

**Dokumentation einer Filterschaltung zur Trennung von
Sprach- und PCM-Information für die Telemetrie-Bodenstation**

1. Einleitung	3
2. Mechanische Realisierung des Audiofilters	4
2.1. Bedienelemente und Stecker.....	4
3. Schaltungstechnische Realisierung des Audiofilters.....	5
3.1. Signaltrennung durch Filterung	5
3.2. Verarbeitung des Audiosignals	6
3.3. Gemessener Frequenzverlauf der Verstärkung vom PCM-Hochpaßfilter	9
3.4 Software im Microcontroller	11
3.4.1. Signalmonitor	12
3.5. Platine und Schaltungspläne.....	13
4. Anhang „Altes Filter“	17
4.1. Einleitung	18
4.2. Filterübertragungsfunktionen.....	20
4.2.1. Audiofilter / Tiefpaß 2. Ordnung.....	20
4.2.2. PCM-Filter / Hochpaß 1. Ordnung	21
4.2.3. PCM-Filter / Hochpaß 2. Ordnung	21
4.3. Berechnung der Übertragungsfunktion für das Hochpaßfilter.....	23
4.3.1. Berücksichtigung eines realen Operationsverstärkers mit begrenzter Bandbreite	24
4.4. Gehäuse	25
4.5. Erläuterung der Steckerbezeichnungen.....	26
4.6. Schaltungskonfigurationen durch steckbare Drahtbrücken.....	27
4.7. Schaltplan.....	28

1. Einleitung

Bei Versuchen mit dem DLR-Hubschrauber wird zur Überwachung des Flugverhaltens eine Funkverbindung - Telemetrie - genutzt. Über diese Verbindung werden Sensordaten übertragen, die zum Beispiel den Flugzustand des Hubschraubers und Steuereingaben von Pilot und Bordrechner beschreiben, sowie ein Sprachsignal, das dem Interkom an Bord des Hubschraubers entspricht.

Die Sensordaten werden in ein PCM-Signal gewandelt und mit dem Audiosignal additiv verknüpft. Dieses Summsignal wird nach einer Bandbegrenzung dem Trägersignal der Telemetrie aufmoduliert und über eine Antenne zum Boden abgestrahlt. Am Boden wird das Summsignal vom Träger abgespalten - demoduliert - und weiterverarbeitet. Die Weiterverarbeitung geschieht im Audiofilter (s. Bild 1). Dort werden PCM- und Sprachsignal getrennt und für eine weitere Nutzung aufbereitet.

Ein bereits bestehendes Audiofilter ist durch das nachfolgend beschriebene ersetzt worden. Das ersetzte Audiofilter, im folgenden als "altes Filter" bezeichnete, erfüllte bereits die Anforderungen an die Trennung in PCM- und Sprachsignal. Allerdings verursachte die analoge Lautstärkeverstellung des aufbereiteten Sprachsignals störende Geräusche und ließ sich auch nicht mehr fein abstimmen. Im neu entwickelten Filter ist die Signaltrennung entsprechend dem alten Filter realisiert worden. Zusätzlich lassen sich die Lautstärke für den Lautsprecher, sowie relevante Pegel für nachfolgende Geräte über digitale Potentiometer mittels eines Microcontrollers einstellen. Außerdem ist per Hard- und Software die Möglichkeit geschaffen worden, in Echtzeit das Sprachsignal über einen PC darzustellen.

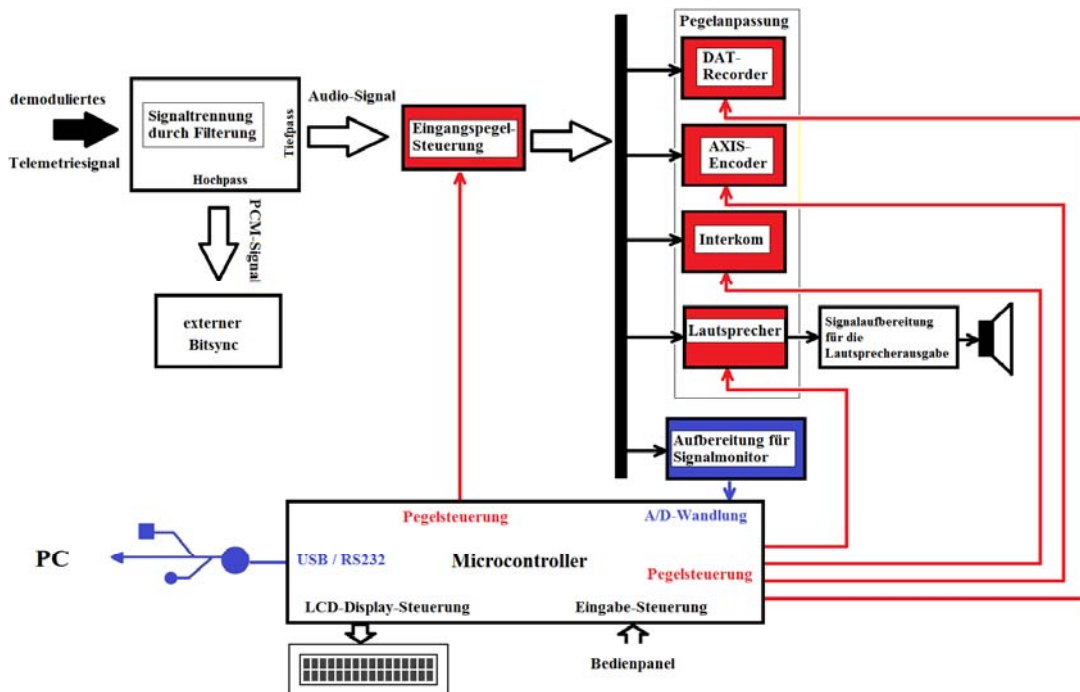


Bild 1. Aufbau des Audiofilters

2. Mechanische Realisierung des Audiofilters

2.1. Bedienelemente und Stecker



Bild 2. Vorderseite des Audiofilters mit Bedienelementen



Bild 3. Rückseite des Audiofilters mit Stecker für externe Geräte

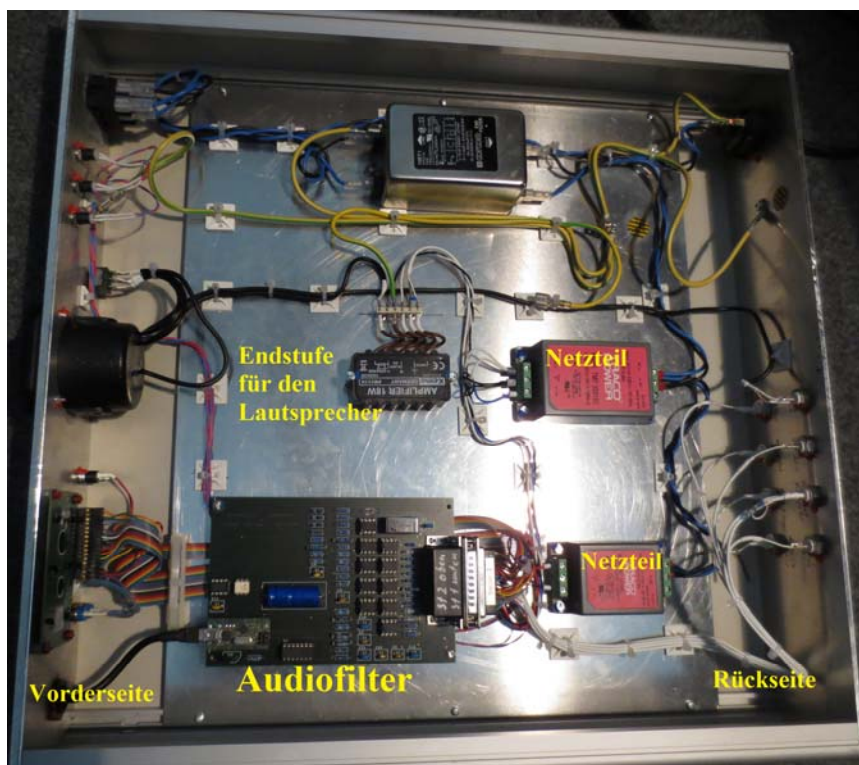


Bild 4. Blick von oben aufs Gehäuse

3. Schaltungstechnische Realisierung des Audiofilters

3.1. Signaltrennung durch Filterung

Folgende Kriterien zur Auslegung der Filter sind der Dokumentation des alten Audiofilters entnommen:

Für die Auslegung der Filter wurde ein Frequenzbereich von $0 - 5 \text{ kHz}$ für das Audiosignal und ein Bereich von $5 \text{ kHz} - 2 \text{ MHz}$ für das PCM-Signal angenommen. Da die Sprachqualität des Interkom-Signals aus dem Flugversuchsträger vergleichbar zu der des analogen Telefonierens ist, kann die Filtereckfrequenz des Tiefpaßfilters zu $2 \sim 3 \text{ kHz}$ gewählt werden.

Um eine genügend große Dämpfung des PCM-Signals für Frequenzen größer 5 kHz zu erreichen, wurde das Audiofilter als ein Butterworth-Tiefpaß 2. Ordnung mit einer Filtereckfrequenz von **1,7 kHz** realisiert (s. Bild 5). Das PCM-Filter wurde als passiver Butterworth-Hochpaß 1. Ordnung (Filtereckfrequenz: **5,3 kHz**) (s. Bild 5) ausgelegt. Als Kriterium für das Hochpaßfilter sollte das "Einrasten" des Bitsynchronisierers genommen werden. Dies ließ sich bereits mit dem Hochpaßfilter 1. Ordnung erreichen.

Außer der einfachen Realisierung des Hochpaßfilters 1. Ordnung mittels passiver Bauelemente - Widerstand und Kondensator - ist ein Argument gegen eine Realisierung mittels aktiver Bauelemente, daß jeder Operationsverstärker bandbegrenzt ist und bei geringeren Frequenzen als bei entsprechenden für passive Bauelementen das Signal dämpft.

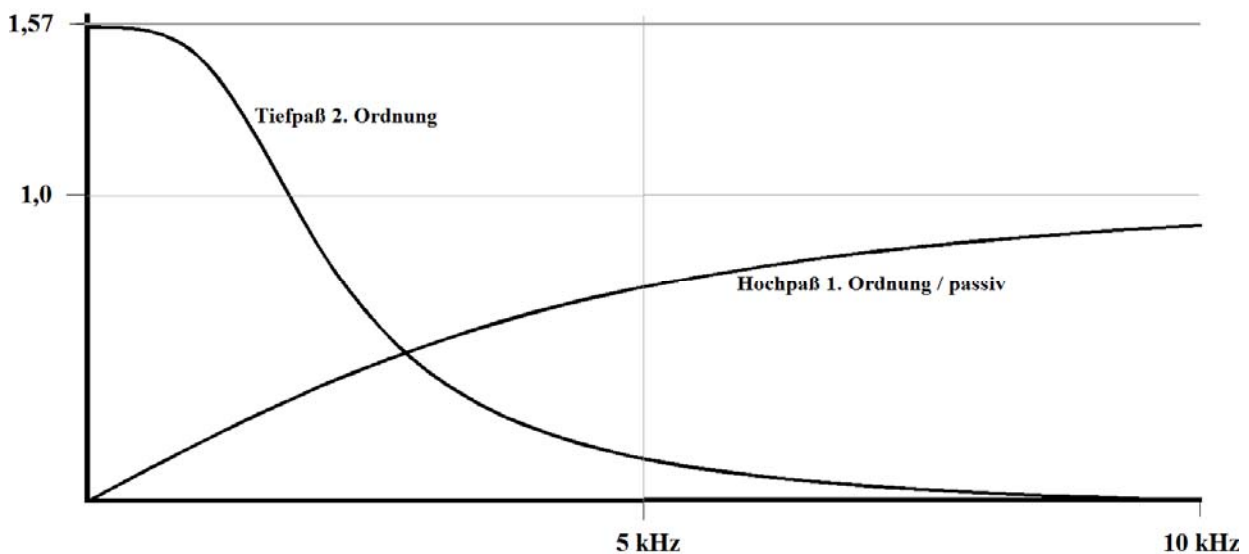


Bild 5. Charakteristik der Filter

Bei späteren Tests zur Verständlichkeit des Audiosignals wurde die Filtereckfrequenz für das Sprachsignal auf **2,8 kHz** angehoben. Eingestellt wird die Grenzfrequenz über die Widerstände $R_3 = R_4 = 1,2 \text{ kOhm}$ und die Kondensatoren $C_2 = C_3 = 0,047 \mu F$.

Die Grenzfrequenz von **5,3 kHz** für das Hochpaßfilter wird über $R_{34} = 3 \text{ kOhm}$ und $C_{14} = 10 \text{ nF}$ festgelegt (s. Anhang Platine und Schaltungspläne).

3.2. Verarbeitung des Audiosignals

Zur weiteren Verarbeitung des Audiosignals, wie Pegelanpassung für externe Geräte und Ausgabe über einen Lautsprecher, wird nur der dynamische Signalanteil (AC) mittels der Kondensatoren C_1 und C_{12} (s. Anhang) übertragen. Damit haben Arbeitspunkteinstellungen und mögliche Offsets der Operationsverstärker keinen Einfluß auf die weitere Signalverarbeitung. Die Kondensatoren C_1 und C_{12} bilden mit den Widerständen der digitalen Potentiometer (Baustein $X9C103 = 10 \text{ kOhm}$ - s. Anhang) einen Hochpaß mit niedriger Grenzfrequenz.

Für die Ausgabe an den Lautsprecher schließt sich ein weiteres Tiefpaßfilter mit $f_{gr} = 3,25 \text{ kHz}$ an ($R_9 = R_{11} = 49 \text{ kOhm}$ und $C_4 = C_5 = 1000 \text{ pF}$). Dieses Filter soll hochfrequentes Rauschen unterdrücken und dient zur besseren Verständlichkeit der ausgegebenen Sprache. Abschließend muß noch ein Kondensator ($C_{Endstufe} = 10 \text{ nF}$) berücksichtigt werden, der sich parallel zum Eingang des Lautsprecher-Endverstärkers befindet. Er soll die Neigung des Endverstärkers zum selbständigen Schwingen (Instabilität) unterdrücken. Zusammen mit dem Spannungsteiler für das Ausgangssignal $R_{18} = 8 \text{ kOhm}$ und $R_{19} = 8 \text{ kOhm}$ bildet der Kondensator $C_{Endstufe}$ einen Tiefpaß. Bild 6 zeigt die gesamte Übertragungsstrecke.

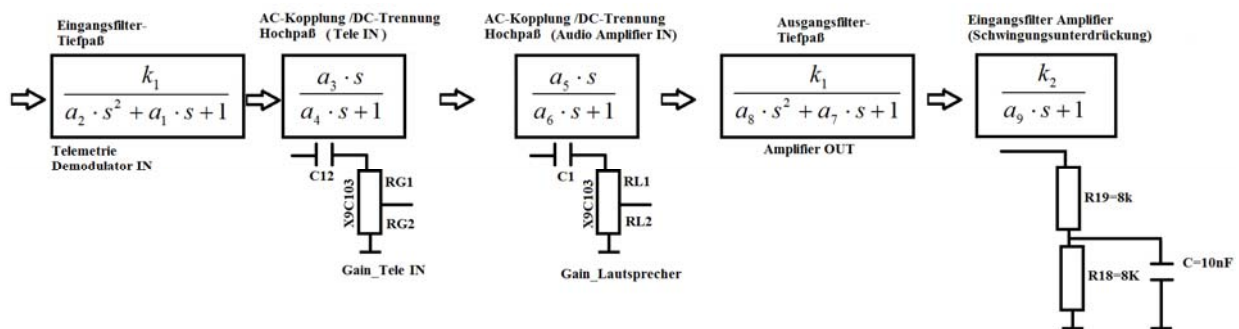


Bild 6. Signalaufbereitung des Audiosignals

Die Parameter der Übertragungsstrecke bestimmen sich wie folgt:

1. Eingangsfiler Tiefpaß:

$$a_2 = (R_T \cdot C_T)^2 \quad a_1 = R_T \cdot C_T \cdot (3 - k_1) \quad R_T = R_3 = R_4 \quad C_T = C_3 = C_2 \quad k_1 = \frac{R_8 + R_6}{R_8} = 1,57$$

2. AC-Kopplung Hochpaß (Tele IN):

$$a_3 = R_{G2} \cdot C_{12} \quad a_4 = (R_{G1} + R_{G2}) \cdot C_{12} \quad \text{mit } R_{G1} + R_{G2} = 10 \text{ kOhm}$$

3. AC-Kopplung Hochpaß (Audio Amplifier IN):

$$a_5 = R_{L2} \cdot C_1 \quad a_6 = (R_{L1} + R_{L2}) \cdot C_1 \quad \text{mit } R_{L1} + R_{L2} = 10 \text{ kOhm}$$

4. Ausgangsfiler Tiefpaß:

$$a_8 = (R_A \cdot C_A)^2 \quad a_7 = R_A \cdot C_A \cdot (3 - k_1) \quad R_A = R_{11} = R_9 \quad C_A = C_4 = C_5 \quad k_1 = \frac{R_{14} + R_{17}}{R_{14}} = 1,57$$

5. Eingangsfiler Amplifier (Schwingungsunterdrückung):

$$a_9 = \frac{R_{18} \cdot R_{19}}{R_{18} + R_{19}} \cdot C \quad k_2 = \frac{R_{18}}{R_{18} + R_{19}}$$

Damit folgt für die Übertragungsfunktion:

$$F(s) = \frac{1}{a_2 \cdot s^2 + a_1 \cdot s + 1} \cdot k_1 \cdot \frac{a_3 \cdot s}{a_4 \cdot s + 1} \cdot \frac{a_5 \cdot s}{a_6 \cdot s + 1} \cdot \frac{1}{a_8 \cdot s^2 + a_7 \cdot s + 1} \cdot k_1 \cdot \frac{1}{a_9 \cdot s + 1} \cdot k_2 \quad (1)$$

Bild 7 zeigt den aus (1) berechneten Frequenzverlauf der Verstärkung $|F(j\omega)|$ - blaue Linie – und den am Filter gemessenen – schwarze Linie.

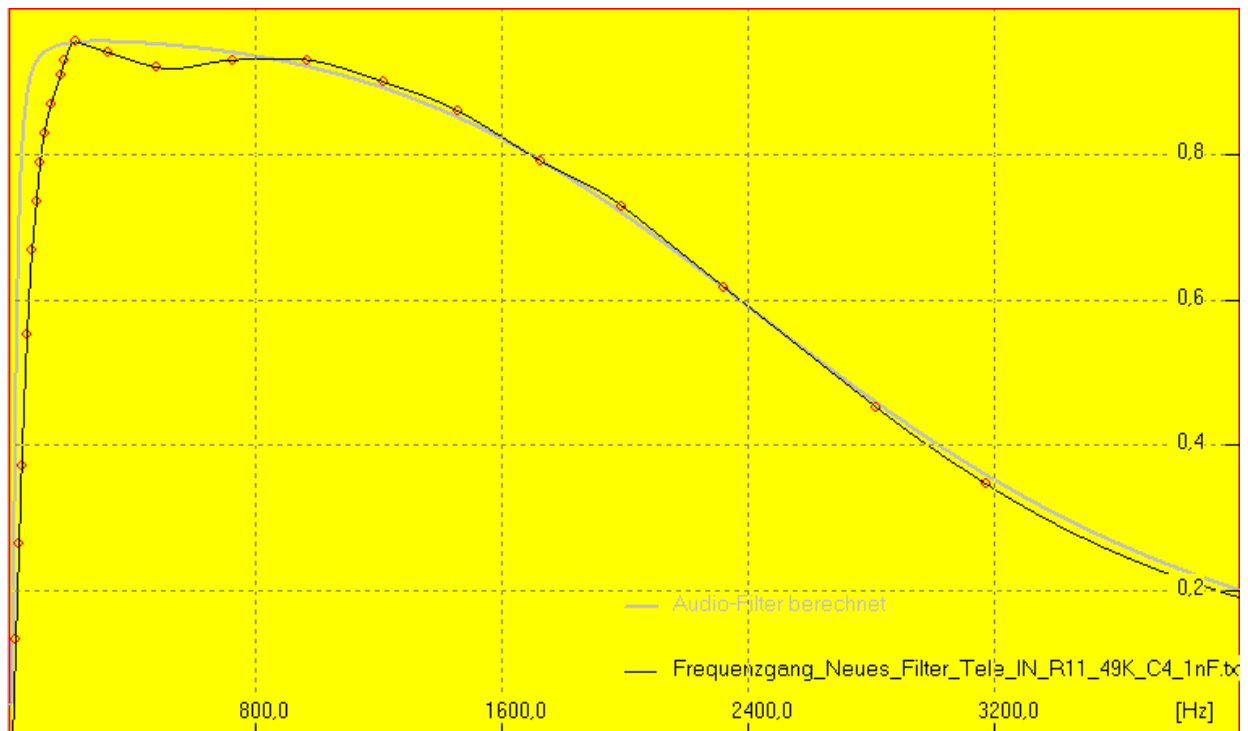


Bild 7. Berechneter und gemessener Frequenzverlauf der Verstärkung des Audiofilters

Bild 8 zeigt im Vergleich die Frequenzverläufe der Verstärkung vom alten – blaue Linie – und neuem Audiofilter – schwarze Linie.

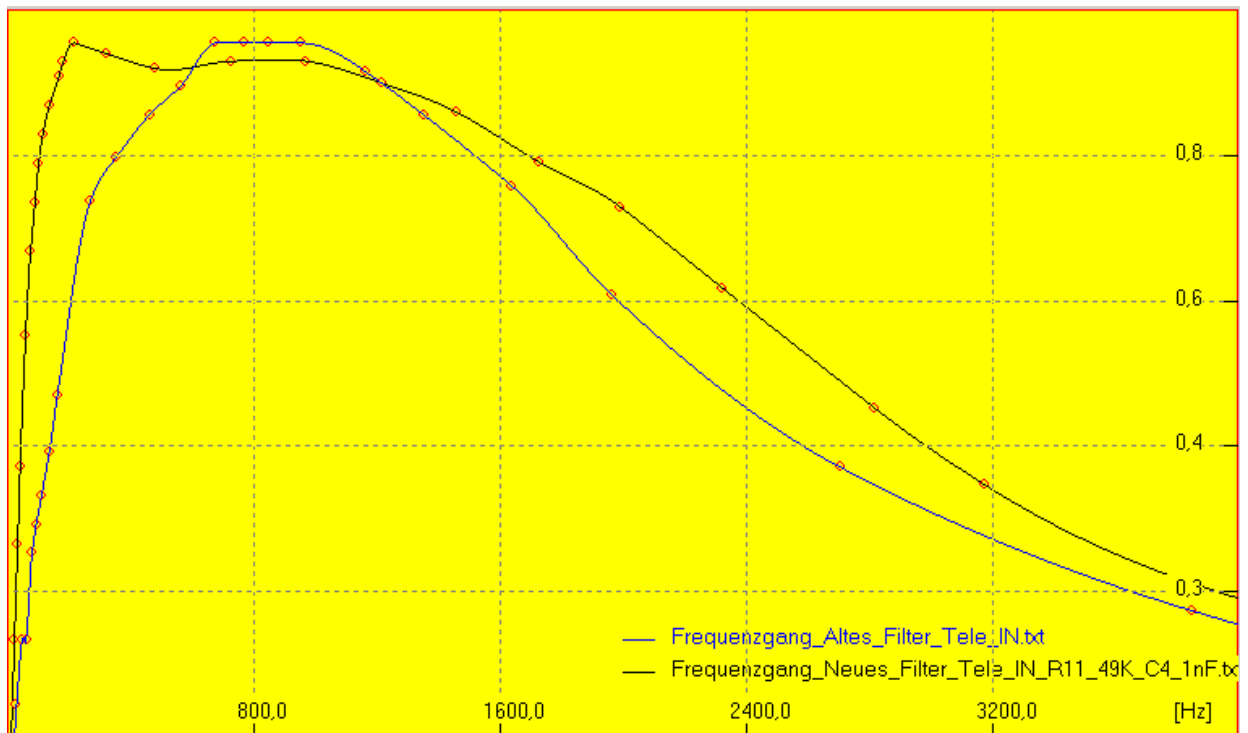


Bild 8. Vergleich des Frequenzverlaufs der Verstärkung vom alten und neuen Audiofilter

3.3. Gemessener Frequenzverlauf der Verstärkung vom PCM-Hochpaßfilter

Die Übertragungsfunktion für das Hochpaßfilter zur Auskopplung des PCM-Signals lautet:

$$F(s) = \frac{a_0 \cdot s}{a_0 \cdot s + 1} \quad (2) \quad \text{mit } a_0 = R_{34} \cdot C_{14} \text{ (s. Anhang)}$$

Bild 9 zeigt für $s=j\omega$ den Frequenzverlauf der berechneten – blaue Linie - und gemessenen – schwarze Linie – Verstärkung $|F(j\omega)|$.

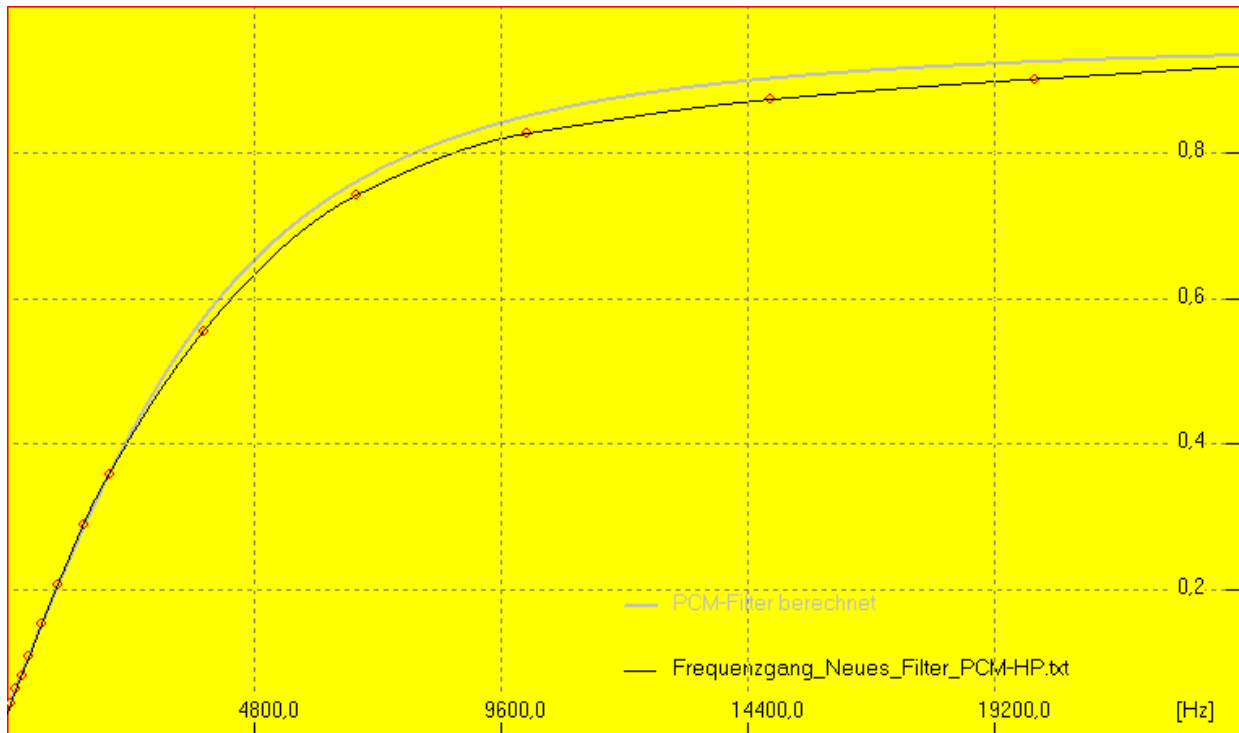


Bild 9. Vergleich von berechnetem und gemessenem Frequenzverlauf des PCM-Filters

Bild 10. stellt die gemessenen Frequenzverläufe vom Audio- und PCM-Filter dar (vgl. Bild 5).

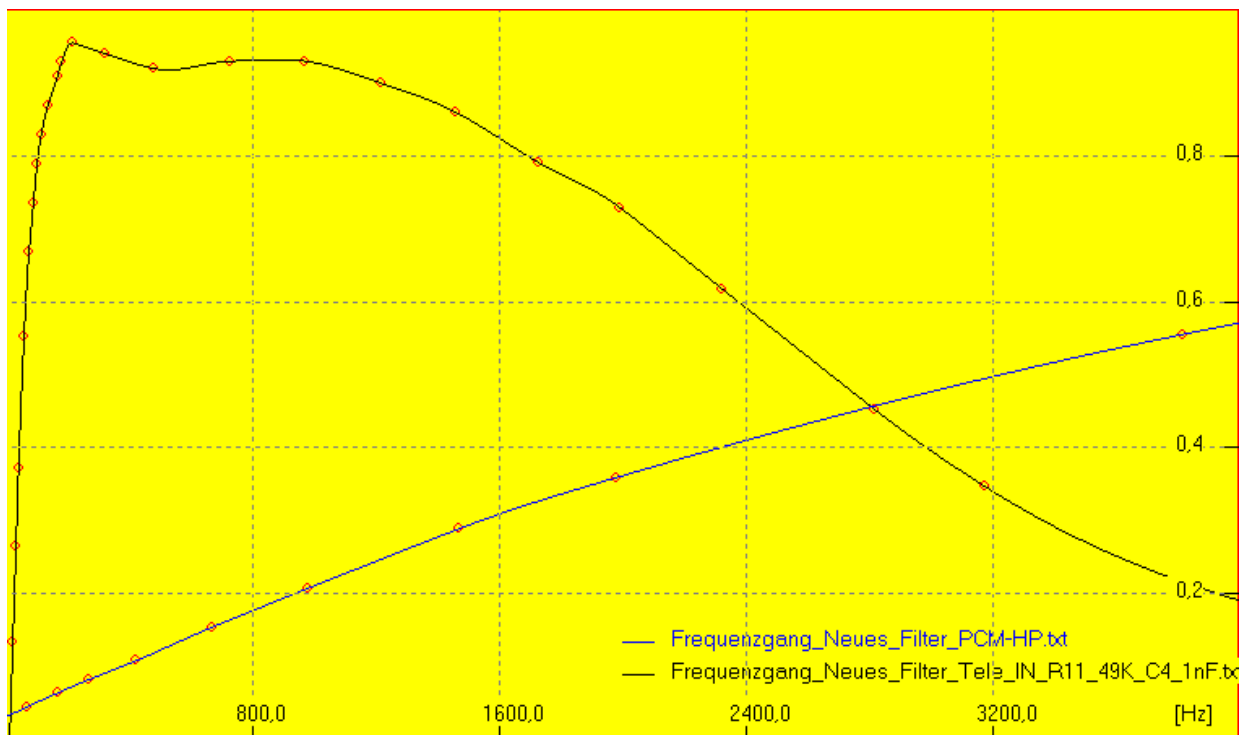


Bild 10. Gemessene Frequenzverläufe vom Audio- und PCM-Filter

3.4 Software im Microcontroller

Für den verwendeten Microcontroller wurde ein C-Programm entwickelt, das eine Verstellung der Verstärkungsfaktoren für die Signaleingänge am AXIS-Encoder, dem DAT-Recorder und dem Intercom, sowie die Lautstärkeregelung für den Lautsprecher gestattet. Außerdem kann hiermit die Verstärkung des Eingangspegels geändert werden (s. Bild 1). Die Einstellungen werden mittels Taster vorgenommen und über ein LCD-Display angezeigt (s. Bild 2).

Außerdem ist in der Software eine Steuerung über PC per USB implementiert. Für die Kommunikation mit dem Microcontroller muß auf dem PC ein USB-to-Serial (COM-Port) Treiber installiert werden – z. B. „*Silicon Labs CP210x USB to UART Bridge*“.

Für eine Verbindung mit dem Hyperterminal müssen folgende Werte gesetzt werden:

Baudrate: 115200
Datenbits: 8
Parität: keine
Stoppbits: 1
Flussteuerung: keine

Nach dem Einschalten meldet sich der Microcontroller mit folgendem Text im Hyperterminal:

** Telemetrie Audio-Filter Juli 2014 **

\$D <CR> gesamtes EEPROM auslesen
\$E xxx (yy)<CR> yy=Byte auf Adr xxx schreiben
EEPROM(16 Bytes) ab Adresse_xxx lesen
\$T <CR> Temperatursensor auslesen
\$R <CR> Rom-Code des Temperatursensors
\$U <CR> /\$U hh:min:sec<CR> (Uhrzeit)
\$S x<CR> Werte in Echtzeit ueber RS232 / <ESC> stoppt
x=0 bzw \$S <CR>:A/D / x=1:D/A senden
x=2 ungefiltert x=3 gefiltert an D/A
\$F Signal-Frequenz fuer D/A-Ausgabe einstellen
\$G x<CR> x=0:Wegner-,1:AXIS-,2:DAT-,3:Lautsprecher-Audio,D:D/A-Gain
x=4:Tele-Audio-IN,5:Digital-Filter
\$P (x)<CR> Process-Status / x=D/A Ausgabe
x=0:D/A-A/D STOP, 1:A/D, 2:A/D dig. gefiltert
3:Saegezahn, 4:num. Sinus, 5:Sinus/Tabelle
\$Y 1/0<CR> LCD Display ON/OFF
?<CR> Hilfetext
<ESC> bricht Aus-/Eingabe ab
<SPACE> wiederholt den letzten Befehl

Die mit „\$“ gekennzeichneten Buchstaben repräsentieren die möglichen Steuerbefehle. Als Beispiel ist nachfolgend das Auslesen von eingestellten Verstärkungsfaktoren dargestellt:

\$G 0			Befehlseingabe
+INC /-DEC			Antwort Microcontroller
Audio-Gain	Intercom	10	Antwort Microcontroller
\$G 1			Befehlseingabe
+INC /-DEC			
Audio-Gain	AXIS	10	Antwort Microcontroller
\$G 5			Befehlseingabe
+INC /-DEC			
Audio-Gain	Dig. Filter	OFF	Antwort Microcontroller

3.4.1. Signalmonitor

Die über USB realisierte Schnittstelle zur Beobachtung des Audiosignals gestattet die Darstellung und Speicherung dieses Signals in Echtzeit. Dafür ist eine parallele Signalaufbereitung im Audiofilter implementiert, die keine Rückwirkung auf die am Filter angeschlossenen Geräte, wie DAT-Recorder, Interkom, AXIS-Encoder oder Lautsprecherausgabe hat.

Die Kommunikation mit dem Microcontroller läuft über ein, in der Programmiersprache Delphi entwickeltes Programm (s. Bild 11). Das Programm startet die Analog-Digital Wandlung (Befehlsstring **\$S**) und empfängt die, mit einer Abtastfrequenz von 7200 Hz gesendeten 8 Bit Digitalwerte, um diese abzuspeichern und darzustellen (Button **<Read RS232>**).

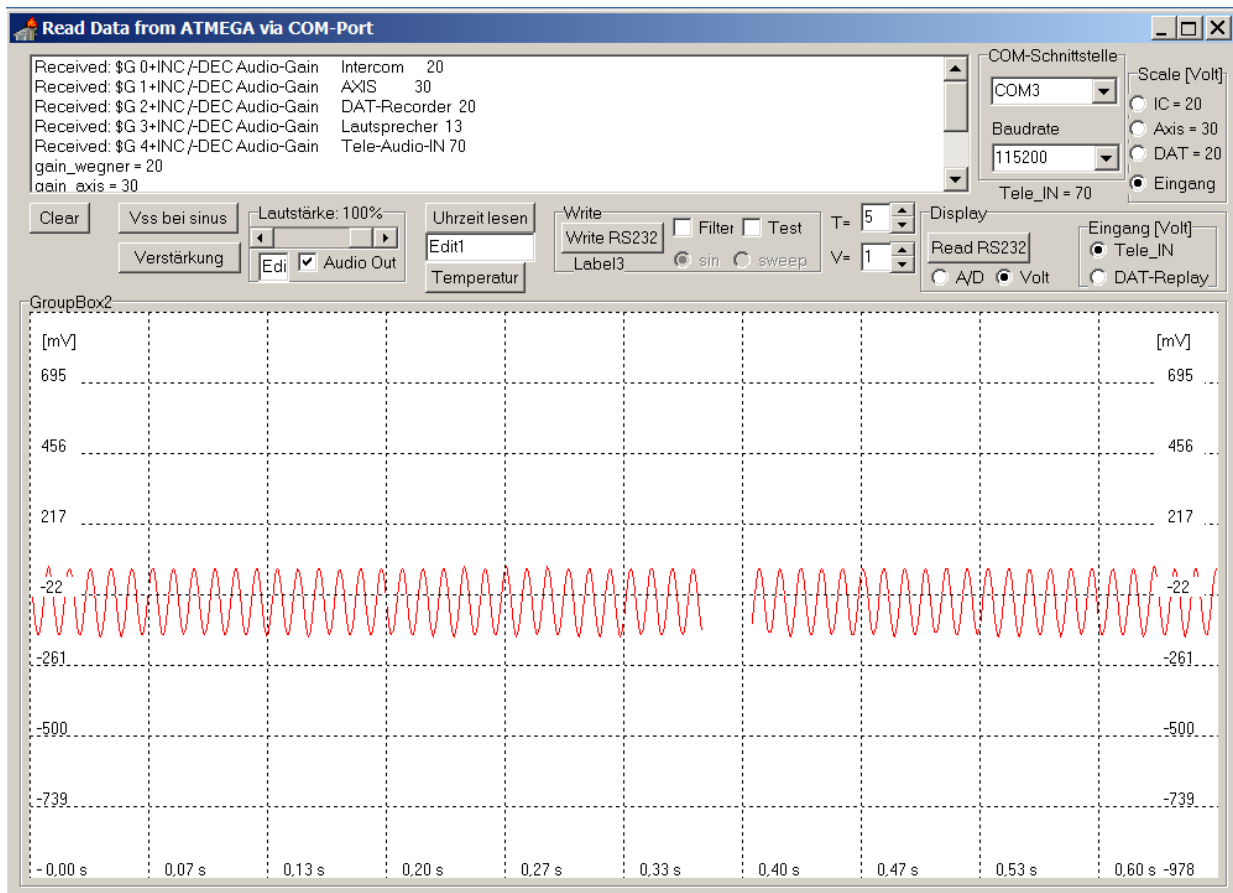


Bild 11. PC-Programm zum Beobachten des Audiosignals

Das Programm ist für den regulären Betrieb des Audiofilters nicht notwendig und dient nur zur Fehlersuche oder zu Testzwecken.

3.5. Platine und Schaltungspläne

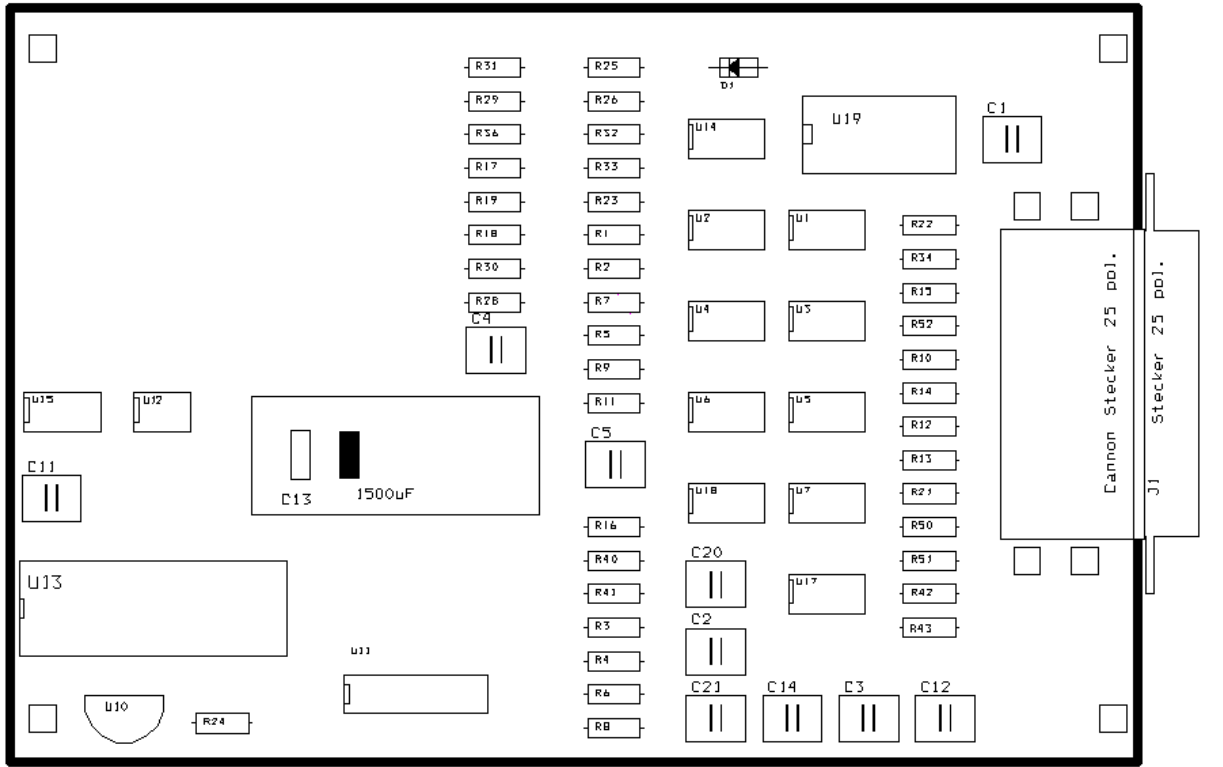


Bild 12. Platine – Bestückungsseite

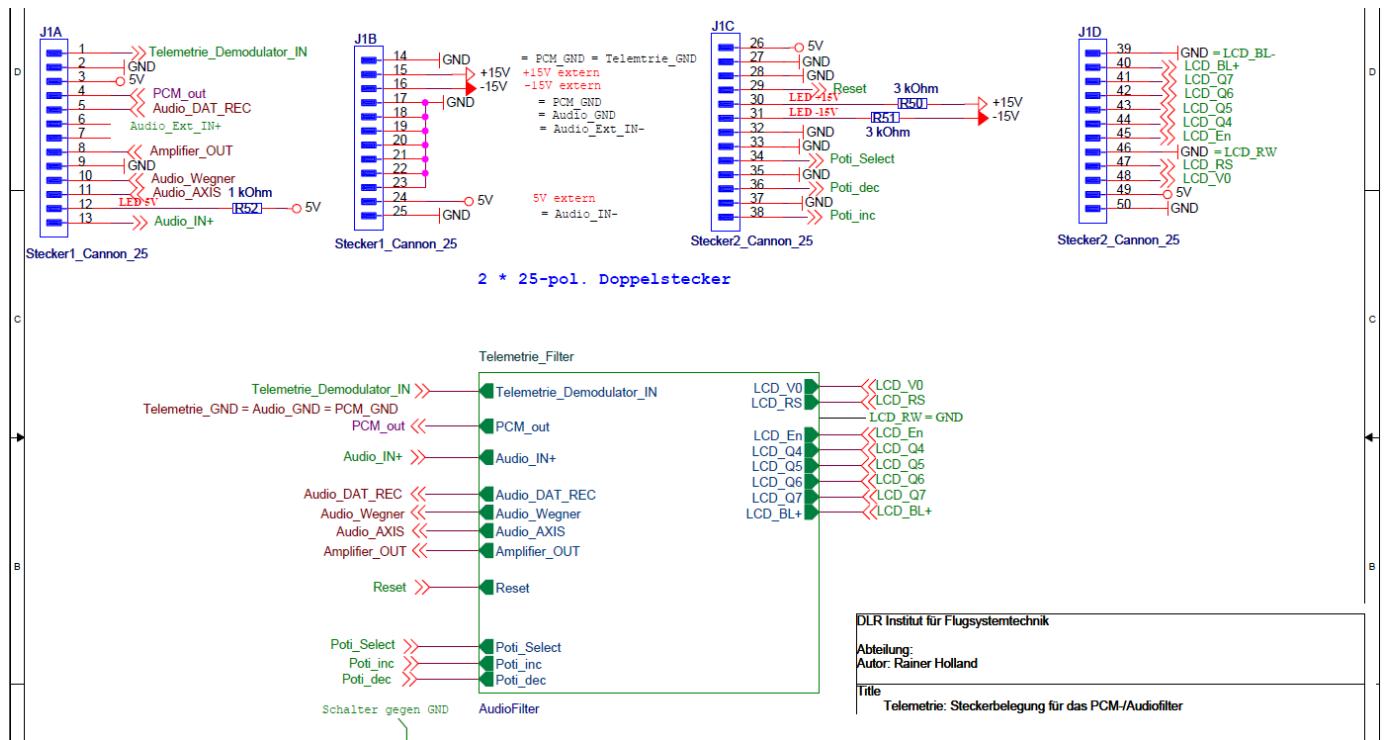


Bild 13. Steckerbelegung

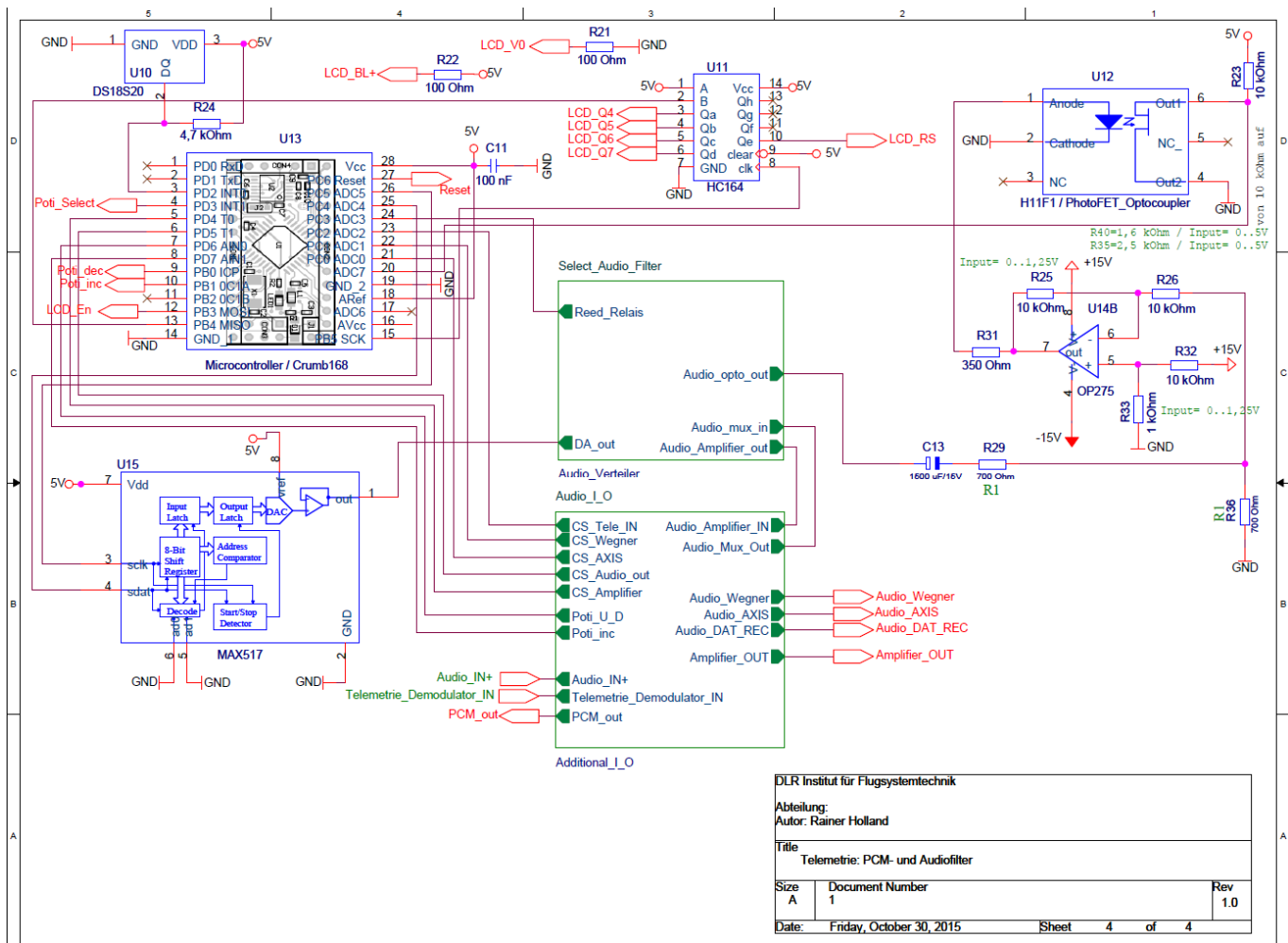


Bild 14. Microcontroller mit Aufbereitung für den Signalmonitor und LCD-Ansteuerung

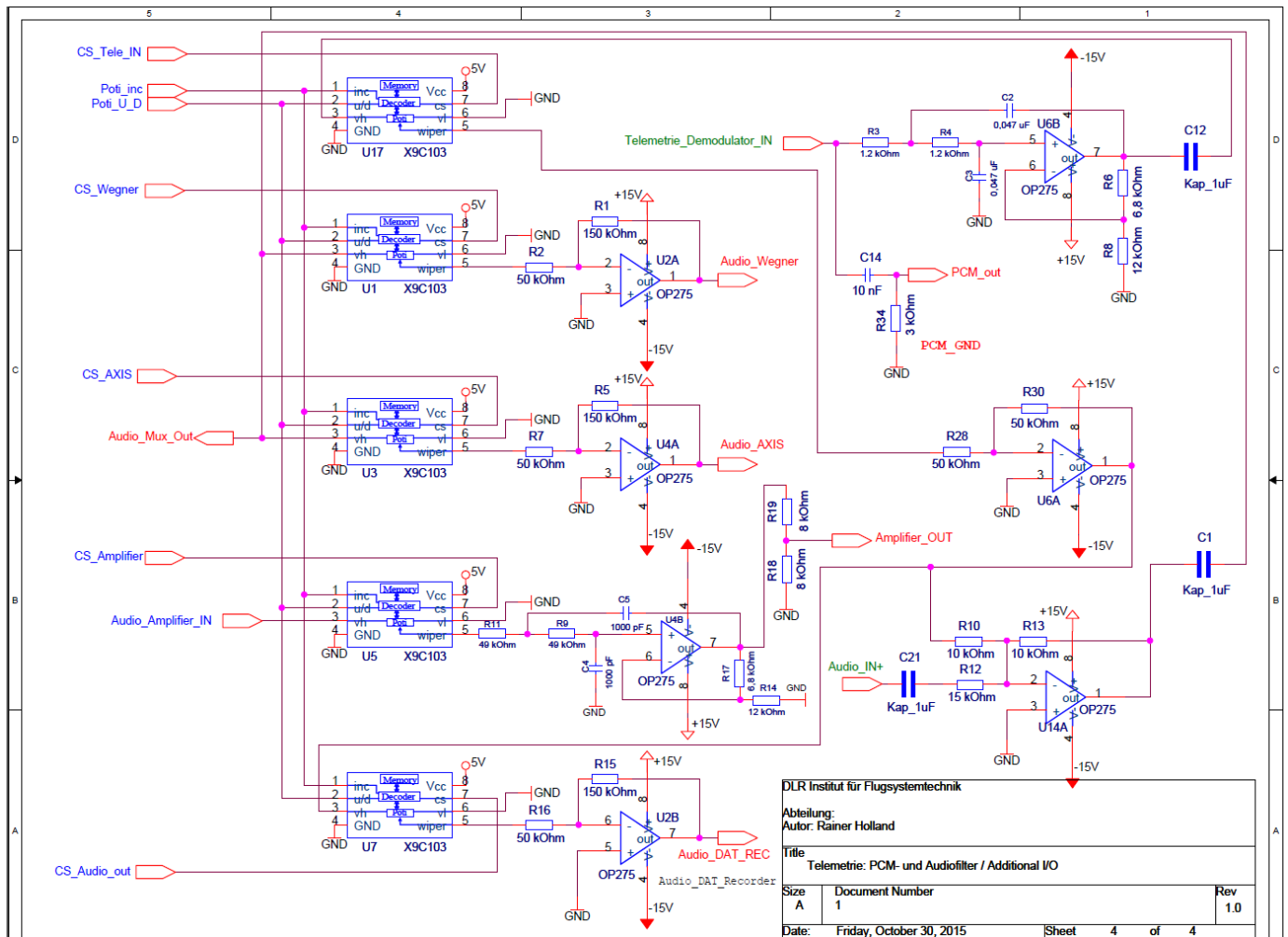


Bild 15. Pegelanpassung und Signalaufbereitung für den Lautsprecher

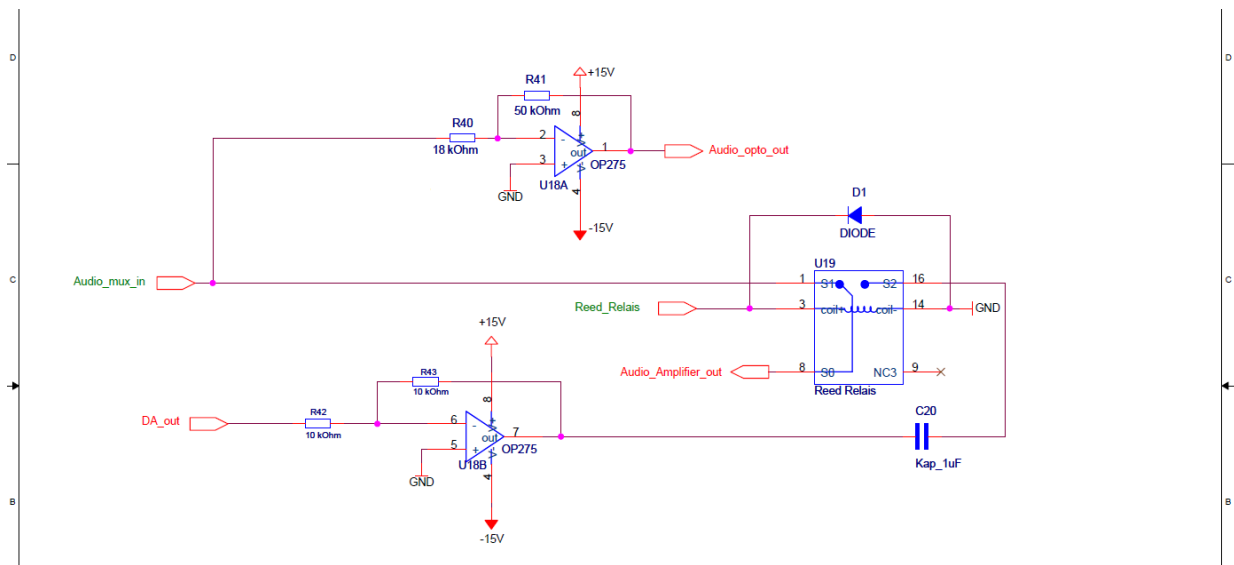


Bild 16. Umschaltung für digitale Filterung

Bill Of Materials

Item	Quantity	Reference	Part
1	4	C1,C12,C20,C21	Kap_1uF
2	2	C2,C3	0,047 uF
3	2	C4,C5	1000 pF
4	1	C11	100 nF
5	1	C13	1500 uF/15V
6	1	C14	10 nF
7	1	D1	DIODE
8	1	J1	Stecker1_Cannon_25
9	1	J1	Stecker2_Cannon_25
10	3	R1,R5,R15	150 kOhm
11	6	R2,R7,R16,R28,R30,R41	50 kOhm
12	2	R3,R4	1.2 kOhm
13	2	R6,R17	6,8 kOhm
14	2	R8,R14	12 kOhm
15	2	R9,R11	49 kOhm
16	8	R10,R13,R23,R25,R26,R32, R42,R43	10 kOhm
17	1	R12	15 kOhm
18	2	R18,R19	8 kOhm
19	2	R21,R22	100 Ohm
20	1	R24	4,7 kOhm
21	2	R29,R36	700 Ohm
22	1	R31	350 Ohm
23	2	R33,R52	1 kOhm
24	3	R34,R50,R51	3 kOhm
25	1	R40	18 kOhm
26	5	U1,U3,U5,U7,U17	X9C103
27	5	U2,U4,U6,U14,U18	OP275
28	1	U10	DS18S20
29	1	U11	HC164
30	1	U12	H11F1 / PhotoFET_Optocoupler
31	1	U13	Microcontroller / Crumb168
32	1	U15	MAX517
33	1	U19	Reed Relais
		HD44780 1602 LCD Module Display	kompatibel: Midas MC21605J6W-BNMLW

Bild 17. Bestückungsliste

4. Anhang „Altes Filter“

Dokumentation einer Filterschaltung zur Trennung von Sprach- und PCM-Information (Version vom August 1998)

Die jetzt folgende Bildnummerierung beginnt wieder mit 1 und bezieht sich nicht auf die vorherigen Bildnummern. Die Dokumentation wurde bereits im Jahr 1998 erstellt.

Bei einer notwendigen Reparatur des nachfolgend beschriebenen Audiofilters wurden einige Komponenten verändert:

1. Netzteil getauscht gegen ein TRACO TMT30215C
2. Poti Lautsprecher 500 kOhm getauscht gegen ein Poti 100 kOhm (s. Schaltplan)
3. Widerstand 90 kOhm (am IC 471/2) gegen einen Widerstand 40 kOhm (s. Schaltplan)

4.1. Einleitung

Die folgende Filterschaltung soll ein Frequenzgemisch aus einem hochfrequenten PCM- und einem niederfrequenten Audiosignal wieder in seine Anteile zerlegen. Dieses Frequenzmultiplexsignal wird an Bord eines Flugversuchsträgers erzeugt und einer Trägerfrequenz aufmoduliert. Nach dem Empfang der Trägerfrequenz und der Demodulation in einer Telemetriebodenstation muß das niederfrequente Sprachsignal vom PCM-Signal getrennt werden.

Das PCM-Signal soll an einen Bitsynchronisierer mit nachfolgendem PCM-Decoder weitergeleitet werden, während das Sprachsignal in der Filterschaltung verstärkt und über eine Leistungsendstufe zum Ansteuern eines Lautsprechers verwendet wird.

Für die Auslegung der Filter wurde ein Frequenzbereich von $0 - 5 \text{ kHz}$ für das Audiosignal und ein Bereich von $5 \text{ kHz} - 2 \text{ MHz}$ für das PCM-Signal angenommen. Da die Sprachqualität des Intercomsignals aus dem Flugversuchsträger vergleichbar zu der des analogen Telefonierens ist, kann die Filtereckfrequenz des Tiefpaßfilters zu $2 \sim 3 \text{ kHz}$ gewählt werden.

Um eine genügend große Dämpfung des PCM-Signals für Frequenzen größer 5 kHz zu erreichen wurde das Audiofilter als ein Butterworth-Tiefpaß 2. Ordnung mit einer Filtereckfrequenz von **1,7 kHz** realisiert (s. Bild 1). Das PCM-Filter wurde als passiver Butterworth-Hochpaß 1. Ordnung (Filtereckfrequenz: **5,3 kHz**) und zusätzlich als aktiver Butterworth-Hochpaß 2. Ordnung (Filtereckfrequenz: **4,8 kHz**) aufgebaut (s. Bild 1). Der aktive Hochpaß hat den Vorteil eine steilere Flanke im Übergangsbereich des Filters zu liefern, dämpft aber aufgrund der dynamischen Eigenschaften des Operationsverstärkers die Betragsübertragungsfunktion im geforderten Durchlaßbereich ab (s. Bild 2). Dieser Nachteil ließe sich durch den Einsatz eines schnelleren Operationsverstärkers beheben - im Schaltplan ist alternativ zum verwendeten Typ OP471 der pinkompatible MC34084 vorgeschlagen. Als Kriterium für das Hochpaßfilter sollte das "Einrasten" des Bitsynchronisierers genommen werden. Dies ließ sich bereits mit dem Hochpaßfilter 1. Ordnung erreichen.

Eine weitere Funktion der Filterschaltung ist durch den eingebauten Leistungsverstärker gegeben. Dieser verstärkt das vom Audiofilter gelieferte Signal und steuert abhängig von einem Umschalter - *extern / intern* - entweder den internen oder einen externen Lautsprecher an. Die Verstärkung respektive Lautstärkeregelung erfolgt über das Potentiometer *Lautsprecher*.

Als weitere Möglichkeit ist die Ansteuerung des Lautsprechers durch ein externes Signal - *Buchse Audio ext.* - vorgesehen. Der Ausgang des Audiofilters läßt sich verstärkt über die *Buchse Audio/out* abnehmen. Die Verstärkung steuert das Potentiometer *Audio out*.

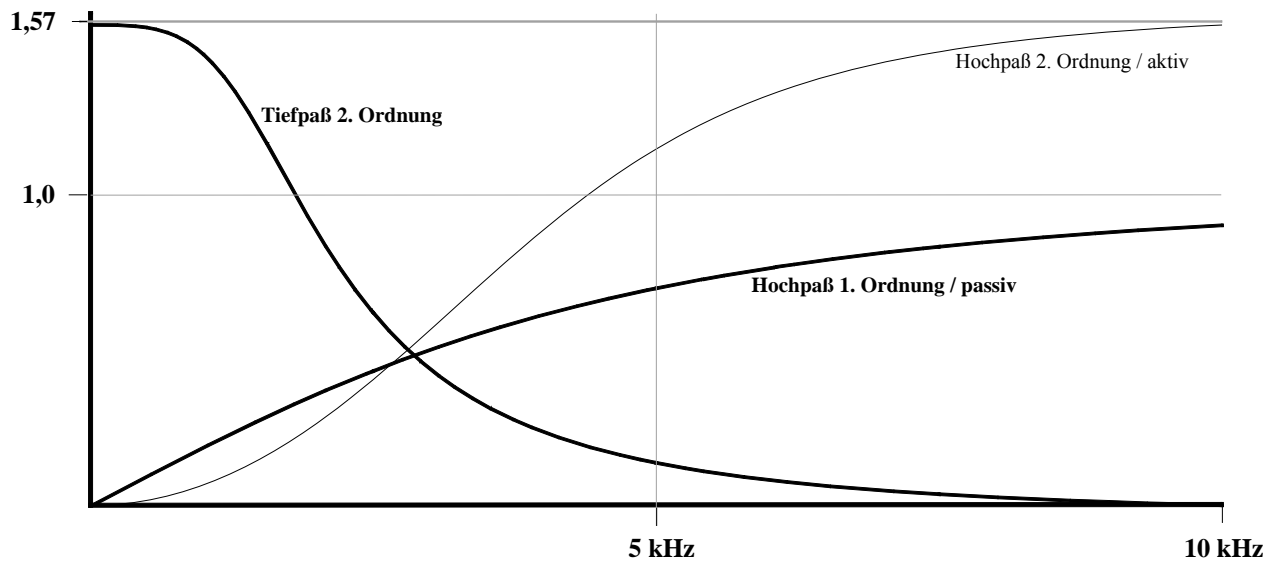
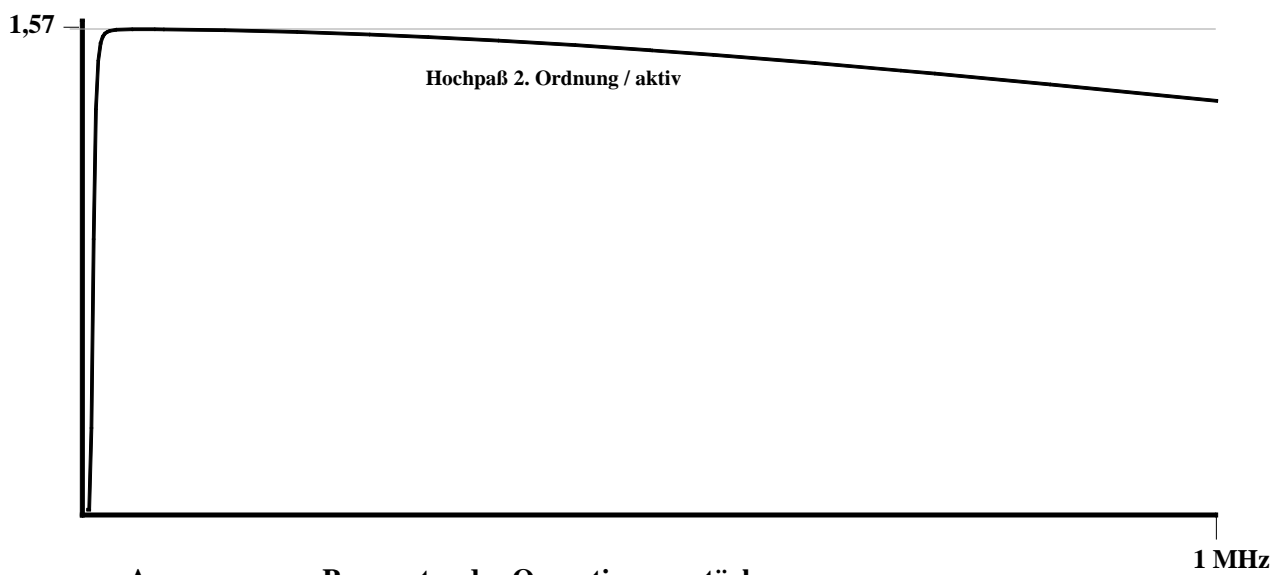


Bild 1. Charakteristik der implementierten Filter



Angenommene Parameter des Operationsverstärkers:

Bandbreitenverstärkungsprodukt: 400000 Hz

Leerlaufverstärkung: 1000000

Bild 2. Einfluß der Frequenzcharakteristik des Operationsverstärkers auf den Hochpaß

4.2. Filterübertragungsfunktionen

4.2.1. Audiofilter / Tiefpaß 2. Ordnung

$$F(p) = \frac{U_a}{U_e} = \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{p^2 (RC)^2 + p RC \left(3 - \frac{1}{k}\right) + 1} \quad (1)$$

mit $p = j\omega$, $k = 0,631$ und $\omega_0 = 1/(RC)$ folgt:

$$F(j\omega) = \frac{1,59}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + j\sqrt{2}\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)} \rightarrow |F(\omega)| = \frac{1,59}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^4}} \quad (2)$$

4.2.2. PCM-Filter / Hochpaß 1. Ordnung

$$F(p) = \frac{p RC}{p RC + 1} \quad (3)$$

mit $p = j\omega$ und $\omega_0 = 1/(RC)$ folgt:

$$|F(\omega)| = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}} \quad (4)$$

4.2.3. PCM-Filter / Hochpaß 2. Ordnung

$$F(p) = \frac{U_a}{U_e} = \frac{1}{k} \cdot \frac{p^2 (RC)^2}{p^2 (RC)^2 + p RC \left(3 - \frac{1}{k}\right) + 1} \quad (5)$$

mit $p = j\omega$, $k = 0,631$ und $\omega_0 = 1/(RC)$ folgt:

$$|F(\omega)| = 1,59 \cdot \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^4}} \quad (6)$$

Der Faktor

$$k = \frac{R_2}{R_2 + R_1} \quad (7)$$

und das Produkt RC gebildet aus Widerstand R und Kondensator C beziehen sich auf die Schaltung in Bild 3.

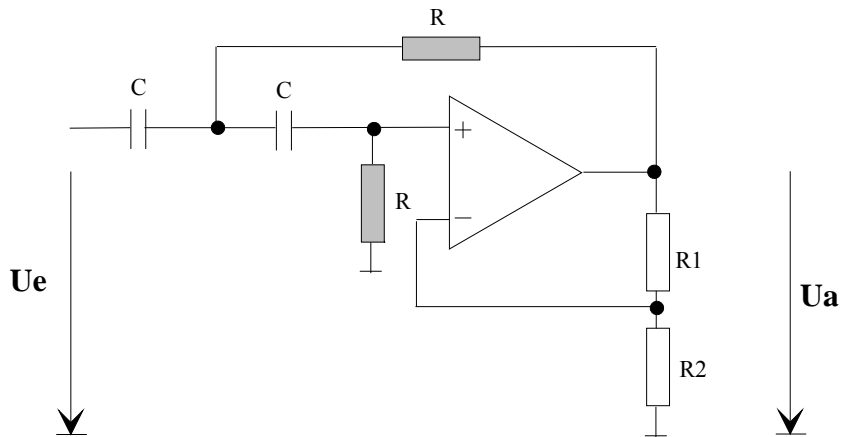


Bild 3. Realisierung des Hochpaß-Filters

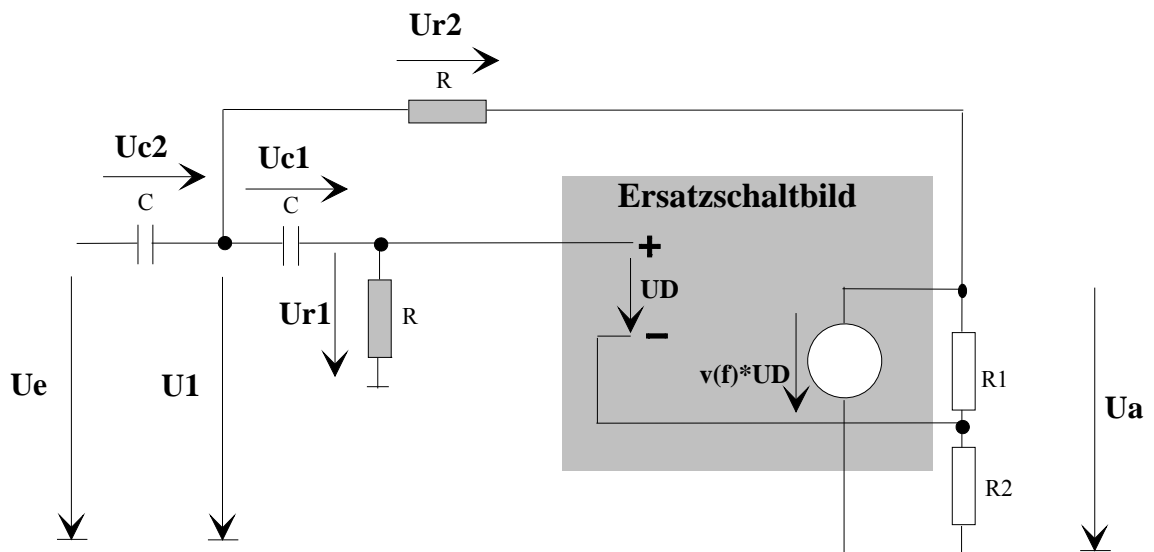


Bild 4. Schaltung unter Berücksichtigung der frequenzabhängigen Verstärkung des Operationsverstärkers

4.3. Berechnung der Übertragungsfunktion für das Hochpaßfilter

Mit

$$U_r I = U_D + \frac{R_2}{R_1 + R_2} v U_D \quad (8)$$

$$U_c I = \frac{U_r I}{p RC} = \frac{I}{p RC} \left(U_D + \frac{R_2}{R_1 + R_2} v U_D \right) \quad (9)$$

$$U_1 = U_c I + U_r I = \left(\frac{I}{p RC} + I \right) \left(U_D + \frac{R_2}{R_1 + R_2} v U_D \right) \quad (10)$$

und

$$U_r 2 = U_1 - v U_D = \left(\frac{I}{p RC} + I \right) \left(U_D + \frac{R_2}{R_1 + R_2} v U_D \right) - v U_D \quad (11)$$

$$i_c 2 = p C U_c 2 = i_r 1 + i_r 2 = \frac{U_r I}{R} + \frac{U_r 2}{R} \quad (12)$$

$$U_c 2 = \frac{I}{p RC} \left[U_D + \frac{R_2}{R_1 + R_2} v U_D + \left(\frac{I}{p RC} + I \right) \left(U_D + \frac{R_2}{R_1 + R_2} v U_D \right) - v U_D \right] \quad (13)$$

folgt:

$$U_e = U_c 2 + U_1 \quad (14)$$

$$= \frac{I}{p RC} \left[\left(\frac{I}{p RC} + 2 \right) \left(U_D + \frac{R_2}{R_1 + R_2} v U_D \right) - v U_D \right] + \left(\frac{I}{p RC} + I \right) \left(U_D + \frac{R_2}{R_1 + R_2} v U_D \right)$$

Multiplikation mit $(p RC)^2$:

$$k = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$p^2 (RC)^2 U_e = (1 + 2 p RC) (U_D + k v U_D) - p RC v U_D + (p RC + p^2 (RC)^2) (U_D + k v U_D)$$

$$p^2 (RC)^2 U_e = p^2 (RC)^2 (U_D + k v U_D) + p RC [3 (U_D + k v U_D) - v U_D] + (U_D + k v U_D)$$

und v_{U_D} wird ersetzt durch U_A :

$$p^2 (RC)^2 U_e = p^2 (RC)^2 \left(\frac{U_a}{v} + k U_a \right) + p RC \left(3 \left(\frac{U_a}{v} + k U_a \right) - U_a \right) + \left(\frac{U_a}{v} + k U_a \right)$$

Dies führt auf die Übertragungsfunktion $F(p) = U_A(p) / U_e(p)$:

$$F(p) = \frac{U_a}{U_e} = \frac{1}{k} \cdot \frac{p^2 (RC)^2}{p^2 (RC)^2 \left(1 + \frac{1}{k v} \right) + p RC \left(3 - \frac{1}{k} + \frac{3}{k v} \right) + \left(1 + \frac{1}{k v} \right)} \quad (15)$$

Für den Fall eines idealen Operationsverstärkers ($v \rightarrow \infty$) geht (15) in die gewünschte Übertragungsfunktion des Hochpaßfilters (5) über.

4.3.1. Berücksichtigung eines realen Operationsverstärkers mit begrenzter Bandbreite

Für die Frequenzabhängigkeit der Verstärkung v des Operationsverstärkers wird ein Verzögerungsglied 1. Ordnung angesetzt:

$$v = v(\omega) = \frac{v_0}{1 + \omega T_1} \quad (16)$$

$$\text{mit } v_0 = \text{Leerlaufverstärkung} \quad \text{und } f_1 = \frac{1}{T_1} = \text{Grenzfrequenz}$$

Die Grenzfrequenz für Operationsverstärker wird durch das Bandbreitenverstärkungsprodukt angegeben. Dieser Wert berücksichtigt folgenden Zusammenhang:

$$v(\omega) = \frac{v_0}{1 + \omega T_1} \approx \frac{v_0}{\omega T_1} = \frac{v_0 \cdot f_1}{2 \pi f} \quad \text{für } \omega = 2 \pi f \gg \frac{1}{T_1} = f_1 \quad (17)$$

$$\frac{v_0}{2 \pi T_1} = \frac{v_0 \cdot f_1}{2 \pi} = B : \text{Bandbreitenverstärkungsprodukt} \quad (18)$$

$$\text{mit } v(\omega_1) \cdot f_1 = v(\omega_2) \cdot f_2 = v(\omega_3) \cdot f_3 = B = \text{const.} \quad (19)$$

Das Bandbreitenverstärkungsprodukt gibt die Frequenz f an, bei der die Verstärkung $v(\omega)$ des Operationsverstärkers gleich 1 ist.

Bild 2 zeigt den Betragsverlauf der Übertragungsfunktion des Hochpasses für einen realen Operationsverstärker - siehe (15) - unter Berücksichtigung einer frequenzabhängigen Verstärkung gemäß (16).

4.4. Gehäuse

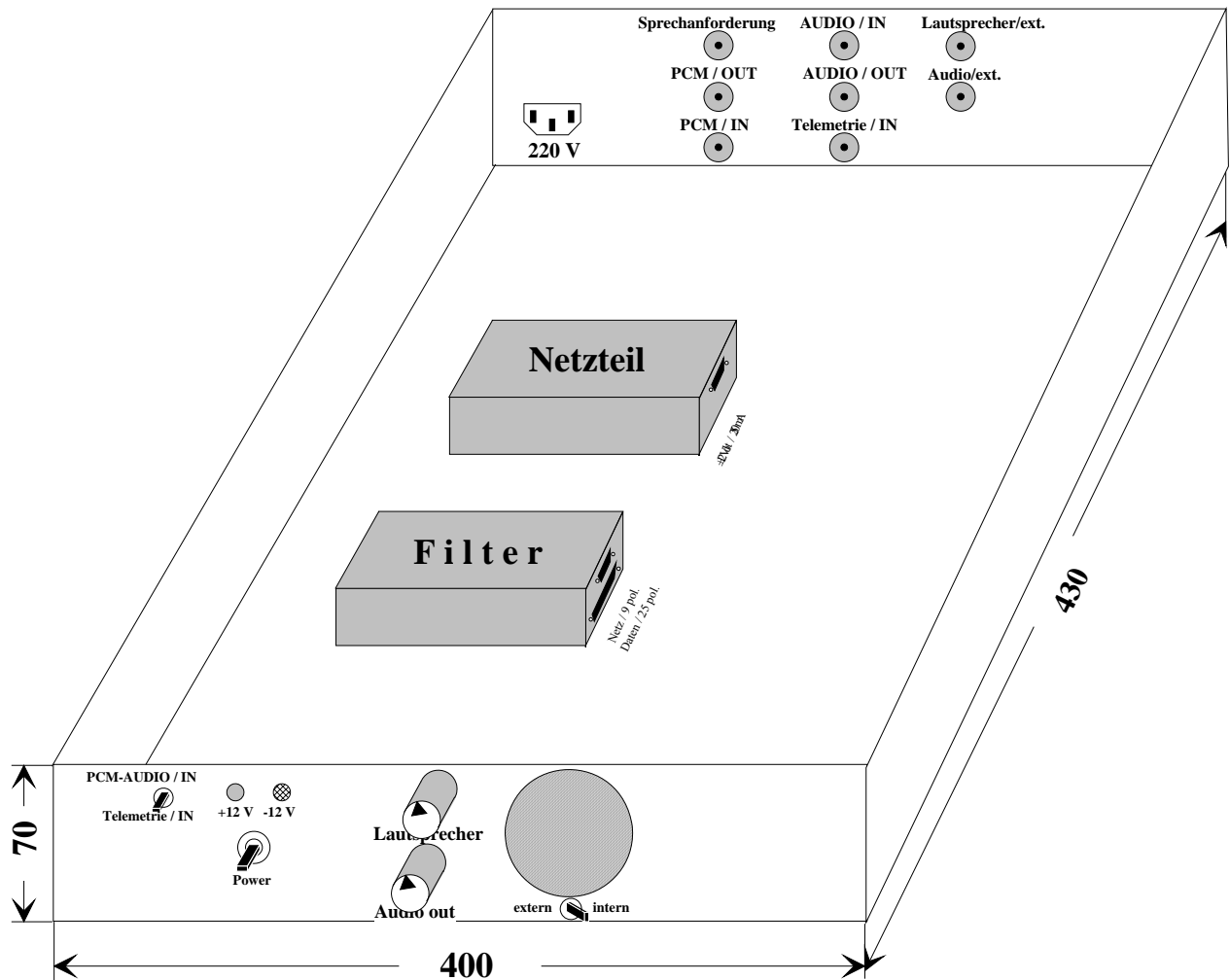


Bild 5. Realisierung des Gehäuses

4.5. Erläuterung der Steckerbezeichnungen

Sprechanforderung: Ein Kurzschluß an diesem Stecker schaltet das durch einen Tiefpaß gefilterte Audiosignal an einen internen Spannungsverstärker (Poti Audio/OUT) durch. Der Ausgang dieses Spannungsverstärkers steht an dem Stecker Audio/OUT zur Verfügung. Ein unbeschalteter Stecker unterbricht die Signalverteilung.

Durch die interne Drahtbrücke B1 / 6-11 wird das gefilterte Audiosignal bei kurzgeschlossenem Relaiskontakt-Stecker auch an den eingebauten Leistungsverstärker (Poti Lautsprecher) weitergeleitet. Durch das Entfernen der Drahtbrücke B1 / 6-11 und dem Installieren der Drahtbrücke B1 / 3-14 wird der Leistungsverstärker durch ein Signal am Stecker Audio/ext. angesteuert.

Audio/OUT: An diesem Stecker steht das in der elektrischen Spannung verstärkte Audiosignal zur Verfügung. Die Spannungsverstärkung wird durch das entsprechende Poti Audio/OUT eingestellt. Dieses Signal kann zur Ansteuerung einer weiteren Elektronik benutzt werden, wobei der Verstärkerausgang jedoch nur einen Strom von ca. 10 mA treiben kann.

PCM/OUT: liefert das durch einen Hochpaß gefilterte PCM-Signal - als Eingang für den Bitsynchronisierer. Je nach gesetzter Drahtbrücke wird folgendes Filter verwandt:

B1 / 1-16 installiert und B1 / 2-15 entfernt: Hochpaß ist ein passives Buttworthfilter 1. Ordnung.

B1 / 2-15 installiert und B1 / 1-16 entfernt: Hochpaß ist ein aktives Buttworthfilter 2. Ordnung.

Audio/ext.: kann zur Ansteuerung des Leistungsverstärkers (Poti Lautsprecher) benutzt werden; dazu muß die Brücke B1 / 6-11 entfernt und die Brücke B1 / 3-14 installiert sein. Es läßt sich über Audio/OUT, welches weiterhin über den Stecker Relaiskontakt / Funk gesteuert wird und einer externen Elektronikschaltung eine zusätzliche Beeinflussung des Audiosignals vornehmen, bevor es über Audio/ext. dem Leistungsverstärker zugeführt wird.

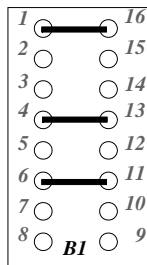
Lautsprecher/ext.: gestattet den Anschluß eines externen Lautsprechers. Dieser Signalausgang wird durch einen Umschalter, der sich unter dem internen Lautsprecher befindet, aktiviert. Bei Aktivierung ist der interne Lautsprecher ausgeschaltet. Die Lautstärke steuert das Poti Lautsprecher.

Telemetrie/IN: Eingang für das im Frequenzbereich gemultiplexte Signal aus PCM-Datenstrom (5 kHz - 2 MHz) und Audioinformation (0 Hz - 3 kHz).

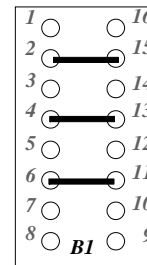
PCM/IN: Signaleingang für den PCM-Datenstrom (5 kHz - 2MHz) zur Erzeugung eines Frequenzmultiplexsignals. Dieser Eingang dient zum Testen der Filterelektronik und kann mit dem Umschalter PCM-AUDIO / IN ~ Telemetrie aktiviert werden.

AUDIO/IN: Eingang für das Audiosignal (0 Hz - 3 kHz) zur Erzeugung eines Frequenzmultiplexsignals. Der Eingang kann auch ohne PCM-Datenstrom betrieben werden, um beispielsweise die Audiospur eines DAT-Rekorders auf den Lautsprecher zu geben. Der Eingang kann nur alternativ zu Telemetrie/IN betrieben werden. Die Umschaltung erfolgt über den Schalter PCM-AUDIO / IN ~ Telemetrie.

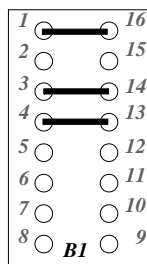
4.6. Schaltungskonfigurationen durch steckbare Drahtbrücken



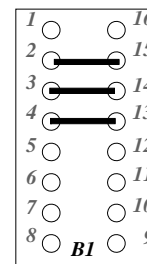
PCM-Hochpaßfilter: 1. Ordnung / passiv
Leistungsverstärker: angesteuert durch
internes Audiofilter



PCM-Hochpaßfilter: 2. Ordnung / aktiv
Leistungsverstärker: angesteuert durch
internes Audiofilter



PCM-Hochpaßfilter: 1. Ordnung / passiv
Leistungsverstärker: angesteuert durch ein
externes Audiosignal



PCM-Hochpaßfilter: 2. Ordnung / aktiv
Leistungsverstärker: angesteuert durch ein
externes Audiosignal

4.7. Schaltplan

