

Frequenzfilter

PPG8

Udo Beier Leon Brückner Valentin Olpp Marco Zech
 Sebastian Ziegler

Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort	3
2	Theoretische Betrachtung	3
2.1	Durchlassfilter	3
2.2	Sperrfilter	4
3	Versuchsdurchführung	6
3.1	Durchlassfilter als Frequenzfilter	6
3.2	Sperrfilter als Frequenzfilter	7
4	Diskussion der Ergebnisse	7
4.1	Durchlassfilter	7
4.2	Sperrfilter	8
4.3	Fazit	8

Abbildungsverzeichnis

1	Schaltbild eines Durchlassfilters	4
2	Position der zusätzlich angenommenen Widerstände	5
3	Schaltbild eines Sperrfilters	6
4	Fotos der Versuchsaufbauten	7
5	Plot der Messdaten des Durchlassfilters unter Berücksichtigung des gemessenen Gesamtwiderstandes	8
6	Plot der Messdaten des Durchlassfilters unter Berücksichtigung des gefitteten Gesamtwiderstandes	9
7	Plot der Messdaten des Sperrfilters mit Theoriekurven	9

1 Vorwort

Frequenzfilter bilden die Grundlage für viele technische Anwendungen. Sie sind insbesondere in der Tontechnik essenziell, wenn es darum geht, bestimmte Frequenzen hervorzuheben oder abzuschwächen. Dies kann sehr gut am Beispiel einer Bassdrum verdeutlicht werden. Dort verstärkt man Frequenzen bei ca. 80 Hz sowie hohe Frequenzen von mehr als 1 kHz, um die charakteristischen Klänge einer Bassdrum hervorzuheben, während man mittlere Frequenzen abschwächt, da diese das Klangbild meist verwaschen klingen lassen. Aufgrund der immensen Bedeutung von Frequenzfiltern sollen im folgenden ein Sperr- und ein Durchlassfilter gebaut und die zugehörigen gemessenen Frequenzkurven mit den Theoriekurven verglichen werden.

2 Theoretische Betrachtung

2.1 Durchlassfilter

Ein Durchlassfilter ist eine Reihenschaltung aus Kondensator, Spule und Widerstand. (s.Abb. 1)

Mit den Kirchhoffschen Regeln und $U = Z \cdot I$ gilt ¹

$$U_a = \frac{R}{R + i \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)} \cdot U_e \quad (1)$$

$$\Rightarrow |U_a| = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}} \cdot |U_e| \quad (2)$$

Bei der Frequenz

$$\omega = \omega_R = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad (3)$$

wird $|U_a| = |U_e|$, d.h. die Wechselspannung $U_e(\omega_R)$ wird vollständig durchgelassen, während alle anderen Frequenzen abgeschwächt werden. Setzt man nun

$$\frac{|U_a|}{|U_e|} = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (4)$$

und löst die quadratische Gleichung, ergibt sich die Bedingung

$$\omega_{1,2} = \pm \frac{R}{2L} + \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} + \omega_R^2} \quad (5)$$

Berechnet man nun die Frequenzbreite $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$, ergibt sich

$$\Delta\omega = \frac{R}{L} \quad (6)$$

, d.h. bei kleineren Widerständen ergeben sich 'schärfere' Peaks.

¹vgl. (Demtröder, 2009, 151 ff.)

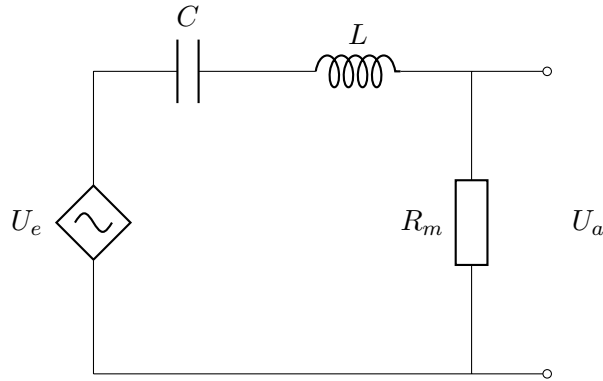


Abbildung 1: Schaltbild eines Durchlassfilters

Diese Betrachtung nimmt an, dass der Ohmsche Widerstand der Spule vernachlässigbar ist, was in der Praxis jedoch nicht immer der Fall ist. Wenn die Spule einen Widerstand R_L besitzt, ändert sich Gleichung (2) zu

$$\Rightarrow |U_a| = \frac{R}{\sqrt{(R + R_L)^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \cdot |U_e| \quad (7)$$

also wird die Wechselspannung U_e selbst bei der Resonanzfrequenz nicht vollständig durchgelassen.

2.2 Sperrfilter

Beim Sperrfilter werden die Spule und der Kondensator nun parallel geschaltet. (siehe Abb. 3 auf Seite 6)

Analog zum Durchlassfilter ergibt sich nun

$$U_a = \frac{R}{R - i\frac{1}{\omega C - \frac{1}{\omega L}}} \cdot U_e \quad (8)$$

$$\Rightarrow |U_a| = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{(\omega C - \frac{1}{\omega L})^2}}} \cdot |U_e| \quad (9)$$

Bei der Resonanzfrequenz (3) geht nun $|U_a| \rightarrow 0$, d.h. die Frequenz ω_R wird blockiert, während andere Frequenzen durchgelassen werden.

Berechnet man hier die Frequenzbreite analog zu (4) und (5) ergibt sich:

$$\Delta\omega = \frac{1}{RC\sqrt{1 - \left(1 - \frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2}} \quad (10)$$

Hier ergeben also größere Widerstände 'schärfere' Peaks.

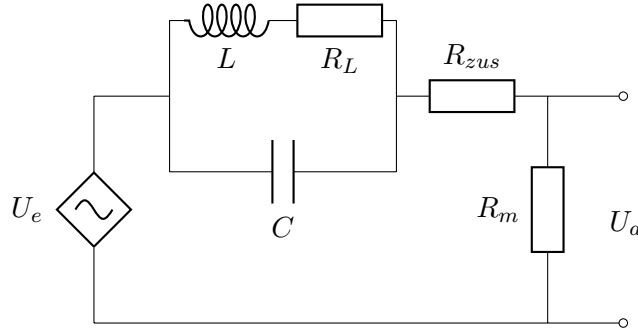


Abbildung 2: Position der zusätzlich angenommenen Widerstände

Auch hier kann man der Spule einen Widerstand R_L zuweisen, außerdem wurde ein nicht weiter spezifizierter zusätzlicher Widerstand R_{zus} eingefügt. Siehe Abb. 2 auf Seite 5.

Der Gesamtwiderstand der Parallelschaltung aus Spule und Kondensator ist dann:

$$Z_{SK} = \frac{1}{\frac{1}{R_L + i\omega L} + i\omega C} \quad (11)$$

Der Gesamtwiderstand der Schaltung kann nun geschrieben werden als

$$Z_{SK} + R_{zus} + R = \frac{\gamma R_L - i\omega\gamma[C\gamma - L]}{R_L^2 + \omega^2[C\gamma - L]^2} + R_{ges} \quad (12)$$

mit $\gamma = R_L^2 + \omega^2 L^2$ und $R_{ges} = R + R_{zus}$

Analoges Vorgehen zu (1) und (2) liefert schließlich:

$$\frac{|U_a|}{|U_e|} = \frac{R\beta}{\sqrt{(\gamma R_L + R_{ges}\beta)^2 + \gamma^2 \epsilon^2}} \quad (13)$$

mit $\gamma = R_L^2 + \omega^2 L^2$, $\epsilon = \omega[C\gamma - L]$, $\beta = R_L^2 + \epsilon^2$

Einsetzen der Substitutionen und Ausschreiben liefert dann folgende Gleichung, die für die Theoriekurven in Abb. 7 verwendet wurde.

$$\left| \frac{U_a}{U_e} \right| = \frac{R \left(R_L^2 + \omega^2 [C (R_L^2 + \omega^2 L^2) - L]^2 \right)}{\sqrt{(R_L^2 + \omega^2 L^2) R_L + R_{ges} \{ R_L^2 + \omega^2 [C (R_L^2 + \omega^2 L^2) - L]^2 \}^2 + (R_L^2 + \omega^2 L^2)^2 \omega^2 [C (R_L^2 + \omega^2 L^2) - L]}} \quad (14)$$

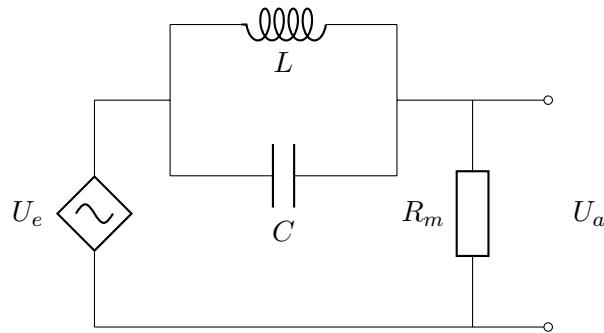


Abbildung 3: Schaltbild eines Sperrfilters

3 Versuchsdurchführung

3.1 Durchlassfilter als Frequenzfilter

Zur Überprüfung der Funktionsweise eines Frequenzfilters wurde zunächst die Schaltung aus Abb. 1 auf Seite 4 wie in Abb. 4a realisiert. Nach anfänglichen Problemen mit der richtigen Dimensionierung der verwendeten Spule haben wir hier schließlich eine Spule "Leybold 56214" mit 500 Windungen und einer Induktivität von 9 mH verwendet, wobei das Augenmerk auf einer möglichst geringen Windungszahl liegt, um den in der Spule angesiedelten Widerstand möglichst gering zu halten. Dieser liegt für die Spule bei angegebenen $2,5 \Omega$, was durch Messung bestätigt wurde. Auf der anderen Seite musste auch eine hinreichend große Induktivität garantiert werden, damit die Resonanzfrequenz, in deren Umgebungen die Messungen stattfanden, in einem gut erfassbaren Bereich lagen. Weiter wurde ein Plastikfolienkondensator der Firma „WIMA“ der Kapazität $0,22 \mu F$ sowie in einem zweiten Teilversuch ein Kondensator gleicher Bauart, allerdings mit $4,7 \mu F$ Kapazität, verwendet. Da beide Teilversuche übereinstimmende Ergebnisse lieferten, wird in der Auswertung nur der erste Teilversuch dargestellt. Weiter wurde der Widerstand als variabel gewählt, wobei hier ein Widerstandskasten, mit dem Widerstände im Bereich von 1Ω bis mehrere $M\Omega$ zugeschaltet werden können, verwendet wurde.

Zur Erzeugung der Eingangsspannung wurde zunächst ein Frequenzgenerator der Marke Hameg (Programmable 15 MHz Function Generator, HM8131/2) verwendet, zur Vereinfachung und Automatisierung der Messung wurde dieser allerdings durch das Power-Cassy ersetzt ². Die Messung der über dem Widerstand abfallenden Ausgangsspannung wurde bei einem ersten Aufbau mit einem Oszilloskop (Tektronix TDS 2024 100MHz, PPL28/2/001) durchgeführt. Hierbei stellte sich allerdings heraus, dass die Messungen etwas an Genauigkeit zu wünschen übrig ließen. Bei der tatsächlichen Durchführung des Experiments haben wir stattdessen das Sensor-Cassy zugeschaltet; Vorteil hierbei ist klar die direkte Übertragung der Daten in die Cassy-Software.

²vgl. (Hund, 2013, 42f.)

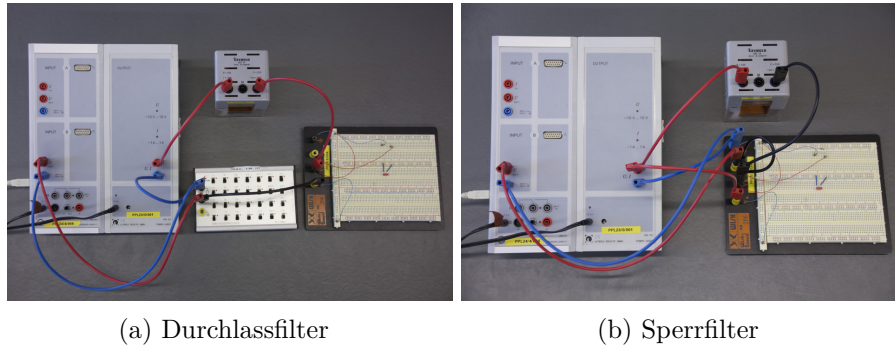


Abbildung 4: Fotos der Versuchsaufbauten

3.2 Sperrfilter als Frequenzfilter

Für die Abwandlung des Durchlassfilters zu einem Sperrfilter müssen lediglich Kapazität und Induktivität parallel anstatt in Reihe geschaltet werden, wie in Abb. 3 dargestellt. Für diesen Versuch wurde der zweite Kondensator mit einer Kapazität von $4,7 \mu F$ sowie daneben eine Spule höherer Induktivität (36 mH bei 1000 Windungen; ebenfalls von "Leybold") verwendet. Grund hierfür war eine erwartete Senkung der Resonanzfrequenz und eine damit verbundene bessere Messung. Tatsächlich wurde aber kein qualitativer Unterschied zum Durchlassfilter und ersterer Spule bei der Genauigkeit der Messung erzielt. Um für dieses Experiment den teilweise recht schwach ausgebildeten Peak deutlicher sichtbar zu machen, also eine geringere Breite zu erreichen, wurde weiter die Widerstandsbox durch einen einfachen Schichtwiderstand, wie etwa in Abb. 4b zu sehen, ersetzt. Grund dafür ist, dass die Widerstandsbox insbesondere bei den kleinsten Widerständen einen zu großen tatsächlichen Widerstand liefert.

4 Diskussion der Ergebnisse

4.1 Durchlassfilter

Beim Aufzeichnen der Spannungskurven für verschiedene ohmsche Widerstände fiel auf, dass die Maxima im Vergleich zu denen der Theoriekurven berechnet nach (7) deutlich zu klein waren. Dabei wurde auch der an weiteren Bauteilen, hierbei vor allem die Spule, abfallende Widerstand berücksichtigt. Dieser wurde zuvor zu $3,0 \Omega$ ausgemessen (siehe Abb. 5). Abbildung 6 zeigt die gleiche Messreihe, wobei hier über dem Gesamtwiderstand des Kreises als Variable gefittet wurde. Ergebnis war, dass dieser nochmals um etwa 4Ω größer ist, als zuvor im „Ruhezustand“ gemessen. Grund hierfür ist wohl schlichtweg zusätzlicher Widerstand, der sich als Übergangswiderstand bei den Steckverbindungen ausbildet, oder ein thermischer Widerstand in der Widerstandsbox.

Die geringen Abweichungen der Resonanzfrequenz, die überdies hinaus zu sehen sind, könnten unter anderem auf ungenaue Kapazitäts- und Induktivitätsangaben zurückgeführt werden, fallen allerdings kaum ins Gewicht.

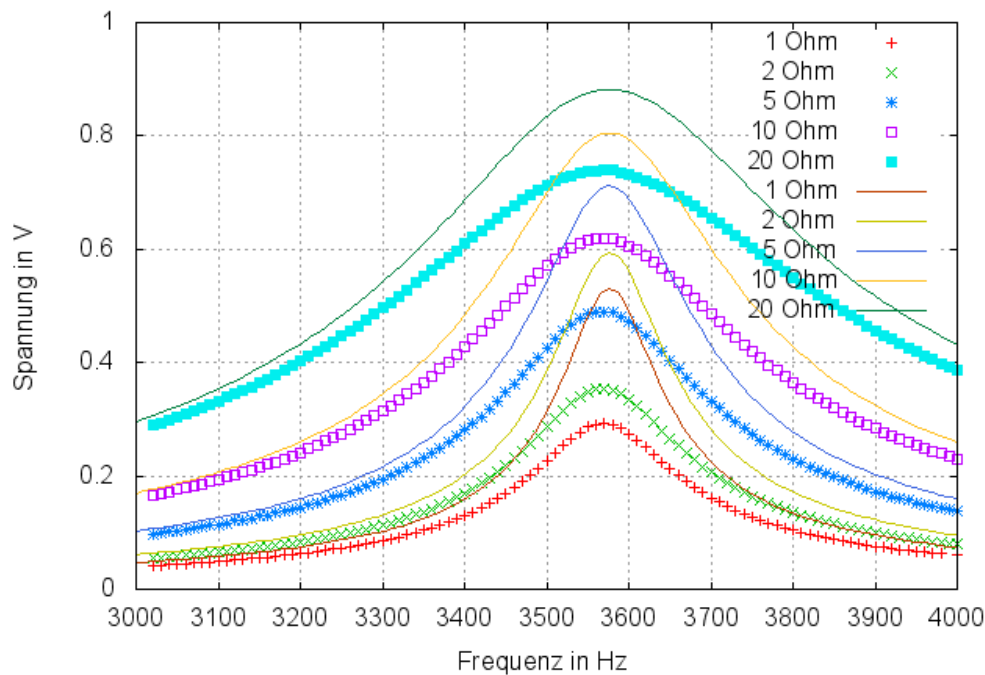


Abbildung 5: Plot der Messdaten des Durchlassfilters unter Berücksichtigung des gemessenen Gesamtwiderstandes

4.2 Sperrfilter

Ähnlich verhält es sich mit den aus dem Betrieb der zweiten Schaltung als Sperrfilter entstandenen Kurven (Abb. 7). Nach Berücksichtigung des ohmschen Widerstandes der Spule ergeben sich nur noch minimale Abweichungen zwischen Theorie nach Formel (14) und den Messwerten, einzig die Resonanzfrequenz konnte nicht getroffen werden. Hier scheint es ebenfalls am wahrscheinlichsten, dass die Induktivität der zweiten Spule mit 36 mH nicht korrekt ist, oder dass in anderen Bauteilen ungewollte Induktivitäten oder Kapazitäten auftreten.

4.3 Fazit

Vergleicht man also die Theorie der behandelten Frequenzfilter mit den tatsächlich gemessenen Ergebnissen, so stimmen beide vor allem in qualitativer Hinsicht gut überein. Durch Ersetzen von etwa der Widerstandsbox durch einen Schichtwiderstand, eine Reduktion des Widerstands der Spule sowie durch Löten der Kontakte an Stelle von gewöhnlichen Steckverbindungen müssten darüberhinaus deutliche Verbesserungen möglich sein, was die Höhe des Spannungsverlaufs und dessen Abweichung von der Theorie betrifft. Darüber hinaus müsste es durch die Verwendung genauer ausgemessener Induktivitäten und Kapazitäten auch möglich sein, die Resonanzfrequenz besser zu treffen.

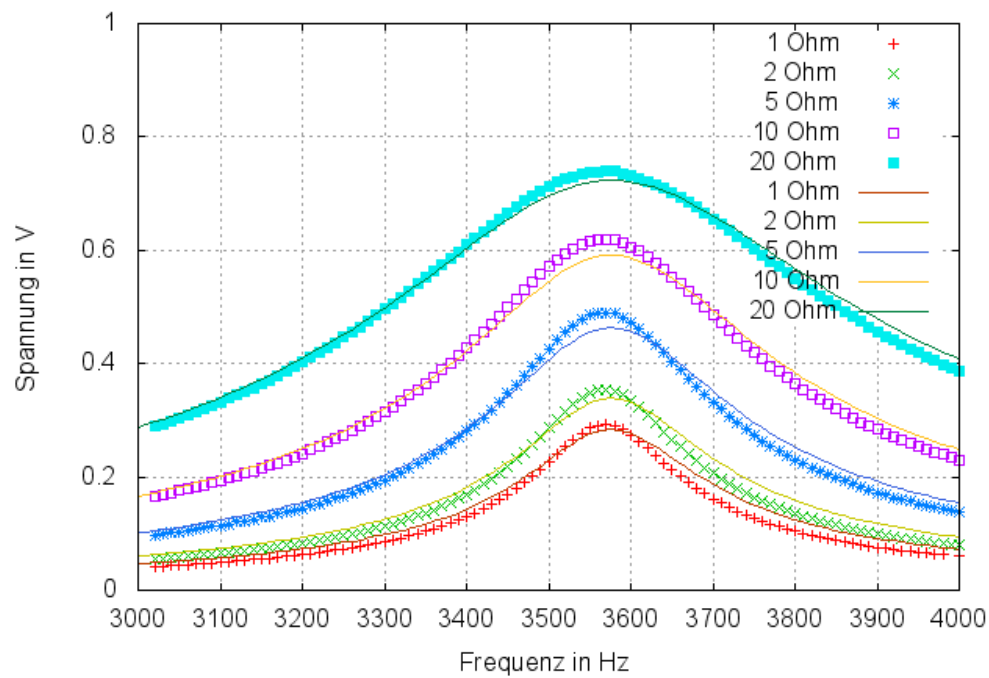


Abbildung 6: Plot der Messdaten des Durchlassfilters unter Berücksichtigung des gefitteten Gesamtwiderstandes

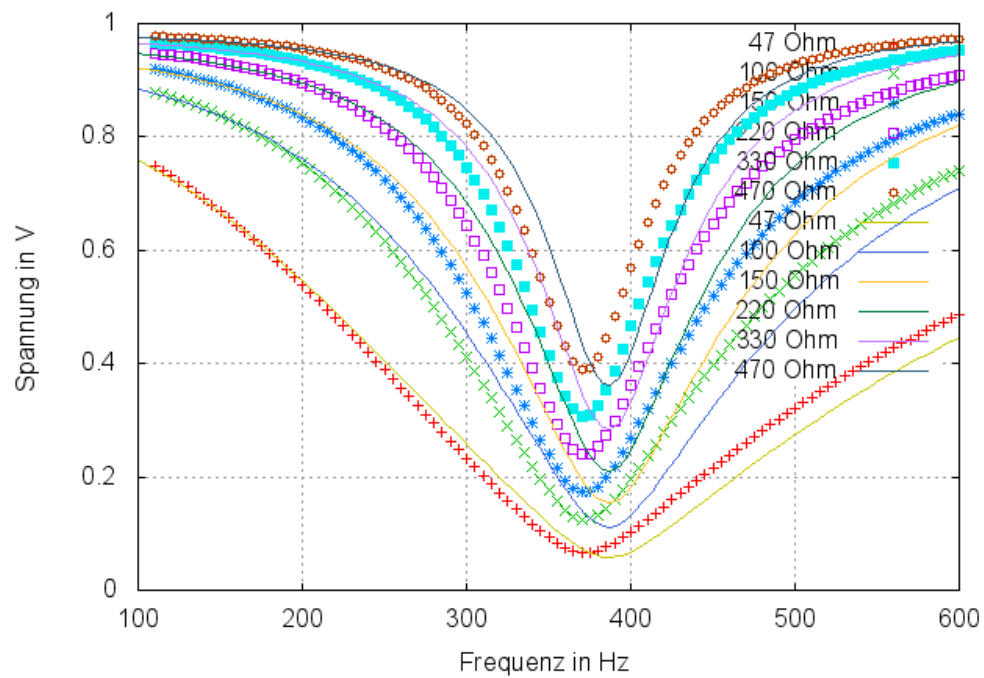


Abbildung 7: Plot der Messdaten des Sperrfilters mit Theoriekurven

Literatur

[Demtröder 2009] DEMTRÖDER, Wolfgang: Experimentalphysik 2: Elektrizität und Optik. 5., überarb. und erw. Aufl. In: *Au. Reihe: Springer-Lehrbuch Bandwerk Experimentalphysik 2* (2009)

[Hund 2013] HUND, Michael: Handbuch CASSY Lab 2. (2013)