

Versuch EP7

Regelschaltungen (PID-Regler)

I. Zielsetzung des Versuches

Regelschaltungen dienen dazu, eine bestimmte (oftmals nichtelektronische) Größe auf einem bestimmten Wert zu halten. Die Größe wird über Sensoren gemessen (vgl. Versuch EP6), der Regler vergleicht diesen Ist-Wert mit einem Soll-Wert und führt Aktionen aus, wenn beide Werte voneinander abweichen.

In diesem Versuch sollen Sie lernen, wie verschiedene Reglertypen den Regelvorgang mit unterschiedlicher Präzision und unterschiedlichem Schaltungsaufwand ausführen können.

II. Vorkenntnisse

Arbeitsweise verschiedener Sensortypen, speziell: NTC.

Funktionsweise des Operationsverstärkers, speziell: Rückkopplungstypen (negative Rückkopplung)

Literatur:

TIETZE, SCHENK: Halbleiter-Schaltungstechnik

III. Theorie

1. Regler

Das Ziel der *Regelung* besteht darin, Ausgangsgrößen technischer Prozesse auf vorgegebenen Sollwerten zu halten (z.B. Temperatur, Druck, etc.). Dabei sollen die regelnden Größen Änderungen der Sollwerte möglichst gut folgen. Zudem sollen die zu regelnden Größen möglichst wenig von auf den Prozess einwirkenden Störungen beeinflusst werden. Man versucht, diese Ziele umzusetzen, indem Messwerte und Sollwerte der zu regelnden Größen miteinander verglichen und aus deren Differenz rückkoppelnde Regelungen abgeleitet werden, welche in den Prozess eingreifend den Abweichungen von den Sollwerten entgegenwirken. In Abb.1 ist die prinzipielle Funktionsweise eines Regelkreises skizziert.

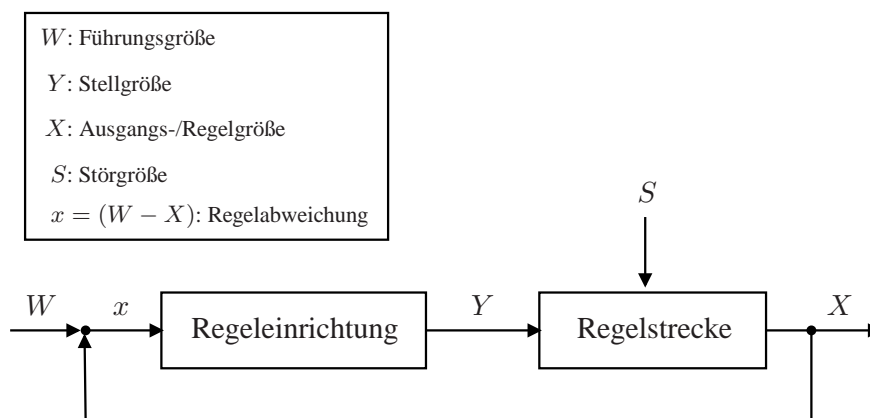
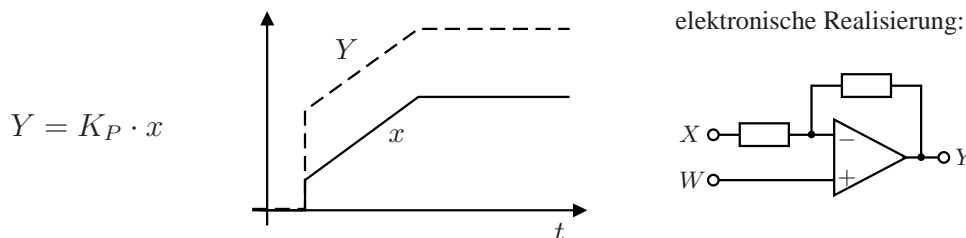


Abbildung 1: Regelkreis – Schematische Darstellung: Die Regelgröße X (z.B. eine Temperatur) soll auf einem gewünschten Sollwert W konstant gehalten werden. Hierzu werden beide Größen miteinander über einen Regler verglichen, der aus der Differenz der beiden Werte (Regelabweichung x) eine Stellgröße Y bildet. Stell- und evtl. Störgrößen bewirken dann innerhalb der Regelstrecke eine Änderung der Regelgröße.

In diesem Versuch werden *stetige Regler* betrachtet, also Regler, welche eine von der Regeldifferenz x abhängende, stetig verlaufende Ausgangsgröße bereitstellen.

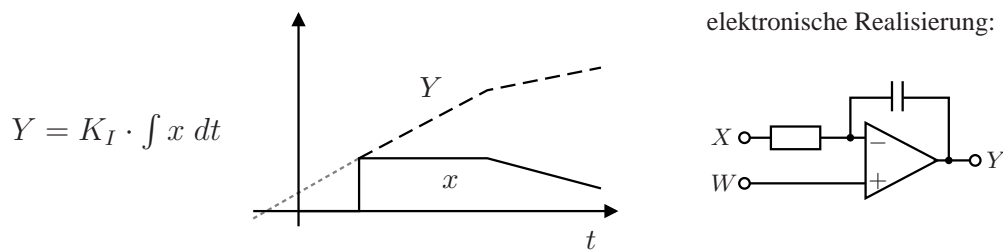
Man unterscheidet im Wesentlichen zwei grundlegende Regelemente, die unterschiedlich auf den Betrag und die Art (den zeitlichen Verlauf) der jeweiligen Abweichung vom Sollwert reagieren:

- Der *P- oder Proportionalregler* – er generiert eine zur Regeldifferenz $x := (W - X)$ proportionale Stellgröße:



In vielen Fällen genügt die Regelung über einen P-Regler, da er einfach zu realisieren ist und schnell auf Regeldifferenzen reagiert. Nachteilhaft ist jedoch, dass Regeldifferenzen über ihn nicht vollständig beseitigt werden können. Zudem kann die Wahl eines zu großen Einstellwertes für K_P zur Systeminstabilität führen.

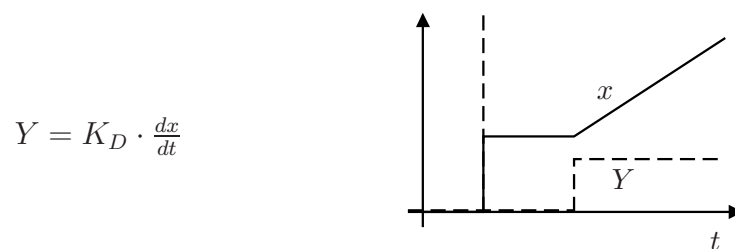
- Der *I-* oder *Integralregler* – er generiert eine Stellgröße, deren Änderungsgeschwindigkeit proportional zur Regeldifferenz ist:



Über den Integralregler können Regelabweichungen eliminiert werden, da er so lange auf ein Eingangssignal reagiert, bis es zu Null geworden ist. Der Nachteil besteht darin, dass er relativ langsam reagiert und daher schnellen dynamischen Anforderungen nicht gerecht wird.

Der effektivste Standardregler ist der sog. *PID-Regler*. Er vereint die beiden genannten Reglemente, mit einem zusätzlichen Differentialregleranteil.

- Ein *D-* oder *Differentialregleranteil* erzeugt eine zur Änderungsgeschwindigkeit der Regeldifferenz proportionale Stellgröße:



Ein derartiges Regelement ist nur sinnvoll in Verbindung mit einem der anderen Reglertypen, da es nicht auf konstante Regeldifferenzen reagiert, für $x = const$ also $Y = 0$ ist. Es kompensiert jedoch zu schnelle Ausgleichsänderungen der anderen beiden Regelemente und trägt somit zur Stabilisierung des Regelkreises bei.

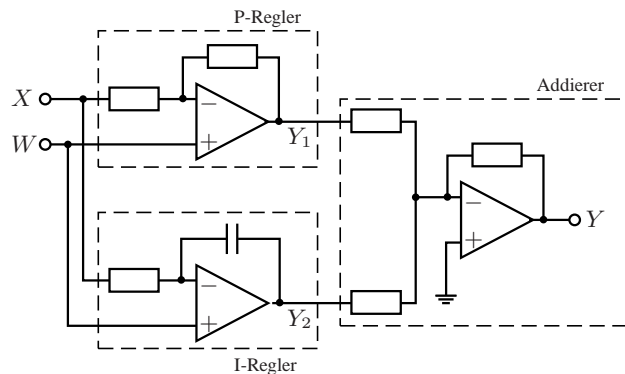
2. Umsetzung in der Elektronik

Gerade im Bereich der elektrischen und elektronischen Regelgeräte existiert eine Vielzahl von Gerätetypen. Sie finden beispielsweise dort Verwendung, wo man Signale mit geringen Verzögerungen über größere Entfernungen übertragen möchte, an schnellen Regelstrecken, in komplex vermaschten Systemen, oder dort, wo sich günstigerweise elektrisch messen und stellen lässt.

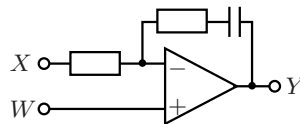
Realisiert werden einfache elektronische Regelsysteme – wie bereits oben angedeutet – oftmals über Operationsverstärker. Technisch genutzt werden dabei überwiegend folgende Kombinationen:

- **PI-Regler:**

$$Y = K_P \cdot x + K_I \cdot \int x dt$$

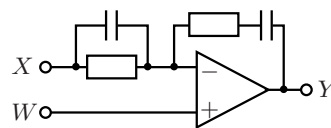


Hierbei wurden die beiden Regelemente des P- und I-Reglers (s.S. 2/3) mit Hilfe einer Summenschaltung (Addierer) zusammengeführt. Die dargestellte Schaltung lässt sich auf einen einzigen Operationsverstärker reduzierend zusammenfassen, was wie folgt aussieht:



- **PID-Regler:**

$$Y = K_P \cdot x + K_I \cdot \int x dt + K_D \cdot \frac{dx}{dt}$$



3. Gütemaße einer Regelung

Die Güte einer Regelung lässt sich nach dem Verlauf der Regelgröße als Folge einer sprungförmigen Änderung beurteilen (Man spricht in diesem Zusammenhang auch von einer *Sprungantwort* des Regelkreises).

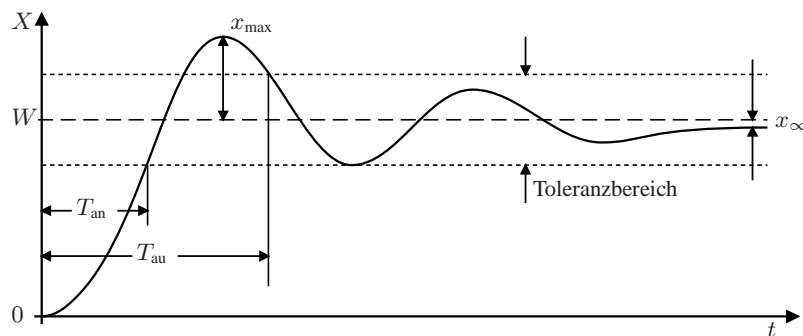


Abbildung 2: Kenngrößen der Regelgüte.

- **Toleranzbereich:** Ein Regelkreis arbeitet genau, wenn die Regelgröße im Beharrungszustand innerhalb eines definierten Toleranzbereichs bleibt. Die Regelung ist dabei umso genauer, je enger die Toleranz gesteckt ist.
- **Anregelzeit T_{an} :** Hierbei handelt es sich um die Zeitspanne, welche vergeht, bis die Regelgröße nach einer Auslenkung wieder in den geforderten Toleranzbereich eintritt und somit um eine Kenngröße für die Schnelligkeit eines Reglers.
- **Ausregelzeit T_{au} :** Sie ist definiert als die Zeitspanne, die ein Regler benötigt, bis nach einer Auslenkung der Toleranzbereich wieder vollständig eingehalten wird.
- **Nicht verschwindende Regelabweichung x_{∞} :** Der verbleibende Differenzwert zwischen Führungsgröße und Regelabweichung, welcher sich nach dem Abklingen von Einschwingvorgängen einstellt.
- **Überschwingweite x_{\max} :** Maximalwert, um den die Regelgröße bei Sprüngen der Führungsgröße über ihren Sollwert überschwingt.

Um einen Regler zu optimieren, gilt es, die oben genannten Größen zu minimieren. Da diese jedoch i.a. voneinander abhängen, muss für gewöhnlich ein Kompromiss aus Genauigkeit, Geschwindigkeit und Stabilität eingegangen werden.

IV. Versuchsprogramm

1. Versuchsaufbau

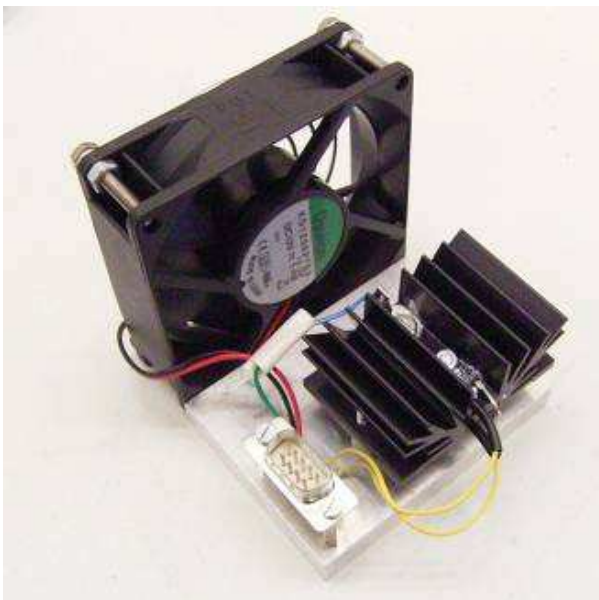
Als zu regelndes System betrachten wir einen Kühlkörper mit Heizung und Lüfter sowie Thermometer:

- Der Kühlkörper kann mit Lastwiderstand (zwei 20- Ω -Widerstände in Serie, also 40 Ω) erwärmt werden.
- Zum Kühlen dient ein Lüfter.
- Die Temperatur des Kühlkörpers wird mit einem Sensor (NTC) gemessen.
- Ein externes Thermometer mit Digitalanzeige dient zur Überprüfung der Kühlkörpertemperatur.

Die Temperatur des Kühlkörpers soll auf einem bestimmten Wert gehalten werden. Dazu wird die Temperatur mit dem NTC-Sensor gemessen und ein Lüfter in geeigneter Weise ein- und ausgeschaltet. Dabei können verschiedene Reglertypen eingesetzt werden.

Die Fotos zeigen den Aufbau. An der 9poligen Buchse links wird noch ein Kabel angeschlossen, welches 6 Bananenstecker hat:

- Einen roten und einen schwarzen Stecker für die Lüfterspannung (rot = plus, schwarz = minus).
- Zwei grüne Stecker für den NTC-Sensor (Polarität unwichtig).
- Zwei gelbe Stecker für den Heizwiderstand (Polarität unwichtig).



VORSICHT: Der Kühlkörper kann heiß werden, also nicht anfassen!

Zusätzlich zum abgebildeten Versuchsaufbau gibt es auch einen mit kleinerem Kühlkörper für schnellere Ansprechzeiten. Der grundsätzliche Aufbau aus Heizung, NTC und Lüfter ist bei beiden Aufbauten identisch.

Machen Sie Ihre Messungen mit einem der beiden Aufbauten nach Wahl. Wenn Zeit ist, vergleichen Sie in einzelnen Versuchsteilen die Eigenschaften beider Aufbauten miteinander.

2. Eichung des NTC-Sensors

Wir wollen zunächst die Temperaturkurve des NTCs aufnehmen. Dazu messen wir den Widerstandswert des NTCs bei verschiedenen Temperaturen:

1. Stecken Sie das externe Thermometer in den Kühlkörper. Hierfür ist an einer Stelle ein passendes Loch gebohrt worden.
2. Verbinden Sie die Anschlüsse des NTCs (grüne Stecker) mit dem Multimeter, um den Widerstand zu messen. Der NTC hat bei Raumtemperatur einen Widerstand von etwa 10 k Ω .
3. Verbinden Sie die Anschlüsse des Heizwiderstands (gelbe Stecker) mit dem linken der beiden 20-V-Ausgänge des Netzgerätes. Stellen Sie zunächst eine Spannung von 10 V ein. Achten Sie darauf, daß die Strombegrenzung auf maximal gestellt ist.
4. Schalten Sie das Netzgerät ein, so daß sich der Kühlkörper langsam erwärmt. Lesen Sie (am besten alle 1 bis 2 Grad) die Temperatur und den zugehörigen NTC-Widerstandswert ab. Stellen Sie den Widerstand als Funktion der Temperatur graphisch dar. Wenn bei höheren Temperaturen die Temperatur nur noch langsam ansteigt, drehen Sie die Spannung am Netzgerät auf 20 V (oder bis zum Einsetzen der Strombegrenzung) hoch.
5. Vergleichen Sie Ihre Meßkurve mit dem theoretischen Wert. Der Widerstand eines NTCs folgt einer e-Funktion gemäß der Formel:

$$R_{NTC}(T) = R_{25} \exp\left(-B\left(\frac{1}{T_{25}} - \frac{1}{T}\right)\right)$$

mit R_{25} = Widerstand bei $T = 25$ °C

und B = B-Wert, Steilheit der Exponentialkurve.

$T_{25} = 25$ °C = 298,15 K,

T = Temperatur.

Achtung: T und T_{25} in Kelvin (K) einsetzen, also den Celsiuswert um 273,15 erhöhen!

Für unseren NTC-Typ ist:

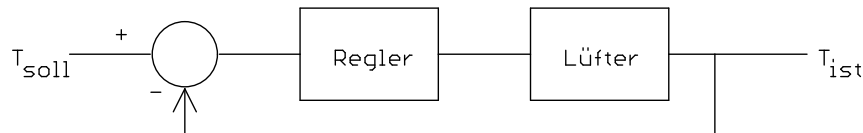
$R_{25} = 10$ k Ω , und

$B = 3988$ K (K = Kelvin, B ist aber keine Temperatur!)

3. Regelschaltungen

3.1. Allgemeines

Die Aufgabe einer Regelschaltung ist es, ein System in einem gewünschten Zustand (hier: konstante Temperatur) zu halten. Hierzu muß die gemessene Temperatur mit einer Referenz verglichen werden und eine *Stellgröße* (hier: Lüfterdrehzahl) so angepaßt werden, daß das System in einem stabilen Zustand bleibt. Dies muß auch bei Änderung der Umgebungsbedingungen (z.B. Heizleistung) gegeben sein.



Hierbei wird die Soll-Temperatur mit der Ist-Temperatur verglichen. Die Differenz geht in den Regler ein und wird dort verstärkt, um die Lüfterdrehzahl zu regeln (erhöhen, wenn die Ist-Temperatur zu hoch ist und senken, wenn diese zu niedrig ist).

3.2. Zweiwegeregler

Die einfachste Form der Regelung benutzt einen sogenannten Zweiwegeregler. Dabei kennt das System nur zwei Zustände:

1. Die Temperatur ist größer als der Sollwert: Der Lüfter arbeitet (mit einer festen (maximalen) Geschwindigkeit).
2. Die Temperatur ist kleiner als der Sollwert: Der Lüfter arbeitet nicht.

Der Vorteil dieses Reglertyps ist sein einfacher Aufbau; er kann mit einem Komparator (Operationsverstärker ohne Rückkopplung) realisiert werden. Nachteilig ist das schlechte Regelverhalten.

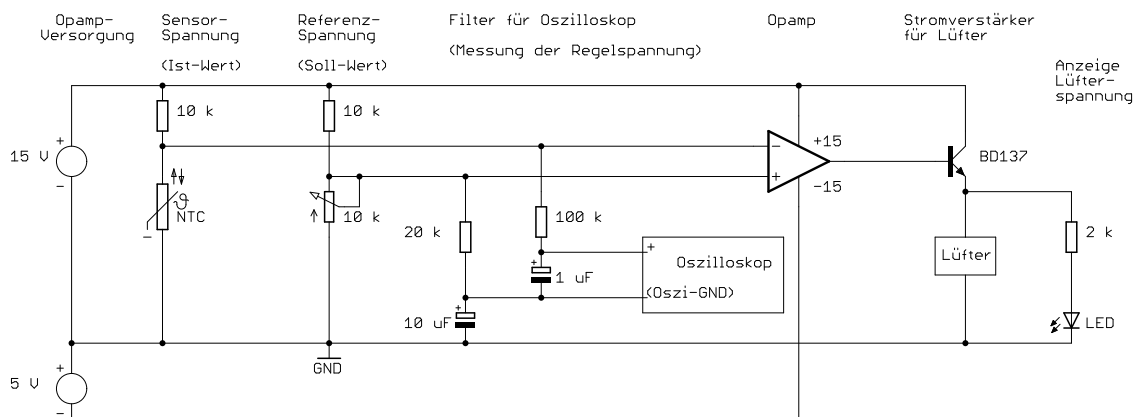
Bauen Sie die folgende Schaltung mit dem Operationsverstärker auf. Die Schaltung besteht aus mehreren Bereichen, die wir zur Übersicht voneinander entfernt gezeichnet haben. Bauen Sie aber alles auf dem bekannten Steckbrett auf, und zwar entweder mit den Kurzschlußbrücken oder möglichst kurzen Bananenkabeln.

Beachten Sie: Der Operationsverstärker wird hier an seinem Anschluß „-15“ mit nur -5 Volt aus der mittleren Spannungsquelle versorgt.

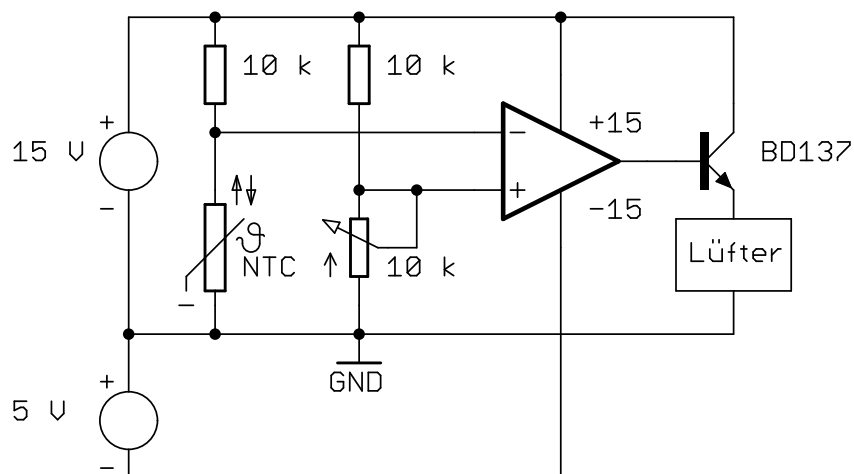
Der NTC wird über das Kabel mit den beiden grünen Steckern an das Steckbrett angeschlossen.

Die Differenz zwischen Soll- und Istwert (also die Temperaturabweichung) können Sie mit dem Oszilloskop sichtbar machen, Empfehlung für die Einstellung: 2,5 sec/div und 50 mV/div. Um Störsignale zu unterdrücken, sind die beiden Tiefpaßfilter erforderlich. Außerdem sollten Sie am Oszilloskop die Bandbreite begrenzen („BW-LIMIT“ auf 20 MHz stellen). Beachten Sie, daß das Oszilloskop mit seiner Masse (schwarze Buchse) diesmal *nicht* an der Schaltungsmasse (GND) angeschlossen wird, sondern (über Filter) zwischen dem invertierten und nichtinvertierten Opamp-Eingang liegt. Das geht ausnahmsweise, weil die Spannungsversorgungen *keine* Verbindung zur Oszilloskopmasse haben. **Sie können aber nicht gleichzeitig diese Eingangssignaldifferenz und das Ausgangssignal des Opamp mit dem Oszilloskop messen**, denn für das Ausgangssignal müßten Sie den Oszilloskop-GND mit der Schaltungsmasse verbinden. Dann aber schließen Sie einen der beiden Opamp-Eingänge nach GND kurz (nämlich den, der an Oszi-GND angeschlossen ist). Machen Sie sich dieses Problem anhand des Schaltbildes klar!

Die Lüfterspannung können Sie mit der LED anzeigen (Vorwiderstand nicht vergessen!) oder mit einem zum Lüfter parallel geschalteten Digitalvoltmeter.



Die eigentliche Reglerschaltung (ohne LED-Anzeige und Oszilloskop mit Filter) sieht so aus:



Wir stellen auch die folgenden Schaltungen in dieser vereinfachten Form dar. Sie unterscheiden sich von der des Zweiwegereglers nur in der Art der Rückkopplung von Opamp-Ausgang auf dessen Eingang. Alles andere (insbesondere die Filterschaltung, wenn Sie mit dem Oszilloskop messen) bleibt.

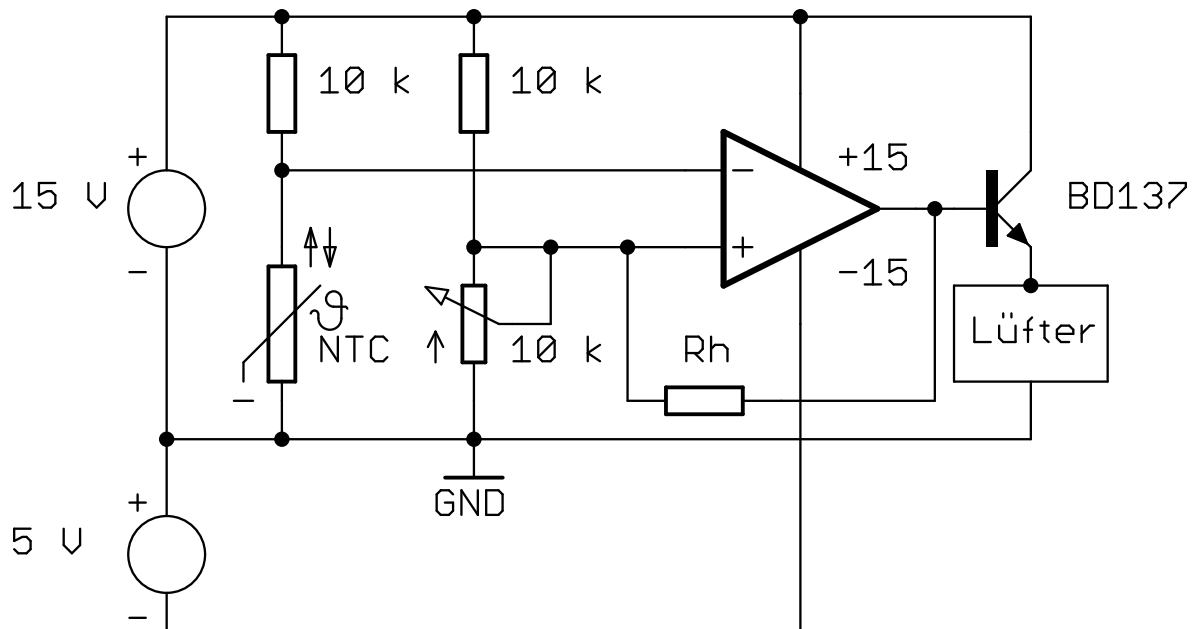
1. Aus der zuvor gemessenen Temperaturkurve sind die Widerstände des NTCs bei verschiedenen Temperaturen bekannt. Welche Spannung erwarten Sie am invertierten Eingang des Operationsverstärkers für eine Temperatur von 50 °C? Stellen Sie mit Hilfe des Potentiometers die Soll-Temperatur auf 50 °C ein. Messen Sie dazu mit dem Digitalvoltmeter die Spannung am nichtinvertierten Eingang des Opamp.
2. Schalten Sie die Heizspannung ein (maximaler Wert) und protokollieren Sie die Temperatur (gemessen mit dem Digitalthermometer) als Funktion der Zeit, nehmen Sie also eine Regelkurve auf. Was fällt auf?
3. Beobachten Sie, wie sich die Ausgangsspannung des Opamp verhält. Sie können am Ausgang aber nur die Leuchtdiode anschließen, nicht das Oszilloskop, wenn sie mit ihm die Eingangsspannungsdifferenz messen (siehe Anmerkungen oben).

3.3. Zweiwegeregler mit Hysterese

Manchmal ist es technisch nicht sinnvoll oder möglich, das regelnde Element (hier: den Lüfter) schnell hintereinander ein- und auszuschalten. Dann kann man durch Einfügen einer sogenannten Hysterese erreichen, daß der Einschalt- und der Ausschaltpunkt bei etwas verschiedenen Temperaturen liegen. Der Lüfter schaltet sich dann beispielsweise nicht mehr bei 50,01 °C ein und bei 49,99 °C aus, sondern erst bei 52 °C ein und bei 48 °C wieder aus. Die Umschaltungen kommen daher verspätet, mit einer Hysterese oder Hysteresis (griech.: hysteros = hinterher, später).

Bei einem Operationsverstärker erreicht man ein solches Verhalten, wenn das Ausgangssignal zu einem Teil auf den nichtinvertierten Eingang zurückgekoppelt wird.

Bauen Sie die folgende Schaltung auf, d.h fügen Sie den Widerstand R_h (z.B. 100 k Ω bis 20 k Ω) ein. Warum bewirkt ein solcher Widerstand die Veränderung der Umschaltunkte?



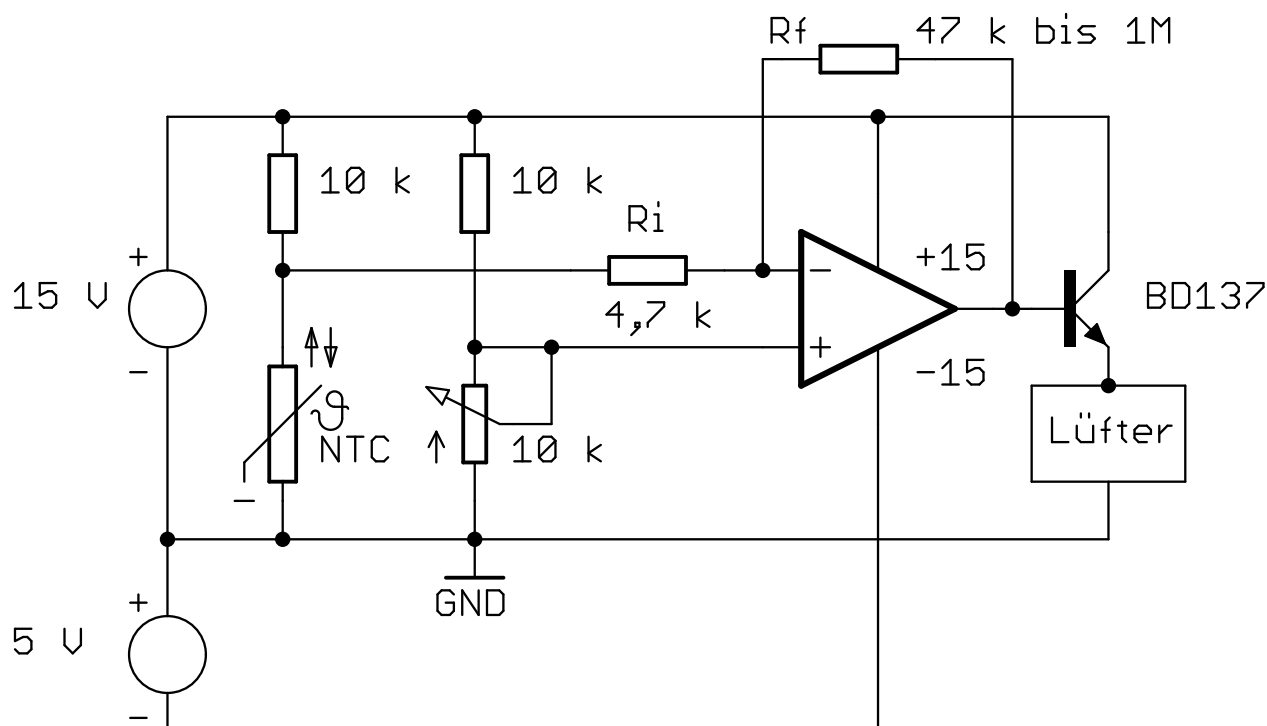
Beobachten Sie auch hier mit dem Oszilloskop, wie sich die Ausgangsspannung des Opamp verhält.

3.4. Der Proportionalregler (P-Regler)

Der Zweiwegeregler führt noch nicht zu einer optimalen Temperaturstabilität am Kühlkörper. Eine Verbesserung ist zu erreichen, wenn die Drehzahl des Lüfters kontinuierlich geregelt werden kann.

Um dies zu erreichen, wird beim Proportionalregler (kurz: P-Regler) ein Teil des Ausgangssignals auf den invertierenden Opampeingang zurückgeführt. Beim P-Regler ist die Rückkopplung auf den Eingang meist nur ein ohmscher Widerstand.

Ändern Sie die Schaltung vom Zweiwegeregler zum P-Regler ab, in dem Sie einen Rückkopplungswiderstand R_f von $1\text{ M}\Omega$ (alternativ: kleinere Werte bis zu $47\text{ k}\Omega$) und einen Eingangswiderstand R_i von $4,7\text{ k}\Omega$ einfügen:



Die Regelspannung des Lüfters ergibt sich jetzt durch die Verstärkung der Spannungsdifferenz ($= k \times \text{Temperaturdifferenz}$) zu $U_{\text{Lüfter}} = V \Delta U$.

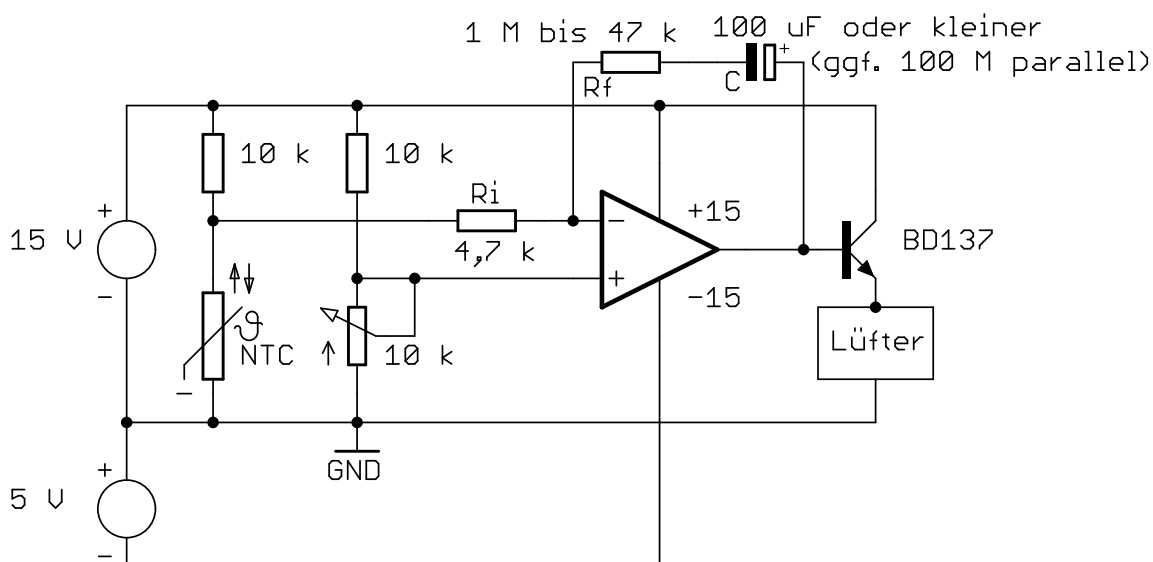
1. Schätzen Sie ab, wie groß die Spannungsdifferenz am Eingang des Opamp für $\Delta T = 1\text{ }^\circ\text{C}$ ist. Wie groß ist also der Faktor k ? Benutzen Sie hierzu Ihre Kenntnisse über die Änderung von R_{NTC} und wie sich dadurch der Ausgang des Spannungsteilers ändert.
2. Lassen Sie den Kühlkörper auf ca. $70\text{ }^\circ\text{C}$ aufheizen, bevor Sie die Regelschaltung aktivieren. Protokollieren Sie wiederum die Temperatur als Funktion der Zeit.
3. Beobachten Sie auch wieder die Ausgangsspannung des Opamp und wie sich diese als Funktion der Regelung ändert.
4. Sie können auch sehen, wie der Regler auf Änderungen reagiert. Hierzu kann entweder die Heizleistung geändert werden oder die Soll-Temperatur am Potentiometer auf einen anderen Wert gesetzt werden.

3.5. Proportionalregler mit Integrator (PI-Regler)

Beim PI-Regler wird durch Einfügen eines Kondensators in die Rückkopplung zusätzlich zum Proportionalverhalten (P) ein integrierendes Verhalten (I) erreicht. Hierdurch wird das Zeitverhalten weiter verbessert. Es können Schwingungen der Regelung ausgeglichen werden und eine stärkere Regelwirkung bei einem Verzug der Wirkung ergibt sich ebenfalls. Die Regelfunktion sieht dann wie folgt aus:

$$U_{\text{Lüfter}} = V \Delta U + \frac{1}{R_i C} \int \Delta U dt$$

Ändern Sie die Schaltung zum PI-Regler ab, indem Sie in die Rückkopplung noch einen Kondensator C (100 μF oder kleinere Werte — ausprobieren!) hinzufügen. R_i und R_f bleiben wie beim P-Regler, also $R_i = 4,7 \text{ k}\Omega$ und $R_f = 1 \text{ M}\Omega$ (evtl. ist es besser, R_f auf bis zu 47 $\text{k}\Omega$ zu verringern). Beachten Sie auch den Hinweis im folgenden Abschnitt (PID-Regler) zur evtl. Drift des Integrators (d.h. ggf. 100 $\text{M}\Omega$ zu C parallelschalten!).



1. Lassen Sie auch hier den Kühlkörper auf ca. 70 °C aufheizen, bevor Sie die Regelschaltung aktivieren. Protokollieren Sie wiederum die Temperatur als Funktion der Zeit.
2. Ändern Sie auch einmal die Soll-Temperatur und die Heizleistung. Die Schaltung sollte innerhalb von einem halben °C regulieren und recht schnell auf die geänderten Werte reagieren.
3. Beobachten Sie auch wieder die Ausgangsspannung des Opamp und wie sich diese als Funktion der Regelung ändert.
4. Variieren Sie auch einmal die Bauteile R_i , R_f und C und beobachten Sie, wie die Regelung auf eine geringere oder höhere Verstärkung reagiert.

3.6. Proportionalregler mit Integrator und Differenzierer (PID-Regler)

(Dieser Versuchsteil ist freiwillig und wird nicht bewertet!)

Wenn noch Zeit ist, können Sie den Regler zum PID-Regler erweitern. Bei ihm wird durch Einfügen eines weiteren Kondensators in die Eingangsleitung (parallel zu R_i) zusätzlich zum Proportionalverhalten (P) und Integralverhalten (I) ein differentielles Verhalten (D) erreicht. Hierdurch wird das Zeitverhalten weiter verbessert, der PID-Regler reagiert schnell auf Änderungen und kann zu einem beschleunigten Einregeln bei starken äußeren Einflüssen führen.

Die Parameter einer Regelschaltung zu bestimmen ist nicht einfach. Die obenstehenden Werte sind für den gegebenen Aufbau recht sinnvoll. Für andere Anwendungen müssen diese immer wieder neu bestimmt werden. Die Parameter hängen hierbei von der Kopplungsstärke der Regelung und den Zeitkonstanten ab.

Ändern Sie die Schaltung zum PID-Regler ab, indem Sie den Kondensator C_i einfügen. Probieren Sie verschiedene Werte für C_i aus, fangen Sie mit kleinen Werten an. Beobachten Sie auch hier den zeitlichen Verlauf der Temperatur.

Durch die Offsetspannung des Operationsverstärkers kann es zu einem „Weglaufen“ des Ausgangssignals kommen, d.h. der Integrator-Kondensator C (der in Serie zu R_f liegt) lädt sich auf, bis die Ausgangsspannung des Operationsverstärkers in die Begrenzung geht. Man kann diesen Effekt deutlich reduzieren, wenn ein kleiner Entladestrom zugelassen wird; dazu wird ein sehr hochohmiger Widerstand ($100\text{ M}\Omega$) parallel zu C geschaltet.

