



**Hochschule Konstanz**  
Technik, Wirtschaft und Gestaltung

**Signale, Systeme und Sensoren**

# **Digitalisierung**

**D. Wollmann, V. Bratulescu**

**Konstanz, 15. Januar 2021**

## **Zusammenfassung (Abstract)**

Thema:	Digitalisierung	
Autoren:	D. Wollmann	da161wol@htwg-konstanz.de
	V. Bratulescu	vl161bra@htwg-konstanz.de
Betreuer:	Prof. Dr. Matthias O. Franz	mfranz@htwg-konstanz.de
	Jürgen Keppler	juergen.keppler@htwg-konstanz.de
	Mert Zeybek	me431zey@htwg-konstanz.de

In dem fünften Versuch geht es um die Umwandlung von analogen in digitale Daten. Die Lernziele dieses Versuches sind zum einen die Messgenauigkeit der AD- und DA-Wandlung zu untersuchen, wie auch praktische Erfahrungen mit dem Abtasttheorem zu sammeln.

# 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 Versuch 1: Genauigkeit der AD-Wandlung</b>	<b>2</b>
2.1 Fragestellung, Messprinzip, Aufbau, Messmittel . . . . .	2
2.2 Messwerte . . . . .	3
2.3 Auswertung . . . . .	3
2.4 Interpretation . . . . .	4
<b>3 Versuch 2: Genauigkeit der DA-Wandlung</b>	<b>5</b>
3.1 Fragestellung, Messprinzip, Aufbau, Messmittel . . . . .	5
3.2 Messwerte . . . . .	5
3.3 Auswertung . . . . .	6
3.4 Interpretation . . . . .	6
<b>4 Versuch 3: Abtasttheorem</b>	<b>7</b>
4.1 Fragestellung, Messprinzip, Aufbau, Messmittel . . . . .	7
4.2 Messwerte . . . . .	7
4.3 Auswertung . . . . .	7
4.4 Interpretation . . . . .	8
<b>Anhang</b>	<b>9</b>
A.1 Quellcode . . . . .	9
A.1.1 Quellcode Versuch 2 . . . . .	9

A.1.2 Quellcode Versuch 3 . . . . .	10
A.2 Messergebnisse . . . . .	10
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>11</b>

# **Abbildungsverzeichnis**

# Tabellenverzeichnis

2.1	Die gemessenen Spannungen der drei Geräten . . . . .	3
2.2	Die berechneten Messwerte der jeweiligen Geräten . . . . .	3
3.1	Die gemessenen Spannungen des DA-Wandlers . . . . .	6
4.1	Ausgewählte und reale Abtastfrequenz . . . . .	7

# Listingverzeichnis

5.1	Skript Versuch 1a . . . . .	9
5.2	Skript Versuch 1b . . . . .	10

# Kapitel 1

## Einleitung

In dem fünften Versuch geht es um die Umwandlung von analogen in digitale Daten. Die Lernziele dieses Versuches sind zum einen die Messgenauigkeit der AD- und DA-Wandlung zu untersuchen, wie auch praktische Erfahrungen mit dem Abtasttheorem zu sammeln.

Im ersten Versuch soll der theoretische Quantisierungsfehler des AD-Wandlers, wie auch die Standardabweichung für zwei verschiedene Messgeräte berechnet werden.

Im zweiten Versuch werden die gleiche Berechnungen für ein DA-Wandler durchgeführt. Dabei wird die Standardabweichung eines Oszilloskops berechnet.

Der letzte Teil der Versuchsreihe beschäftigt sich mit dem Abtasttheorem.



# **Kapitel 2**

## **Versuch 1: Genauigkeit der AD-Wandlung**

### **2.1 Fragestellung, Messprinzip, Aufbau, Messmittel**

In diesem Versuch soll der theoretische Quantisierungsfehler eines 11-Bit-AD-Wandlers berechnet werden. Zusätzlich sollen verschiedene Spannungen mit einem Feinmessgerät Keithley TRMS 179, einem Multimeter Philips PM 2503 und mit dem AD-Wandler gemessen werden. Des Weiteren soll von dem Multimeter und dem AD-Wandler der Messfehler sowie die Standardabweichung zum Feinmessgerät bestimmt werden.

## 2.2 Messwerte

In Tabelle 2.1 werden die gemessene Spannungen zwischen 0V und 10V dargestellt.

Spannung [V]	AD-Wandler [V]	PM 2503 [V]	TRMS 179 [V]
1	1.0166	1.022	1.027
2	2.07	2.07	2.079
3	3.076	3.071	3.084
4	4.082	4.07	4.09
5	5	4.98	5
6	6.006	5.98	6.007
7	7.041	7.04	7.061
8	8.048	8.04	8.068
9	8.965	8.95	8.979
10	9.990	10	10.034

Tabelle 2.1: Die gemessenen Spannungen der drei Geräten

## 2.3 Auswertung

In Tabelle 2.2 werden die berechneten Messfehler angezeigt.

Spannung [V]	$e_i$ AD-Wandler [V]	$e_i$ PM 2503 [V]
1	0,0104	0,005
2	0,009	0,009
3	0,008	0,013
4	0,008	0,02
5	0	0,02
6	0,001	0,027
7	0,02	0,021
8	0,021	0,028
9	0,014	0,029
10	0,044	0,034

Tabelle 2.2: Die berechneten Messwerte der jeweiligen Geräten

Der theoretische Quantisierungsfehler für den AD-Wandler beträgt

$$\Delta U_{\text{AD}} = \frac{10\text{V} - (-10\text{V})}{2^{11}} = 0.0098\text{V}$$

Für das Multimeter ergibt sich aus den Messwerten die folgende Standardabweichung

$$S_{\text{M}} = 0.0207\text{V}$$

und für den AD-Wandler

$$S_{\text{AD}} = 0.0191\text{V}$$

## 2.4 Interpretation

Anhand der Standardabweichung können wir daraus schließen, dass der AD-Wandler minimal genauer ist, als der Multimeter. Da die Standardabweichungen zueinander sehr ähnlich sind, lässt sich anhand dieser Messwerte nicht sagen, welches Messgerät die besseren Ergebnisse liefert. Die Standardabweichung des Multimeters lässt sich wahrscheinlich, auf Fertigungstoleranzen zurückführen und die des AD-Wandlers auf das Auftreten von Jitter.

# **Kapitel 3**

## **Versuch 2: Genauigkeit der DA-Wandlung**

### **3.1 Fragestellung, Messprinzip, Aufbau, Messmittel**

In diesem Versuch soll die Spannung eines 10-Bit-DA-Wandlers von 0.5V bis 5V mithilfe eines Oszilloskops gemessen werden. Dabei werden ebenfalls der theoretische Quantisierungsfehler und die Standardabweichung berechnet.

### **3.2 Messwerte**

In Tabelle 3.1 werden die gemessenen Spannungen im Spannungsbereich von 0.5V bis 5V dargestellt.

AD-Wandler [V]	Oszilloskop [V]	Abweichung [V]
0.5	0.566	0,066
1	1.072	0,072
1.5	1.578	0,078
2	2.096	0,096
2.5	2.609	0,109
3	3.121	0,121
3.5	3.634	0,134
4	4.139	0,139
4.5	4.635	0,135
5	5.127	0,127

Tabelle 3.1: Die gemessenen Spannungen des DA-Wandlers

### 3.3 Auswertung

Der theoretische Quantisierungsfehler für den DA-Wandler beträgt

$$\Delta U_{\text{DA}} = \frac{5V - 0V}{2^{10}} = 0.00488V$$

Für den DA-Wandler ergibt sich aus den Messwerten die folgende Standardabweichung

$$S_{\text{DA}} = 0.1169V$$

### 3.4 Interpretation

Die Standardabweichung liegt deutlich über dem theoretischen Quantisierungsfehler, was darauf schließen lässt, dass die Umwandlung eines digitalen in ein analoges Signal sehr ungenau ist. Thermisches Rauschen begünstigt den Fehler.

# Kapitel 4

## Versuch 3: Abtasttheorem

### 4.1 Fragestellung, Messprinzip, Aufbau, Messmittel

In diesem Versuch soll eine Abtastfrequenz im Intervall [6000, 8000] ausgewählt und mithilfe eines Python-Programms, die tatsächliche Abtastfrequenz des AD-Wandlers ausgelesen werden. Anschließend soll die Nyquist-Frequenz angegeben werden. Von der halben bis zur doppelten Nyquist-Frequenz soll die Frequenz variiert und mithilfe eines Sinusgenerators in 7 Schritten die Kurven geplottet werden. Des Weiteren soll eine Diskussion über die Ergebnisse stattfinden.

### 4.2 Messwerte

Siehe Moodle plots\_aufg5\_abtasttheorem.pdf.

### 4.3 Auswertung

In Tabelle 4.1 wird die ausgewählte und tatsächliche Abtastfrequenz gegenübergestellt, wie auch die Nyquist-Frequenz angegeben.

Ausgewählte Abtastfrequenz [Hz]	Tatsächliche Abtastfrequenz [Hz]	Nyquist-Frequenz [Hz]
7000	7009	3504.5
8000	8021	4010.5

Tabelle 4.1: Ausgewählte und reale Abtastfrequenz

## 4.4 Interpretation

Das Abtasttheorem besagt, dass die Abtastfrequenz mindestens das Doppelte der Bandbreite betragen, damit kein Aliasing auftritt. Die Bedingung wird in den Abbildungen 6.1 bis 6.3 für die Frequenzen 2005Hz, 3000Hz und 4010Hz erfüllt. In den Abbildungen 6.4 bis 6.7 ist die Bedingung nicht erfüllt und es kommt zu Aliasing. Dies bedeutet, dass das kontinuierliche Signal nicht mehr fehlerfrei aus dem abgetasteten Signal rekonstruiert werden kann.

# Anhang

## A.1 Quellcode

### A.1.1 Quellcode Versuch 2

```
1 # -*- coding: utf-8 -*-
2 """
3 Created on Fri Jan 15 12:17:10 2021
4
5 @author: danie
6 """
7
8 import math
9
10 uAd = [1.0166, 2.07, 3.076, 4.082, 5, 6.006, 7.041, 8.047, 8.965, 9.99]
11 uPm = [1.022, 2.07, 3.071, 4.07, 4.98, 5.98, 7.04, 8.04, 8.95, 10.034]
12 uRef = [1.027, 2.079, 3.084, 4.09, 5, 6.007, 7.061, 8.068, 8.979, 10.034]
13
14 index = [0,1,2,3,4,5,6,7,8,9]
15
16 sAd = 0
17 sPm = 0
18
19 n = 10
20
21 for i in index:
22     sAd = sAd + math.pow((uRef[i] - uAd[i]), 2)
23     sPm = sPm + math.pow((uRef[i] - uPm[i]), 2)
24
25 sAd = math.sqrt(1/(n-1) * sAd)
26 sPm = math.sqrt(1/(n-1) * sPm)
27
28 print(sAd)
```



```
29 print(sPm)
```

Listing 5.1: Skript Versuch 1a

### A.1.2 Quellcode Versuch 3

```
1 # -*- coding: utf-8 -*-
2 """
3 Created on Fri Jan 15 13:20:43 2021
4
5 @author: danie
6 """
7
8 import math
9
10 uAd = [0.566, 1.072, 1.578, 2.096, 2.609, 3.121, 3.634, 4.139, 4.635, 5.127]
11 uRef = [0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5]
12
13 index = [0,1,2,3,4,5,6,7,8, 9]
14
15 sAd = 0
16
17 n = 10
18
19 for i in index:
20     sAd = sAd + math.pow((uRef[i] - uAd[i]), 2)
21
22 sAd = math.sqrt(1/(n-1) * sAd)
23
24 print(sAd)
```

Listing 5.2: Skript Versuch 1b

## A.2 Messergebnisse

SSS Versuch 5

$$\boxed{2} \quad \Delta U = \frac{10V - (-10V)}{2^{11}} = 0,00976V$$

Spannung	AD-Wandler	PM 2503	TRMS 129
1V	1,0186	1,022	1,027
2V	2,070	2,070	2,079
3V	3,076	3,071	3,084
4V	4,082	4,070	4,090
5V	5,000	4,980	5,000
6V	6,006	5,980	6,007
7V	7,041	7,040	7,061
8V	8,047	8,040	8,068
9V	8,965	8,950	8,975
10V	9,990	10,000	10,034

$$\boxed{3} \quad \Delta U = \frac{5V - 0V}{2^{10}} = 0,00488$$

0,5V	0,566
1,0V	1,072
1,5V	1,578
2,0V	2,096
2,5V	2,609
3,0V	3,121
3,5V	3,634
4,0V	4,139
4,5V	4,635
5,0V	5,127
AD-Wert	082i

$\boxed{5}$

Samplingrate: 2000  $\rightarrow$  7009  
(8000  $\rightarrow$  8021)

Nyquistfrequ: 7009  $\rightarrow$  3504,5  
(8021  $\rightarrow$  4010,5)

1. 1752	5. 5000
2. 2000	6. 6000
3. 3000	7. 7009
4. 4000	

*0.92*