

Protokoll: Operationsverstärker I

Tom Kranz, Philipp Hacker

21. Mai 2014

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|----------------------------------|-----------|
| 1 | Vorbereitung | 2 |
| 1.1 | Vorbereitungsaufgabe 1 | 2 |
| 1.2 | Vorbereitungsaufgabe 2 | 3 |
| 1.3 | Vorbereitungsaufgabe 3 | 3 |
| 1.4 | Vorbereitungsaufgabe 4 | 4 |
| 1.5 | Vorbereitungsaufgabe 5 | 4 |
| 1.6 | Schaltskizzen | 5 |
| 1.7 | Dimensionierung | 6 |
| 2 | Durchführung | 7 |
| 2.1 | Messgeräte | 7 |
| 2.2 | Messergebnisse | 7 |
| 2.2.1 | Versuchsaufgabe 1 | 7 |
| 2.2.2 | Versuchsaufgabe 2 | 8 |
| 2.2.3 | Versuchsaufgabe 3 | 8 |
| 2.2.4 | Versuchsaufgabe 4 | 9 |
| 2.2.5 | Versuchsaufgabe 6 | 9 |
| 2.3 | Oszillogramme | 10 |
| 2.3.1 | Versuchsaufgabe 4 | 10 |
| 2.3.2 | Versuchsaufgabe 5 | 10 |
| 3 | Auswertung | 11 |
| 4 | Anhang | 11 |

1 Vorbereitung

1.1 Vorbereitungsaufgabe 1

Die Kenngrößen eines Operationsverstärkers sind die Differenzverstärkung $A_D(w)$ (i.A. von der Frequenz abhängig), die Differenzeingangsspannung $U_D = U_+ - U_-$ (siehe Abb. 1a) sowie die Eingangs- bzw. Ausgangswiderstände r_G und r_a . Dabei gilt $A_D(w) \propto \frac{U_a}{U_D}$. Ein idealer Operationsverstärker ist durch eine unendlich große, frequenzunabhängige Differenzverstärkung gekennzeichnet. Für ihn werden die Eingangswiderstände als unendlich groß und der Ausgangswiderstand als 0 angenommen (siehe Schaltskizze Abb. 1a). Somit folgt, dass der ideale OPV eine unendlich große Bandbreite besitzt und die ansteuernde Spannungsquelle nicht belastet wird. Wiederum kann der Ausgang des OPV schwach belastet werden, ohne das U_a zusammenbricht. Für reale Operationsverstärker gelten diese Annahmen jedoch nur in erster Näherung: $A_D(w)$ ist im Allgemeinen stark frequenzabhängig (siehe Bodediagramm Abb. 1b; $A_D \in [10^4 \dots 10^7]$) und wird für Frequenzen größer der Transitfrequenz f_t sogar < 1 . Die Gleichtaktwiderstände $r_G \in [10^9 \Omega \dots 10^{15} \Omega]$, der Ausgangswiderstand $r_a \in [30 \Omega \dots 1000 \Omega]$ und der Differenzeingangswiderstand $r_D \in [10^6 \Omega \dots 10^{12} \Omega]$ weichen mehr oder weniger stark von den Idealisierungen ab, was die Belastung der ansteuernden/angesteuerten Systeme sowie die Leistung des OPV empfindlich beeinflusst.

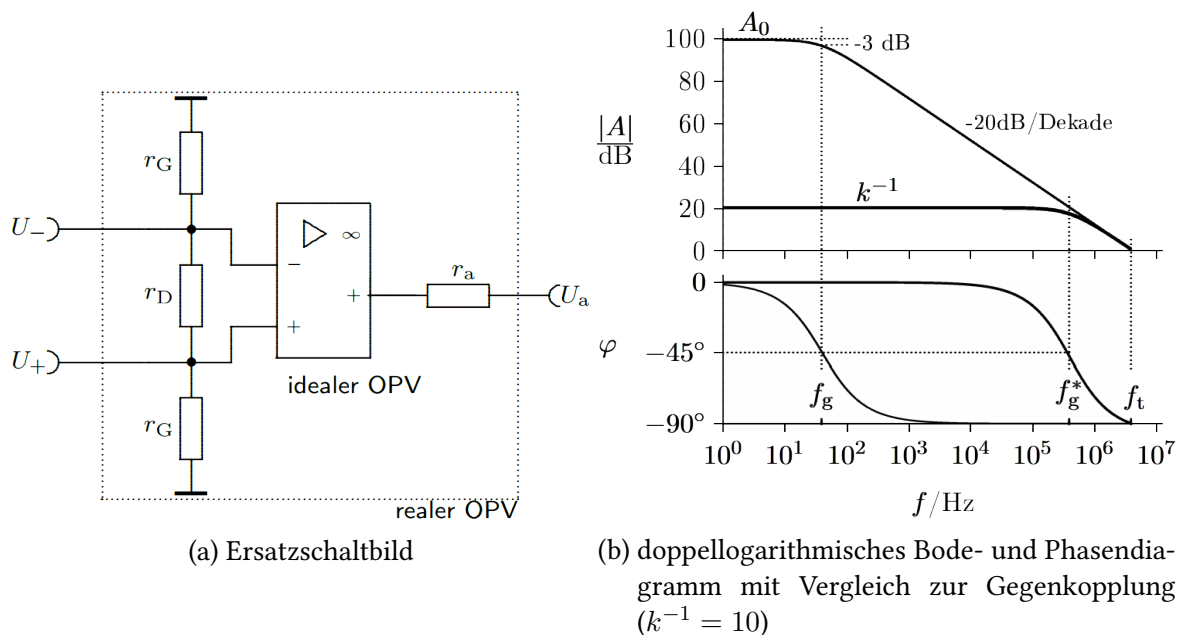


Abb. 1: realer Operationsverstärker

1.2 Vorbereitungsaufgabe 2

$$A(w) = \frac{\frac{1}{k}}{1 + \mathbf{i} \cdot \frac{w}{k \cdot A_0 \cdot w_g}} = \frac{A_D}{1 + k \cdot A_D}$$

$$k \approx \frac{R_1}{R_1 + R_2} ; z = \frac{w}{w_g} \rightarrow A_D(w) = \frac{A_0}{1 + \mathbf{i} \cdot z}$$

$$\rightarrow A(w) = \frac{\frac{1}{k}}{1 + \mathbf{i} \cdot \frac{z}{k \cdot A_0}}$$

1.3 Vorbereitungsaufgabe 3

Abb. 2: Ersatzschaltbild der Elektrometer-Gegenkopplung

$$\frac{\Delta U_a}{\Delta U_D} = A_D \quad \frac{\Delta U_e}{k} = \Delta U_a$$

$$\frac{\Delta U_D}{r_D} = \frac{\Delta U_e}{k \cdot A_D \cdot r_D} \quad \Delta I_D = \frac{\Delta U_e}{r_G} \quad \Delta I_G = \frac{\Delta U_e}{r_G}$$

$$\Delta I_e = \Delta I_G + \Delta I_D = \Delta U_e \cdot \left(\frac{1}{k \cdot A_D \cdot r_D} + \frac{1}{r_G} \right)$$

$$\rightarrow r_e = \frac{\Delta U_e}{\Delta I_e} = \left(\frac{1}{k \cdot A_D \cdot r_D} + \frac{1}{r_G} \right)$$

$$\Delta \tilde{U}_a = A_D \cdot U_D \quad \Delta U_a = \Delta \tilde{U}_a - r_a \cdot \Delta I_a \quad \Delta U_D = -k \cdot \Delta U_a$$

$$\tilde{r}_a = -\frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = -\frac{k \cdot A_D \cdot \Delta U_a + r_a \cdot \Delta I_a}{\Delta I_a}$$

$$\rightarrow \tilde{r}_a = \frac{r_a}{1 + k \cdot A_D}$$

1.4 Vorbereitungsaufgabe 4

$$r_i = \frac{\Delta U_i}{\Delta I_i} \approx R_i \quad \tilde{r}_a = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \approx \frac{r_a}{1 + k \cdot A_D}$$

$$\rightarrow k = \left. \frac{U_-}{U_a} \right|_{U_e=0}$$

1.5 Vorbereitungsaufgabe 5

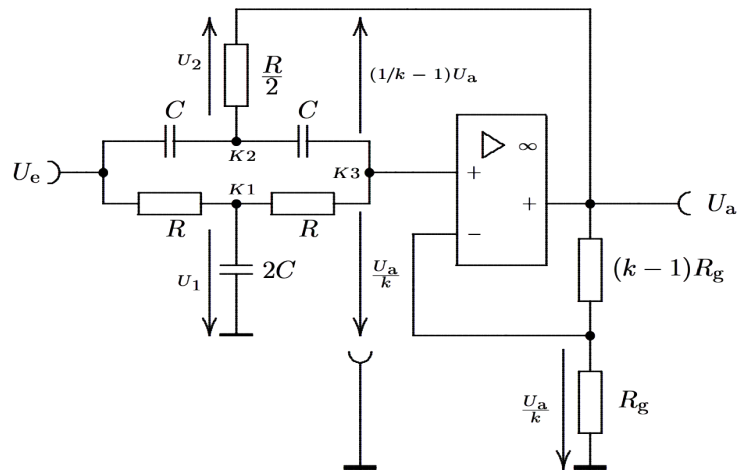


Abb. 3: Schaltbild der Bandsperre

$$\mathbf{K1}: U_1 = \frac{k \cdot U_e + U_a}{2 \cdot k \cdot (1 + P)} \qquad \mathbf{K2}: U_2 = \frac{(k \cdot U_e + (1 - 2 \cdot k) \cdot U_a) \cdot P}{2 \cdot k \cdot (1 + P)}$$

$$\mathbf{K3:} \ ((1 - k) \cdot P + 1) \cdot U_a = \frac{k \cdot U_e + U_a}{2 \cdot (1 + P)} + \frac{(k \cdot U_e + (1 - 2 \cdot k) \cdot U_a) \cdot P^2}{2 \cdot (1 + P)}$$

$$A = \frac{U_a}{U_e} \rightarrow ((1 - k) \cdot P + 1) \cdot A = \frac{k + A + (k + (1 - 2 \cdot k) \cdot A) \cdot P^2}{2 \cdot (1 + P)}$$

$$\rightarrow A = \frac{k \cdot (1 + P^2)}{1 + 2 \cdot (2 - k) \cdot P + P^2}$$

1.6 Schaltskizzen

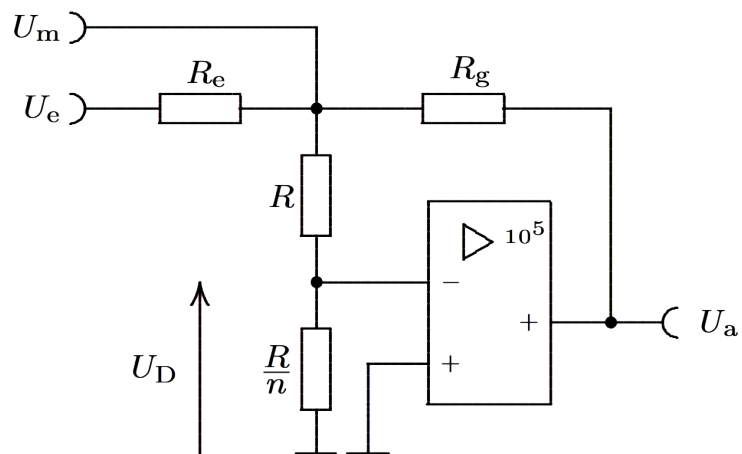
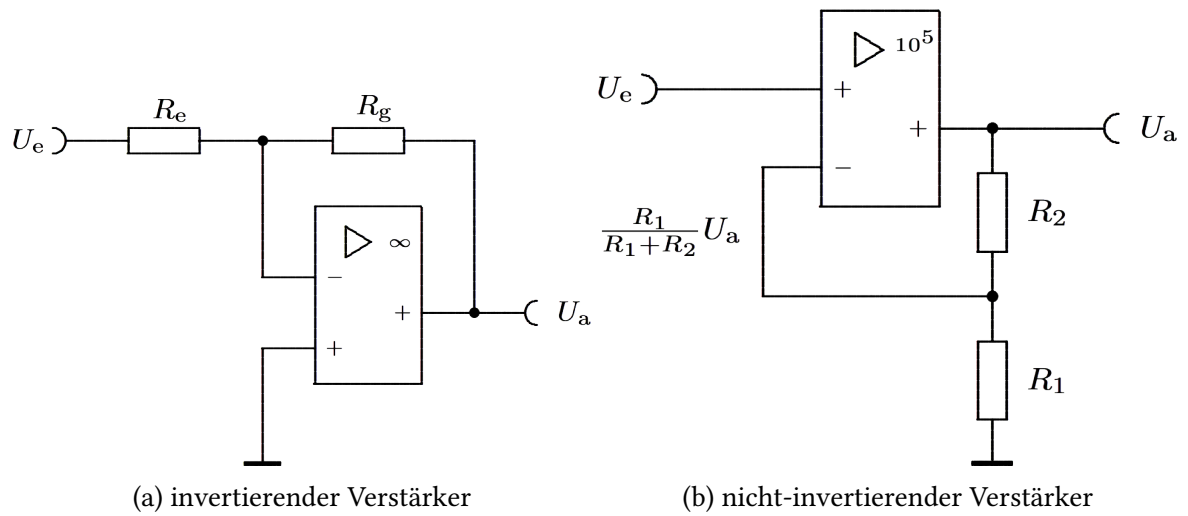
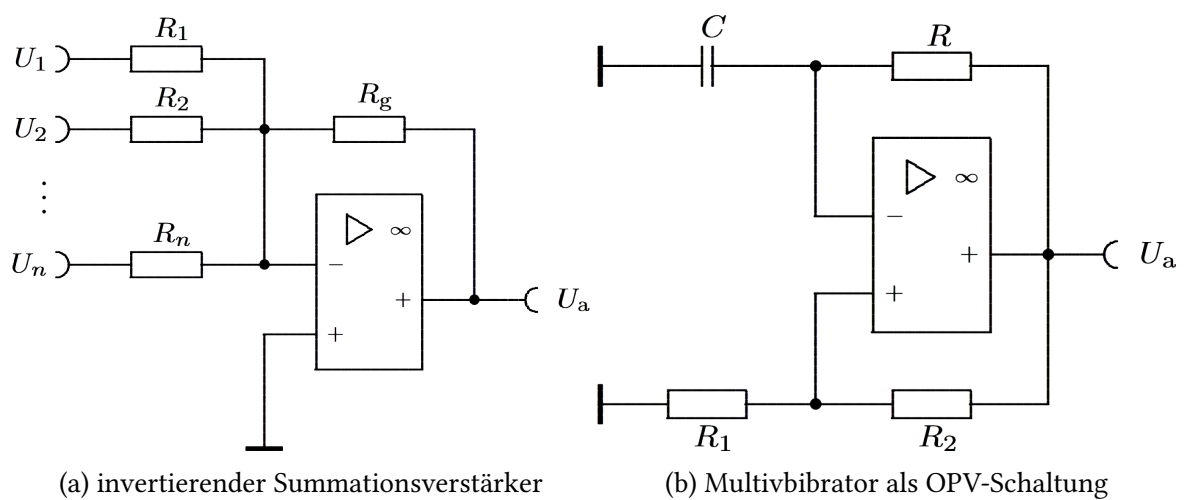


Abb. 5: Schaltung zur Messung der Differenzverstärkung



1.7 Dimensionierung

Versuchsaufgabe 1, Abb. 4a Wie in der Aufgabenstellung gegeben, wurden $R_e = R_g = 10 \text{ k}\Omega$, $U_s = 15 \text{ V}$ sowie U_e auf Massepotential (0 V) gesetzt.

Dabei war ein Kopplungsfaktor $k = \frac{1}{2}$ gefordert ($R_e = R_g$). Weiterhin sollte der differentielle Eingangswiderstand $r_e = R_e$ viel kleiner sein als der differentielle Gleichtaktwiderstand, welcher im Bereich von etwa $10^{15} \Omega$ für einen im Eingang befindlichen FET. Durch das Massepotential von U_e und des nicht-invertierenden Eingangs wird die Differenzspannung U_D quasi 0. Die Speisespannung lässt U_a jedoch nicht verschwinden, womit aus der Kopplung auf den invertierenden Eingang $U_D \neq 0$ folgt.

Versuchsaufgabe 2, Abb. 4b Es galt einen Gegenkopplungsfaktor $k \approx 10^{-1}$ einzustellen. Somit muss $\frac{R_2}{R_1} \approx 9$ sein. Durch den ohmschen Spannungsteiler (beide Widerstände arbeiten in ihrem Leistungsbereich) wird ein Teil der Ausgangsspannung auf den invertierenden Eingang zurückgeführt. Die Widerstände wurden mittelohmig gewählt, weil die gegengekoppelte Spannung über diese nicht zusammenbrechen durfte und der Verluststrom an dieser Stelle möglichst gering gehalten werden sollte. Somit ergab sich $R_1 = 1,195 \text{ k}\Omega$ und $R_2 = 9,94 \text{ k}\Omega$, woraus $k = 0,1073$ folgte.

Versuchsaufgabe 3, Abb. 5 Hierbei sollte eine beliebige Gegenkopplung das Messen der Differenzverstärkung A_D ermöglichen (u.A. Rauschunterdrückung). Ein weiterer Spannungsteiler aus R und dem n -ten Teil von R sorgt für die n -fache Vergrößerung der Messspannung U_m bei voller OPV-Aussteuerung. Der Eingangswiderstand $R_e = R_1 = 1,195 \text{ k}\Omega$ und der gegengekoppelnde Widerstand $R_g = R_2 = 9,94 \text{ k}\Omega$ wurden wiederum aus bereits genannten Gründen mittelohmig gewählt (siehe 1.7; Versuchsaufgabe 1/2). Hinzu kommt, dass sich R_e und R in Reihe zum neuen Eingangswiderstand addieren. Daher ist auch die Größe von R eingeschränkt. Die Wahl von $R = 11,95 \text{ k}\Omega$ macht in der Reihenschaltung mit $\frac{R}{n} = 11,7 \Omega$ ($n = 1021,15$) eben diesen vernachlässigbar.

Versuchsaufgabe 4, Abb. 4a Aus der Forderung, dass $\left| \frac{U_a}{U_e} \right| \approx 10$ sein soll, folgt dass $R_g \approx 10 \cdot R_e$. Dimensioniert man $R_g = 11,93 \text{ k}\Omega$, so folgt $R_e = 1,195 \text{ k}\Omega$. Hierbei ist $|A_D| = 9,985$.

Versuchsaufgabe 5, Abb. 6a Der Kopplungswiderstand R_g wurde, aus bereits angeführten Gründen, zu $11,96 \text{ k}\Omega$ gewählt. Für die Gewichtsfaktoren der Eingangssignale $U_{e;1}$ und $U_{e;2}$ soll $t_i = -\frac{R_g}{R_i} = -1$ gelten. Daraus folgt, dass $R_g = R_i$ ist. Summiert wurden ein Sinussignal und ein Rechtecksignal, jeweils mit der Peak-to-Peak-Spannung von 1 V.

Versuchsaufgabe 6, Abb. 6b Die mittelohmigen Widerstände R_1 und R_2 wählten wir gleich, sodass auf den nicht-invertierenden Eingang gerade $\frac{U_{\max}}{2}$ rückgekoppelt wird. Somit sind R und C maßgeblich für die Frequenz des Multivibrators. Hierbei lädt der Widerstand den Kondensator mit der Zeitkonstante $R \cdot C$ auf. Wenn die Spannung am invertierenden Eingang größer wird als die genannten $\frac{U_{\max}}{2}$, dann beginnt C schlagartig sich umzuladen und der Vorgang wird wiederholt. Über dem Widerstand musste eine hinreichend große Spannung

abfallen, woraus die Dimensionierung zu $R = 6,74 \text{ k}\Omega$ und $C = 6,72 \text{ nF}$ für eine Schwingfrequenz von $f = 10,0048 \text{ kHz}$ folgte.

2 Durchführung

2.1 Messgeräte

Die Speisespannung und die verschiedenen Eingangs-Gleichspannungen lieferte das Stromversorgungsgerät TEKTRONIX PS 280, Wechselsignale wurden mit dem Funktionsgenerator TEKTRONIX AFG 3022B erzeugt. Gleichspannungen wurden mit dem Multimeter VOLTcraft-PLUS VC 920 gemessen, Wechselsignale mit dem Oszilloskop HAMEG HM1508-2 dargestellt.

2.2 Messergebnisse

2.2.1 Versuchsaufgabe 1

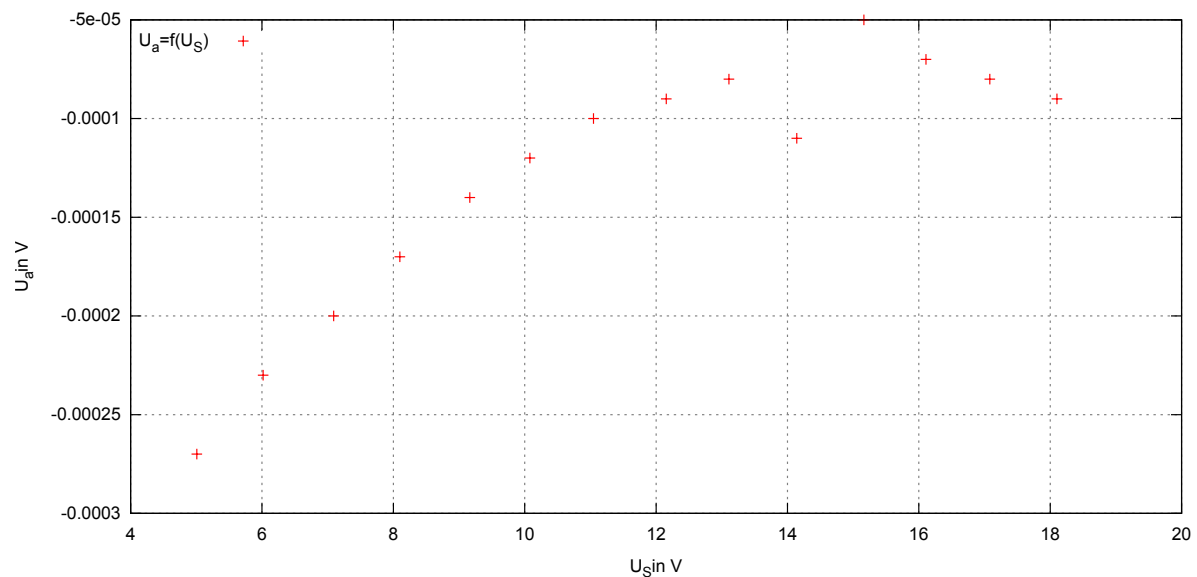
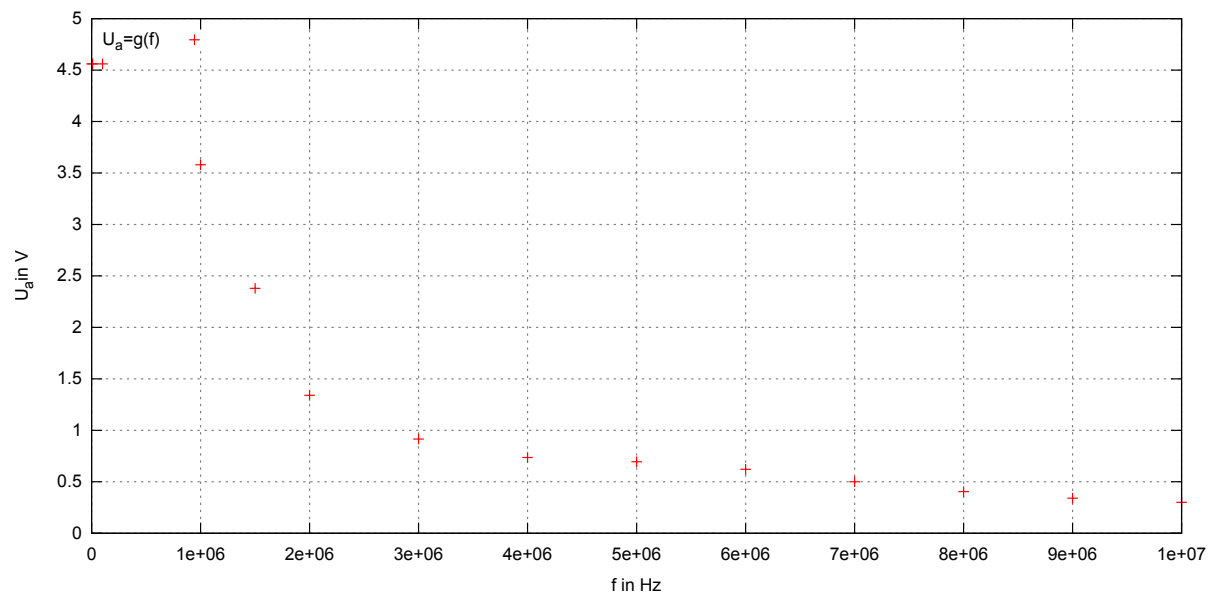


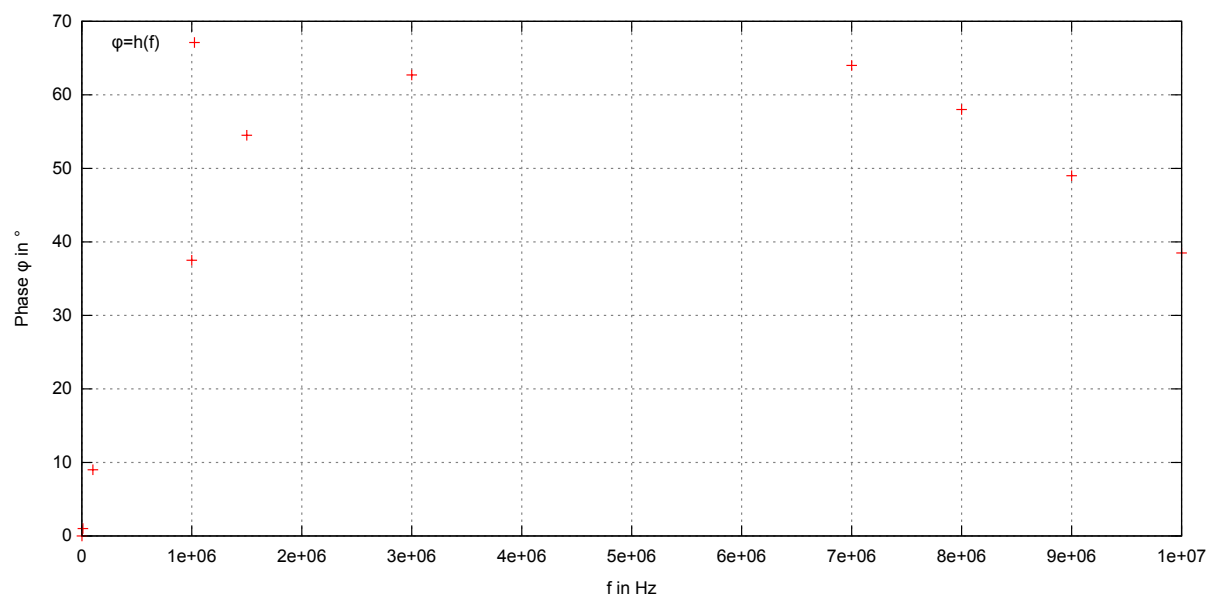
Abb. 7: Messwerte zur Versuchsaufgabe 1

Der Durchgriff ist $\frac{\Delta U_a}{\Delta U_S} \approx 0,02958$ für den nahezu linearen Bereich zwischen $U_S \approx 5 \text{ V}$ und $U_S \approx 11 \text{ V}$.

2.2.2 Versuchsaufgabe 2



(a) Ausgangsspannung U_a



(b) Phase φ

2.2.3 Versuchsaufgabe 3

Die Messergebnisse zu dieser Aufgabe sind nicht verwertbar. Sie hatten in keiner Weise etwas mit den Erwartungen oder Erfahrungen zu OPVs gemeinsam. Beispielsweise lies sich eine Transitfrequenz von nur $f_t \approx 10$ kHz, bei einer gleichzeitig betrachteten Grenzfrequenz von $f_g \approx 700$ kHz, messen. Außerdem war das Rauschen so stark, dass quasi keine Oszillographie durchgeführt werden konnte.

2.2.4 Versuchsaufgabe 4

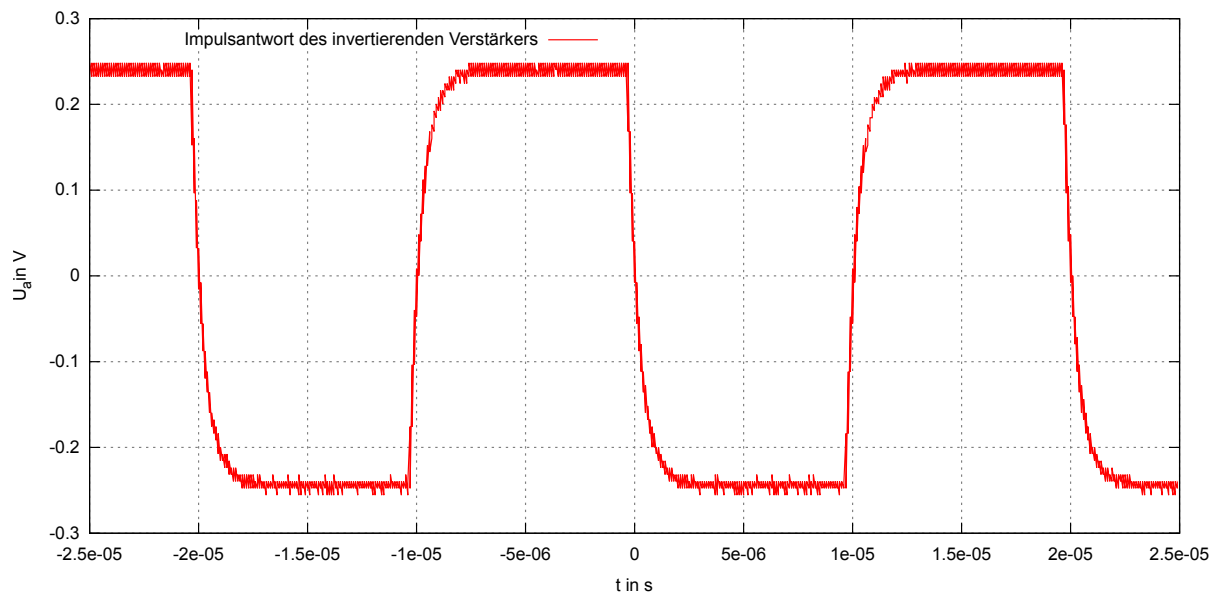


Abb. 9: Diagramm zur slew rate S_r

Für die Vorderflanke ergibt sich die slew rate zu $S_{r,V} = 1,29 \frac{\text{V}}{\mu\text{s}}$. Die slew rate der Rückflanke ist $S_{r,R} = 0,9553 \frac{\text{V}}{\mu\text{s}}$. Die Großsignalbandbreite bei einer Spannungsamplitude $\hat{U}_a \approx 260 \text{ mV}$ ergibt sich somit zu $f_{\text{GS}} = 792,173 \text{ kHz}$.

2.2.5 Versuchsaufgabe 6

In einem Zeitintervall von $\Delta t = 890 \text{ ns}$ wuchs die Spannung um $\Delta U = 26,2 \text{ V}$. Damit ist die slew rate $S_r = 29,43 \frac{\text{V}}{\mu\text{s}}$.

2.3 Oszillogramme

2.3.1 Versuchsaufgabe 4

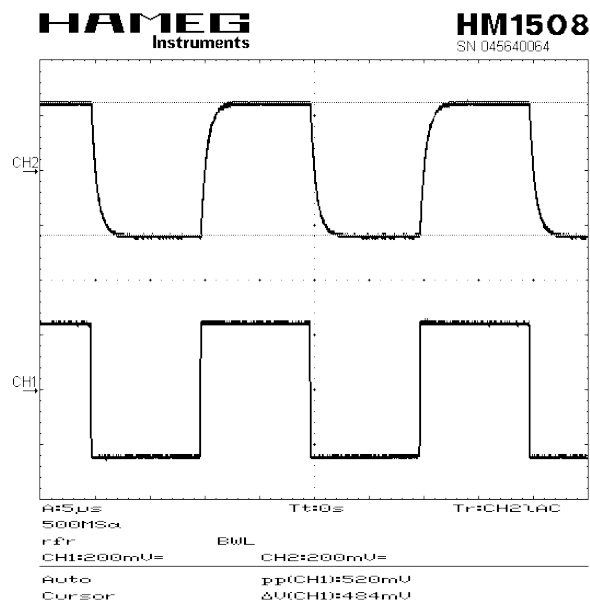
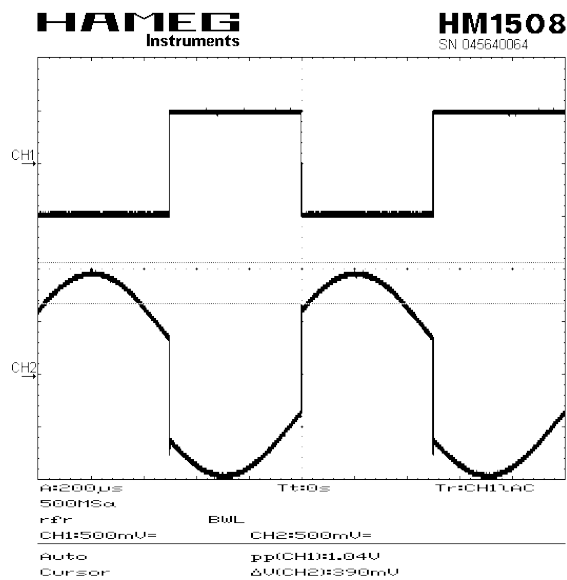
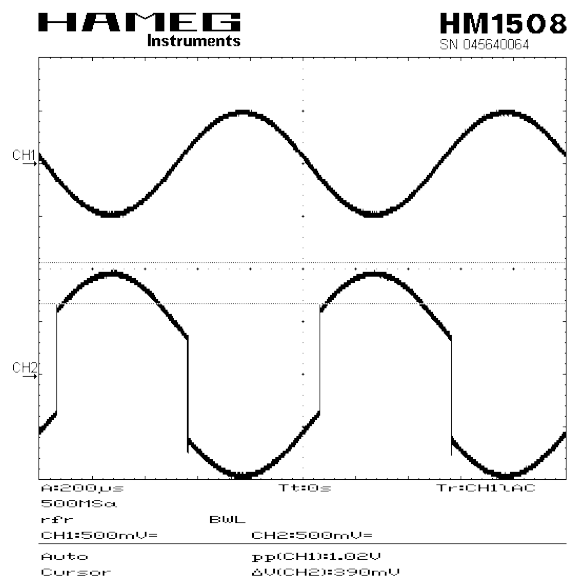


Abb. 10: Impulsantwort des invertierenden Verstärkers bei $f \approx 50 \text{ kHz}$ und $\hat{U}_0 \approx 0,5 \text{ V}$

2.3.2 Versuchsaufgabe 5



(a) Vergleich Rechteck



(b) Vergleich Sinus

Abb. 11: Summation von Sinus- und Rechtecksignal bei Gewichtungsfaktor $t_i = -1$