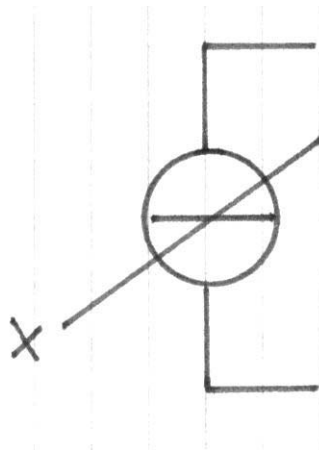
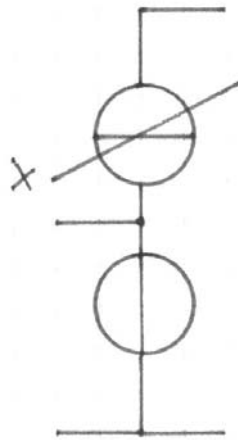


Einleitung

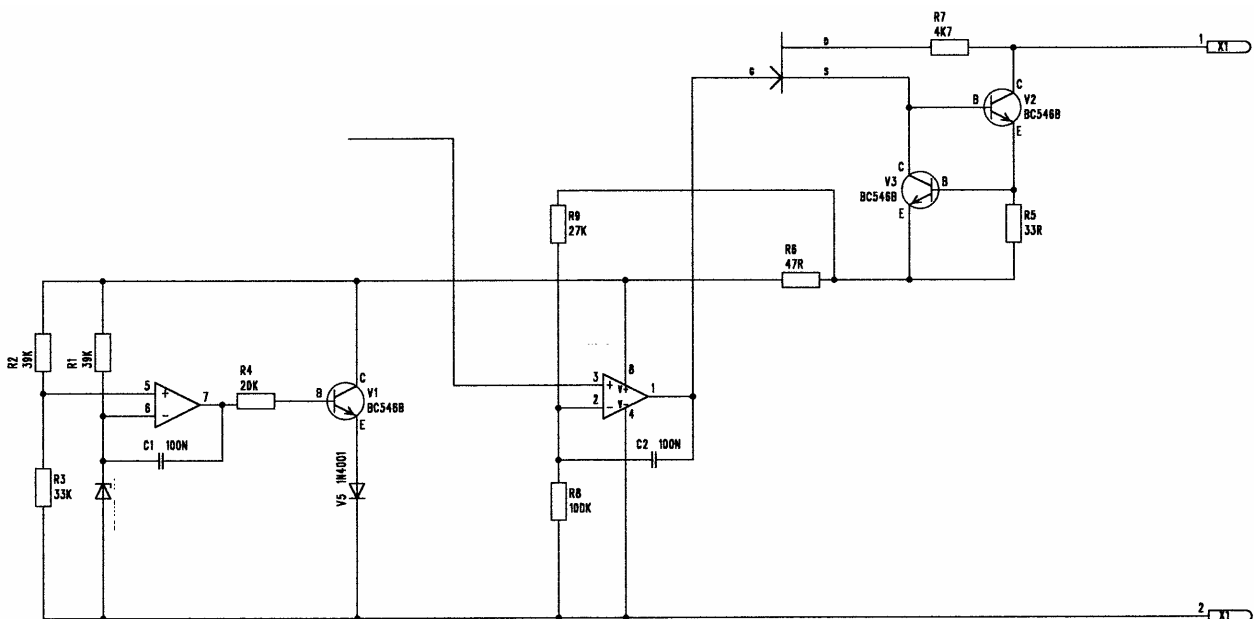
In der Industrie werden Sensoren und Auswerteschaltungen nicht immer am gleichen Ort verwendet. Der Sensor muss über längere Strecken sein Sensorsignal liefern, ebenso muss der Sensor mit Spannung versorgt werden. Damit verschiedene Sensoren und Auswerterschaltungen gegeneinander ausgetauscht werden können muss ein einheitliches Sensorsignal vorliegen. Da es bei langen Leitungen zu Spannungsabfällen durch den Widerstand der Leitung führen kann, ist ein Spannungsabhängiges Signal ungeeignet für die Signalübertragung. In der Industrie hat sich eine Zweileitertechnik etabliert die als Ausgangssignal einen Strom zwischen 4 und 20 mA liefert. Wobei die 4 mA dem kleinsten Messwert und die 20 mA den größten Messwert des Sensors darstellt. Der Sensor wird über ein Kabel mit 2 Adern versorgt. Die Versorgungsspannung liegt im Bereich von 10V bis 35 V. Als Auswertesignal wird der Strom verwendet, der durch diese 2 Leitungen fließt. Dies hat zur Folge, dass die Schaltung mit einem Strom von weniger als 4 mA auskommen muss, da sonst der Stromverbrauch der Schaltung schon als Signal interpretiert wird.



Bei der 4- 20mA Schaltung wird eine Stromquelle durch eine Steuergröße x verändert.

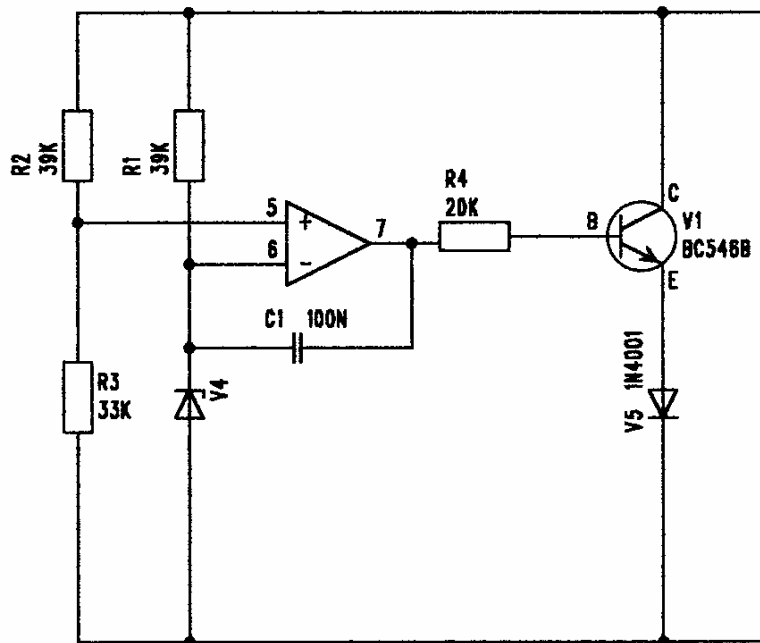


Die Funktionsweise der Schaltung besprechen wir an zwei unterschiedlichen Konzepten.



Durch eine Unterteilung der Schaltung in einzelne Funktionsblöcke, kann die Funktionsweise besser erläutert werden.

Die Konstantspannungsquelle



Eine konstante Spannung kann man auf verschiedene Arten realisieren werden. In diesem Beispiel wird eine Operationsverstärkerschaltung mit einer Z – Diode gewählt. Die Z – Diode sorgt für die Referenzspannung am negativen Eingang des Operationsverstärkers. Wir bestimmen zunächst die Spannung, die als Konstantspannung in Frage kommt. Der schlimmste Fall wäre eine maximale Stromstärke von 20mA und eine minimale Versorgungsspannung von 10V. Über den Transistor V2 der als steuerbare Stromquelle in der Schaltung verwendet wird, haben wir einen Spannungsabfall von etwa 1V. Der Widerstand R5 wird als Strombegrenzung verwendet. Bei 20mA fällt über diesen eine Spannung von 0,7V ab. Zur Strombegrenzung später mehr. Über den Messwiderstand R6 fällt auch etwa 1V ab. Durch die einzelnen Spannungsabfälle ergibt sich für die Konstantspannungsquelle eine maximale Spannung von

$$10V - 1V - 0,7V - 1V = 7,3V$$

Die Funktionsweise dieser Schaltung wurde auch schon in der Elektronikvorlesung besprochen. Über die Z – Diode am negativen Eingang fällt eine Referenzspannung von 3,3V ab. Diese Spannung ist unabhängig von der Versorgungsspannung. Die restlichen 4V der fallen über den Widerstand R1 ab. Durch diesen Zweig sollte kein großer Strom fließen. Der Strom I_1 soll im Bereich von 100µA liegen. Zur Strombegrenzung benutzen wir den Widerstand R1.

$$R = \frac{U}{I}$$

$$R1 = \frac{4V}{100\mu A} = 40k\Omega$$

Aus der Normreihe wählen wir uns einen Widerstand von 39kΩ. Daraus ergibt sich ein Strom von

$$I_2 = \frac{4V}{39k\Omega} = 102\mu A$$

Die konstante Spannung wird über einen Spannungsteiler am positiven Eingang des Operationsverstärkers angeschlossen. Im Normalfall, also bei einer Spannung U von 7,3V, soll über dem Widerstand R3 die gleiche Spannung abfallen, wie über die Z – Diode, also 3,3V. Der Strom I_2 liegt im Bereich von I_1 .

$$I_1 = \frac{7,3V}{72k\Omega} = 101\mu A$$

Die Spannung über R3 ergibt sich aus

$$U_{R3} = 101\mu A \cdot 33k\Omega = 3,33V$$

Der Operationsverstärker regelt seinen Ausgang rauf und runter entsprechend der Spannungsdifferenz an U_+ und U_- . Regelungsbeispiel: Die Spannung U steigt auf 8V. Somit steigt auch der Spannungsabfall über R3 an auf 3,66V. Die Spannung über der Diode hingegen bleibt konstant auf 3,3V. Der Operationsverstärker steuert nun seinen Ausgang auf, um der Spannungsdifferenz entgegen zu wirken. Die Erhöhung der Ausgangsspannung des Operationsverstärkers bewirkt, dass der Transistor V1 leitend wird und die Spannung U sinkt wieder ab.

Die Diode V5 hebt das Spannungspotential des Transistors um 0,7V. Dies wird benötigt, da der Operationsverstärker seinen Ausgang nicht bis auf 0V absenken kann. Typisch sind Werte im Bereich von 0,6V. Bei dieser Spannung ist der Transistor nicht sicher gesperrt und die Regelung kann versagen. Hebt man nun das Potential des Transistors um 0,7V an, so kann der Operationsverstärker den Transistor auch sicher Sperren, da die Ansteuerspannung des Transistors im Regelbereich des OP's liegt.

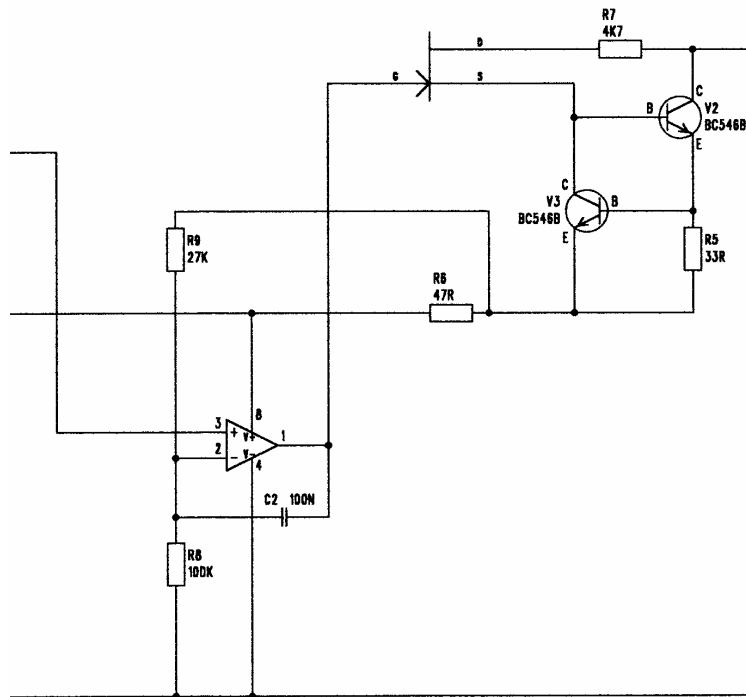
Durch den Transistor soll der Strom fließen können, der nicht von der Schaltung benötigt wird, aber der von Signalwert erforderlich ist. Somit soll ein Strom I_3 von etwa 25-30mA durch den Transistor fließen können. Der Widerstand R4 dient als Strombegrenzung des Basisstroms. Der Transistor BC546B hat einen Verstärkungsfaktor von $B=330$. Bei einem Basisstrom von $90\mu A$ und der Verstärkung von 330 würde ein Strom I_3 von 30mA fließen. Die Ausgangsspannung des Operationsverstärkers kann auf maximal 6V ansteigen. Der Spannungsabfall über die Basis-Emitter Strecke des Transistor beträgt 0,7V sowie über die Diode V5 0,7V. Somit haben wir einen Spannungsabfall über R4 von maximal 4,6V. Daraus ergibt sich ein Widerstand von

$$R4 = \frac{4,6V}{90\mu A} = 51,1k\Omega$$

Wähle $56k\Omega$

$$I_{3,max} = \frac{4,6V}{56k\Omega} \cdot 330 = 27,1mA$$

Strommessung und Stromregelung



Durch den Widerstand R6 fließt der komplette Strom der Schaltung, deshalb wird der Widerstand R6 auch als Messwiderstand für den Strom verwendet. Dies geschieht durch den Spannungsabfall über R6 bei einem bestimmten Strom.

$$U_1 = U_{\text{konstant}} + 4mA \cdot R6$$

$$U_2 = U_{\text{konstant}} + 20mA \cdot R6$$

Je größer der Widerstand R6 ist, desto größer ist auch der Spannungsunterschied zwischen U_1 und U_2 , was zur Stromregelung günstiger wäre. Der Widerstand kann aber nicht beliebig groß gewählt werden, wenn über diesen eine Spannung von zum Beispiel 5V abfallen würden und man eine Konstantspannung von 7,3V eingestellt hätte, dann müsste die Versorgungsspannung schon größer 12,5V sein, welche größer als die Mindestversorgungsspannung ist. Bei einer Versorgungsspannung von 10V und einem maximalen Strom von 20mA lässt sich der Spannungsabfall wie folgt bestimmen.

Geregelte Spannung = 7,3V
Spannungsabfall über V2 = 1V
Spannungsabfall über R5 = 0,7V

$$10V = 7,3V + 1V + 0,7V + U_{R6}$$

Die Spannung über R6 darf maximal 1V betragen.
Wähle einen Widerstand von 47Ω . Der Maximale Spannungsabfall über R6 beträgt dann

$$47\Omega \cdot 20mA = 0,94V < 1V$$

Nehmen wir einen beliebigen Sensor (Temperatur, Druck, Weg, usw.) und dieses Sensorelement liefert ein Sensorsignal von zum Beispiel 3,7V bis 4,1V. Diese Spannung wird auf den positiven Eingang des Operationsverstärker geführt. Der negative Eingang ist über einen Spannungsteiler R6, R8, R9 in Bezug auf die Konstantspannung von 7,3V angeschlossen. Die Spannung über den Widerstand R8 soll entsprechend dem Strom durch R6 seine Spannung im Bereich von 3,7V und 4,1V sich verändern. Die Spannung am Punkt x ist um den Spannungsabfall an R6 größer.

$$U_1 = 7,3V + 4mA \cdot 47\Omega = 7,4V$$
$$U_2 = 7,3V + 20mA \cdot 47\Omega = 8,2V$$

Um eine Spannung von 3,7V bei 4mA und 4,1V bei 20mA zu erhalten muss das Spannungsteilerverhältnis der Widerstände R8 und R9 errechnet werden.

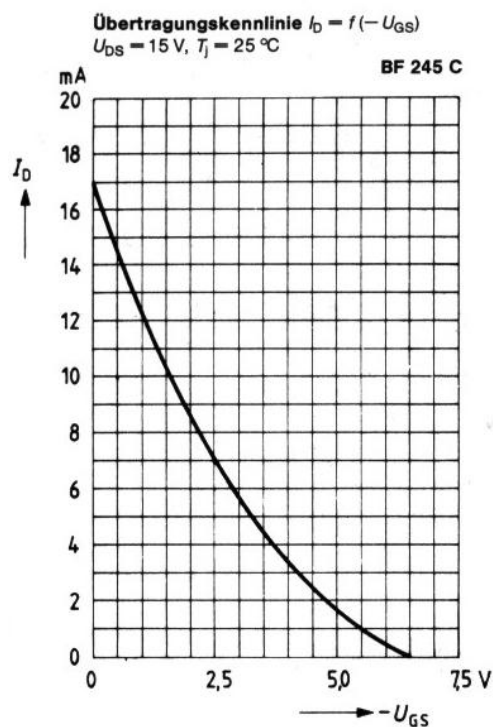
$$\frac{U_1}{U_{R8}} = \frac{R8 + R9}{R9} = 2$$

Die beiden Widerstände können in diesem Beispiel gleich groß gewählt werden. Damit kein zu großer Strom durch den Spannungsteiler fließt setzen wir für R8 und R9 $100k\Omega$ ein, was einen Strom von

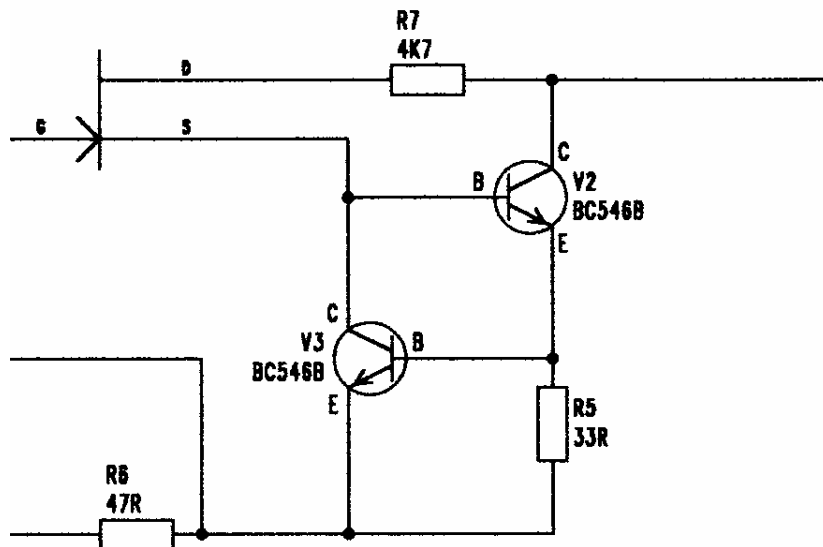
$$\frac{8,2V}{200k\Omega} = 41\mu A$$

entspricht. Die Sensorsignale sind nicht immer im Voltbereich, dies kann zum Beispiel durch eine Verstärkerstufe (Elektrometerverstärker) angehoben werden. Der Ausgang des Operationsverstärkers steuert nun seinen Ausgang je nach Spannungsdifferenz an den Eingängen. Das Ausgangspotential liegt immer unterhalb der Versorgungsspannung des Operationsverstärkers. Es ist deshalb nicht möglich, wie bei der Konstantspannungsquelle den Transistor V2 direkt anzusteuern, da das Basispotential immer unterhalb des Emitterpotentials liegen würde und der Transistor deshalb immer sperrt.

Abhilfe schafft hier ein N – Kanal Feldeffekt Transistor. Wie aus der Elektronik bekannt ist, steuert die Gate – Source – Spannung den Drainstrom. Bei 0V Gate – Source – Spannung ist der NFET leitend. Um diesen zu sperren muss eine negative Gate - Source – Spannung angelegt werden. In unserem Fall ideal, da die Ausgangsspannung immer unterhalb der Sourcespannung liegt, in Bezug auf GND. Der Drainstrom steuert die Basis des Transistors V2, der die steuerbare Stromquelle in der Schaltung realisiert.



Strombegrenzung



Es werden noch 3 Bauteile zusätzlich in die Schaltung eingesetzt, die den Strom begrenzen sollen. Die Widerstände R5 und R7 sowie der Transistor V3. Die Funktion dieser Strombegrenzung ist denkbar einfach. Je nach fließendem Strom durch R5 steigt der Spannungsabfall über diesen an. Bei einem Strom größer 20mA soll der Spannungsabfall über R5 größer als 0,7V betragen.

$$\frac{0,7V}{20mA} = 35\Omega$$

wähle 27Ω

$$\frac{0,7V}{27\Omega} = 25,9mA$$

fließt also ein Strom von 25mA oder mehr, so steigt die Spannung über R5 auf $\geq 0,7V$. Diese Spannung liegt auch an der Basis-Emitter-Strecke des Transistors V3 an. Dieser wird leiten und der Strom I_5 kann über den Transistor abfließen. Die Folge daraus ist, dass der Transistor V2 sperrt und der Spannungsabfall über R5 geringer wird und deshalb der Transistor V3 sperrt. Der Widerstand R7 dient als Strombegrenzung für den Strom I_5 wenn dieser durch den Transistor V3 fließen kann. Bei einer maximalen Spannungsdifferenz von ca. 22V und einem Widerstand von 4,7kΩ wird der Strom auf etwa 5mA begrenzt.

$$\frac{30V - 7,3V}{4,7k\Omega} = 4,8mA$$

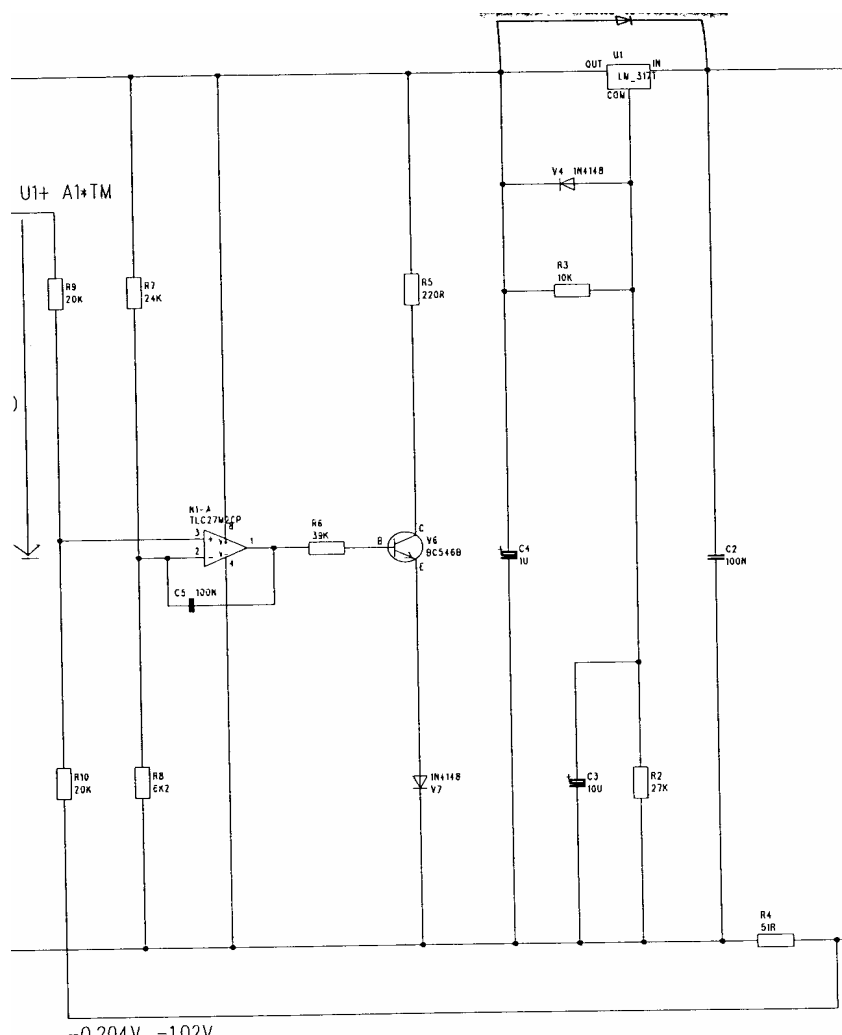
Die Kondensatoren C1 und C2, welche noch in der Schaltung vorhanden sind, dienen der Stabilisierung der Operationsverstärker.

Nach dem Dimensionieren muss man kontrollieren, dass die Schaltung einen Stromverbrauch von weniger als 4mA hat. Die Operationsverstärker benötigen je etwa 700µA. Hinzu kommen noch die Ströme der Spannungsteiler $I_1=101\mu A$, $I_2=102\mu A$, $I_4=50\mu A$. Addiert man nun die Ströme so kommt man auf einen Gesamtstrom von

$$I = 2 \cdot 700\mu A + 101\mu A + 102\mu A + 41\mu A = 1,6mA$$

Hinzu kämen noch die Ströme die für die Signalaufbereitung sowie für das eigentliche Sensorelement notwendig wären, zum Beispiel Verstärkungsstufen oder Kompensationsstufen für Temperatur.

Alternativ zu diesem Prinzip bespreche ich noch eine weitere Variante der Stromregelung aus einer bestehenden Schaltung eines Kommilitonen.



Man erzeugt sich eine konstante Spannung mit Hilfe eines einstellbaren Spannungslängsreglers. Die Spannung wird durch die Widerstände R2 und R3 bestimmt.

In diesem speziellen Fall wurde eine Spannung von 6V eingestellt, welche sich aus der minimalen Versorgungsspannung von 10V und den Spannungsabfällen von $R4 \approx 1,3V$ einer Diode $0,7V$, dem Spannungsregler $2V$ sowie einer Schutzschaltung $\approx 0,03V$ ergab.

$$10V - 0,7V - 0,03V - 2V - 1,3V = 5,97V$$

Als steuerbare Stromquelle dient der Transistor V6, der über den Operationsverstärker angesteuert wird. Die Diode hebt die Spannung um $0,7V$ an damit der Operationsverstärker auch sicher sperren kann. Dieses Prinzip wurde zuvor bei der Konstantspannungsquelle verwendet. Der Strom der durch den Transistor fließen kann errechnet sich aus der Verstärkung und dem Basisstrom. Der Operationsverstärker bringt maximal $4V$ am Ausgang.

$$I_c = \frac{4V - 0,7V - 0,7V}{39k\Omega} \cdot 330 = 22mA$$

Der Widerstand R5 im Stromzweig ist zusätzlich zur Strombegrenzung vorhanden.

$$I_{c,max} = \frac{6V - 0,7V}{220\Omega} = 24mA$$

Die konstante Spannung von $6V$ liegt über einem Spannungsteiler am negativem Eingang des OP's. U_{R8} dient dann als Referenzspannung für das Sensorsignal. Das Sensorsignal ist über einen Spannungsteiler R9, R10 und R4 bezogen auf GND an dem positiven Eingang angeschlossen. Der Widerstand R4 dient in diesem Fall als Messwiderstand.

$$51\Omega \cdot 20mA = 1,02V$$

Steuert nun der Operationsverstärker seinen Ausgang auf, so fließt ein größerer Strom durch den Transistor und zwangsläufig auch durch den Widerstand R4.

Durch den Spannungsabfall an R4 wird der Operationsverstärker gegengekoppelt, der seinen Ausgang so regelt, dass U_+ und U_- des OP's genau gleich sind. Die Spannungsteiler müssen nun noch an das jeweilige Sensorelement angepasst werden.

Als Dritte Alternative zur 4 – 20 mA Technik sind fertige IC. Als Beispiel sind 2 Datenblätter angefügt.

Der Loop – Powered 4 – 20mA Sensor Transmitter AD693 ist ein 20 pol. IC, welches an eine Versorgungsleitung von 12V – 36V angeschlossen werden kann. Das IC bietet dem eigentlichen Sensorelement eine Versorgungsspannung von bis zu 6.2V an. Das Sensorsignal kann im Bereich von 30mV bis 60mV liegen. Der Ausgang kann dann auf 3 verschiedene Arten konfiguriert werden. Unipolare Signale von 4mA – 20mA und 0mA – 20mA, sowie einem bipolaren Signal $12 \pm 8\text{mA}$ sind wählbar. Datenblätter im Anhang

Alternativ ist der 4 – 20mA Transmitter AD694*. Dieses IC kann mit einer Spannung von +4,5V bis +36V versorgt werden. Als Signaleingänge stehen 2 Spannungsbereiche zur Verfügung, einmal von 0V – 2V und zum anderen der Bereich von 0V – bis 10V. Als Ausgangssignal kann man zwischen 0 – 20mA und 4 – 20mA entscheiden. Wird der Signalbereich von 0-10V verwendet, so muss die Versorgungsspannung $> 12,5\text{V}$ sein. In diesem Bereich regelt das IC 1,6mA pro Volt. Im 2V Bereich sind es 8mA/V. Datenblätter im Anhang.

Quellen

Vorlesung Sensortechnik I

Vorlesung Elektronik

Ausarbeitung eines Kommilitonen Fach Praktische Schaltungstechnik.

Datenblättersammlung

Internet : www.conrad.de
www.farnell.de