



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Grundlagen der Nachrichtentechnik

Aktive Filter

Autoren:

Tommy JAHNKE
J.Sebastian FRISCH
Nils PARCHE

Professorin:
Prof. Dr. LI

9. Dezember 2016

Abbildungsverzeichnis

1	.....	3
2	.....	4
3	.....	5
4	.....	7
5	.....	8
6	.....	9
7	Sprungantwort Butterworth-Tiefpass	13
8	Sprungantwort Tschebyscheff-Tiefpass	14
9	Sprungantwort Bessel-Tiefpass	14
10	Amplitudengang Butterworth-Tiefpass mit Marker	17
11	Amplitudengang Butterworth- und Tschebyscheff-Tiefpass mit Marker bei Tschebyscheff	17
12	Amplitudengang Butterworth-, Tschebyscheff- und Bessel-Tiefpass mit Marker bei Bessel	18
13	Amplitudengang Butterworth-Hochpass mit Marker	18
14	Amplitudengang Butterworth- und Tschebyscheff-Hochpass mit Marker bei Tschebyscheff	19
15	Amplitudengang Butterworth-, Tschebyscheff- und Bessel-Hochpass mit Marker bei Bessel	20
16	Amplitudengang Bandsperre mit Marker	21
17	Amplitudengang Bandsperre und Bandpass mit Marker beim Bandpass	22
18	Phasengang Butterworth-Tiefpass mit Markern	23
19	Phasengang Butterworth- und Tschebyscheff-Tiefpass mit Markern bei Tschebyscheff	24
20	Phasengang Butterworth-, Tschebyscheff- und Bessel-Tiefpass mit Markern bei Bessel	24
21	Sprungantwort Butterworth: Messung der Anstiegszeit	25
22	Sprungantwort Butterworth: Messung der Einschwingzeit	25
23	Sprungantwort Butterworth: Messung des Überschwingers	26
24	Sprungantwort Tschebyscheff: Messung der Anstiegszeit	26
25	Sprungantwort Tschebyscheff: Messung der Einschwingzeit	27
26	Sprungantwort Tschebyscheff: Messung des Überschwingers	27
27	Sprungantwort Bessel: Messung der Anstiegszeit	28
28	Sprungantwort Bessel: Messung der Einschwingzeit	28

Tabellenverzeichnis

1	Tiefpassfilter - Grundverstärkung V_0 , Grenzfrequenz f_g	2
2	Hochpassfilter - Grundverstärkung V_∞ , Grenzfrequenz f_g	7
3	Gemessenen Grenzfrequenzen der verschiedenen Tiefpässe/Hochpässe	12
4	Frequenzen bei einer Phasenverschiebung von -60° und -120° . .	12
5	Mittenfrequenz und Sperrfrequenz des Bandpasses sowie der Bandsperre	12
6	Vergleich: gemessenen und vorausbestimmte Grenzfrequenzen der verschiedenen Tiefpässe/Hochpässe	15
7	Gegenüberstellung: gemessene und vorausbestimmte Mittenfrequenz und Sperrfrequenz des Bandpasses sowie der Bandsperre	15
8	Gegenüberstellung: gemessene und vorausbestimmte Frequenzen bei einer Phasenverschiebung von -60° und -120°	15
9	Anstiegszeit, Überschwingen und Einschwingzeit der drei Tiefpässe	16

Inhaltsverzeichnis

1	Vorbereitung	1
1.1	Grundverstärkung und Grenzfrequenzen der Hoch- und Tiefpässe .	1
1.1.1	Tiefpassfilter	1
1.1.2	Hochpassfilter	4
1.1.3	Bandpassfilter	8
1.1.4	Bandsperre	10
2	Messungen	11
2.1	Verwendete Geräte	11
2.2	Messung von Amplituden- und Phasengang der Filterschaltungen .	12
2.3	Sprungantworten der Tiefpässe	13
3	Auswertung	15
3.1	Zu: Messung von Amplituden- und Phasengang der Filterschaltungen	15
3.2	Zu: Sprungantworten der Tiefpässe	16
4	Anhang	17
4.1	Amplitudengänge	17
4.1.1	Tiefpässe	17
4.1.2	Hochpässe	18
4.1.3	Bandpass/Bandsperre	19
4.2	Phasengänge Tiefpässe	20
4.3	Sprungantworten der Tiefpässe	21
4.3.1	Butterworth	21
4.3.2	Tschebyscheff	22
4.3.3	Bessel	23

1 Vorbereitung

Es sind an einem Universalfilter verschiedenen Filtertypen 2. Ordnung zu untersuchen. Über die Widerstandsbeschaltung R_a , R_b , R_c , R_d , R_e und R_f können bestimmte Filtercharakteristiken, wie Butterworth, Tschebyscheff und Bessel nachgebildet werden. Mit der Tabelle [?] in der Aufgabenstellung sollen bei den Hochpass- und Tiefpassfilter der drei genannten Filtercharakteristiken die Grenzfrequenz f_g und die Grundverstärkung V_0 bestimmt werden. Bei dem Bandpass ist die Mittelfrequenz f_M und die Bandbreite B zu berechnen. Die Bandsperre wird auf ihre Sperrfrequenz untersucht.

1.1 Grundverstärkung und Grenzfrequenzen der Hoch- und Tiefpässe

1.1.1 Tiefpassfilter

In der Versuchsbeschreibung [?] Kapitel 7: Gleichungen zum Universal-Filter wird die Übertragungsfunktion H_{TP} angegeben mit.

$$H_{TP}(j\omega) = \frac{U_{TP}}{U_e} = \frac{R_b \cdot R_f}{R_a \cdot R_c} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_b \cdot R_f}{R_c \cdot R_e} \cdot (j\omega\tau) + \frac{R_f}{R_d} \cdot (j\omega\tau)^2} \quad \text{mit } \tau = R \cdot C \quad (1)$$

Durch die Wahl von $R_b = R_c = R_f = R_0$ vereinfacht sich die Gleichung zu:

$$H_{TP}(j\omega) = \frac{R_0}{R_a} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_0}{R_e} \cdot (j\omega\tau) + \frac{R_0}{R_d} \cdot (j\omega\tau)^2} \quad (2)$$

Aus der Allgemeinen Gleichung eines Tiefpassfilter 2. Ordnung können so die Parameter a_1 , b_1 und V_0 zugewiesen werden. V_0 ist die maximale Verstärkung bei $\omega \rightarrow 0$.

$$\frac{V_0}{1 + a_1 \cdot j\omega + b_1 \cdot (j\omega)^2} = \frac{R_0}{R_a} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_0}{R_e} \cdot (j\omega\tau) + \frac{R_0}{R_d} \cdot (j\omega\tau)^2} \quad (3)$$

$$V_0 = \frac{R_0}{R_a} \quad (4)$$

$$a_1 = \frac{R_0}{R_e} \cdot \tau \quad (5)$$

$$b_1 = \frac{R_0}{R_d} \cdot \tau^2 \quad (6)$$

Allgemeine Formel zur Bestimmung der Grenzfrequenzen

Der Amplitudengang lautet:

$$|H_{TP(j\omega)}| = \frac{|V_0|}{\sqrt{(1 - b_1 \cdot \omega^2)^2 + a_1^2 \cdot \omega^2}} \quad (7)$$

Mit der Definition $H_{TP(j\omega_g)} = |H_{TP(j\omega)}|_{max} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}}$ und $V_0 = 1$ (Tabelle 1) kann über einen Koeffizientenvergleich die Grenzfrequenz bestimmt werden.

$$2 = (1 - b_1 \cdot \omega^2)^2 + a_1^2 \cdot \omega^2 \quad (8)$$

$$0 = b_1^2 \cdot \omega^4 - (2 \cdot b_1 - a_1^2) \cdot \omega^2 - 1 \quad \text{substituiert } \omega^2 = x \quad (9)$$

$$0 = x^2 - \frac{2 \cdot b_1 - a_1^2}{b_1^2} \cdot x - \frac{1}{b_1^2} \quad (10)$$

Bestimmen der Möglichen Frequenzen:

$$x_{1,2} = -\frac{p}{2} \pm \sqrt{\frac{p^2}{2} - q} \quad (11)$$

$$w_{g1} = +\sqrt{x1} \quad (12)$$

$$w_{g2} = -\sqrt{x1} \quad (13)$$

$$w_{g3} = +\sqrt{x1} \quad (14)$$

$$w_{g4} = -\sqrt{x2} \quad (15)$$

$TP_{Filtercharakteristik}$	Grundverstärkung V_0	Grenzfrequenz f_g
Butterworth	1	1,5726 kHz
Tschebyscheff	1	1,5777 kHz
Bessel	1	1,585 kHz

Tabelle 1: Tiefpassfilter - Grundverstärkung V_0 , Grenzfrequenz f_g

Bodeplot der TP-Filter Butterworth, Tschebyscheff und Bessel.

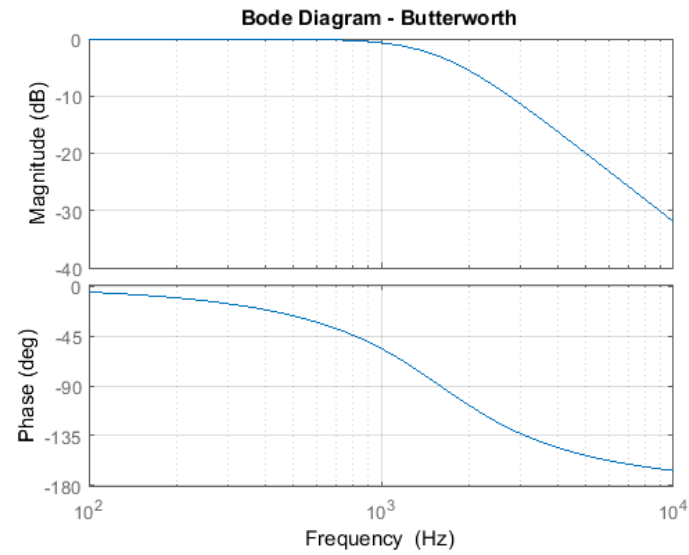


Abbildung 1

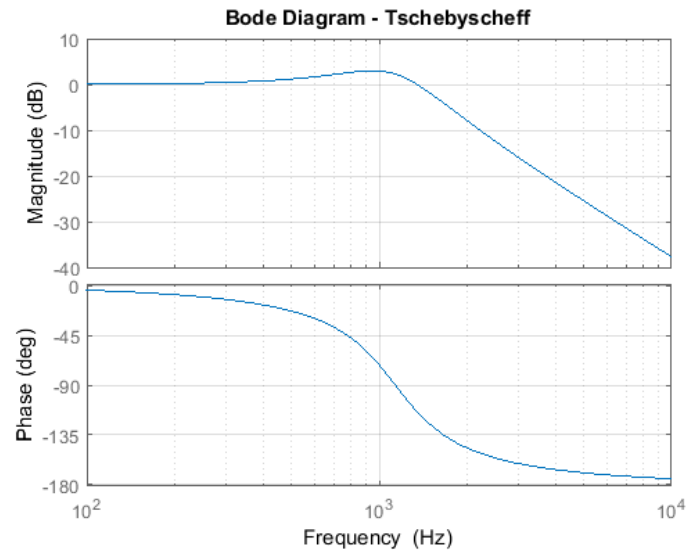


Abbildung 2

1.1.2 Hochpassfilter

In der Versuchsbeschreibung [?] Kapitel 7: Gleichungen zum Universal-Filter wird die Übertragungsfunktion H_{HP} angegeben mit.

$$H_{HP}(j\omega) = \frac{U_{HP}}{U_e} = \frac{R_b \cdot R_d}{R_a \cdot R_c} \cdot \frac{\frac{R_f}{R_d} \cdot (j\omega\tau)^2}{1 + \frac{R_b \cdot R_f}{R_c \cdot R_e} \cdot (j\omega\tau) + \frac{R_f}{R_d} \cdot (j\omega\tau)^2} \quad \text{mit } \tau = R \cdot C \quad (16)$$

Durch die Wahl von $R_b = R_c = R_d = R_0$ vereinfacht sich die Gleichung zu:

$$H_{HP}(j\omega) = \frac{R_0}{R_a} \cdot \frac{\frac{R_f}{R_d} \cdot (j\omega\tau)^2}{1 + \frac{R_f \cdot R_0}{R_0 \cdot R_e} \cdot (j\omega\tau) + \frac{R_f}{R_0} \cdot (j\omega\tau)^2} \quad (17)$$

Aus der Allgemeinen Gleichung eines Hochpassfilter 2. Ordnung können so die Parameter a_1, b_1 und V_0 zugewiesen werden. V_∞ ist die maximale Verstärkung bei $\omega \rightarrow \infty$.

$$V_\infty \cdot \frac{\frac{1}{b_1} \cdot (j\omega)^2}{1 + \frac{a_1}{b_1} \cdot j\omega + \frac{1}{b_1} \cdot (j\omega)^2} = \frac{R_0}{R_a} \cdot \frac{\frac{R_f}{R_0} \cdot (j\omega\tau)^2}{1 + \frac{R_f \cdot R_0}{R_0 \cdot R_e} \cdot (j\omega\tau) + \frac{R_0}{R_d} \cdot (j\omega\tau)^2} \quad (18)$$

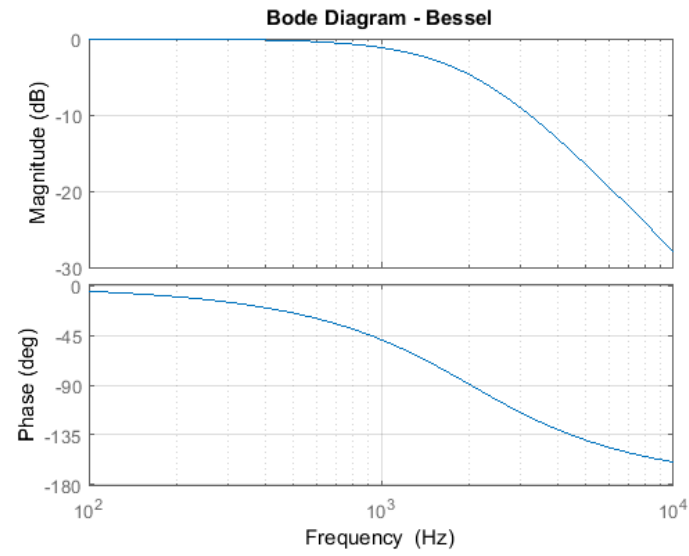


Abbildung 3

$$V_{\infty} = \frac{R_0}{R_a} \quad (19)$$

$$b_1 = \frac{R_0}{R_f} \cdot \frac{1}{\tau^2} \quad (20)$$

$$\frac{a_1}{b_1} = \frac{R_f \cdot R_0}{R_0 \cdot R_e} \cdot \tau \quad (21)$$

$$a_1 = \frac{R_f \cdot R_0}{R_0 \cdot R_e} \cdot \tau \cdot b_1 \quad (22)$$

$$\Rightarrow \frac{R_f \cdot R_0}{R_0 \cdot R_e} \cdot \tau \cdot \frac{R_0}{R_f} \cdot \frac{1}{\tau^2} \quad (23)$$

$$\Rightarrow \frac{R_0}{R_e} \cdot \frac{1}{\tau} \quad (24)$$

Allgemeine Formel zur Bestimmung der Grenzfrequenzen

Der Amplitudengang lautet:

$$|H_{HP(j\omega)}| = \frac{|V_\infty| \cdot \left(\frac{1}{b_1}\right) \cdot \omega^2}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{1}{b_1}\right) \cdot \omega^2\right)^2 + \left(\frac{a_1}{b_1}\right) \cdot \omega^2}} \quad (25)$$

Mit der Definition $H_{HP(j\omega_g)} = |H_{HP(j\omega)}|_{max} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}}$ und $V_\infty = 1$ (Tabelle 1) kann die Gleichung nach ω_g aufgelöst werden.

$$\frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{|V_\infty| \cdot \left(\frac{1}{b_1}\right) \cdot \omega^2}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{1}{b_1}\right) \cdot \omega^2\right)^2 + \left(\frac{a_1}{b_1}\right) \cdot \omega^2}} \quad (26)$$

$$\sqrt{2} \cdot |V_\infty| \cdot \left(\frac{1}{b_1}\right) \cdot \omega^2 = \sqrt{\left(1 - \left(\frac{1}{b_1}\right) \cdot \omega^2\right)^2 + \left(\frac{a_1}{b_1}\right) \cdot \omega^2} \quad (27)$$

$$2 \cdot |V_\infty|^2 \cdot \left(\frac{1}{b_1^2}\right) \cdot \omega^2 = \left(1 - \left(\frac{1}{b_1}\right) \cdot \omega^2\right)^2 + \left(\frac{a_1}{b_1}\right) \cdot \omega^2 \quad (28)$$

$$0 = \left(\frac{1}{b_1^2} - 2 \cdot |V_\infty|^2 \cdot \frac{1}{b_1^2}\right) \cdot \omega^4 + \left(\frac{a_1^2}{b_1^2} - 2 \cdot \frac{1}{b_1}\right) \cdot \omega^2 + 1 \quad (29)$$

$$0 = x^2 + \frac{a_1^2 - 2 \cdot b_1}{1 - 2 \cdot |V_\infty|^2} \cdot x + \frac{b_1^2}{1 - 2 \cdot |V_\infty|^2} \quad (30)$$

Bestimmen der Möglichen Frequenzen:

$$x_{1,2} = -\frac{p}{2} \pm \sqrt{\frac{p^2}{2} - q} \quad (31)$$

$$w_{g1} = +\sqrt{x1} \quad (32)$$

$$w_{g2} = -\sqrt{x1} \quad (33)$$

$$w_{g3} = +\sqrt{x2} \quad (34)$$

$$w_{g4} = -\sqrt{x2} \quad (35)$$

$HP_{Filtercharakteristik}$	Grundverstärkung V_{∞}	Grenzfrequenz f_g
Butterworth	1	1,6107 kHz
Tschebyscheff	1	1,6055 kHz
Bessel	1	1,582 kHz

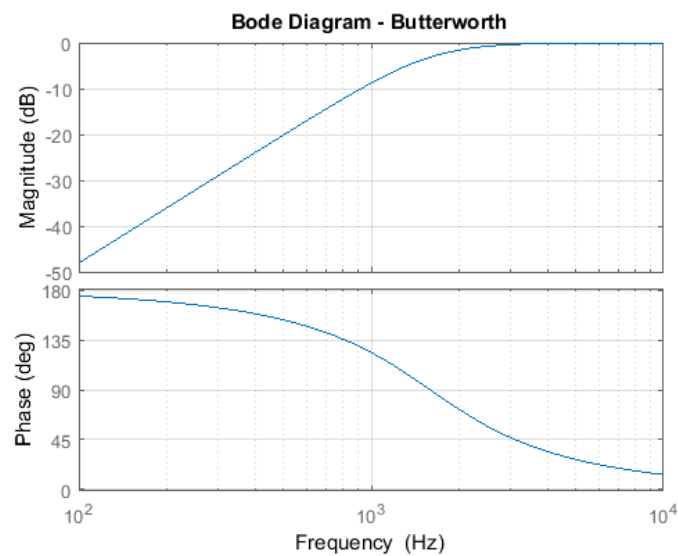
Tabelle 2: Hochpassfilter - Grundverstärkung V_{∞} , Grenzfrequenz f_g **Bodeplot der HP-Filter Butterworth, Tschebyscheff und Bessel.**

Abbildung 4

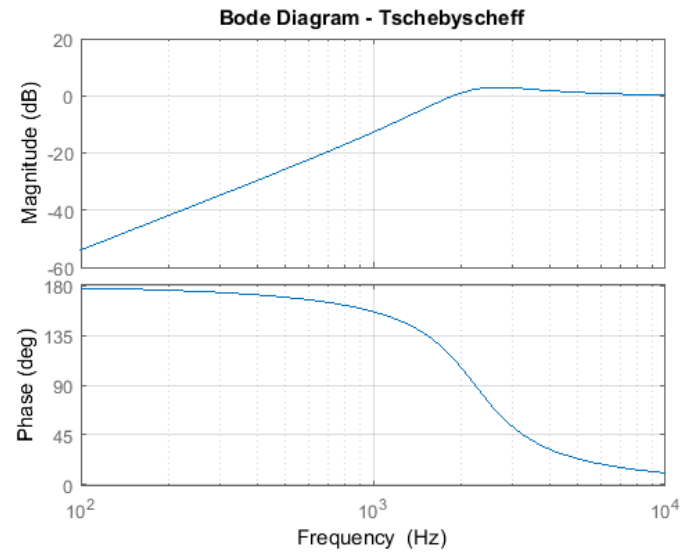


Abbildung 5

1.1.3 Bandpassfilter

Die vereinfachte Formel für den Bandpassfilter hergeleitet vom Universalfilter kann der Allgemeinen Übertragungsfunktion eines Bandpasses gleichgesetzt und so die Parameter bestimmt werden.

$$H_{BP}(j\omega) = V_{max} \cdot \frac{A \cdot j\omega}{1 + A \cdot j\omega + b \cdot (j\omega)^2} \iff -\frac{R_0}{R_a} \cdot \frac{\frac{R_0}{R_c} \cdot (j\omega\tau)}{1 + \frac{R_0}{R_c} \cdot (j\omega\tau) + (j\omega\tau)^2} \quad (36)$$

Dadurch ergeben sich die nachfolgenden Parameter:

$$A = \frac{R_0}{R_c} \quad (37)$$

$$b = \tau^2 \quad (38)$$

$$V_{max} = -\frac{R_0}{R_a} \quad (39)$$

Das Maximum des Bandpassfilter wird erreicht wenn der Imaginärteil des Nenner $= 0$ ist. Somit entspricht V_{max} dem erreichbaren Maximum. An diesem Punkt befindet sich die Mittenfrequenz f_0 .

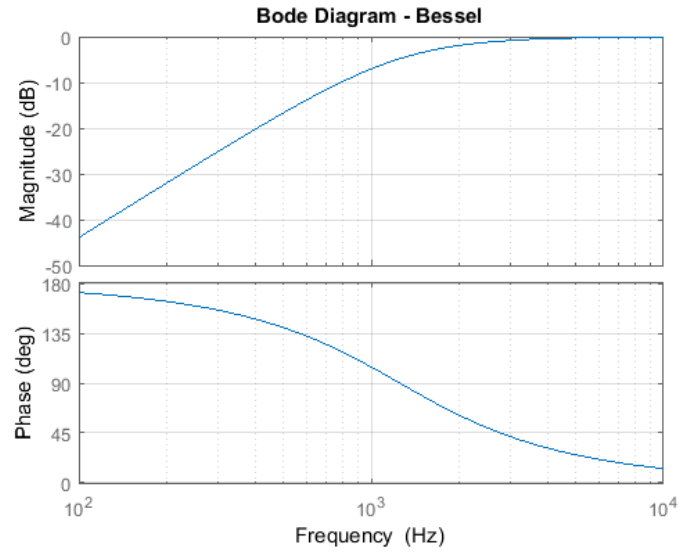


Abbildung 6

$$H_{BP}(j\omega) = V_{max} \cdot \frac{1}{\frac{1}{j\omega \cdot A} + 1 + \frac{j\omega \cdot b}{A}} \quad (40)$$

$$\Rightarrow V_{max} \cdot \frac{1}{1 + j \left(\frac{b}{A} \cdot \omega - \frac{1}{A \cdot \omega} \right)} \quad (41)$$

$$0 = \frac{b}{A} \cdot \omega - \frac{1}{A \cdot \omega} \quad (42)$$

$$\frac{1}{A \cdot \omega} = \frac{b}{A} \cdot \omega \quad (43)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{b}} \quad (44)$$

$$f_0 = \frac{1}{\tau} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} = 1,592 kHz \quad (45)$$

$$V_{f_0} = 1 \quad (46)$$

Die zwei zu berechnenden Grenzfrequenzen können nach der Definition $H_{BP}(j\omega_g) = |H_{BP}(j\omega)|_{max} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}}$ berechnet werden.

$$\frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{V_{max} \cdot A \cdot \omega}{\sqrt{(1 - b \cdot \omega^2)^2 + A^2 \cdot \omega^2}} \quad (47)$$

$$0 = x^2 + \frac{A^2 - 2 \cdot b - 2 \cdot A^2 \cdot V_{max}}{b^2} \cdot x + \frac{1}{b^2} \quad (48)$$

Bestimmen der Möglichen Frequenzen:

$$x_{1,2} = -\frac{p}{2} \pm \sqrt{\frac{p^2}{2} - q} \quad (49)$$

$$w_{g1} = +\sqrt{x1} \quad (50)$$

$$w_{g2} = -\sqrt{x1} \quad (51)$$

$$w_{g3} = +\sqrt{x1} \quad (52)$$

$$w_{g4} = -\sqrt{x2} \quad (53)$$

$$f_{gu} = 1,4395kHz \quad (54)$$

$$f_{go} = 1,7597kHz \quad (55)$$

$$B = f_{go} - f_{gu} = 320,2Hz \quad (56)$$

1.1.4 Bandsperre

Werte müssen noch berechnet werden und stammen aus der PSPice simulation.

$$f_0 = 1,5922kHz \quad (57)$$

$$f_{go} = 1,76014kHz \quad (58)$$

$$f_{gu} = 1,43911kHz \quad (59)$$

$$B = 321Hz \quad (60)$$

$$V_{0,\infty} = 1 \quad (61)$$

2 Messungen

2.1 Verwendete Geräte

2.2 Messung von Amplituden- und Phasengang der Filterschaltungen

In diesem Versuch geht es darum, die Amplituden und Phasengänge der Butterworth-, Tschebyscheff- und Bessel-Tiefpässe und die Amplitudengänge der Butterworth-, Tschebyscheff- und Bessel-Hochpässe sowie des Bandpasses und der Bandsperre mittels dem Audio-Analyzer UVP zu messen. Die folgende Tabelle zeigt unsere gemessenen Grenzfrequenzen der Tiefpässe/Hochpässe. Die Graphen sind im Anhang zu finden.

	<i>Butterworth</i>	<i>Tschebyscheff</i>	<i>Bessel</i>
<i>Tiefpass</i>	1.538kHz	1.557kHz	1.551kHz
<i>Hochpass</i>	1.596kHz	1.592kHz	1.610kHz

Tabelle 3: Gemessenen Grenzfrequenzen der verschiedenen Tiefpässe/Hochpässe

Anschließend ging es darum, die Phasengänge der oben genannten Filtertypen für den Tiefpass zu messen. Die Frequenzen bei einer Phasenverschiebung von -60° und -120° wurden bestimmt und in die folgende Tabelle eingetragen. Auch diese Graphen sind im Anhang zu finden.

	<i>Butterworth</i>	<i>Tschebyscheff</i>	<i>Bessel</i>
-60°	1.046kHz	898.250kHz	1.229kHz
-120°	2.381kHz	1.400kHz	3.225kHz

Tabelle 4: Frequenzen bei einer Phasenverschiebung von -60° und -120°

Schließlich wurden die Mittenfrequenz und Sperrfrequenz des Bandpasses sowie der Bandsperre gemessen. Ergebnisse sind der folgenden Tabelle zu entnehmen. Für die Graphen siehe Anhang.

	<i>Mittenfrequenz</i>	<i>Sperrfrequenz</i>
<i>Bandpass</i>	1.556kHz	/
<i>Bandsperre</i>	/	1.568kHz

Tabelle 5: Mittenfrequenz und Sperrfrequenz des Bandpasses sowie der Bandsperre

2.3 Sprungantworten der Tiefpässe

In diesem Versuch geht darum, die Anstiegszeit, Überschwingen und die Einstiegszeit der drei Tiefpässe nach Butterworth, Tschebyscheff und Bessel aus der Sprungantwort zu bestimmen. Die Filter wurde mit einem Rechtecksignal ($500mV_{pp}$ und $250mv$ Offset und variabler Frequenz) angesteuert. Eingangs- und Ausgangssignal wurden in einem gemeinsamen Oszillogramm dargestellt.

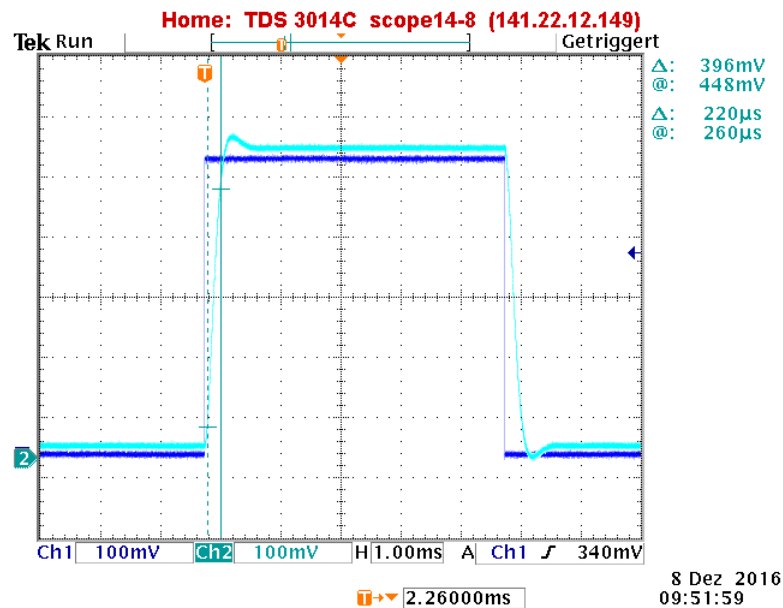


Abbildung 7: Sprungantwort Butterworth-Tiefpass

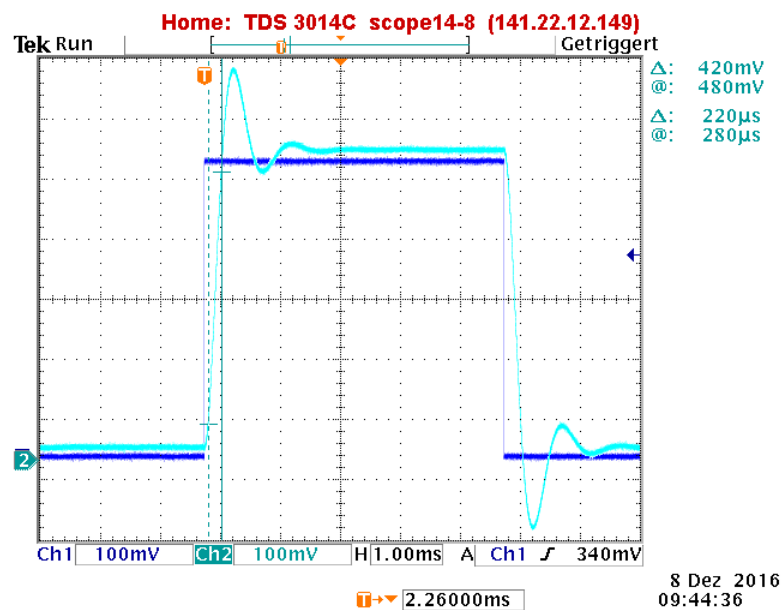


Abbildung 8: Sprungantwort Tschebyscheff-Tiefpass

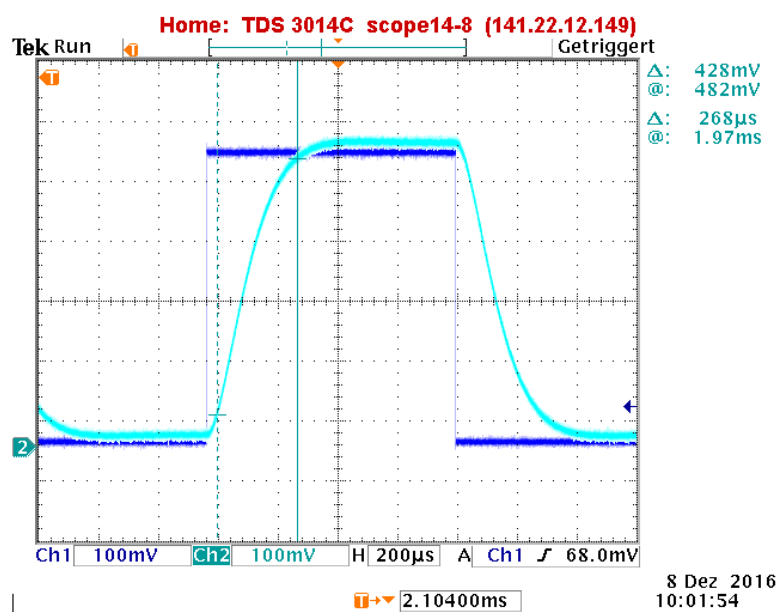


Abbildung 9: Sprungantwort Bessel-Tiefpass

3 Auswertung

3.1 Zu: Messung von Amplituden- und Phasengang der Filterschaltungen

Alle Messwerte und Grenzfrequenzen wurden zusammen mit den vorausberechneten Werten in einer Tabelle dargestellt.

	<i>Tiefpass</i>	<i>Hochpass</i>
<i>Butterworth_{errech.}</i>	1.573kHz	1.611kHz
<i>Butterworth_{gemes.}</i>	1.538kHz	1.596kHz
<i>Tschebyscheff_{errech.}</i>	1.578kHz	1.606kHz
<i>Tschebyscheff_{gemes.}</i>	1.557kHz	1.592kHz
<i>Bessel_{errech.}</i>	1.585kHz	1.582kHz
<i>Bessel_{gemes.}</i>	1.551kHz	1.610kHz

Tabelle 6: Vergleich: gemessenen und vorausbestimmte Grenzfrequenzen der verschiedenen Tiefpässe/Hochpässe

	<i>Mittelfrequ._{errech.}/Mittelfrequ._{gemes.}</i>	<i>Sperrfrequ._{errech.}/Sperrfrequ._{gemes.}</i>
<i>Bandpass</i>	1.556kHz/1.591kHz	/
<i>Bandsperr</i>	/	1.568kHz/1.592kHz

Tabelle 7: Gegenüberstellung: gemessene und vorausbestimmte Mittenfrequenz und Sperrfrequenz des Bandpasses sowie der Bandsperr

	-60°	-120°
<i>Butterworth_{errechnet}</i>	...	...
<i>Butterworth_{gemessen}</i>	1.046kHz	2.381kHz
<i>Tschebyscheff_{errechnet}</i>	...	...
<i>Tschebyscheff_{gemessen}</i>	898.250kHz	1.400kHz
<i>Bessel_{errechnet}</i>	...	...
<i>Bessel_{gemessen}</i>	1.229kHz	3.225kHz

Tabelle 8: Gegenüberstellung: gemessene und vorausbestimmte Frequenzen bei einer Phasenverschiebung von -60° und -120°

3.2 Zu: Sprungantworten der Tiefpässe

Die Anstiegszeit, das Überspringen sowie die Einschwingzeit der drei Tiefpässe wurden gemeinsam in einer Tabelle zusammengefasst und verglichen.

	<i>Anstiegszeit</i>	<i>Überspringen</i>	<i>Einschwingzeit</i>
<i>Butterworth</i>	$220\mu s$	4.86%	$320\mu s$
<i>Tschebyscheff</i>	$220\mu s$	27.24%	$1.06ms$
<i>Bessel</i>	$268\mu s$	0%	$308\mu s$

Tabelle 9: Anstiegszeit, Überspringen und Einschwingzeit der drei Tiefpässe

Die Werte wurden den Oszillogrammen entnommen. Diese sind im Anhang zu finden.

4 Anhang

4.1 Amplitudengänge

4.1.1 Tiefpässe

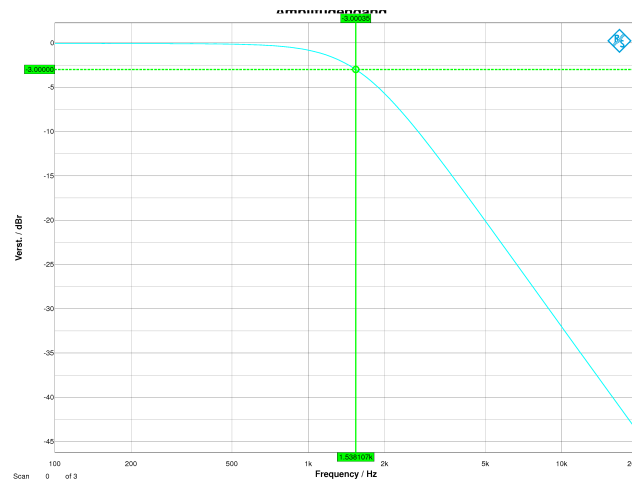


Abbildung 10: Amplitudengang Butterworth-Tiefpass mit Marker

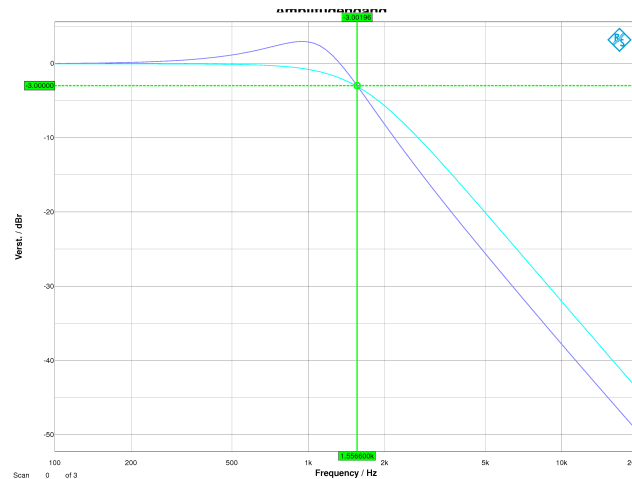


Abbildung 11: Amplitudengang Butterworth- und Tschebyscheff-Tiefpass mit Marker bei Tschebyscheff

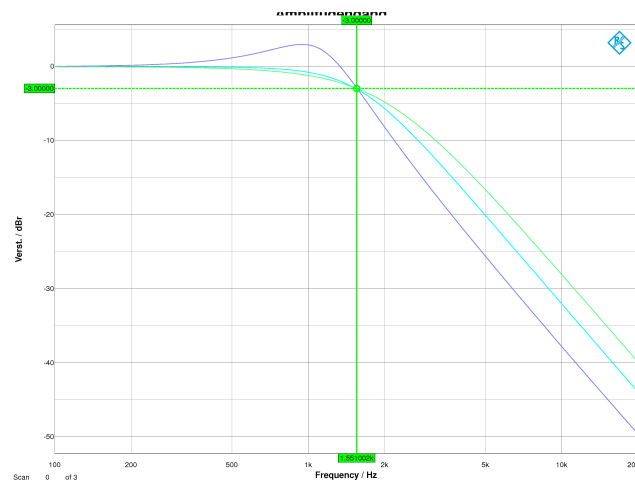


Abbildung 12: Amplitudengang Butterworth-, Tschebyscheff- und Bessel-Tiefpass mit Marker bei Bessel

4.1.2 Hochpässe

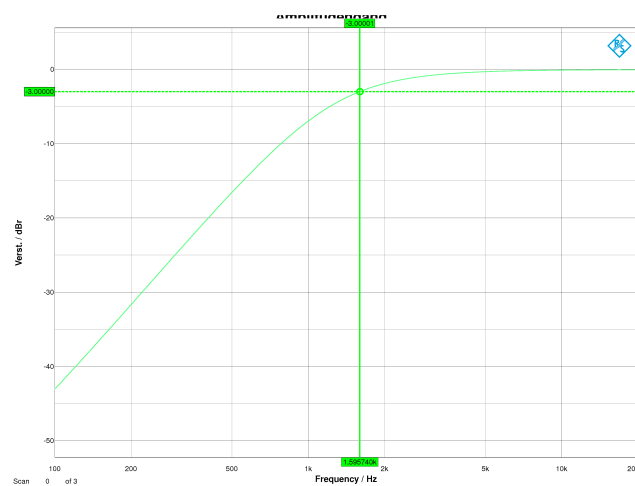


Abbildung 13: Amplitudengang Butterworth-Hochpass mit Marker

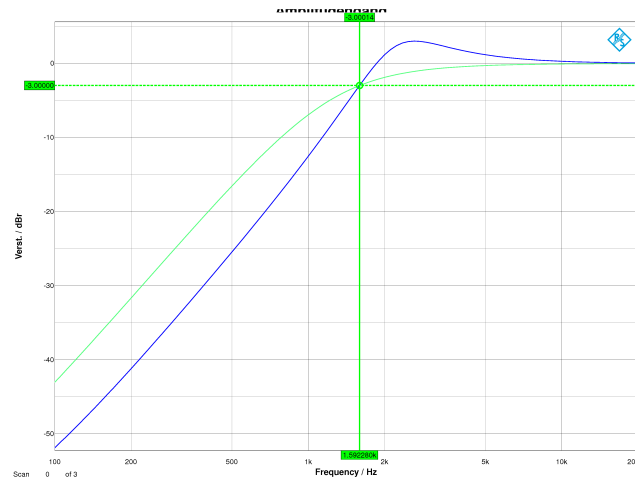


Abbildung 14: Amplitudengang Butterworth- und Tschebyscheff-Hochpass mit Marker bei Tschebyscheff

4.1.3 Bandpass/Bandsperre

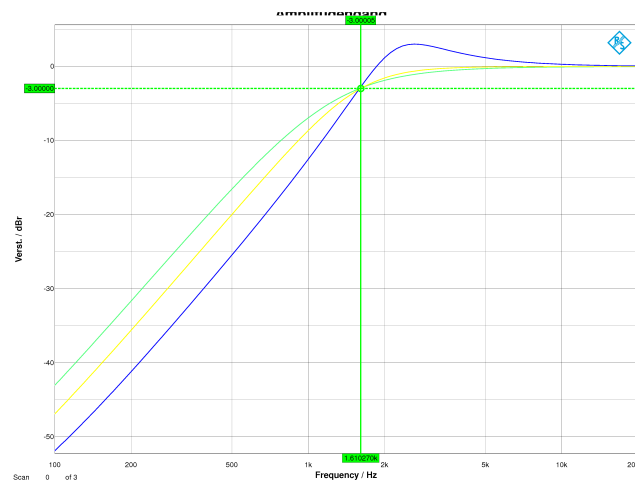


Abbildung 15: Amplitudengang Butterworth-, Tschebyscheff- und Bessel-Hochpass mit Marker bei Bessel

4.2 Phasengänge Tiefpässe

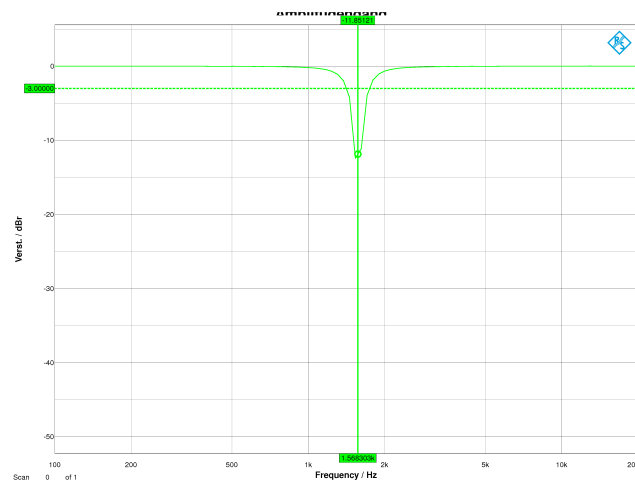


Abbildung 16: Amplitudengang Bandsperre mit Marker

4.3 Sprungantworten der Tiefpässe

4.3.1 Butterworth

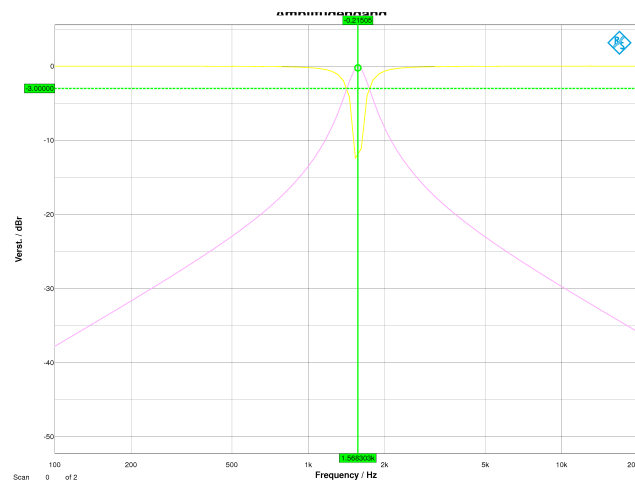


Abbildung 17: Amplitudengang Bandsperre und Bandpass mit Maker beim Bandpass

4.3.2 Tschebyscheff

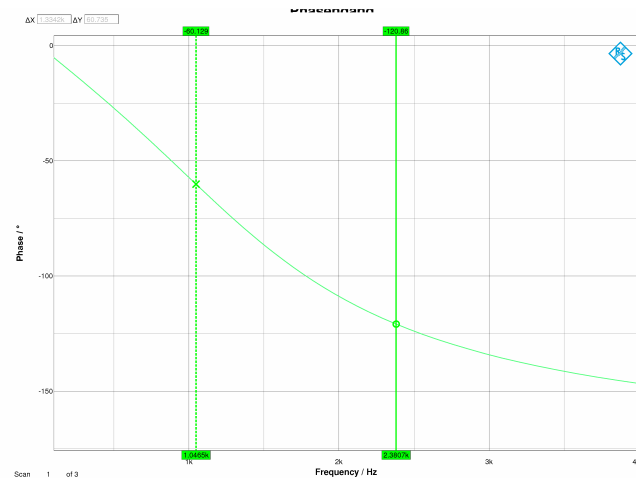


Abbildung 18: Phasengang Butterworth-Tiefpass mit Markern

4.3.3 Bessel

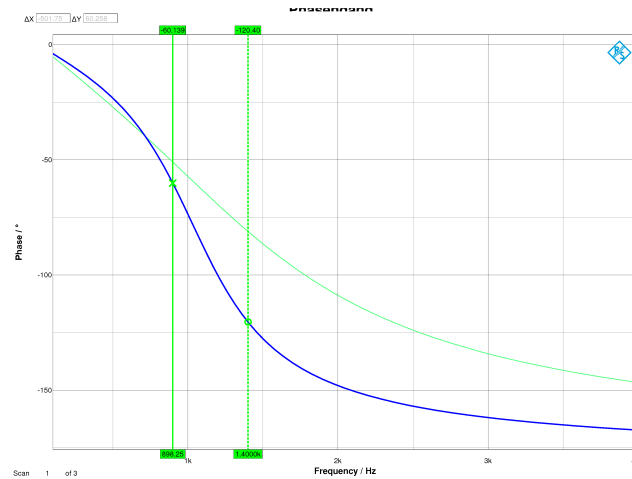


Abbildung 19: Phasengang Butterworth- und Tschebyscheff-Tiefpass mit Markern bei Tschebyscheff

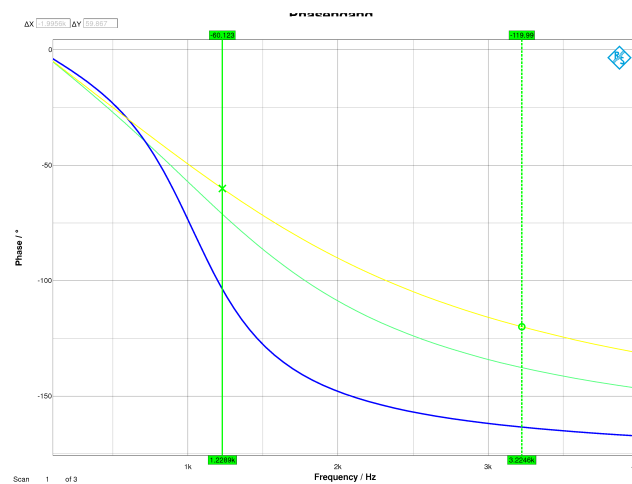


Abbildung 20: Phasengang Butterworth-, Tschebyscheff- und Bessel-Tiefpass mit Markern bei Bessel

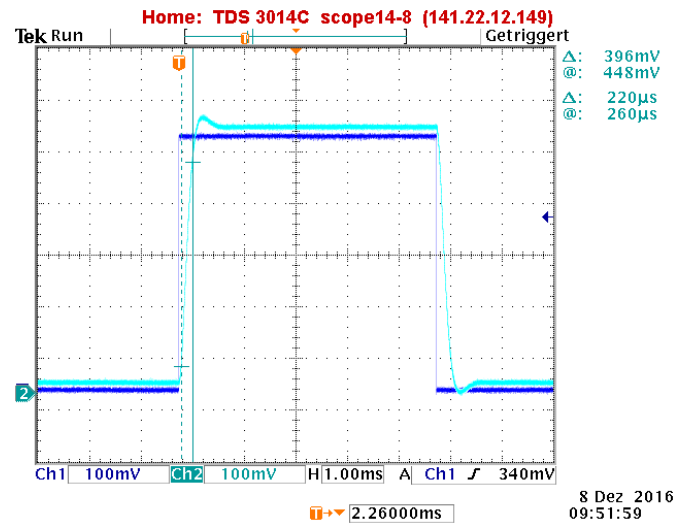


Abbildung 21: Sprungantwort Butterworth: Messung der Anstiegszeit

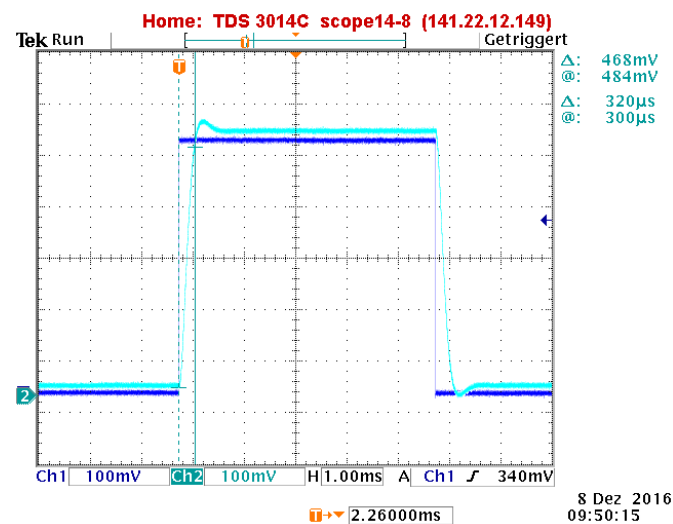


Abbildung 22: Sprungantwort Butterworth: Messung der Einschwingzeit

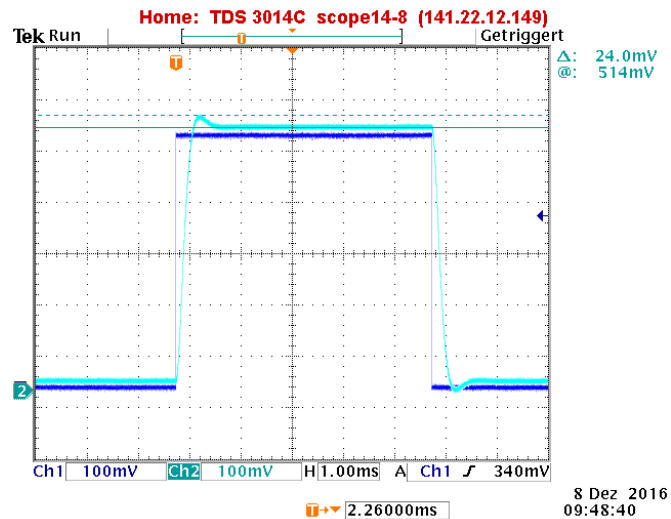


Abbildung 23: Sprungantwort Butterworth: Messung des Überschingers

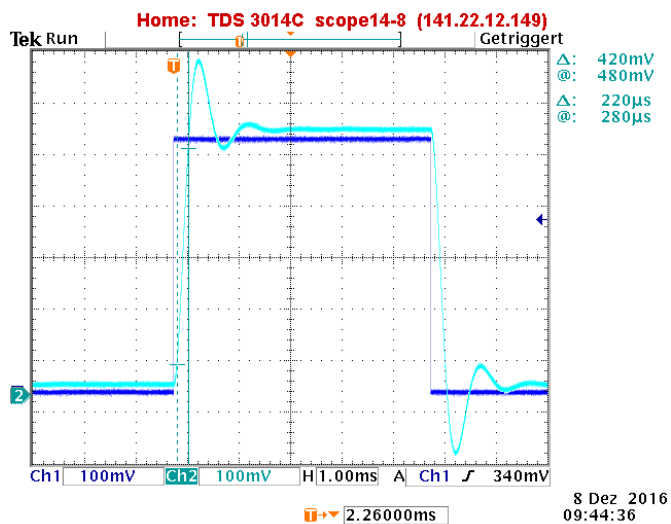


Abbildung 24: Sprungantwort Tschebyscheff: Messung der Anstiegszeit

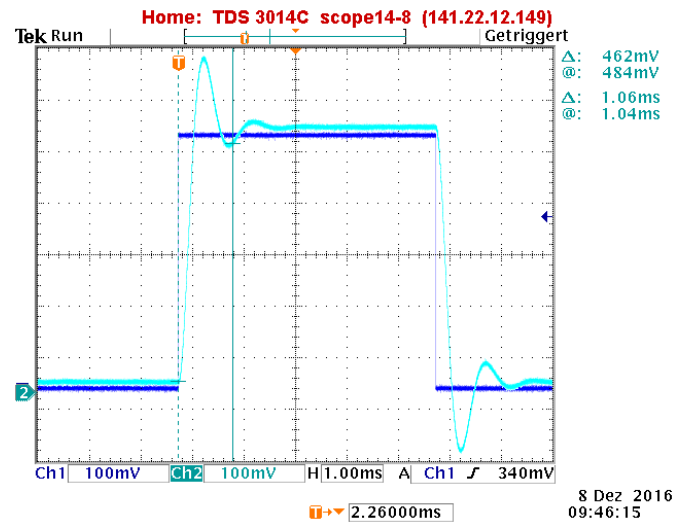


Abbildung 25: Sprungantwort Tschebyscheff: Messung der Einschwingzeit

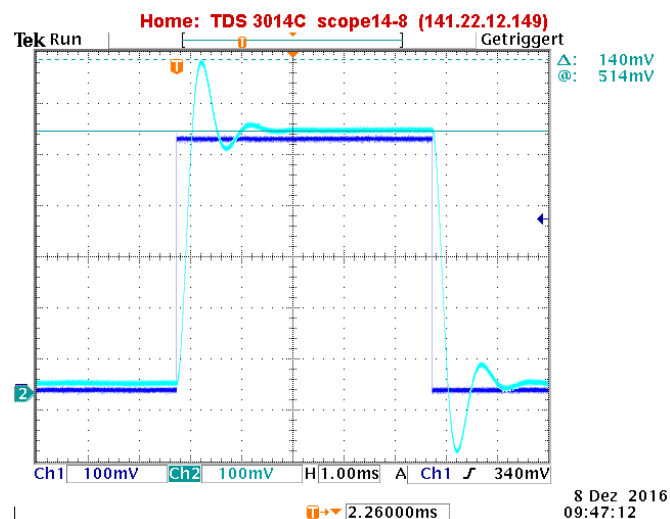


Abbildung 26: Sprungantwort Tschebyscheff: Messung des Überschingers

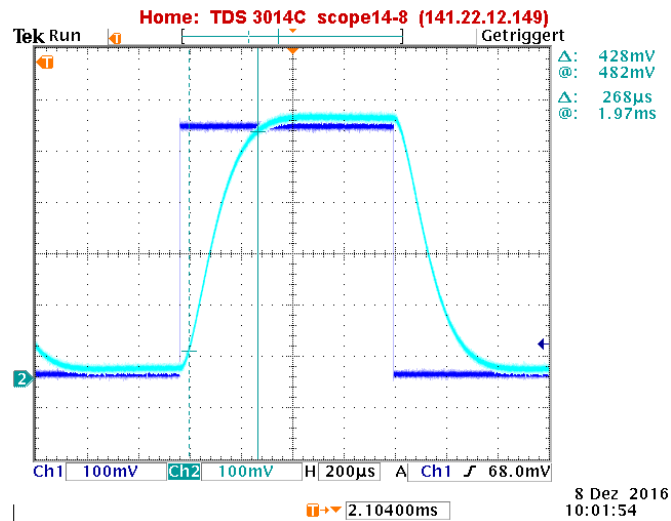


Abbildung 27: Sprungantwort Bessel: Messung der Anstiegszeit

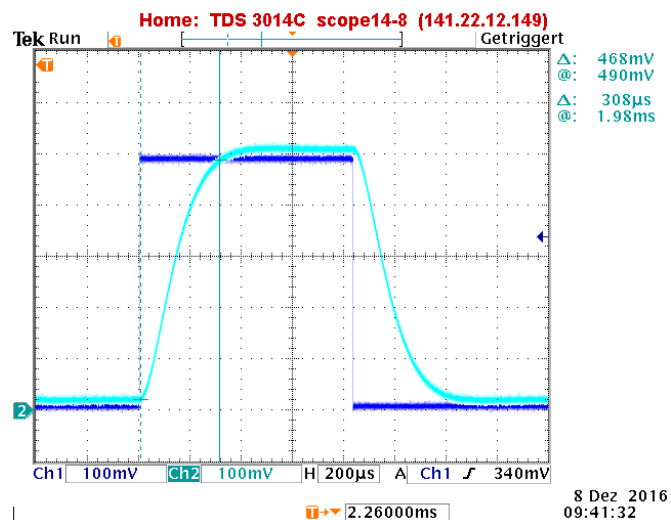


Abbildung 28: Sprungantwort Bessel: Messung der Einschwingzeit

Literatur