



**HOCHSCHULE KONSTANZ TECHNIK, WIRTSCHAFT UND GESTALTUNG**  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

**Signale, Systeme und Sensoren**

# **Digitalisierung**

**Th. Gnädig, F. Gendusa, O. Manz**

**Konstanz, 25. Januar 2016**

## **Zusammenfassung (Abstract)**

Thema:	Digitalisierung	
Autoren:	Th. Gnädig	thgnaedi@htwg-konstanz.de
	F. Gendusa	fagendus@htwg-konstanz.de
	O. Manz	olmanz@htwg-konstanz.de
Betreuer:	Prof. Dr. Matthias O. Franz	mfranz@htwg-konstanz.de
	Jürgen Keppler	juergen.keppler@htwg-konstanz.de
	Martin Miller	martin.miller@htwg-konstanz.de

Dieser Versuch befasst sich mit einigen Phänomenen der Digital-Analog und Analog-Digital Wandlung.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>IV</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>V</b>
<b>Listingverzeichnis</b>	<b>VI</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Programmierung der AD/DA-Wandlerkarte</b>	<b>2</b>
2.1 Fragestellung, Messprinzip, Aufbau, Messmittel . . . . .	2
2.2 Messwerte . . . . .	2
2.3 Auswertung . . . . .	3
2.4 Interpretation . . . . .	3
<b>3 Genauigkeit der AD-Wandlung</b>	<b>4</b>
3.1 Fragestellung, Messprinzip, Aufbau, Messmittel . . . . .	4
3.2 Messwerte . . . . .	4
3.3 Auswertung . . . . .	5
3.4 Interpretation . . . . .	5
<b>4 Genauigkeit der DA-Wandlung</b>	<b>7</b>
4.1 Fragestellung, Messprinzip, Aufbau, Messmittel . . . . .	7
4.2 Messwerte . . . . .	8
4.3 Auswertung und Interpretation . . . . .	9
<b>5 Zeitverhalten der DA wandlung</b>	<b>10</b>
5.1 Fragestellung, Messprinzip, Aufbau, Messmittel . . . . .	10
5.2 Ergebnis . . . . .	11
5.3 Auswertung und Interpretation . . . . .	11

<b>6</b>	<b>Abtasttheorem</b>	<b>12</b>
6.1	Fragestellung, Messprinzip, Aufbau, Messmittel . . . . .	12
6.2	Messwerte . . . . .	13
6.3	Auswertung und Interpretation . . . . .	17
<b>Anhang</b>		<b>18</b>
A.1	Quellcode . . . . .	18
A.1.1	Quellcode Versuch 1 . . . . .	18
A.2	Messergebnisse . . . . .	21

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Ausgelesene Werte der ME-RedLab USB-1208LS . . . . .	3
5.1	Ausgabe des Oszilloskops . . . . .	11
6.1	Frequenzbereich 2kHz . . . . .	13
6.2	Frequenzbereich 3kHz . . . . .	14
6.3	Frequenzbereich 4kHz . . . . .	14
6.4	Frequenzbereich 5kHz . . . . .	15
6.5	Frequenzbereich 6kHz . . . . .	15
6.6	Frequenzbereich 7kHz . . . . .	16
6.7	Frequenzbereich 8kHz . . . . .	16
7.8	Protokoll . . . . .	21

# Tabellenverzeichnis

3.1	Aufgabe 2 . . . . .	5
4.1	gemessene Werte . . . . .	8

# Listingverzeichnis

7.1	Standartabweichung captionpos . . . . .	18
-----	---	----

# 1

## Einleitung

Dieser Laborbericht befsst sich mit der Umwandlung analoger Signale in Digitale und umgekehrt. Dabei kommt die AD/DA - Wandlerkarte ME-RedLab USB-1208LS zum Einsatz. Lernziele hierbei sind

- Umgang mit Analog-zu-Digital und Digital-zu-Analog-Wandlern
- Messung der Genauigkeit der AD- und DA-Wandlung
- Untersuchung des Zeitverhaltens der DA-Wandlung
- Praktische Erfahrungen mit dem Abtasttheorem



## 2

# Programmierung der AD/DA-Wandlerkarte

## 2.1 Fragestellung, Messprinzip, Aufbau, Messmittel

Fragestellung: Die AD/DA-Wandlerkarte des ME-RedLab USB-1208LS soll mit einem Python-Skript programmiert und getestet werden.

Messprinzip: Anhand eines Python-Skriptes sollen eine Reihe von unterschiedlichen Werten aus der AD/DA-Wandlerkarte des ME-RedLab USB-1208LS ausgelesen und grafisch dargestellt werden. Dieses Skript soll anschließend um eine Funktion erweitert werden, die eine Konsoleneingabe auf der AD/DA-Wandlerkarte ausgibt.

Aufbau: Für den Versuch wird eine Multifunktionsbox ME-RedLab USB-1208LS verwendet. Diese besitzt mehrere analoge und digitale Ein-/Ausgänge. Für die Eingangsspannungsbereich wird der single-ended-Modus und eine Spannung von  $\pm 10$  V verwendet, für den Ausgangsspannungsbereich 0 bis 5 V. Die Board Configuration ist auf 8 single-ended channels einzustellen.

Messmittel: ME-RedLab USB-1208LS

## 2.2 Messwerte

Das Python-Skript ergab die folgende Darstellung der ausgelesenen Werte:

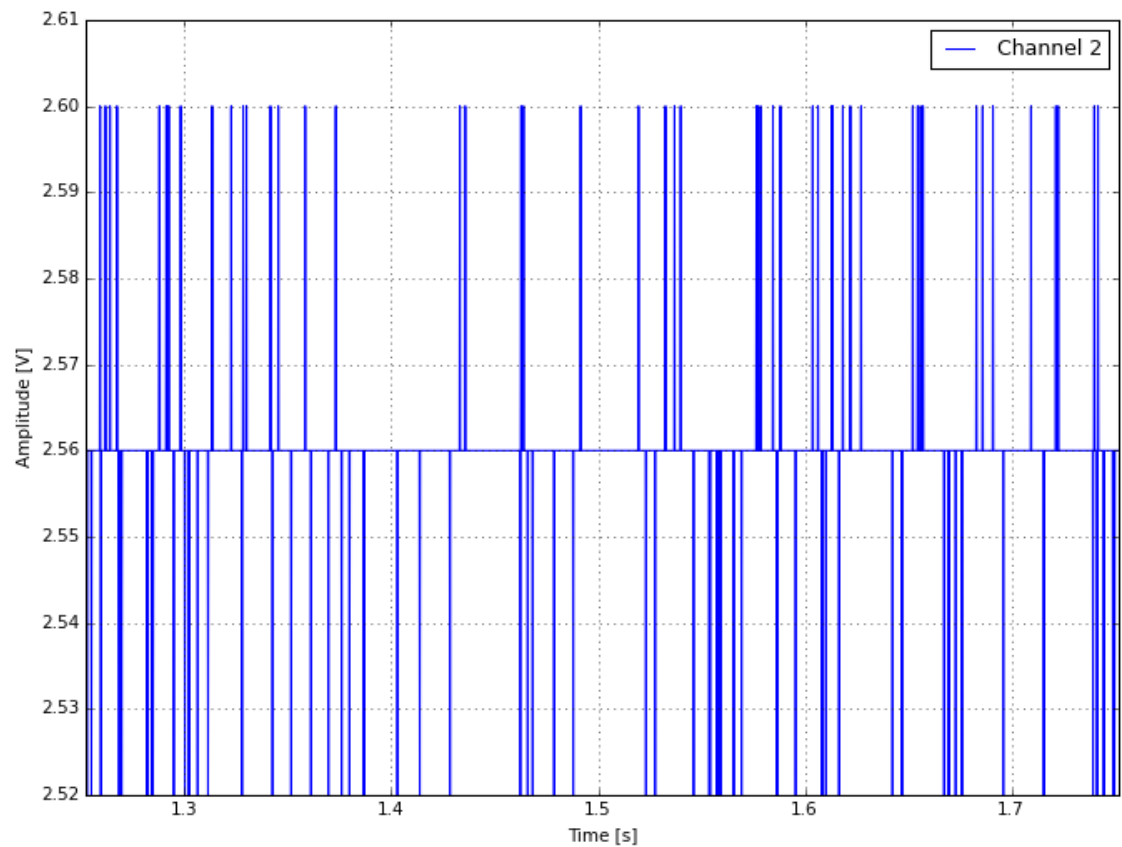


Abbildung 2.1: Ausgelesene Werte der ME-RedLab USB-1208LS

## 2.3 Auswertung

Das Bild zeigt mehrere markante Spitzen sowohl nach oben als auch nach unten.

## 2.4 Interpretation

Bei den Spitzen handelt es sich um Quantisierungsfehler.

# 3

## Genauigkeit der AD-Wandlung

### 3.1 Fragestellung, Messprinzip, Aufbau, Messmittel

Fragestellung: Die Genauigkeit der AD-Wandlung ist anhand mehrerer Messungen zu prüfen.

Messprinzip: Es ist zunächst der Quantisierungsfehler des 11-Bit-Wandlers zu berechnen. Anschließend werden im Bereich von 1 bis 10 V Gleichspannung zehn Messungen im Intervall von jeweils 1 V durchgeführt. Die Spannung wird dabei mit drei verschiedenen Geräten gemessen: Dem Feinmessgerät Keithley TRMS 179, dem analogen Multimeter Philips PM 2503 und mit dem AD-Wandler. Alle Messergebnisse werden in einer handschriftlichen Tabelle notiert. Anschließend wird für jeden der Tabelleneinträge der Messfehler für das Multimeter und den AD-Wandler bestimmt. Die Werte des Feinmessgeräts werden als Referenz genommen. Daraus werden dann die Standardabweichungen der beiden Messgeräte als Genauigkeitsmaß ermittelt.

Aufbau: Das Feinmessgerät, das Multimeter und der AD-Wandler werden an eine Spannungsquelle angeschlossen.

Messmittel: Feinmessgerät Keithley TRMS 179, Multimeter Philips PM 2503, A/D-Wandler.

### 3.2 Messwerte

Der Quantisierungsfehler wird nach der Formel

$$\Delta U = \frac{U_{max} - U_{min}}{2^n} \quad (3.1)$$

berechnet, wobei  $U_{min} = -10$  und  $U_{max} = 10$  ist. Da es sich um einen 11-Bit-Wandler handelt, beträgt  $n=11$ . Einsetzen in die Formel ergibt:

$$\Delta U = \frac{10V - (-10V)}{2^{11}} = \frac{10V + 10V}{2^{11}} = \frac{20V}{2^{11}} = 9,765 \cdot 10^{-3}V \quad (3.2)$$

Der Quantisierungsfehler beträgt somit 9,765 mV.

Die Messwerte der oben beschriebenen zehn Messungen sind in nachfolgender Tabelle aufgeführt:

Mess-Nr.	Keithley	Phillips	AD-Wandler
1	0,997	0,995	0,99609
2	1,995	1,920	1,992
3	3,007	2,88	2,998
4	3,996	4,02	3,984
5	4,975	5,0	4,986
6	5,991	6,0	5,976
7	6,994	6,99	6,992
8	7,980	7,99	7,968
9	9,007	8,99	8,994
10	10	9,92	9,99

Tabelle 3.1: Aufgabe 2

### 3.3 Auswertung

Für die Berechnung der Standardabweichung benutzen wir das Keithley-Messgerät als Bezugsnormale. Die Standardabweichung des Messgeräts von Phillips beträgt: 0.057585 V Die Standardabweichung des AD-Wandlers beträgt: 0.010529 V

### 3.4 Interpretation

Die hohe Standardabweichung des Phillips kommt hauptsächlich durch das im Vergleich zum A/D-Wandler ungenaue Ablesen des analogen Multimeters zustande. Selbst wenn man das

Multimeter derart abliest, dass der Zeiger mit seinem Spiegelbild auf dem hinter ihm liegenden Spiegel zusammenfällt, bleibt eine gewisse Restungenauigkeit. Die Standardabweichung des AD-Wandlers liegt sehr nahe bei dem theoretischen Quantisierungsfehler. Was sehr erfreulich ist.

# 4

## Genauigkeit der DA-Wandlung

Bestimmung der Genauigkeit der Digital Analogwandlers ME-RedLab USB-1208LLS.

### 4.1 Fragestellung, Messprinzip, Aufbau, Messmittel

Im vorigen Versuch wurde die Genauigkeit des Analog / Digitalwandlers gemessen und mit dem theoretischen Quantisierungsfehler verglichen. Dieser dritte Versuch befasst sich im gegensatz zum vorhergehenden mit der Genauigkeit des Digital-Analog-Wandlers. Es wird diesmal eine Spannung an dem Wandler digital eingestellt, welche er dann analog ausgibt. Bei Wandlungen vom Analogen ins Digitale findet stets eine Diskretisierung der kontinuierlichen Werte statt. Möchte man digitale(diskrete) Werte als analoge Spannung ausgeben, hat man wiederum einen Quantisierungsfehler. Dies hängt damit zusammen, dass man keine unendlich langen Bitstrings abspeichern kann. Der Digital-Analog Wandler müsste einen unendlich großen Speicher haben, um den exakten Wert auszugeben. Dies ist jedoch praktisch nicht umsetzbar, weshalb man sich mit endlichen Bitstrings begnügen muss. Das stellt jedoch kein Problem dar, da schon mit wenigen Bits eine Spannung, recht genau repräsentiert wird. So hat man Beispielsweise mit einem 8-Bit AD/DA Wandler über einen Spannungsbereich von einem Volt eine Genauigkeit von  $\approx \pm 3.91mV$ . Die Bitzahl eines AD/DA - Wandlers gibt also die Auflösung dessen an. In diesem Fall handelt es sich um einen 10 - Bit DA-Wandler, dessen Genauigkeit praktisch gemessen werden soll. Dieser gemessene Fehler wird dann mit dem theoretischen Quantisierungsfehler verglichen. Der Theoretische Fehler berechnet sich mit folgender Formel:

$$\Delta U = \frac{U_{max} - U_{min}}{2^n} \quad (4.1)$$

Bei  $U_{max} - U_{min}$  handelt es sich um den Bereich der maximal dargestellt werden kann.  $2^n$  n ist gerade die Anzahl an Bits des DA-Wandlers. Der DA-Wandler, der in diesem Versuch zum Einsatz kommt hat einen Mindestspannung von 0V und eine Höchstspannung von 5V. Auf diese Weise ergibt sich ein theoretischer Quantisierungsfehler von  $\approx \pm 4,88mV$ . Diesen Wert experimentell zu bestimmen wird eine Reihe von Spannungen von 0.5V bis 5.0V in 0.5V Schritten eingestellt. Die ausgegebene Spannung wird dann mit einem Feinmessgerät gemessen. Mit Hilfe der Werte des Feinmessgerätes und der eingestellten Spannung wird dann die Standardabweichung bestimmt. Diese wird dann als praktisch gemessener Quantisierungsfehler genommen.

## 4.2 Messwerte

Eingestellt	Gemessen
0.5	0.512
1.0	1.016
1.5	1.521
2.0	2.033
2.5	2.539
3.0	3.047
3.5	3.559
4.0	4.065
4.5	4.57
5.0	5.073

Tabelle 4.1: gemessene Werte

Errechnete Standardabweichung:  $0.0512022V \approx 51.2mV$

### **4.3 Auswertung und Interpretation**

Betrachtet man den Theoretischen Quantisierungsfehler von 4.88mV und die gemessenen Standardabweichung, dann lässt sich eine prozentuale Abweichung von 90% feststellen. Es besteht quasi keine Korrelation zwischen beiden Werten. Man muss annehmen, dass die Abweichung von ca. einem Faktor 10 aufgrund der Ungenauigkeit des Feinmessgeräts entstanden ist. Man müsste den Versuch eventuell mit einem genaueren Messgerät erneut durchführen.



# 5

## Zeitverhalten der DA wandlung

Ziel dieser Aufgabe ist es, eine Sinusspannung durch sequentiell hintereinander auf die Karte gelegte Werte zu simulieren:

### 5.1 Fragestellung, Messprinzip, Aufbau, Messmittel

Zur bearbeitung dieser Aufgabe wird zunächst ein Pythonscript erstellt, welches Digitale Werte einer Sinusschwingung errechnet und diese anschließend mit der Funktion

$$rl.cbVOut(0,0,101,np.sin(x)+2) \quad (5.1)$$

an den DA wandler ausgibt. Die Werte von x befinden sich gleichmäßig verteilt zwischen  $-Pi$  und  $+Pi$ . Das Ergebnis der Sinusfunktion wird noch +2 gerechnet, damit wir in keinem Fall einen Wert kleiner Null erhalten. anschließend ist noch zu beachten, dass nach jedem aufrufen dieser Methode das Pythonmodul einen kleinen Moment schlafen sollte, damit das Signal einen Moment anliegt und anhand des Oszilloskop besser interpretiert werden kann.

## 5.2 Ergebnis

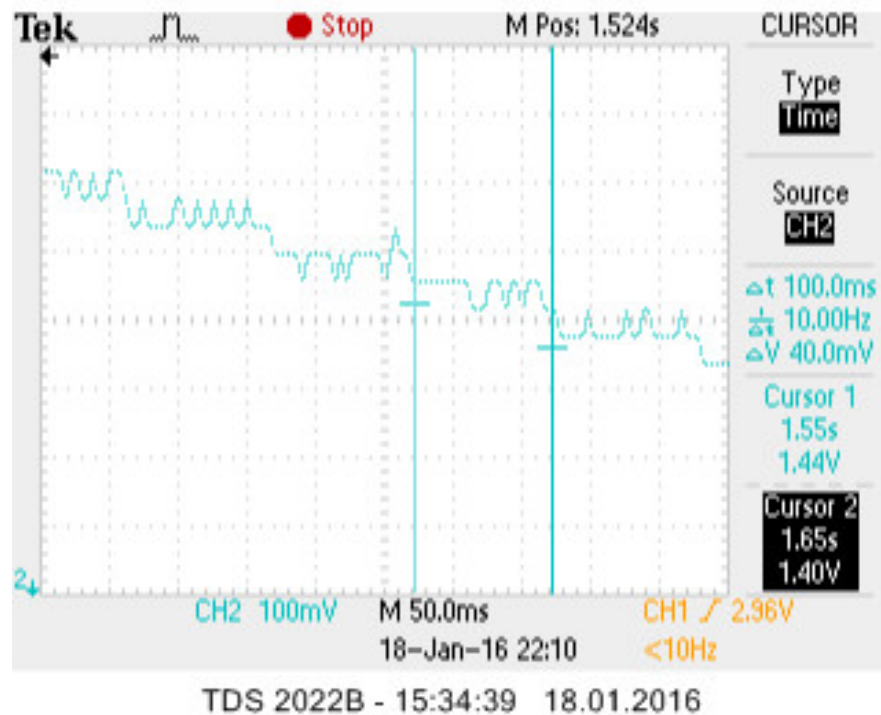


Abbildung 5.1: Ausgabe des Oszilloskops

## 5.3 Auswertung und Interpretation

In Abbildung 5.1 ist zu erkennen, dass unser Pythonscript nach anlegen eines neuen Pegels 100ms schläft, bevor es diesen wieder ändert. Diese 100ms entsprechen genau dem Intervall, in welchem neue Werte an den DA-Wandler gegeben wurden. Es kann anhand dieser Grafik keine Verzögerung des Umwandlungsprozesses erkannt werden. Um diese zu erkennen, sollte man eventuell höher takten, als nur mit 10Hz, wie es hier der Fall war. Zwischen den beiden Linien befindet sich eine Stufe der Sinusschwingung, bei dieser ist zu erkennen, dass es sich nicht um eine gerade handelt, sondern dass diese zwischen zwei werten schwankt. Bei dieser Schwankung handelt es sich wohl um den Quantisierungsfehler, als auch sehr um die Ungenauigkeit des Oszilloskops.

# 6

## Abtasttheorem

Dieser Versuch befasst sich mit dem Abtasttheorem, welches bei der Digitalisierung von Analogen Signalen eine essentielle Rolle spielt.

### 6.1 Fragestellung, Messprinzip, Aufbau, Messmittel

Bei der Digitalisierung von kontinuierlichen Signalen wird in einem gewissen Zeitintervall das Signal abgetastet. Das digitale Signal ergibt sich aus einer Multiplikation des kontinuierlichen Kurvenverlaufes und der Kammfunktion. Die Abstände der Impulse der Kammfunktion ist gerade die Zeitspanne in der abgetastet wird. Man kann sich vorstellen, dass bei einer zu geringen Abtastrate Information verloren geht. In der Signaltheorie kann erklärt werden, warum dies der Fall ist. Wie bereits erwähnt kann man die Abtastung einer Funktion(Signal) auch als Multiplikation von Funktion und Kammfunktion darstellen. Die Abtastfrequenz ist gerade die Frequenz der Kammfunktion. Nach der Modulationseigenschaft von Signalen entspricht die Multiplikation der Kammfunktion mit der abzutastenden Funktion einer Faltung der Spektren beider Signale. Das Spektrum der Kammfunktion ist gerade wieder eine Kammfunktion, jedoch mit einer anderen Frequenz. Es gilt also: Je höher die Abtastfrequenz, desto größer die Periodendauer im Spektrum der Kammfunktion und umgekehrt. Wird das Spektrum der zu diskretisierenden Funktion mit der Kammfunktion gefaltet, so wird dieses unendlich oft repliziert. An jedem Impuls entsteht also eine Kopie des Spektrums. Das Spektrum dieser diskreten Funktion ist nach der Abtastung periodisch. Die Periodendauer des Spektrums hängt von der Abtastfrequenz ab. Bei kleinerer Abtastzeit wird die Periode des Spektrums im diskretisierten Signal größer und umgekehrt. Die Spektren rücken also je nach Abtastfrequenz näher zusammen oder weiter auseinander. Wird zu gering abgetastet überlappen sich die Spektren und das Originalsignal kann nicht mehr ver-

lustfrei hergestellt werden. Dieses Phänomen nennt sich auch Aliasing. Damit kein Aliasing auftritt muss man beachten, dass ausreichend hoch abgetastet wird. Die minimale Abtastfrequenz ist gerade die doppelte Maximalfrequenz des Signals und nennt sich Nyquistfrequenz. Hält man bei der Abtastung die Nyquistfrequenz ein kommt es zu keinem Aliasing. Das Abtasttheorem besagt also, dass ein auf  $f_{max}$  bandbegrenzttes Signal mit einer Frequenz von größer  $2 \cdot f_{max}$  abgetastet werden muss, damit man es aus dem zeitdiskreten Signal wieder exakt rekonstruieren kann. In diesem Versuch wird ein Sinussignal von der halben Nyquistfrequenz bis hin zur Abtastfrequenz erhöht um zu sehen, was dies für Auswirkungen hat. Die Abtastfrequenz des AD-Wandlers beträgt  $80000\text{Hz}$ . Die Nyquistfrequenz beträgt somit genau  $4\text{kHz}$ . Die Frequenz des Signals wird in sieben Schritten erhöht. Die entsprechenden Spektren sind folgen zu sehen.

## 6.2 Messwerte

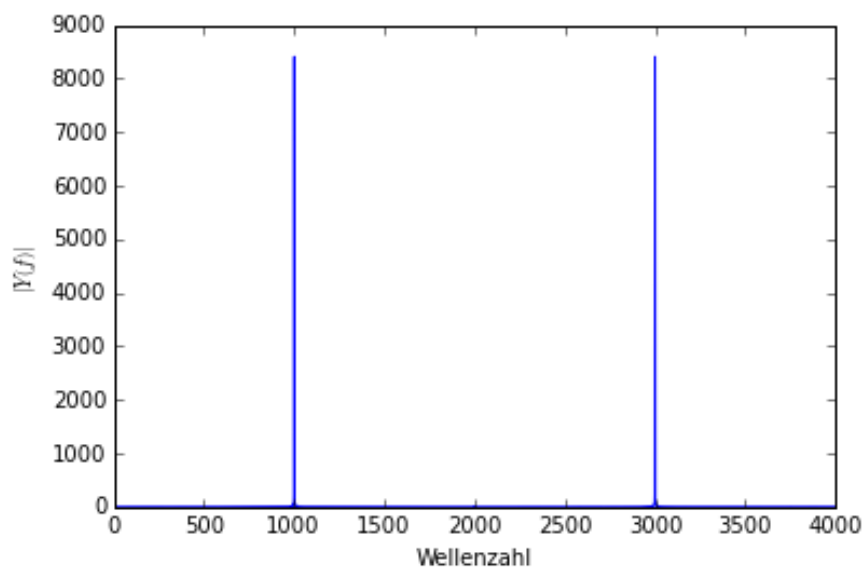


Abbildung 6.1: Frequenzbereich 2kHz

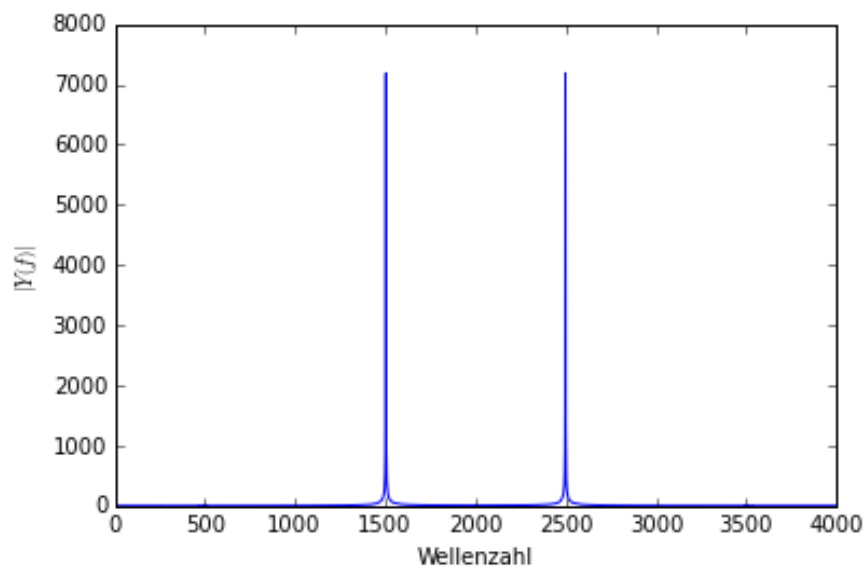


Abbildung 6.2: Frequenzbereich 3kHz

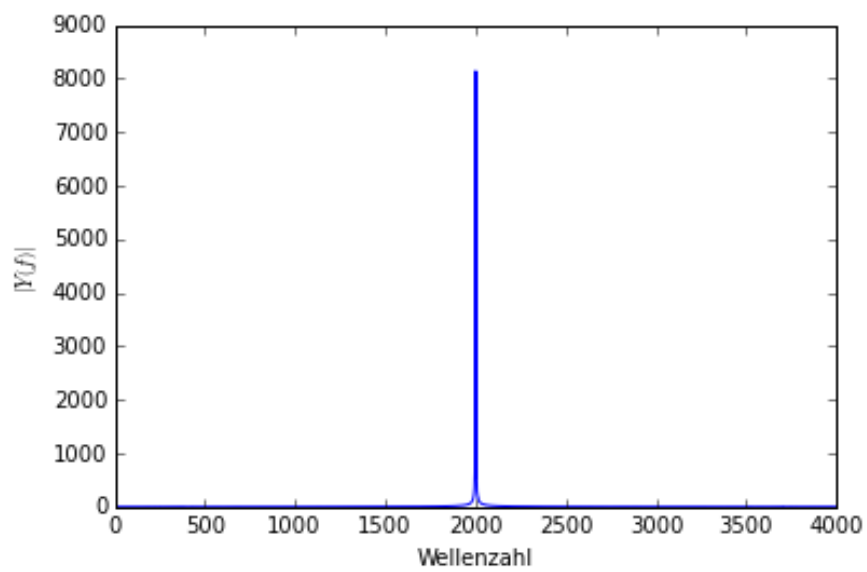


Abbildung 6.3: Frequenzbereich 4kHz

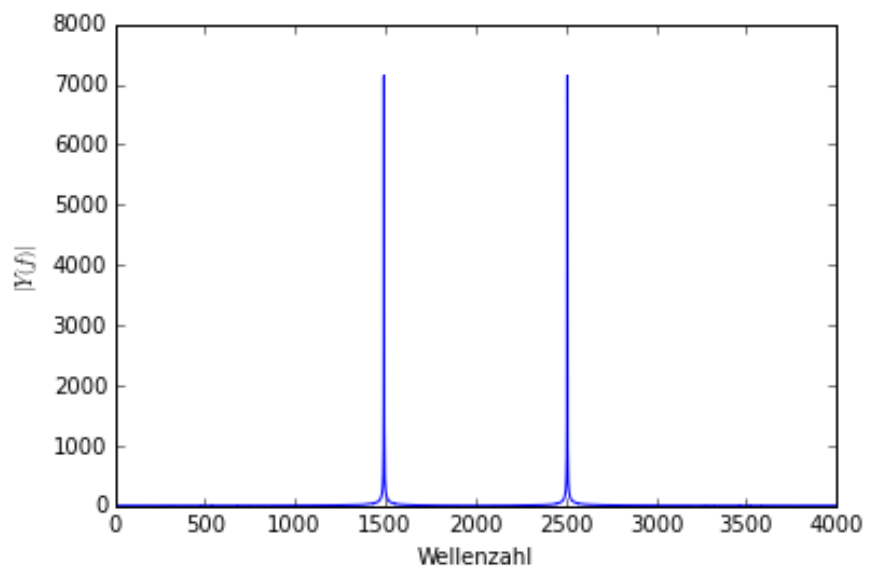


Abbildung 6.4: Frequenzbereich 5kHz

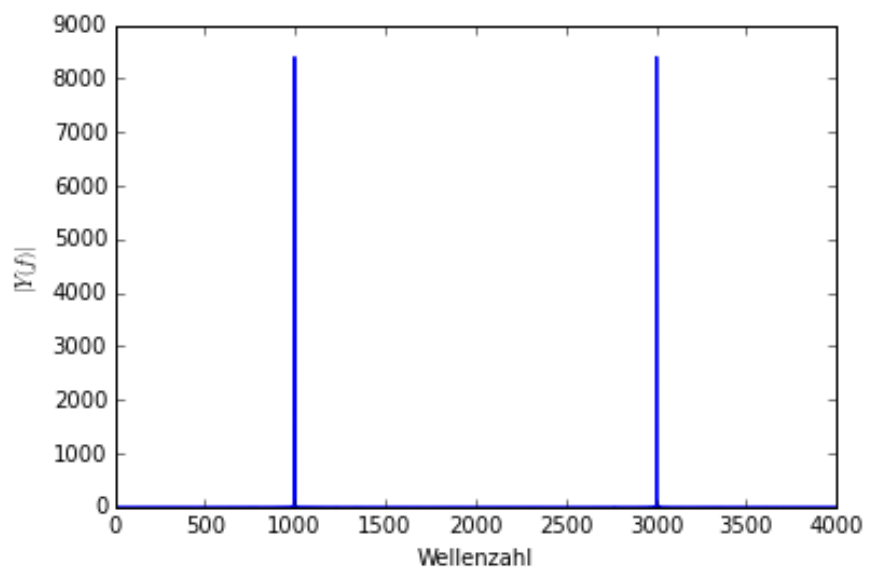


Abbildung 6.5: Frequenzbereich 6kHz

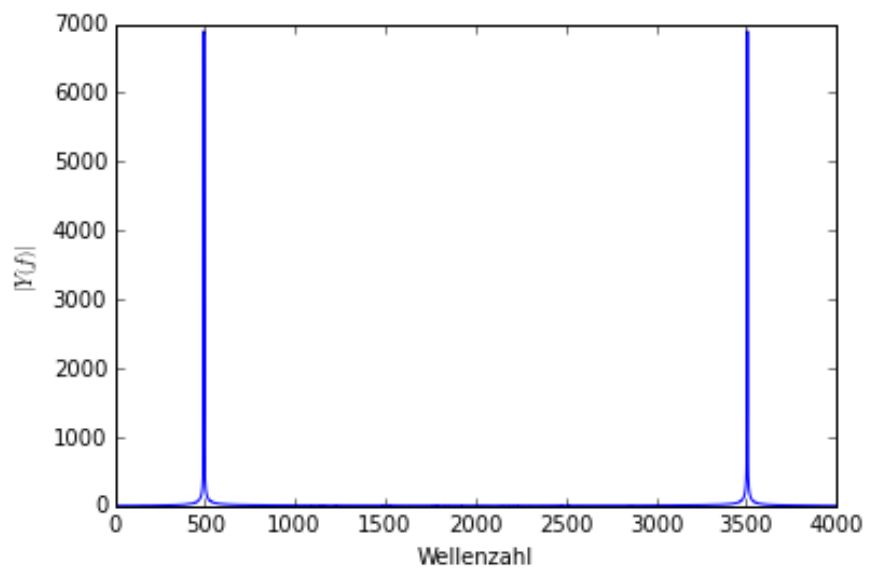


Abbildung 6.6: Frequenzbereich 7kHz

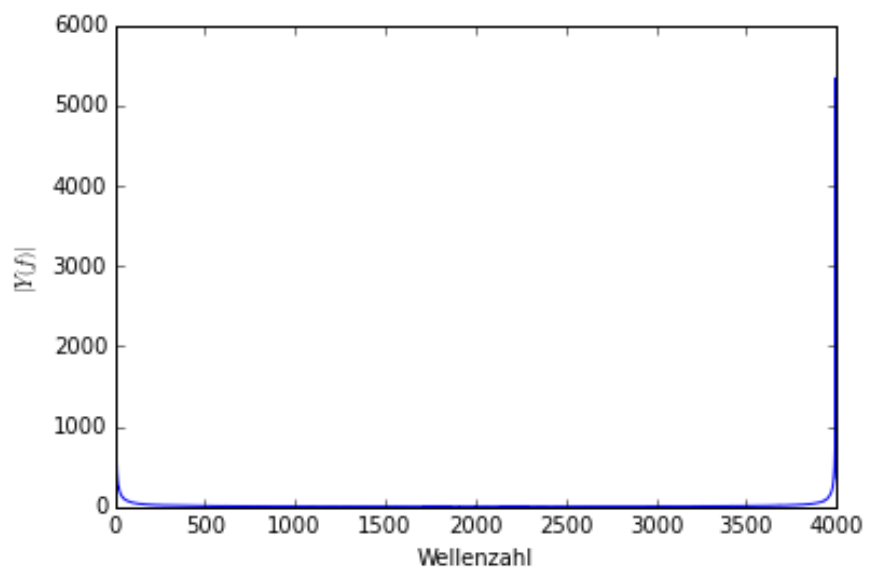


Abbildung 6.7: Frequenzbereich 8kHz

## 6.3 Auswertung und Interpretation

Auf der x-Achse ist die jeweilige Wellenzahl aufgetragen. Die entsprechenden Frequenzen stehen unterhalb der Grafik. In Abbildung 6.1 ist das Spektrum einer Sinusschwinung mit 2000Hz zu sehen. Dies entspricht dem Impuls bei der Wellenzahl 1000. Der andere Impuls bei Wellenzahl 3000 ist bereits die Nächste Periode im Spektrum. Er ist quasi eine Kopie des Spektrums bei Wellenzahl 1000. In diesem Fall liegt die Maximalfrequenz des Signals unterhalb der Nyquistfrequenz des AD-Wandlers und es kommt nicht zu Aliasing. In der nächsten Abbildung wurde die Frequenz der Sinusschwinung erhöht, was ein zusammenrücken der Spektren zufolge hat. Auch nun überlappen sich die Signale in der Fourierdomäne noch nicht, da die Frequenz der Schwinung noch unterhalb der Nyquistfrequenz liegt. In der nächsten Abbildung liegen die Spektren genau übereinander, denn die Frequenz der Sinusschwinung ist gerade die Nyquistfrequenz. Obwohl sich die Spektren genau überlappen könnte man nun noch das Signal wiederherstellen, da die halbe Abtastfrequenz gleich und nicht kleiner als die maximale Frequenz der Sinusschwinung ist. In Abbildung 6.4 sind die Spektren aneinander vorbeigelaufen. Sie überlappen sich also und Aliasing kommt zum vollen Zuge, da die Frequenz der angelegten Sinusschwinung nun größer als die halbe Abtastfrequenz ist. Das Originalsignal kann nun nicht mehr ohne weiteres Verlustfrei hergestellt werden. Es schleichen sich Frequenzen ein, die im Ursprünglichen Signal gar nicht vorhanden waren. Der Impuls bei Wellenzahl 2500 repräsentiert die Schwinung mit 5000Hz. Der Impuls bei Wellenzahl 1500 ist eine neu hinzugekommene Schwinung, die im Originalsignal nicht vorhanden war. In den weiteren Abbildungen ist zu sehen, wie die Impulse immer weiter auseinanderrücken. Würde man die Frequenz weiterhin erhöhen müsste nach dem letzten Bild wieder ein neuer Impuls einer anderen Periode des Spektrums ins Bild rücken.



# Anhang

## A.1 Quellcode

### A.1.1 Quellcode Versuch 1

```
1 import numpy as np
2
3 def stdabw(a,b,i=0):
4     stdab = 0
5     for k in range(10):
6         current = (a[k][0] - b[k][i])**2
7         stdab = stdab + current
8     stdab = np.sqrt(stdab / (len(a)-1))
9     print(stdab)
10
11
12 keithley = np.array([0.512, 1.016, 1.521, 2.033, 2.539, 3.047, 3.559, 4.065, 4.57, 5.073])
13 DA = np.linspace(0.5,5.0, 10)
14 #stdabw(keithley,DA)
15
16
17 afg2 = [(0.997 , 0.995 , 0.99609 ),
18 (1.995 , 1.920 , 1.992 ),
19 (3.007 , 2.88 , 2.998 ),
20 (3.996 , 4.02 , 3.984 ),
21 (4.975 , 5.0 , 4.986 ),
22 (5.991 , 6.0 , 5.976 ),
23 (6.994 , 6.99 , 6.992 ),
24 (7.980 , 7.99 , 7.968 ),
25 (9.007 , 8.99 , 8.994 ),
26 (10 , 9.92 , 9.99 )]
27
28 stdabw(afg2,afg2,2)
```





## A.2 Messergebnisse

### AD-Wandler

18.01.2016

M. Müller

### Versuch 2

Q Fehler  
Theoretisch:  $\Delta U = \frac{10+10}{2^{11}} = \frac{20}{2^{11}} = 9,765625 \cdot 10^{-3} \text{ V}$

<u>Messungen</u>	Keilker	Philipp's (Analog)	AD-Wandler
1. 0,997	0,995	0,99609	
2. 1,995	1,920	1,992	
3. 3,007	2,88	2,998	
4. 3,996	4,02	3,988	
5. 4,975	5,0	4,986	
6. 5,991	6,0	5,976	
7. 6,994	6,99	6,992	
8. 7,980	7,99	7,968	
9. 8,007	8,99	8,984	
10. 10,000	9,92	9,990	

### Versuch 3

Theoret. Quantität:  $\Delta U = \frac{J}{2^{11}} = 4,883 \text{ mV}$

DA	Keilker		
1. 0,5	0,572	9. 4,5	4,570
2. 1,0	1,016	10. 5,0	5,074
3. 1,5	1,521		
4. 2,0	2,213		
5. 2,5	2,539		