



Praktische Studienarbeit Mess- und Testsysteme

Thema: Frequenzgang von passiven R-C Netzwerken

**Frank Kleinert
Thomas Flugs**

fkleinert@uni.de
flugser@t-online.de

**Fachhochschule Schmalkalden
Fachbereich Informatik
98574 Schmalkalden**

Kurzfassung: Dieses Dokument beinhaltet die Beschreibung unserer Studienarbeit

Schmalkalden
Februar 2004-02-22

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	3
2. Beschreibung der Applikation.....	3
2.1 Grafischer Compiler.....	3
2.2 Aufbau und Bedienung.....	4
2.3 Auszug aus dem Quelltext der Applikation	5
3. Frequenzgang von passiven R-C Netzwerken	8
3.1 Frequenzgang von passiven R-C Netzwerken mit Hochpassfilter.....	9
3.2 Frequenzgang von passiven R-C Netzwerken mit Tiefpassfilter.....	10
4 Dokumentation der Ergebnisse	11
4.1 Messungen ohne R-C Netzwerk.....	12
4.2 Messungen mit dem R-C Hochpassfilter	14
4.2.1 Einfacher Hochpass.....	14
4.2.2 Doppelter Hochpass	16
4.2.3. Auswertung	18
4.3 Messungen mit dem R-C Tiefpassfilter	19
4.3.1 Einfacher Tiefpass.....	19
4.3.2 Doppelter Tiefpass	21
4.3.3 Auswertung	23

Beschreibung zur praktischen Studienarbeit

1. Einleitung

Mit dieser Studienarbeit konnten wir das theoretische Verständnis der Vorlesung „Mess- und Testsysteme“ an einem praktische Beispiel anwenden. Nachdem schon in den vergangenen Semestern und im privaten Umfeld Erfahrungen im Umgang mit Hardware und deren Programmierung gemacht werden konnten sind wir mit gespannten Erwartungen an die Lösung der Aufgabe „Frequenzgang von passiven R-C Netzwerken“ getreten.

Gänzlich neu war für uns der Umgang mit dem Programmentwicklungssystem „LabWindows/CVI“ der Firma National Instruments. Auf ähnlichem Gebiet wurden unsererseits bisher nur Programmierumgebungen auf Assemblerbasis eingesetzt. Durch die Unterstützung des grafischen Compilers und der Programmierung in der Hochsprache ANSI C konnten Aspekte des Software Engineering besser berücksichtigt werden. Als Betriebssystem diente Windows XP, installiert auf einem PC mit durchschnittlicher Konfiguration und Leistungsvermögen. Zusätzlich beinhaltete dieser PC eine IEEE-488-Interface Karte mit installiertem Treiberpaket (National Instruments). Zur Verfügung standen die folgenden Geräte:

Controller:

- PC mit IEEE-488-Interfand Karte

Stimulator:

- Funktionsgenerator HP 33120 A

Indikator:

- Digitalmultimeter HP 34401 A
- Digitaloszilloskop HP 54600 A

2. Beschreibung der Applikation

2.1 Grafischer Compiler

Das Programmentwicklungssystem „LabWindows/CVI“ Version 5.0 der Firma National Instruments bietet hervorragende Unterstützung bei der grafischen Implementierung. Bei der geforderten Anwendung konnten die grafischen Module des Entwicklungssystems genutzt werden. So ließen sich die Formulare mit den Panels, Buttons, Ein- und Ausgabefeldern, Beschriftungen usw. recht einfach realisieren. Die so entstandene grafische Oberfläche stellt die Schnittstelle zum Benutzer dar. Dabei hängt die Akzeptanz der Applikation vom Benutzer im hohen Maße von der Gestaltung der Grafischen Oberfläche dieser Anwendung ab. Deshalb wurde hierbei besonderen Wert auf leichte Bedienbarkeit, Vertrautheit etc. gelegt, wobei Primär stets die Funktionalität und deren Visualisierung im Vordergrund standen. Der interne Quellcode Editor unterstützte wesentlich das Vorgehen mit Syntaxhervorhebung, vollständigem Compiler, Debugger und weiteren Werkzeugen mit ihren vielfältigen Eigenschaften, so dass der Entwurf in ANSI C Ingenieurmäßig erfolgen konnte. Ein Highlight stellt der interne Source-Code-Generator dar, der nach Entwurf der grafischen Oberfläche den Quellcode dazu erzeugt und damit schon mal den Rahmen für die Implementierung liefert. Bemerkenswert sind auch die umfangreichen Funktionsbibliotheken, die angefangen bei der Einbindung der Geräte über deren Interaktion bis zu der Datenrepräsentation der Ergebnisse alle wünschenswerten Funktionalitäten zur Verfügung stellen.

Ein weiterer Vorteil des Entwicklungssystems ist die Systemoffenheit. So lagen zu allen hier verwendeten Instrumenten die entsprechenden Treiber bei. Bei diesen Geräten handelt es sich um Traditionelle-, also nicht um Virtuelle Instrumente. Außer beim Digitaloszilloskop wären Virtuelle Instrumente ebenso bzw. besser geeignet gewesen, da die Steuerung ausschließlich vom PC (Controller) erfolgt und Einstellungen an den Gerätefrontplatten nicht notwendig sind. Zu Demonstrationszwecken lassen sich parallel zu der grafischen Ausgabe auf dem Diagramm der Anwendung die Werte an allen Gerätefrontplatten ablesen. Dies wurde beim Digitaloszilloskop von vornherein gefordert und auch umgesetzt.

Aufgrund der umfassenden Geräteunterstützung konnten diese Instrumente über den integrierten Weg der Entwicklungsumgebung eingebunden und angesprochen werden. Dazu musste nicht der Weg über Busnachrichten (IEEE-488.1, IEE-488.2, SCPI) gegangen werden, der dank Standardisierung ebenfalls möglich gewesen wäre. Aufgrund des Aufsetzens der internen Bibliotheken auf diese vorangegangenen Standards und die optimale Integration in die Entwicklungsumgebung führt dies zu dem Vorteil einer einfacheren Handhabung der Geräte und damit letztendlich zum Entschluss für diesen Weg.

2.2 Aufbau und Bedienung

Das Hauptaugenmerk der grafischen Ausgabe, das Spannungs- Frequenz Diagramm, erscheint unverkennbar in zentraler Lage und lenkt damit sofort den Blick des Anwenders auf sich. Damit ist das primäre Ziel in anschaulicher und repräsentativer Form unverkennbar im Vordergrund der Applikation. Die Spannungsskala mit ihren Unterteilungen in 1 V Schritten ist fest auf den vorgegebenen Richtwert von 10 V eingestellt. Hiermit wird die stets selbige Lage der Spannungsunterteilungen bei allen Messungen erzielt; eine wichtige Grundlage bei der effektiven Vergleichsdurchführung mehrerer Frequenzgangkurven. Die Grenzfrequenz befindet sich bei ca. 7.07 V und ist mit dieser mittleren Lage der Frequenzgangkurve im Diagramm in einem optimalen Sichtfeld des Betrachters. Da die Spannungsmessungen über ein definiertes Frequenzband hinauslaufen unterliegt die Frequenzskala einer dynamischen Anpassung an die Eingabeparameter, das heißt sie passt sich automatisch an die Frequenzwerte an. Diese Eingabefrequenzen mit dem definierten Startwert, Endwert und der konstanten Schrittweite können über die Eingabefelder direkt unter dem Diagramm eingegeben werden. Andererseits ist ein Einladen einer Datei („Frequenzen.txt“) im Verzeichnis der Applikation mit konstanter, dynamischer oder anderer Schrittweite ebenfalls möglich. Diese Datei liegt leserlich im ASCII Format vor und kann nach belieben mit dem zu messenden Frequenzen editiert werden. Eine zusätzliche Funktion bietet das „Publizieren“. Dabei werden die eingespeisten Frequenzen und deren gemessene Spannungswerte am Ausgang des R-C Netzwerkes in einer HTML Seite gesammelt und sofort nach Messende mit dem Browser in Tabellenform ausgegeben. Zu allen durchgeführten Messungen wird eine Datei „Spannungen.txt“ mit den eingespeisten Frequenzen und den dazugehörigen Spannungswerten erstellt. Diese Dateien werden bei weiteren Messungen jeweils mit den aktuellen Daten überschrieben. Auf der rechten Seite der grafischen Oberfläche befindet sich ein Drehregler mit zugehörigem Eingabefeld über die jeweils der Spannungswert am Eingang des R-C Netzwerkes eingestellt werden kann. Er befindet sich per Default auf dem Richtwert von 10 V. Direkt darunter besteht die Möglichkeit per Schiebeschalter das AC-Filter einzustellen. Die Standardeinstellung ist „Automatisch“, wobei je nach angelegter Frequenz die beste Filtereinstellung gewählt wird. Im darunter befindlichen Bereich kann man sich weitere Werte jeder durchgeführten Messung in uneditierbaren Textfeldern betrachten. Dazu gehört das Maximum, Minimum und der Mittelwert in sehr präziser Form. Mit dem rechts platzierten Schieberegler kann Einfluss auf die Präzision der Messung und der Ausgabe von Nachkommastellen (Standard= 6), sowohl auf der Bedienoberfläche als auch des Digitalmultimeters, genommen werden. Dabei werden die letzten Stellen gerundet. Bei Beendigung aller Messreihen kann die Applikation mit dem Button „ENDE“ verlassen werden.

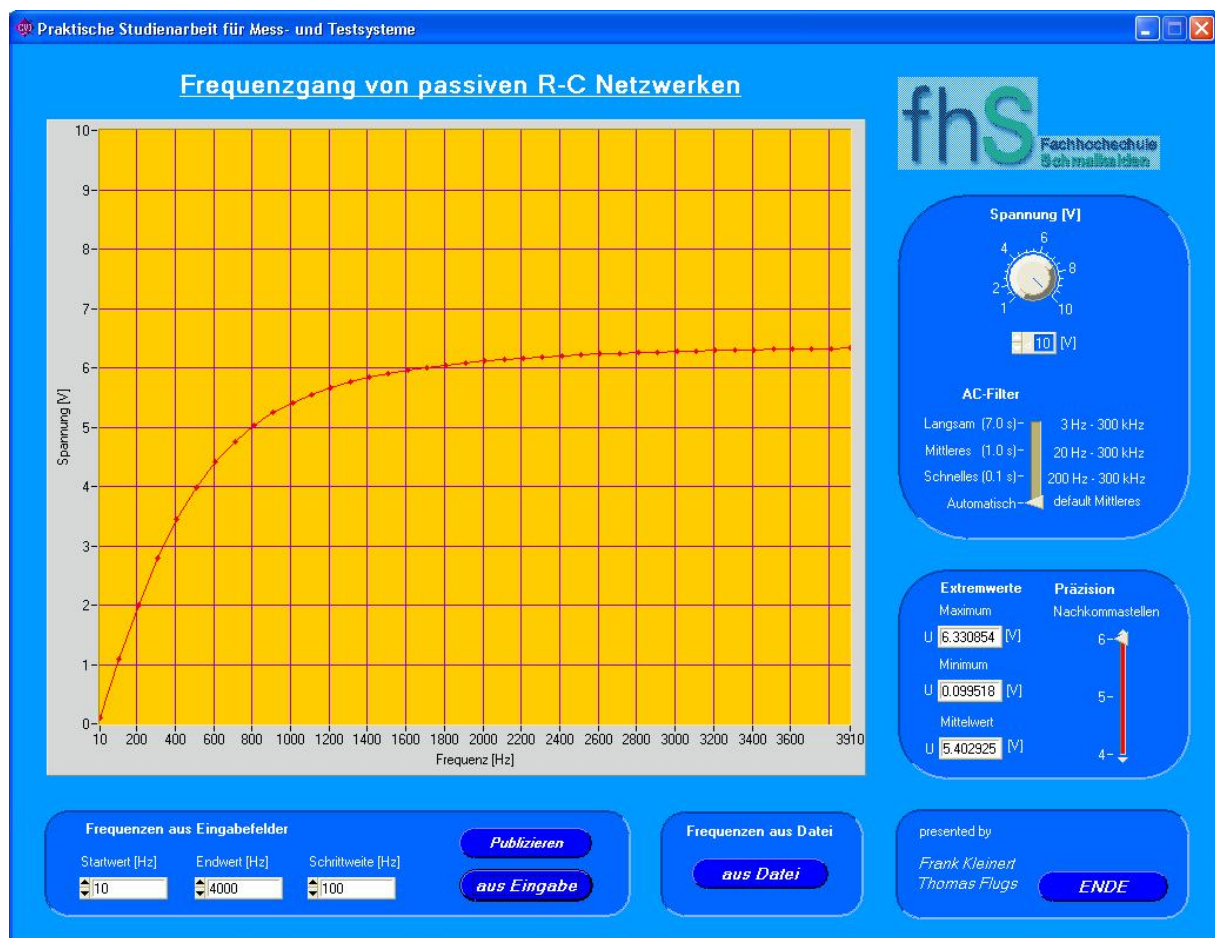


Abbildung: Beispielabbildung eines Hochpass Frequenzganges mit Werten aus den unteren Eingabefeldern

2.3 Auszug aus dem Quelltext der Applikation

Einbindung der Gerätebibliotheken:

```
#include "hp33120a.h"           // Funktionsgenerator (HP 33120 A)
#include "hp546xxb.h"          // Digitaloszilloskop (HP 54600 A)
#include "HP34401A.h"          // Digitalmultimeter (HP 34401 A)
```

Deklaration benutzerdefinierter Methoden zur Modularisierung:

```
int GenerierSpannung (void);           // Führt Messung durch mit Diagrammausgabe
int Extremwerte(double *voltArray, double freqAnzahl); // Berechnung des MIN, MAX und Mittelwertes
int Publizieren(double *freqArray, double *voltArray, double freqAnzahl); // Erzeugen einer HTML Datei
```

Ausgabe des Panels und Abfrage des Spannungsreglers und AC-Filter- sowie Präzisions- Schiebereglers:

```
DisplayPanel (generator);           // Panel ausgeben
GetCtrlVal (generator, GENERATOR_SPANNUNGSCHIEBE, &spannung); // Spannung am Drehschalter
GetCtrlVal (generator, GENERATOR_ACFILTERSCHIEBE, &filter); // AC-Filter am Schiebeschalter
GetCtrlVal (generator, GENERATOR_PRECISIONSCHIEBE, &precision); // Präzision am Schiebeschalter
```

Initialisieren und Konfigurieren der Geräte

Funktionsgenerator:

```
hp33120a_InitWithOptions ("GPIB::7::INSTR", VI_TRUE, VI_TRUE, "Simulate=0,RangeCheck=1,
QueryInstrStatus=1, Cache=1", &handle33120); // Initialisierung mit folgenden Parameter:
// Ressource Name: GPIB Board::PrimaryAdress 7::INSTR
// ID Abfragen
// Gerät zurücksetzen
// weitere Optionen
// Instrumentenhandle
```

Digitaloszilloskop:

```
hp546xxx_init (9, 0, 1, 1, &handle54601); // Initialisierung mit folgenden Parameter:
// GPIB Adresse: ID: 9
// ID Abfrage
// Gerät zurücksetzen
// Instrumenten Modell
// Instrumentenhandle

hp546xxx_conf_trg_sigcond (1, 0.0, 0, 0); // Konfiguration des Triggers
hp546xxx_conf_trg_src (1, 4, 2, 200e-9); // Konfiguration der Triggerquelle

hp546xxx_conf_disp_attr (1, 0, 0, 0, 0, 0); // Konfiguration des Displays
hp546xxx_conf_disp_src (1, 1, 0); // Display löschen (alle Eingänge werden abgeschaltet)

// Meldungstext auf Display ausgeben:
hp546xxx_conf_disp_text (1, 3, 18, "Fachhochschule Schmalkalden");
hp546xxx_conf_disp_text (1, 5, 20, "Fachbereich Informatik");
hp546xxx_conf_disp_text (1, 9, 21, "Mess- und Testsysteme");
hp546xxx_conf_disp_text (1, 11, 20, "Studienarbeit zum Thema");
hp546xxx_conf_disp_text (1, 13, 25, "R-C Netzwerke");
hp546xxx_conf_disp_text (1, 17, 26, "F. Kleinert");
hp546xxx_conf_disp_text (1, 18, 27, "T. Flugs");

// Meldungstext auf unterer Leiste ausgeben:
hp546xxx_conf_disp_msg (1, "> Herzlich willkommen zur MuT-Studienarbeit: R-C Netzwerke! <");
```

Digitalmultimeter:

```

hp34401a_init (2, &handle34401);           // Initialisierung mit folgenden Parameter:
                                           // ID: 2
                                           // Instrumentenhandle

hp34401a_beeper (1, 1, 1);                // Ton erzeugen

hp34401a_conf (1, 0, 1, spannung, 2);     // Konfiguration mit folgenden Parameter:
                                           // ID: 2
                                           // Funktion: 0 - AC, 1 - DC
                                           // Autorange: 0 - On, 1 - Off
                                           // Range: 10 V
                                           // Auflösung: 2 - 6 1/2 digits

hp34401a_conf_trig (1, 0, 1, 0.000001, 1, 1); // Konfiguration des Triggers mit folgenden Parameter:
                                           // ID: 1
                                           // Triggerquelle: 0 - Intern, 1 - Extern, 2 - Software
                                           // Automatische Triggervverzögerung: 0 - Off, 1 - On
                                           // Triggervverzögerung [sec]: 0 - 3600 sec
                                           // Anzahl der Trigger 1 - 50000
                                           // Anzahl der Samples: 1 - 50000

hp34401a_conf_misc (1, 1, filter, 0);     // Konfiguration des AC-Filters mit folgenden Parameter:
                                           // ID: 1
                                           // Autozero: 0 - Off, 1 - On , 2 - Once
                                           // Bandbreitenerkennung (AC-Filter):
                                           //   Eingangsfrequenz [Hz]: 3 - Langsam
                                           //   //                               20 - Mittel (default)
                                           //   //                               200 - Schnell
                                           //   // Auto Impedance: 1 - Enabled, 0 - Disabled

hp34401a_display (1, 1, " Informatik ", 0); // Meldungstext ausgeben

```

Displays Löschen und für Messung vorbereiten:

```

Delay(10);                                // 10 Sekunden warten
hp546xxx_conf_disp_clr (1, 1);            // Oszilloskop Display löschen
hp546xxx_conf_disp_attr (1, 0, 1, 0, 0, 2); // Displayeigenschaften einstellen
hp546xxx_conf_disp_src (1, 1, 1);        // Eingang 1 einschalten
hp546xxx_conf_autoscale (1);             // Oszilloskop Skalierung automatisch
hp34401a_display (1, 1, "", 1);          // Multimeter Display löschen

```

Methodenaufruf durch Betätigung des Buttons „Publizieren“:

```

GenerierSpannung();
Publizieren(freqArray, voltArray, freqAnzahl);
LaunchExecutableEx("Publik.bat", LE_HIDE, 0); // startet Browser mit generierter HTML Datei (Publik.htm)

```

Überprüfung der Eingabewerte und Fehlerbehandlung

```

if(!Startwert || !Endwert || !Schrittweite){
    status= ConfirmPopup ("Warnung!", "Werte groesser 0 eintragen!");
    while (!status) status= ConfirmPopup ("Scherz?", "Warum denn nicht?"); return -1; }

if(Schrittweite >= Endwert){
    status= ConfirmPopup ("Warnung!", "Schrittweite ist zu gross!");
    while (!status) status= ConfirmPopup ("Scherz?", "Na klar zu gross!"); return -1; }

if(Startwert >= Endwert){
    status= ConfirmPopup ("Warnung!", "Startwert ist zu gross!");
    while (!status) status= ConfirmPopup ("Scherz?", "Na klar zu gross!"); return -1;
}

```

Optimierung des AC-Filters bei Wahl von „Automatisch“

```
if(!filter && (freqArray[i] >= 200)){ // Frequenz oberhalb 200 Hz
    hp34401a_conf_misc (1, 1, 200, 0); // Schnelles AC-Filter
} else {
    if(!filter && (freqArray[i] <= 20)){ // Frequenz unterhalb 20 Hz
        hp34401a_conf_misc (1, 1, 3, 0); // Langsames Filter
    } else {
        hp34401a_conf_misc (1, 1, 20, 0); // ansonsten Mittleres Filter
    }
}
```

Durchführung der Messung (in Programmschleife über alle Frequenzen):

```
// Funktionsgenerator: Generierung der Sinusfunktion mit definierter Spannung und definierter Frequenz:
hp33120a_ConfigureStandardWaveform (handle33120, "", HP33120A_VAL_WFM_SINE, spannung, 0.0,
freqArray[i], 0.0);
```

```
// Digitalmultimeter: Messung der Spannung und Speicherung im Array:
hp34401a_single_meas (handle34401, &volt);
voltArray[i]= volt;
```

```
// Aufruf zur Berechnung der Extremwerte:
Extremwerte(voltArray, freqAnzahl);
```

Berechnung der Extremwerte:

```
MaxMinID (voltArray, freqAnzahl, &Umax, &Imax, &Umin, &Imin); // Berechnet MAX / MIN des voltarray's
SumID (voltArray, freqAnzahl, &Usum); // Berechnet Summe des voltarray's
Uavg= Usum / freqAnzahl; // arithmetisches Mittel
```

```
SetCtrlAttribute (generator, GENERATOR_MAXIMUMU, ATTR_PRECISION, precision); // Aktualisierung
SetCtrlAttribute (generator, GENERATOR_MINIMUMU, ATTR_PRECISION, precision); // der Ausgabe-
SetCtrlAttribute (generator, GENERATOR_MITTELWERTU, ATTR_PRECISION, precision); // präzision
```

```
SetCtrlVal (generator, GENERATOR_MAXIMUMU, Umax); // Ausgabe der Extremwerte (GUI)
SetCtrlVal (generator, GENERATOR_MINIMUMU, Umin);
SetCtrlVal (generator, GENERATOR_MITTELWERTU, Uavg);
```

Ausgabe der Messergebnisse auf der grafischen Oberfläche:

```
// Löschen alter Diagramminhalte und Zeichnen des aktuellen Frequenzganges:
DeleteGraphPlot (generator, GENERATOR_DIAGRAM, -1, VAL_IMMEDIATE_DRAW);
PlotXY (generator, GENERATOR_DIAGRAM, freqArray, voltArray, freqAnzahl, VAL_DOUBLE,
VAL_DOUBLE, VAL_CONNECTED_POINTS, VAL_DOTTED_SOLID_DIAMOND, VAL_SOLID,
1, VAL_RED);
// Ausgabe der Extremwerte:
SetCtrlVal (generator, GENERATOR_MAXIMUMU, Umax); // Ausgabe des Spannungs- Maximum
SetCtrlVal (generator, GENERATOR_MINIMUMU, Umin); // Ausgabe des Spannungs- Minimum
SetCtrlVal (generator, GENERATOR_MITTELWERTU, Uavg); // Ausgabe des Spannungs- Mittelwertes
```

Publizieren in HTML Datei:

```
fprintf(fpOut, "%s\n\n", "<html><head></head><body lang=DE bgcolor=#2222AA><h1><font
color=#FFFFFF><center>Frequenzgang von passiven R-C Netzwerken!</center></font></h1>");
fprintf(fpOut, "%s\n", "<center><table border=1 cellpadding=8><tr
bgcolor=#AAAA77><th>Frequenz [Hz]</th><th>Spannung [V]</th></tr><br><br>");
for(i= 0; i < freqAnzahl; i= i+1){
    fprintf(fpOut, "%s%.0f%%s%f%%s\n", "<tr bgcolor=#CCCC99><td>", freqArray[i],
"</td><td>", voltArray[i], "</td></tr>");
}
fprintf(fpOut, "%s", "</table></center><font color=#FFFFFF><h5 align=right>presented by<br>Frank
Kleinert<br>Thomas Flugs</h5></font></body></html>");
```

3. Frequenzgang von passiven R-C Netzwerken

RC-Schaltungen sind besondere Wechselstromkreise und stellen eine Untermenge der Vierpole dar. Vierpole sind gekennzeichnet durch je zwei Anschlussklemmen für die angelegte und abgegriffene Spannung.

In spezieller Ausführung der Vierpole mit Baugruppen, die aus dem Zusammenspiel von Widerständen (R) und Kondensatoren (C) besteht, bezeichnet man diese als RC-Hochpass bzw. RC-Tiefpass. Sie gehören zu den Filtern bzw. Sieben, also Schaltungen mit frequenzgangabhängigen Eingangs- und Ausgangsspannungen. Die Übertragungsfunktion aller Blindwiderstände hängt in charakteristischer Weise von der Frequenz ab, so dass bestimmte Frequenzbereiche gut und andere schlecht übertragen werden.

Grenzfrequenz bei RC-Schaltungen

Als Grenzfrequenz f_g wird diejenige Frequenz bezeichnet, bei der der ohmsche Widerstand (Wirkwiderstand) R genau so groß ist wie der Blindwiderstand X_C :

$$R = X_C$$

setzt man für X_C die entsprechende Formel ein, so erhält man:

$$R = 1 / (2 \cdot \pi \cdot f_g \cdot C)$$

Löst man nun diese Gleichung nach f_g auf, so erhält man die Formel zur Berechnung

der Grenzfrequenz bei einer RC-Schaltung (RC-Hochpass bzw. RC-Tiefpass):

$$f_g = \frac{1}{2 \pi \cdot R \cdot C}$$

Wenn die beiden Widerstände R und X_C gleich groß sind, dann sind demzufolge auch die Spannungen U_R und U_C an diesen Widerständen gleich groß: $U_R = U_C$

Beide Spannungen U_R und U_C liegen an der Eingangsspannung U_1 an. U_R und U_C stehen in einem 90° Winkel zueinander. Daher berechnet sich die Spannung U_1 gemäß:

$$U_1 = \sqrt{U_R^2 + U_C^2}$$

da bei Erreichen der Grenzfrequenz f_g gilt $U_R = U_C = U_2 = U$

kann man die Formel folgendermaßen ändern:

$$U_1 = \sqrt{2 \cdot U^2}$$

Setzt man U^2 vor die Wurzel, so erhält man:

$$U_1 = U_2 \cdot \sqrt{2} = U \cdot 1,414 \dots$$

löst man diese Gleichung nach U auf so erhält man:

$$U_2 = U_1 / \sqrt{2} = U_1 / 1,414 \dots = U_1 \cdot 0,707 \dots$$

Beim Erreichen der Grenzfrequenz f_g beträgt die Ausgangsspannung U_2 70,7% der Eingangsspannung U_1 .

Bspw.: $U_1 = 10$ V Wechselspannung (Sinus): Effektivspannung von $U_1 \approx 7,07$ V folgt: $U_2 \approx 5$ V

Effektivwert bei Messungen mit Multimeter

Die Wechselspannungsfunktion eines Multimeters misst den echten Effektivwert, also den „Heizwert“ der Wechselspannungsanteile der Eingangswellenformen (Gleichspannung wird unterdrückt). Bei Sinuswellen, Dreieckswellen und Rechteckwellen sind die Wechsel- und Gleichspannungswerte gleich, da diese Wellenformen keinen Gleichspannungsoffset beinhalten.

Da sich Scheitel- und Effektivwert nur um den konstanten Faktor $1 / \sqrt{2} = \sqrt{2} / 2$ unterscheiden, ändern sich die Phasenbeziehungen nicht.

Für den Effektivwert der Spannung gilt:

$$\tilde{u} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}} \approx 0,707 \hat{U} ; \quad \hat{u} = \frac{10V}{\sqrt{2}} \approx 7,07V$$

Crestfaktor (Scheitelfaktor) bei wellenförmigen Signalen

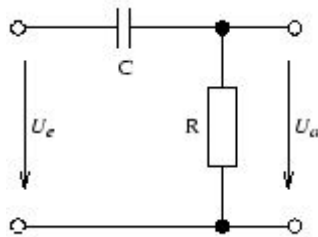
Wellenformen von Signalen werden im Allgemeinen mit dem Crestfaktor beschrieben.

Dieser ist das Verhältnis zwischen Spitzenwert (Scheitelwert) und Effektivwert einer Wellenform: $k_s = \frac{\hat{U}}{U}$

Für reine Sinusgrößen beträgt dieser: $k_s = \sqrt{2} \approx 1,414$ und bei Dreieckswellenformen ca. 1.732.

3.1 Frequenzgang von passiven R-C Netzwerken mit Hochpassfilter

Ein **Hochpass** ist eine elektrische Filterschaltung, die nur hohe Frequenzen passieren lässt. Das Bild zeigt den grundsätzlichen Aufbau aus einem Kondensator C und einem Widerstand R.



Von der Eingangsspannung U_e erscheint am Ausgang gemäß der Spannungsteilerformel nur der Anteil U_a :

$$U_a = U_e \cdot R / (R_C + R)$$

Oder anders formuliert: Das Spannungsteilerverhältnis U_2 zu U_1 berechnet sich nach der Formel:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}$$

Unter der Grenzfrequenz f_G versteht man diejenige Frequenz, bei der $U_a = U_e / \sqrt{2}$ (d.h. U_a gegenüber U_e um 3 Dezibel abgeschwächt) ist. Da R_C mit steigender Frequenz kleiner wird,

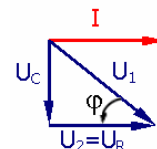
$$R_C = 1 / (j \omega C) \quad \text{mit } \omega = 2 \pi f,$$

geht das Teilungsverhältnis mit steigender Frequenz gegen 1, für hohe Frequenzen wird $U_a = U_e$.

Oder anders formuliert: Je höher die Frequenz der Eingangsspannung U_1 , umso geringer wird der Widerstand X_C an C und damit liegt dann an R eine hohe Ausgangsspannung U_2 an. X_C berechnet sich gemäß der Formel:

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

Umgekehrt folgt daraus, dass bei niedrigen Frequenzen der Widerstand X_C an C sehr hoch ist und damit liegt dann an R eine geringe Ausgangsspannung U_2 an.



Beim Erreichen der Grenzfrequenz f_g beträgt die Ausgangsspannung U_2 70,7 % der Eingangsspannung U_1 .

Bspw. bei $U_1 = 10$ V Wechselspannung (Sinus): Effektivwert der Spannung $U_1 \approx 7,07$ V folgt: $U_2 \approx 5$ V d.h. von der Grenzfrequenz an Aufwärts beträgt U_2 mehr als 70 % von U_1 , also mehr als 5 V.

Höhere Frequenzen erzeugen eine größere Ausgangsspannung, währenddem kleinere von Beginn an herausgefiltert werden.

Optimierung eines Hochpassfilters

Einen verbesserten Hochpass erhält man, indem man R durch eine Induktivität L ersetzt, da diese ihrerseits eine - und zwar zum Kondensator gegenläufige - Frequenzabhängigkeit besitzt:

$$R_L = j \omega L \quad \text{mit } \omega = 2 \pi f.$$

Damit fällt die Ausgangsspannung U_a unterhalb von f_G schneller ab, da nun in

$$U_a = U_e \cdot R_L / (R_C + R_L)$$

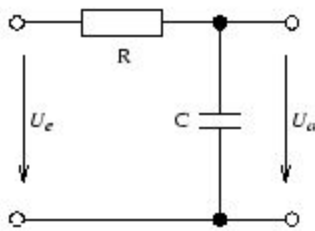
nicht nur R_C größer sondern zugleich R_L kleiner wird.

Praktische Bedeutung des Hochpassfilters

Die bekanntesten Anwendungen sind Schärfekorrekturen verschiedener Bildbearbeitungsprogramme und das ausgleichen terrestrischer Störungen bei Fernsehbildern.

3.2 Frequenzgang von passiven R-C Netzwerken mit Tiefpassfilter

Ein **Tiefpass** ist eine elektrische Filterschaltung, die nur tiefe Frequenzen passieren lässt. Das Bild zeigt den grundsätzlichen Aufbau aus einem Kondensator C und einem Widerstand R.



Von der Eingangsspannung U_e erscheint am Ausgang gemäß der Spannungsteilerformel nur der Anteil U_a :

$$U_a = U_e \cdot R_C / (R_C + R)$$

Oder anders formuliert: Das Spannungsteilerverhältnis U_2 zu U_1 berechnet sich nach der Formel:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{X_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}$$

Unter der Grenzfrequenz f_G versteht man diejenige Frequenz, bei der $U_a = U_e / \sqrt{2}$ (d.h. U_a gegenüber U_e um 3 Dezibel abgeschwächt) ist. Da R_C mit steigender Frequenz kleiner wird,

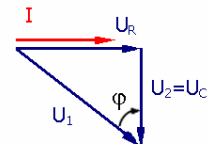
$$R_C = 1 / (j \omega C) \text{ mit } \omega = 2 \pi f,$$

geht das Teilungsverhältnis mit sinkender Frequenz gegen 1, für Gleichspannung (Frequenz $f=0$) wird $U_a = U_e$.

Oder anders formuliert: Je höher die Frequenz der Eingangsspannung U_1 , umso geringer wird der Widerstand X_C an C und damit liegt dann an C eine geringe Ausgangsspannung U_2 an. X_C berechnet sich gemäß der Formel:

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

Umgekehrt folgt daraus, dass bei niedrigen Frequenzen der Widerstand X_C an C sehr hoch ist und damit liegt dann an C eine hohe Ausgangsspannung U_2 an.



Beim Erreichen der Grenzfrequenz f_g beträgt die Ausgangsspannung U_2 70,7 % der Eingangsspannung U_1 .

Bspw. bei $U_1 = 10$ V Wechselspannung (Sinus): Effektivwert der Spannung $U_1 \approx 7,07$ V folgt: $U_2 \approx 5$ V d.h. von der Grenzfrequenz an Aufwärts beträgt U_2 weniger als 70 % von U_1 , also weniger als 5 V.

Kleinere Frequenzen erzeugen eine größere Ausgangsspannung, währenddem höhere zunehmend herausgefiltert werden.

Optimierung eines Tiefpassfilters

Einen verbesserten Tiefpass erhält man, indem man R durch eine Induktivität L ersetzt, da diese ihrerseits eine - und zwar zum Kondensator gegenläufige - Frequenzabhängigkeit besitzt:

$$R_L = j \omega L \text{ mit } \omega = 2 \pi f.$$

Damit fällt die Ausgangsspannung U_a oberhalb von f_G schneller ab, da nun in

$$U_a = U_e \cdot R_C / (R_C + R_L)$$

nicht nur R_C kleiner sondern zugleich R_L größer wird.

Praktische Bedeutung des Tiefpassfilters

Die bekanntesten Anwendungen sind in Soundsystemen zu finden. Sie dienen der sauberen Ansteuerung von Subwoofern.

4 Dokumentation der Ergebnisse

Bei Wechselspannungsmessungen mit dem Multimeters HP 34401A wird vom echten Effektivwert ausgegangen. Diese beträgt, wie oben beschrieben, bei einer Wechselspannung (Sinus) von $10\text{ V} \approx 7,07\text{ V}$. Das Multimeter verwendet 3 verschiedene WechselspannungsfILTER, mit denen entweder die Genauigkeit bei niederen Frequenzen optimiert oder eine schnellere Einschwingzeit erreicht werden kann.

Je nach angegebener Eingangsfrequenz wählt das Multimeter ein langsames, mittleres oder schnelles Filter:

AC-Filter	Bandbreite	Triggerverzögerung
langsam	3 Hz – 300 kHz	7 s
mittel	20 Hz – 300 kHz	1 s
schnell	200 Hz – 300 kHz	0,1 s

Im rechnergesteuertem Betrieb wird wie im Herstellerhandbuch empfohlen die Standardeinstellverzögerung zu verwenden (Delay Auto = AC-Filter Mittel). Bei Frequenzen unterhalb 100 Hz wird das langsame AC-Filter verwendet (nur für sinusförmige Eingangssignale spezifiziert).

Die Verzögerung wird durch die Funktion, den Wertebereich und die Einstellung des Wechselspannungsfilters (AC-Filter) bestimmt.

Sämtliche Multimeter zeigen Messfehler die abhängig vom Crestfaktor sind. Folgende Tabelle zeigt Niederfrequenzfehler (% des Messwertes):

Frequenzen (Hz)	AC-Filter		
	Langsam	Mittel	Schnell
10 – 20	0	0,74	-
20 – 40	0	0,22	-
40 – 100	0	0,06	0,73
100 – 200	0	0,01	0,22
200 – 1000	0	0	0,18
> 1000	0	0	0

Es wurden 4 Messreihen generiert, welche in der weiterführenden Dokumentation der einfach halber M1 - M4 genannt werden. Dabei wird von folgenden Richtwerten ausgegangen:

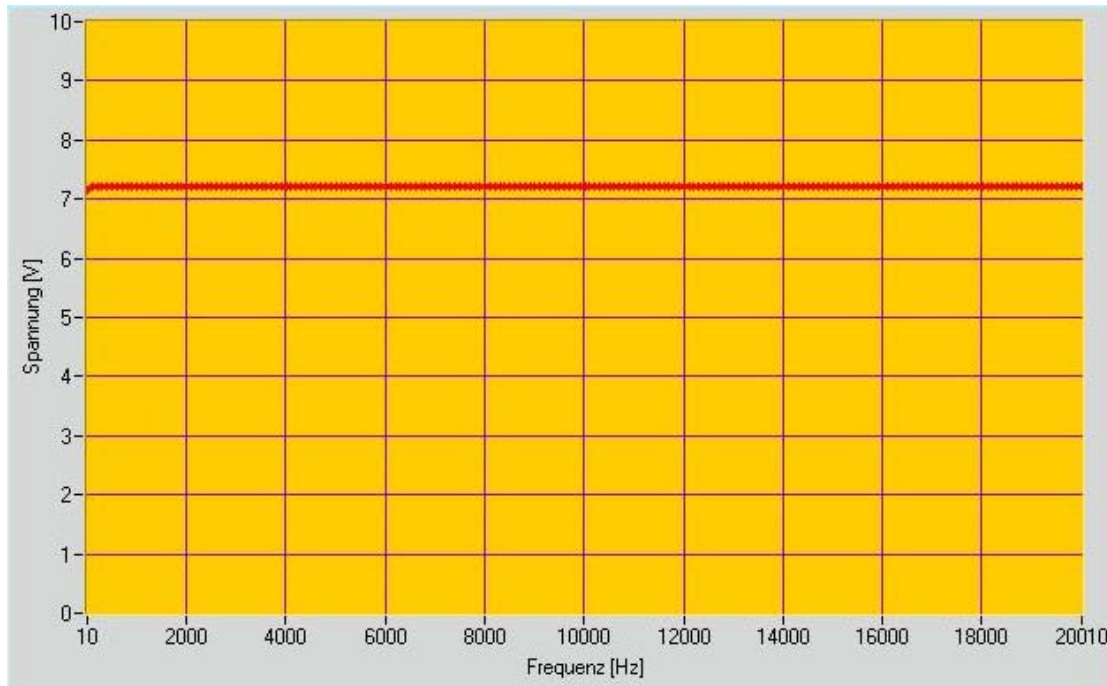
Eingangsspannung: $U_1 = 10\text{ V}$

Messreihe	Eingangsfrequenz f_1	Endfrequenz f_2 (gerundet)	Schrittweite	Schritt-Typ
M1	10 Hz	20 kHz	100 Hz	Konstant
M2	10 Hz	50 kHz	1,5 fache	Variabel
M3	100 Hz	1 MHz	1 kHz	Konstant
M4	1000 Hz	4 MHz	4 kHz	Konstant

4.1 Messungen ohne R-C Netzwerk

Die Instrumente arbeiten mit einer angegebenen Genauigkeit die von vielen Faktoren abhängt. Durch Umwelteinflüsse können Messfehler oder Abweichungen bei Messgenauigkeiten auftreten. Jede Messung beeinflusst das zu untersuchende Objekt (hier RC-Netzwerk), es gibt keine Rückkopplungsfreie Messung.

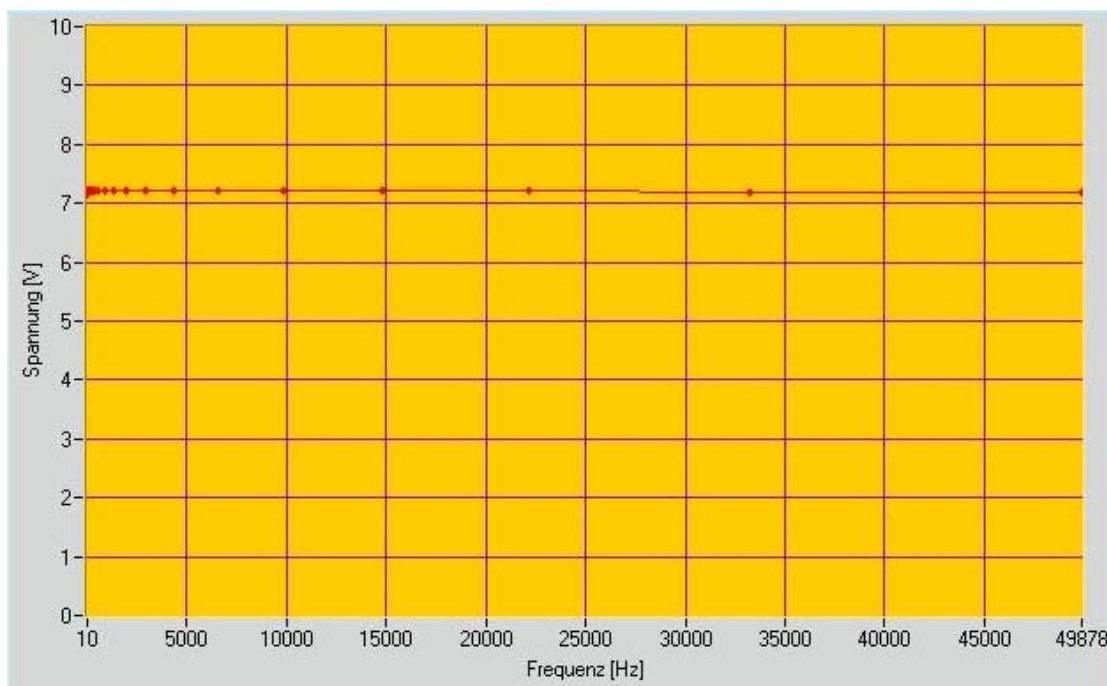
Messreihe 1:



M1: Spannung bleibt in etwa konstant bei dem errechneten echten Effektivwert (7,072 V)

max. 7,208 V min. 7,166 V mw. 7,206 V

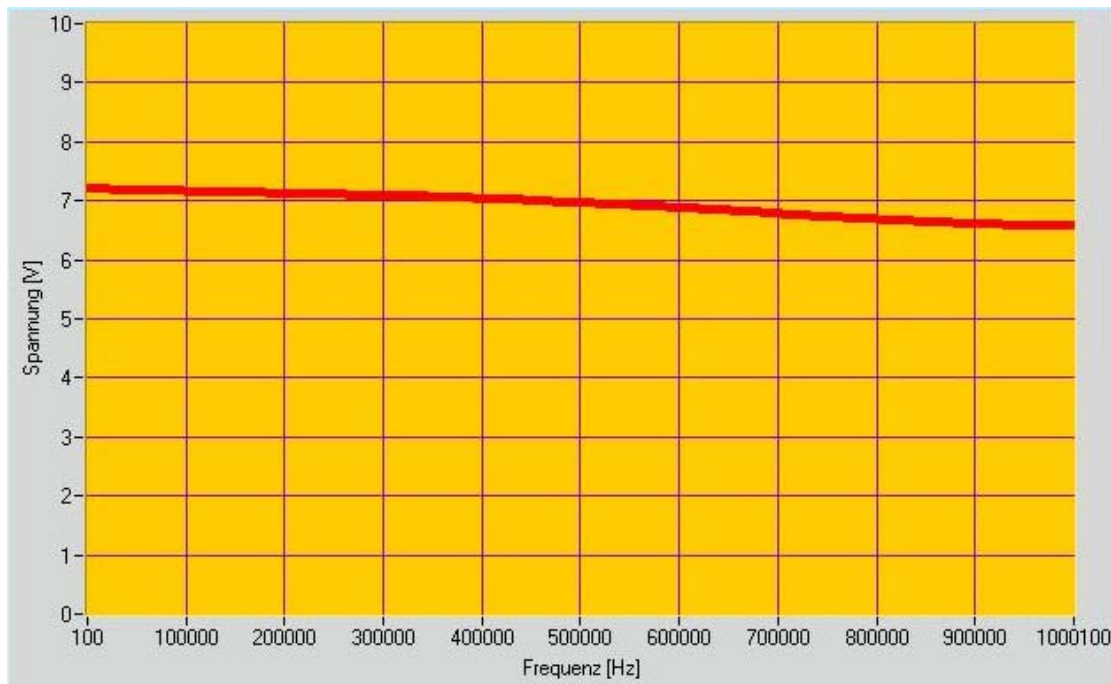
Messreihe 2:



M2: Spannung bleibt in etwa konstant bei dem errechneten echten Effektivwert (7,072 V)

max. 7,209 V min. 7,203 V mw. 7,169 V

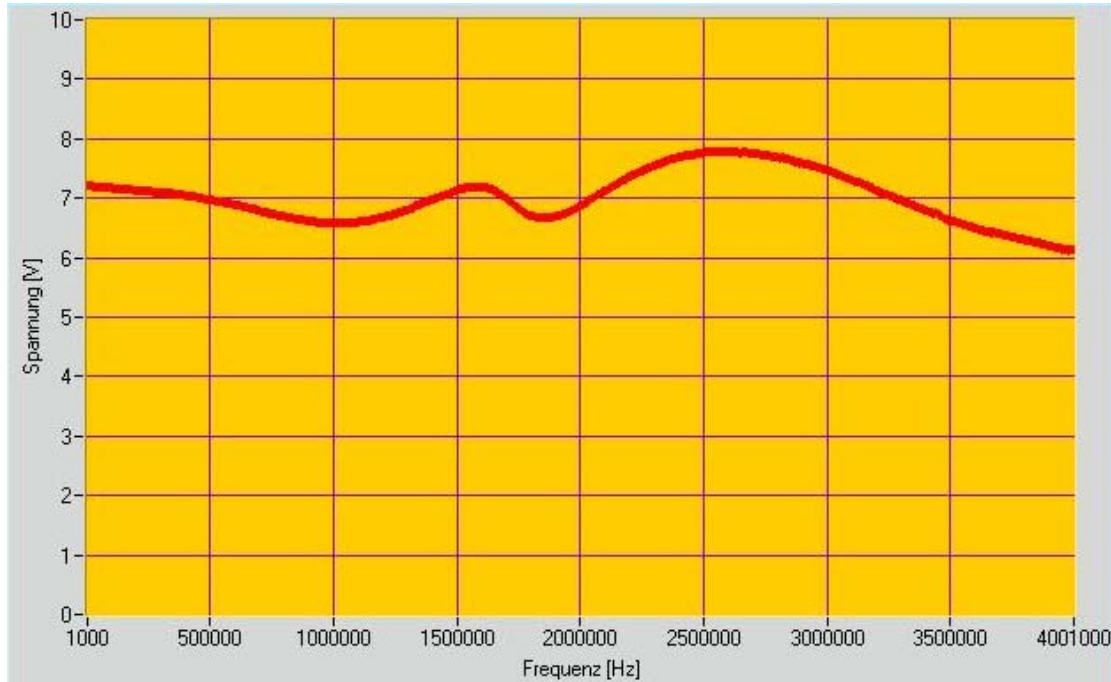
Messreihe 3:



M3: Spannung bleibt bis etwa 400 kHz in der Nähe des echten Effektivwert, dann starker Spannungsabfall

max. 7,208 V min 6,579 V mw. 6,931 V

Messreihe 4:



M4: Spannung fällt ab 500 kHz stark ab, Spannungsspitze bei 1,6 MHz, Abfall der Spannung bei 1,8 MHz, absolute Spannungsspitze bei 2,6 MHz, danach stetiger Abfall

max. 7,788 V min. 6.121 V mw. 7,009 V

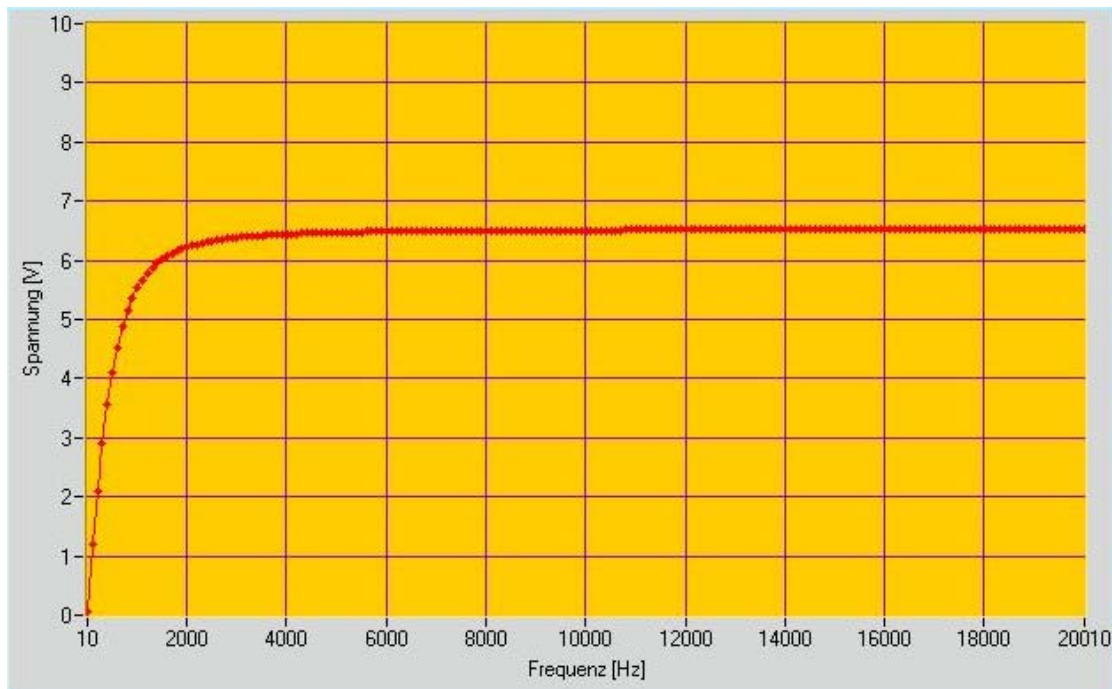
Bei den Messreihen M1 und M2 sind die geringen Abweichungen vom echten Effektivwert auf oben genannte Umwelteinflüsse zu schieben.

Da das Multimeter HP 34401 A einen Messbereich von 3 Hz bis 300 kHz hat, erklären sich die starken Spannungsabfälle in den Messungen M3 und M4. Ab 1 MHz liegen die Messfehler beim HP 34401 A bei 30% was die Spannungsspitzen bei 1,6 MHz und 2 MHz erklären.

4.2 Messungen mit dem R-C Hochpassfilter

4.2.1 Einfacher Hochpass

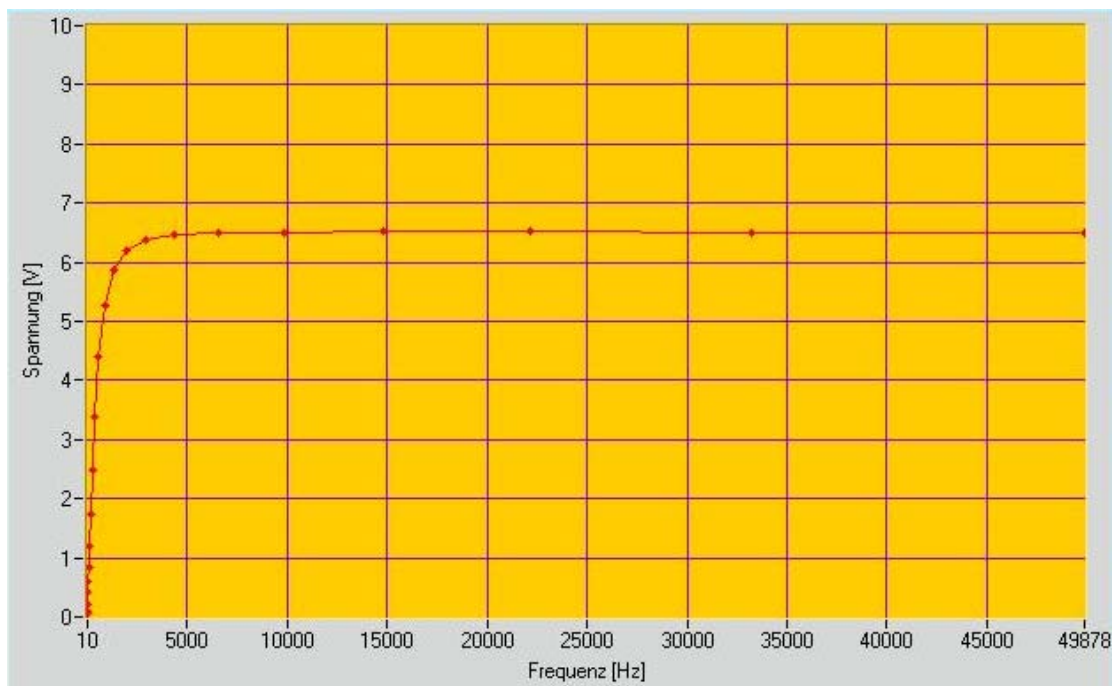
Messreihe 1:



M1: Spannung steigt bis 2000 Hz stark an, dann bis Ende der Messung leicht steigend

max. 6,517 V min. 0,046 V mw. 6,308 V

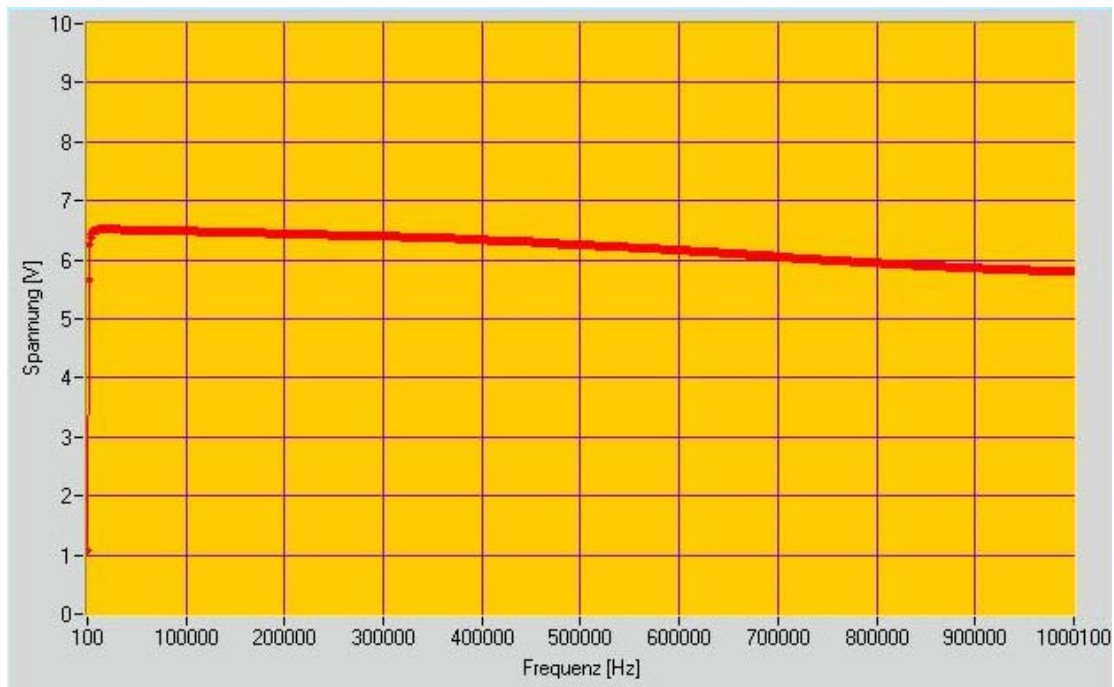
Messreihe 2:



M2: stark ansteigende Spannung bis 2,5 kHz, danach nahezu konstant bis zum Ende

max. 6,515 V min. 0,046 V mw. 3,845 V

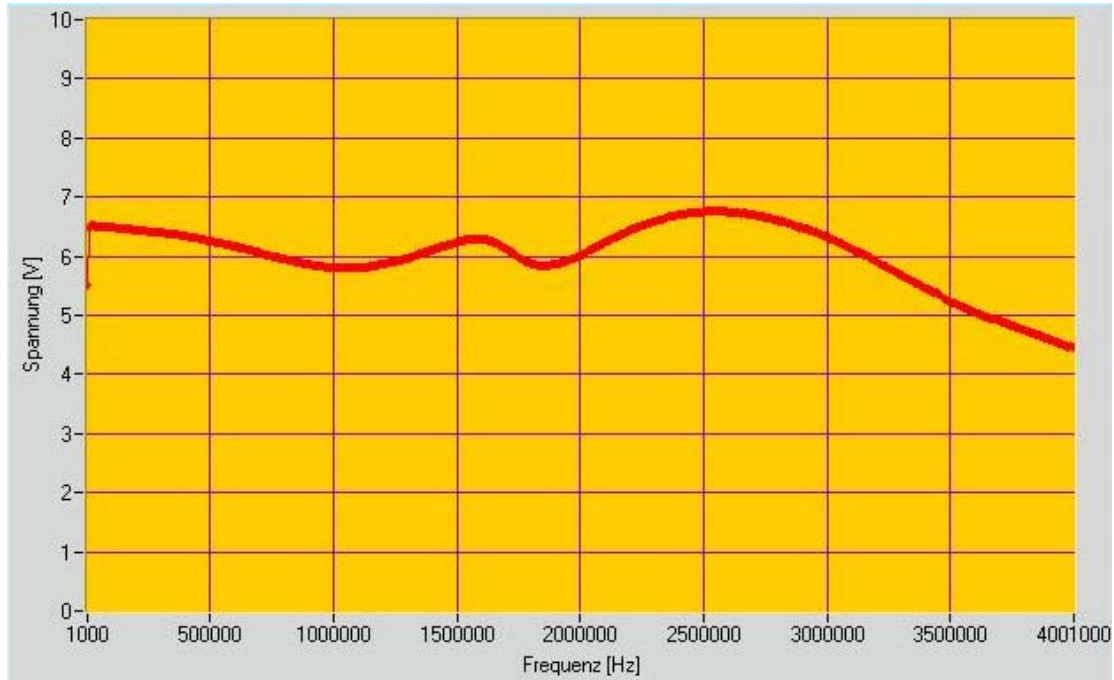
Messreihe 3:



M3: Spannung nach Start sehr stark steigend, ab dann stetig schwach abfallend

max. 6,516 V min. 1,086 V mw. 6,204 V

Messreihe 4:

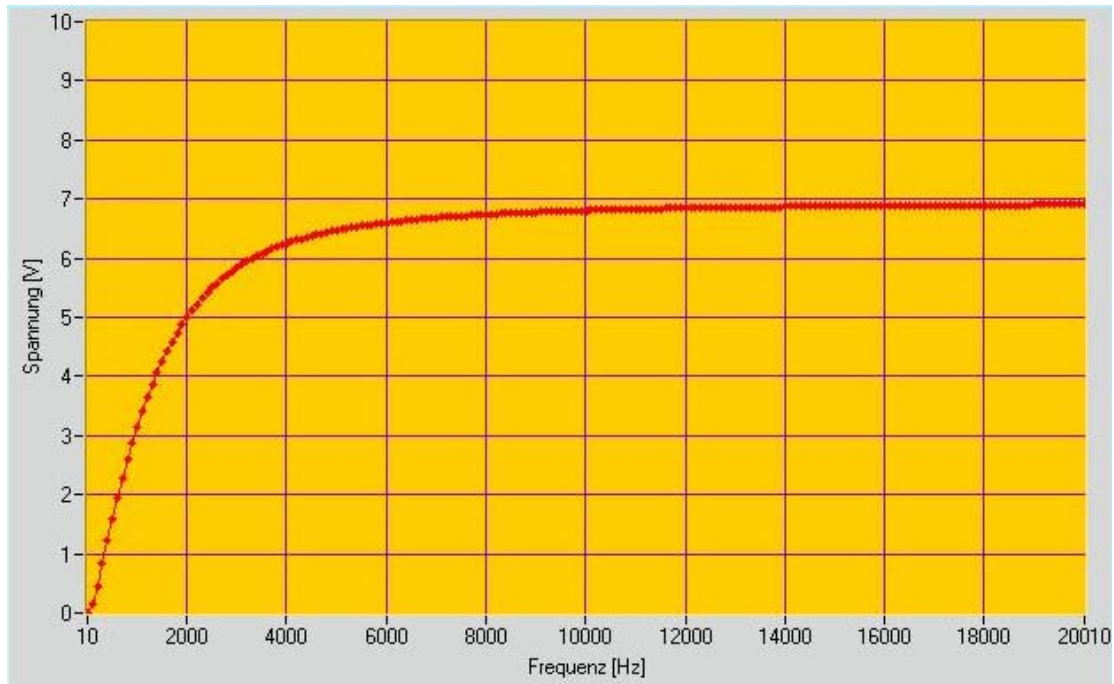


M4: nach dem Start sehr starker Anstieg der Spannung, bei 1 MHz Spannungstief, Spannungshoch bei 1,6 MHz erneutes Spannungstief bei 1,8 MHz, maximale Spannungsspitze bei 2,6 MHz, bis zum Ende der Messung abfallend

max. 6,763 V min. 4,458 V mw. 6,016 V

4.2.2 Doppelter Hochpass

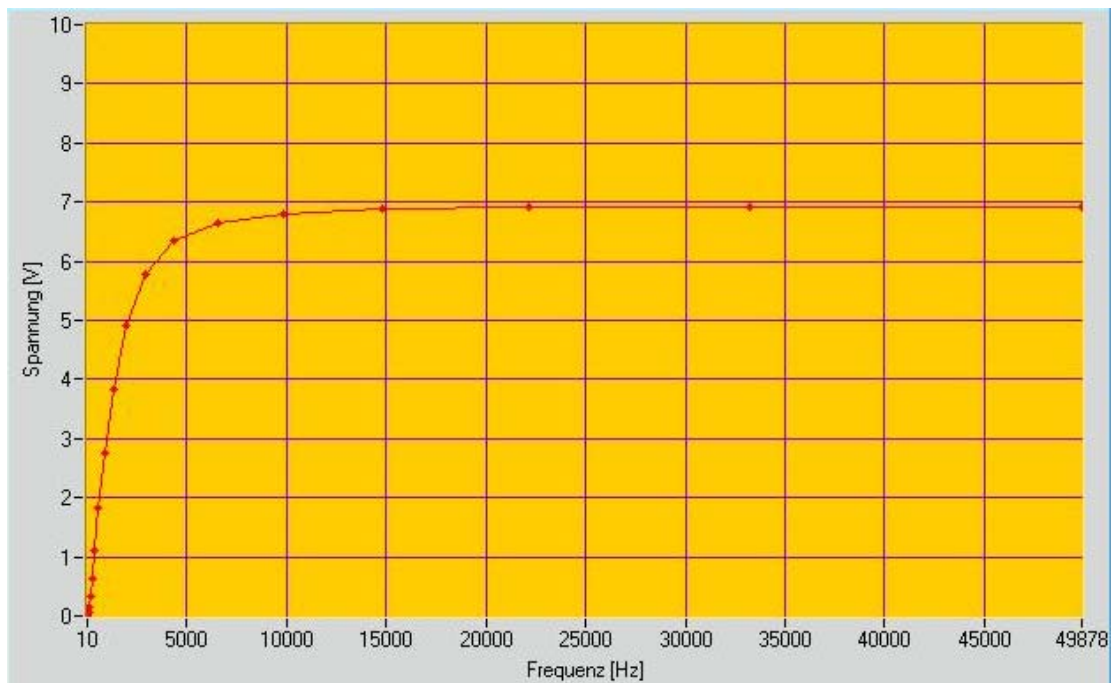
Messreihe 1:



M1: Spannung steigt bis 3000 Hz stark an, ab da nur noch ein leichter Anstieg bis Messende

max. 6,605 V min. 0,002 V mw. 6,278 V

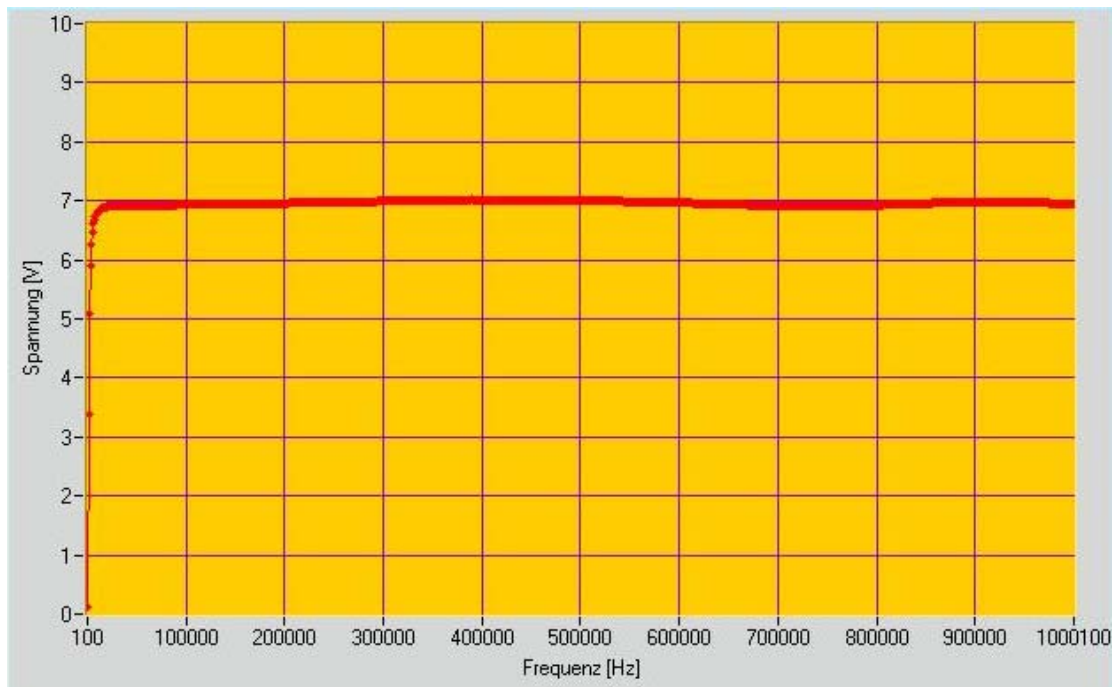
Messreihe 2:



M2: starker Spannungsanstieg bis 5000 Hz, von 5kHz bis 15 kHz leichter Anstieg, dann nahezu konstant

max. 6,927 V min. 0,002 V mw. 3,132 V

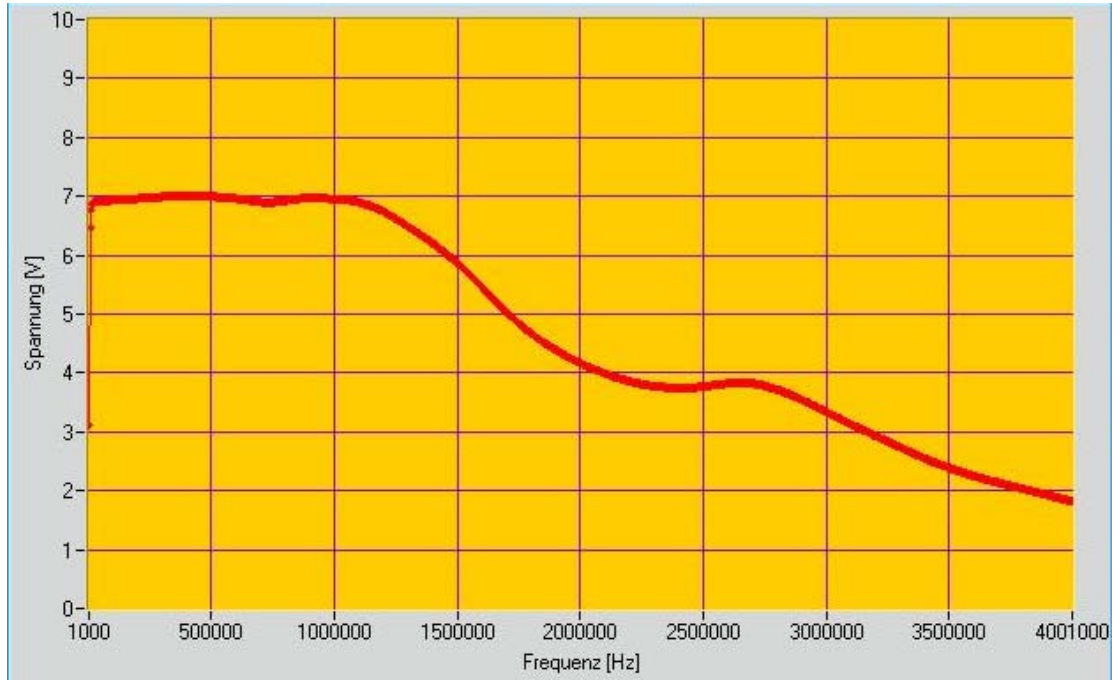
Messreihe 3:



M3: steil ansteigende Spannung nach Start, bis Ende der Messung etwa konstant

max. 7,021 V min. 0,125 V mw. 6,947 V

Messreihe 4:



M4: sehr steiler Spannungsanstieg nach Start, bis 1 MHz konstanter Verlauf, danach fallend bis Messende

max. 7,018 V min 1,824 V mw. 4,728 V

4.2.3. Auswertung

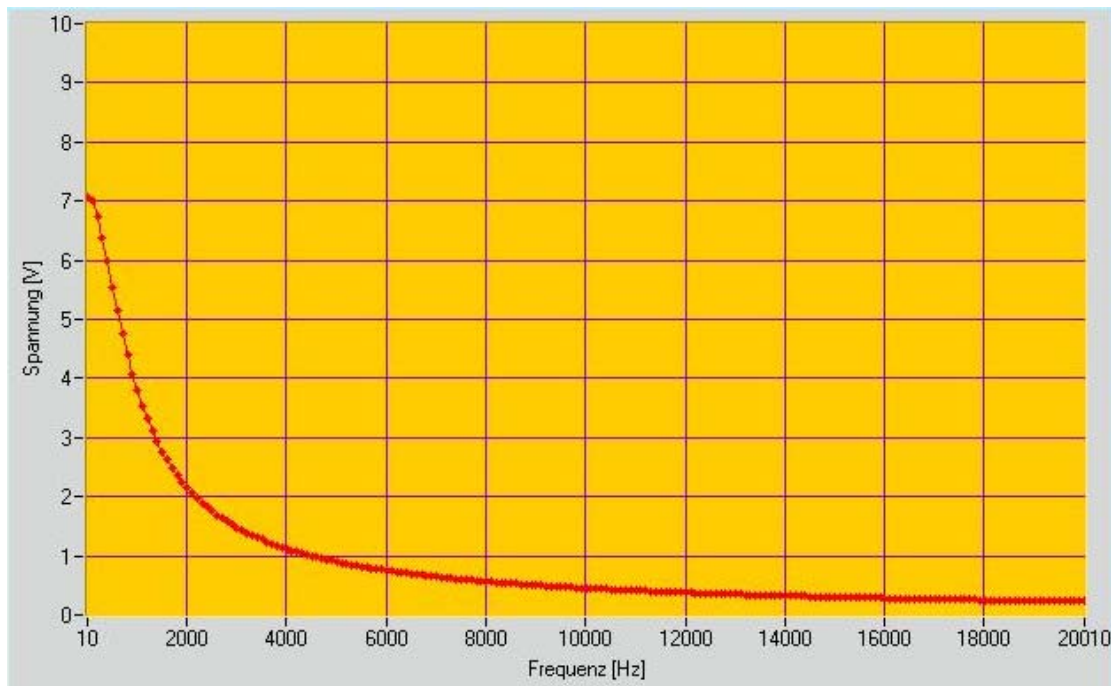
Wie man beobachten kann filtert der einfache Hochpass, welcher einen Widerstand von 500Ω und einen Kondensator mit $470 \mu\text{F}$ hat, Frequenzen unter ca. 2000 Hz heraus. Ab diesem Bereich lässt der einfache Hochpass die höheren Frequenzen durch, was an der Annäherung an den echten Effektivwert der Spannung erkennbar ist. Die Spannungsabfälle ab etwa 400 kHz sind auf das Messbereichende des HP 34401 A bei 300 kHz zurückzuführen.

Bei dem doppelte Hochpass, zwei in Reihe geschaltete einfache Hochpässe mit den gleichen technischen Daten der oben genannte Bauteile, konnte man vor allen Dingen in den niedrigen Frequenzen der ersten beiden Messreihen M1 und M2 sehen, dass sich die Spannung ab ca. der doppelten Frequenz gegenüber dem einfachen Hochpass dem echten Effektivwert ($7,07 \text{ V}$) annähert. Bei den Messreihen M3 und M4 lässt sich durch die großen Frequenzsprünge und dem sofortigen Anstieg nach Start der Frequenzmodulation bei beiden Hochpässen keine Aussage machen. In den oberen Frequenzbereichen ist auch dort auf Grund der Fehlerquote beim Überschreiten des Messbereichs des HP 34401 A (wie zuvor beschrieben) ein Spannungsabfall erkennbar.

4.3 Messungen mit dem R-C Tiefpassfilter

4.3.1 Einfacher Tiefpass

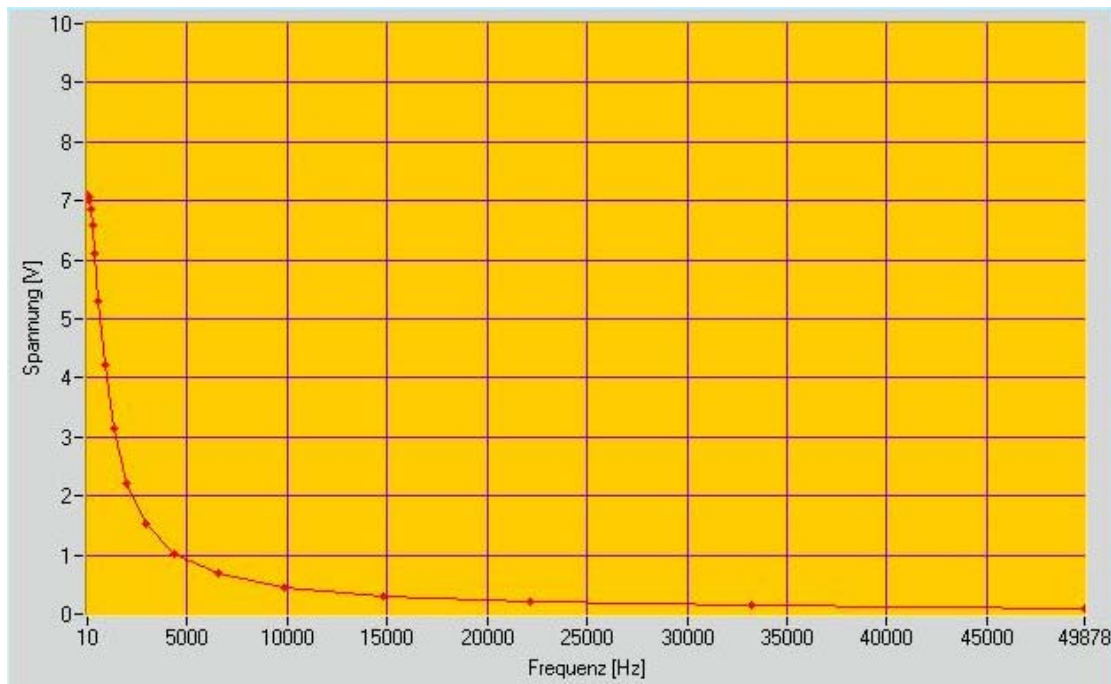
Messreihe 1:



M1: stark fallende Spannung bis 3000 Hz, dann stetig leicht abfallend bis Ende der Messung

max. 7,064 V min. 0,227 V mw. 0,949 V

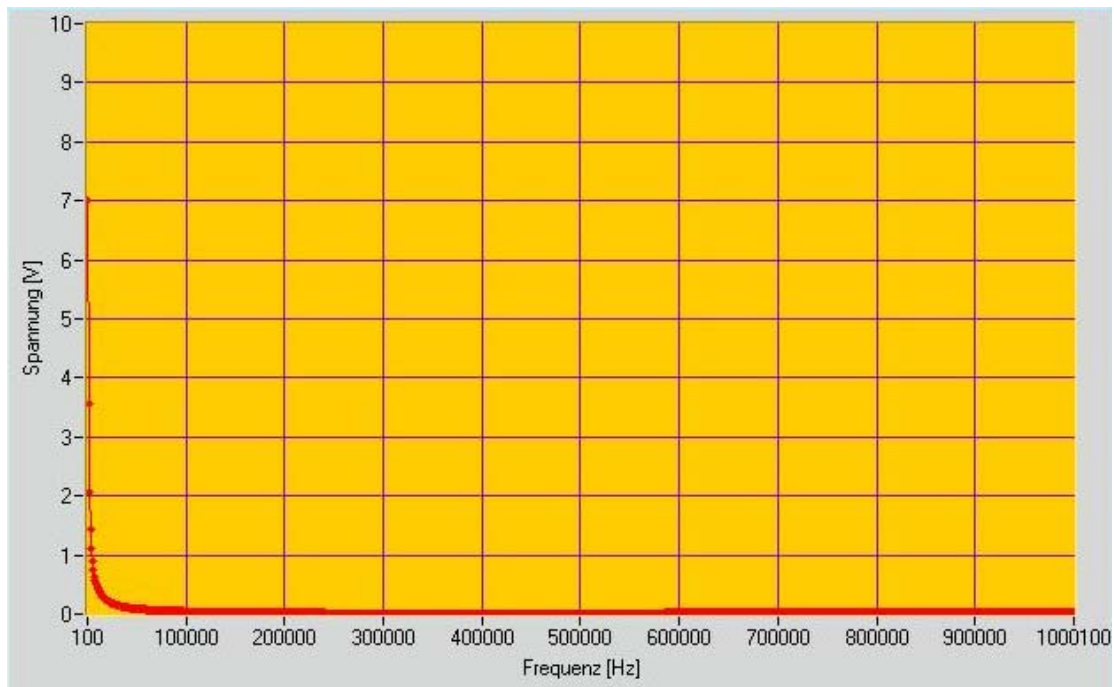
Messreihe 2:



M2: stark fallende Spannung bis 3000 Hz, danach schwach fallend gegen 0 V

max. 7,091 V min. 0,090 V mw. 4,016 V

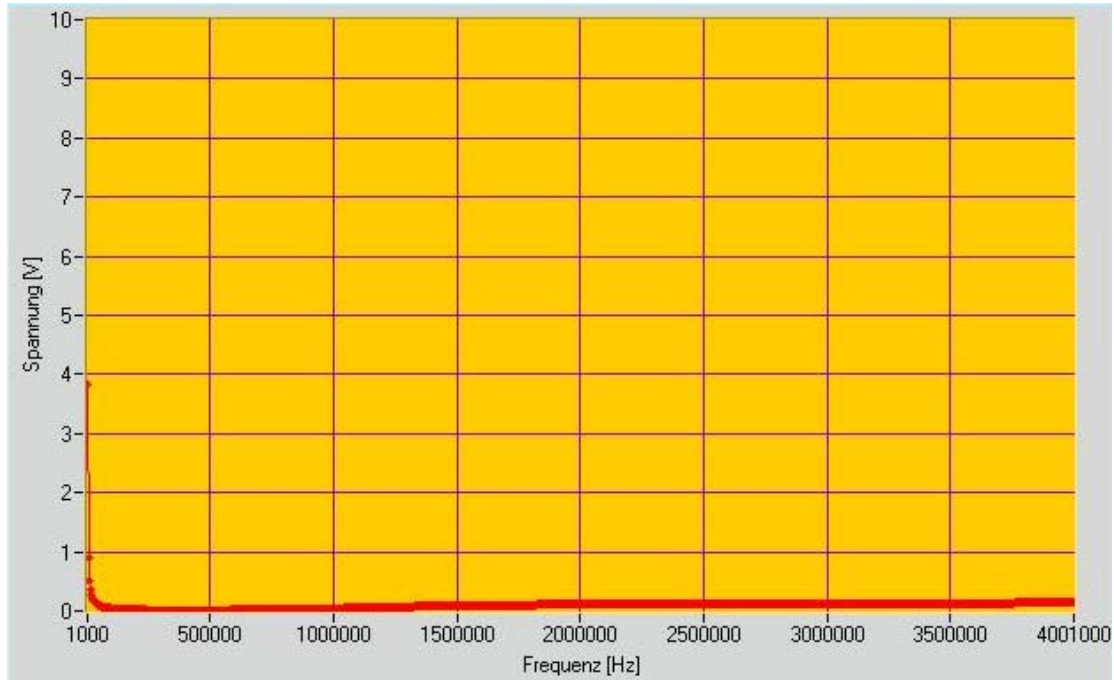
Messreihe 3:



M3: bei Start sehr stark abfallende Spannung bis 6000 Hz, bis Messende abfallend gegen 0 V

max. 7,017 V min. 0,009 V mw. 0,048 V

Messreihe 4:

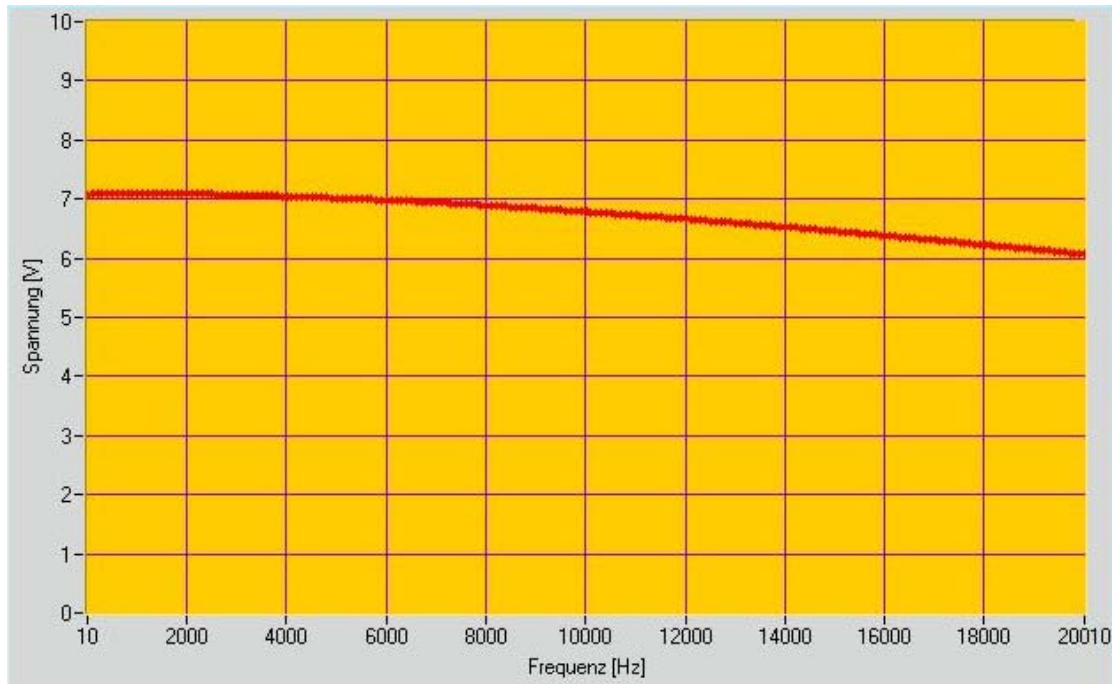


M4: sofort nach Start sehr stark abfallende Spannung, dann stetig fallend gegen 0 V

max. 3,832 V min. 0,009 V mw. 0,094 V

4.3.2 Doppelter Tiefpass

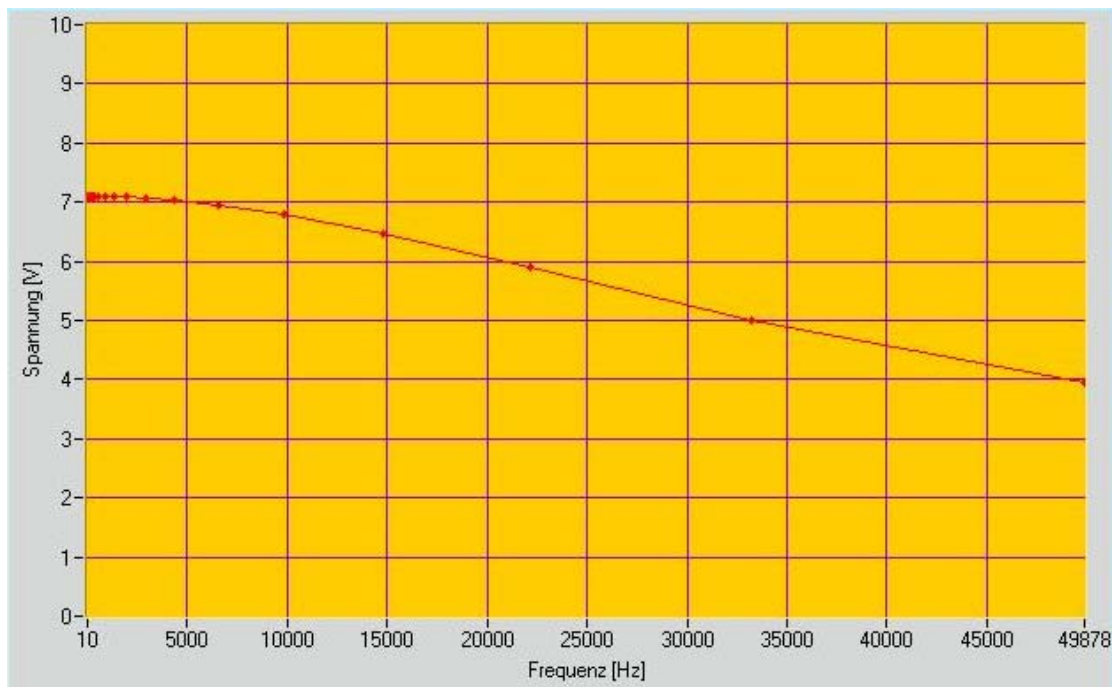
Messreihe 1:



M1: stetiges Abfallen der Spannung ab Start der Messung

max. 7,105 V min. 6,067 V mw. 6,719

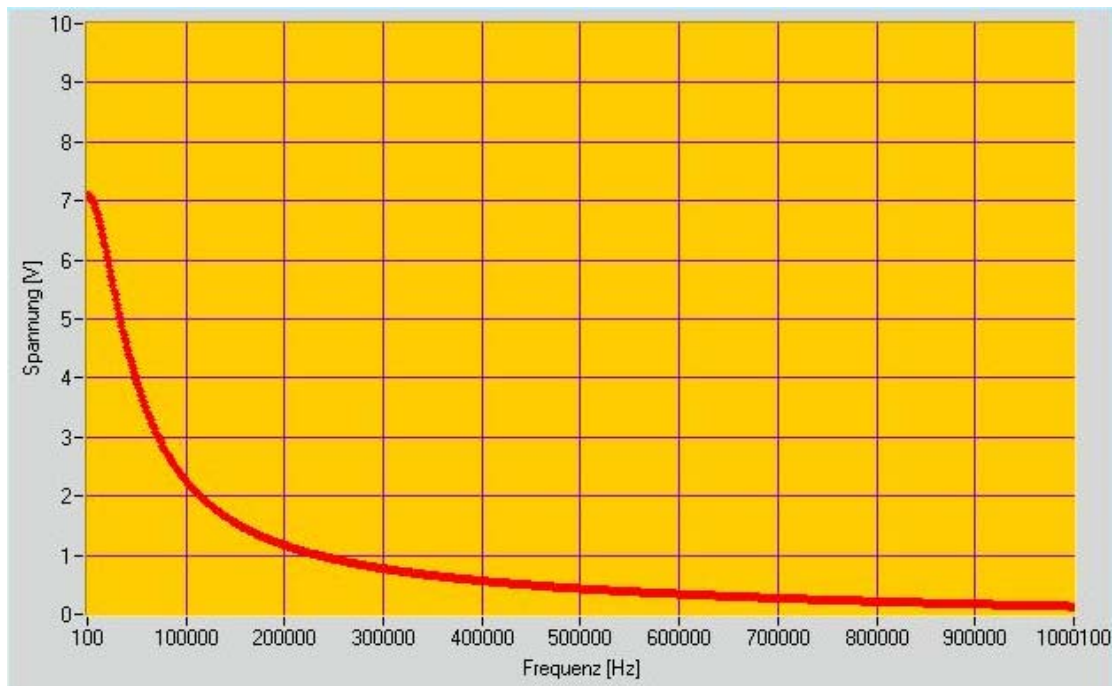
Messreihe 2:



M2: konstanter Verlauf der Spannung bis 3000 Hz, danach stetig abfallend

max. 7,105 V min. 3,945 V mw. 6,753 V

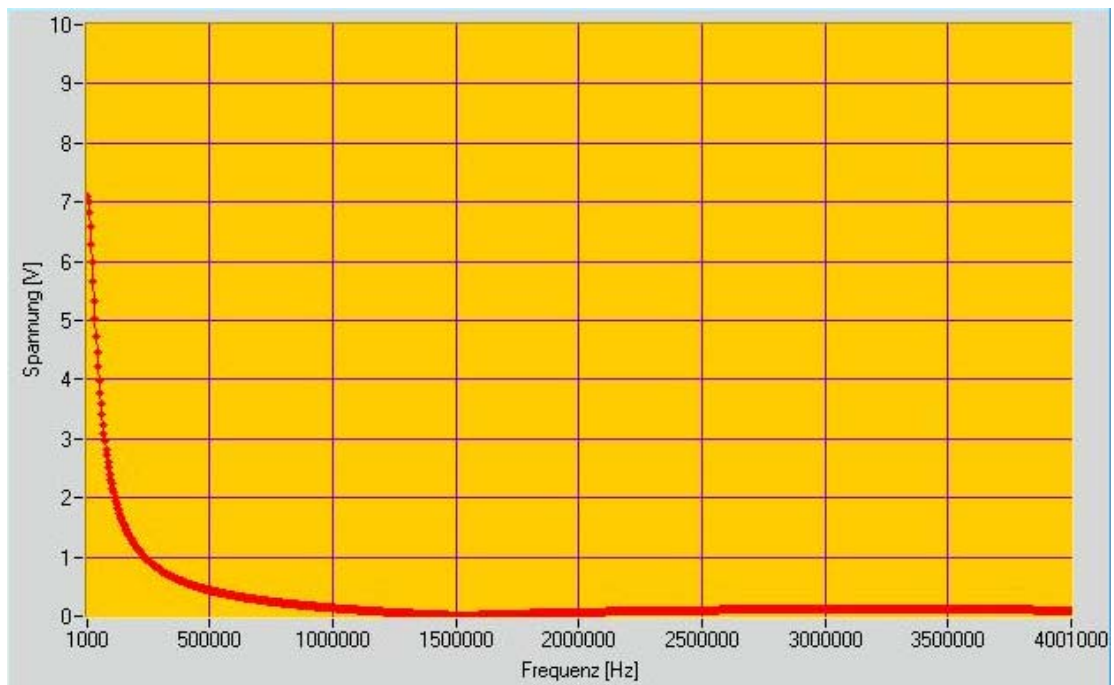
Messreihe 3:



M3: stark abfallende Spannung bis 100 kHz, dann stetig fallend bis Messende

max. 7,104 V min. 0,133 V mw. 0,904 V

Messreihe 4:



M4: Spannung fällt bis 200 kHz stark ab, bis zum Ende der Messung stetiges Fallen der Spannung gegen 0 V

max. 7,099 V min. 0,008 V mw. 0,298 V

4.3.3 Auswertung

Wie man beobachten kann filtert der einfache Tiefpass, welcher einen Widerstand von 500Ω und einen Kondensator mit $470 \mu\text{F}$ hat, Frequenzen über ca. 2000 Hz heraus. Bis zu diesem Frequenzbereich lässt der einfache Tiefpass die tieferen Frequenzen durch. Die ausgegebene Spannung bei darüber liegenden Frequenzen geht gegen 0 V .

Bei dem doppelten Tiefpass, zwei in Reihe geschaltete einfache Tiefpässe mit den gleichen technischen Daten der oben genannten Bauteile, konnte man sehr gut ein großzügigeres Durchlassen auch höherer Frequenzen erkennen. Erst ab ca. 100 kHz werden oberhalb liegende Frequenzen herausgefiltert. Das stetige Abfallen der Spannungskurve erfolgt hier auch mit flacherem Gefälle.

Bei allen Testreihen der Tiefpassfilter liegt der Startwert der Spannung in der Nähe des echten Effektivwertes bei ca. 7.07 V . Danach erfolgt mit zunehmender Frequenz der Kurvenverlauf der ausgegebenen Spannung in bekannter Form und geht schließlich gegen 0 V . Messfehler wie bei den Hochpassfiltern waren hier nicht zu erkennen.