

Zielsetzung des Versuchs

In der Versuchsreihe werden verschiedene Regelschaltungen experimentell auf ihre Effizienz und Präzision überprüft. Explizit wird untersucht, wie sie in der Lage sind, ein zu regelndes System aus einem Kühlkörper, Lüfter und Heißleiter in seiner Temperatur stabil zu regulieren, während ein Heizwiderstand dem System kontinuierlich Wärme zuführt.

Geräte

- Netzgerät der Firma Hameg (2 Variable Gleichspannungsausgänge bis 20V, 1 konstanter 5V Gleichspannungsausgang, 1 Funktionsgenerator)
- Oszilloskop von Tektronix mit zwei Kanälen
- Diverse Widerstände, Kondensatoren, Operationsverstärker und Diode(n) (siehe Schaltpläne)
- Optional: Rastersteckplatten von Leybold mit Zubehör
- Digitalmulti- und Digitalthermometer
- Kühlkörper mit integriertem Heizwiderstand, NTC, Lüfter und Bohrung für ein Thermometer:

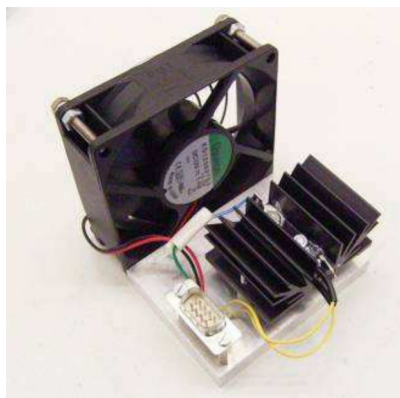


Abbildung 1: zu regelndes System

- Ein Adapterkabel, welches dem Anschluss auf dem zu regelnden System folgende Stecker zuordnet:
 - Einen roten(+) und einen schwarzen(-) Stecker für die Lüfterspannung
 - Zwei grüne Stecker für den NTC-Sensor
 - Zwei gelbe Stecker für den Heizwiderstand

Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeine Theorie einer Regelschaltung	4
2	Vermessung des NTC-Sensors	4
2.1	Resultat	5
3	Zweiwegeregler	5
3.1	Aufbau	6
3.2	Resultat	7
4	Zweiwegeregler mit Hysterese	8
4.1	Aufbau	8
4.2	Resultat	9
5	Der Proportionalregler	11
5.1	Aufbau	11
5.2	Resultat	12
6	Der Proportionalregler mit Integrator	14
6.1	Aufbau	14
6.2	Resultat	15
7	Zusammenfassung	16
8	Anhang	17

1 Allgemeine Theorie einer Regelschaltung

Die in diesem Versuch behandelten Schaltungen sind allesamt Umsetzungen der abstrakten Idee eines Reglers. Im Allgemeinen ist es das Ziel eines Reglers eine gewisse Größe zu regulieren. Er erreicht dieses Ziel, indem er die Differenz zwischen dem Soll-Wert (auch Führungsgröße) W des zu regelnden Systems und dem Ist-Wert X (auch Regelgröße) bildet. Basierend auf diesem Wert x , welcher als Regelabweichung bezeichnet wird, produziert die Regeleinrichtung eine Stellgröße Y , die auf eine Regelstrecke gegeben wird. Das Ziel dabei ist es, den Ist-Wert dem Soll-Wert anzupassen, wobei jeweils eine Störgröße S beachtet werden muss. Zuletzt wird der neue Ist-Wert erneut verglichen, womit der Prozess von vorne beginnt.

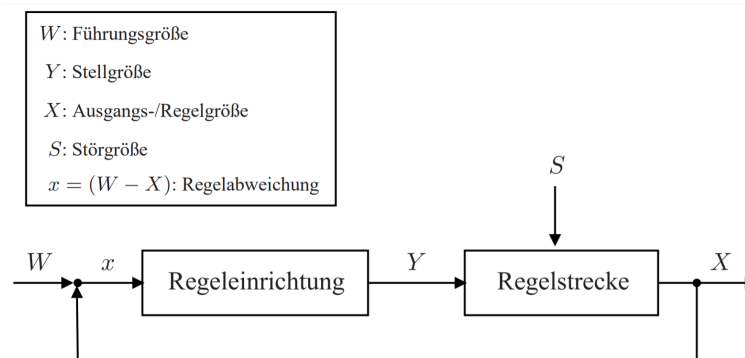


Abbildung 2: Aufbau des beschriebenen Regler ;Quelle [1]

2 Vermessung des NTC-Sensors

Um in den folgenden Messungen die Temperatur akkurat einer Spannung zuordnen zu können, wird ein NTC, auch Heißleiter genannt, vermessen. Über die Formel

$$R_T = R_N \cdot e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{25}}\right)}$$

lassen sich, mit den gegebenen charakteristischen Werten (siehe Tabelle 1), die theoretischen Widerstandswerte für eine gegebene Temperatur, in Kelvin, näherungsweise ermitteln.

Der NTC ist zusammen mit einem Heizwiderstand in einem gemeinsamen Bauteil verbaut (siehe Abbildung 1 in der Geräteliste). Durch Anlegen einer Heizspannung an die gelben Stecker und durch einfügen eines genormten Thermometer kann eine Temperaturkurve aufgenommen werden.

2.1 Resultat

Im folgenden Graphen sind die vermessenen und berechneten Widerstandswerte, für einen Temperaturbereich von 20 °C Raumtemperatur bis hin zu der maximal verwendeten Temperatur von 70 °C, aufgetragen.

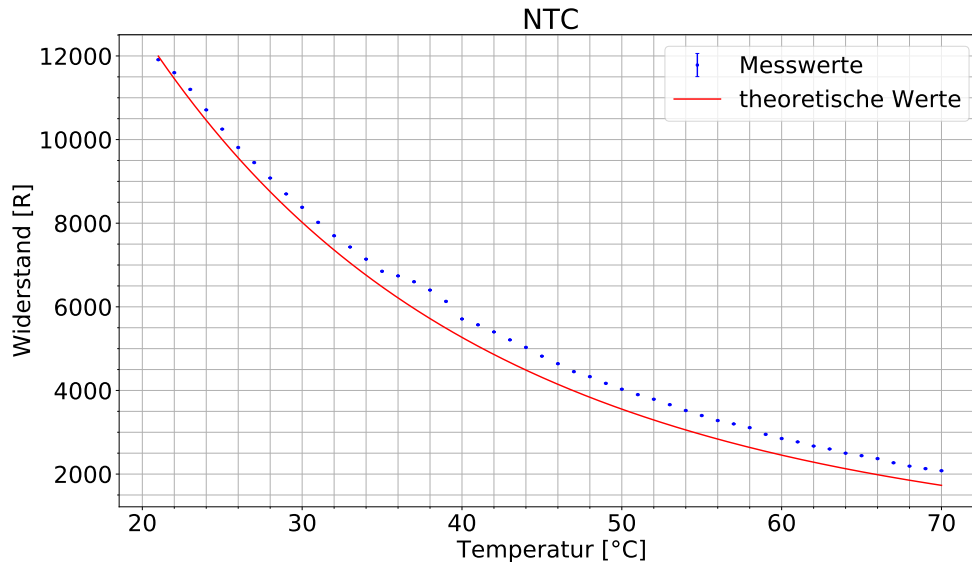


Abbildung 3: gemessene und berechnete Widerstandswerte des NTC

Wie zu erkennen ist folgen die gemessenen Widerstände eindeutig einem exponentiellen Abfall mit ansteigender Temperatur, wobei die Abweichung zu den theoretischen Werten nur minimal ist.

Für den fortlaufenden Versuch werden somit die gemessenen Widerstandswerte verwendet als Referenzwerte für eine gegebene Temperatur.

3 Zweiwegeregler

Mit dem gewonnen wissen über den NTC kann nun ein System, bezüglich seiner Temperatur, geregelt werden. In diesem und folgenden Versuchsteilen wird dies das System aus Kühlkörper, Heizwiderstand und Lüfter sein, welches bei der Vermessung des Heißeiters bereits verwendet wurde. Der Regler ist ein einfacher Zweiwegeregler, welcher lediglich AN oder AUS auf die Regelstrecke, beziehungsweise den Lüfter, legen kann. Er reagiert zudem instantan auf die Abweichung vom Sollwert, was im Aufbau deutlich wird und sich im Resultat widerspiegelt.

3.1 Aufbau

Das zentrale Bauteil im Zweiwegregler stellt dabei ein Operationsverstärker da. Dieser erhält über seinen nicht negierten Eingang eine konstante Spannung als Soll-Wert und über den negierten Eingang eine Spannung als Ist-Wert. Die beiden Spannungen werden dabei über zwei Spannungsteiler mit der selben Ausgangsspannung erzeugt, welche die Spannung im ersten Fall über ein Potentiometer und im zweiten Fall über einen Kaltleiter teilen. Das Potentiometer dient dabei zur Einstellung des Soll-Werts. Das Ausgangssignal des Operationsverstärkers ist zur Basis eines Transistors angeschlossen, welcher einen Lüfter mit Strom versorgt. Im Falle von zu hohen Temperaturen fällt so die Spannung, aufgrund des Spannungsteiler mit dem NTC ($U_- = 15\text{ V} \cdot R_{NTC} / (R_{NTC} + 10\text{ k}\Omega)$), am negierten Eingang des Operationsverstärker ab. Der Op-Amp verstärkt nun das Signal des Sollwerts maximal bis zur Betriebsspannung, der Transistor erhält einen Basis-Emitterstrom und wird geöffnet, der Lüfter beginnt zu laufen und kühlt den Kühlkörper und so auch den Kaltleiter wieder herunter. Dabei wird der Operationsverstärker mit +15 V und -5 V betrieben da für den Fall einer zu hohen Temperatur also eines positiven Ausgangssignal eine relativ hohe Spannung zum betrieb des Lüfters wünschenswert ist. Die negative Verstärkung auf -5 V werden dabei erst bei Verwendung einer Hysterese im nächsten Versuchsteil interessant. Für nun führen sie lediglich zur Sperrung der Basis-Emitter-Diode und verhindert einen Stromfluss, wenn die Spannung am negierten Eingang, durch abkühlen, über die Sollspannung wächst.

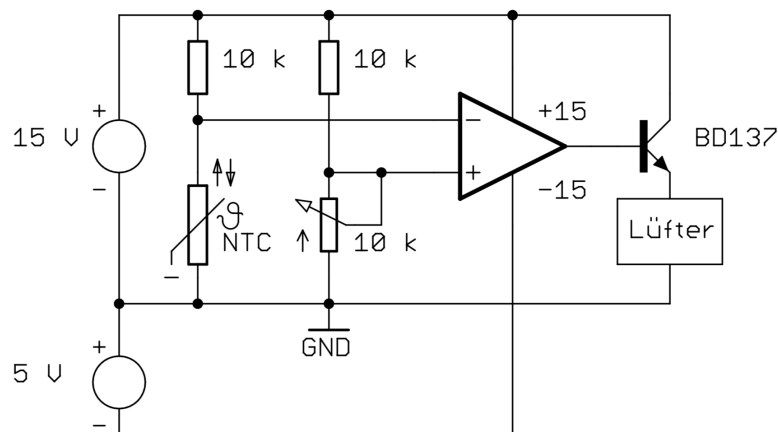


Abbildung 4: Schaltung des Zweiwegreglers ;Quelle [1]

Um eine Solltemperatur von 50°C zu erreichen, muss somit die Sollspannung am Op-Amp die selbe betragen, wie der Spannungsteiler mit dem NTC liefert. Nach der aufgenommenen Kennlinie des Heißeiter besitzt dieser bei 50°C einen Widerstandswert von 4030Ω . Die resultierende, einzustellende, Spannung beträgt somit nach der Formel Unterabschnitt 3.1 $4,31\text{ V}$. Wie sich zeigen wird liegt die resultierende Solltemperatur lediglich in einem Bereich um 50°C , wobei sie zudem auch nicht relevant ist für das zu untersuchende grundlegende Verhalten eines Reglers.

In dieser so wie auch in den folgenden Schaltungen wird sowohl eine Leuchtdiode zur Beobachtung der Lüfteraktivität als auch ein Oszilloskop angeschlossen mit welchem sich die Eingangsdifferenz und der Ausgang beobachten lässt. Da zur Messung der Eingangsdifferenz jedoch die Sollspannung als Ground gewählt wird, kann nicht gleichzeitig die Ausgangsspannung gemessen werden. Zusätzlich müssen noch Vorwiderstände und Kondensatoren in die Schaltung zu Messung der Eingangsdifferenz eingebaut werden. Der genaue Aufbau wird im folgenden Schaltplan dargestellt

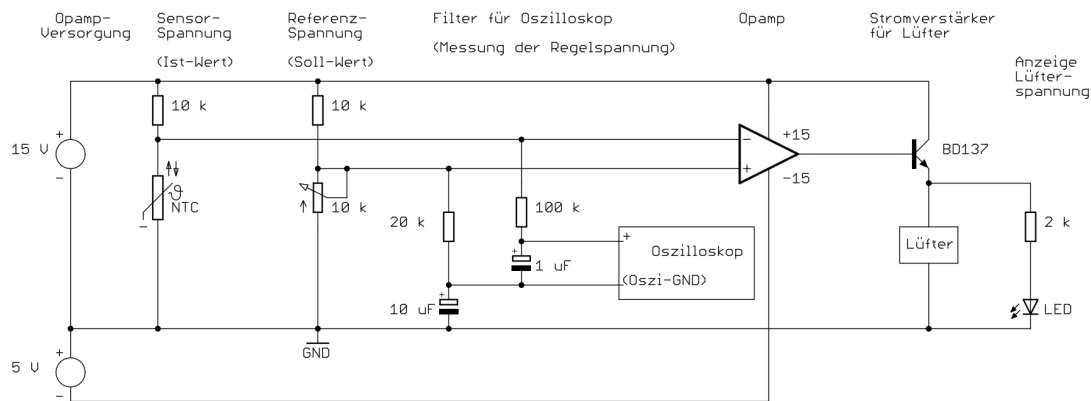


Abbildung 5: Schaltplan zur Messung der Eingangsdifferenz ;Quelle [1]

3.2 Resultat

Um das Regelverhalten zu begutachten ist im folgenden Graphen die Zeit-Temperatur-Kurve dargestellt als auch ein Ausschnitt dieser, für die Zeit nach der Ausregelzeit.

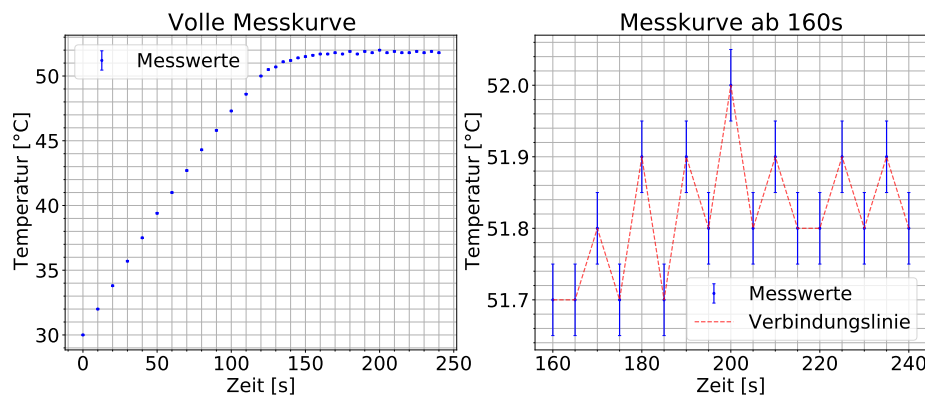
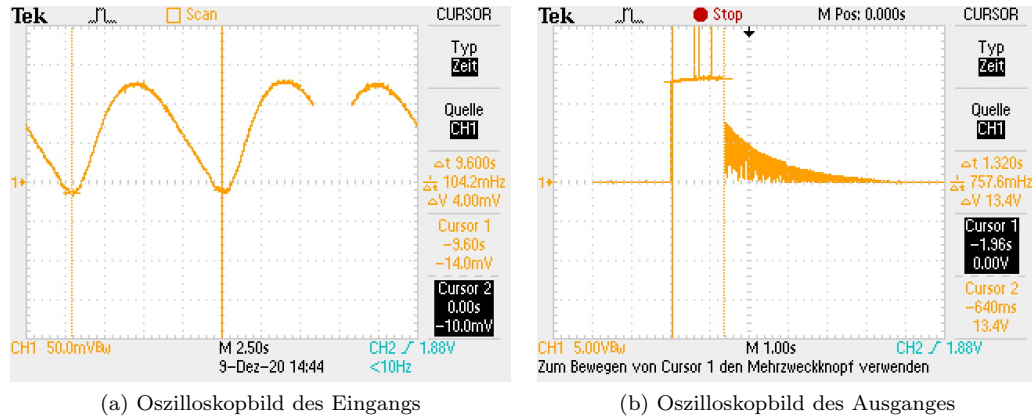


Abbildung 6: Zeit-Temperatur-Kurve des einfachen Zweiwegereger

Es zeigt sich im linken Plot, dass das System sich zu beginn linear erwärmt bis es in etwa 52°C erreicht, wo es beginnt eine konstante Temperatur anzunehmen. Bei genauerer Betrachtung des zuletzt erwähnten Falles, wird ein rapides Schwingen um 51.85°C deutlich. Die Periode jedoch, aufgrund der zu geringen Abtastrate, nicht durch den Graphen bestimmt werden.

Durch Hinzuziehen der folgenden Oszilloskopbilder, der Eingangs- und Ausgangsspannung, lassen sich sowohl die Periode der Temperaturschwankung, bzw. des Lüfter, als auch seine Aktivierungszeit messen.



Die Periode der Lüfteraktivierung ergibt sich aus der zeitlichen Differenzen zwischen den Minima des Eingangssignales. Dies ist ein Resultat der Tatsache, dass dies die Momente sind, zu welchem die Differenz, näherungsweise, am Op-Amp zu einer Aktivierung des Lüfters führt. Aus dem Oszilloskopbild lässt sich somit eine Periode von 9.6 s ablesen welche sich mit der Regelkurve deckt. Die Länge der Lüfteraktivierung beträgt, basierend auf dem Ausgangsbild, 1.32 s wobei die langsame Entladung über die LED zusätzlich sichtbar wird.

Die Schaltung hält den Temperaturwert somit höchst präzise, schaltet jedoch den Lüfters ebenfalls circa alle 10 Sekunden für eine Sekunde an, welches unweigerlich zu einem hohen Materialverschleiß führt.

4 Zweiwegeregler mit Hysterese

Je nachdem welches Bauteil durch die Regelung gesteuert wird, wie in diesem Fall der Lüfter, kann es wünschenswert sein den zuvor beschriebenen Materialverschleiß zu minimieren, beziehungsweise ihn nicht im schnellen Wechsel von an und aus zu betreiben um das Bauteil nicht zu beschädigen. Daher bietet es sich an, eine sogenannte Hysterese zu verwenden, welche die Aktivierung und Deaktivierung des Lüfters verzögert.

4.1 Aufbau

Diese Verzögerung wird erreicht durch eine Rückkopplung des Ausgangssignals auf den nicht negierten Eingang. Steigt nun die Temperatur nun über den Sollwert so fällt wie in 3.1 die Spannung am negierten Eingang ab und der Operationsverstärker verstärkt das Signal des Sollwerts maximal so, dass der Lüfter aktiviert wird. Der wesentliche Unterschied zu 3.1 liegt dabei darin, dass durch die Rückkopplung ein Teil der Ausgangsspannung zum nicht negierten Eingang zurückgeführt wird, was den Sollwert anhebt und somit den Lüfter in Betrieb lässt bis die Spannung am negierten Eingang bis über diesen neuen Sollwert gestiegen bzw. die Temperatur unter diesen neuen Sollwert gesunken ist.

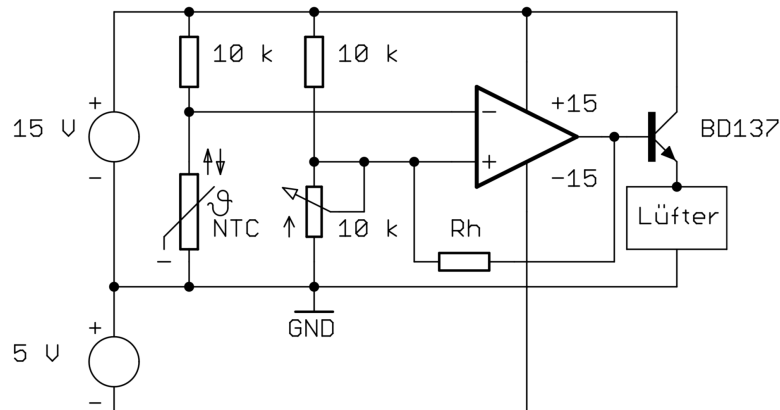


Abbildung 7: Schaltung des Zweiwegereglers mit Hysteresis ;Quelle [1]

4.2 Resultat

Das Verhalten des Zweiwegereglers mit Hysterese ist für zwei unterschiedliche Rückkopplungswiderstände vermessen. Es werden nun lediglich die Zeiten beobachtet, nach der Ausregelzeit, da die anfängliche Regelkurve unabhängig vom Einbau der Hysterese ist.

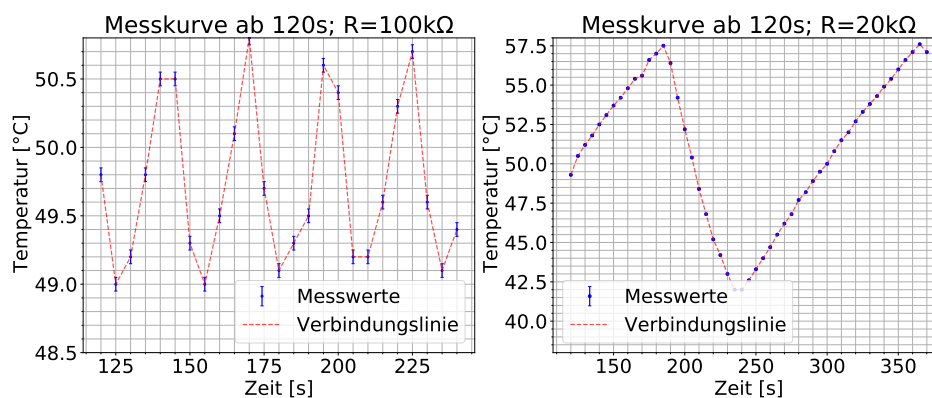
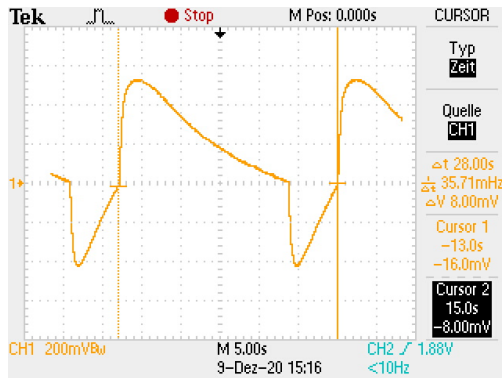


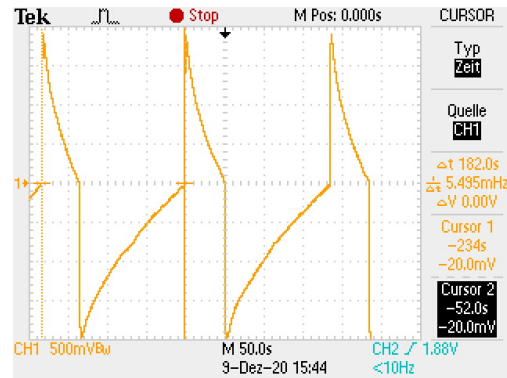
Abbildung 8: Ende der Zeit-Temperatur-Kurven der Zweiwegeregler mit Hysterese (Im Anhang befinden sich die vollen Kurven: Abbildung 17)

Die Regelkurven zeigen eine größere Differenz zwischen dem Temperatur Minimum und Maximum sowie eine größerer Periode des Lüfters, als die Regelschaltung ohne Hysterese. Zudem wird deutlich, dass bei Verringerung des Widerstandes, die zuvor erwähnten Werte zunehmen. Dies ist konsistent mit der Vorstellung, dass beim einfachen Zweiwegeregler zwischen dem Aus- und Eingang ein unendlich großer Widerstand lag.

Aus den Oszilloskop Bildern der Spannungsdifferenz vor dem Op-Amp lassen sich erneut quantitative Aussagen über die Periode treffen lassen. Anzumerken ist, dass für das Bild bzgl. 20 k Ω die Polarität vertauscht ist.



(a) Oszilloskopbild des Eingangs bei 100 k Ω

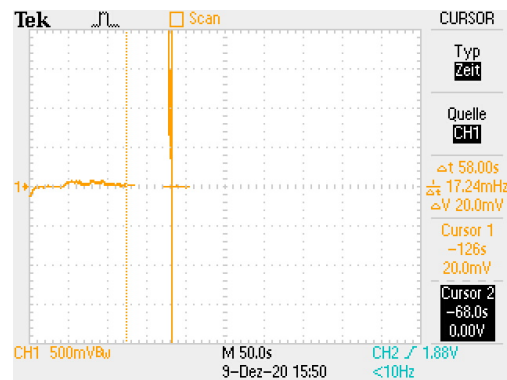


(b) Oszilloskopbild des Eingangs bei 20 k Ω (vertauschte Polarität)

Die Periode bei Verwendung eines 100 k Ω Widerstand beträgt 28 s und die Periode für den 20 k Ω Widerstand 182. Aus den Oszilloskopbildern des Ausgangs lässt sich zudem erkennen, dass die Zeiten der Lüfteraktivierung, wie erwartet, sich ebenfalls erhöht haben.



(c) Oszilloskopbild des Ausgangs bei 100 k Ω



(d) Oszilloskopbild des Ausgangs bei 20 k Ω (vertauschte Polarität)

Die Aktivierungszeiten betragen 6.4 s und 58 s für den 100 k Ω und 20 k Ω Rückkopplungswiderstand.

Es zeigt sich somit, dass bei Verwendung eines Zweiwegereglers steht ein Abwägung zwischen dem Toleranzbereich der Temperatur und dem Materialverschleiß des Lüfter getroffen werden muss.

5 Der Proportionalregler

Um die Effizienz der Regelung zu steigern kann man auch mit relativ einfachen mitteln den Zweiwegeregler zu einem Proportionalregler umwandeln. Statt an oder aus ist es der Schaltung nun möglich die Lüfterdrehzahl proportional zur positiven Termperaturabweichung zu regeln. Dadurch kann die Temperatur deutlich präziser bei kleinen Abweichungen geregelt werden.

5.1 Aufbau

Im Vergleich zu 3.1 muss lediglich ein Rückkopplungswiderstand vom Ausgang zum negierten Eingang des Operationsverstärkers, sowie ein Vorwiderstand vor dieser Rückkopplung ergänzt werden. Praktisch funktioniert der Proportionalregler also wie ein Spannungsverstärker, welcher unter richtig gewähltem Vorwiderstand das Regelsignal abhängig von der positiven Abweichung proportional verstärkt und nicht bloß eine Rechteckkurve von Maxima zu Maxima ausgibt.

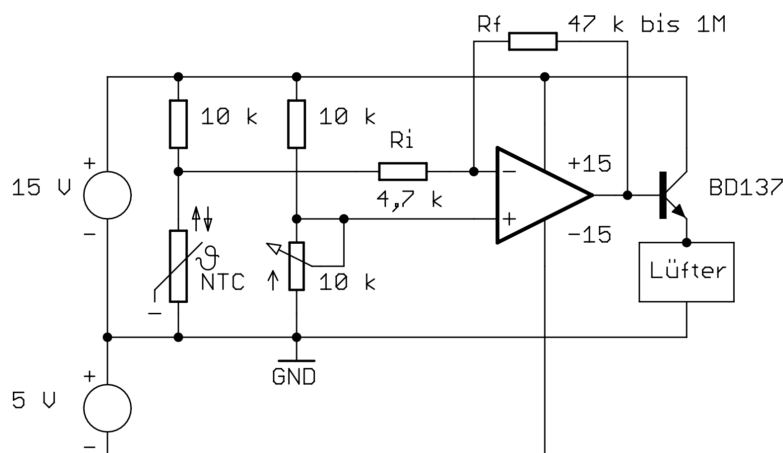


Abbildung 9: Schaltung des P-Reglers ;Quelle [1]

Um abzuschätzen inwiefern eine Temperaturänderung von 1°C zu einer Spannungsänderung am Lüfter führt, muss sowohl die Spannungsdifferenz am Eingang des Op-Amp berechnet werden, als auch die Verstärkung dieser. Letztere ergibt sich aus der Widerstandswahl von R_f und R_i und beträgt R_f/R_i . Um die Spannungsänderung am Eingang zu bestimmen, kann näherungsweise die Ableitung der Spannungsteiler Formel getätigt werden. Es folgt die Formel:

$$dU = \frac{dNTC/dT \cdot (10k\Omega + NTC) - dNTC/dT \cdot NTC}{(10k\Omega + NTC)^2} \cdot 15V \cdot dT$$

Bei Wahl des Arbeitspunktes von 50°C und einer Widerstandsänderung basierend auf der 4% Regel für Heißleiter, kann die Spannungsänderung am Eingang als 0.122 Volt pro Grad Celsius approximiert werden. Der endgültige Verstärkungsfaktor beträgt somit $0.122 \cdot R_f/R_i$ Volt pro Grad Celsius. Für eine Wahl der Widerstandswerte von jeweils $1\text{M}\Omega$ und $4.7\text{k}\Omega$ beträgt dieser Verstärkungsfaktor beispielsweise etwa $26\text{V}^\circ\text{C}^{-1}$

5.2 Resultat

Die folgende Regel kurve zeigt wie der P-Regler schnell die Temperatur herunter regelt und sie dann jedoch innerhalb weniger Zehntel eines Grad Celsius konstant hält. R_f beträgt dabei $1\text{ M}\Omega$.

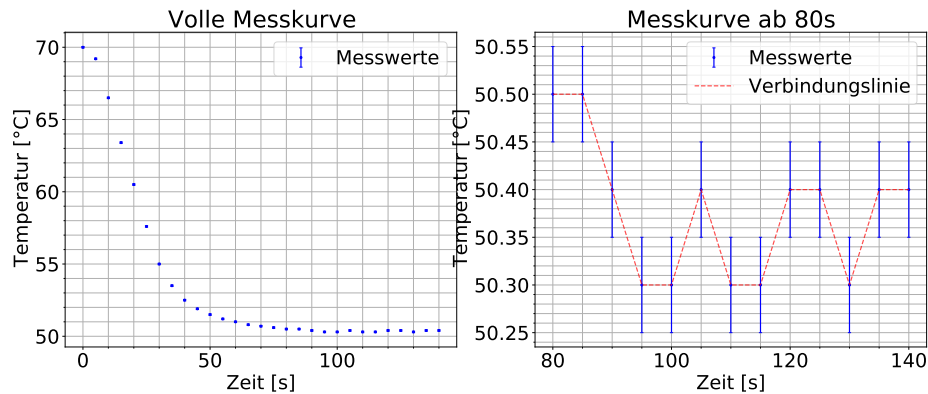


Abbildung 10: Regelkurve des P-Regler $R_i = 4.7\text{ k}\Omega$ $R_f = 1\text{ M}\Omega$

Die Ausgangsspannung des P-Regler zeigt, dass dieser, im Gegensatz zu dem Zweiwegeregler, kontinuierlich seine Ausgangsspannung ändert:

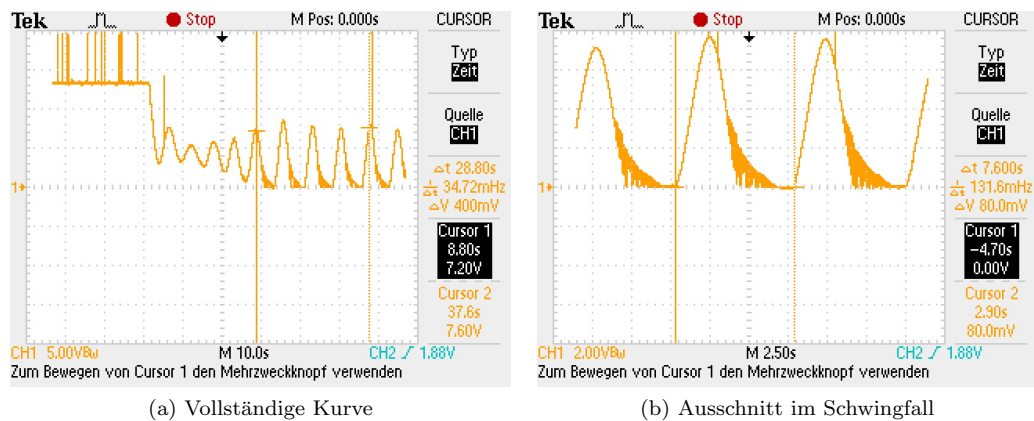


Abbildung 11: Verlauf der Ausgangsspannung bei zu voriger Erwärmung über die Solltemperatur ($R_f=1\text{ M}\Omega$)

Zudem reagiert der P-Regler dynamisch auf Änderungen von äußeren Bedingungen. Dies ist im folgenden Oszilloskopbild zu erkennen, bei welchem die Heizspannung von 20 V auf 10 V abgesenkt worden ist.

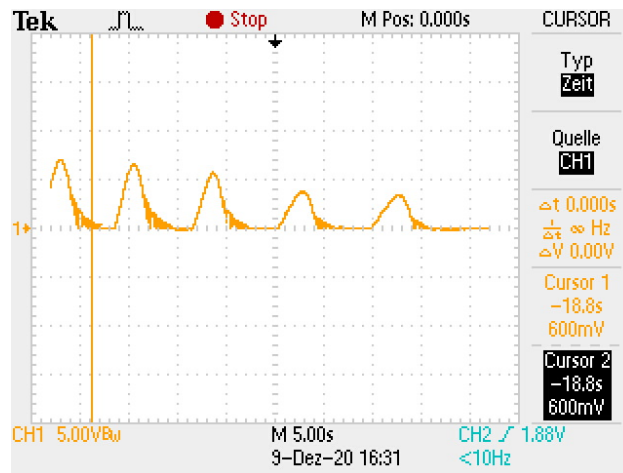


Abbildung 12: Ausgangsspannung bei Absenkung der Heizspannung; Zeitpunkt markiert durch Cursorposition

Es ist jedoch erkennbar, dass der Lüfter zu stark ausschlägt und somit periodisch deaktiviert wird. Um dies zu umgehen kann ein geringer Verstärkungsfaktor am Op-Amp gewählt werden durch Absenkung von R_f auf 470 K Ω . Der vollständige Verstärkungsfaktor beträgt nun in etwa 12 V °C⁻¹ und folgendes Ausgangssignal liegt nun am Lüfter an.

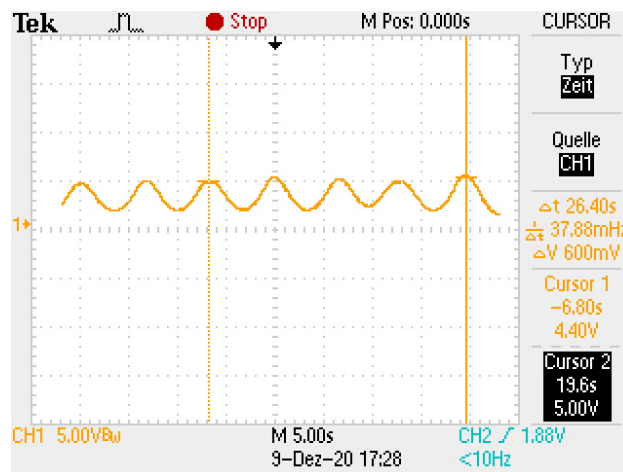


Abbildung 13: Ausschnitt im Schwingfall mit $R_f=470$ k Ω

Wie zu erkennen ist ändert der Lüfter zwar seine Drehzahl kontinuierlich, muss jedoch nicht periodisch Starten. Der P-Regler kann somit, bei richtiger Wahl von Verstärkungsfaktoren, den Lüfter kontinuierlich betreiben und den Materialverschleiß minimieren.

6 Der Proportionalregler mit Integrator

Um bei sehr kleinen Abweichungen trotzdem noch eine regelnde Wirkung zu erhalten lässt sich die Schaltung des Proportionalreglers mit einem Integrator ergänzen. Letzterer gibt eine Stellgröße aus, deren Änderungsgeschwindigkeit proportional zur Abweichung vom Sollwert ist. Bei kleinen Abweichungen geht die Stellgröße des Proportionalreglers nahe null wohingegen der Integrierer im Idealfall so lange weiter eine Stellgröße liefert bis die Abweichung vom Sollwert null ist.

6.1 Aufbau

Der Aufbau ist dabei sehr ähnlich zu 5.1 mit dem einzigen Unterschied, dass zu dem Rückkopplungswiderstand, in Reihe, noch ein Kondensator geschaltet wird. So erfüllt die bereits bestehende Schaltung des Proportionalreglers zusätzlich die eines Integrators und hat den selben Effekt als würde man die einzelnen Schaltungen über einen Addierer kombinieren.

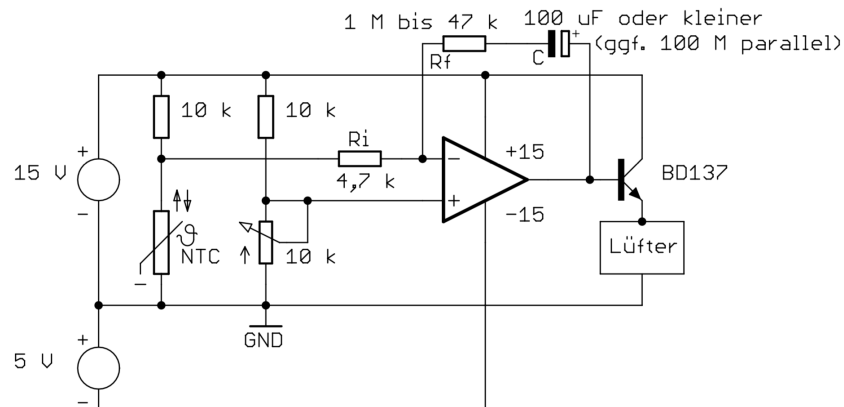


Abbildung 14: Schaltung des PI-Reglers ;Quelle [1]

Zusätzlich kann noch ein $100\text{ M}\Omega$ Widerstand parallel zu dem Kondensator geschaltet werden, um ein "weglaufen des der Integratorausgangs" zu verhindern. Dieser Widerstand wurde in allen folgenden Versuchen hinzugefügt

6.2 Resultat

Die Regelkurve des PI-Reglers unterscheidet sich nur marginal von der des P-Reglers, wobei die Regelkurve sowohl für eine Kapazität von $10\mu\text{F}$ und $100\mu\text{F}$ aufgenommen ist.

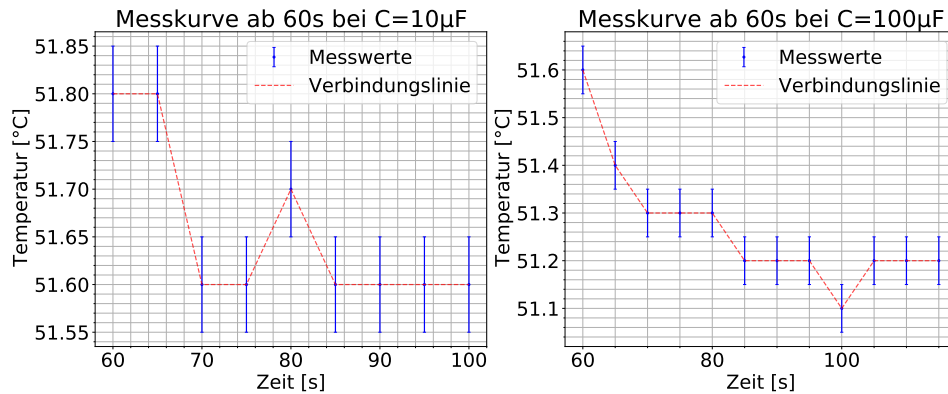


Abbildung 15: Ende der Zeit-Temperatur-Kurven der PI-Regler (Im Anhang befinden sich die vollen Kurven: Abbildung 18)

Der PI-Regler erreicht eine Regelung auf ein Zehntel eines Grades welche vergleichbar mit der Regelung des P-Reglers ist.

Ebenso reagiert der PI-Regler schnell auf Änderungen äußerer Einflüsse, wie beispielsweise eine Verringerung der Heizspannung von 20 V auf 10 V:

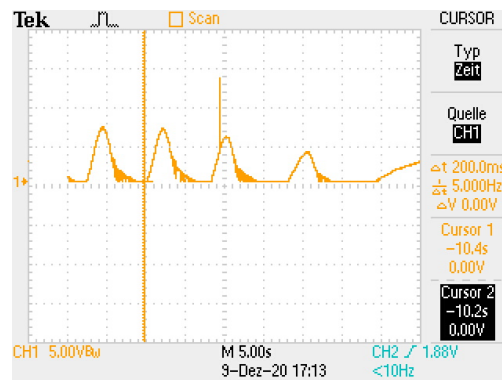


Abbildung 16: Ausgangsspannung bei Absenkung der Heizspannung; Zeitpunkt markiert durch Cursorposition; $4.7\text{ k}\Omega$ $1\text{ M}\Omega$ $10\mu\text{F}$

Die Ausgangsspannung wurde zudem für Vier verschiedene Kombination von R_f und C beobachtet. Die Oszilloskopbilder sind im Anhang unter der Abbildung 19 vorzufinden. Die beste Kombination unter ihnen ist $R_I = 4.7\text{ k}\Omega$ $R_f = 47\text{ k}\Omega$ $C = 100\mu\text{F}$, da bei dieser, die Lüfterdrehzahl am geringsten schwankt.

7 Zusammenfassung

Um eine Eingangsgröße auf einen gewünschten Wert zu regeln lässt sich mithilfe des Konzepts eines Reglers eine relativ einfache Schaltung konstruieren, welche versucht einen gemessenen Istwert einem vorgegebenen Sollwert über eine Regeleinrichtung anzupassen. Die einfachste Ausführung dieses Systems liefert dabei ein sogenannter Zweiwegeregler welcher, wie der Name schon andeutet, abhängig vom Eingangssignal die Regeleinrichtung entweder aktivieren oder deaktivieren kann. Da jedoch dieser Regler, beim Versuch den Istwert möglichst nah beim Sollwert zu halten, eine hohe Schaltfrequenz besitzt, kann es zu hohen Materialverschleiß in der Regeleinrichtung führen.

Dies lässt sich über die Verwendung einer Hysterese vermeiden, welche es ermöglicht einen Toleranzbereich zu wählen. Daraus resultiert eine Verringerung der Schaltfrequenz und somit eine Erhöhung der Lebensdauer der Regeleinrichtung.

Für präzisere Ergebnisse lässt sich aus der Schaltung des Zweiwegereglers ein Proportionalregler bauen welcher eine Stellgröße proportional zu der Eingangsdifferenz ausgibt. Dies sorgt, bei einer entsprechenden Wahl der Verstärkung, für einen durchgehenden Lüfterbetrieb mit Variation in der Drehzahl.

Dies sorgt für deutlich besser dosierte Stellgrößen passend zum Istwert, hat jedoch auch den Nachteil, dass bei besonders geringen Abweichungen nur noch ein vernachlässigbarer Regeleffekt vorhanden ist. Um dieses Problem zu lösen lässt sich auf Basis der bereits bestehenden Schaltung des Proportionalreglers ein Integrator ergänzen, dessen Änderungsgeschwindigkeit der Stellgröße abhängig von der Abweichung zum Sollwert ist. Dadurch findet auch bei kleinen Abweichungen immer noch eine Regelung statt. Die Schaltung insgesamt arbeitet sowohl für große als auch für kleine Abweichungen präzise.

Literatur

- [1] Skript zum Versuch EP7. http://www.atlas.uni-wuppertal.de/~kind/ep7_19.pdf

8 Anhang

Tabelle 1: charakteristische NTC Werte

Formelzeichen	R_{25}	B	T_{25}
Wert	10000 Ω	3988 K	298,15 K

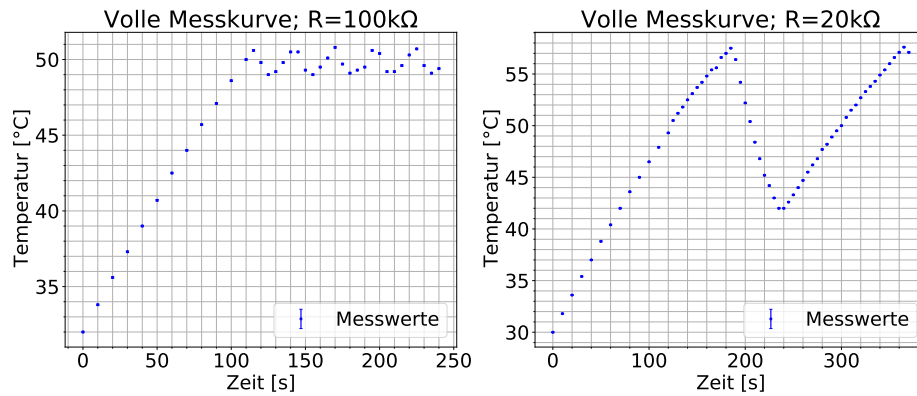


Abbildung 17: Vollständige Zeit-Temperatur-Kurven der Zweiwegeregler mit Hysterese

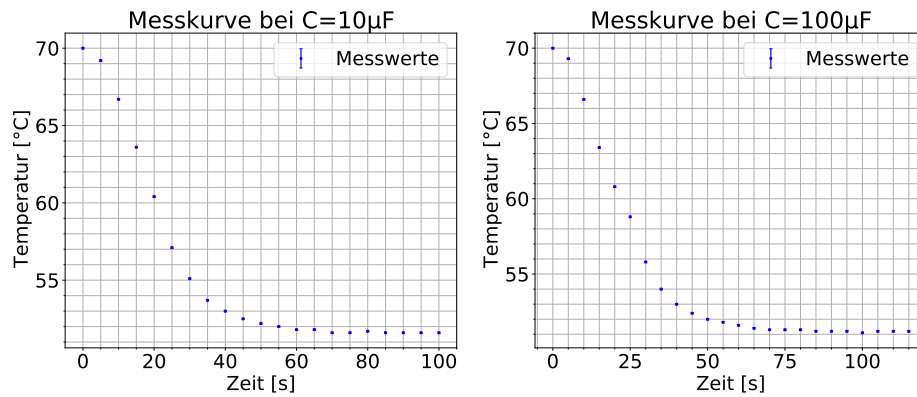
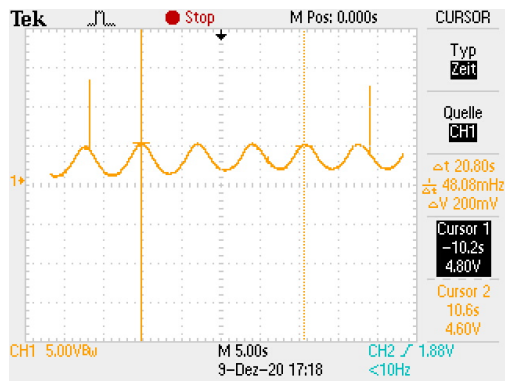
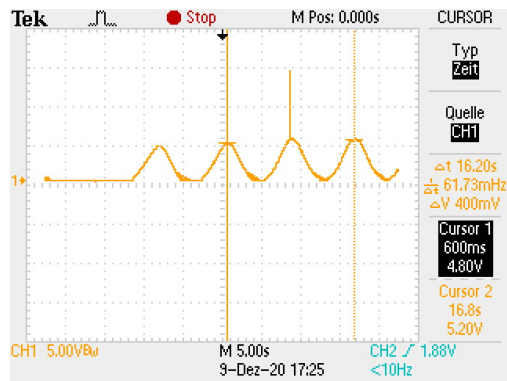


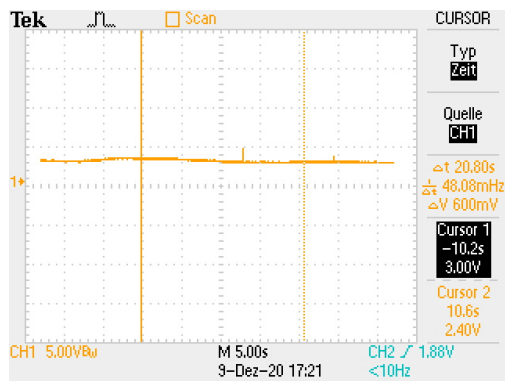
Abbildung 18: Vollständige Zeit-Temperatur-Kurven des Pi Regler



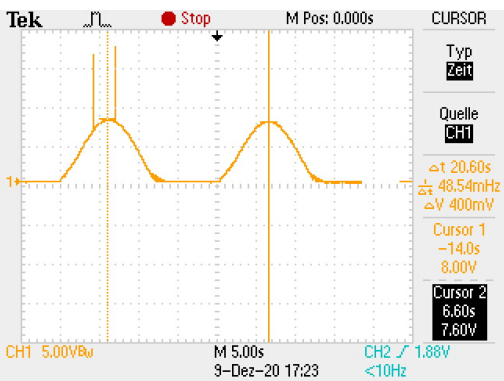
(a) $R_I = 4.7 \text{ k}\Omega$ $R_f = 470 \text{ k}\Omega$ $C = 100 \mu\text{F}$



(b) $R_I = 4.7 \text{ k}\Omega$ $R_f = 470 \text{ k}\Omega$ $C = 10 \mu\text{F}$



(c) $R_I = 4.7 \text{ k}\Omega$ $R_f = 47 \text{ k}\Omega$ $C = 100 \mu\text{F}$



(d) $R_I = 4.7 \text{ k}\Omega$ $R_f = 47 \text{ k}\Omega$ $C = 10 \mu\text{F}$

Abbildung 19: Ausgangssignal bei variation der Bauteile bei dem PI-Regler

Tabelle 2: Regler ohne Hysteresis

Zeit [s]	Temperatur [°C]
0	30.0±0.1
10	32.0±0.1
20	33.8±0.1
30	35.7±0.1
40	37.5±0.1
50	39.4±0.1
60	41.0±0.1
70	42.7±0.1
80	44.3±0.1
90	45.8±0.1
100	47.3±0.1
110	48.6±0.1
120	50.0±0.1
125	50.5±0.1
130	50.7±0.1
135	51.1±0.1
140	51.2±0.1
145	51.4±0.1
150	51.5±0.1
155	51.6±0.1
160	51.7±0.1
165	51.7±0.1
170	51.8±0.1
175	51.7±0.1
180	51.9±0.1
185	51.7±0.1
190	51.9±0.1
195	51.8±0.1
200	52.0±0.1
205	51.8±0.1
210	51.9±0.1
215	51.8±0.1
220	51.8±0.1
225	51.9±0.1
230	51.8±0.1
235	51.9±0.1
240	51.8±0.1

Tabelle 3: Hysterese mit 100 kΩ

Zeit [s]	Temperatur [°C]
0	32.0±0.1
10	33.8±0.1
20	35.6±0.1
30	37.3±0.1
40	39.0±0.1
50	40.7±0.1
60	42.5±0.1
70	44.0±0.1
80	45.7±0.1
90	47.1±0.1
100	48.6±0.1
110	50.0±0.1
115	50.6±0.1
120	49.8±0.1
125	49.0±0.1
130	49.2±0.1
135	49.8±0.1
140	50.5±0.1
145	50.5±0.1
150	49.3±0.1
155	49.0±0.1
160	49.5±0.1
165	50.1±0.1
170	50.8±0.1
175	49.7±0.1
180	49.1±0.1
185	49.3±0.1
190	49.5±0.1
195	50.6±0.1
200	50.4±0.1
205	49.2±0.1
210	49.2±0.1
215	49.6±0.1
220	50.3±0.1
225	50.7±0.1
230	49.6±0.1
235	49.1±0.1
240	49.4±0.1

Tabelle 4: Hysterese mit 20 kΩ

Zeit [s]	Temperatur [°C]
0	30.0±0.1
10	31.8±0.1
20	33.6±0.1
30	35.4±0.1
40	37.0±0.1
50	38.8±0.1
60	40.4±0.1
70	42.0±0.1
80	43.6±0.1
90	45.0±0.1
100	46.5±0.1
110	47.9±0.1
120	49.3±0.1
125	50.5±0.1
130	51.2±0.1
135	51.8±0.1
140	52.5±0.1
145	53.1±0.1
150	53.7±0.1
155	54.2±0.1
160	54.8±0.1
165	55.4±0.1
170	55.6±0.1
175	56.6±0.1
180	57.0±0.1
185	57.5±0.1
190	56.4±0.1
195	54.2±0.1
200	52.2±0.1
205	50.4±0.1
210	48.4±0.1
215	46.8±0.1
220	45.2±0.1
225	44.2±0.1
230	43.0±0.1
235	42.0±0.1
240	42.0±0.1

Tabelle 5: Fortsetzung der Hysterese mit $20\text{ k}\Omega$

Zeit [s]	Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]
245	42.6 ± 0.1
250	43.3 ± 0.1
255	44.0 ± 0.1
260	44.7 ± 0.1
265	45.5 ± 0.1
270	46.2 ± 0.1
275	46.8 ± 0.1
280	47.7 ± 0.1
285	48.2 ± 0.1
290	48.9 ± 0.1
295	49.5 ± 0.1
300	50.0 ± 0.1
305	50.8 ± 0.1
310	51.5 ± 0.1
315	52.0 ± 0.1
320	52.7 ± 0.1
325	53.3 ± 0.1
330	53.8 ± 0.1
335	54.3 ± 0.1
340	54.9 ± 0.1
345	55.4 ± 0.1
350	56.0 ± 0.1
355	56.6 ± 0.1
360	57.1 ± 0.1
365	57.6 ± 0.1
370	57.1 ± 0.1

Tabelle 6: P-Regler

Zeit [s]	Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]
0	70.0 ± 0.1
5	69.2 ± 0.1
10	66.5 ± 0.1
15	63.4 ± 0.1
20	60.5 ± 0.1
25	57.6 ± 0.1
30	55.0 ± 0.1
35	53.5 ± 0.1
40	52.5 ± 0.1
45	51.9 ± 0.1
50	51.5 ± 0.1
55	51.2 ± 0.1
60	51.0 ± 0.1
65	50.8 ± 0.1
70	50.7 ± 0.1
75	50.6 ± 0.1
80	50.5 ± 0.1
85	50.5 ± 0.1
90	50.4 ± 0.1
95	50.3 ± 0.1
100	50.3 ± 0.1
105	50.4 ± 0.1
110	50.3 ± 0.1
115	50.3 ± 0.1
120	50.4 ± 0.1
125	50.4 ± 0.1
130	50.3 ± 0.1
135	50.4 ± 0.1
140	50.4 ± 0.1

Tabelle 7: PI-Regler 100 μ F

Zeit [s]	Temperatur [°C]
0	70.0 \pm 0.1
5	69.3 \pm 0.1
10	66.6 \pm 0.1
15	63.4 \pm 0.1
20	60.8 \pm 0.1
25	58.8 \pm 0.1
30	55.8 \pm 0.1
35	54.0 \pm 0.1
40	53.0 \pm 0.1
45	52.4 \pm 0.1
50	52.0 \pm 0.1
55	51.8 \pm 0.1
60	51.6 \pm 0.1
65	51.4 \pm 0.1
70	51.3 \pm 0.1
75	51.3 \pm 0.1
80	51.3 \pm 0.1
85	51.2 \pm 0.1
90	51.2 \pm 0.1
95	51.2 \pm 0.1
100	51.1 \pm 0.1
105	51.2 \pm 0.1
110	51.2 \pm 0.1
115	51.2 \pm 0.1

Tabelle 8: PI-Regler 10 μ F

Zeit [s]	Temperatur [°C]
0	70.0 \pm 0.1
5	69.3 \pm 0.1
10	66.6 \pm 0.1
15	63.4 \pm 0.1
20	60.8 \pm 0.1
25	58.8 \pm 0.1
30	55.8 \pm 0.1
35	54.0 \pm 0.1
40	53.0 \pm 0.1
45	52.4 \pm 0.1
50	52.0 \pm 0.1
55	51.8 \pm 0.1
60	51.6 \pm 0.1
65	51.4 \pm 0.1
70	51.3 \pm 0.1
75	51.3 \pm 0.1
80	51.3 \pm 0.1
85	51.2 \pm 0.1
90	51.2 \pm 0.1
95	51.2 \pm 0.1
100	51.1 \pm 0.1
105	51.2 \pm 0.1
110	51.2 \pm 0.1
115	51.2 \pm 0.1

Tabelle 9: NTC Werte

Temperatur [°C]	Widerstand [R]
21.0	11910 \pm 10
22.0	11600 \pm 10
23.0	11200 \pm 10
24.0	10710 \pm 10
25.0	10250 \pm 10
26.0	9810 \pm 10
27.0	9450 \pm 10
28.0	9080 \pm 10
29.0	8700 \pm 10
30.0	8380 \pm 10
31.0	8020 \pm 10
32.0	7700 \pm 10
33.0	7430 \pm 10
34.0	7140 \pm 10
35.0	6850 \pm 10
36.0	6740 \pm 10
37.0	6600 \pm 10

Weiter auf der nächsten Seite

Tabelle 9: Fortsetzung NTC Werte

Temperatur [°C]	Widerstand [R]
38.0	6400±10
39.0	6130±10
40.0	5710±10
41.0	5570±10
42.0	5400±10
43.0	5210±10
44.0	5030±10
45.0	4820±10
46.0	4640±10
47.0	4450±10
48.0	4330±10
49.0	4170±10
50.0	4030±10
51.0	3900±10
52.0	3790±10
53.0	3660±10
54.0	3520±10
55.0	3400±10
56.0	3280±10
57.0	3200±10
58.0	3110±10
59.0	2950±10
60.0	2850±10
61.0	2770±10
62.0	2670±10
63.0	2600±10
64.0	2500±10
65.0	2440±10
66.0	2370±10
67.0	2270±10
68.0	2190±10
69.0	2130±10
70.0	2080±10
Ende	