

# Praktikum Messtechnik

Gruppe 4.3.2-4

**Versuch:**

- 403 -  
Operationsverstärker

**Versuchsdatum:**

21.05.2003

**Teilnehmer:**

Hornung, Jörg  
Karg, Michael  
Uhl, Michael

Versuchsvorbereitung:**5.1 Diodenkennlinie**

Eine Halbleiterdiode besteht aus einem N- (Kathode) und einem P-Dotierten (Anode) Bereich. Sie wird im wesentlichen im Durchlassbereich betrieben. Wenn also eine Spannung zwischen Anode und Kathode anliegt fließt ein Strom  $I_{AK}$ .

$$I_{AK} = I_{Rmax} \cdot e^{\left(\frac{U}{U_T} - 1\right)}$$

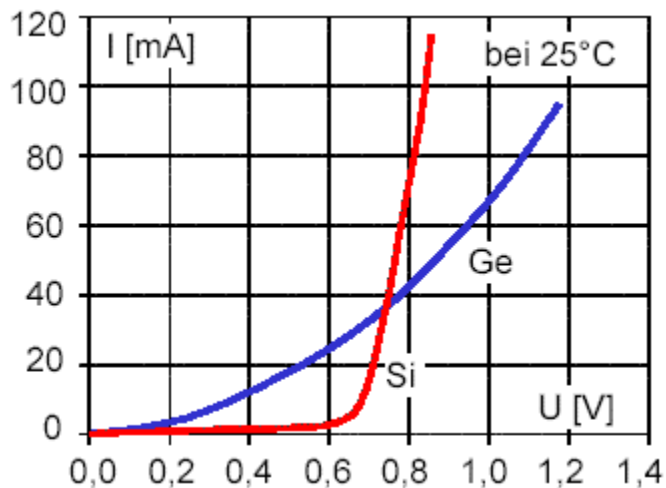
$I_{Rmax}$ : Strom in der Größe des maximalen Sperrstromes

$U_T$  : Temperaturspannung

Die Diode wird aber erst bei einer bestimmten Spannung (Schwellspannung) von ca.  $0,6V$  in Durchlassrichtung leitend. In Sperrrichtung wird die Diode ab einer bestimmten Spannung zerstört (Durchbruchspannung).

Eine Diode wird hauptsächlich dazuverwendet, den Strom in eine bestimmte Richtung durchzulassen, und die andere Richtung zu sperren (z.B. zur Gleichrichtung).

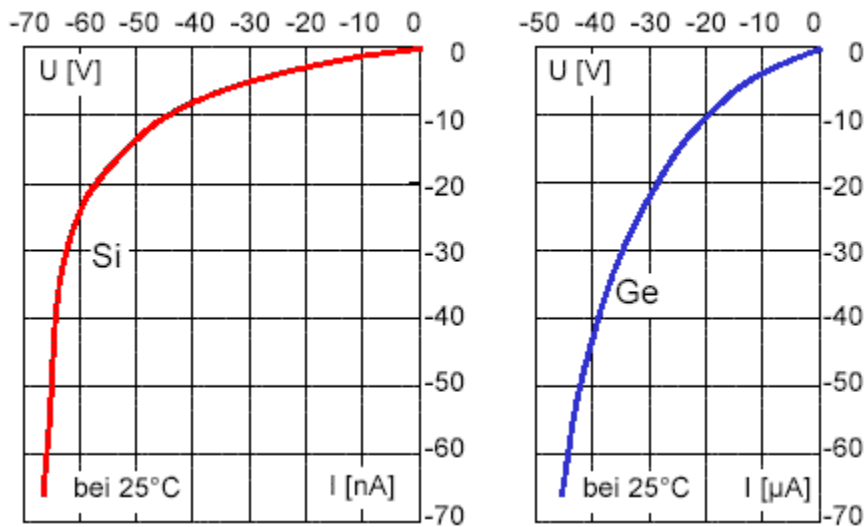
Kennlinie einer Diode im Durchlassbereich:



Si : Silizium-Diode

Ge: Germanium-Diode

Kennlinie einer Diode im Sperrbereich:



### Mittelwert, Gleichrichtwert, Spitzenwert, Effektivwert, Formfaktor

Mittelwert :

$$\overline{x(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$$

Gleichrichtwert :

$$|\overline{x(t)}| = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt$$

Effektivwert :

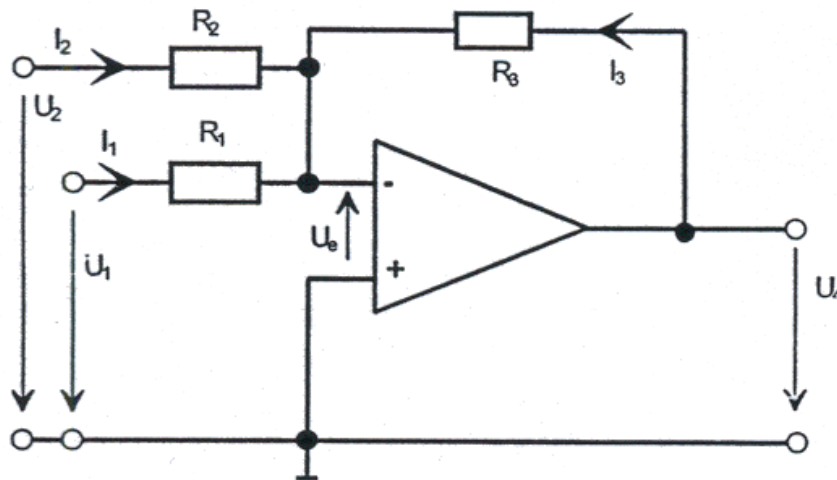
$$X_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [x(t)]^2 dt}$$

Formfaktor :

$$F = \frac{\text{Effektivwert}}{\text{Gleichrichtwert}} = \frac{X_{eff}}{|\overline{x(t)}|}$$

Spitzenwert :  $\hat{u}$  ist der von der Nulllinie aus größte (positive) Wert.

## 5.2 Berechnung des dargestellten Summierverstärkers



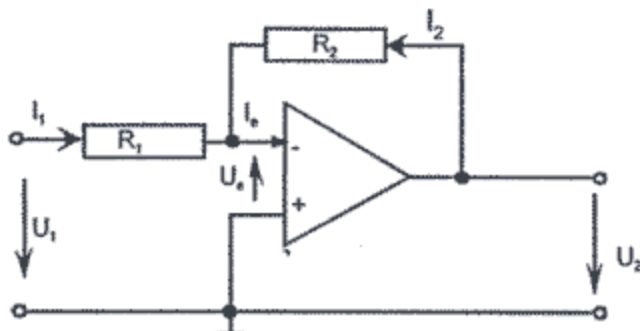
$$I_1 + I_2 + I_3 = 0 \quad ;$$

$$\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \frac{U_3}{R_3} = 0 \quad ; \quad U_4 = U_3 \quad ; \quad \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \frac{U_4}{R_3} = 0 \quad ;$$

$$\underline{\underline{U_4 = -\left(\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2}\right) \cdot R_3}}$$

Versuchdurchführung:

## 6.1 Invertierender Spannungsverstärker



a)  $R_I = R_E = 10k\Omega$  ;  $V_B = -10$  ;

$$V_B = -\frac{R_2}{R_1} \Rightarrow \underline{\underline{R_2 = -(-10 \cdot 10k\Omega) = 100k\Omega}}$$

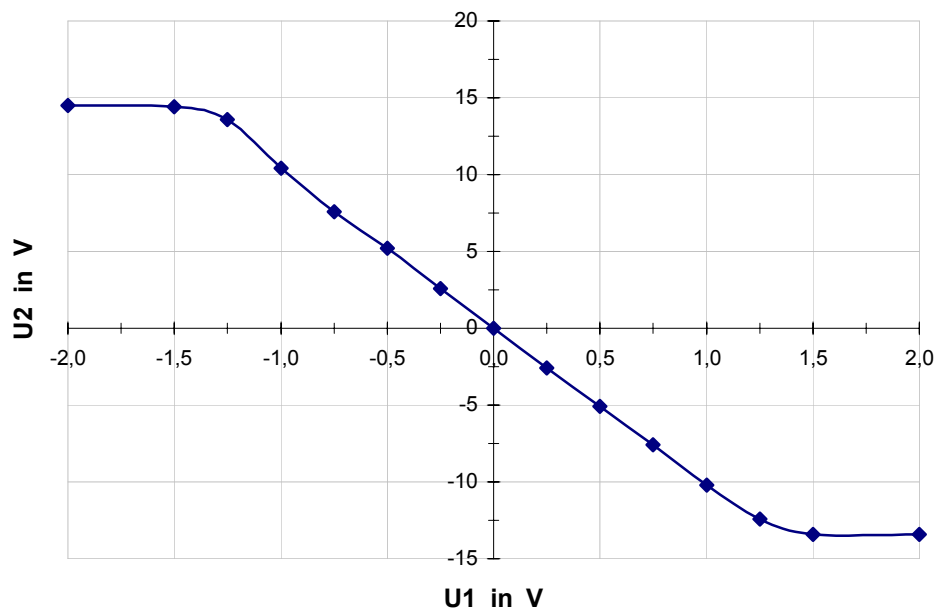
b) Es wurde mit Hilfe der vorhandenen Experimentiereinrichtung die Messschaltung nach der obigen Abbildung aufgebaut und die Kennlinie aufgenommen. Die Eingangsspannung  $U_1$  wurde zwischen  $-2V$  und  $+2V$  variiert und die Ausgangsspannung  $U_2$  gemessen. Als Messgeräte wurde das *NF-Multimeter 12S* und das *Voltcraft HC-5050DB* verwendet.

$U_1$ in V	-2,00	-1,50	-1,25	-1,00	-0,75	-0,50	-0,25	0,00
$U_2$ in V	14,50	14,40	13,60	10,40	7,60	5,20	2,60	0,00

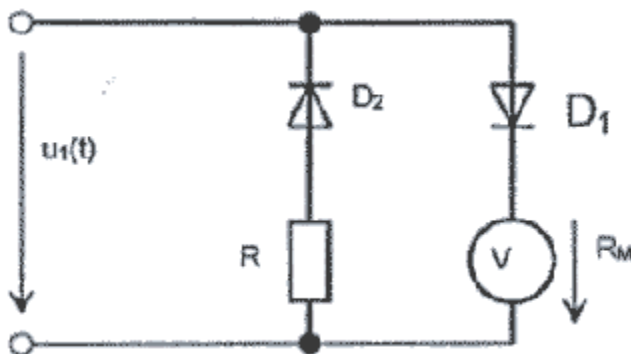
0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	2,00
-2,60	-5,10	-7,60	-10,20	-12,40	-13,40	-13,40

Kennlinie der Ausgangsspannung des invertierenden Spannungsverstärkers:



c) Eine Kompensation war nicht nötig, da die Kennlinie durch den Ursprung verläuft.

## 6.2 Einweggleichrichtung



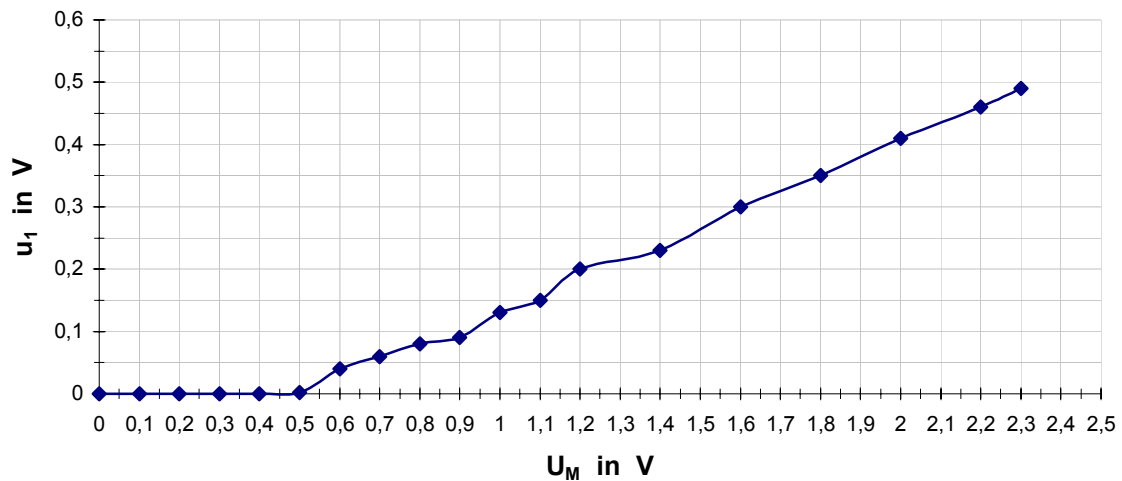
a) Die Messschaltung wurde nach obiger Abbildung aufgebaut und die Kennlinie

$U_M = f(\hat{u}_1)$  aufgenommen. Zur Spannungsmessung wurde ein Drehspulinstrument ohne Gleichrichter (0,5V-Bereich,  $R_M = 10k\Omega$ ) verwendet. Für den Widerstand  $R$  wurden  $100k\Omega$  und für die Frequenz wurde  $200Hz$  gewählt.

$\hat{u}_1$ in V	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$U_M$ in V	0	0	0	0	0	0,002	0,04	0,06	0,08	0,09
F	-	-	-	-	-	176,78	10,61	8,25	7,07	7,07

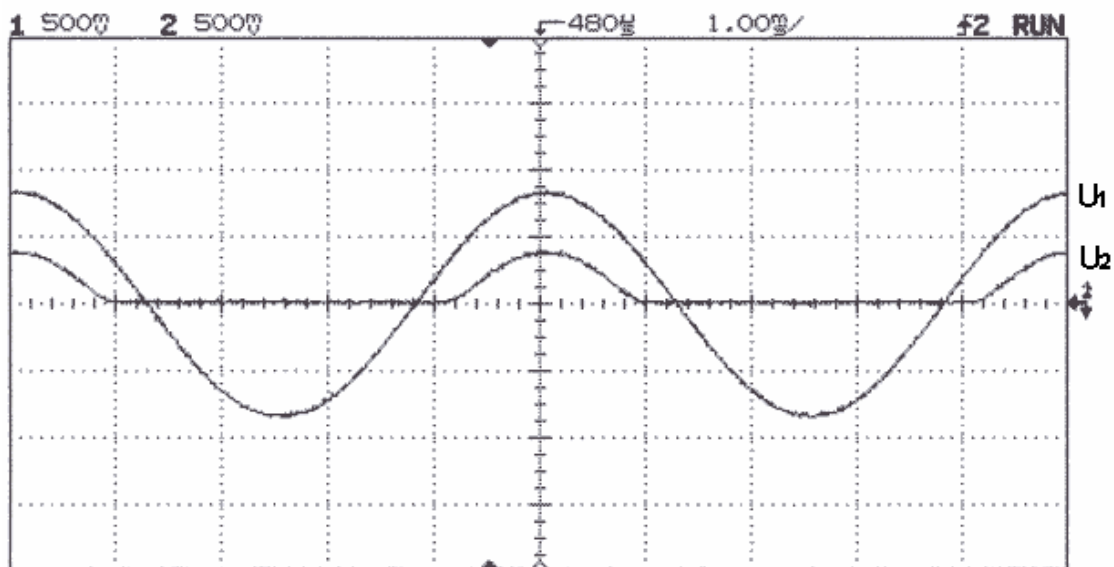
1,0	1,1	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,3
0,13	0,15	0,20	0,23	0,30	0,35	0,41	0,46	0,49
5,44	5,19	4,24	4,30	3,77	3,64	3,45	3,38	3,32

Kennlinie:  $U_M = f(\hat{u}_1)$

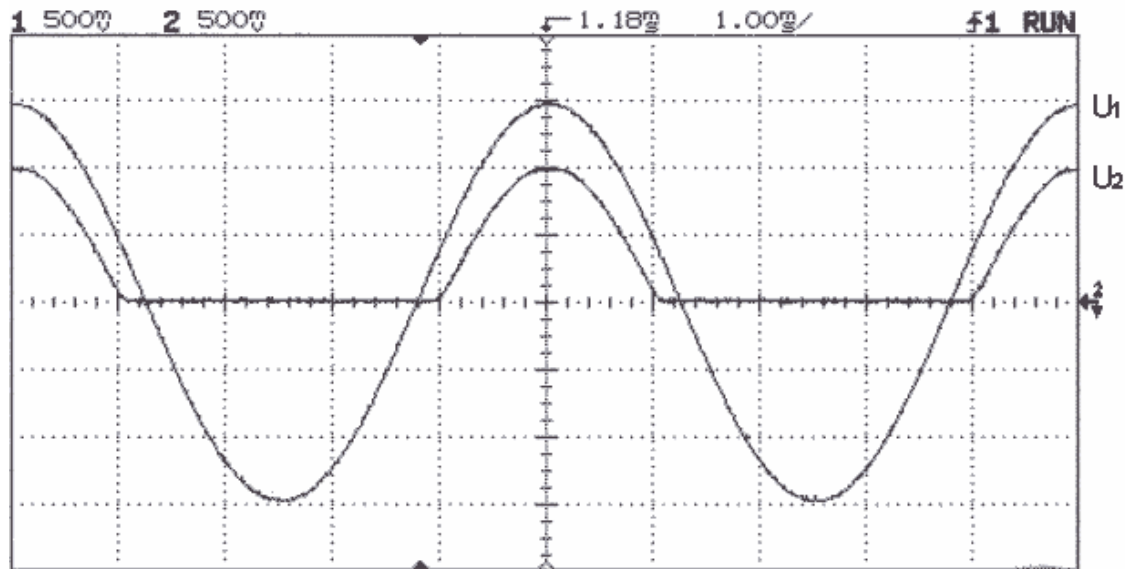


b) Die Spannungsverläufe  $\hat{u}_1$  und  $U_M$  wurden mit dem Oszilloskop für zwei verschiedene Spannungen beobachtet und aufgezeichnet.

Oszillogramm für  $\hat{u}_1 = 0,8V$ :

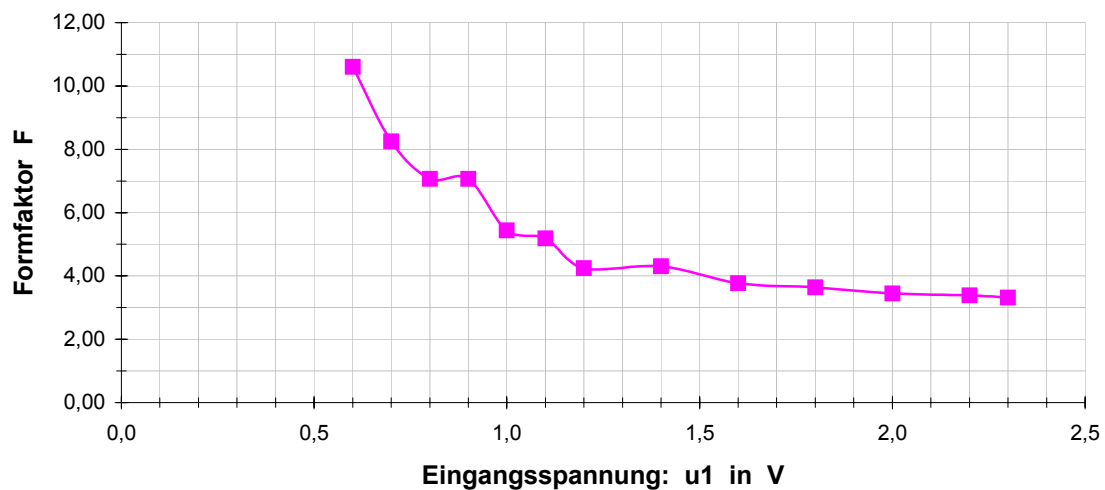


Oszillogramm für  $\hat{u}_1 = 1,5V$ :



c) Formfaktor: 
$$F = \frac{U}{\overline{|u|}} = \frac{\hat{u}_1}{U_M}$$
 [Werte berechnet bei a)]

Formfaktor in Abhängigkeit von der Eingangsspannung  $F = f(\hat{u}_1)$  :

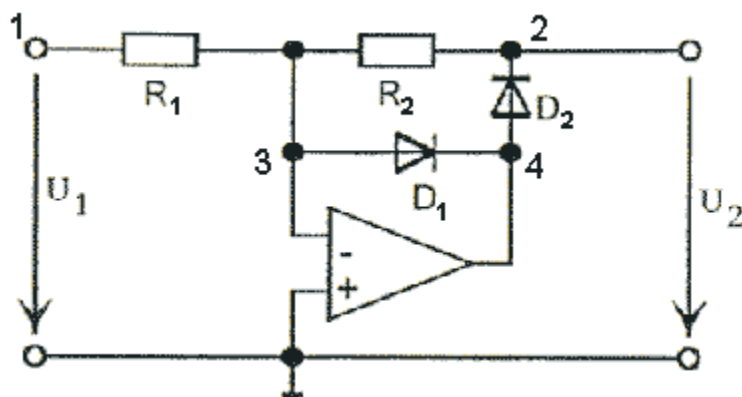


Bei dieser Einweggleichrichterschaltung ist die dem Messgerät vorgeschaltete Diode  $D_1$ , die es dem Messgerät ermöglicht auch Wechselgrößen zu messen, zu berücksichtigen. An der Diode fällt eine Spannung ab, die sog. Schwellenspannung. Bei dieser Diode müssen erst



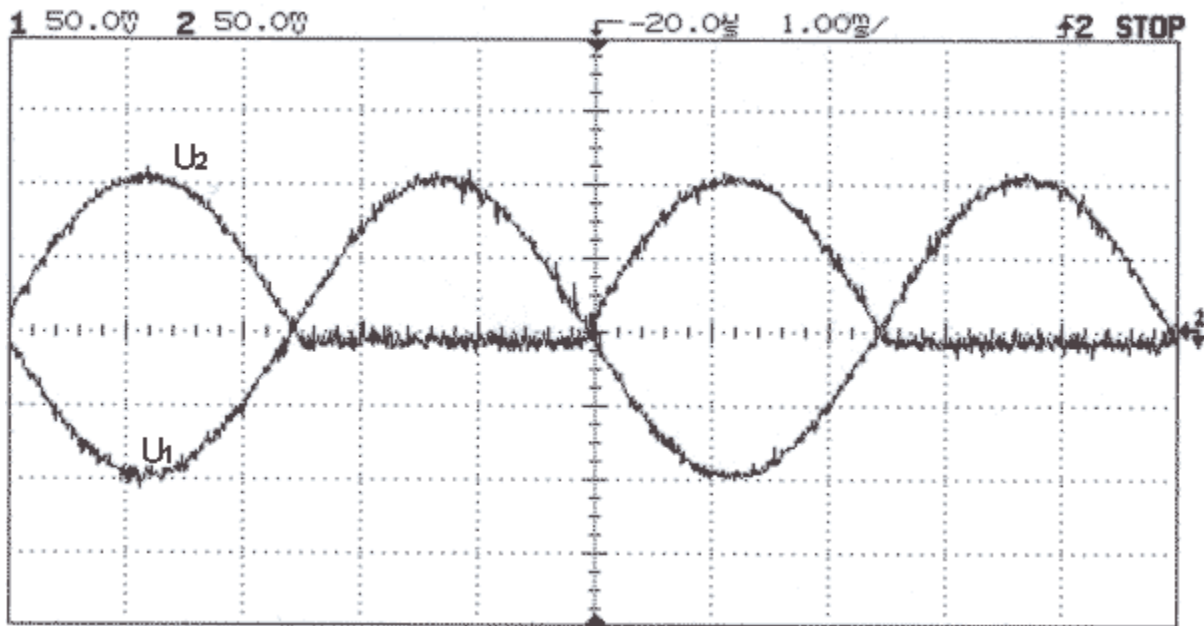
0,6V Schwellenspannung überschritten werden um am Messgerät eine Spannung ablesen zu können. Auch die gekrümmte Diodenkennlinie ist zu berücksichtigen, da die Diode ein differentieller Widerstand ist. Sie führt zu einem exponentiell ansteigenden Strom bei steigender Eingangsspannung  $\hat{u}_1$ , dem der Zeiger des Messgeräts proportional folgt. Dieses exponentielle Wachstum schlägt sich somit über die abgelesene Spannung auch auf den Formfaktor nieder.

### 6.3 Ideale Einweggleichrichtung unter Verwendung einer Operationsverstärkerschaltung



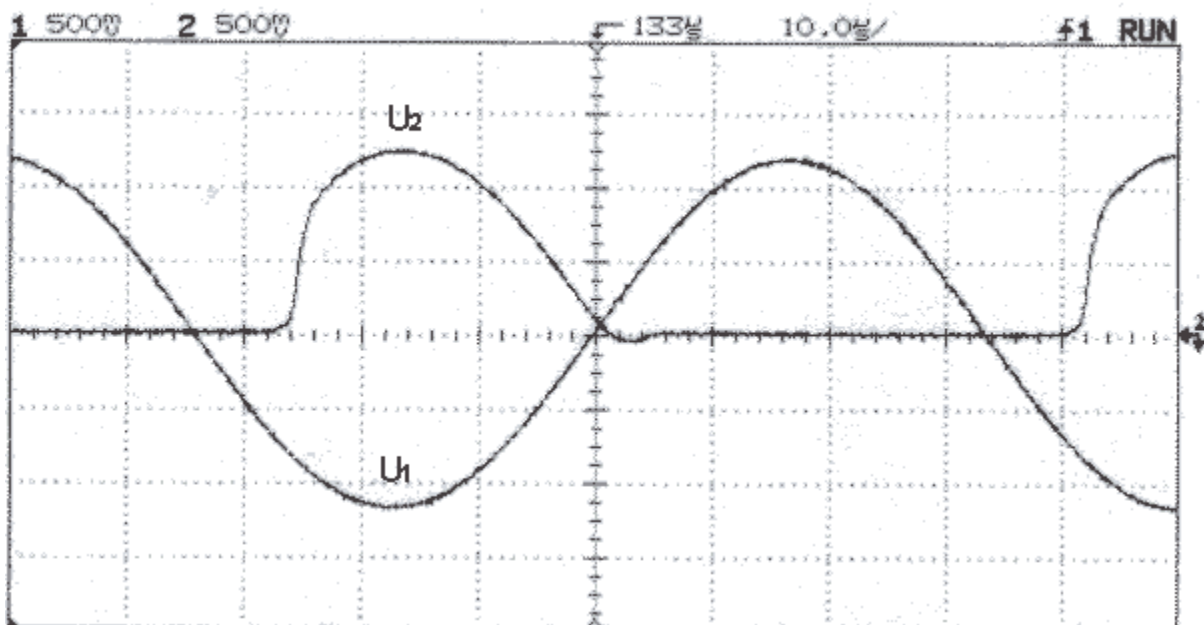
Die Messschaltung wurde nach obiger Darstellung aufgebaut und wurde bezüglich Ihrer Grenzen untersucht und oszilloskopiert.

Oszillogramm bei einer Frequenz von  $200\text{Hz}$  und einer Eingangsspannung von  $100\text{mV}$ :



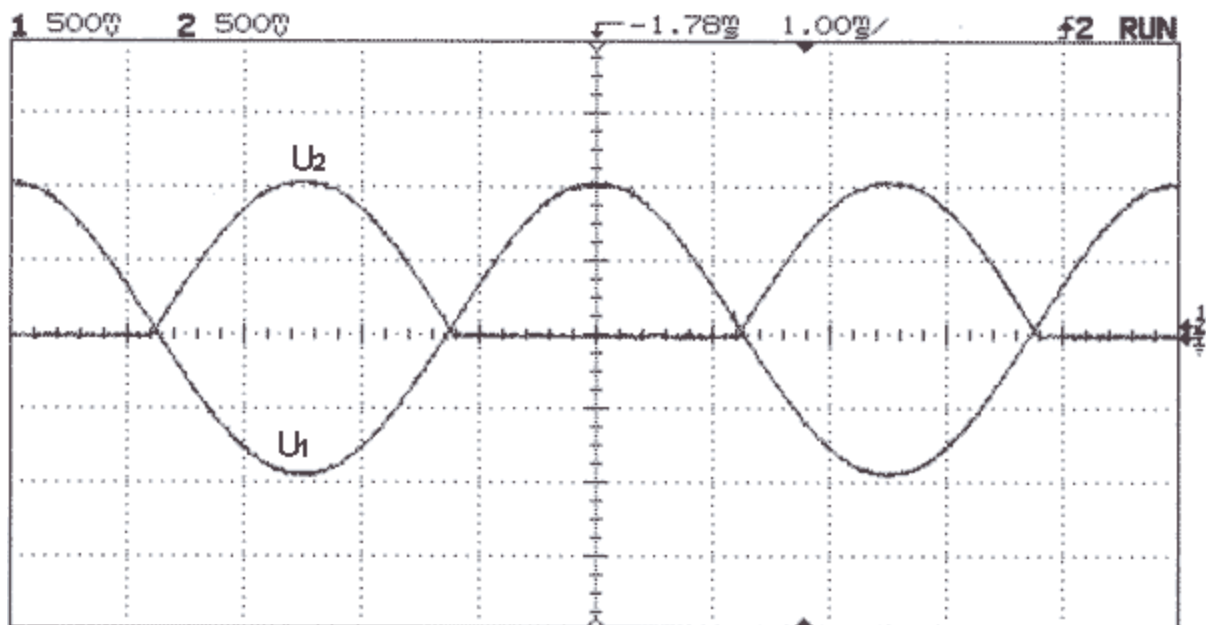
Selbst bei einer Eingangsspannung von unter 0,6V ist eine Gleichrichtung möglich.  
Die Schwellenspannung der Diode spielt hier keine Rolle.

Oszillogramm bei einer Frequenz von 15kHz und einer Eingangsspannung von 1,5V:



Bei einer zu hohen Frequenz wie hier z.B. 15kHz wird das Ausgangssignal nicht sauber wiedergegeben. Es weicht von der Sinusform ab.

Oszillogramm bei einer Frequenz von 200Hz und einer Eingangsspannung von 1V:



Wenn die Grenzen der Schaltung wie hier nicht überschritten werden, erhält man eine saubere Einweggleichrichtung.

Bei dieser Gleichrichtung durch eine Operationsverstärkerschaltung können auch sehr kleine Eingangsspannungen von weit aus weniger als 0,6V (Schwellenspannung einer Diode) gleichgerichtet werden. Die Grenzen liegen bei:

$$0V < U_1 \leq 15V \quad \text{und} \quad 0Hz < f \leq 15kHz$$

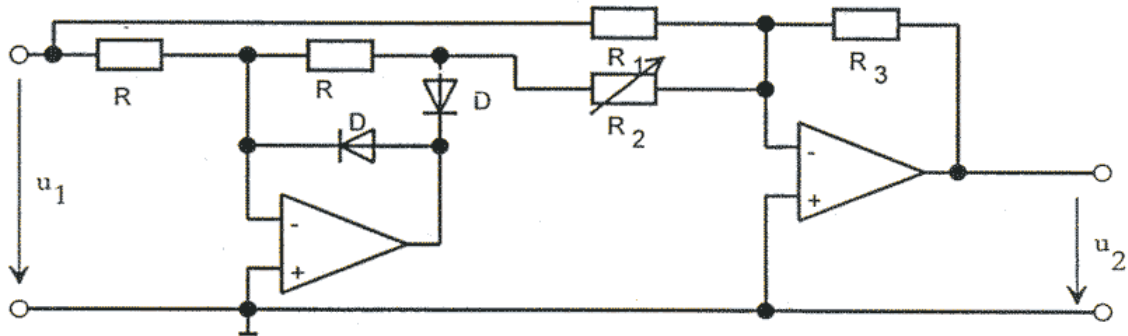
b) Der Eingangswiderstand des Operationsverstärkers ist sehr groß (nahezu  $\infty$ ) und deshalb fließt fast kein Strom in den Eingang hinein, was bedeutet das am Eingangswiderstand auch fast keine Spannung abfällt. Man bezeichnet deshalb den *Messpunkt 3* als virtuellen Nullpunkt, da zwischen ihm und Masse fast kein Potentialunterschied vorhanden ist.

Liegt nun eine positive Eingangsspannung  $U_1$  an so fällt am Widerstand  $R_1$  eine Spannung ab und erzeugt einen Strom. Am invertierten Eingang liegt ein positives Signal an, was zur Folge hat das am Ausgang des Operationsverstärkers ein negatives Signal erscheint. Das Potential am *Messpunkt 4* ist negativer als das Potential am *Messpunkt 3* wodurch ein Strom durch die Diode  $D_1$  fließt welchen einen Spannungsabfall gleich der Schwellenspannung hervorruft. Das Potential am *Messpunkt 2* ist positiver als das am *Messpunkt 4* und damit die Diode  $D_2$  in Sperrrichtung geschaltet. Somit ist die Spannung  $U_2=0V$ .

Liegt nun eine negative Eingangsspannung  $U_1$  an so wird durch den Widerstand  $R_1$  wieder ein Strom erzeugt. Aber am invertierten Eingang des Operationsverstärkers liegt nun ein negatives Signal was am Ausgang des Operationsverstärkers ein positives Signal hervorruft. Die Diode  $D_1$  ist nun in Sperrrichtung geschaltet und die Diode  $D_2$  in Durchlassrichtung. Da aber unser virtueller Nullpunkt annähernd 0V haben sollte und  $U_1$  an  $R_1$  abfällt muss laut der Knotenpunktregel  $(-U_1) = U_2$  sein und an  $R_2$  abfallen. Dies wird erreicht da der Operationsverstärker an seinen Ausgang eine Spannung stellt, die um die Schwellenspannung von  $D_2$  größer ist als  $U_1$ . Die Ausgangsspannung  $U_2$  ist folglich  $(-U_1)$ .

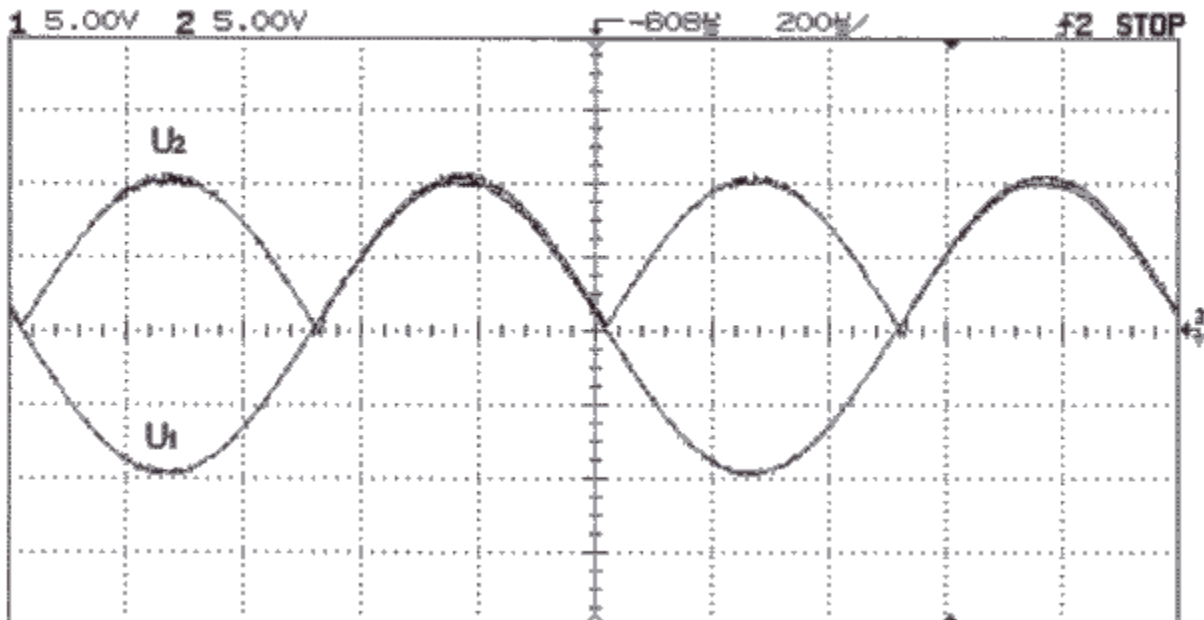
Wenn die Eingangsspannung eine Spitzenspannung von  $1V$  hat, so hat auch die Ausgangsspannung eine Spitzenspannung von  $1V$  nur ist eben die positive Halbwelle weggeschnitten.

#### 6.4 Ideale Doppelweggleichrichtung

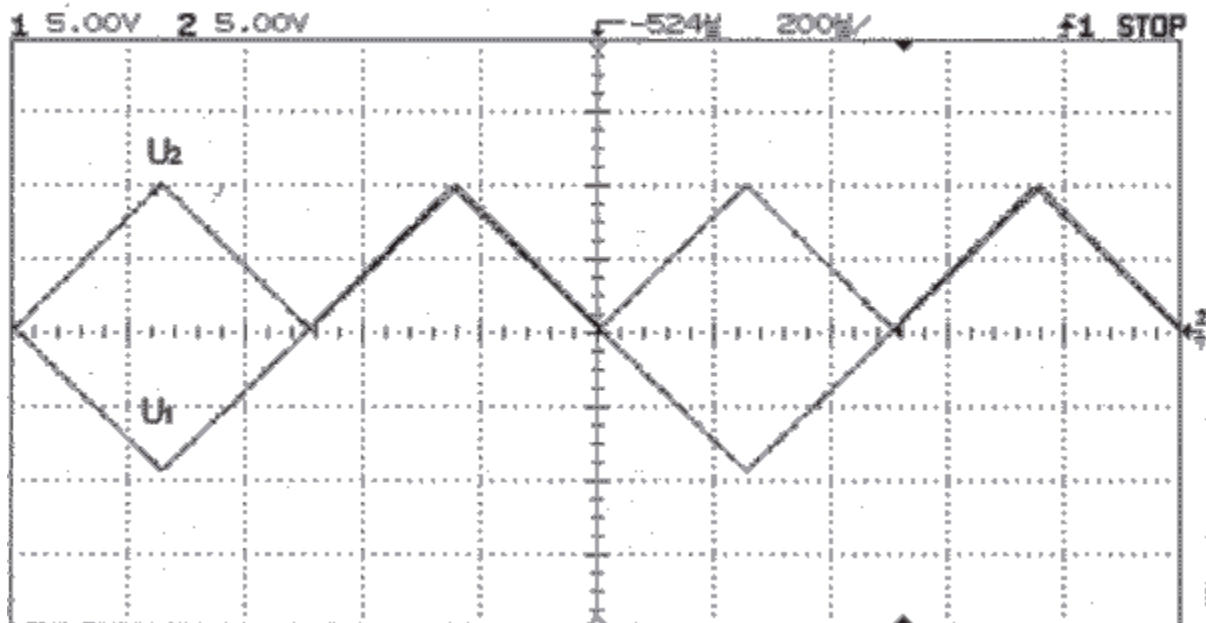


Die Messschaltung wurde nach obiger Darstellung aufgebaut. Die Widerstandswerte betrugen  $R_1=R_3=10k\Omega$ ;  $R_2=5k\Omega$  (Potentiometer);  $R=3,3k\Omega$ . Die Eingangsspannung  $U_1$  hatte eine Frequenz von  $1kHz$  und wurde bei Sinus- und Dreieck-Spannung in der Amplitude variiert. Sie wurde ebenso wie die Ausgangsspannung  $U_2$  oszilloskopiert und beobachtet.

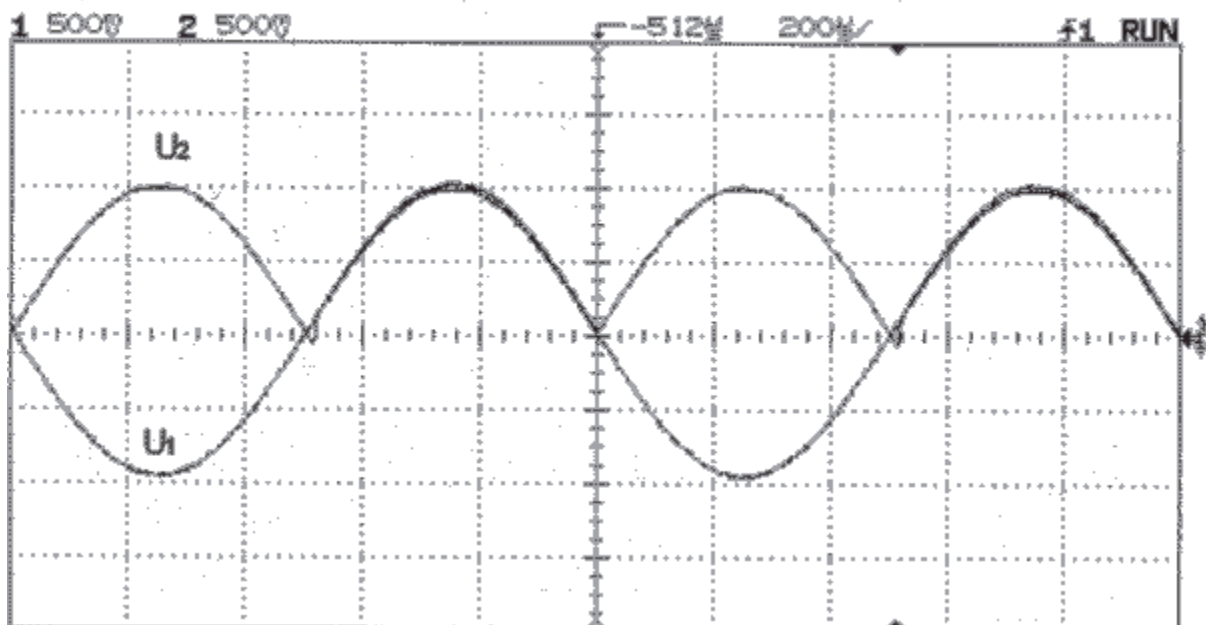
Oszillogramm bei  $\hat{u}_1=10V$  Sinus-Spannung:



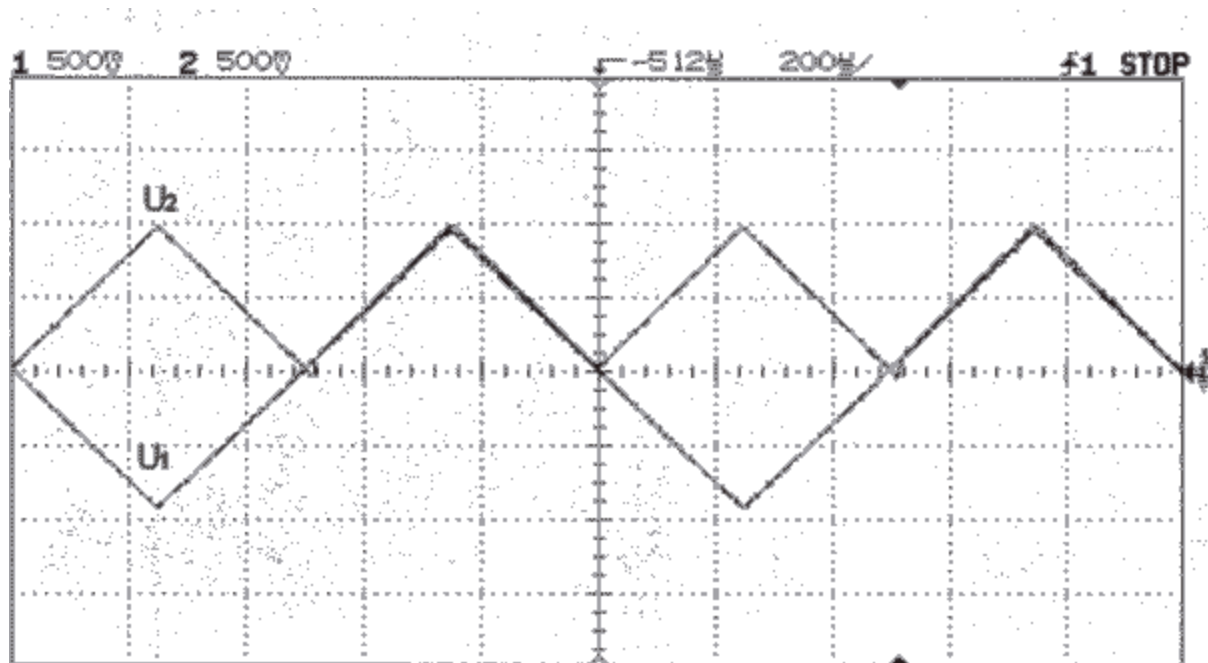
Oszillogramm bei  $\hat{u}_1 = 10V$  Dreieck-Spannung:



Oszillogramm bei  $\hat{u}_1 = 1V$  Sinus-Spannung:



Oszillogramm bei  $\hat{u}_1 = 1V$  Dreieck-Spannung:



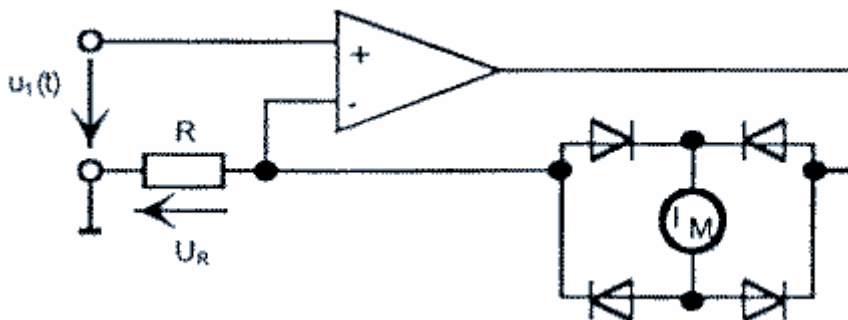
Bei der Schaltung handelt es sich um eine Doppelgleichrichtung, das heißt, die negative Halbwelle wird nicht einfach abgeschnitten, sondern sie wird nach oben geklappt. Die Doppelgleichrichtung funktioniert bei *Sinus*- genauso wie bei *Dreiecksspannungen*. Genauso wie bei der Einweggleichrichtung können auch Spannungen die kleiner als  $0,6V$  sind gleichgerichtet werden.

b) Der erste Operationsverstärker hat die selbe Funktion als Einweggleichrichter wie bei 6.3 schon beschrieben wurde. Das Besondere an dieser Schaltung ist, dass der zweite Operationsverstärker als Addierer funktioniert.

Bei einer positiven Halbwelle addiert er die invertierte Halbwelle die am Ausgang des ersten Operationsverstärkers erscheint und welche auf Grund des Widerstandverhältnisses  $R_3/R_2$  am Eingang des zweiten Operationsverstärkers um den Faktor 2 verstärkt wird, mit der positiven Halbwelle des Eingangssignals. Am Ausgang des zweiten Operationsverstärkers  $U_2$  erscheint, dadurch, dass auch dieser die Eingangsspannung invertiert, eine positive Halbwelle.

Bei einer negativen Halbwelle fließt durch den Widerstand  $R_2$  kein Strom, das heißt es liegt am zweiten Operationsverstärker nur die negative Halbwelle der Eingangsspannung an. Diese wird invertiert und erscheint am Ausgang  $U_2$  dann ebenfalls als positive Halbwelle.

### 6.5 Stromgleichrichtung



a) Der Operationsverstärker wird hier aufgrund seiner äußeren Beschaltung als Konstant-Stromquelle verwendet. Ändert die Spannung mit der Zeit  $t$  ihren Wert, so ändert auch der Strom am Ausgang des Operationsverstärkers seinen Wert mit der Zeit. Wegen der vier Dioden, von denen pro Halbwelle immer zwei in Durchlassrichtung und zwei in Sperrrichtung geschaltet sind, zeigt das Messgerät den gleichgerichteten Strom  $I_M$  an. Wird die Skala des Strommessers in Spannungswerte umgeeicht, so kann man auch die Spannung messen.

b) Die Schaltung ist auf einen nicht-invertierenden Spannungs-/Strom-Verstärker zurückzuführen.

c)  $U_1 = 50 \text{ mV}; \quad I_{\max} = 50 \mu\text{A}$

$$I_R \cdot R = U_R; \quad U_R = U_1; \quad I_R = I_{\max};$$

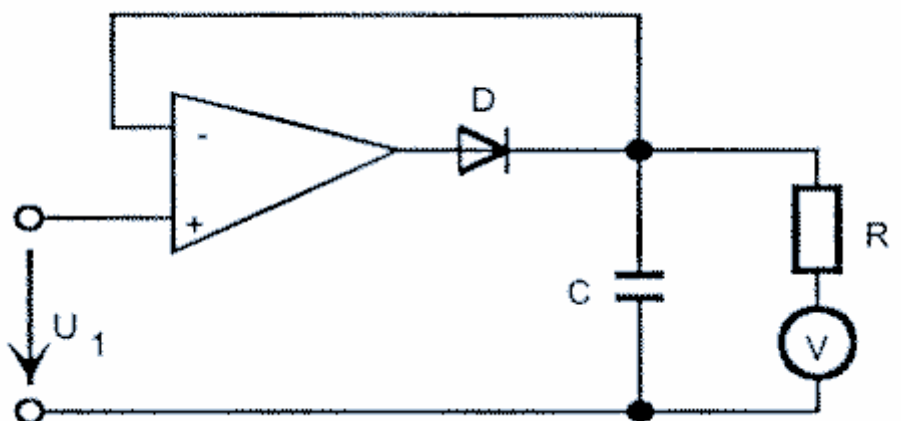
$$R = \frac{\hat{u}_R}{\hat{i}_{\max}}; \quad \hat{u}_R = \sqrt{2} \cdot U_1; \quad \hat{i}_{\max} = \frac{\bar{I}_{\max} \cdot \pi}{2}$$

$$\Rightarrow R = \frac{\sqrt{2} \cdot U_1}{\frac{\bar{I}_{\max} \cdot \pi}{2}} = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,05 \text{ V}}{50 \cdot 10^{-6} \text{ A} \cdot \pi} = 900,3 \Omega \approx \underline{\underline{900 \Omega}}$$

d) Die angegebenen Werte wurden mit der Parallelschaltung von einem  $1 \text{ k}\Omega$  und einem  $10 \text{ k}\Omega$  Widerstand sehr gut erreicht.

$$R = \left( \frac{1 \cdot 10}{1 + 10} \right) \Omega = \underline{\underline{909,1 \Omega}}$$

### 6.6 Scheitelwertmessung

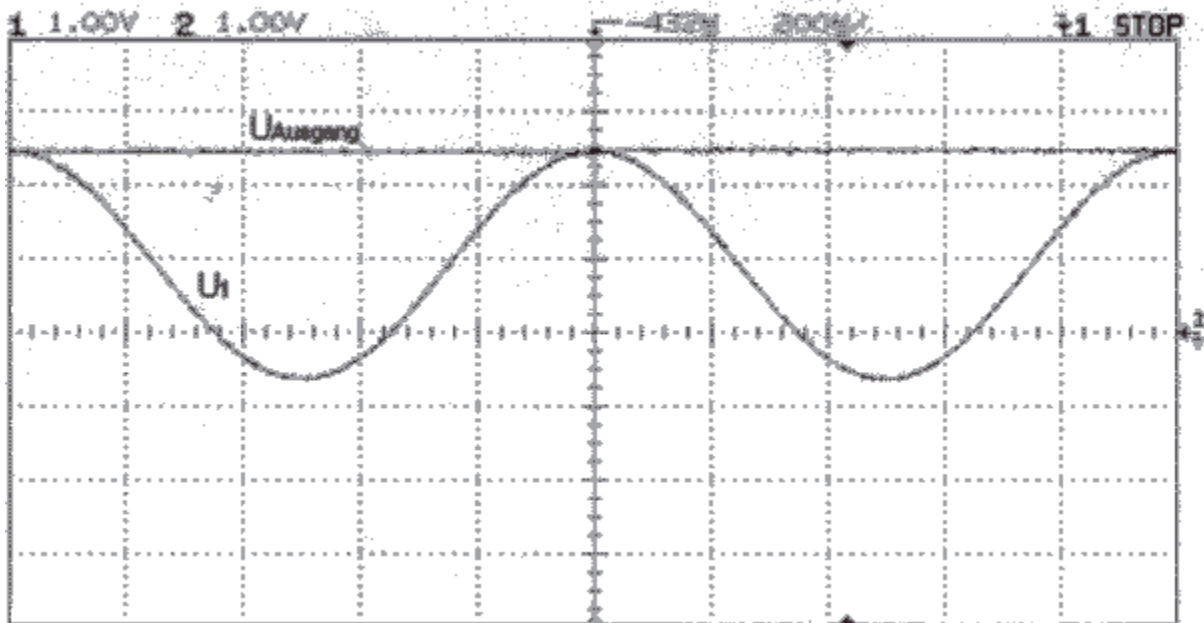


a) Die Schaltung wurde nach der obigen Darstellung aufgebaut und der positive Scheitelwert und nach Umpolung der Diode auch der negative Scheitelwert mit dem Oszilloskop dargestellt und gemessen. Die Eingangsspannung war eine Mischspannung



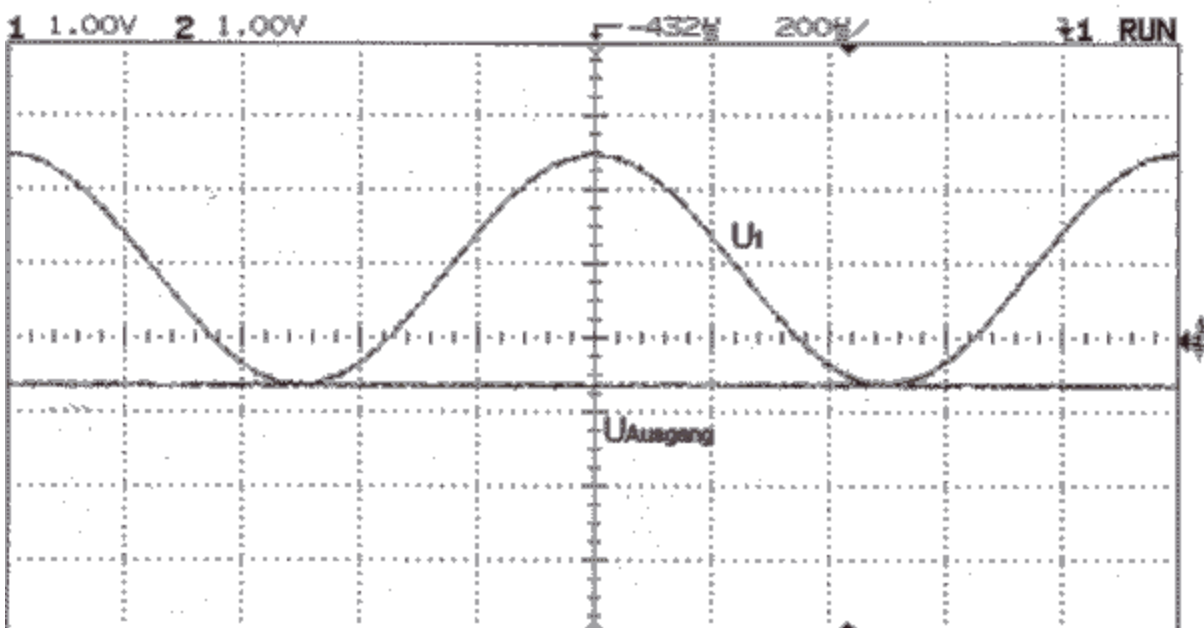
$u_1 = 1V + 1,5V \sin(\omega_0 t)$  mit der Frequenz von  $1kHz$ . Als Voltmeter wurde das *Voltcraft HC-5050DB* verwendet. Als Kondensator wurde ein  $1\mu F$  – Kondensator gewählt.

Oszillogramm bei Schaltung nach Vorgabe:



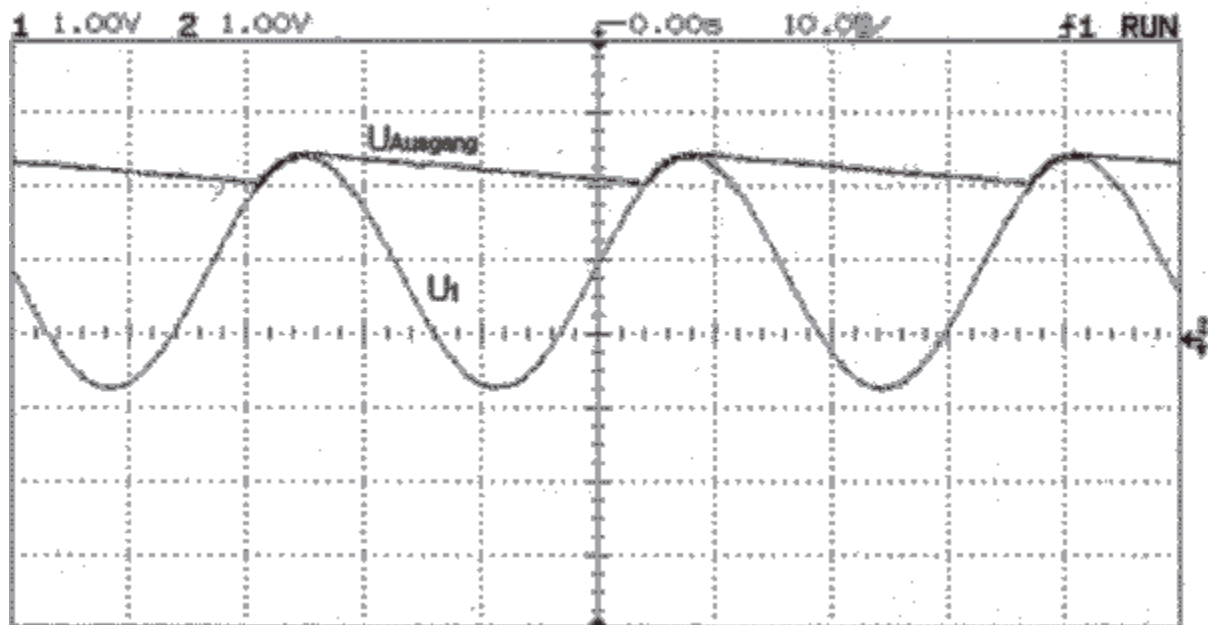
Der positive Scheitelwert beträgt:  $2,2V$

Oszillogramm bei umgepolter Diode:



Der negative Scheitelwert beträgt:  $-0,65V$

Oszillogramm für eine Frequenz von  $30\text{Hz}$ , einer Spannung von  $2,3\text{V}$  und einer Kapazität von  $2\mu\text{F}$  :



Hier wird gezeigt wie sich der Kondensator langsam entlädt. Die Ausgangsspannung ist keine schöne Gleichspannung mehr. Abhilfe schaffen würde entweder die Frequenz zu erhöhen oder die Kapazität vergrößern.

b) Der Operationsverstärker wird hier durch die äußere Beschaltung zum Spannungsfolger gemacht. Da der Spannungsverstärker mit  $R_1 = 0$  und  $R_2 \rightarrow \infty$  gegengekoppelt ist und somit die gesamte Ausgangsspannung des Operationsverstärker auf den Eingang zurückgeführt wird gilt:  $u_a = u_e$ . Somit hat auch der Spannungsabfall an der Diode keinen Einfluss auf die Scheitelwertsmessung, da erst nach der Diode zurückgekoppelt wird.

Durch die Richtung mit der die Diode in die Schaltung eingebaut ist, lässt sich der positive bzw. der negative Scheitelwert der Spannung mit dem Messgerät messen. Der Kondensator C lädt sich auf den Scheitelwert der anliegenden Spannung auf und kann sich nicht mehr entladen, da im Idealfall der Innenwiderstand  $R_i$  des Messgerätes unendlich groß ist. Da aber der Innenwiderstand nicht unendlich groß ist muss die Zeitkonstante viel größer als  $T_0$  sein, da sich sonst der Kondensator schon während der zu messenden Halbwelle über  $R_i$  entladen kann. Der Kondensator kann sich erst bei der Halbwelle wieder entladen die von der Diode gesperrt wird.

c) Um den Effektivwert messen zu können müsste man das Spannungsmessgerät so

umkalibrieren, dass die Anzeige der Scheitelspannung immer mit dem Wert  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  multipliziert wird.

