Die maximale Ausgangsspannung des Operationsverstärkers beträgt

$$U_{y\text{ max}} = \pm 11,4\text{ V}$$

Der Widerstand R_3 wird zu

$$R_3 = 1\text{ k}\Omega$$

gewählt. Damit kann der Widerstand R_2 berechnet werden:

$$R_2 = \frac{-R_3 - \frac{U_{e\text{ ein}}}{U_{y\text{ max}}} \cdot R_3}{\frac{U_{e\text{ ein}}}{U_{y\text{ max}}}} = \frac{-1\text{ k}\Omega - \frac{-1\text{ V}}{11,4\text{ V}} \cdot 1\text{ k}\Omega}{\frac{-1\text{ V}}{11,4\text{ V}}} = 10,4\text{ k}\Omega \quad (43)$$

Der Widerstand für R_2 wird aus Normreihe E3 gewählt:

$$R_2 = 10\text{ k}\Omega$$

Daraus ergibt sich der neue Schaltpunkt $U_{e\text{ ein}}$ zu:

$$U_{e\text{ ein}} = -\frac{R_3}{R_2 + R_3} \cdot U_{y\text{ max}} = -\frac{1\text{ k}\Omega}{10,4\text{ k}\Omega + 1\text{ k}\Omega} \cdot U_{y\text{ max}} = -1,04\text{ V} \quad (44)$$

Und dementsprechend der neue Schaltpunkt $U_{e\text{ aus}}$:

$$U_{e\text{ aus}} = +1,04\text{ V}$$

Berechnung des P-Reglers

Für K_{PR} gilt:

$$K_{PR} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (45)$$

In diesem Fall können die Widerstände frei gewählt werden, solange sie die Gleichung erfüllen. In diesem Fall wird

$$R_1 = 1 \text{ k}\Omega$$

und

$$R_2 = 50 \text{ k}\Omega$$

gewählt. R_2 ist dabei der einstellbare Widerstand.

Berechnung des I-Reglers

Für K_{IR} gilt:

$$K_{IR} = \frac{1}{R_1 \cdot C_1} \quad (46)$$

Der Kondensator C_1 wird gewählt:

$$C_1 = 470 \text{ nF}$$

Daraus folgt für R_1 :

$$R_1 = \frac{1}{K_{IR} \cdot C_1} = \frac{1}{40 \frac{1}{s} \cdot 470 \cdot 10^{-9} F} = 53,2 \text{ k}\Omega \quad (47)$$

Aus der Normreihe E24 wird der Widerstand

$$R_1 = 51 \text{ k}\Omega$$

gewählt. Damit ergibt sich ein maximaler Einstellbereich für K_{IR} :

$$K_{IRmax} = \frac{1}{R_1 \cdot C_1} = \frac{1}{51 \text{ k}\Omega \cdot 470 \cdot 10^{-9} F} = 41,7 \frac{1}{s} \quad (48)$$

Berechnung des D-Reglers

Der Differentialbeiwert K_{DR} berechnet sich nach

$$K_{DR} = R_1 \cdot C_1 \quad (49)$$

C_1 wird auch hier gewählt:

$$C_1 = 470 \mu F$$

Daraus folgt:

$$R_1 = \frac{K_{DR}}{C_1} = \frac{10 s}{470 \cdot 10^{-6} F} = 21,3 k\Omega \quad (50)$$

R_1 wird aus Normreihe E3 – E-24 gewählt:

$$R_1 = 22 k\Omega$$

Damit ergibt sich ein neuer maximaler Einstellbereich für K_{DR} :

$$K_{DRmax} = R_1 \cdot C_1 = 22 k\Omega \cdot 470 \cdot 10^{-6} F = 10,3 s \quad (51)$$

5.2 Gesamtschaltplan des Regelkreises

Aus den in den vorangegangenen Kapiteln dimensionierten Regelkreiselementen ergibt sich nun der vollständige Schaltplan des Regelkreises (siehe Abbildung 5.2, hier beispielhaft für die Temperaturregelstrecke). Die Spannungsversorgung für die einzelnen ICs ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Erfahrungsgemäß bietet es sich an den PID-Regler aus einzelnen ICs aufzubauen.

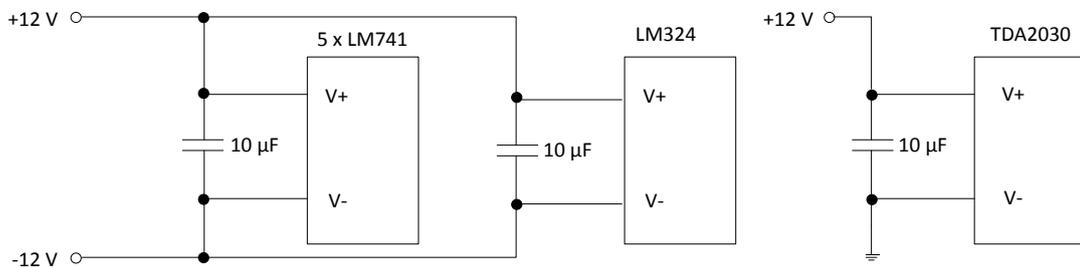


Abbildung 5.1: Spannungsversorgung der ICs

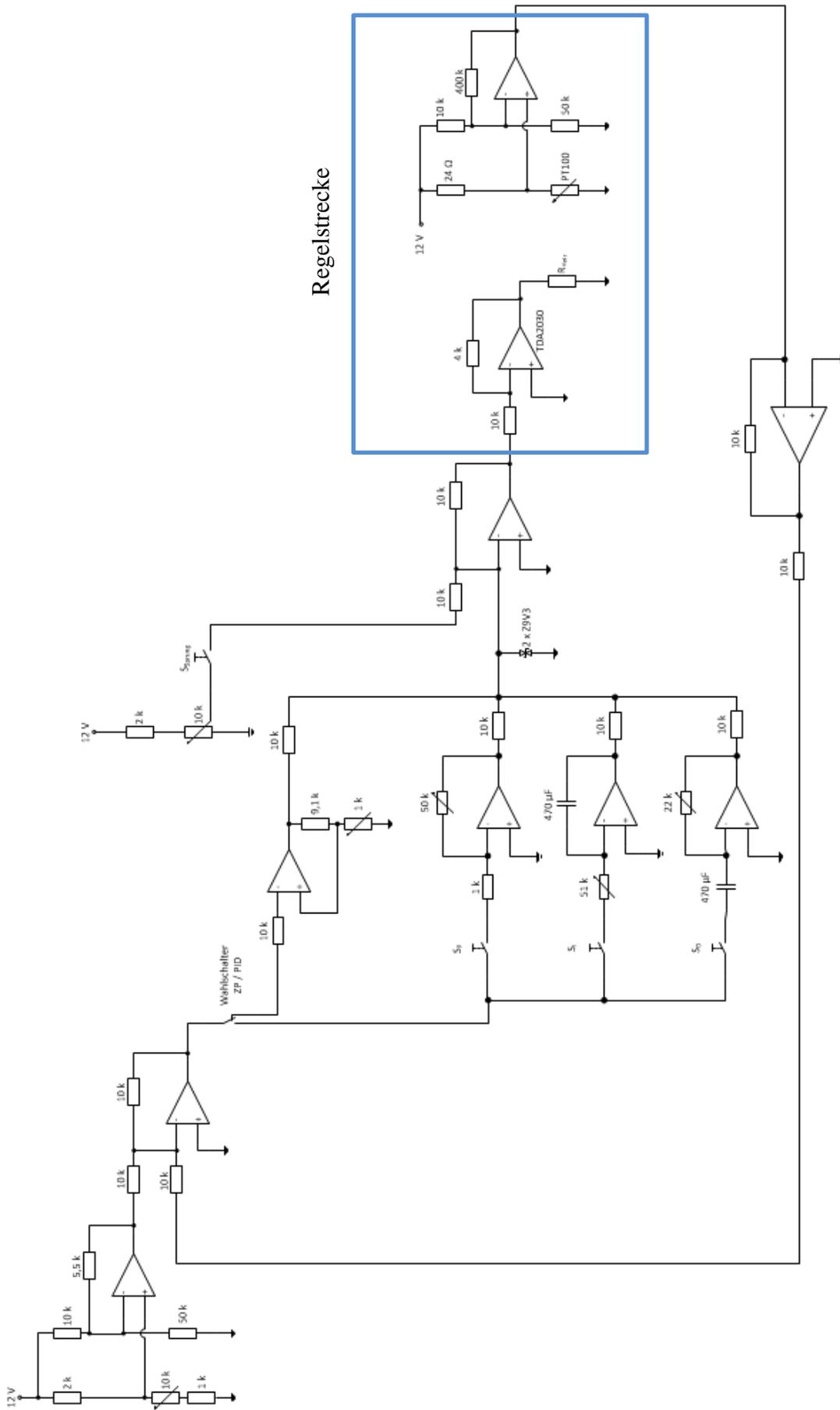


Abbildung 5.2: Schaltplan Reglerplatine

6 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der Arbeit war es ein Experimentiersystem zum Thema Regelungstechnik zu entwickeln, mit dem den Auszubildenden die verschiedenen Eigenschaften und Verhaltensweisen einer Regelung durch Versuche und Demonstrationen vermittelt werden können. Zudem sollte die zu verwendende Regelstrecke einen Bezug zu einer Anwendung in einem Passagierflugzeug haben.

Die erste Aufgabe bestand darin eine geeignete Regelstrecke auszuwählen. In Zusammenarbeit mit der Berufsausbildung wurden einige Anforderungen an die Regelstrecke aufgestellt. Es wurden verschiedene Regelstrecken diskutiert und mit Hilfe eines aus den Anforderungen erstellten Kriterienkataloges bewertet. Dabei stellte sich heraus, dass die Regelstrecke mit der besten Bewertung nicht alle Anforderungen erfüllt. Dementsprechend wurde eine weitere Regelstrecke zur Umsetzung ausgewählt. Dies hat den weiteren Vorteil, dass das Experimentiersystem flexibler gestaltet werden konnte. Aufgrund der unterschiedlichen Regelstrecken führte diese Entscheidung zu einer Erhöhung der Komplexität dieser Arbeit.

Nach der Auswahl der Regelstrecken wurden sie praktisch untersucht. Durch Aufnahme der Sprungantworten wurde das Verhalten bestimmt und die charakteristischen Kennwerte grafisch ermittelt. Dabei wurde festgestellt, dass mit diesem grafischen Verfahren nicht immer eine exakte Bestimmung des Regelstreckenverhaltens, bzw. der Kennwerte, möglich ist. Für diesen Fall wurde eine ausreichende grafische Näherung ermittelt und später in der Simulation verifiziert.

Die ermittelten Kennwerte der Regelstrecken bildeten die Grundlage für die Auslegung des Reglers. Nachdem die Entscheidung getroffen wurde, das Experimentiersystem analog mit Hilfe von Operationsverstärkern umzusetzen, galt es die entsprechend notwendigen Schaltungen sowie den Einstellbereich des PID-Reglers zu ermitteln. Unter Verwendung von praktischen Einstellregeln wurden zunächst die optimalen Einstellwerte für beide Regelstrecken errechnet. Diese Werte dienten zur ersten Einschätzung des Einstellbereichs und zusätzlich als Richtwert für die späteren Anwender. Eine anschließende Simulation in Matlab Simulink des Regelkreises diente zur Verifizierung der optimalen Einstellungen und der Ermittlung der maximalen Einstellwerte. Hierbei wurde vor allem berücksichtigt, dass mit dem zu entwickelnden Experimentiersystem, neben einer optimalen Reglereinstellung, auch ein normalerweise in der Regelungstechnik ungewolltes Verhalten der Regelgröße dargestellt werden kann. Nach Abschluss der Simulation konnten die Regler dimensioniert und der komplette Schaltplan des Regelkreises erstellt werden.

Das Experimentiersystem kann nun anhand dieses Schaltplanes aufgebaut werden. Wie gut der Regelkreis den Anforderungen entspricht und ob die Einstellbereiche ausreichend genau gewählt wurden, kann letztendlich erst dann praktisch überprüft werden. Zum Abschluss bleibt festzustellen, dass die Vorgehensweise dieser Arbeit sowie auch die praktische Umsetzung des Experimentiersystems in die Berufsausbildung einfließen werden.

7 Literaturverzeichnis

Böther, Klaus, et al. 1990. *Elektronik IV B Meß- und Regelungstechnik*. München : Pflaum Verlag, 1990.

Brechmann, Gerhard, et al. 2006. *Elektrotechnik Tabellen Energieelektronik*. Braunschweig : Westermann Schulbuchverlag GmbH, 2006.

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.

www.gefahrdungsbeurteilung.de. [Online] [Zitat vom: 10. Februar 2012.]

http://www.gefahrdungsbeurteilung.de/de/gefahrdungsfaktoren/thermische_gefahrdungen/heiss.

Busch, Peter. 1992. *Elementare Regelungstechnik*. Würzburg : Vogel, 1992.

CIP-Kurztitelaufnahme der deutschen Bibliothek. 1995. *Linear-IC-Taschenbuch*. Bonn : IWT Verlag GmbH, 1995.

Dankert, Jürgen. www.dankertdankert.de. *Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Dankert*. [Online] [Zitat vom: 10. Februar 2012.] http://www.rzbt.haw-hamburg.de/dankert/numet_5.pdf.

—. www.tm-mathe.de. [Online] [Zitat vom: 3. Februar 2012.] http://www.tm-mathe.de/Themen/html/matlab__die_ode-functions_muss.html.

Elpers, et al. 1998. *Elektrotechnik Energietechnik*. [Hrsg.] Sauerwein Heymann. Troisdorf : Kieser, 1998.

Gemmel, Stefan. www.stegem.de. [Online] [Zitat vom: 06. Januar 2012.] <http://www.stegem.de/Elektronik/OP3/op.html>.

Lunze, Jan. 2007. *Regelungstechnik 1*. Berlin Heidelberg : Springer, 2007.

Quick-Ohm Küpper & Co. GmbH. www.quick-cool.com. [Online] [Zitat vom: 2. Februar 2012.] <http://www.quick-cool.com/heatpipe/download/Erlaeuterung-zu-Peltierelementen.pdf>.

Schmidt-Walter, Heinz. www.schmidt-walter.eit.h-da.de. [Online] [Zitat vom: 16. Januar 2012.] http://www.schmidt-walter.eit.h-da.de/el/skript_pdf/el_13.pdf.

Schneider, Wolfgang. 2008. *Praktische Regelungstechnik*. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2008.

Schulz, Wolfgang. 2010. Skript "Mess- Steuer- und Regelungstechnik". 2010.

Unbehauen, Heinz. 2007. *Regelungstechnik I*. Wiesbaden : Vieweg, 2007.

Wernstedt, J. und Winkler, W. 2003. Skript "Inbetriebnahme eines Regelkreises". 2003.

Zacher, Serge und Reuter, Manfred. 2011. *Regelungstechnik für Ingenieure*. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2011.

Eidesstattliche Erklärung

Zur Erläuterung des Zwecks dieses Blattes:

§ 16 Abs. 5 der APSO-TI-BM lautet:

„Zusammen mit der Thesis ist eine schriftliche Erklärung abzugeben, aus der hervorgeht, dass die Arbeit – bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit (§18 Absatz 1) – ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Dieses Blatt mit der folgenden Erklärung ist nach Fertigstellung der Arbeit durch jede/n Kandidat/en/in auszufüllen und jeweils mit **Originalunterschrift** (keine Ablichtungen !) **als letztes Blatt des als Prüfungsexemplar der Bachelorthesis gekennzeichneten Exemplars einzubinden.**

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann - auch nachträglich - zur Ungültigkeit der Bachelor-Abschlusses führen.

Erklärung

Hiermit versichere ich,

Name: **Richters** Vorname: **Timo**

dass ich die vorliegende Bachelorthesis mit dem Thema

Entwicklung eines regelungstechnischen Experimentiersystems für den Einsatz in der Berufsausbildung für Elektroniker/-in für Luftfahrttechnische Systeme

ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Ort

Datum

Unterschrift im Original

Anhang

LM741

Operational Amplifier

General Description

The LM741 series are general purpose operational amplifiers which feature improved performance over industry standards like the LM709. They are direct, plug-in replacements for the 709C, LM201, MC1439 and 748 in most applications. The amplifiers offer many features which make their application nearly foolproof: overload protection on the input and

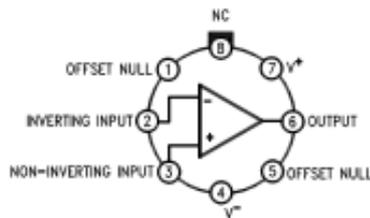
output, no latch-up when the common mode range is exceeded, as well as freedom from oscillations.

The LM741C is identical to the LM741/LM741A except that the LM741C has their performance guaranteed over a 0°C to +70°C temperature range, instead of -55°C to +125°C.

Features

Connection Diagrams

Metal Can Package

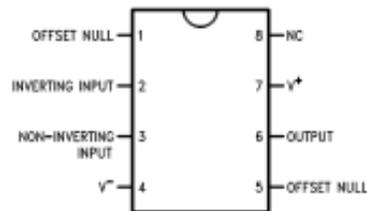


00034102

Note 1: LM741H is available per JM38510/10101

Order Number LM741H, LM741H/883 (Note 1),
LM741AH/883 or LM741CH
See NS Package Number H08C

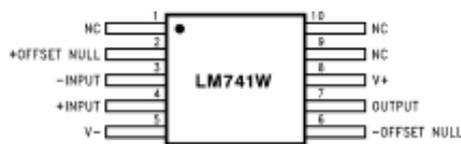
Dual-In-Line or S.O. Package



00034103

Order Number LM741J, LM741J/883, LM741CN
See NS Package Number J08A, M08A or N08E

Ceramic Flatpak

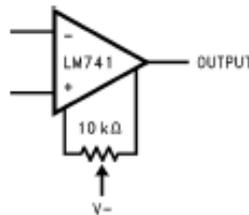


00034106

Order Number LM741W/883
See NS Package Number W10A

Typical Application

Offset Nulling Circuit



00034107

Absolute Maximum Ratings (Note 2)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

(Note 7)

| | LM741A | LM741 | LM741C |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|
| Supply Voltage | ±22V | ±22V | ±18V |
| Power Dissipation (Note 3) | 500 mW | 500 mW | 500 mW |
| Differential Input Voltage | ±30V | ±30V | ±30V |
| Input Voltage (Note 4) | ±15V | ±15V | ±15V |
| Output Short Circuit Duration | Continuous | Continuous | Continuous |
| Operating Temperature Range | -55°C to +125°C | -55°C to +125°C | 0°C to +70°C |
| Storage Temperature Range | -65°C to +150°C | -65°C to +150°C | -65°C to +150°C |
| Junction Temperature | 150°C | 150°C | 100°C |
| Soldering Information | | | |
| N-Package (10 seconds) | 260°C | 260°C | 260°C |
| J- or H-Package (10 seconds) | 300°C | 300°C | 300°C |
| M-Package | | | |
| Vapor Phase (60 seconds) | 215°C | 215°C | 215°C |
| Infrared (15 seconds) | 215°C | 215°C | 215°C |
| See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" for other methods of soldering surface mount devices. | | | |
| ESD Tolerance (Note 8) | 400V | 400V | 400V |

Electrical Characteristics (Note 5)

| Parameter | Conditions | LM741A | | | LM741 | | | LM741C | | | Units |
|---------------------------------------|--|--------|-----|-------|-------|-----|-----|--------|-----|-----|------------------------------|
| | | Min | Typ | Max | Min | Typ | Max | Min | Typ | Max | |
| Input Offset Voltage | $T_A = 25^\circ\text{C}$ $R_B \leq 10\text{ k}\Omega$ $R_B \leq 50\Omega$ | | 0.8 | 3.0 | | 1.0 | 5.0 | | 2.0 | 6.0 | mV mV |
| | $T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$ $R_B \leq 50\Omega$ $R_B \leq 10\text{ k}\Omega$ | | | 4.0 | | | 6.0 | | | 7.5 | mV mV |
| | | | | 15 | | | | | | | $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ |
| Average Input Offset Voltage Drift | | | | 15 | | | | | | | $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ |
| Input Offset Voltage Adjustment Range | $T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_B = \pm 20\text{V}$ | ±10 | | | | ±15 | | | ±15 | | mV |
| Input Offset Current | $T_A = 25^\circ\text{C}$ | | 3.0 | 30 | | 20 | 200 | | 20 | 200 | nA |
| | $T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$ | | | 70 | | 85 | 500 | | | 300 | nA |
| Average Input Offset Current Drift | | | | 0.5 | | | | | | | $\text{nA}/^\circ\text{C}$ |
| Input Bias Current | $T_A = 25^\circ\text{C}$ | | 30 | 80 | | 80 | 500 | | 80 | 500 | nA |
| | $T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$ | | | 0.210 | | | 1.5 | | | 0.8 | μA |
| Input Resistance | $T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_B = \pm 20\text{V}$ | 1.0 | 6.0 | | 0.3 | 2.0 | | 0.3 | 2.0 | | $\text{M}\Omega$ |
| | $T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$, $V_B = \pm 20\text{V}$ | 0.5 | | | | | | | | | $\text{M}\Omega$ |
| Input Voltage Range | $T_A = 25^\circ\text{C}$ | | | | | | | ±12 | ±13 | | V |
| | $T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$ | | | | ±12 | ±13 | | | | | V |

| Electrical Characteristics (Note 5) (Continued) | | | | | | | | | | | |
|---|---|----------|-------------|------------|----------------------|----------------------|-----------|----------------------|----------------------|-----|----------------------|
| Parameter | Conditions | LM741A | | | LM741 | | | LM741C | | | Units |
| | | Min | Typ | Max | Min | Typ | Max | Min | Typ | Max | |
| Large Signal Voltage Gain | $T_A = 25^\circ\text{C}$, $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$ $V_S = \pm 20\text{V}$, $V_O = \pm 15\text{V}$ $V_S = \pm 15\text{V}$, $V_O = \pm 10\text{V}$ | 50 | | | 50 | 200 | | 20 | 200 | | V/mV V/mV |
| | $T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$, $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$, $V_S = \pm 20\text{V}$, $V_O = \pm 15\text{V}$ $V_S = \pm 15\text{V}$, $V_O = \pm 10\text{V}$ $V_S = \pm 5\text{V}$, $V_O = \pm 2\text{V}$ | 32 | | | 25 | | | 15 | | | V/mV V/mV V/mV |
| | | 10 | | | | | | | | | |
| Output Voltage Swing | $V_S = \pm 20\text{V}$ $R_L \geq 10\text{ k}\Omega$ $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$ | ± 16 | | | | | | | | | V V |
| | $V_S = \pm 15\text{V}$ $R_L \geq 10\text{ k}\Omega$ $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$ | | | | ± 12 ± 10 | ± 14 ± 13 | | ± 12 ± 10 | ± 14 ± 13 | | V V |
| | | | | | | | | | | | |
| Output Short Circuit Current | $T_A = 25^\circ\text{C}$ | 10 | 25 | 35 | | 25 | | | 25 | | mA mA |
| | $T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$ | 10 | | 40 | | | | | | | |
| Common-Mode Rejection Ratio | $T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$ $R_S \leq 10\text{ k}\Omega$, $V_{CM} = \pm 12\text{V}$ $R_S \leq 50\Omega$, $V_{CM} = \pm 12\text{V}$ | 80 | 95 | | 70 | 90 | | 70 | 90 | | dB dB |
| | | | | | | | | | | | |
| Supply Voltage Rejection Ratio | $T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$, $V_S = \pm 20\text{V}$ to $V_S = \pm 5\text{V}$ $R_S \leq 50\Omega$ $R_S \leq 10\text{ k}\Omega$ | 86 | 96 | | 77 | 96 | | 77 | 96 | | dB dB |
| | | | | | | | | | | | |
| Transient Response Rise Time Overshoot | $T_A = 25^\circ\text{C}$, Unity Gain | | 0.25 6.0 | 0.8 20 | | 0.3 5 | | | 0.3 5 | | μs % |
| | | | | | | | | | | | |
| Bandwidth (Note 6) | $T_A = 25^\circ\text{C}$ | 0.437 | 1.5 | | | | | | | | MHz |
| Slew Rate | $T_A = 25^\circ\text{C}$, Unity Gain | 0.3 | 0.7 | | | 0.5 | | | 0.5 | | V/ μs |
| Supply Current | $T_A = 25^\circ\text{C}$ | | | | | 1.7 | 2.8 | | 1.7 | 2.8 | mA |
| Power Consumption | $T_A = 25^\circ\text{C}$ $V_S = \pm 20\text{V}$ $V_S = \pm 15\text{V}$ | | 80 | 150 | | | | | | | mW mW |
| | $V_S = \pm 20\text{V}$ $T_A = T_{AMIN}$ $T_A = T_{AMAX}$ | | | 165 135 | | | | | | | mW mW |
| | $V_S = \pm 15\text{V}$ $T_A = T_{AMIN}$ $T_A = T_{AMAX}$ | | | | | 60 45 | 100 75 | | | | mW mW |
| | | | | | | | | | | | |

Note 2: "Absolute Maximum Ratings" indicate limits beyond which damage to the device may occur. Operating Ratings indicate conditions for which the device is functional, but do not guarantee specific performance limits.

18W Hi-Fi AMPLIFIER AND 35W DRIVER

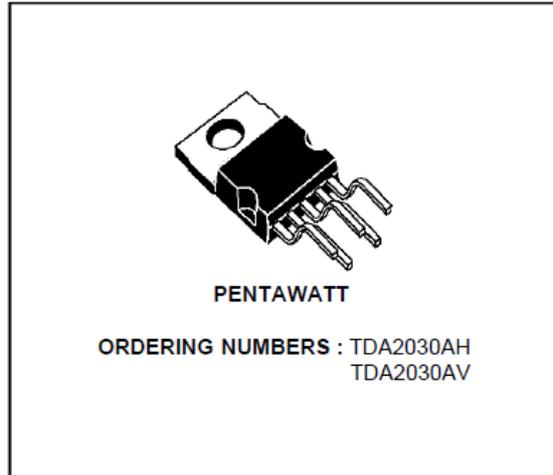
DESCRIPTION

The TDA2030A is a monolithic IC in Pentawatt® package intended for use as low frequency class AB amplifier.

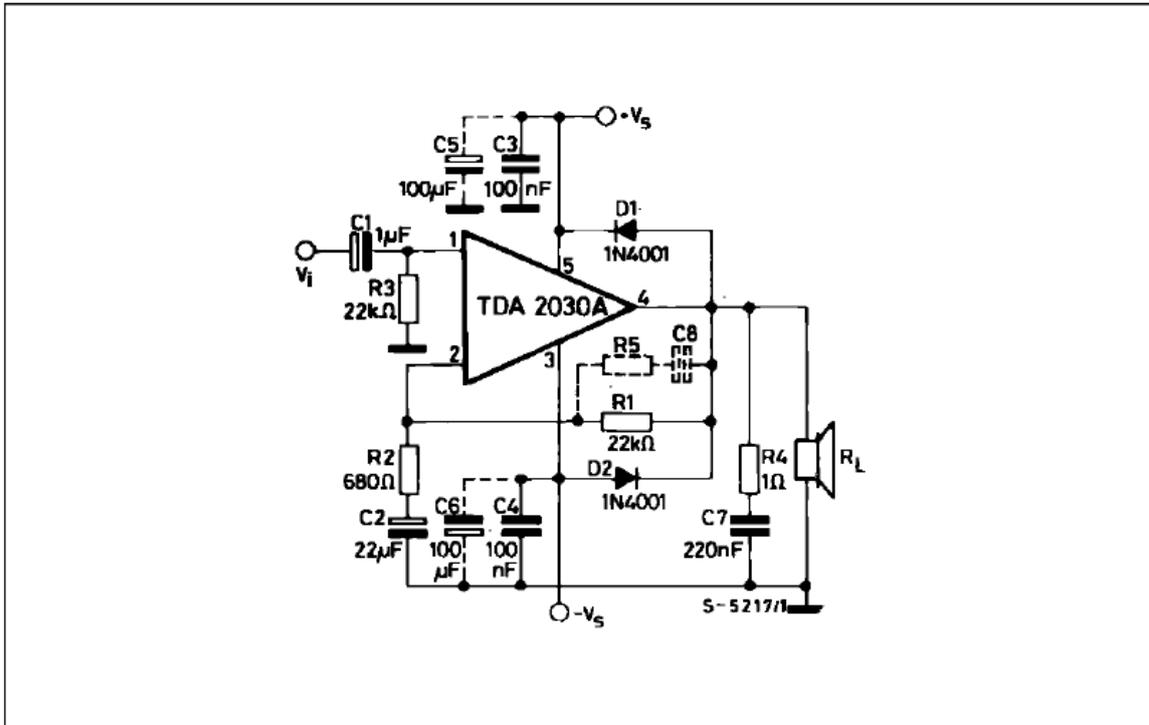
With $V_{S \text{ max}} = 44V$ it is particularly suited for more reliable applications without regulated supply and for 35W driver circuits using low-cost complementary pairs.

The TDA2030A provides high output current and has very low harmonic and cross-over distortion.

Further the device incorporates a short circuit protection system comprising an arrangement for automatically limiting the dissipated power so as to keep the working point of the output transistors within their safe operating area. A conventional thermal shut-down system is also included.

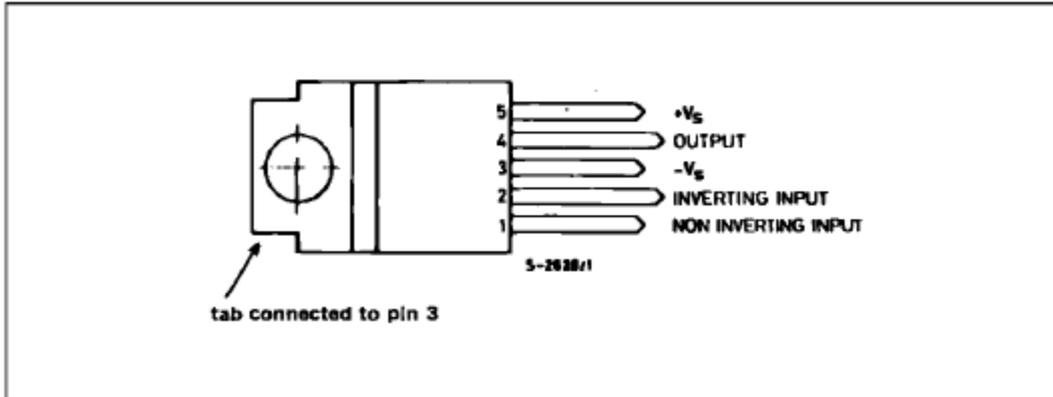


TYPICAL APPLICATION

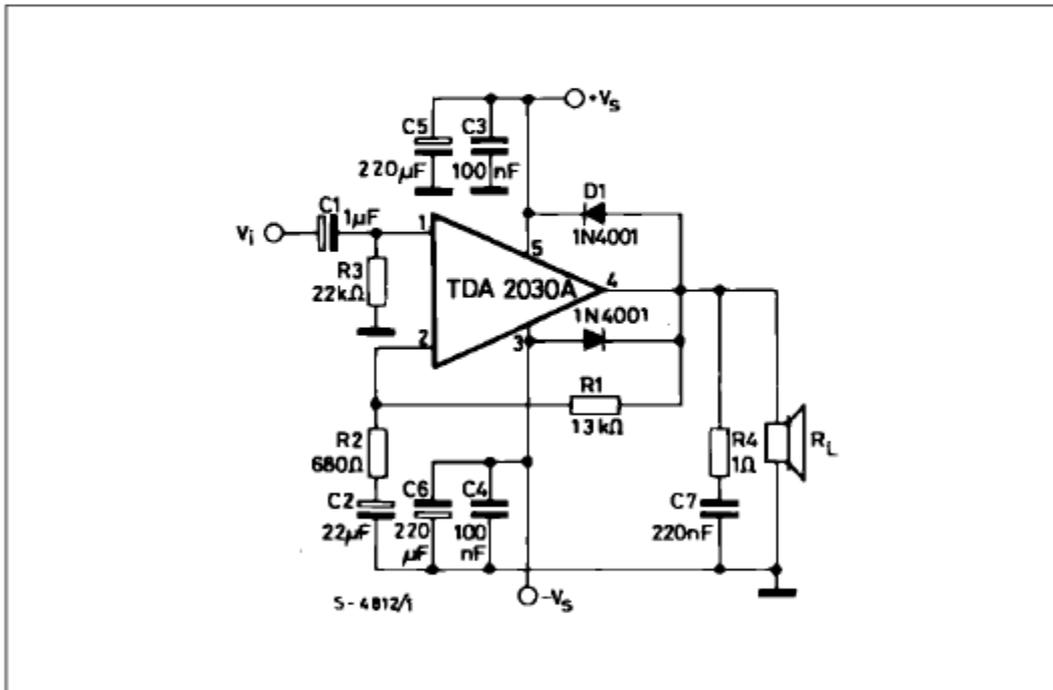


TDA2030A

PIN CONNECTION (Top view)



TEST CIRCUIT



THERMAL DATA

| Symbol | Parameter | Value | Unit |
|------------------|----------------------------------|-------|---------------|
| $R_{th(j-case)}$ | Thermal Resistance Junction-case | Max 3 | $^{\circ}C/W$ |

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

| Symbol | Parameter | Value | Unit |
|----------------|--|-----------------|------------------|
| V_s | Supply Voltage | ± 22 | V |
| V_i | Input Voltage | V_s | |
| V_d | Differential Input Voltage | ± 15 | V |
| I_o | Peak Output Current (internally limited) | 3.5 | A |
| P_{tot} | Total Power Dissipation at $T_{case} = 90^\circ\text{C}$ | 20 | W |
| T_{stg}, T_j | Storage and Junction Temperature | -40 to $+150$ | $^\circ\text{C}$ |

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

(Refer to the test circuit, $V_s = \pm 16\text{V}$, $T_{amb} = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified)

| Symbol | Parameter | Test Conditions | Min. | Typ. | Max. | Unit |
|----------|--|---|----------------|---------------------|-----------|--------------------------------|
| V_s | Supply Voltage | | ± 6 | | ± 22 | V |
| I_d | Quiescent Drain Current | | | 50 | 80 | mA |
| I_b | Input Bias Current | $V_s = \pm 22\text{V}$ | | 0.2 | 2 | μA |
| V_{os} | Input Offset Voltage | $V_s = \pm 22\text{V}$ | | ± 2 | ± 20 | mV |
| I_{os} | Input Offset Current | | | ± 20 | ± 200 | nA |
| P_o | Output Power | $d = 0.5\%$, $G_v = 26\text{dB}$ $f = 40$ to 15000Hz $R_L = 4\Omega$ $R_L = 8\Omega$ $V_s = \pm 19\text{V}$ $R_L = 8\Omega$ | 15 10 13 | 18 12 16 | | W |
| BW | Power Bandwidth | $P_o = 15\text{W}$ $R_L = 4\Omega$ | | 100 | | kHz |
| SR | Slew Rate | | | 8 | | V/ μsec |
| G_v | Open Loop Voltage Gain | $f = 1\text{kHz}$ | | 80 | | dB |
| G_v | Closed Loop Voltage Gain | $f = 1\text{kHz}$ | 25.5 | 26 | 26.5 | dB |
| d | Total Harmonic Distortion | $P_o = 0.1$ to 14W $R_L = 4\Omega$ $f = 40$ to $15\ 000\text{Hz}$ $f = 1\text{kHz}$ $P_o = 0.1$ to 9W , $f = 40$ to $15\ 000\text{Hz}$ $R_L = 8\Omega$ | | 0.08 0.03 0.5 | | % % % |
| d_2 | Second Order CCIF Intermodulation Distortion | $P_o = 4\text{W}$, $f_2 - f_1 = 1\text{kHz}$, $R_L = 4\Omega$ | | 0.03 | | % |
| d_3 | Third Order CCIF Intermodulation Distortion | $f_1 = 14\text{kHz}$, $f_2 = 15\text{kHz}$ $2f_1 - f_2 = 13\text{kHz}$ | | 0.08 | | % |
| e_N | Input Noise Voltage | B = Curve A B = 22Hz to 22kHz | | 2 3 | 10 | μV μV |
| i_N | Input Noise Current | B = Curve A B = 22Hz to 22kHz | | 50 80 | 200 | pA pA |
| S/N | Signal to Noise Ratio | $R_L = 4\Omega$, $R_o = 10\text{k}\Omega$, B = Curve A $P_o = 15\text{W}$ $P_o = 1\text{W}$ | | 106 94 | | dB dB |
| R_i | Input Resistance (pin 1) | (open loop) $f = 1\text{kHz}$ | 0.5 | 5 | | M Ω |
| SVR | Supply Voltage Rejection | $R_L = 4\Omega$, $R_o = 22\text{k}\Omega$ $G_v = 26\text{dB}$, $f = 100\text{Hz}$ | | 54 | | dB |
| T_j | Thermal Shut-down Junction Temperature | | | 145 | | $^\circ\text{C}$ |

Quad, 1MHz, Operational Amplifiers for Commercial, Industrial, and Military Applications

The CA124, CA224, CA324, LM324, and LM2902 consist of four independent, high-gain operational amplifiers on a single monolithic substrate. An on-chip capacitor in each of the amplifiers provides frequency compensation for unity gain. These devices are designed specially to operate from either single or dual supplies, and the differential voltage range is equal to the power-supply voltage. Low power drain and an input common-mode voltage range from 0V to V+ -1.5V (single-supply operation) make these devices suitable for battery operation.

Part Number Information

| PART NUMBER (BRAND) | TEMP. RANGE (°C) | PACKAGE | PKG. NO. |
|---------------------|------------------|--------------------------|----------|
| CA0124E | -55 to 125 | 14 Ld PDIP | E14.3 |
| CA0124M (124) | -55 to 125 | 14 Ld SOIC | M14.15 |
| CA0124M96 (124) | -55 to 125 | 14 Ld SOIC Tape and Reel | M14.15 |
| CA0224E | -40 to 85 | 14 Ld PDIP | E14.3 |
| CA0224M (224) | -40 to 85 | 14 Ld SOIC | M14.15 |
| CA0324E | 0 to 70 | 14 Ld PDIP | E14.3 |
| CA0324M (324) | 0 to 70 | 14 Ld SOIC | M14.15 |
| CA0324M96 (324) | 0 to 70 | 14 Ld SOIC Tape and Reel | M14.15 |
| LM324N | 0 to 70 | 14 Ld PDIP | E14.3 |
| LM2902N | -40 to 85 | 14 Ld PDIP | E14.3 |
| LM2902M (2902) | -40 to 85 | 14 Ld SOIC | M14.15 |
| LM2902M96 (2902) | -40 to 85 | 14 Ld SOIC Tape and Reel | M14.15 |

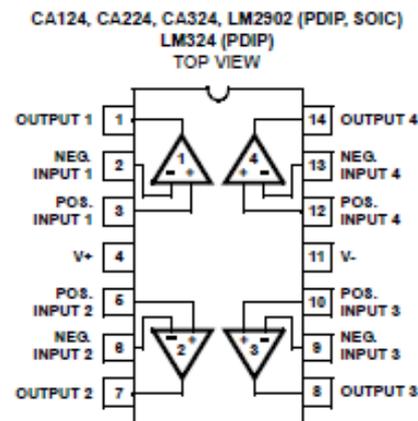
Features

- Operation from Single or Dual Supplies
- Unity-Gain Bandwidth 1MHz (Typ)
- DC Voltage Gain 100dB (Typ)
- Input Bias Current 45nA (Typ)
- Input Offset Voltage 2mV (Typ)
- Input Offset Current
 - CA224, CA324, LM324, LM2902 5nA (Typ)
 - CA124 3nA (Typ)
- Replacement for Industry Types 124, 224, 324

Applications

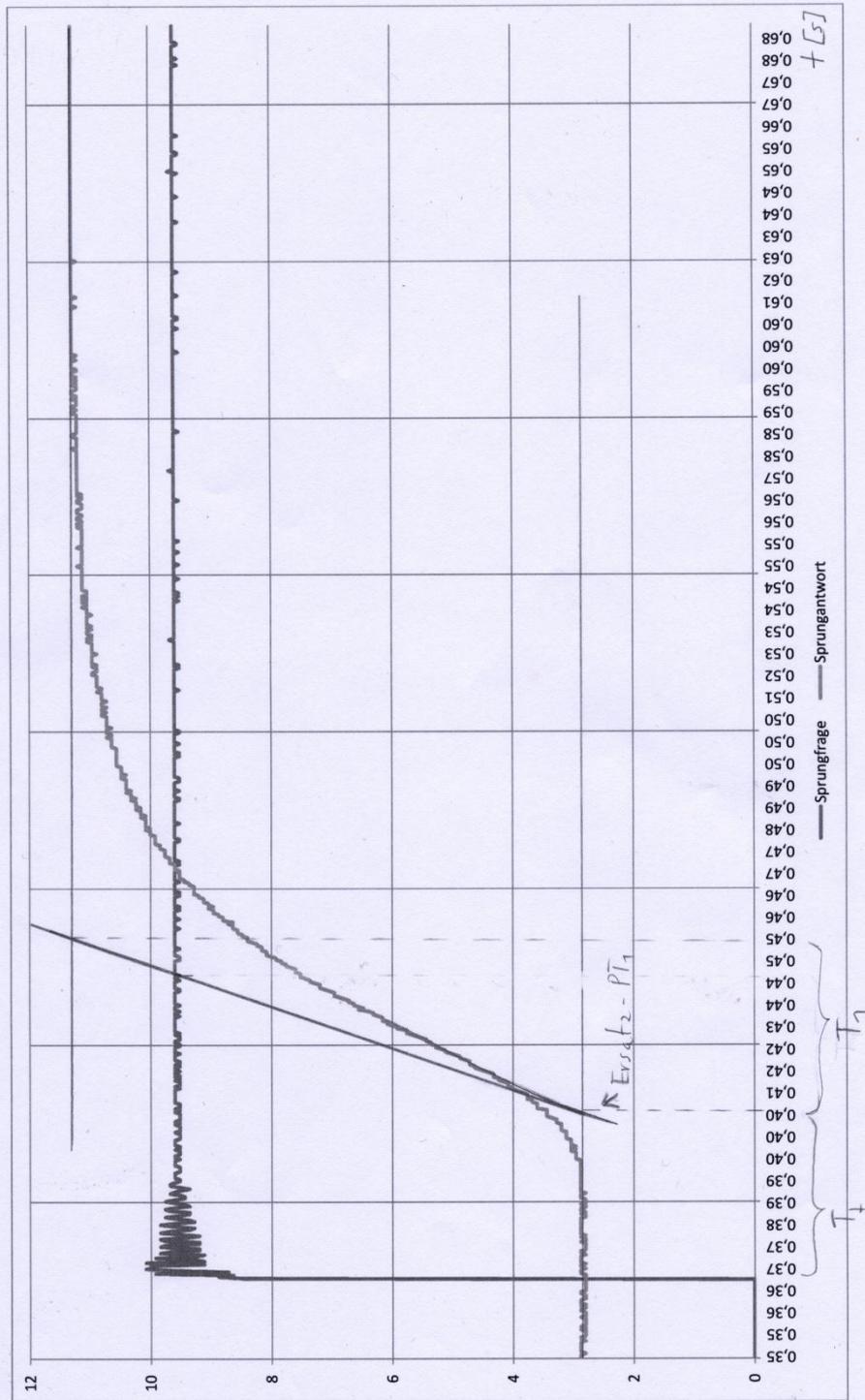
- Summing Amplifiers
- Multivibrators
- Oscillators
- Transducer Amplifiers
- DC Gain Blocks

Pinout



"Ersatz-PT" Lichtrelektreche

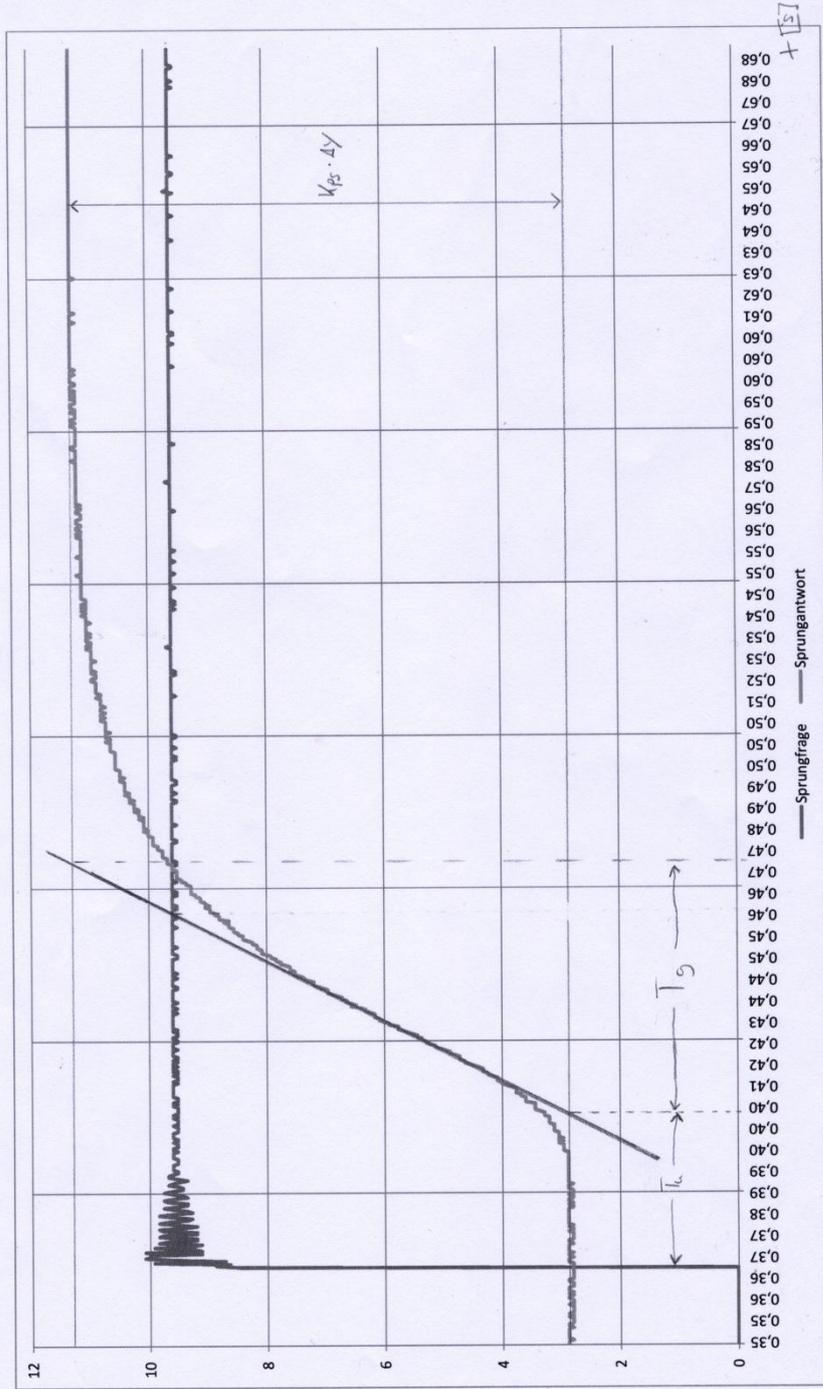
$U [V]$



$$T_1 = 0,03s \quad T_2 = 0,05s$$

~~U[V]~~ Sprungantwort Lichtregelstrecke

U[V]



$$T_a = 0,03 \text{ s}$$

$$T_g = 0,07 \text{ s}$$

$$\Delta = \frac{T_g}{T_s} = \frac{0,03}{0,07} = 0,43 \rightarrow \text{schlecht regelbar}$$

$$k_{PS} = \frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{8V}{9,5V} = 0,84$$