

**Projekt (Stufe 1): Temperatur-Regelung (Analogschaltungen)**

**Inhaltsverzeichnis**

- 1. [Einführung](#)
- 2. [Halbleiterdioden als Temperatursensoren](#)
- 3. [Aufbau und Kalibrierung des Temperatursensors](#)
- 4. [Aufbau der Leistungsstufe für die Widerstandsheizung](#)

**1. Einführung**

Dieser Versuch ist die *erste* Stufe des Projektes für eine Temperatur-Regelung: Dieser (zunächst sehr willkürlich erscheinende) ausgewählte Anwendungsfall ist ein recht typisches und lehrreiches Beispiel. Die von Ihnen dabei gewonnenen Erkenntnisse und praktisch realisierten Schaltungen sind auch für die weiteren Versuche nützlich und erforderlich. Wir werden hier auch einige Konzepte aus der Analog-Elektronik einsetzen und gezielt weiterentwickeln.

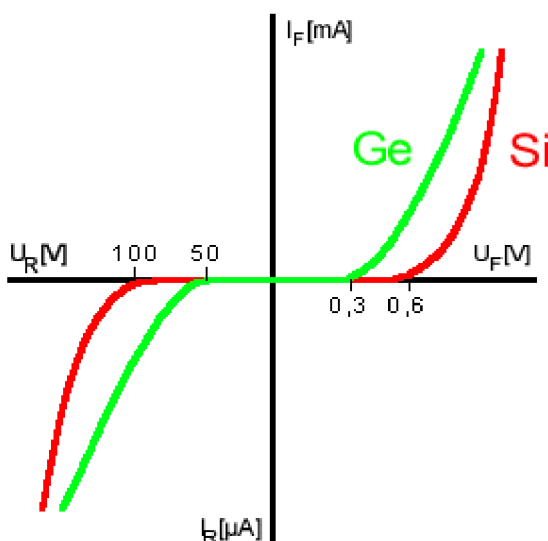
**Die Problemstellung:**

Ein offenes physikalisches System (z.B. eine Probe auf einem Halter) soll auf einer möglichst konstanten und frei wählbaren Temperatur gehalten werden, die sich von der Umgebungs-Temperatur unterscheidet. Je nach Temperatur ist dazu entweder eine Kühlung oder eine Heizung erforderlich - oft findet man beide (z.B. in Kryostaten). Mit einer Widerstands-Heizung ist eine Wärmezufuhr einfach realisierbar. Da die Wärmeabgabe des Systems an die Umgebung zeitlich nicht konstant ist (wie z.B. in einem sog. Durchfluss-Kryostaten im kalten Gasstrom), wird sich bei konstanter Heizleistung nie eine stabile Temperatur einstellen lassen. Deshalb ist eine Rückkopplung im System erforderlich, d.h. die tatsächliche Temperatur (Ist-Wert) ist zu messen, mit dem (vorgegebenen) Sollwert zu vergleichen und eine von der Temperatur-Differenz abhängige Heizleistung zuzuführen.

**2. Halbleiterdioden als Temperatursensoren**

Zur elektrischen Messung physikalischer Größen wie Druck, Temperatur u.a. sind entsprechende Bauelemente (Sensoren) erforderlich, die ein elektrisches Signal liefern. Als Sensoren für Temperatur-Messungen können Thermoelemente, temperaturabhängige Widerstände (NTC, PTC) und Halbleiter-Dioden eingesetzt werden. Zu beachten ist jeweils der geforderte Temperaturbereich, denn jeder Temperatur-Sensor ist nur für einen bestimmten Messbereich geeignet.

Aus dem Versuch 1 im vorigen Semester sind Ihnen Halbleiter-Dioden und einige ihrer Anwendungen bereits bekannt. Die Abb.1 zeigt stark schematisch den Verlauf der I-U-Kennlinien von Ge- bzw. Si-Dioden, die Ihnen aus Ihren eigenen Messungen sicher noch in Erinnerung sind.



**Abb.1 I-U-Kennlinien (schematisch)**

Halbleiterdioden sind nicht nur wegen der Gleichrichtereigenschaften von praktischem Interesse, sie sind auch als Temperatursensoren einsetzbar. Wie in Abb.2 zu sehen ist, hängt die I-U-Kennlinie offensichtlich von der Temperatur des pn-Übergangs ab: mit steigender Temperatur wachsen die Ströme sowohl in Sperr- als auch in Durchlass-Richtung.

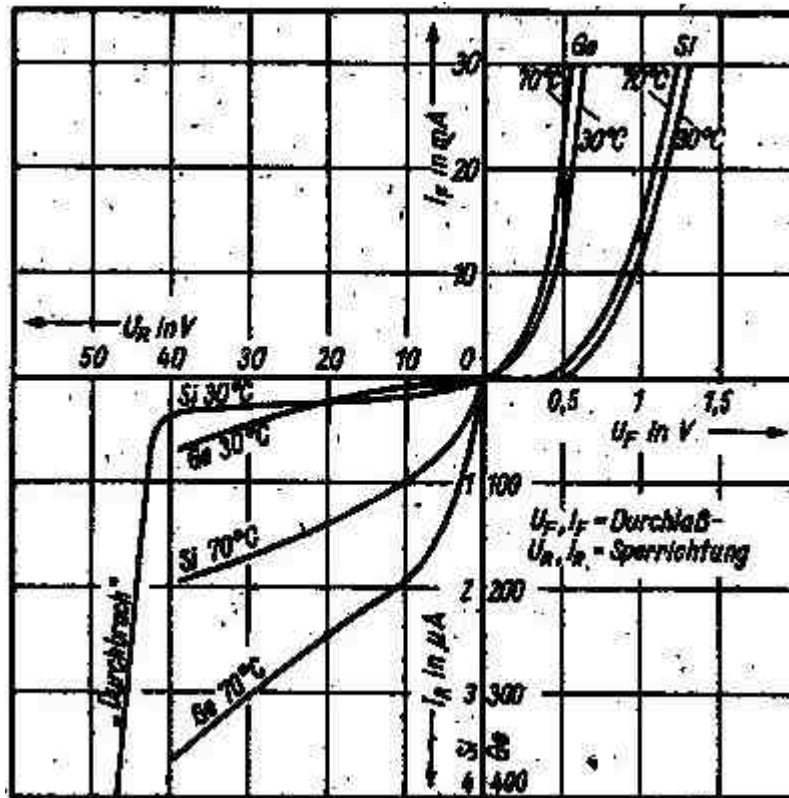


Abb.2 I-U-Kennlinien für verschiedene Temperaturen

Wie erklärt sich dieses Temperaturverhalten?

Aus der Betrachtung eines p-n-Überganges kann unter bestimmten (hier nicht genannten) Voraussetzungen die Beziehung für die I-U-Kennlinie einer idealen Diode (Shockley-Gleichung) abgeleitet werden:

$$I(U) = I_S \cdot \{ \exp(q_0 \cdot U / k \cdot T) - 1 \} \quad (1)$$

Es sind hier  $q_0 = 1.602177 \cdot 10^{-19}$  As die Elementarladung,  $k = 1.380658 \cdot 10^{-23}$  J·K<sup>-1</sup> die Boltzmann-Konstante und T die Temperatur in K. Der Sättigungssperrstrom  $I_S$  ist temperaturabhängig gemäß der Beziehung

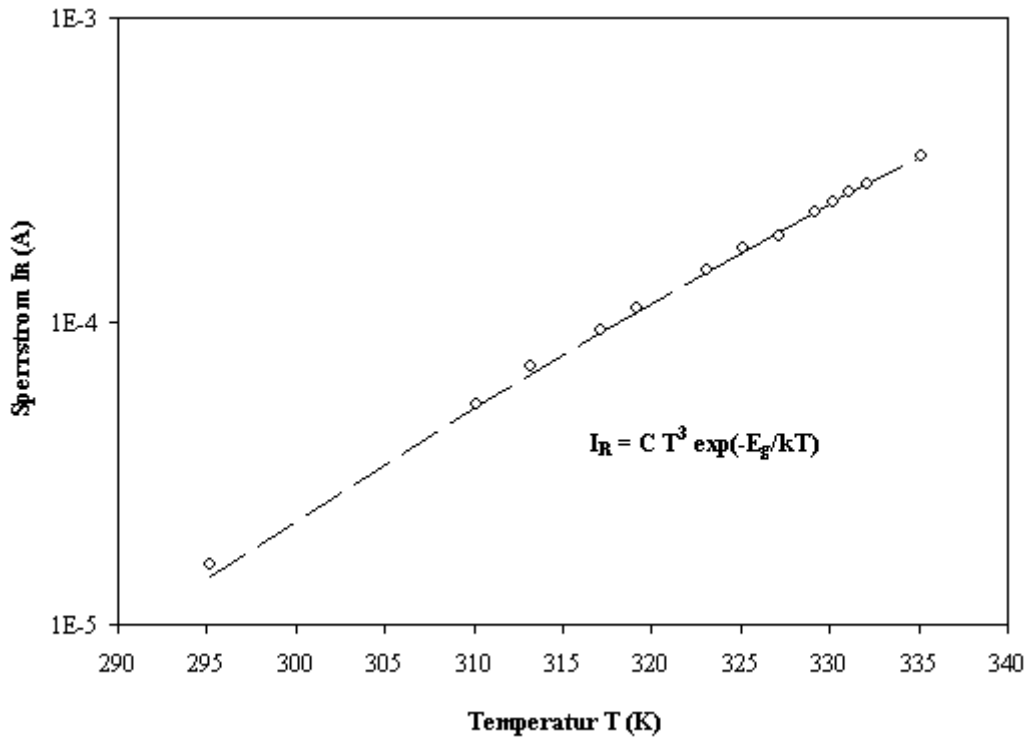
$$I_S = c \cdot T^3 \cdot \exp(-E_g / k \cdot T) \quad (2)$$

Mit  $E_g$  bezeichnen wir die Breite der verbotenen Zone (0.6 eV für Ge, 1.1 eV für Si bei Raumtemperatur;  $E_g$  ist temperatur- und materialabhängig), mit c eine nicht näher bezeichnete Konstante. Diese Relation ist nur für pn-Übergänge in Ge für genügend hohe Temperaturen ( $T \geq 300$  K) recht gut erfüllt (Dominanz des Diffusionsstromes gegenüber Generationsströmen). Für andere Halbleiter wie Si und insbesondere tiefere Temperaturen müssen weitere Effekte berücksichtigt werden, auf die wir hier nicht eingehen können. In Ge-Dioden sind die Sperrströme wegen der höheren Eigenleitungs-Konzentration  $n_i$  größer als in anderen Halbleiterdioden und daher wesentlich leichter messbar. Wir betrachten hier für unsere Zwecke ein Temperaturintervall, in dem  $E_g$  eine vernachlässigbar schwache Temperaturabhängigkeit aufweist und daher als konstant angenommen werden darf.

Betreibt man die Diode in Sperrrichtung bei einer genügend großen Spannung in Sättigung (aber noch weit jenseits des Durchbruchs), so wird die Temperaturabhängigkeit des Sperrstroms  $I_R$  durch  $I_S$  bestimmt. Dabei überwiegt die exponentielle Abhängigkeit in (2), d.h. näherungsweise ist ein Verhalten zu erwarten wie

$$I_R \propto \exp(-E_g / k \cdot T) \quad (3)$$

Diesen Sachverhalt belegt die Abb.3: Die Messung erfolgte an einer Ge-Diode desselben Typs, der im Versuchsaufbau eingesetzt werden soll. Die Messung erfolgte bei einer Sperrspannung von  $U_R = -5$  V. Der Sperrstrom bei Raumtemperatur lag bei 18  $\mu$ A. Wie dieses Ergebnis zeigt, ist für den Zweck einer elektrischen Temperaturmessung eine hinreichend starke Abhängigkeit gegeben - allerdings eine *nichtlineare*. Für praktische Anwendungen ist meist aber ein linearer Zusammenhang erwünscht, der sich mit zusätzlichem Schaltungsaufwand (z.B. mit einem logarithmischen Verstärker) herstellen lässt. Eine lineare Abhängigkeit zwischen Temperatur und elektrischer Messgröße lässt sich aber auch auf andere Weise erreichen, wie wir gleich sehen werden.



**Abb.3 Temperaturabhängigkeit des Sättigungsstroms**

In Durchlassrichtung ist eine exponentielle Temperaturabhängigkeit des Flussstromes in der Form

$$I_F \propto \exp(-(E_g - q_0 \cdot U)/k \cdot T) \quad (4)$$

zu erwarten. Für eine hinreichend große Flussspannung, d.h. unter der Bedingung  $U_F \gg k \cdot T/q_0$ , gilt als Näherung für (1) die Relation

$$I_F \cong I_S \cdot \exp(q_0 \cdot U_F/k \cdot T) \quad (5a)$$

bzw. in Umkehrung

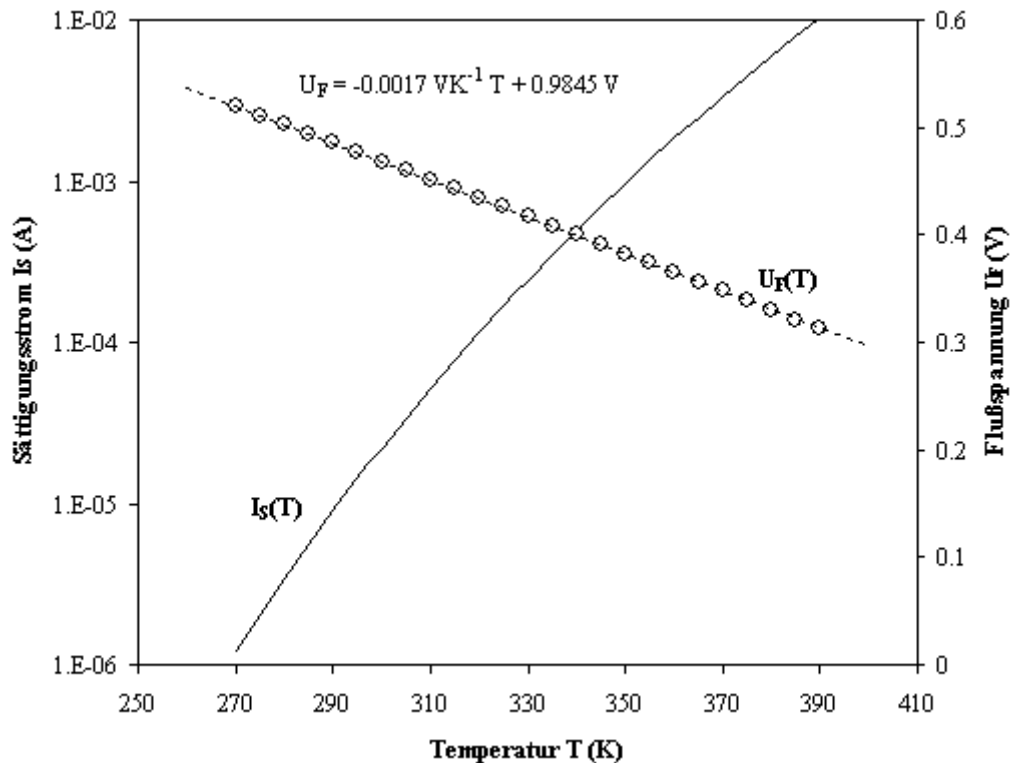
$$U_F \cong k \cdot T/q_0 \cdot \ln(I_F/I_S) \quad (5b)$$

über mehrere Größenordnungen des Flussstromes. Setzt man nun in die Beziehung (5b) die Beziehung (2) für den Sättigungsstrom ein, so zeigt sich für die Flussspannung bei *konstantem* Flussstrom mit der Zusatzbedingung  $I_F > I_S$  (die für das gesamte interessierende Temperatur-Intervall einzuhalten ist!) eine näherungsweise *lineare* Abhängigkeit von der Temperatur. Die exponentielle Temperatur-Abhängigkeit für den Sättigungsstrom wird hier praktisch durch den logarithmischen Zusammenhang zwischen Spannung und Strom ausgeglichen.

Der Spannungsabfall über die Diode verringert sich dabei um etwa 2 mV für einen Temperaturanstieg um 1 K:

$$\Delta U_F/\Delta T \cong -2 \text{ mV} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6)$$

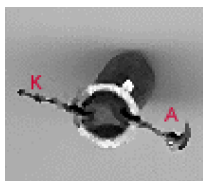
In Abb.4 ist diese Abhängigkeit für eine Ge-Diode veranschaulicht. Für Si erhält man übrigens i.a. einen etwas geringeren Temperatur-Koeffizienten als für Ge. Diese Betriebsart (Diode in Flussrichtung) ist eben wegen der Linearität über einen relativ großen Temperaturbereich die allgemein übliche für eine Temperaturmessung mit Halbleiter-Dioden. Allerdings ist dafür eine zusätzliche Schaltung für eine Konstantstromquelle notwendig, die mit relativ einfachen Mitteln praktisch realisierbar ist.



**Abb.4 Temperaturabhängigkeit der Flußspannung (Konstantstrombetrieb)**

### 3. Aufbau und Kalibrierung des Temperatursensors

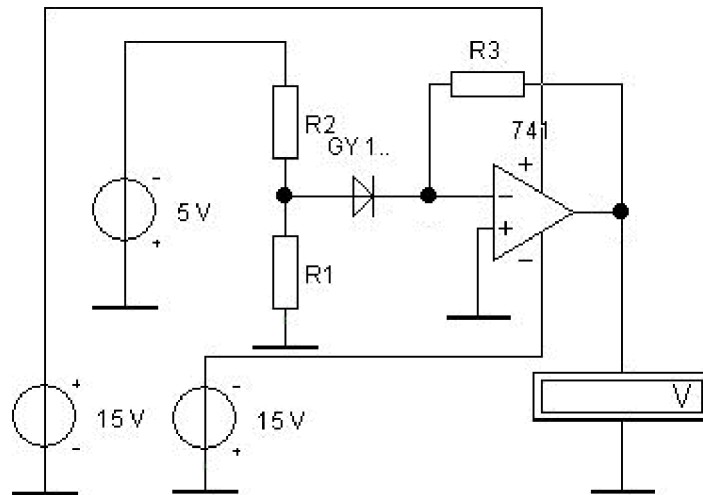
Für den von uns zu realisierenden Anwendungsfall wollen wir im Temperatur-Bereich von Raum-Temperatur bis maximal  $100^\circ\text{C}$  arbeiten. Die später mit der Temperatur-Regelung zu erreichende Soll-Temperatur soll bei ca.  $80^\circ\text{C}$  liegen. Die einzusetzenden Ge-Dioden (Kleinleistungs- Gleichrichter) vom Typ GY 1... (s. Abb.5) im Metallgehäuse weisen typische Sättigungssperrströme von  $10\text{-}50 \mu\text{A}$  auf. Die maximale Sperrspannung erreicht wenigstens  $-12 \text{ V}$ . Der maximal zulässige Flußstrom in Durchlassrichtung liegt bei  $100 \text{ mA}$  für eine Spannung von  $U_F = 0.5 \text{ V}$ . Diese Werte gelten für *Raumtemperatur*. Normalerweise werden Ge- Bauelemente nicht oberhalb von  $80^\circ\text{C}$  betrieben. Da wir in unserem Projekt auch *höhere* Temperaturen erreichen wollen, sollten wir aber die angegebenen *Grenzwerte* für Spannung und Strom möglichst nicht voll ausnutzen.



**Abb.5 Ge-Diode GY 1.. (Ansicht von unten)**

Überprüfen Sie durch eigene Messung (Widerstandsmessung mit dem DC-Multimeter, Vorsicht!) die korrekte Pinbelegung der Ge-Diode! Aus dem vorhandenen Bestand ist für Ihre weitere Arbeit eine Diode mit möglichst kleinem Sättigungs-Sperrstrom (günstig wären etwa  $10\text{-}20 \mu\text{A}$  bei Raumtemperatur) auszusuchen: Überlegen Sie sich, wie (Schaltung) und womit (Messgerät) Sie den Sättigungs-Sperrstrom praktisch ausmessen könnten!

**Anmerkung:** Unter Umständen sind die Sperrströme von Dioden mit den verfügbaren Multimetern (kleinster DC-Strommessbereich  $200 \mu\text{A}$ ) nicht mehr zuverlässig messbar. Für diesen Fall wäre ein Strom-Spannungs-Wandler (z.B. mit dem OPV LM741 gemäß der Abb.6) einzusetzen.



**Abb.6 I-U-Wandler mit OPV**

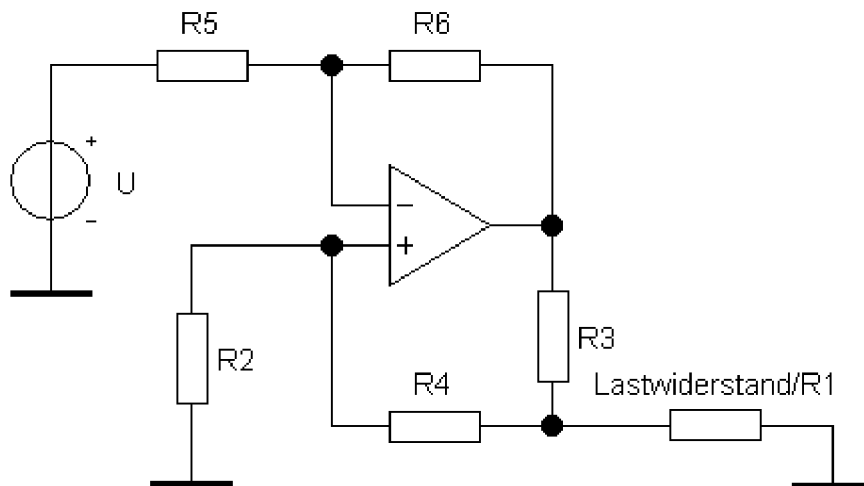
Die Widerstände dieser Schaltung sind geeignet zu dimensionieren:

Mit  $R_1$  und  $R_2$  als Spannungsteiler an einer Konstant-Spannungsquelle (hier -5 V) kann die Sperrspannung (max. -12 V als Grenzwert beachten, s.o.) für die Diode eingestellt werden.  $R_1$  sollte klein im Vergleich zum Widerstand der Diode in Sperr-Richtung sein (warum?).

Der Widerstand  $R_3$  bestimmt die Empfindlichkeit der Schaltung gemäß  $U_a = I_R \cdot R_3$ . Denken Sie daran, dass der Sperrstrom exponentiell mit der Temperatur anwächst - wählen Sie deshalb  $R_3$  nicht zu groß! Mit der Formel (3) kann aus dem Wert bei Raumtemperatur auf den Sättigungsstrom bei 100°C extrapoliert werden.

Sie können und sollten hier EWB wieder einsetzen, in der Bibliothek sind auch Ge- Dioden (z.B. MBR10100) enthalten! Es kann übrigens auch die Temperaturabhängigkeit simuliert werden (Analyse.. Temperatur-Variation.. DC-Arbeitspunkt).

Kontrollieren Sie mit dieser Schaltung Ihre Dioden-Auswahl (Kriterium für den Sättigungsstrom bei Raumtemperatur s.o.)! Prüfen Sie mit einfachen Mitteln nach, ob sich der Sättigungsstrom mit der Temperatur tatsächlich verändert!



**Abb.7 Konstantstromquelle nach Howland**

Für die weitere Arbeit wird die eben ausgesuchte Ge-Diode an einer Konstantstromquelle betrieben. Ein "Lehrbuch-Beispiel" für die Realisierung mit Hilfe eines OPV ist die Konstantstromquelle nach Howland (s. Abb.7).

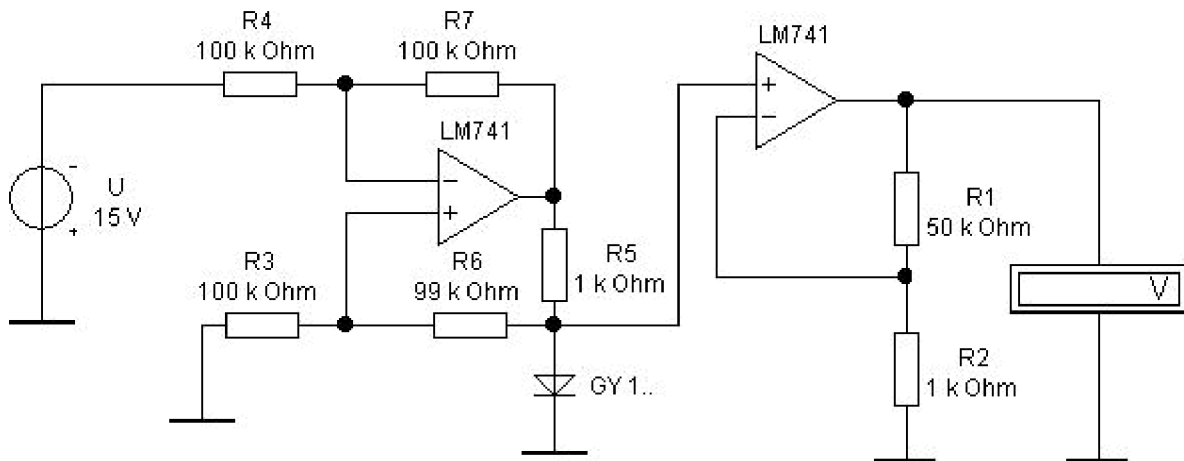
Für die Dimensionierung dieser Schaltung sind folgende Hinweise zu beachten:  $R_2=R_5$  und  $R_6=R_3+R_4$ . Für die Widerstandsverhältnisse muss die Relation  $R_6/R_5=(R_3+R_4)/R_2$  möglichst exakt eingehalten werden. Unter diesen Bedingungen gilt für den Konstant- Strom durch den Lastwiderstand  $R_1$  (der variabel sein kann) die Beziehung  $I_{\text{const}}=U \cdot R_6 / (R_5 \cdot R_3)$ , er kann daher in gewissen Grenzen eingestellt werden.

Zur Einhaltung der o.g. Bedingungen ist eine Vermessung und Auswahl der Widerstände unbedingt erforderlich! Obwohl diese Schaltung einfach und zweckmäßig erscheint, hat sie aber einige Nachteile und wird daher nicht oft eingesetzt: Die Leistungsfähigkeit ist von der offenen Schleifenverstärkung des OPV abhängig, für größere Ausgangsströme müssen die Widerstände relativ klein sein - man erreicht schnell die erlaubten Grenzen für den Ausgangsstrom des OPV (für den LM741 z.B. 25 mA). Beachten Sie in diesem Zusammenhang, dass am Ausgang des OPV ein Stromknoten liegt (der Ausgangsstrom

des OPV fließt über die beiden Zweige mit  $R_6$  und  $R_3$ ).

Anstelle des in Abb.7 symbolisch eingezeichneten Lastwiderstandes soll die Ge-Diode (in Flussrichtung) eingesetzt werden: Ihr Widerstand in Flussrichtung ist zunächst unbekannt. Bestimmen Sie mit dem DC-Multimeter bei Raumtemperatur den Widerstand der Diode in Durchlassrichtung! (Anmerkung: Das verwendete DC-Multimeter arbeitet bei der Widerstandsmessung mit einer Konstantstromquelle, so dass der Flussstrom begrenzt bleibt.) Dieser Widerstand sollte mit der Temperatur abnehmen - prüfen Sie das nach, indem Sie die Diode mit der Hand anwärmen!

Unter Berücksichtigung dieser Überlegungen zur Konstantstromquelle kann nunmehr die Gesamtschaltung für den Temperatursensor mit der Ge-Diode in Flussrichtung aufgebaut werden:



**Abb.8 Gesamtschaltung des Temperatursensors**

**Anmerkungen:**

Die angegebenen Dimensionierungen betrachten Sie bitte lediglich als *erste Anhaltspunkte* zur Orientierung. Sie finden in der Gesamtschaltung die bereits diskutierte Howland-Konstantstromquelle wieder, kritisch ist vor allem deren Dimensionierung - achten Sie unbedingt darauf, dass der erlaubte Ausgangsstrom des OPV von 25 mA *keinesfalls* überschritten wird! Eine Simulation mit EWB ist für eine richtige Dimensionierung empfehlenswert. Verwenden Sie eine Ge-Diode aus der Bauteil-Bibliothek und setzen Sie für den Sättigungsperrstrom ( $I_S$ ) den Wert bei Raumtemperatur für Ihre ausgewählte Diode ein (diese Parameter-Änderung bitte aber nicht abspeichern!); damit kommen Sie durch Variation des Konstantstroms relativ schnell zum Ergebnis.

Die gesamte Schaltung werden wir auch für die weiteren Versuche verwenden: Notieren Sie sich daher alle erzielten Ergebnisse gewissenhaft und lassen Sie diese Schaltung nach erfolgreichem Aufbau unverändert.

**Aufgaben:**

- Bauen Sie die gesamte Schaltung schrittweise auf, beginnen Sie mit der Konstantstromquelle! Beachten Sie die o.a. Hinweise bezüglich der Auswahl der Widerstände - eine Simulation mit EWB ist unbedingt ratsam!
- Die Ge-Diode ist aus praktischen Gründen (Erreichbarkeit der Messorte) mit längen Anschlüssen zu versehen (ca. 15-20 cm sollten genügen). Achten Sie beim Anlöten darauf, die Diode nicht thermisch zu überlasten!
- Zunächst wird der Konstantstrom durch die Diode eingestellt: Wählen Sie gemäß den Vorbetrachtungen einen vernünftigen Wert (unterhalb des Grenzwertes von 25 mA für den OPV, aber noch deutlich größer als der maximal zu erwartende Sättigungs- Sperrstrom, also z.B. 15 mA)! Überzeugen Sie sich von der korrekten Funktionsweise der Schaltung bei Raumtemperatur durch Messung an geeigneten Testpunkten!
- Der temperaturabhängige Spannungsabfall über die Diode wird mit Hilfe eines *nichtinvertierenden* (warum?) Verstärkers gemessen. Dimensionieren Sie den nichtinvertierenden Verstärker so, dass Sie innerhalb linearer Verstärkung eine möglichst große Ausgangsspannung (aber höchstens 10 V wegen der späteren Kopplung an einen ADC!) für den maximalen Spannungsabfall an der Diode (Für welche Temperatur ist dieser Fall gegeben?) erzielen! Überprüfen Sie die korrekte Funktion dieser Verstärkerstufe und verbinden Sie erst danach mit der Diode!
- Kalibrieren Sie die Schaltung: Messen Sie das Ausgangssignal  $U_a$  als Funktion der Diodentemperatur im Bereich von 20°C bis 100°C mit einer hinreichend großen Punktdichte vor allem bei höheren Temperaturen! Prüfen Sie nach, ob tatsächlich ein linearer Zusammenhang besteht und bestimmen Sie den Temperaturkoeffizienten  $\Delta U_a / \Delta T$  aus Ihren Messergebnissen! Ermitteln Sie eine geeignete Näherung ("Eichkurve") für die die Funktion  $U_a(T)$ ! Die ausgeführte

Kalibrierung wird später wieder benötigt, arbeiten Sie deshalb sorgfältig und speichern Sie die ermittelte Abhängigkeit!

Ihr Messergebnis sollte aller Erwartung nach einen Verlauf ähnlich wie in Abb.9 zeigen:

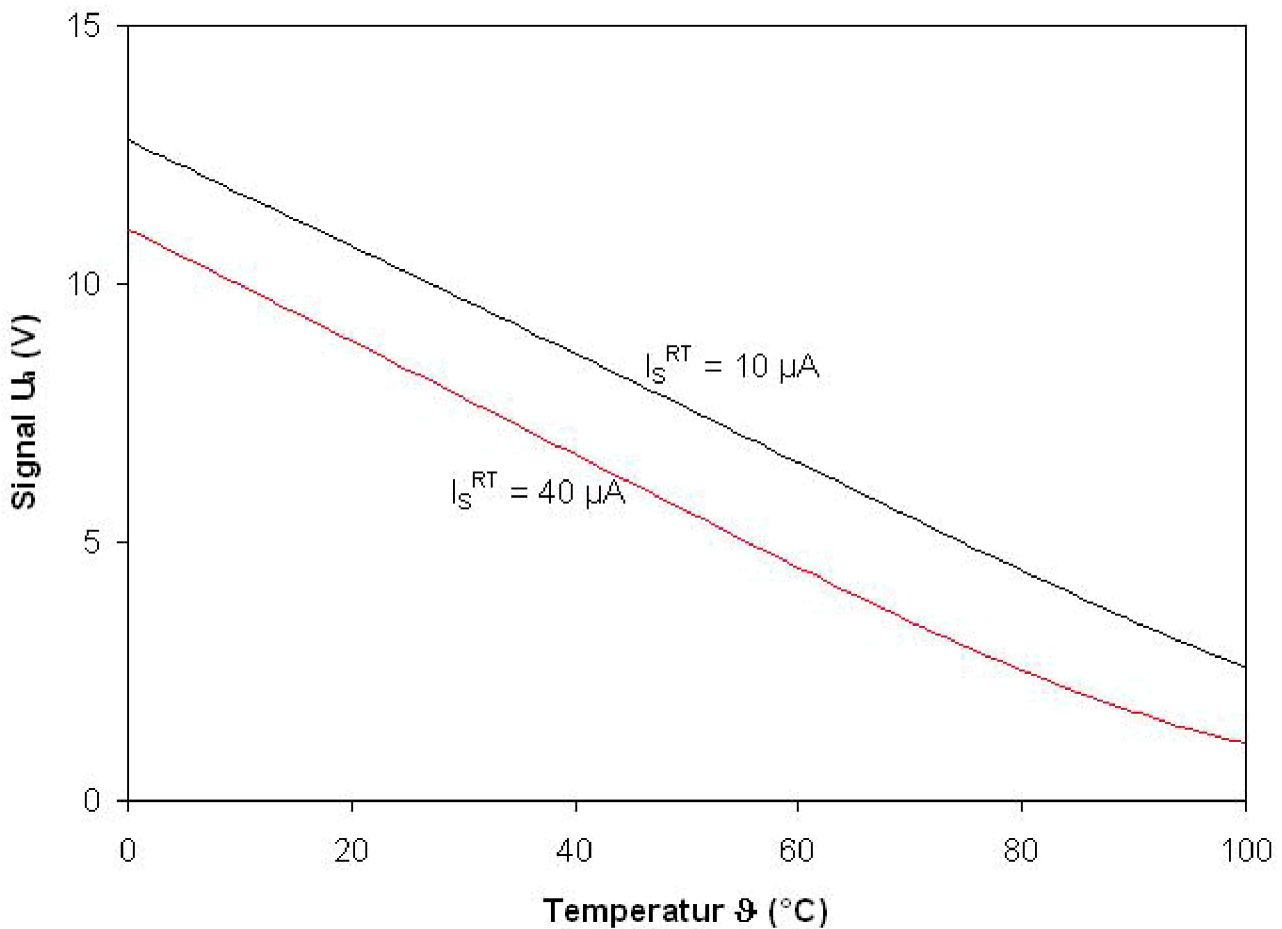


Abb.9 Ausgangssignal des Temperatursensors

Für diese Darstellung wurde mit EWB genau die Schaltung nach Abb.8 simuliert. Eingestellt wurde ein Konstantstrom von 15 mA durch die Ge-Diode, deren Sättigungsstrom bei Raumtemperatur ( $I_S$ ) als Parameter variiert wurde. Ordnen Sie Ihre Ergebnisse ein und versuchen Sie eine Erklärung! Falls Sie eine Nichtlinearität bei höheren Temperaturen feststellen: Was ist die Ursache? Beachten Sie hier den früher gegebenen Hinweis, dass für eine Linearität der Flussstrom groß gegenüber dem Sättigungsstrom sein muss! Nun müsste Ihnen auch das Auswahlkriterium für die Ge-Diode verständlich werden.

Mit der aufgebauten Temperatursensorschaltung kann jede Temperatur im interessierenden Intervall elektrisch als Spannung gemessen werden (Ist-Wert), die mit einem gewählten Soll-Wert der Temperatur verglichen wird. Für die vollständig aufzubauende Temperatur-Regelung wird dann die Differenz zwischen diesen beiden Werten als Steuergröße für eine definierte Wärmezufuhr verwendet.

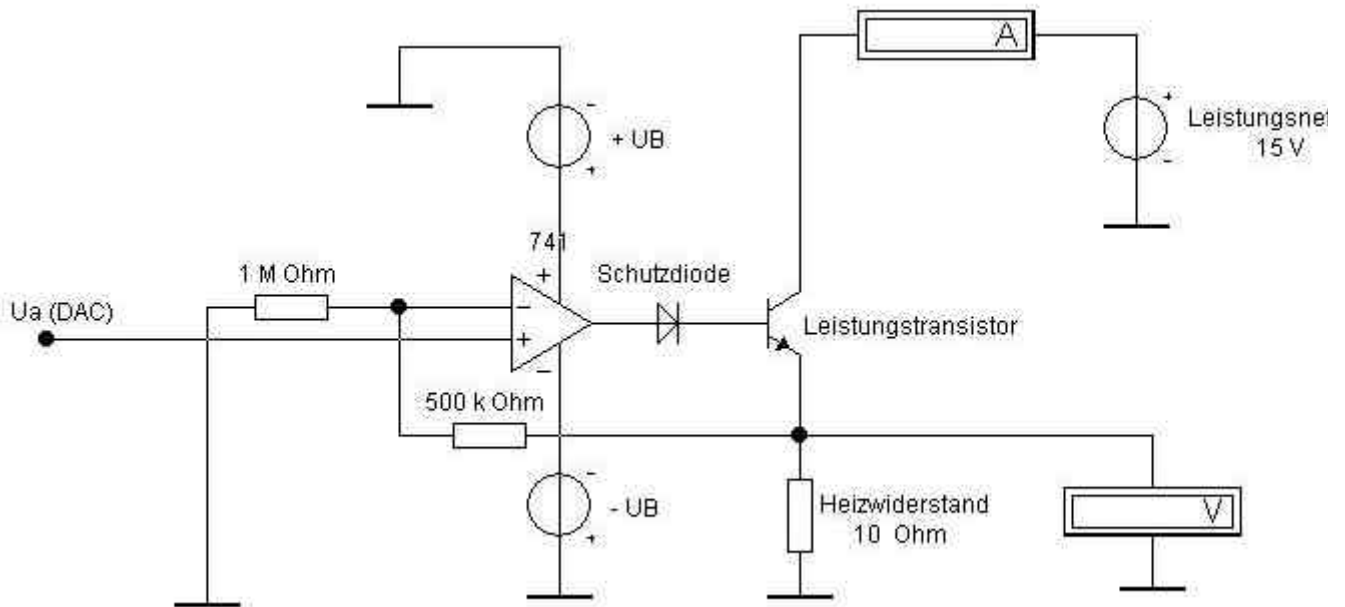
#### 4. Aufbau der Leistungsstufe für die Widerstandsheizung

Für die definierte Wärmezufuhr soll in unserem Projekt eine elektrische Widerstands-Heizung eingesetzt werden. Bedingt durch die Wärmekapazität des Aufbaus und den Wärmeaustausch mit der Umgebung, ist eine Heizleistung von einigen Watt erforderlich.

Wie Sie bereits wissen, kann man mit einem normalen Standard-OPV keine größeren Lastströme (und damit Ausgangsleistungen) realisieren. Allerdings existieren auch kommerzielle Leistungs- OPV, die höhere Ausgangs- Ströme und Leistungen zulassen. Für eine Widerstands-Heizung wird aber häufig eine noch größere Leistung benötigt.

Eine einfache Möglichkeit zur Erzielung größerer Leistungen ergibt sich bei Verwendung eines zusätzlichen Leistungstransistors, der den erforderlichen Ausgangsstrom liefern kann.

Die gesamte Schaltung für die Leistungsstufe zeigt die Abb.10:



**Abb.10 Schaltung der Leistungsstufe für die Widerstandsheizung**

Der OPV 741 wird hier in der nichtinvertierenden Verstärkerschaltung eingesetzt, die Verstärkung wird durch die beiden Widerstände von 1 M und 500 k festgelegt. Beachten Sie, dass diese Dimensionierung evtl. durch Sie noch angepasst werden muss!

Am Ausgang des OPV liegt zunächst eine Diode, die den nachfolgenden Leistungstransistor vor einer Ansteuerung mit falscher Polarität schützt. Der Ausgangsstrom des OPV liefert den Basisstrom zur Ansteuerung des Leistungstransistors, dessen Kollektorstrom durch den Heizwiderstand fließt und die notwendige Leistung liefert. Wie die Abb.10 zeigt, ist in der Verstärkerschaltung für den OPV der Leistungstransistor eingeschlossen - die Rückkopplung erfolgt direkt am Transistor (der Heizwiderstand ist gleichzeitig Emittterwiderstand: Emitttergegenkopplung).

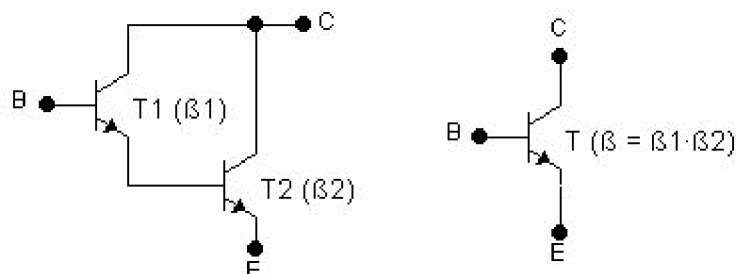
Die Spannungsversorgung für den Leistungstransistor muss mit einem separaten Leistungsnetzteil (max. 1 A) vorgenommen werden, da der erforderliche Betriebsstrom für unsere Standardnetzteile zu groß wird.

Der Strom durch den Heizwiderstand ist der um den Stromverstärkungsfaktor  $\beta$  des Transistors verstärkte Ausgangsstrom des OPV:

$$I_H = \beta \cdot I_{\text{aus}}^{\text{OPV}} \quad (9)$$

Meist haben Leistungstransistoren eine relativ kleine Stromverstärkung (typisch  $\beta = 10..20$ ), so dass der erzielbare Ausgangsstrom noch zu gering bleibt.

Einen Ausweg bietet hier die sog. Darlington-Schaltung (s. Abb.11): T2 ist der Leistungstransistor, T1 ein anderer npn-Typ kleinerer Leistung mit höherer Stromverstärkung. Die gesamte Stromverstärkung des Darlington-Paars ist das Produkt aus den Stromverstärkungen der Einzeltransistoren.



**Abb.11 Darlington-Schaltung**

Anstelle eines diskreten Aufbaus aus Einzeltransistoren werden wir für unsere Zwecke den (integrierten) Darlington-Transistor TIP 142 einsetzen, der wegen der auftretenden Verlustleistungen bereits auf einem Kühlkörper montiert ist.

*Anmerkungen:*

Betrachten Sie angegebene Widerstandswerte wieder als Orientierung für Sie. Auch diese Schaltung werden wir wieder



verwenden: Notieren Sie sich daher alle erzielten Ergebnisse gewissenhaft und lassen Sie diese Schaltung nach erfolgreichem Aufbau unverändert.

*Aufgaben:*

- Sehen Sie sich das Datenblatt zum TIP 142 an; beachten Sie die Pinbelegungen und die elektrischen Grenzwerte! Messen Sie den Transistor am Kennlinienmessplatz aus und bestimmen Sie die Stromverstärkung  $\beta$ , um Ihre aufzubauende Schaltung exakt dimensionieren zu können!
- Simulieren Sie zunächst die gesamte Schaltung nach Abb.10 mit Hilfe von EWB unter Verwendung der durch Sie bestimmten Stromverstärkung  $\beta$  für den Leistungstransistor! Setzen Sie dabei in der Schaltung geeignete Testpunkte fest, an denen Sie Spannungen und Ströme messen können!
- Ein zusätzlicher Hinweis für die Festlegung der Verstärkung: Zur Ansteuerung steht uns vom später eingesetzten DAC eine Gleichspannung von maximal 10 V zur Verfügung - eine Vollaussteuerung (1 A Stromfluss durch die Kollektor-Emitter-Strecke und den Heizwiderstand) sollte bei diesem Signal erreicht werden können!
- Bauen Sie die Schaltung nun vollständig auf; berücksichtigen Sie dabei alle o.g. Hinweise und Ihre Simulationsergebnisse! Wegen der Erreichbarkeit des Messortes sollten Sie den Heizwiderstand ebenfalls mit ausreichend langen Anschlüssen versehen. Zweckmäßigerweise sollten Sie dazu auch gleich diesen Widerstand und die Ge-Diode im Aluminiumblock montieren, der unsere "Messstelle" bildet.
- Prüfen Sie jetzt die korrekte Funktion, indem Sie mit definierten Gleichspannungspegeln am Eingang die Heizleistung am Widerstand einstellen!  
Achtung: Das Leistungsnetzteil hat eine Strombegrenzung (einstellbar bis 1 A), die eine Überlastung verhindert! Vermeiden Sie eine thermische Überbelastung, indem Sie mit Ihrer schon aufgebauten Temperaturmessschaltung die Temperaturen kontrollieren!
- Welche Temperaturen werden erreicht? Für unsere Regelung sollten 80°C sicher erzielt werden können - bezogen auf eine Ansteuerung mit 10 V Eingangssignal. Möglicherweise müssen Sie die Verstärkung durch Änderung der Widerstandswerte (1 M und 500 k am OPV) noch entsprechend anpassen.
- Wie lässt sich die Heizleistung bestimmen? Ermitteln Sie den Zusammenhang zwischen Eingangsspannung und Heizleistung am Widerstand, der für die genaue Kenntnis der späteren Regelcharakteristik wichtig ist!

Letzte Aktualisierung am 23.05.2002