

Mikrofonverstärkerschaltung

Mit der folgenden Schaltung kann das Signal eines Electret-Mikrofons verstärkt und gefiltert werden. Die Schaltung verhält sich wie einen aktiven Bandpassfilter, der möglicherweise nur die Bandbreite der menschlichen Stimme verstärkt.

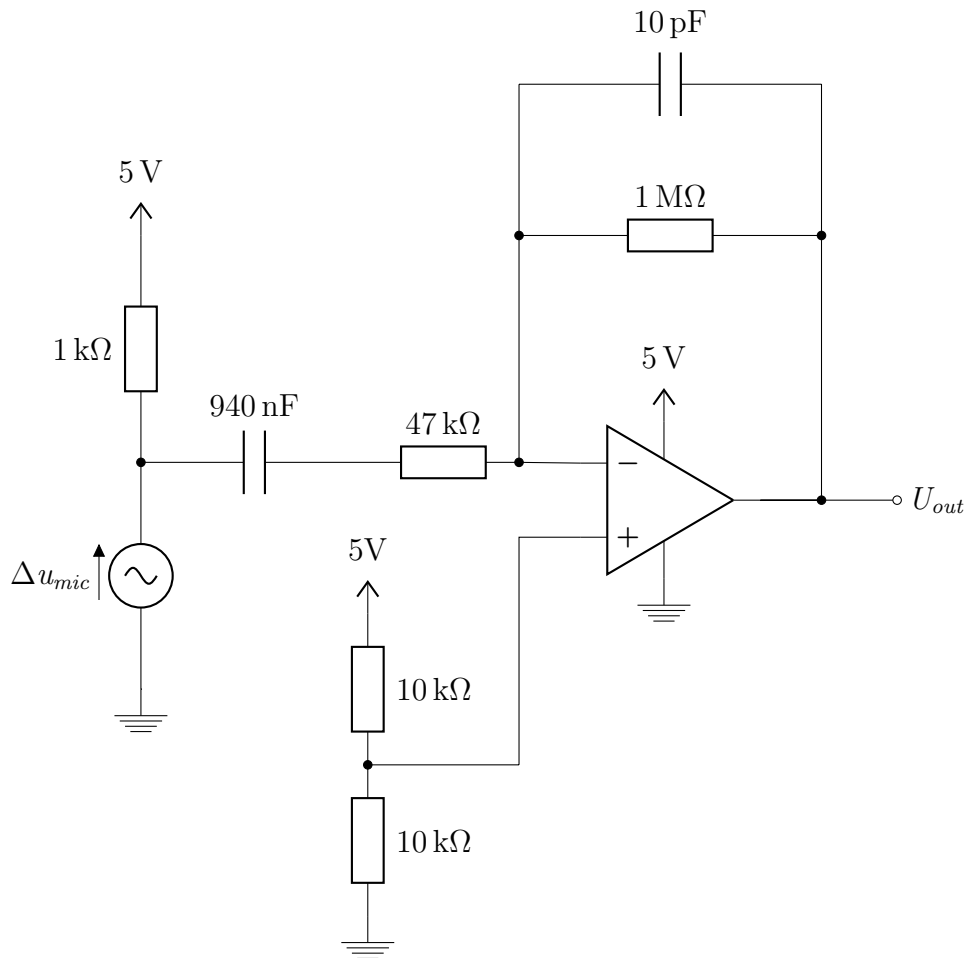


Abbildung 1: Mikrofonverstärkerschaltung

1 Zusammensetzung der Schaltung

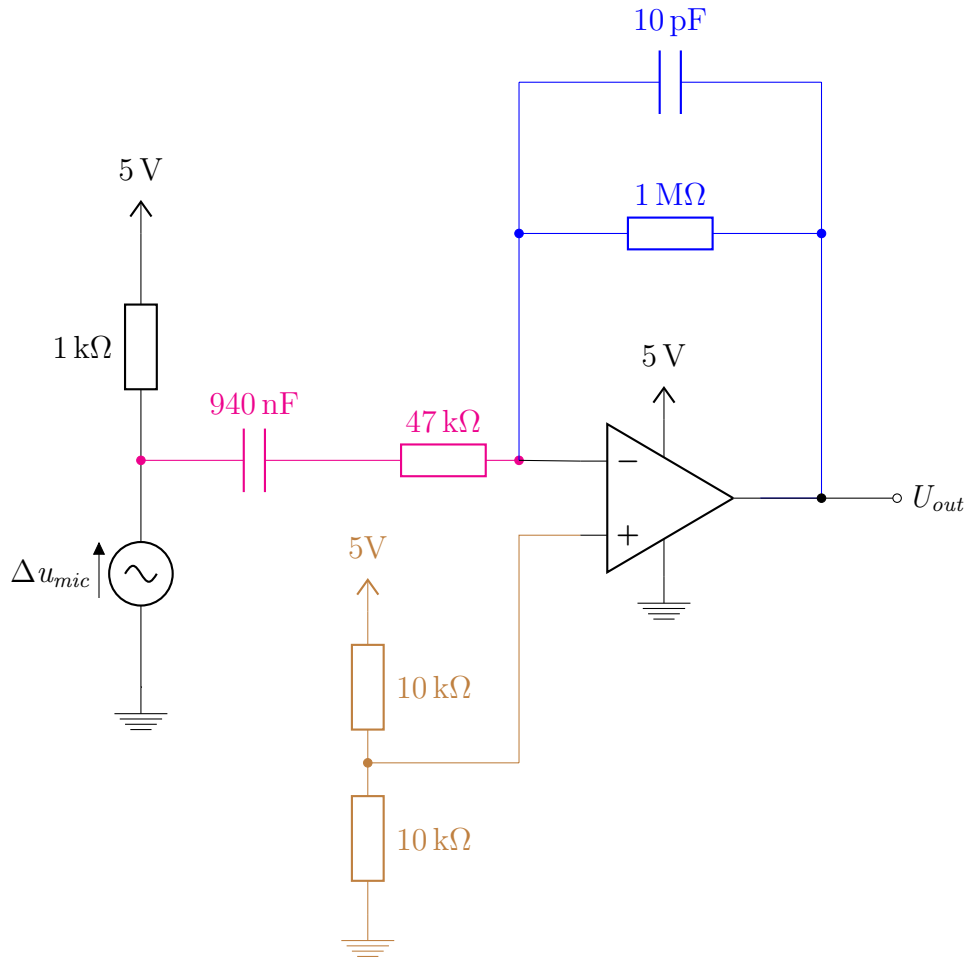


Abbildung 2: Zusammensetzung der Schaltung

Hochpassfilter

Tiefpassfilter

2,5 V DC-Offset

Es wird ein 2,5V DC-Offset erzeugt, damit die negativen Werten des Eingangssignal vom Op-Amp als positiv (verschobene) Werte ausgegeben werden. Eine negative Spannungsquelle für den Op-Amp zu entwerfen, um sich diesen Schritt zu sparen, wäre auch nicht einfach.

2 Arbeitspunktberechnung

Zuerst wollen wir feststellen, ob die Schaltung ein stabiles Verhalten aufweist, um dann der Arbeitspunkt zu bestimmen. Wenn die Schaltung stabil ist, oszillieren Wechselspannungen um den Arbeitspunkt.

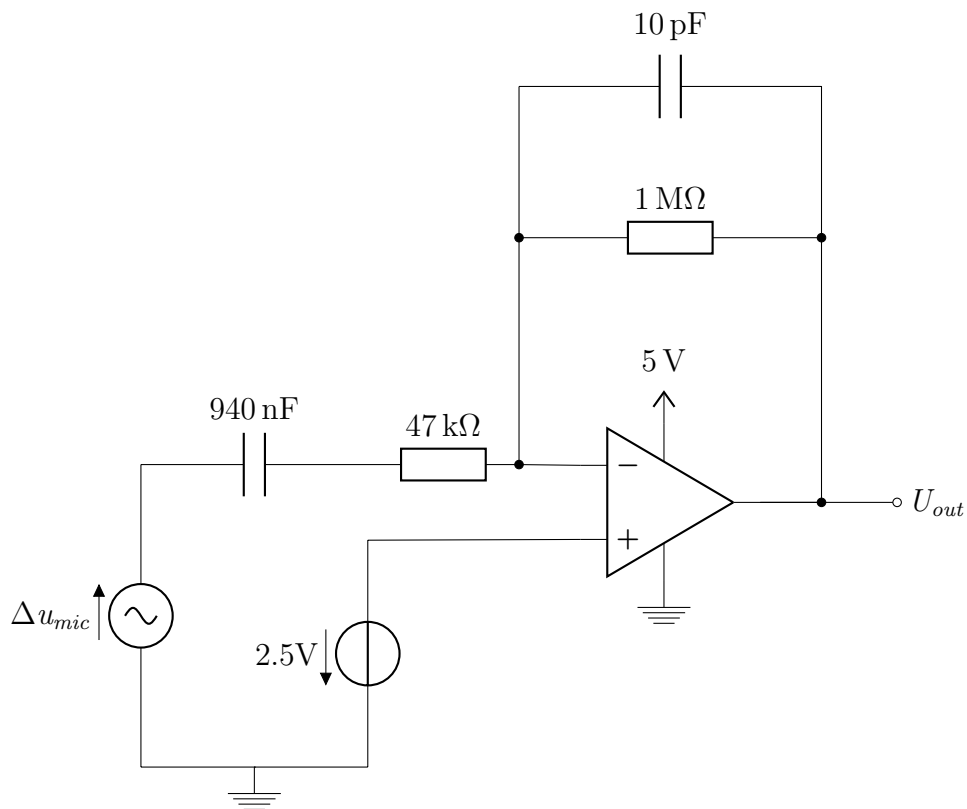


Abbildung 3: Spannungsquelle anstatt Spannungsteiler

Vereinfachungen:

1. Der Spannungsteiler, der das DC-Offset erzeugt, kann mit einer Spannungsquelle (2,5V) ersetzt werden, weil er vom Rest der Schaltung durch den Nullator komplett entkoppelt ist.
2. **Arbeitspunktberechnung** keine Betrachtung der Wechselspannungen $\rightarrow \Delta u_{mic} = 0V$ (Kurzschluss)
3. Op-Amp mit Nullor-Modell im linearen Bereich modellieren

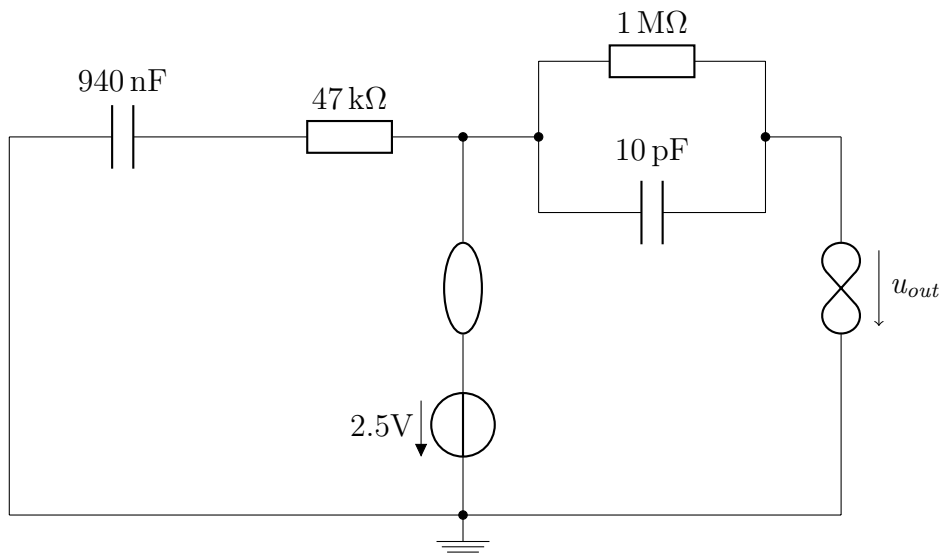


Abbildung 4: Schaltung im Arbeitspunkt mit Nullor-Modell

2.1 Umformung zu Zweitor mit zwei Kapazitäten

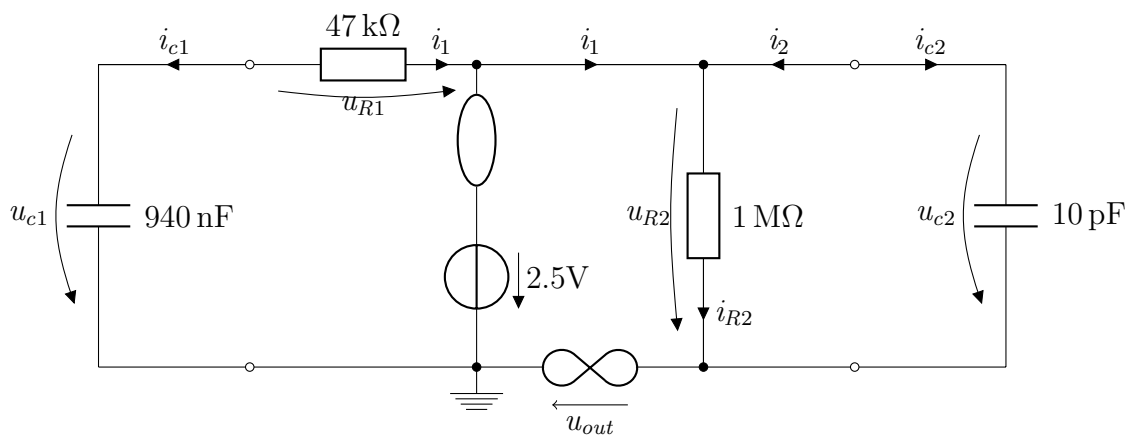


Abbildung 5: Zweitor zur Leitwertbeschreibung

(1) KVL:

$$-u_{C1} + i_1 R_1 + 2,5 V = 0$$

$$i_1 = (u_{C1} - 2,5 V) \frac{1}{R_1}$$

(2) KCL:

$$i_2 = i_{R2} - i_1 = \frac{U_{C2}}{R_2} - i_1$$

$$i_2 = \frac{U_{C2}}{R_2} - \frac{U_{C1}}{R_1} + \frac{2,5V}{R_1}$$

(3) Leitwertbeschreibung

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} & 0 \\ -\frac{1}{R_1} & \frac{1}{R_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{C1} \\ u_{C2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{2,5V}{R_1} \\ \frac{2,5V}{R_1} \end{bmatrix}$$

mit: $i_C = C \dot{u}_C$

$i_{C1} = -i_1$ und $i_{C2} = i_2$

(4) Umformung

$$\begin{bmatrix} \dot{u}_{C1} \\ \dot{u}_{C2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_1 C_1} & 0 \\ \frac{1}{R_1 C_2} & -\frac{1}{R_2 C_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{C1} \\ u_{C2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{2,5V}{R_1 C_1} \\ -\frac{2,5V}{R_1 C_2} \end{bmatrix}$$

(5) Eigenwerte

$$\lambda_1 = -\frac{1}{R_1 C_1}; \lambda_2 = -\frac{1}{R_2 C_2}$$

Das System ist stabil, da $\text{Re} \{ \lambda_1, \lambda_2 \} < 0$

ohne Erregung konvergiert die Spannung an den Kapazitäten gegen 0

$u(t \rightarrow \infty) = u_\infty = 0$.

Da das System erregt wird (konstante Erregung), bleibt der Arbeitspunkt stabil (s. *Schaltungstechnik 2 Skript, Autonome Differentialgleichungen, auf Seite 51, SS17*).

$$\underline{x}_\infty = -\underline{A}^{-1} \underline{B} \underline{v}_0 \quad (1)$$

$$\text{mit } \underline{x}_\infty = \underline{u}_\infty = \begin{bmatrix} u_{C1\infty} \\ u_{C2\infty} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{C1}(t \rightarrow \infty) \\ u_{C2}(t \rightarrow \infty) \end{bmatrix}$$

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_1 C_1} & 0 \\ \frac{1}{R_1 C_2} & -\frac{1}{R_2 C_2} \end{bmatrix} \text{ und } \underline{B} \underline{v}_0 = \begin{bmatrix} \frac{2,5V}{R_1 C_1} \\ -\frac{2,5V}{R_1 C_2} \end{bmatrix}$$

$$\text{Berechnung von Gleichung 1 mit Matlab } \underline{x}_\infty = \begin{bmatrix} u_{C1\infty} \\ u_{C2\infty} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2,5V \\ 0V \end{bmatrix}$$

(6) Ausgangsgröße $u_{out}(t \rightarrow \infty)$

KVL:

$$u_{C2\infty} + u_{out} - 2,5\,V = 0$$

$$u_{out,AP} = 2,5\,V$$

Um die 2,5V (Arbeitspunkt) wird das Kleinsignal variieren.

3 Kleinsignalverhalten mit komplexer Wechselstromrechnung

Die komplexe Wechselstromrechnung kann an der Stelle verwendet werden, weil das Signal vom Mikrophon auch durch eine Addition von sinusförmigen Wellen modelliert werden kann (s. Fourier-Transformation).

Kleinsignalverhalten → konstante Quellen werden kurzgeschlossen (s. *Skript Schaltungstechnik 1, Anhang auf Seite 214, WS16/17*).

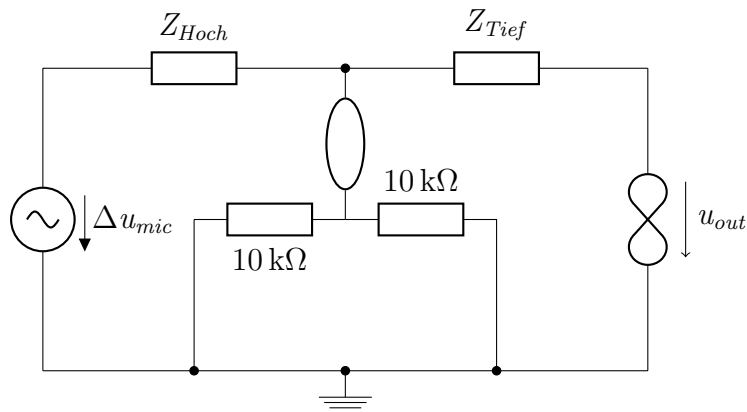


Abbildung 6: Schaltung fürs Kleinsignalverhalten

Vereinfachungen:

1. Tiefpass:

$$\underline{Z}_{Tief} = \frac{R_2}{j\omega R_2 C_2 + 1}$$

2. Hochpass:

$$\underline{Z}_{Hoch} = R_1 - \frac{j}{\omega C_1}$$

3. Kein DC-Offset:

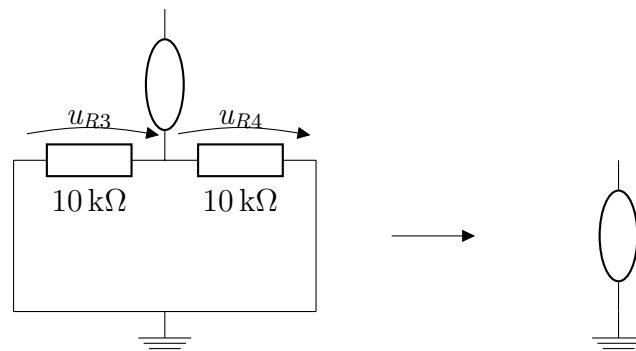


Abbildung 7: Kein DC-Offset

Es lässt sich zeigen, dass kein Strom durch die $10\text{k}\Omega$ Widerstände fließt.

$$\begin{aligned}
 u_{R3} &= -u_{R4} \\
 i_{R3} &= i_{R4} = i \\
 R_3 &= R_4 = R \\
 Ri &= -Ri \\
 2Ri &= 0 \rightarrow i = 0 \rightarrow u_{R3} = u_{R4} = 0
 \end{aligned}$$

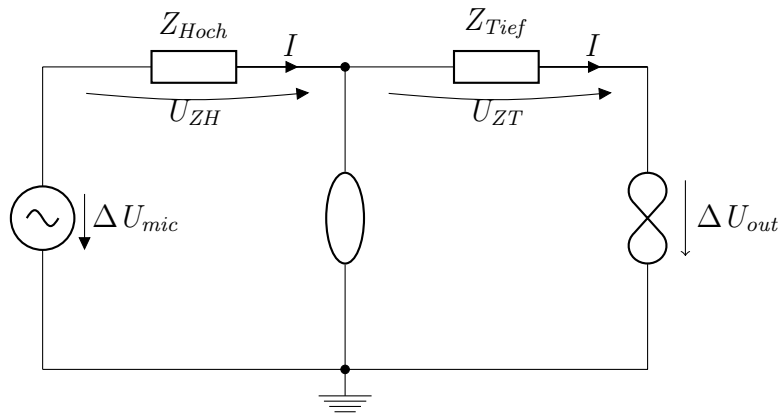


Abbildung 8: Vereinfachte Schaltung für die Kleinsignalbetrachtung

$$\begin{aligned}
 \underline{H} &= \frac{\Delta \underline{U}_{out}}{\Delta \underline{U}_{mic}} \\
 \text{mit } \Delta \underline{U}_{out} &= -\underline{U}_{ZT} \\
 \text{mit } \Delta \underline{U}_{mic} &= \underline{U}_{ZH} \\
 \underline{H} &= \frac{-\underline{U}_{ZT}}{\underline{U}_{ZH}} = -\frac{\underline{Z}_T I}{\underline{Z}_H I} = -\frac{\underline{Z}_T}{\underline{Z}_H} \\
 \underline{H} &= \left(-\frac{R_1}{R_2} - \frac{C_2}{C_1} - j(R_1 \omega C_2 - \frac{1}{\omega C_1 R_2}) \right)^{-1}
 \end{aligned}$$

Der Betrag von $|\underline{H}|$ wird für alle Frequenzen zw. 0 und 10 MHz in Matlab berechnet.


```

1  % Bestimmung der Uebertragungsfunktion
2  R1 = 47000; % 47k Ohm
3  C1 = 940 * 10^(-9); % 940nF
4  R2 = 1000000; % 1M Ohm
5  C2 = 10 * 10^(-12); % 10pF (original Design)
6
7  w = 0:1:10^7;
8
9  H = (-R1/R2-C2/C1 - j.*(R1.*w*C2-1./(C1*R2.*w))).^(-1);
10 H_abs = abs(H); % Berechnung des Betrags von imaginaerer
    Groesse H
11 dB = mag2db(H_abs); % 20*log(H_abs) ist die Umrechnung von
    Feldgroessen in dB
12
13 subplot(1,2,1)
14 semilogx(w,dB) % Plot in dB
15 grid on
16 xlabel('Frequenz in Hz')
17 ylabel('Verstaerkung H in dB')
18 title('Bandpassfilter [in dB]')
19 subplot(1,2,2)
20 semilogx(w,H_abs) % Plot des Betrags
21 xlabel('Frequenz in Hz')
22 ylabel('Verstaerkung H')
23 title('Bandpassfilter')

```

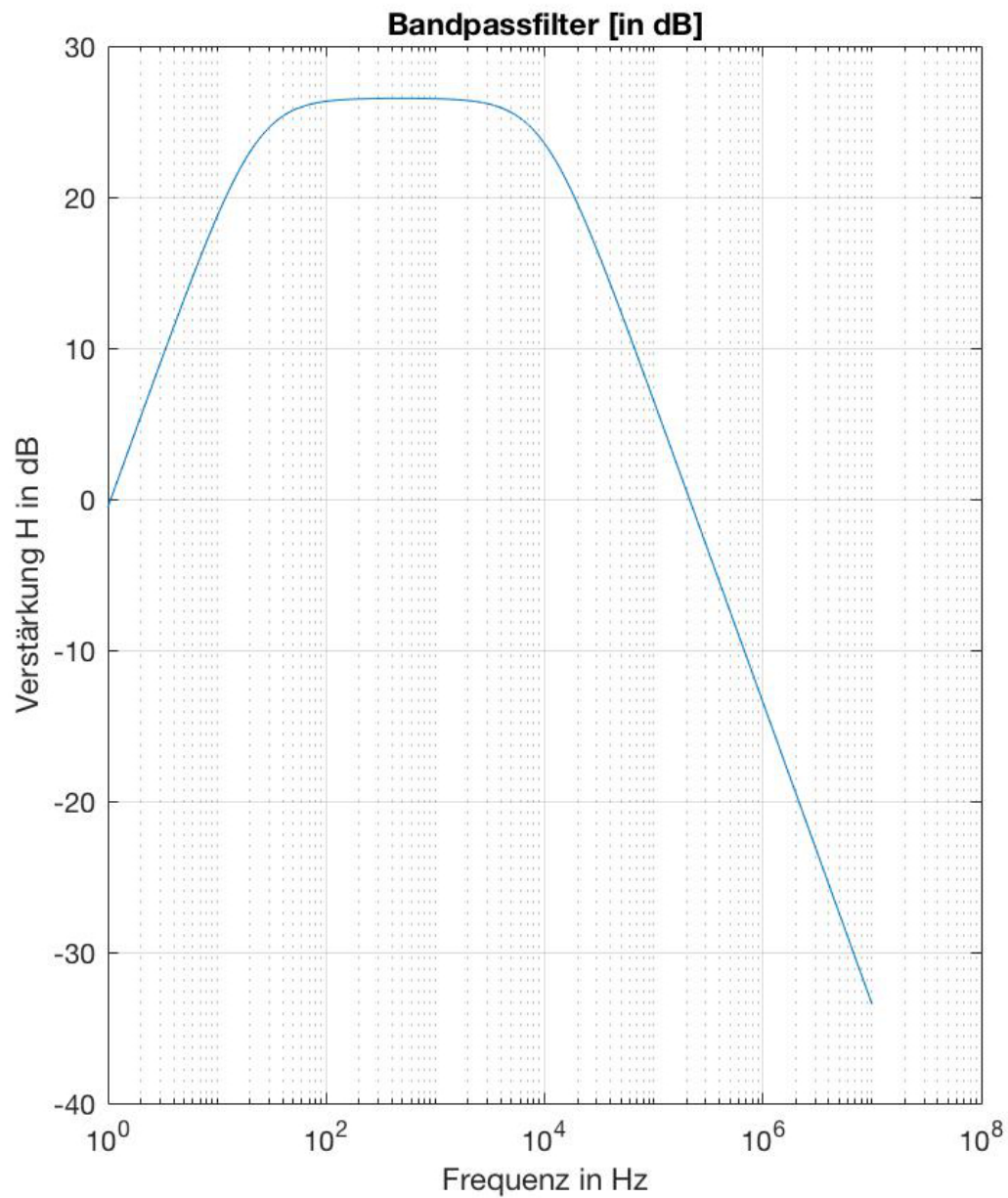


Abbildung 9: Betrag der Übertragungsfunktion in dB