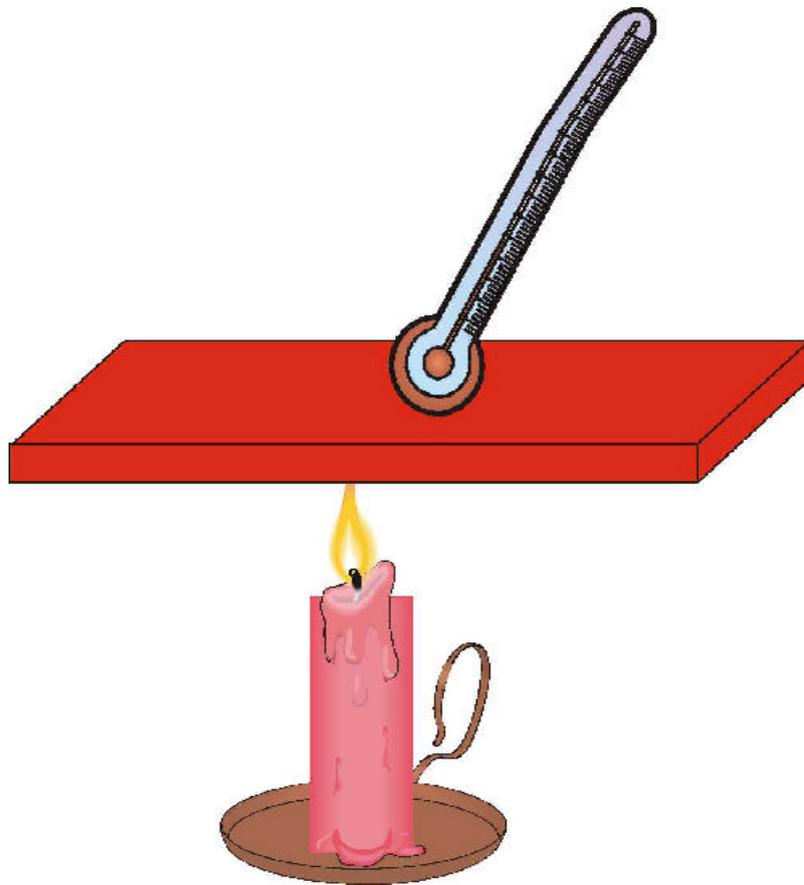


# **Berührungslose Temperaturmessung mit Infrarot-Detektoren**



*Wettbewerb „Jugend forscht / Schüler experimentieren“ 2002*

*Sebastian Hellberg (13)*

*Daniel Markx (12)*

*Arbeitsgemeinschaft „Jugend forscht“  
des Christian-Gymnasiums Hermannsburg  
Betreuung: StD Thomas Biedermann*

# **Inhaltsverzeichnis**

<b>1. Warum eigentlich berührungslose Temperaturmessung?</b>	<b>3</b>
<b>2. Vom Licht zur Spannung</b>	<b>3</b>
2.1 Verwendete Sensoren	3
2.2 Schaltungsaufbau	4
2.3 Funktionstest	5
<b>3. Messergebnisse</b>	<b>5</b>
3.1 Eichen unserer Ausgangsspannung	6
3.2 Probleme beim Schaltungsaufbau	7
3.3 Wie funktioniert unsere letztendliche Schaltung?	7
<b>4. Anwendungsmöglichkeiten</b>	<b>9</b>
<b>5. Literatur</b>	<b>9</b>
<b>Danksagung</b>	<b>9</b>

## 1. Warum eigentlich berührungslose Temperaturmessung?

Wir sind eigentlich durch eine andere Jugend-Forscht-Gruppe auf die Idee unseres Projektes gekommen. Sie wollten nämlich die Temperatur eines erhitztem Stück Glas wissen. Dabei hatten sie das Problem, dass sie die Temperatur des Glases nicht mit einem herkömmlichen Thermometer messen können, weil sich das Glas an der Stelle, wo man den Fühler aufsetzt, sofort abkühlt. Außerdem ist die Kontaktfläche nur sehr klein und der Fühler nimmt nicht die Temperatur des Glases an. Also haben wir uns gesagt, dass wir den armen Mädchen helfen wollen. (Viele Grüße an Maria und Miriam!) Dadurch sind wir zu diesem Thema gekommen.

Wir wollen einmal mit der Frage beginnen, was wir überhaupt konstruieren möchten. Wir bauen ein Gerät, mit dem man Temperaturen von Gegenständen messen kann. Dabei entsteht bei einem konventionellen Thermometer oder einem Digitalthermometer mit Sensor aber ein Problem, wenn man zum Beispiel die Temperatur einer Herdplatte messen will. Wenn man ein normales Quecksilberthermometer oder den Sensor eines Digitalthermometers an die Herdplatte hält, hat es erstens nur eine sehr geringe Kontaktfläche, das heißt, das Quecksilber im Thermometer (oder der meist runde Sensor eines Digitalthermometers) kann sich nicht richtig erwärmen. Außerdem ergibt sich das Problem, dass sich die Herdplatte an der Stelle, wo man das Thermometer oder den Sensor andrückt, abkühlt. Dadurch würde in beiden Fällen ein verfälschtes Ergebnis auftreten. Was gibt es da für eine Lösung? Man muss die Temperatur ohne Berührung messen. Aber wie soll das gehen? Also, wenn man seine Hand etwa sieben cm über eine heiße Herdplatte hält, merkt man, dass sie Wärme abstrahlt. Diese Wärme strahlt die Platte als für das menschliche Auge unsichtbare Infrarotstrahlung ab. Es gibt Sensoren, die das Infrarotlicht „einfangen“ und in einen Strom- oder Spannungswert umwandeln. Der Wert kann dann von einem Messgerät angezeigt werden. Wir entwickeln also ein Gerät, mit dem man eine Temperatur ohne Berührung des Gegenstandes messen kann.

## 2. Vom Licht zur Spannung

### 2.1 Verwendete Sensoren

Wir haben mit zwei verschiedenen Sensoren Versuche gemacht. Im Sensor (Typ: Licht/Spannungswandler TSL260, siehe Abbildung 1) sind bereits alle notwendigen Verstärkerkomponenten integriert, dadurch ist keine weitere Elektronik notwendig. Weil aber die Komponenten in dem Sensor integriert sind, bleibt aber keine Möglichkeit, verschiedene Empfindlichkeitsstufen einzustellen.

Anders dagegen bei der Schaltung mit der Photodiode BPW34 (Abbildung 2 auf der nächsten Seite). Sie ist ein „reiner“ Sensor ohne eingebaute Verstärkerkomponenten. Diese ist zwar nicht nur im infraroten, sondern auch im Bereich des sichtba-

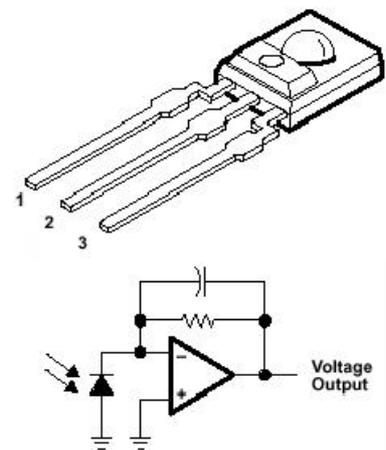


Abb. 1: Ansicht und Innenschaltung des Sensors TSL 260

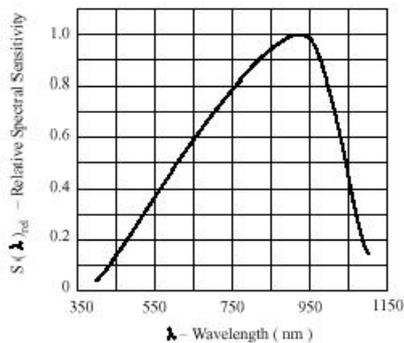


Abb. 3: Spektrale Empfindlichkeit der BPW34

## 2.2 Schaltungsaufbau

Die allerersten Versuche mit einer Schaltung für die Fotodiode BPW34 haben wir auf einer Experimentierplatine gemacht. Sie besteht aus einem Operationsverstärker U1, der den Strom der Photodiode in eine Spannung umwandelt, und einem zweiten

ren Lichtes empfindlich, man kann aber durch einen vorgeschalteten Infrarotfilter das Tageslicht ausblenden. Es ist zwar eine Schaltung zu entwerfen, aber bei dieser Schaltung ist der Vorteil, dass man sie nach belieben verändern kann. Also kann man auch verschiedene Empfindlichkeitsstufen einbauen. Abbildung 3 zeigt, dass sie im Bereich von ca. 370 nm bis zu 1100 nm empfindlich ist. Bei 950 nm - das ist der für uns interessante Infrarot-Bereich - ist sie am empfindlichsten.



Abb. 2: Die Diode BPW34

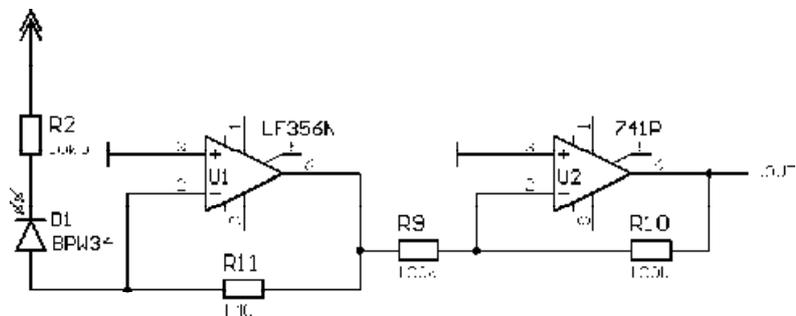


Abb. 5: Schaltung unseres ersten Messaufbaues

OP U2, der das Vorzeichen der Ausgangsspannung von U1 umkehrt (siehe Abb. 5). Dabei haben wir aber festgestellt, dass die Schaltung schwingt. Man mag zwar manchmal denken, dass es gut ist, wenn eine Schaltung schwingt, zum Beispiel bei einem Funksender. In diesem Falle ist das Schwingen aber unerwünscht, weil es ein Messen der Ausgangsspannung unmöglich macht. Mit einigen Kondensatoren haben wir das aber wieder auf die Reihe bekommen. Die Kondensatoren haben wir deshalb eingebaut, weil sie wie eine „Bremse“ für die (verhältnismäßig) schnellen Spannungswechsel wirken und nur langsame Spannungswechsel zulassen.

Um die Schaltung transportabel zu machen, haben wir sie dann auf einer Lochrasterplatine in Fädertechnik aufgebaut. Da aber Fädeldraht wie eine Antenne wirkt, hat auch dieser Aufbau so stark geschwungen, dass wir es nicht mehr geschafft haben, das Schwingen unter Kontrolle zu kriegen. Also mussten wir eine gedruckte Schaltung herstellen. Daraufhin wurde das Schwingen weniger, sodass wir es mit geschirmten Kabeln und einigen Kondensatoren an strategisch wichtigen Punkten unter Kontrolle bekommen konnten. Geschirmte Kabel sind dazu da, dass das zu messende Signal nicht dadurch gestört wird, dass es wie eine Antenne unerwünschte Fremdsignale einfängt und damit auf andere Komponenten der Schaltung zurückwirkt. Die Schaltung war daraufhin betriebsbereit.

### 2.3 Funktionstest

Wir haben zuerst einmal mit einem Digitalvoltmeter ausprobiert, ob das Gerät überhaupt auf Licht reagiert. Die Schaltung hat sehr gut auf das Glühlampenlicht reagiert. Bei den beiden empfindlichsten Stufen war die Aussteuergrenze des Operationsverstärkers erreicht, bei den anderen beiden noch nicht. Wir hatten also vier Empfindlichkeitsstufen eingebaut. (Es waren eigentlich fünf Stufen geplant, aber die fünfte Stufe, die am unempfindlichsten ist, hat so stark geschwungen, dass wir keine sinnvollen Messwerte erhalten haben.) Nach der Fertigstellung der Schaltung der Fotodiode BPW34 haben wir die Schaltung, die Fotodiode und den Lichtsensor in ein Metallgehäuse eingebaut, welches geerdet und mit Klebefolie gegen Fremdlicht abgedichtet ist. Als nächsten Schritt haben wir über alle vier Empfindlichkeitsstufen mit der BPW34 und zum Vergleich mit dem TSL260 eine Kontrollmessung am Brennofen der Mädchen vorgenommen und in einer Tabelle notiert.

### 3. Messergebnisse

Unsere Tabelle enthält folgende Einträge: In der ersten Spalte die von dem im Brennofen eingebauten Thermometer angezeigte Temperatur, in der zweiten Spalte den eingestellten Messbereich der BPW34, in der dritten Spalte die gemessene Spannung und in der vierten Spalte die Ausgangsspannung des TSL260. Den prinzipiellen Aufbau dieser Tabelle sieht man in der Abb. 6.

Temperatur	Bereich	BPW34	TSL260
640	100	4,75	0,16
660	100	6,88	0,24
680	10	0,93	0,33
700	10	1,24	0,45
720	10	1,7	0,61
°C	-	V	V

Abb. 6: Beispiel unserer Excel-Tabellen

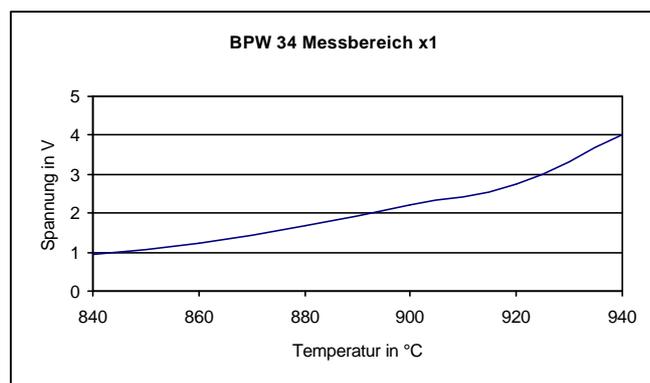
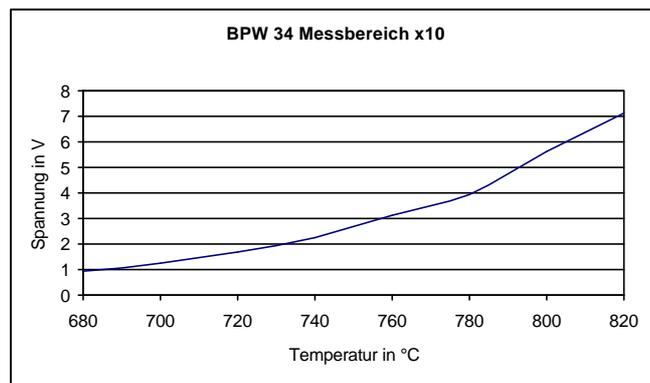
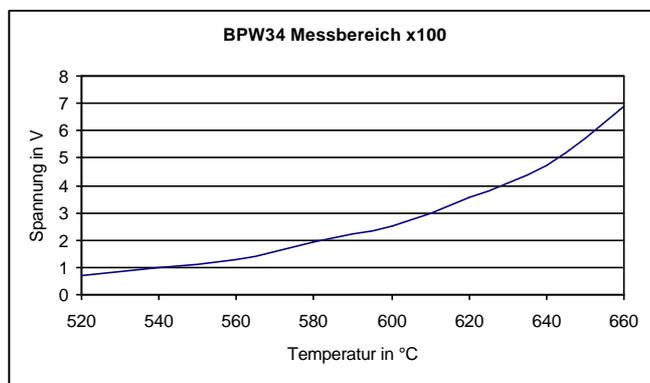
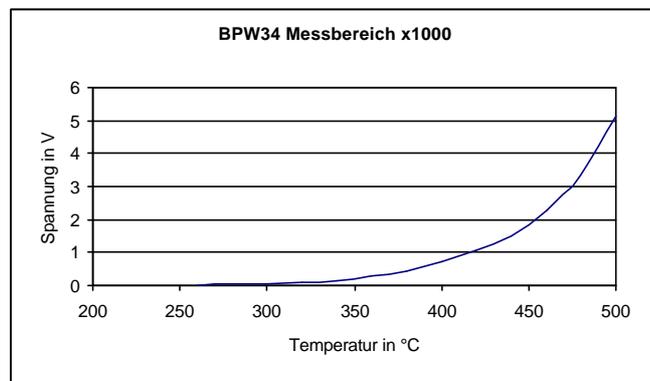


Abb. 7: Gesamtübersicht über die Messkurven (BPW34)

### 3.1 Eichen unserer Ausgangsspannung

Bei dem Eichen des Gerätes an einem speziellen Hochtemperaturofen ist herausgekommen, dass die Werte nicht proportional sind. Das kommt daher, dass die Strahlungsleistung mit der vierten Potenz der Temperatur zunimmt. (Stefan-Boltzmannsches Strahlungsgesetz [1]) Unser Betreuungslehrer hat uns gezeigt, dass die von der BPW34 gemessenen Spannungen mit dem Quadrat der vierten Potenz der Temperatur zunehmen. Nach dem Datenblatt der BPW34 hätten wir erwartet, dass die Spannung proportional zur vierten Potenz ansteigt. Warum das nicht so ist, können wir leider nicht erklären.

Mit der Schaltung der Fotodiode BPW34 haben wir einen sehr großen Messbereich. Die Schaltung liefert im Bereich von 200°C bis etwa 960°C sehr gut brauchbare und reproduzierbare Werte. Die folgende Tabelle enthält die verschiedene Empfindlichkeitsstufen mit ihrem dazugehörigen Messbereich:

Sensor	Messbereich	Minimal- Temperatur	Maximal- Temperatur
BPW34	1000	200	500
BPW34	100	520	660
BPW34	10	680	820
BPW34	1	840	960
TSL		280	800
-	-	°C	°C

Abb. 8: Tabelle der einzelnen Messbereiche

Wie man der Tabelle entnimmt, wird der Messbereich mit zunehmender Temperatur kleiner wird. Das kommt wegen der vierten Potenz, denn je höher die Temperatur wird, desto steiler wird der Graph (siehe Abb. 7).

Abbildung 9 kann man entnehmen ist, dass der TSL260 insgesamt einen verhältnismäßig großen Messbereich hat, der aber immer noch kleiner ist als bei unserer umschaltbaren Schaltung mit der Fotodiode BPW34. Das ist eben der Nachteil, wenn man nichts an der Elektronik verändern kann. Die BPW34 hat einen noch größeren Messbereich als der TSL260, aber man muss nach bestimmten Temperaturwerten – der Tabelle zu entnehmen - umschalten. Man könnte, wenn man will, noch mehr Messbereiche einbauen. Der Widerstand, der an den Schalter angeschlossen wird, darf aber keinesfalls kleiner sein als der Schutzwiderstand der Fotodiode (R2 im Schaltplan), weil man sonst nur unbrauchbare Werte messen würde.

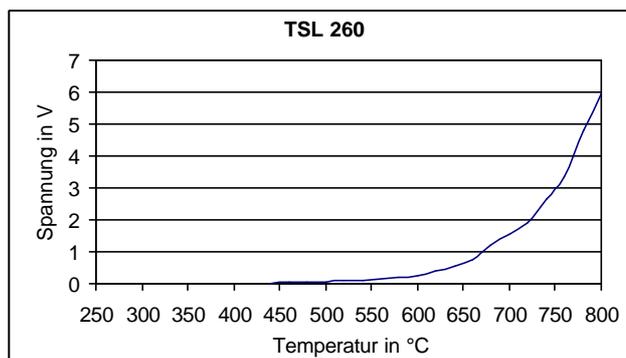


Abb. 9: Messkurve für den TSL260

### 3.2 Probleme beim Schaltungsaufbau

Bei all den Versuchen ist auch herausgekommen, dass wir es mit einer „Problem“-Schaltung zu tun hatten. Die Schaltung an sich war schnell entworfen und gebaut, aber das Debugging war das schwierigste. Wir hatten es damit zu tun, dass die Schaltung unerwünscht schwingt. Das war wohl das schwierigste. Wir haben Stunden um Stunden gegessen um es herauszubekommen. Man musste:

- 1.) Abgeschirmte Kabel verwenden
- 2.) Kurze Signalwege verwenden
- 3.) Mehrere Kondensatoren einbauen, die die hohen Frequenzen puffern (Es war mehr oder weniger Glück, dass wir die richtigen Stellen für sie gefunden haben, denn so etwas ist nirgendwo dokumentiert. Außerdem hängt es von der Bauweise der Schaltung genauso wie von der Länge der Signalwege ab, welchen Wert die Kondensatoren haben müssen und wo sie eingebaut werden.)
- 4.) Ein geschirmtes, geerdetes Gehäuse benutzen.

### 3.3 Wie funktioniert unsere letztendliche Schaltung?

Also, wir wollen mal anfangen mit der Schaltung der Fotodiode BPW34. Wie man (hoffentlich) weiß, läßt eine Fotodiode mit zunehmender Helligkeit immer mehr Strom (nicht Spannung) durch. Der erste Operationsverstärker, ein LF357N, wandelt den Strom, der durch die Diode fließt, in Spannung um. Das funktioniert so, dass der OP seine Ausgangsspannung so lange erhöht, bis der

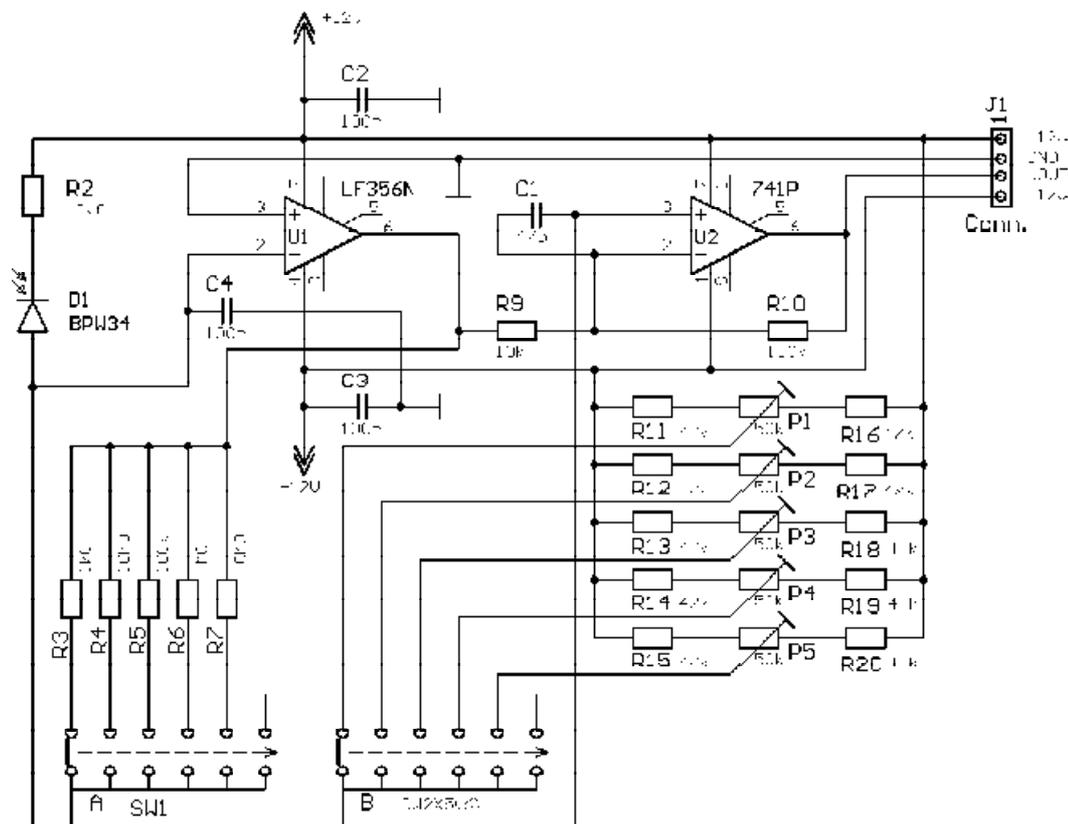


Abb. 10: Schaltung für die BPW34 mit Messbereichumschaltung und Entstörkondensatoren

Strom durch den Gegenkopplungswiderstand (R3...R7) genauso groß ist wie der von der Diode gelieferte Strom. Je höher der Widerstand ist, desto empfindlicher ist die Elektronik. Über einen Widerstand mit dem Wert von 10k geht die Ausgangsspannung in den invertierenden Eingang des zweiten OP's, ein LF356N, und wird von diesem noch einmal um den Faktor 10 verstärkt. Da aber kein Operationsverstärker und keine Fotodiode perfekt ist, liegt auch bei nicht angeschlossener Diode, oder wenn die Diode angeschlossen und komplett abgedunkelt ist, immer noch eine Spannung an. Diese Spannung nennt man Offsetspannung. Um die Offsetspannung zu kompensieren, wird an dem zweiten, nicht-invertierenden Eingang eine der Offsetspannung entsprechende Gleichspannung angelegt. Dieser Vorgang nennt sich Offsetspannungskompensation. In unserem Falle ist das so realisiert, dass der eine Anschluss eines Potentiometers über einen Widerstand von 47k mit +12V verbunden ist, der andere Anschluss ist über einen Widerstand von 47k mit -12V verbunden.

Der Schleiferanschluss des Potis ist an den nicht-invertierenden Eingang des zweiten OP's angeschlossen. Je nach dem, in welche Richtung man das Poti dreht, kommt entweder positive oder negative Spannung an dem Anschluss an. Da es ja ein Potentiometer ist, lässt sich die Spannung nach Belieben verändern. Weil wir aber vier verschiedene Empfindlichkeitsstufen eingebaut haben, liegt in jeder Stufe eine andere Offsetspannung an. Also müssen vier Potis verwendet werden, bei denen jeweils die Anschlüsse über einen Widerstand von 47k mit +12V oder -12V verbunden sind. Die Schleiferanschlüsse der Potentiometer haben wir dann an einen Vierstufen-Schalter angelötet. Je nach Schaltstufe wird immer die entsprechende Spannung an den Eingang des OP's geleitet. Für den empfindlichsten Messbereich haben wir nachträglich noch ein weiteres Poti eingebaut, das von außen zugänglich ist und mit dem vor Beginn einer Messung der Nullpunkt genau auf Null gestellt werden kann.

Wie schon im vorherigen Text erwähnt, haben wir vier Empfindlichkeitsstufen eingebaut. Aber warum? Es würde doch eine Empfindlichkeitsstufe reichen, die bis etwa 1000 Grad gehen würde. Nein, eine Empfindlichkeitsstufe würde nicht reichen. Wenn man zum Beispiel eine verhältnismäßig niedrige Temperatur (zum Beispiel 243,4°C) genau messen will, würde das Gerät nicht die exakte Temperatur anzeigen, weil ein Digit (eine Anzeigeeinheit) in diesem Falle 10°C wäre. Also ist in diesem Falle das Messergebnis zu ungenau. Also braucht man doch verschiedene Empfindlichkeitsstufen. Aber wie ist das zu realisieren? Wir haben ja einen Schalter eingelötet. Dieser ist ein doppelter Vierstufenumschalter (2 x 4 Eingänge, 1 Ausgang). Der Schalter schaltet zwischen vier Widerständen um, welche zwischen dem invertierenden Eingang und dem Ausgang des ersten Operationsverstärkers (OP) liegen. Das ist in unserer Schaltung so gemacht, dass der invertierende Eingang des ersten OP's am Ausgang des Schalters liegt. Je ein Anschluss der Widerstände (Werte: 10 k, 100 k, 1 M, 10 M) ist mit dem Ausgang des ersten OP's verbunden. Der andere Anschluss der Widerstände ist an den vier Eingängen des Schalters angeschlossen, nach folgendem Muster: Widerstand 10 k – Eingang 1 des Schalters, Widerstand 100 k – Eingang 2 des Schalters und so weiter.

#### **4. Anwendungsmöglichkeiten**

Mit unserem Gerät kann man Temperaturen in einem Bereich zwischen 200°C und 960°C berührungslos messen. Damit lässt sich z.B. die Temperatur einer Herdplatte oder eines Backofens messen. Sie wäre aber auch geeignet, um die Brennraumtemperatur eines Töpferofens oder eines Metallschmelzofens zu überwachen. Da die Messwerte als Spannung vorliegen, können sie auch einfach weiterverwendet und z.B. von einem Computer ausgewertet werden. Grundsätzlich kann jedes Objekt gemessen werden, das groß genug ist, dass es das „Blickfeld“ des Sensors, das wir deswegen durch ein Röhrchen eingegrenzt haben, vollständig ausfüllt. Probleme könnte es also mit der Temperatur eines Glühfadens einer Lampe geben, weil dieser sehr dünn ist und der Sensor auch den kälteren Hintergrund „sieht“. Das gleiche Problem ergibt sich, wenn man die Temperatur einer Gasflamme messen will, weil auch diese „durchsichtig“ ist. Mit einer Kerzenflamme könnte das vielleicht klappen, aber diese ist etwas heißer, als wir messen können. Aber die Temperatur der Glut eines Holz- oder Kohlefeuers könnte man problemlos messen. Da manche Glassorten das Infrarotlicht schlecht durchlassen, können Gläser (z.B. bei einem Backofen) das Ergebnis verfälschen.

#### **5. Literatur**

- [1] Dorn, Bader: Physik-Oberstufe Band O, Verlag Hermann Schroedel, Hannover 1976, Seite 151
- [2] U. Tietze, Ch. Schenk: Halbleiterschaltungstechnik, Springer-Verlag, Berlin 1978
- [3] J. Grehn, J. Krause (Hrsg.): Metzler Physik, Verlag Metzler / Schroedel, Hannover 1998
- [4] Datenblätter der Firma Conrad electronic zur Photo-Diode BPW 34 von Siemens
- [5] Datenblätter der Firma Conrad electronic zum IR-Sensor TSL 260 von Texas Instruments

#### **Danksagung**

Wir bedanken uns bei unserem Betreuungslehrer Herrn StD Thomas Biedermann für seine unendliche Geduld und seine (fast) unendliche Zeit. Außerdem bedanken wir uns bei der ganzen Familie Biederman, die unseren Keks- und Kuchenbedarf gestillt hat. Dank gilt auch Maria und Miriam aus einer anderen JuFo-Gruppe, denn ohne deren Hochtemperaturofen wäre ein Eichen des Gerätes unmöglich gewesen. Auch der Förderstiftung Jugend Forscht gilt ein besonderer Dank, da sie das Experimentieren erst möglich gemacht hat. Außerdem möchten wir uns bei allen bedanken, die bei unseren Versuchen auch nur in irgendeiner Weise mitgeholfen haben.

DANKE!!!