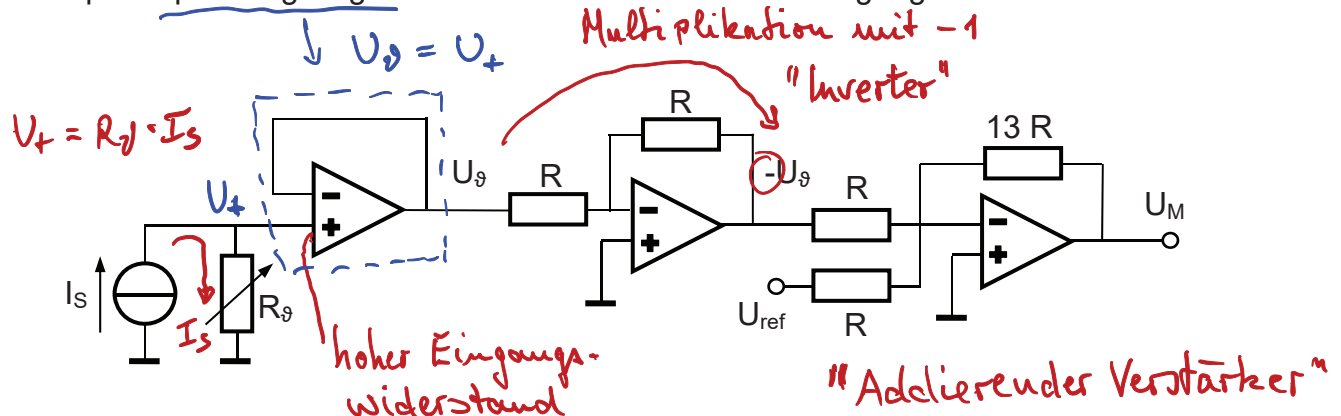


## 4 Messschaltungen, Operationsverstärker

Auch wenn heute Messdaten überwiegend digital erfasst werden, findet doch bei fast allen Messungen vor der Digitalisierung eine Signalaufbereitung mit analoger Schaltungstechnik statt. Häufig werden dabei Operationsverstärkerschaltungen eingesetzt.

Beispiel: Spannungsfolger und Verstärker mit Offsetbereinigung



Die Schaltung liefert bei der Temperaturmessung mit einem Pt-100-Sensorelement eine definierte Spannung mit 0 V bei 0°C.

### 4.1 Aufbau und Eigenschaften von Operationsverstärkern

Ein Operationsverstärker (kurz: "OP") ist aus einer Kette von Transistorverstärkerschaltungen aufgebaut. Die Eingangsstufe nimmt nur sehr geringe Ströme auf und die Gesamtverstärkung der Eingangsspannung beträgt mehrere Zehnerpotenzen.

Es gibt ihn in vielen verschiedenen Varianten und Bauformen. Der verbreitetste Typ ist in Abb. 4.1 skizziert.

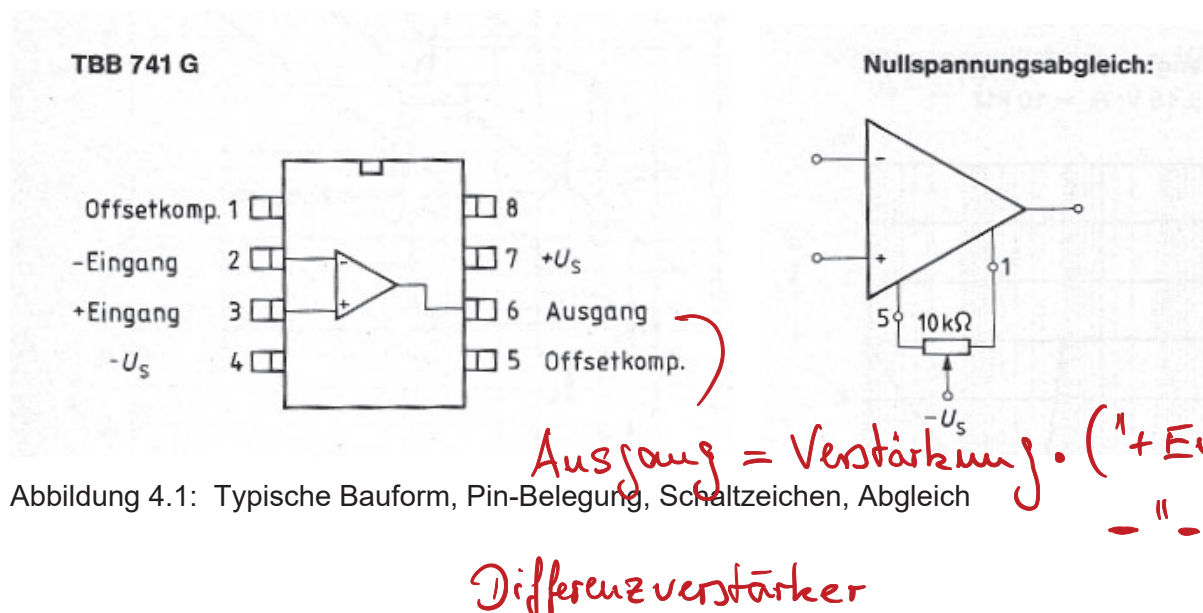


Abbildung 4.1: Typische Bauform, Pin-Belegung, Schaltzeichen, Abgleich

Einige typische Daten sind hier einem Datenblatt von Texas Instruments entnommen – ursprünglich aus dem Jahr 1970! Also ein Dinosaurier der Schaltungstechnik, aber unverwüstlich.

$\mu A741, \mu A741Y$   
**GENERAL-PURPOSE OPERATIONAL AMPLIFIERS**

SLOS094B – NOVEMBER 1970 – REVISED SEPTEMBER 2000

electrical characteristics at specified free-air temperature,  $V_{CC\pm} = \pm 15\text{ V}$  (unless otherwise noted)

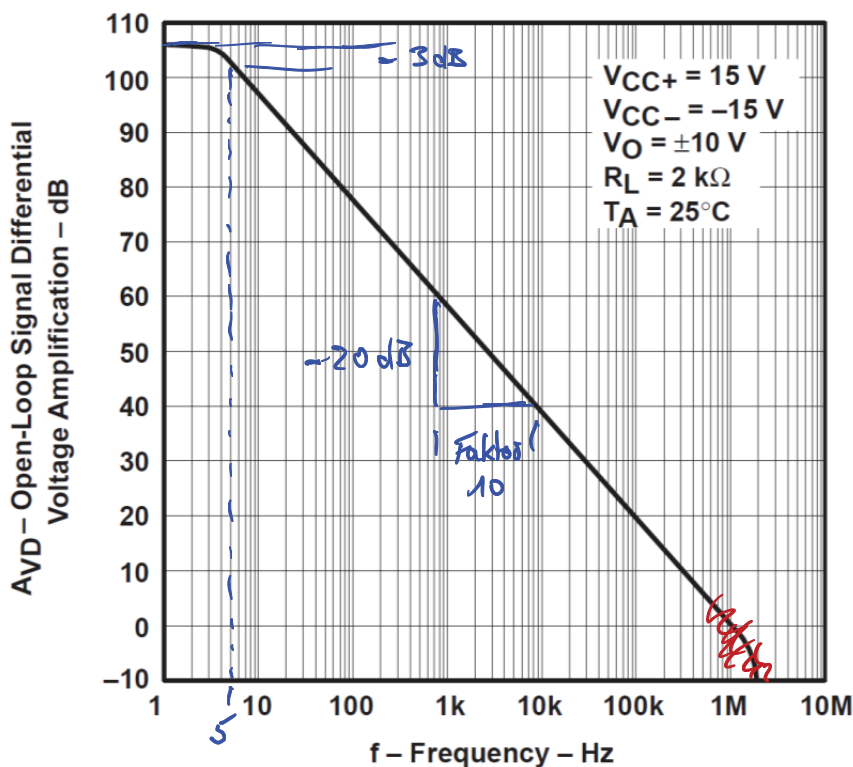
PARAMETER	TEST CONDITIONS	$T_A^\dagger$	$\mu A741C$			$\mu A741I, \mu A741M$			UNIT
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
$A_{VD}$ Large-signal differential voltage amplification	$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$ $V_O = \pm 10\text{ V}$	25°C Full range	20	200		50	200		V/mV
$r_i$ Input resistance		25°C	0.3	2		0.3	2		M $\Omega$
$r_o$ Output resistance	$V_O = 0$ , See Note 5	25°C		75			75		$\Omega$

Der Eingangswiderstand liegt bei diesem OP bei  $R_i = 2\text{ M}\Omega$  und die Differenzspannung der beiden Eingänge wird mit der Verstärkung  $V_0 = 200 \frac{\text{V}}{\text{mV}}$  auf den Ausgang übertragen, also mit dem Faktor  $2 \cdot 10^5 \approx 106\text{ dB}$ .



– Innenwiderstand

Wie Abb. 4.2 zeigt, hat das Übertragungsverhalten des OP Tiefpasscharakter. Das ist beim Einsatz in Schaltungen, die Frequenzen oberhalb einiger kHz verarbeiten, zu beachten.



geben Sie einen  
Frequenzgang  $G(j\omega)$   
an, der so ein  
Bodediagramm hat.  
 $G(j\omega) = \frac{2 \cdot 10^5}{1 + j\omega/\omega_g} \quad (106\text{ dB})$   
 $\omega_g = 2\pi \cdot 5\text{ Hz} \Rightarrow T = \frac{1}{10^4\text{ s}}$

Abbildung 4.2: Frequenzgang des "741"-Operationsverstärkers

Ein "idealer" Verstärker hätte

- unendlich hohe Eingangsimpedanz
- unendlich große Verstärkung

Die Daten des Operationsverstärkers kommen dem so nah, dass folgende

Annahmen zur vereinfachten Berechnung gelten:

- Eingangsströme:
- Eingangsspannungen:

$$I_n = 0, I_p = 0$$

$$U_p = U_n$$

Letzteres folgt wegen der hohen Verstärkung aus

$$U_a = V_0 \cdot (U_p - U_n) \quad \text{und damit} \quad (U_p - U_n) = \frac{U_a}{V_0} \approx 0.$$

$\sim 10^5$

Sind  $U_p$  und  $U_n$  verschieden, geht wegen der hohen Verstärkung der Ausgang des OP in die Begrenzung, das heißt  $U_a = +U_S$  oder  $U_a = -U_S$  je nach Vorzeichen der Eingangsspannungsdifferenz. So werden Operationsverstärker z. B. beim "Schmitt-Trigger" eingesetzt, nicht aber in Filter- und Verstärkerschaltungen.

## 4.2 Operationsverstärkerschaltungen

Die Idealisierungen ermöglichen die Bestimmung der Funktion einer OP-Verstärkerschaltung durch einfache Anwendung von Knoten- und Maschenregel.

Beispiel: Invertierender Verstärker

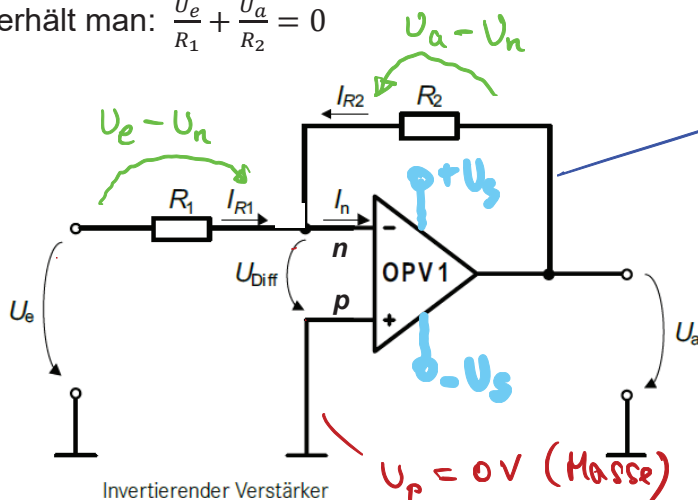
Knotenregel in "n":  $I_{R1} + I_{R2} = I_n = 0$  (wegen Idealisierung "Eingangsströme = 0")

Ohmsches Gesetz:  $\frac{U_e - U_n}{R_1} + \frac{U_a - U_n}{R_2} = 0$

Summe der Ströme in dem Knoten  
= Summe der heraus fließenden Ströme  
Notwendig: Zählpfeile in der Schaltung

Und wegen Idealisierung " $U_p - U_n = 0$ ":  $U_n = U_{Diff} + U_p = 0 + 0 = 0$ ,

erhält man:  $\frac{U_e}{R_1} + \frac{U_a}{R_2} = 0$



Die Rückführung des Ausgangs auf den "- Eingang" sorgt für die Einhaltung der Bedingung  $U_n \approx U_p$ .

$U_p = 0V$  (Masse)  $\Rightarrow U_n \approx 0V$  sonst ist  $U_a$  in der Begrenzung  $+U_S$  oder  $-U_S$

Ausgangsspannung:

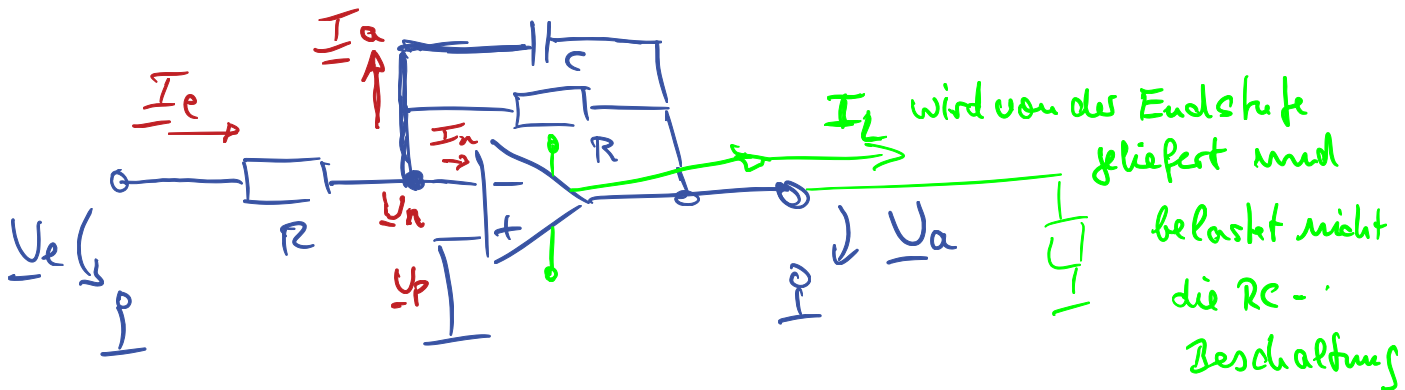
$$U_a = -\frac{R_2}{R_1} U_e$$

Quelle: Matthias Viehmann: "Operationsverstärker – Grundlagen, Schaltungen, Anwendungen"; Hanser Verlag, München, 2016

1) Vorzeichenumkehr, 2) Verstärkung mit  $R_1, R_2$  einstellbar.

Gleiche Vorgehensweise bei RC oder RL - Beschaltung

z.B. in DAQ-USB



- 1.) Bezeichnungen und Stromzählpfeile
- 2.) Knotenregel anwenden (Eingang des OP)

$$\underline{I_e} = \underline{I_a} + \underbrace{\underline{I_n}}_{=0} \quad \text{Idealisierung}$$

- 3.) Spannungsgleichung mittels Ohmschen Gesetz

$$\frac{\underline{U_e} - \underline{U_n}}{R} = \frac{\underline{U_n} - \underline{U_a}}{R \parallel Z_c} \quad R \parallel Z_c = \frac{R \cdot \frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{R}{1 + j\omega RC}$$

3. a)  $\underline{U_n} = \underline{U_p}$  (Idealisierung)  
einsetzen

$$\underline{U_p} = 0 \Rightarrow \underline{U_n} = 0$$

$$\frac{\underline{U_e}}{R} = \frac{-\underline{U_a}}{R \cancel{1 + j\omega RC}} \quad | \cdot \frac{-R}{1 + j\omega RC}$$

4.) Nach  $\underline{U_a}$  auflösen :

$$\underline{U_a} = \frac{1}{R} \cdot \left( -\frac{R}{1 + j\omega RC} \right) \cdot \underline{U_e} = -\frac{1}{1 + j\omega RC} \cdot \underline{U_e}$$