

Werner-Von-Siemens-Schule Hildesheim
Von-Thünen-Straße 24
31135 Hildesheim

VFGT09-IT

Facharbeit

Erstellung eines Temperatur-Spannungswandlers

Paul Szymanski

30.11.2010

Betreuung durch Herrn Bock

Dieses Dokument wurde mit Hilfe von KOMA-Script und \LaTeX gesetzt.

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	4
2	Auswahl der Bauteile	5
2.1	Temperatursensor	5
2.1.1	PT100	5
2.1.2	KTY-81	6
2.1.3	LM*35	6
2.1.4	Thermoelement	7
2.1.5	LM334	7
2.1.6	Entscheidung	7
2.2	Operationsverstärker	8
3	Schaltung	9
3.1	Widerstand-Spannungs Wandler	9
3.2	Verstärkung	11
3.3	Berechnung der Bauteilwerte	11
4	Platine	14
4.1	Layout	14
4.2	Bestückungsplan	15
4.3	Bestellliste	15
5	Funktionstest	17
5.1	Fehlersuche	17
5.2	Fehlerbeseitigung	18
	Literaturverzeichnis	19

1 Zielsetzung

Ziel ist es, eine Schaltung zu bauen, die abhängig von der Umgebungstemperatur eine Spannung U_a ausgibt. Die Schaltung soll für den Temperaturbereich von -20°C bis $+43^\circ\text{C}$ gebaut werden.

Im Schuljahr 13 werden wir Temperaturen über einen Computer einlesen. Dazu ist es notwendig die Spannung des Temperatur-Spannungswandlers zu digitalisieren. Für diese Aufgabe wird nach Absprache das Velleman P8055 verwendet. Dieses Modul hat unter anderem einen A/D-Wandler¹, dessen Auflösung 256bit hat und Spannungen von 0V bis 5V misst.

Daraus ergibt sich, dass bei einer Temperatur von -20°C , die Spannung U_a 0V betragen muss und bei einer Temperatur von 43°C , die Spannung U_a 5V betragen muss, damit man eine möglichst hohe Auflösung der Temperatur erreicht.

Zusammengefasst sind die Anforderungen an die Schaltung:

- $T_{\min} = -20^\circ\text{C}$
- $T_{\max} = 43^\circ\text{C}$
- $U_{a,\min} = 0\text{V}$
- $U_{a,\max} = 5\text{V}$

¹Analog/Digital-Wandler

2 Auswahl der Bauteile

Um Überlegungen für die Schaltung anstellen zu können, müssen zunächst geeignete Bauteile ausgewählt werden.

2.1 Temperatursensor

Es gibt eine recht große Auswahl an Temperatursensoren. Beim genaueren Betrachtung, kann man die Temperatursensoren jedoch in mehrere Gruppen einteilen:

- Analoge Sensoren¹
 - Passive Sensoren²
 - * PTC
 - PT100
 - KTY-81
 - * NTC
 - Aktive Sensoren³
 - * Spannungsänderung
 - LM*35
 - Thermoelement
 - * Stromänderung
 - LM334
- Digitale Sensoren⁴
 - I²C
 - 1-Wire

2.1.1 PT100

Der PT100 ist ein Platinwiderstand, der seinen Widerstandswert nach der Temperatur ändert. Die Widerstandsänderung beträgt jedoch nur $0,4 \Omega/K$, wodurch eine komplizierte Verstärkerschaltung benötigt wird.

¹Analoges Messsignal

²Widerstandswert ändert sich. Temperatur wird passiv über die Abfallende Spannung ausgelesen.

³Temperatur kann direkt über die Ausgangsspannung des Sensors ausgelesen werden.

⁴Digitales Signal

Vorteile

- großer Messbereich
- hohe Linearität
- hohe Wiederholgenauigkeit

Nachteile

- relativ teuer (bei segor.de ab 3,80 €)
- brauchen aufwändigere Auswerteschaltung

2.1.2 KTY-81

Der KTY-81 ist – wie der PT100 auch – ein PTC⁵. PTC sind sogenannte Kaltleiter: Sie haben ihren geringsten Widerstand bei niedrigen Temperaturen. Um mit diesem passiven Sensor eine Spannung zu erhalten, schaltet man ihn mit einem festen Widerstand in Reihe zu einem Spannungsteiler und misst den Spannungsabfall.

Vorteile

- günstig (bei Reichelt 0,47 €)

Nachteile

- sind nichtlinear

2.1.3 LM*35

Dieser aktive Sensor, ändert seine Ausgangsspannung pro Kelvin um 10mV. Allerdings benötigt man für das Ziel des Temperaturbereiches ab -20°C drei Operationsverstärker in der Schaltung: einen für die Verstärkung, einen für eine Spannungsanhebung auf 0V bei -20°C und einen zur invertierung des invertierten Signals aus der Spannungsanhebung.

Vorteile

- relativ günstig (LM335 bei Reichelt ab 0,76 €)

Nachteile

- benötigt 3 Operationsverstärker

⁵engl. Positive Temperature Coefficient

2.1.4 Thermoelement

Das Thermoelement basiert auf den Seebeck-Effekt. Er gibt wie der LM*35 ebenfalls eine Spannung aus. Da diese jedoch im Mikrovoltbereich liegen, wird eine sehr gute Auswertelektronik benötigt.

Vorteile

- über einen sehr weiten Temperaturbereich einsetzbar

Nachteile

- es wird eine sehr gute Auswertelektronik benötigt

2.1.5 LM334

Bei dem LM 334 hängt der durch das IC fließende Strom von der Temperatur ab. Mit einer einfachen Schaltung kann dann der Strom so gewandelt werden, dass pro Kelvin eine Spannungsänderung von 10mV ausgegeben wird.

Vorteile

- relativ günstig (Reichelt 0,54 €)

Nachteile

- Bereich 0°C bis 70°C

Digitale Sensoren

Digitale Temperatursensoren, geben ein digitales Signal aus. Es gibt Sensoren für verschiedene Protokolle (z.B. I²C, 1-Wire). Da mein Ziel jedoch eine Spannung ist, ist es unsinnig sich weitere Gedanken über die Verwendung von Digitalen Sensoren in der Schaltung für das angestrebte Ziel zu machen.

2.1.6 Entscheidung

Aus den Vor- und Nachteilen der Sensoren, komme ich zu dem Entschluss, dass die Verwendung eines KTY-81 am einfachsten und günstigsten ist.

Der KTY-81 ist in mehreren Varianten erhältlich. Er ist in zwei Serien aufgeteilt. Die Sensoren der Serie 1 haben bei 25°C einen Widerstandswert von 1kΩ. Die der Serie 2 einen Widerstandswert von 2kΩ. Aus dem Datenblatt konnte ich herauslesen, dass die Serie 2 die geringste Toleranz hat. In den Serien gibt es nochmal verschiedene Varianten. Ich habe den 210er gewählt, da dieser in der Serie 2 den geringsten Temperatur Fehler hat (Abb. 2.1 und [1]).

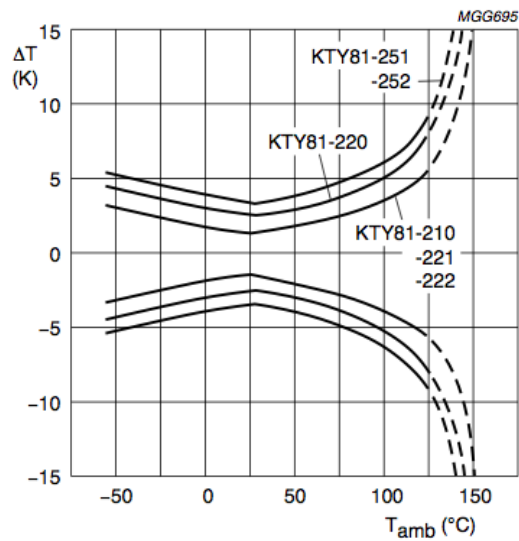


Abbildung 2.1: Höchste zu erwartende Temperatur Abweichung ΔT

2.2 Operationsverstärker

Um eine optimale Ausnutzung des Messbereiches des A/D-Wandlers zu erreichen, muss die Spannung, die am KTY81 abfällt passend verstärkt werden. Ausserdem muss der Nullpunkt (T_{min}) auf 0V gesetzt werden.

Dazu wird ein Operationsverstärker benötigt. Da die Ausgangsspannung U_a 0V bis 5V betragen soll, muss auch nur diese positive Spannung verstärkt werden. Somit ist der OP LM258 für diese Aufgabe geeignet. Seine Versorgungsspannung liegt bei +5V und die Arbeitstemperatur geht von -40°C bis $+105^{\circ}\text{C}$.

3 Schaltung

3.1 Widerstand-Spannungs Wandler

Um an dem KTY-81 eine Abfallende Spannung messen zu können, wird ein Spannungsteiler benötigt (Abb. 3.1). U_a wird mit Formel (3.1) berechnet.

$$U_a = \frac{U}{R_1 + R_2} * R_2 \tag{3.1}$$

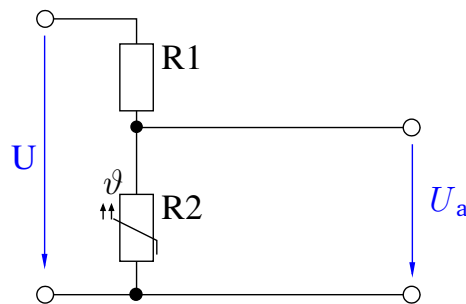


Abbildung 3.1: Spannungsteiler

Um den Unteren Arbeitspunkt T_{min} festzulegen, wird noch ein zweiter Spannungsteiler benötigt, der parallel zum ersten Spannungsteiler geschaltet wird (Abb. 3.2).

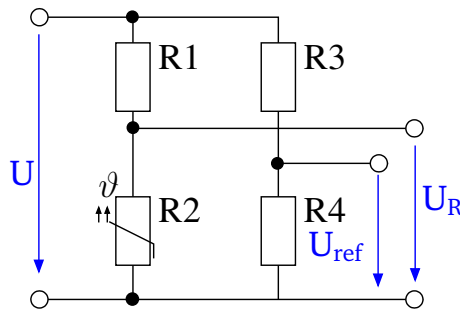


Abbildung 3.2: Spannungsteiler

Seine Spannung U_{ref} dient als Referenzspannung und wird an den negierten Eingang des OP angeschlossen. Der nicht negierte Eingang des OPs greift die Spannung zwischen den beiden Widerständen am ersten Spannungsteiler ab. Meine Überlegung

dahinter ist, dass $U_R - U_{\text{ref}}$ – wobei R_4 dem Widerstandswert entspricht, den R_2 bei -20°C hat – bei -20°C gleich 0V ist.

Mit der Formel (3.2) kann nun U_a berechnet werden.

$$U_a = \frac{U}{R_1 + R_2(T)} * R_2(T) - \frac{U}{R_3 + R_4} * R_4 \quad ; R_4 = R_2(T_{\text{min}}) \quad (3.2)$$

Für R_1 und R_2 müssen nun Werte berechnet werden. Wie in der Formel (3.2) zu sehen ist, gebe ich R_2 als Funktion an¹. Dies folgt daher, dass R_2 abhängig von der Temperatur ist. Die Funktion $R_2(T)$ kann mit Hilfe der im Datenblatt angegebenen Tabelle aufgestellt werden. Dazu habe ich die Methode des kleinsten quadrates angewandt, um eine lineare Funktion zu erhalten. Sie wird mit der Formel (3.3) angegeben [3].

$$\begin{aligned} \bar{T} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i \\ \bar{y} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \\ m &= \frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T}) - (y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2} \\ \bar{y} &= m * \bar{T} + b \\ b &= \bar{y} - m * \bar{T} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Diese Formeln und die Tabelle aus dem Datenblatt habe ich in Excel eingegeben und somit Formel (3.4) erhalten.

$$R_2(T) = 14,4436 * T + 1624,1074; -20^\circ\text{C} \leq T \leq 43^\circ\text{C} \quad (3.4)$$

Der Formelteil b entspricht dem Wert des Widerstands R_4 . Da der KTY81 für einen Strom von $I_{\text{cont}} = 1\text{mA}$ ausgelegt ist [1, p. 7], wähle ich den Widerstandswert für R_1 so, dass der Strom auf 1mA begrenzt wird. Da die Widerstände R_1 und R_2 in Reihe geschaltet sind, ergeben R_1 und R_2 gemeinsam R_{ges} . Somit lässt sich R_{ges} mit Formel (3.5) berechnen.

$$R_{\text{ges}} = \frac{U}{I_{(\text{sen})\text{cont}}} \quad (3.5)$$

R_1 wird somit mit Formel (3.6) berechnet.

$$R_1 = R_{\text{ges}} - R_2(T_{\text{min}}) \quad (3.6)$$

¹Der besseren Lesbarkeit halber wird $R_2(T)$ im Text als R_2 angegeben. In Formeln wird $R_2(T)$ als Funktion angegeben.

3.2 Verstärkung

Um – wie vorher erwähnt (p. 10) – die Spannung aus dem Spannungsteiler so zu verstärken, dass der Messbereich des A/D-Wandlers optimal ausgenutzt wird, muss diese passend verstärkt werden. Dazu verwende ich eine Verstärkerschaltung (Abb. 3.3).

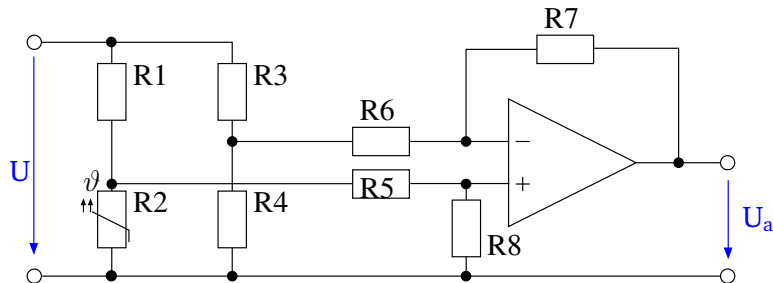


Abbildung 3.3: Komplette Schaltung

Die Verstärkung V wird nach Formel (3.7) berechnet.

$$V = \frac{R_7}{R_6} ; R_6 = R_5 ; R_7 = R_8 \quad (3.7)$$

Bei einer Verstärkung von $V = 1$ ist $U_a = (U_R(T) - U_{ref})$. Daraus ergibt sich die Forme (3.8)

$$U_a = (U_R(T) - U_{ref}) * V \quad (3.8)$$

3.3 Berechnung der Bauteilwerte

Nun werden aus den Formeln die Werte berechnet. Ich setze die Werte ohne Einheiten in die Formeln ein.

R_1 und R_2 berechnen

$$R_1 = \frac{5}{0,001} - (14,4436 * (-20) + 1624,1074) \\ = 3664,7646$$

Da es keinen Widerstand mit 3664,8 Ohm gibt, verwende ich von nun an 3600 Ohm

$$R_2 = 14,4436 * T + 1624,1074$$

R_3 und R_4 berechnen

$$R_3 = R_1$$

$$R_4 = \text{Formelteil b}$$

$$= 1624,1$$

(3.9)

Um nun die Verstärkung V zu berechnen, wird als Rechenwert für $R_2(T) \{T\} = 43$ eingesetzt. V muss dann so groß sein, dass $U_a = (U_R(T_{\max}) - U_{\text{ref}}) * V = 5$ ist. Der Wert 5 kommt aus dem oberen Messbereich des A/D-Wandlers².

$U_R - U_{\text{ref}}$ berechnen

$$\begin{aligned} U_R(T_{\max}) &= \frac{5}{3600 + R_2(T_{\max})} * R_2(T_{\max}) \\ &= 1,920540817 \\ U_{\text{ref}} &= \frac{5}{3600 + 1624,1} * 1624,1 \\ &= 1,554435309 \end{aligned}$$

umstellen nach V

$$\begin{aligned} U_a(T_{\max}) &= (U_R(T_{\max}) - U_{\text{ref}}) * V \quad | \div (U_R(T_{\max}) - U_{\text{ref}}) \\ V &= \frac{U_a(T_{\max})}{(U_R(T_{\max}) - U_{\text{ref}})} \end{aligned} \tag{3.10}$$

Werte einsetzen

$$\begin{aligned} V &= \frac{5}{1,920540817 - 1,554435309} \\ &= 13,6573 \end{aligned}$$

Die Verstärkung wird am Operationsverstärker mit den Widerständen R_5 , R_6 , R_7 und R_8 eingestellt. Wenn die Widerstände $R_5 = R_7$ und $R_6 = R_8$ sind, werden die Widerstände mit der Formel (3.7) berechnet.

Um Visuell zu zeigen, dass meine Berechnung für V stimmt, habe ich $U_a(T)$ je mit einer Värstärkung von 1 und mit der berechneten Verstärkung in ein Diagramm eingetragen (Abb. 3.4). Den Graphenausschnitt habe ich so gewählt, dass auf der y-Achse die 0V - 5V und auf der x-Achse die -20°C bis 43°C angezeigt werden.

²Entspricht $U_{a, \max}$

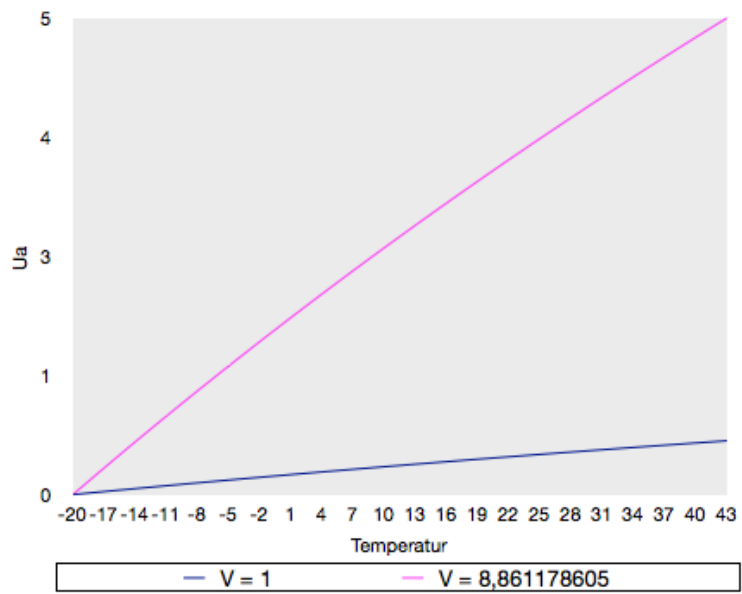


Abbildung 3.4: $U_a(T)$ mit Verstärkung und ohne Verstärkung

4 Platine

4.1 Layout

Für die Widerstände R_5 und R_6 habe ich den Wert $10\text{k}\Omega$ gewählt. Dadurch ergibt sich als Widerstandswert für R_7 und R_8 ein Wert von 88611Ω (Formel (4.1)).

$$V = \frac{R_7}{R_6} \quad (4.1)$$
$$R_7 = V * R_6$$

Da es keinen Widerstand mit 88611Ω gibt, wähle ich an dieser Stelle einen Trimmer. Für den Widerstand R_4 wähle ich ebenfalls einen Trimmer. Dort *muss* ein Trimmer zum Einsatz kommen, da evt. noch der Offset abgeglichen werden muss.

Für die Erstellung des Layouts habe ich die Schaltung als Schaltplan in das Programm EAGLE von CadSoft eingetragen. Mit der Autoroutig Funktion habe ich dann das Layout erstellen lassen. PSpice als Alternative habe ich nicht verwenden können, da das Programm nicht für das von mir genutzte Betriebssystem Mac OS X erhältlich ist. Ausserdem arbeite ich lieber mit EAGLE, da dieses Programm viele Funktionen besitzt, die ein falsches Layouten so gut wie unmöglich machen. Auf Masseflächen habe ich verzichtet. Bei größeren Platinen währ es allerdings empfehlenswert, damit das Entwicklerbad und Ätzbad länger verwendbar sind.

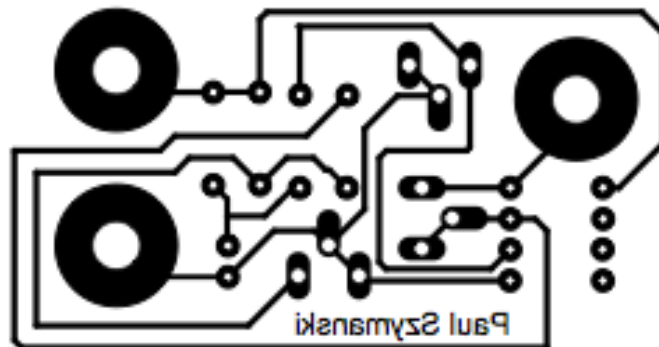


Abbildung 4.1: Schablone für das Belichten

4.2 Bestückungsplan

Der Bestückungsplan dient zur Bestückung der Platine.

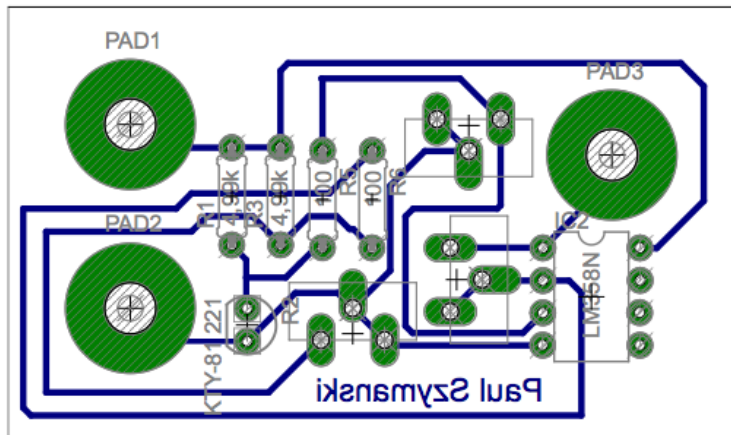


Abbildung 4.2: Bestückungsplan

4.3 Bestellliste

Die Chemikalien und Geräte für das Herstellen der Platine, habe ich nicht in die Rechnung aufgenommen. Wenn man noch das Basismaterial von Bungard, den Lötendraht, die Litze und den Schrumpfschlauch mit der tatsächlich verwendeten Menge gegenrechnet, kommt man auf Gesamtkosten von ca. 3,80 €.

1/4W 10K	Kohleschichtwiderstand 1/4W, 5%, 10 K-Ohm	1	2	0,10 €	0,21 €
1/4W 3,6K	Kohleschichtwiderstand 1/4W, 5%, 3,6 K-Ohm	1	2	0,10 €	0,21 €
76-40 100K	Cermet-Trimmer, stehend, 10mm, 100 K-Ohm	1	2	0,36 €	0,72 €
76-40 2,0K	Cermet-Trimmer, stehend, 10mm, 2,0 K-Ohm	1	1	0,39 €	0,39 €
LM 258 DIP	Op-amp, DIP-8	1	1	0,24 €	0,24 €
KTY 81-210	Temperatursensor, -55...+150°C	1	1	0,62 €	0,62 €
BB 4 SW	Bananenbuchse 4mm, vollisoliert, schwarz	1	1	0,21 €	0,21 €
BB 4 RT	Bananenbuchse 4mm, vollisoliert, rot	1	1	0,24 €	0,24 €
BB 4 GN	Bananenbuchse 4mm, vollisoliert, grün	1	1	0,21 €	0,21 €
FEPCU 150X100	Fotoplatine, Epoxyd, einseitig, 150x100mm	1	1	1,85 €	1,85 €
LÖTZINN AG 0,507	Lötendraht mit AG-Anteil, 70g Rolle, 0,5mm, SN62	0	1	5,30 €	5,30 €
LITZE SW	Kupferlitze isoliert, 10M, 1x0,14mm, schwarz	1	1	0,71 €	0,71 €
SDH 2,4 SW	10er Pack 2:1 Schrumpfschlauch, 2,4mm schwarz	1	1	0,42 €	0,42 €
SDH 4,8 BL	10er Pack 2:1 Schrumpfschlauch, 4,8mm blau	1	1	0,76 €	0,76 €
GS 8	IC-Sockel, 8-polig, doppelter Federkontakt	1	1	0,040 €	0,04 €
Warenwert					12,12 €

Abbildung 4.3: Bestellliste Reichelt

Auf meiner Fertigen Platine habe ich statt den LM258, den LM358, da mir erst nach Bestellung aufgefallen ist, das der LM358 nicht den gewünschten Temperaturbereich

abdeckt.

5 Funktionstest

Für den Funktionstest werden 5V an die rote Buchse und Masse an die Schwarze Buchse gelegt. Das Spannungsmessgerät kommt mit dem Messanschluss an die gelbe Buchse und mit dem Bezugsanschluss an Masse. Auf der Anzeige kann nun eine Spannung abgelesen werden. Diese muss nun mit Hilfe eines geeichten Thermometers durch einstellen des Trimmers R4 an die Tabelle angepasst werden. Nun ist der Temperatur-Spannungswandler bereit zum Funktionstest.

Tabelle 5.1: Spannungswerte bei jeweiliger Temperatur

Temperatur	Spannung U_a
16,1°C	3,0644 V
16,3°C	3,0834 V
16,6°C	3,1024 V
16,8°C	3,1213 V
17,1°C	3,1403 V
17,3°C	3,1592 V
17,6°C	3,1780 V
17,8°C	3,1969 V
18,0°C	3,2157 V
18,3°C	3,2345 V
18,5°C	3,2533 V
18,8°C	3,2720 V
19,0°C	3,2908 V
19,3°C	3,3095 V
19,5°C	3,3282 V
19,8°C	3,3468 V
20,0°C	3,3655 V

Zunächst habe ich einfach den KTY81 zwischen meine Finger gehalten. Auf dem Messgerät kann sofort eine Spannungszunahme beobachtet werden. Diese stoppt bei 3,75V. Diese Spannung entspricht 25,2°C. Meine Finger weisen jedoch eine Temperatur von 30°C auf. Es liegt anscheinend ein Fehler in der Schaltung vor.

5.1 Fehlersuche

Eine falsche Verstärkung als Fehler kann nach dem gescheiterten Versuch die Spannung mit einem Föhn zu erhöhen sofort ausgeschlossen werden. Der Fehler muss

also beim Operationsverstärker sein. Zunächst habe ich vermutet, dass der Operationsverstärker nicht mehr funktionstüchtig war. Nachdem ich ihn ausgetauscht hatte, war der Fehler immer noch vorhanden. Dann kam ich auf die Vermutung, dass die Ausgangsspannung Bauteilbedingt begrenzt ist. Dafür durchsuchte ich das Datenblatt nach einem Hinweis darauf. Dort gibt es einen Wert der mit $V_{OPP} = V_{CC}^+ - 1,5$ angegeben ist¹. Das heisst in meinem Fall, dass U_a maximal ca. 3,5V betragen kann.

5.2 Fehlerbeseitigung

Nun könnte man entweder die Verstärkung geringer einstellen – wodurch allerdings das Ziel der Optimalen Messbereichsauslastung nicht erreicht werden würde – oder die Versorgungsspannung auf mindestens 6,5V ändern, was die eventuelle Stromversorgung aus einem USB-Port nicht mehr ermöglicht. Ausserdem müssten die Widerstände R1, R3 geändert werden. Die letzte Möglichkeit ist einen anderen Operationsverstärker zu suchen. Nach kleiner Suche im Internet habe ich herausgefunden, dass hier ein Rail-to-Rail² Operationsverstärker benötigt wird. Über das Wiki von RN-Wissen.de konnte ich schnell einen geeigneten Operationsverstärker raussuchen [2]. Der OPA347 ist ein solcher. Er besitzt einen Rail-to-Rail Ausgang und hat eine einseitige Spannungsversorgung von 2,2 V bis 5,5 V. Die Variante mit zwei Operationsverstärkern in einem Gehäuse – der OPA2347 – passt sogar auf das vorhandene Board.

Da es zeitlich allerdings nicht mehr möglich ist noch einen anderen Operationsverstärker zu bestellen, werde ich die Versorgungsspannung auf 7,5 V festlegen.

¹Output Voltage Swing

²Der Ausgang kann bis auf die Versorgungsspannung gesteuert werden.

Literaturverzeichnis

Die Literaturangaben sind alphabetisch nach den Namen der Autoren sortiert. Bei mehreren Autoren wird nach dem ersten Autor sortiert.

- [1] NXP Semiconductors.
KTY81 series Product data sheet, rev. 05 edition, April 2008.
- [2] RN-Wissen.
Liste gängiger Typen von Operationsverstärkern.
http://www.rn-wissen.de/index.php/Operationsverst%C3%A4rker#Liste_g.C3.A4ngiger_Typen_von_Operationsverst.C3.A4rkern, 7. Dezember 2010.
- [3] Sobber.
Trendlinie berechnen.
<http://www.hausaufgaben-forum.net/threads/5435-Trendlinie-berechnen?s=f33a607d964d8b4bff986831fec70516&p=17414&viewfull=1#post17414>, 3. Dezember 2010.