

# Operationsverstärker

Sascha Reinhardt

17. Juli 2001

# 1 Einführung

Es gibt zwei grundlegende Operationsverstärkerschaltungen. Einmal den invertierenden Verstärker und einmal den nichtinvertierenden Verstärker. Es wird immer

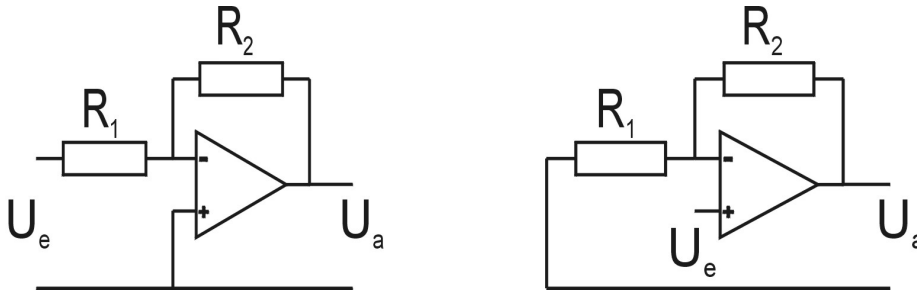


Abbildung 1: Schaltung invertierender Verstärker. ”-” ist der invertierende Eingang. ”+” ist der nichtinvertierende Eingang.

von einem idealen Verstärker ausgehen. Die Ausgangsspannung  $U_a$  und die Eingangsspannung  $U_e$  hängen wie folgt zusammen für einen invertierenden Verstärker.

$$U_a = -\frac{R_2}{R_1}U_e = -v_0 \cdot U_e \quad (1)$$

( $v_0$  ist die Verstärkung)  $R_2$  und  $R_1$  sind die Widerstände im Spannungsteiler <sup>1</sup>. Für einen nichtinvertierenden Verstärker erhält man ( $v_0$  ist hier anders definiert als oben):

$$U_a = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)U_e = v_0 \cdot U_e \quad (2)$$

Ein Operationsverstärker verhält sich in einfachster Näherung wie ein Tiefpass. Die Übertragungsfunktion ist also

$$g(\omega) = \frac{|U_a|}{|U_e|} = \frac{v_0}{\sqrt{1 + \frac{\omega^2}{\omega_g^2}}} \quad (3)$$

$$\omega_g = \text{Grenzfrequenz}$$

und für den Phasengang

$$\phi(\omega) = \arctan\left(-\frac{\omega}{\omega_g}\right) \quad (4)$$

<sup>1</sup>Eine ausführliche Behandlung findet man in ”Elektronik für Physiker” von K.-H. Rohe aus dem Verlag B. G. Teubner Stuttgart

## 2 Operationsverstärker LM741

An einem Operationsverstärker vom Typ LM741 wurden verschiedene Messungen gemacht.

### 2.1 Übertragungsfunktion und Phasengang

Es wurde für die folgenden Messungen die invertierende Verstärkung genommen. Für die erste Messung wurde der Widerstand  $R_1 = 1k\Omega$  und  $R_2 = 39k\Omega$  gesetzt. Es wird daher eine Verstärkung von  $v_0 = 39$  erwartet. Als Eingangssignal diente ein sinusförmiges Eingangssignal mit einer Amplitude von  $0,3V$ . Die Versorgungsspannung des Operationsverstärkers wurde auf  $\pm 18V$  gesetzt. Die Spannungen wurden Spitze-Spitze gemessen.

#### Messung

Frequenz [Hz]	Eingangsspannung [V] $\pm 0,05$	Ausgangsspannung [V] $\pm 0,05$	Phase [ $\pi$ ] $\pm 0,05$
100	0,6	23,4	1
1000	0,6	23,2	1
10000	0,6	22,2	0,9
25000	0,6	12,5	0,65
50000	0,6	6,6	0,63
75000	0,6	4,3	0,56
100000	0,6	3,2	0,54
250000	0,6	1,3	0,5
500000	0,6	0,68	0,4
1000000	0,6	0,33	0,4

Aus dem Fit erhält man folgende Parameter (vgl. Abbildung 2):

$$\begin{aligned}v_0 &= 40 \pm 1 \\ \nu_g &= \frac{\omega_g}{2\pi} = (16 \pm 4)kHz\end{aligned}$$

Aus dem Phasendiagramm folgt eine Grenzfrequenz (vgl. Abbildung 3) unter Berücksichtigung der durch die Schaltung entstehenden Phasenverschiebung:

$$\nu_g = (25 \pm 7)kHz$$

Aus den Abbildungen kann man folgendes erkennen:

- der Operationsverstärker ist frequenzgangkompensiert
- die Grenzfrequenz liegt bei ca. 20kHz

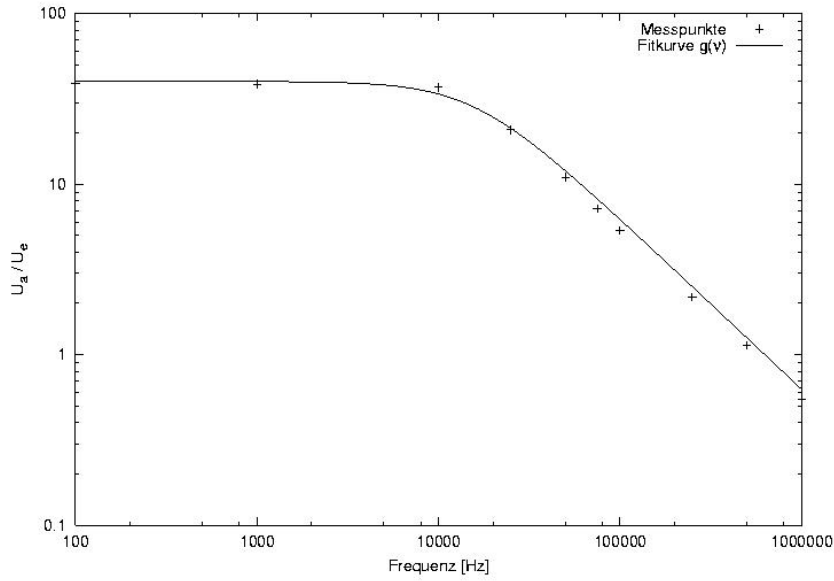


Abbildung 2: Verhalten eines invertierenden Verstärkers mit  $\nu_0 \approx 39$

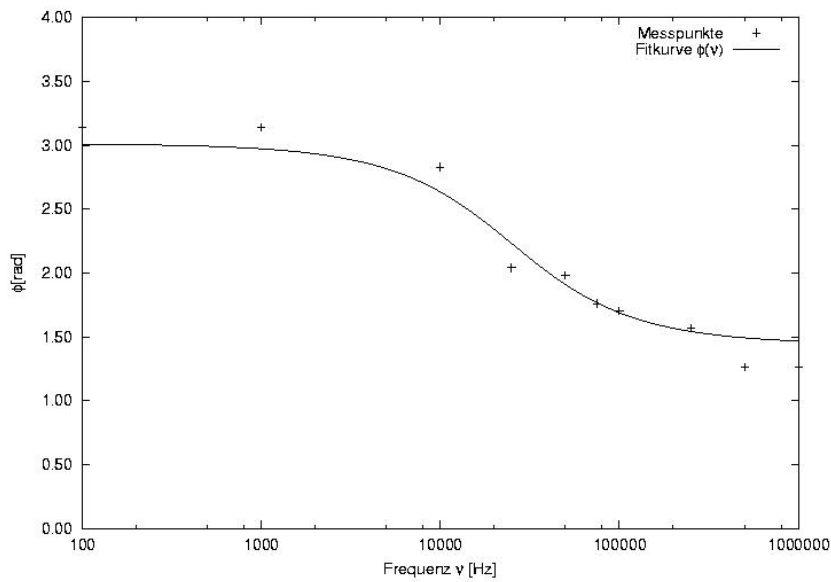


Abbildung 3: Verhalten eines invertierenden Verstärkers mit  $\nu_0 \approx 39$

## 2.2 Linearität der Verstärkung

Es wurden auch Messungen zur Linearität bei zwei verschiedenen Frequenzen gemacht. Die erste Messung erfolgte bei einer Frequenz von 100Hz mit einer nichtinvertierenden Schaltung und einer Verstärkung von ca. 5 ( $R_1 = 1k\Omega, R_2 = 3,9k\Omega$ ). Die Signalform war sinusförmig. Die Versorgungsspannung betrug  $\pm 18V$  und die Messung der Spannungen erfolgte Spitze-Spitze.

Der Verlauf der Kurve ist in Abbildung 5 zu sehen. Die Spannungsverstärkung wird durch die Versorgungsspannung begrenzt. Wird bei einer deutlich höheren Frequenz dieselbe Messung gemacht, so wird die Verstärkung durch die maximale Anstiegsgeschwindigkeit ("Slew-Rate") des Operationsverstärkers begrenzt. Mit einer invertierenden Schaltung wurde diese Messung gemacht ( $R_1 = 10k\Omega, R_2 = 39k\Omega \Rightarrow$  Verstärkung ca. 4, Versorgungsspannung  $\pm 18V$ ). Das Eingangssignal war ein Sinus mit einer Frequenz von 100kHz. Durch die endliche Anstiegszeit des Operationsverstärkers wird aus dem Sinus am Ausgang ein Dreiecksspannung (vgl. Abbildung 4).

Grafische Darstellung s. Abbildung 6. Man kann daraus eine Abschätzung der Anstiegszeit  $v$  machen. In der Hälfte der Periodendauer steigt das Signal vom Minimum zum Maximum. Der Operationsverstärker kann in dieser Zeit seine Ausgangsspannung um maximal 3,90V ändern.

$$v = \frac{3,90V}{\frac{1}{2 \cdot 100000} s} = 0,78 \frac{V}{\mu s}$$

Im Datenblatt wird als typischer Wert von  $v = 0,5V/\mu s$  angegeben. Die Größenordnung stimmt also.

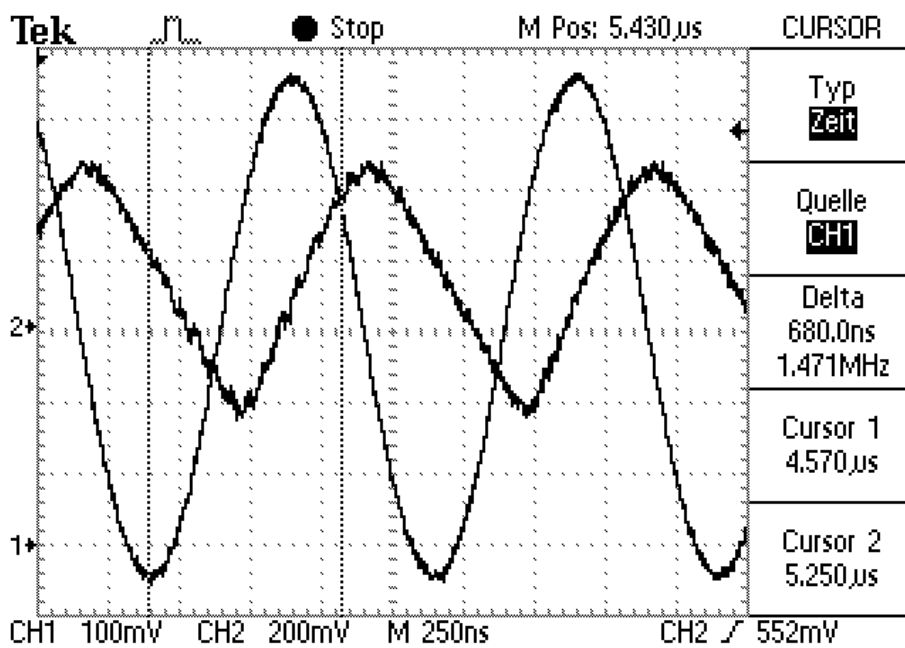


Abbildung 4: Signalform: Kanal2: Eingang Sinus mit 0,7V Amplitude, Frequenz  $10^6 Hz$ , Kanal1: Ausgang

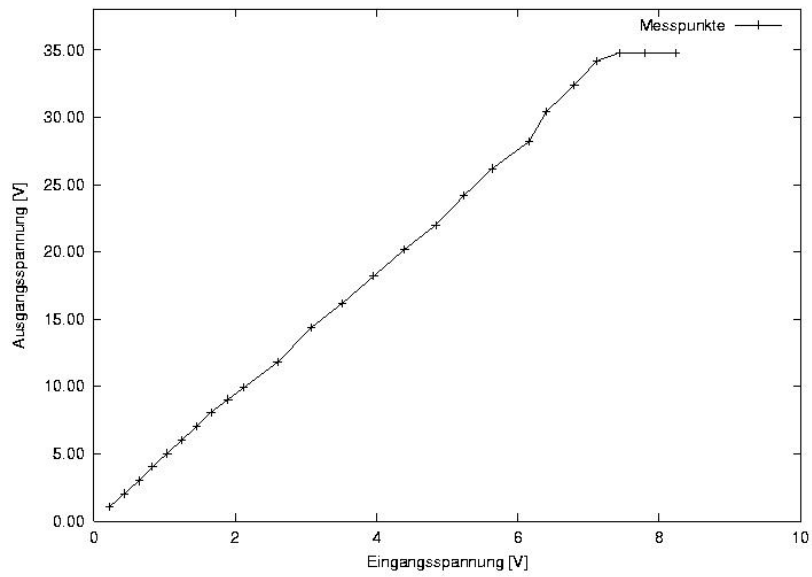


Abbildung 5: Verstärkung bei fester Frequenz 100Hz (nichtinvertierender Verstärker, Verstärkung ca. 5)

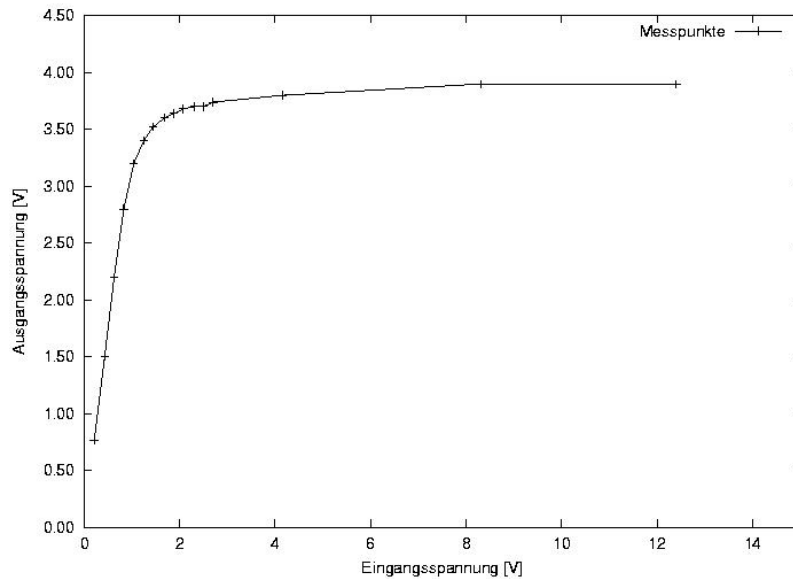


Abbildung 6: Verstärkung bei fester Frequenz 100kHz (invertierender Verstärker, Verstärkung ca. 4)

## 2.3 Frequenzen über 1MHz

Bei Frequenzen grösser als 1MHz gibt es Abweichungen, die nicht mehr so einfach zu handhaben sind. Die folgenden Messungen schliessen sich nahtlos an die vorherigen an, so dass nur der Frequenzbereich zwischen 1MHz und 10MHz dargestellt wird.

Die 1. Messungen erfolgte bei einer invertierenden Schaltung mit  $R_1 = 1k\Omega$  und  $R_2 = 3,9k\Omega$ . Die 2. Messungen erfolgte bei einer invertierenden Schaltung mit  $R_1 = 10k\Omega$  und  $R_2 = 39k\Omega$ . Man hat als Verstärkung ca. 3,9. Das Eingangssignal war bei beiden identisch. Es war ein Sinus mit einer Amplitude von 0,7V. Die Übertragungsfunktion und Phasenverlauf der beiden Messungen sind in den Abbildungen 7 und 8 dargestellt. Bei der 1. Messung wird die Übertragungsfunktion immer flacher, während sie bei der 2. Messung weiter gleichmässig abnimmt. Im Phasendiagramm strebt die Kurve bei 1. Messung gegen 0 und damit auch in Phase der Eingangsspannung (der Operationsverstärker wäre instabil wenn die Verstärkung grösser 1 wäre). Bei der 2. Messung sind für eine Aussage beim Phasenverlauf zu wenige Messpunkte vorhanden.



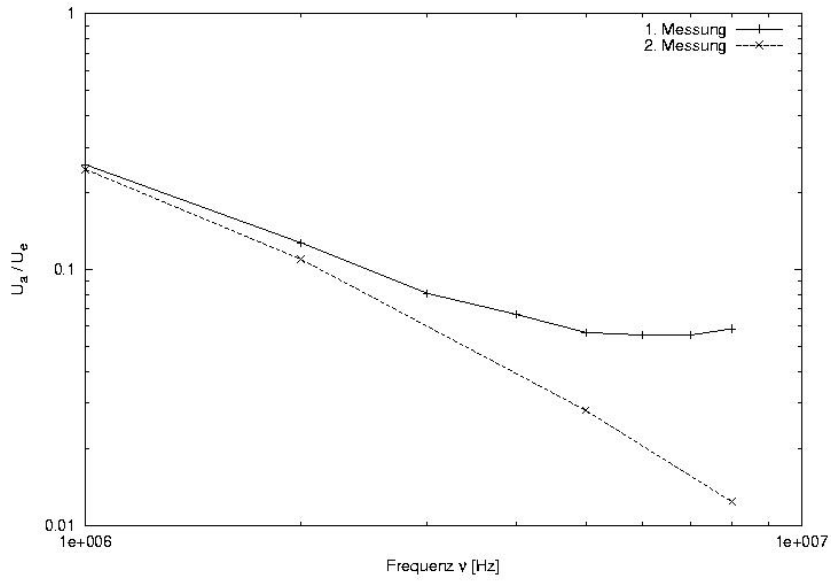


Abbildung 7: Übertragungsfunktion der zwei verschiedenen Messungen

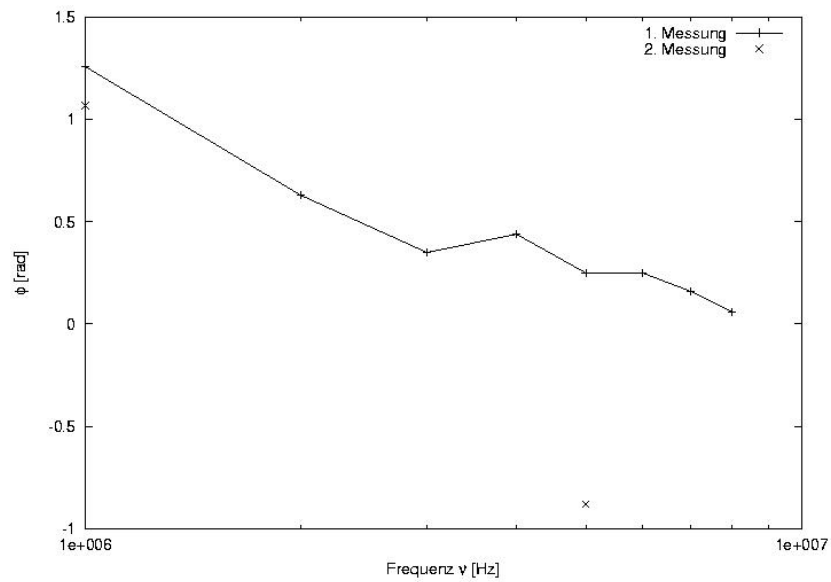


Abbildung 8: Phasenverlauf der zwei verschiedenen Messungen

### 3 Schaltungen

Alle hier verwendeten Operationsverstärker sind vom Typ LM741.

#### 3.1 Integrator

Eine mögliche Anwendung des Operationsverstärker ist der Integrator (vgl. Abbildung 9 und 10).

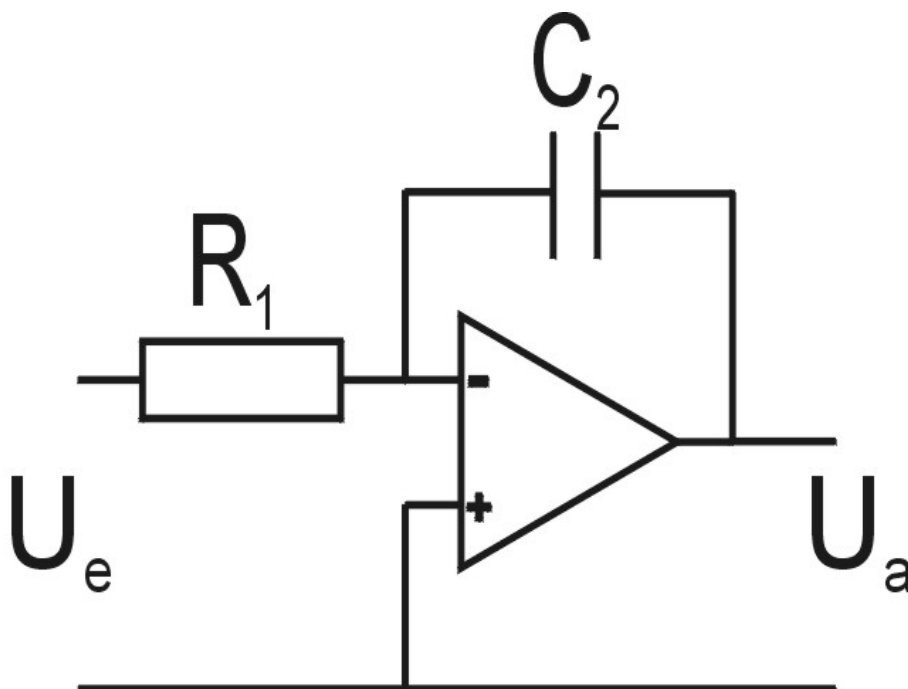


Abbildung 9: Integratorschaltung  $R_1 = 10k\Omega, C_2 = 10nF$

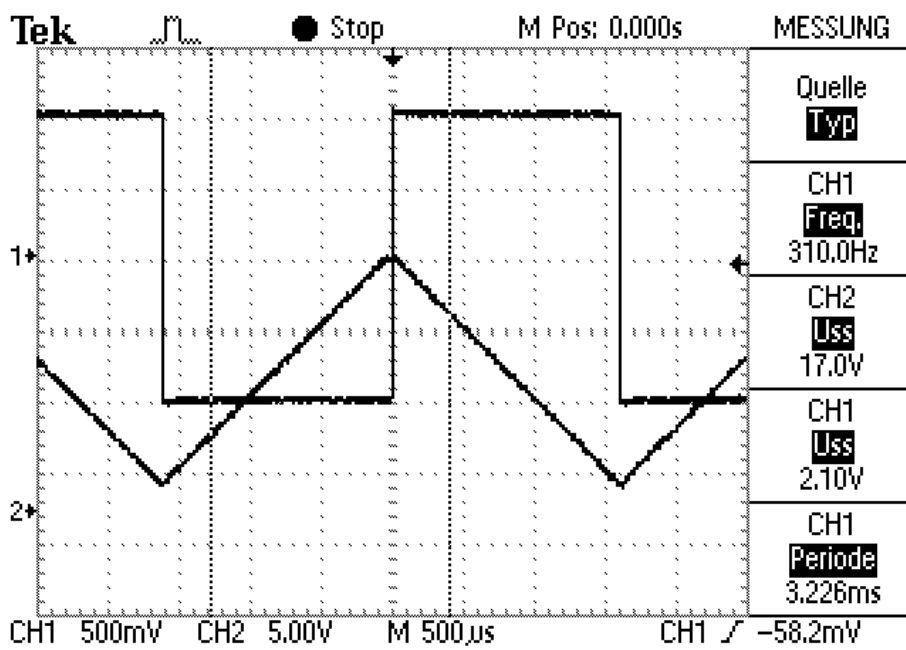


Abbildung 10: Screenshot: Kanal1: Eingang Rechtecksignal Amplitude 1V Frequenz 310Hz , Kanal2: Ausgang

## 3.2 Multiplizierer

Aus Operationsverstärkern und Dioden kann man auch eine Analogmultiplizierer bauen (wobei man nur positive "Zahlen" multiplizieren kann, da der Logarithmus einer negativen Zahl nicht definiert ist). Dieser besteht aus drei Stufen:

1. Logarithmierer
2. Addierer
3. Potenzierer

Man kann damit multiplizieren, da man die Multiplikation umschreiben kann:

$$\begin{aligned} a \cdot b &= e^{\ln(a \cdot b)} \\ &= e^{\ln(a) + \ln(b)} \end{aligned}$$

$D_1$  ist eine Diode mit der Bezeichnung 1N4148. Die Widerstände hatten folgende Werte:

- $R_1 = 1M\Omega$
- $R_2 = 10k\Omega$
- $R_3 = 2,7k\Omega$  (dann  $U_a \approx -U_{1e} \cdot U_{2e}$ ) oder  $R_3 = 100\Omega$

Als Beispiel ist in Abbildung 11 das Eingangssignal, das bei beiden Eingängen gleich war, und das Ausgangssignal als Screenshot dargestellt. Man erhält als Ausgangssignal eine Parabel (man rechnet  $x^2$ ).

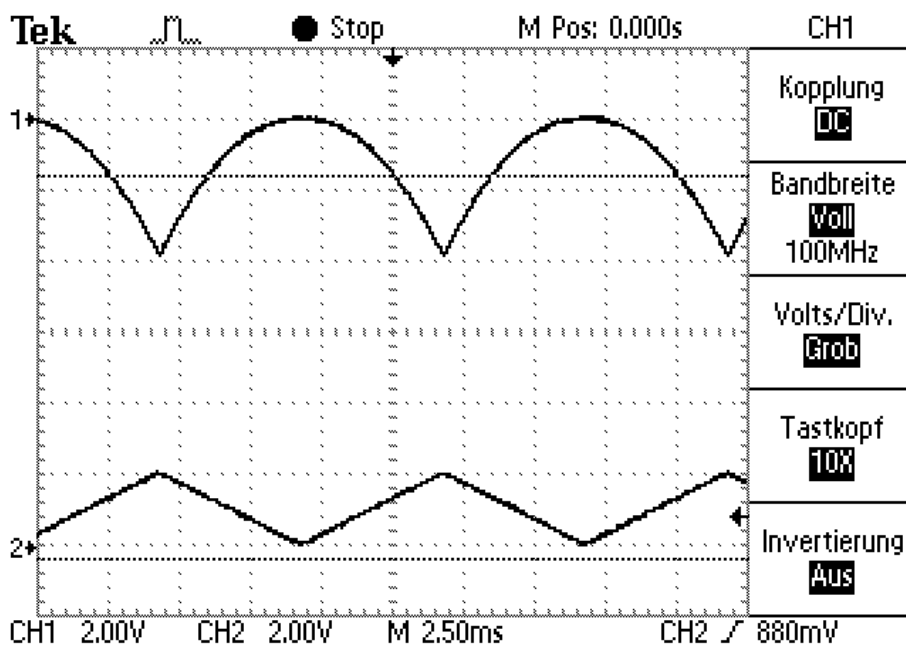


Abbildung 11: Beispiel: Kanal2: Eingang Dreieck mit Offset ( $R_3 = 2,7k\Omega$ ), Kanal2: Ausgang

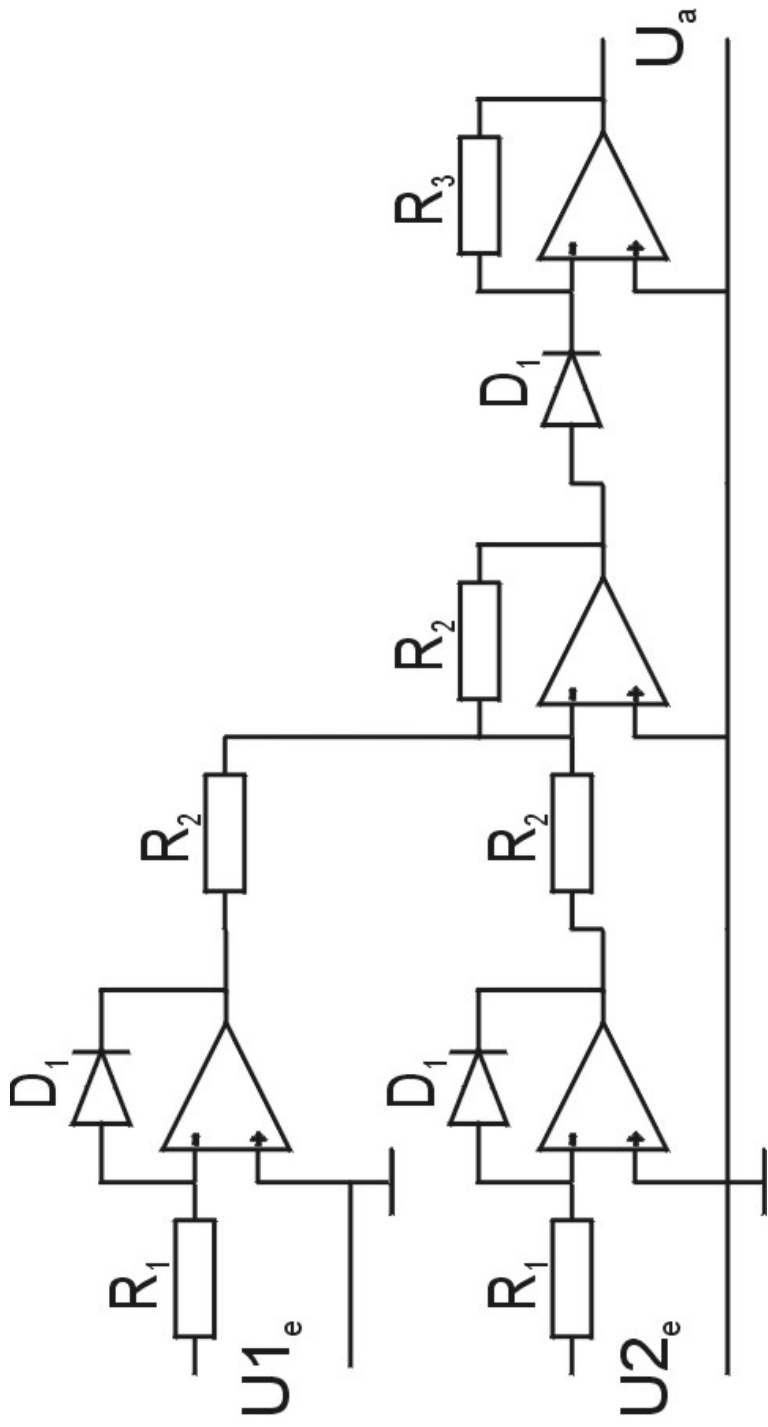


Abbildung 12: Schaltung Multiplizierer