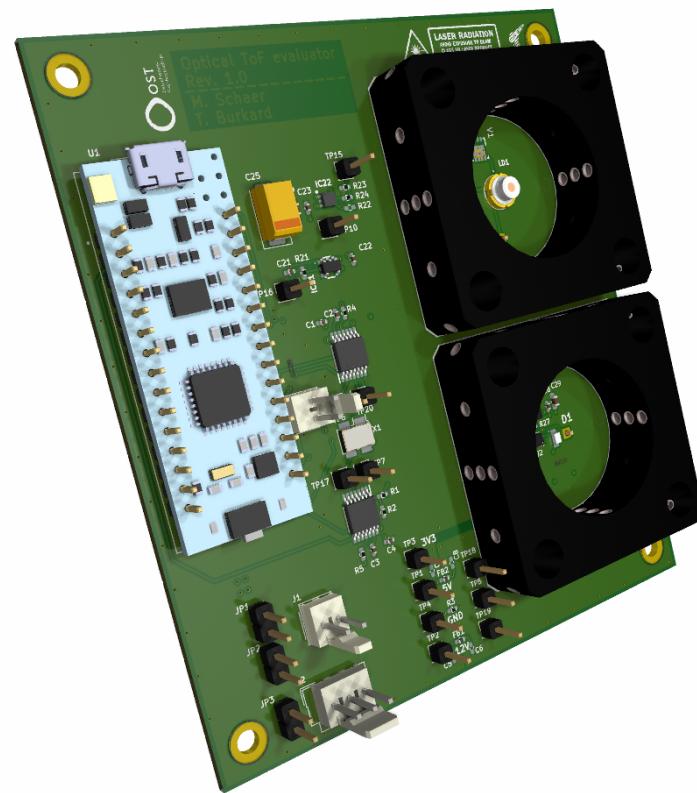


# DIY Optische ToF Distanzmessung

CAS Sensorik und Sensor Signal Conditioning

**Matthias Schär, Timon Burkard**  
OST – Ostschweizer Fachhochschule

18. Januar 2025



# **CAS Sensorik und Sensor Signal Conditioning an der OST – Ostschweizer Fachhochschule**

<b>Titel</b>	<b>DIY Optische ToF Distanzmessung</b>
<b>Diplomandin/Diplomand</b>	<b>Matthias Schär, Timon Burkard</b>
<b>Studiengang</b>	<b>CAS Sensorik und Sensor Signal Conditioning</b>
<b>Semester</b>	<b>HS24</b>
<b>Dozentin/Dozent</b>	<b>Prof. Guido Keel, Michael Lehmann</b>

## **Abstract**

Die vorliegende Projektarbeit befasst sich mit der Entwicklung eines...

Ort, Datum Rapperswil, 18. Januar 2025

© Matthias Schär, Timon Burkard, OST – Ostschweizer Fachhochschule

---

Alle Rechte vorbehalten. Die Arbeit oder Teile davon dürfen ohne schriftliche Genehmigung der Rechteinhaber weder in irgendeiner Form reproduziert noch elektronisch gespeichert, verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Sofern die Arbeit auf der Website der Ostschweizer Fachhochschule online veröffentlicht wird, können abweichende Nutzungsbedingungen unter Creative-Commons-Lizenzen gelten. Massgebend ist in diesem Fall die auf der Website angezeigte Creative-Commons-Lizenz.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>11</b>
<b>2 Theorie</b>	<b>12</b>
2.1 Time of Flight . . . . .	12
2.2 Photostrom . . . . .	13
2.2.1 Berechnung mit RLD94PZJ5 und BPV23NF . . . . .	13
2.2.2 Berechnung mit RLD65NZX1 und NJL6401R-3 . . . . .	14
2.2.3 Berechnung mit Empfangs-Linse . . . . .	14
2.2.4 Erwarteter Lichtstrom . . . . .	15
2.3 Transimpedanzverstärker . . . . .	17
<b>3 Konzept</b>	<b>18</b>
3.1 Signalkette . . . . .	18
3.2 Zeitmessung . . . . .	19
3.3 Vorgehensweise . . . . .	19
<b>4 Simulationen</b>	<b>21</b>
4.1 Laser Treiber . . . . .	21
4.2 Transimpedanzverstärker . . . . .	22
<b>5 Umsetzung</b>	<b>25</b>
5.1 Schaltungen . . . . .	25
5.1.1 Selective Input Voltage . . . . .	25
5.1.2 Nucleo Board . . . . .	26
5.1.3 TDC Electrical Signal . . . . .	27
5.1.4 TDC Optical Signal . . . . .	27
5.1.5 Oscillator For TDCs . . . . .	28
5.1.6 Power Supply Separation . . . . .	29
5.1.7 Laser Driver . . . . .	30
5.1.8 Photo Receiver . . . . .	30
5.1.9 Decoupling Capacitors . . . . .	31
5.2 Layout . . . . .	32
5.3 3D View . . . . .	33
5.4 Fabrikation . . . . .	33
5.5 Firmware . . . . .	34
<b>6 Messungen</b>	<b>37</b>
6.1 Elektrische Messungen . . . . .	37
6.1.1 GPIO Toggle mit HAL . . . . .	37
6.1.2 GPIO Toggle ohne HAL . . . . .	40
6.1.3 Unterschiedliche Kabellängen . . . . .	43
6.1.4 Mode 1 vs. Mode 2 . . . . .	45
6.1.5 Timer Output . . . . .	47
6.1.6 Unterschiedliche Clock-Konfigurationen . . . . .	49
6.2 Optische Messungen . . . . .	52
6.2.1 Signalpfad Sender . . . . .	52
6.2.2 ToF-Messungen via Spiegel . . . . .	54
6.2.3 ToF-Messungen via Wand . . . . .	60

<b>7 Fazit</b>	<b>61</b>
<b>8 Anhang</b>	<b>62</b>
8.1 TDC Treiber . . . . .	62
8.2 Python Analyse . . . . .	70
8.3 Schema . . . . .	74
8.4 Stückliste . . . . .	77
8.5 Layout . . . . .	78
8.6 Komponenten-Platzierung . . . . .	82
8.7 3D View . . . . .	84
8.8 Fotos Demonstrator . . . . .	85

# Abkürzungsverzeichnis

**ADC** Analog to Digital Converter. 16

**AMS** Analog/Mixed Signal. 19

**CPU** Central Processing Unit. 35, 36, 38, 39, 44, 45

**DIY** Do It Yourself. 9

**DSO** Digital Storage Oscilloscope. 35, 37, 38, 40, 41, 50, 53, 54

**FW** Firmware. 32

**GPIO** General Purpose Input/Output. 25, 33, 35–42, 44–47, 50

**HAL** Hardware Abstraction Layer. 35–41, 44

**HSI** High Speed Internal. 46–48

**IC** Integrated Circuit. 17, 33

**MCU** Microcontroller Unit. 16–18, 24–26, 33, 35, 38, 44, 45, 50, 53, 58

**PCB** Printed Circuit Board. 22, 30, 31, 52

**PLL** Phase-Locked Loop. 47–49

**SPI** Serial Peripheral Interface. 24, 25, 33

**TDC** Time to Digital Converter. 9, 17, 24–28, 33, 36, 37, 39, 40, 43–46, 50, 54, 56, 60, 64, 68

**TIA** Trans-Impedance Amplifier. 15, 20–22, 27, 28, 30, 57, 58

**ToF** Time of Flight. 9, 10, 16, 17, 20, 23, 31, 32, 69, 70

**UART** Universal Asynchronous Receiver/Transmitter. 36, 39

**USB** Universal Serial Bus. 24

# Abbildungsverzeichnis

1	Visualisierung von a: direct ToF und b: indirect ToF . . . . .	12
2	Linse von QIOPTIQ . . . . .	15
3	Beschaltung Operationsverstärker als TIA . . . . .	17
4	Konzeptioneller Signalpfad . . . . .	18
5	Konzept Betrieb TDC rein elektrisch . . . . .	19
6	Simulation Laser-Treiber - Schema . . . . .	21
7	Simulation Laser-Treiber - Plot . . . . .	22
8	Simulation TIA - Schema . . . . .	22
9	Simulation TIA - Plot . . . . .	23
10	Simulation TIA - Plot ohne CF . . . . .	24
11	Selective Input Voltage . . . . .	25
12	Nucleo Board . . . . .	26
13	TDC Electrical Signal . . . . .	27
14	TDC Optical Signal . . . . .	28
15	Oscillator for TDCs . . . . .	29
16	Power Supply Separation . . . . .	29
17	Laser Driver . . . . .	30
18	Photo Receiver . . . . .	31
19	Decoupling Capacitors . . . . .	31
20	Innerer Layer 1 mit Vermerken zum Speisungskonzept . . . . .	32
21	3D View Top . . . . .	33
22	Demonstrator von vorne ohne Linse . . . . .	34
23	Aufbau Firmware-Projekt . . . . .	34
24	Pin-Konfiguration des STM32F042K6 . . . . .	36
25	GPIO Toggle mit HAL - Histogramm . . . . .	38
26	GPIO Toggle mit HAL - Boxplot . . . . .	39
27	GPIO Toggle mit HAL - DSO . . . . .	39
28	GPIO Toggle mit HAL - DSO (Zoom) . . . . .	40
29	GPIO Toggle ohne HAL - Histogramm . . . . .	41
30	GPIO Toggle ohne HAL - Boxplot . . . . .	42
31	GPIO Toggle ohne HAL - DSO . . . . .	42
32	GPIO Toggle ohne HAL - DSO (Zoom) . . . . .	43
33	Unterschiedliche Kabellängen . . . . .	44
34	TDC Mode 1 . . . . .	45
35	TDC Mode 2 . . . . .	46
36	Default Clock-Configuration . . . . .	48
37	Clock-Configuration HSI mit PLL 16 MHz . . . . .	50
38	Clock-Configuration HSI48 48 MHz . . . . .	50
39	PLL-Jitter . . . . .	51
40	Messung Signalpfad Sender: <code>start_op</code> , <code>LD_pulse</code> , FET-Gate . . . . .	52
41	Messung Signalpfad Sender: Strom durch Laser-Diode . . . . .	53
42	Mess-Setup mit Spiegel . . . . .	54
43	Laser Abstrahl-Charakteristik . . . . .	54
44	Laser-Ausrichtung . . . . .	55
45	Laser-Ausrichtung angepasst . . . . .	55
46	Initiale Spiegelmessung mit DSO . . . . .	56
47	Unterschiedliche Distanzen zum Spiegel - Plot . . . . .	57

48	Unterschiedliche Distanzen zum Spiegel - Plot mit linearer Interpolation . . . . .	58
49	TIA-Ausgang und Komparator-Schaltschwelle bei 12 cm . . . . .	59
50	TIA-Ausgang und Komparator-Schaltschwelle bei 30 cm . . . . .	60
51	Schema S.1/3 . . . . .	74
52	Schema S.2/3 . . . . .	75
53	Schema S.3/3 . . . . .	76
54	PCB Layout Top . . . . .	78
55	PCB Layout Innen 1 . . . . .	79
56	PCB Layout Innen 2 . . . . .	80
57	PCB Layout Bottom . . . . .	81
58	PCB Komponenten-Platzierung Top . . . . .	82
59	PCB Komponenten-Platzierung Bottom . . . . .	83
60	3D View Top . . . . .	84
61	3D View Bottom . . . . .	84
62	Demonstrator von oben . . . . .	85
63	Demonstrator von oben ohne Linse . . . . .	85
64	Demonstrator von vorne . . . . .	86
65	Demonstrator von vorne ohne Linse . . . . .	86
66	Demonstrator von unten . . . . .	87

# Formelverzeichnis

1	Eintreffende Lichtleistung . . . . .	13
2	Strahlungsintensität . . . . .	13
3	Raumwinkel . . . . .	13
4	Photostrom . . . . .	13
5	Werte des RLD94PZJ5 . . . . .	13
6	Werte des BPV23NF . . . . .	13
7	Nummerische Resultate mit RLD94PZJ5 und BPV23NF . . . . .	14
8	Werte des RLD65NZX1 . . . . .	14
9	Werte des NJL6401R-3 . . . . .	14
10	Nummerische Resultate mit RLD65NZX1 and NJL6401R-3 . . . . .	14
11	Vergrösserung der Empfangsfläche durch Linse . . . . .	15
12	Erhöhte Sendeleistung bei der Laser-Diode . . . . .	16
13	Photostrom Szenario 1 . . . . .	16
14	Modell Abstrahlung Laserdiode . . . . .	16
15	Photostrom Szenario 2 . . . . .	16
16	Übertragungsfunktion TIA . . . . .	17
17	Maximale räumliche Auflösung des TDC7200 . . . . .	19
18	TIA Zeitkonstante . . . . .	23
20	GPIO Toggle mit HAL . . . . .	38
21	GPIO Toggle ohne HAL . . . . .	41
22	Zurückrechnen auf Kabellänge . . . . .	44
23	Mode 1 vs. Mode 2 . . . . .	47
24	GPIO-Schalten Verzögerungszeit . . . . .	48
25	GPIO Toggle mit Timer-Output . . . . .	49
26	GPIO-Schalten Verzögerungszeiten . . . . .	51
27	Berechnung Strom durch Laser-Diode . . . . .	53
28	Berechnung Strom durch Laser-Diode (tatsächlich) . . . . .	53
29	Theoretisch erwartete Laufzeit-Änderung . . . . .	57

# Tabellenverzeichnis

1	Unterschiedliche Kabellängen . . . . .	44
2	Kabellängen zurückgerechnet . . . . .	45
3	Mode 1 vs. Mode 2 . . . . .	47
4	Unterschiedliche Clock-Quellen . . . . .	50
5	Unterschiedliche Distanzen zum Spiegel - Statistische Grössen . . . . .	57
6	Bill of Material . . . . .	77

# Codeverzeichnis

1	TDC Init und Enable mit Treiber . . . . .	35
2	TDC Read/Write mit Treiber . . . . .	35
3	TDC Messung mit Treiber . . . . .	35
4	GPIO Toggle mit HAL . . . . .	37
5	GPIO Toggle mit HAL . . . . .	38
6	GPIO Toggle ohne HAL . . . . .	40
7	GPIO Toggle ohne HAL . . . . .	41
8	Mode 1 . . . . .	46
9	GPIO Toggle mit Timer-Output . . . . .	48
10	TDC Driver (Header) . . . . .	62
11	TDC Driver (Source) . . . . .	66
12	Python Analyse . . . . .	70
13	Python Analyse (Multi ToFs) . . . . .	71
14	Python Analyse (Multi Logs) . . . . .	72

# 1 Einleitung

Bei dieser Projektarbeit geht es darum ein Do It Yourself (DIY) optisches Time of Flight (ToF) Distanzmesssystem aufzubauen. Dazu soll ein Time to Digital Converter (TDC) verwendet werden.

...

## 2 Theorie

In den nachfolgenden Unterkapitel werden die theoretischen Grundlagen erarbeitet, welche für das Verständnis sowie das Design eines Demonstrators für das ToF-Verfahren notwendig sind.

### 2.1 Time of Flight

Beim Messverfahren, welches als "Time of Flight" bekannt ist geht es darum, die Laufzeit eines Signales zu messen. Das Signal kann hierbei optischer oder akustischer Natur sein. Eine Anwendung davon ist beispielsweise die Distanzmessung.

Beim hier behandelten optischen Prinzip wird mit einem Sender Licht ausgesandt, welches von einem Empfänger detektiert wird. Zwischen dem Senden und Empfangen des Signals kann eine Zeitmessung gemacht werden. Weil sich Licht mit einer definierten Geschwindigkeit ausbreitet, kann über diese Laufzeitmessung ein Rückschluss darüber gewonnen werden, welche Distanz das Signal innerhalb der gemessenen Zeit zurückgelegt hat.

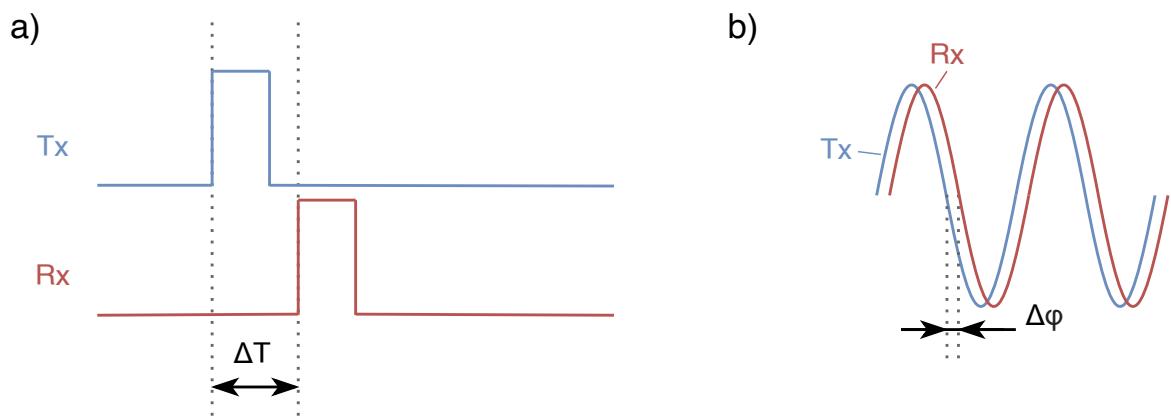


Abbildung 1: Visualisierung von a: direct ToF und b: indirect ToF

Man unterscheidet zwei Arten von ToF: Direct ToF (dTOf) und Indirect ToF (iTOf). Bei dToF wird einzig und alleine die Laufzeit zwischen Sende- und Empfangspuls ermittelt. In der Abbildung 1 sind bei a) beispielhaft solche Pulse dargestellt.

Bei iTOf wird (teilweise zusätzlich) zur Laufzeitmessung auch die Phasenverschiebung eines modulierten Lichtsignals gemessen. Dies sei bei Abbildung 1 im Teil b) dargestellt. Diese Methode erlaubt es, höhere Auflösungen zu erreichen, ist jedoch in der Auswertung und Signalaufbereitung ungleich komplexer.

Diese Arbeit beschränkt sich auf das direct ToF Verfahren.

Nachfolgend werden die theoretischen Grundlagen, vor allem in Hinblick auf das Auslegen einer geeigneten Optik, diskutiert.

## 2.2 Photostrom

Zur Berechnung des theoretisch zu erwartenden Photostrom wird von einer Distanz zur Wand von 10 m ausgegangen.

Der Laserstrahl gehe idealisiert mit 0° zur Wand und werde dort uniform Halbkugel-förmig gestreut. In der Realität wird der Laser nicht mit 0° zur Wand gehen und die Streuung wird sich nicht uniform verteilen, sondern in der Mitte stärker konzentriert sein.

Die Berechnung der empfangenen Strahlungsleistung, der Strahlungsintensität, dem Raumwinkel einer Halbkugel und dem Photostrom sind in Formel 1, 2, 3 bzw. 4 gezeigt.

$$P_{in} = E_e \cdot A = \frac{I_e}{r^2} \cdot A \quad (1)$$

$$I_e = \frac{P_{out}}{\Omega} \quad (2)$$

$$\Omega = 4 \cdot \pi \cdot 0.5 \quad (3)$$

$$I_{ph} = S \cdot P_{in} \quad (4)$$

### 2.2.1 Berechnung mit RLD94PZJ5 und BPV23NF

Ersten Berechnungen wurden mit der Laserdiode RLD94PZJ5 (ROHM, 2020) und der Photodiode BPV23NF (Vishay Semic., 2024) durchgeführt.

Die relevanten Werte aus den Datenblättern sind in Formel 5 und 6 aufgelistet.

$$P_{out} = 285 \text{ mW} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} A &= 4.4 \text{ mm}^2 \\ S &= 0.6 \frac{A}{W} \end{aligned} \quad (6)$$

Diese Werte eingesetzt in Formel 2, 1 und 4 ergibt die Resultate in Formel 7.

$$\begin{aligned}
 I_e &= \frac{P_{out}}{\Omega} = \frac{285 \text{ mW}}{4 \cdot \pi \cdot 0.5 \text{ sr}} = 45.4 \frac{\text{mW}}{\text{sr}} \\
 P_{in} &= \frac{I_e}{r^2} \cdot A = \frac{45.4 \frac{\text{mW}}{\text{sr}}}{(10 \text{ m})^2} \cdot 4.4 \text{ mm}^2 = 2 \text{ nW} \\
 I_{ph} &= S \cdot P_{in} = 0.6 \frac{\text{A}}{\text{W}} \cdot 2 \text{ nW} = 1.2 \text{ nA}
 \end{aligned} \tag{7}$$

## 2.2.2 Berechnung mit RLD65NZX1 and NJL6401R-3

Die Laserdiode RLD94PZJ5 hat im Bezug auf diese Projektarbeit zwei Nachteile: Sehr hohe Leistung, welche für das menschliche Auge gefährlich werden kann und ein Wellenlängenbereich, der für das menschliche Auge nicht sichtbar ist.

Aus diesen Gründen wurde eine zweite Laserdiode evaluiert: RLD65NZX1 (ROHM, 2019). Gepaart wird sie mit der Photodiode NJL6401R-3 (JRC, 2014). Die folgenden Berechnungen wurden basierend auf diesen beiden Komponenten durchgeführt.

Die relevanten Werte aus den Datenblättern sind in Formel 8 und 9 aufgelistet.

$$P_{out} = 10 \text{ mW} \tag{8}$$

$$\begin{aligned}
 A &= 0.7 \text{ mm} \cdot 0.7 \text{ mm} = 0.49 \text{ mm}^2 \\
 S &= 0.42 \frac{\text{A}}{\text{W}}
 \end{aligned} \tag{9}$$

Diese Werte eingesetzt in Formel 2, 1 und 4 ergibt die Resultate in Formel 10.

$$\begin{aligned}
 I_e &= \frac{P_{out}}{\Omega} = \frac{10 \text{ mW}}{4 \cdot \pi \cdot 0.5 \text{ sr}} = 1.59 \frac{\text{mW}}{\text{sr}} \\
 P_{in} &= \frac{I_e}{r^2} \cdot A = \frac{1.59 \frac{\text{mW}}{\text{sr}}}{(10 \text{ m})^2} \cdot 0.49 \text{ mm}^2 = 7.8 \text{ pW} \\
 I_{ph} &= S \cdot P_{in} = 0.42 \frac{\text{A}}{\text{W}} \cdot 7.8 \text{ pW} = 3.28 \text{ pA}
 \end{aligned} \tag{10}$$

## 2.2.3 Berechnung mit Empfangs-Linse

Auf Vorschlag der Dozenten wurden verschiedene Optiken aus einem Baukasten-System von QI-OPTIQ ausprobiert. Besonders vielversprechend erschien hierbei eine Linse mit einem Durchmesser von 17 mm bei einer Brennweite von 40 mm. Die Linse ist in Abbildung 2 dargestellt.



Abbildung 2: Linse von QIOPTIQ

Eine Solche Linse vergrössert die effektive Fläche, auf welcher der Lichtstrom empfangen werden kann, was eine höhere Empfangsleistung, sprich einen höheren Lichtstrom zur Folge hat.

Die Formel 11 zeigt auf, um welchen Faktor die Fläche in etwa ansteigen wird, beim Einsatz einer solchen Optik.

$$A' = \frac{A_L}{A_{PD}} = \frac{\left(\frac{17 \text{ mm}}{2}\right)^2 \cdot \pi}{0.49 \text{ mm}^2} = 463.2 \quad (11)$$

## 2.2.4 Erwarteter Lichtstrom

Nachfolgend werden zwei Szenarien betrachtet: Einmal wird wie bis anhin davon ausgegangen, dass sich das Licht ab dem Laser in einem geraden Strahl ausbreitet, um danach halbkugelförmig und diffus am Target zu reflektieren.

Im zweiten Szenario wird versucht, die Abstrahlcharakteristik der Laser-Diode zu modellieren. Laut Datenblatt hat die Diode in der Abstrahlebene zwei unterschiedliche Öffnungswinkel, was mit dem Raumwinkel einer rechteckigen Pyramide annäherungsweise berechnet werden kann. Die Streuung wird verhindert, da an einem Spiegel reflektiert wird.

Bei beiden Szenarien soll sei die abgestrahlte Leistung der Laser-Diode höher als in der ersten Rechnung. Im gepulsten Betrieb kann diese problemlos über das maximale Rating erhöht werden. Thermisch stellt dies kein Problem dar für die Diode, da der Duty-Cycle sehr klein ist. Die Formel 12 zeigt die neu zu erwartete Abstrahl-Leistung eines solchen Pulses. Die zur Umrechnung benötigte Effizienz der Laser-Diode wird aus einem Diagramm dem Datenblatt des RLD65NZX1 entnommen (ROHM, 2019).

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_{25 \text{ mA}}}{I_{ld}} = \frac{7 \text{ mW}}{25 \text{ mA}} = 0.28 \frac{\text{W}}{\text{A}} \\ I'_{ld} &= \frac{5 \text{ V} - V_{LD}}{R_v} = \frac{5 \text{ V} - 2.8 \text{ V}}{5 \Omega} = 440 \text{ mA} \\ P'_{out} &= \eta \cdot I'_{ld} = 0.28 \frac{\text{W}}{\text{A}} \cdot 440 \text{ mA} = 123 \text{ mW} \end{aligned} \quad (12)$$

Bei einem Target, welches sich in 2 m Distanz befindet, kann laut Formel 13 folgender Lichtstrom erwartet werden:

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{\Omega \cdot r^2} \cdot A_L = \frac{123 \text{ mW}}{4\pi \cdot 0.5 \text{ sr} \cdot (2 \text{ m})^2} \cdot 227 \text{ mm}^2 = 1.11 \mu\text{W}$$

$$I_{ph} = S \cdot P_{in} = 0.42 \frac{A}{W} \cdot 1.11 \mu\text{W} = 467 \text{ nA} \quad (13)$$

Ohne Optik kann die Laserdiode nicht gebündelt abstrahlen. Diese nicht ganz so ideale Abstrahlcharakteristik kann im zweiten Szenario über den Raumwinkel einer Pyramide, wie er in Formel 14 definiert ist, modelliert werden. Die typischen Abstrahlwinkel  $\theta$  werden ebenfalls dem Datenblatt der Laser-Diode entnommen werden. Hierbei ist zu beachten, dass im Datenblatt der Vollwinkel angegeben wird. In der Formel wird dieser deswegen halbiert.

$$\Omega_P = 4 \cdot \arcsin(\sin(\theta_x) \cdot \sin(\theta_y)) = 4 \cdot \arcsin\left(\sin\left(\frac{9^\circ}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{29^\circ}{2}\right)\right) = 4.2 \text{ sr} \quad (14)$$

Mit der Formel 15 wird erneut die zu erwartende Empfangsleistung sowie der dazugehörige Photostrom errechnet. Der Unterschied zur vorherigen Berechnung liegt nun aber darin, dass der Raumwinkel auch bereits vor der Reflexion berücksichtigt werden muss. Deswegen wird die Distanz zum Target mit zwei multipliziert.

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{\Omega \cdot (2 \cdot r)^2} \cdot A_L = \frac{123 \text{ mW}}{4.2 \text{ sr} \cdot (2 \cdot 2 \text{ m})^2} \cdot 227 \text{ mm}^2 = 416 \text{ nW}$$

$$I_{ph} = S \cdot P_{in} = 0.42 \frac{A}{W} \cdot 416 \text{ nW} = 175 \text{ nA} \quad (15)$$

## 2.3 Transimpedanzverstärker

Wie die Berechnungen in den vorgängigen Kapiteln aufzeigen, haben die Photoströme, welche zu detektieren sind, sehr kleine Stromstärken. Weiter sind die Lichtimpulse typischerweise oft nur von sehr kurzer Dauer, nämlich im Bereich einiger Nanosekunden. Dies hat zur Folge, dass die Signale dementsprechend kurze Anstiegszeiten haben, welche detektiert werden müssen.

Die Anforderungen zeigen auf, dass ein Verstärker mit sehr hohem Gain bei gleichzeitig sehr hoher Bandbreite eingesetzt werden muss. Die Verstärkerschaltung, welche eingesetzt wird, ist ein Strom-Spannungswandler. Die Beschaltung des Operationsverstärkers, welche in Abbildung 3 ersichtlich ist, wird auch Transimpedanzverstärker (TIA) genannt.

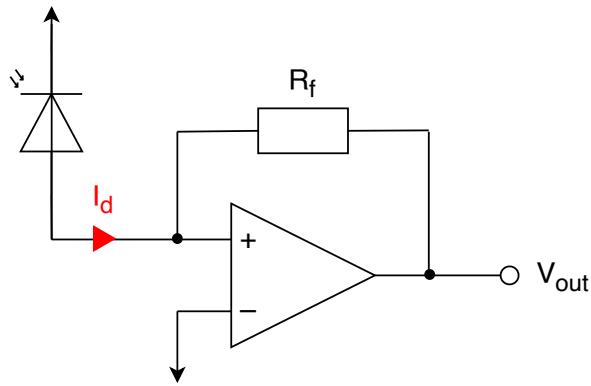


Abbildung 3: Beschaltung Operationsverstärker als TIA

Wie der Name der Schaltung vermuten lässt, wandelt der Transimpedanzwandler den Photostrom  $I_d$  in eine Spannung  $V_{out}$  um. Dabei gibt der Feedback-Widerstand  $R_f$  die Verstärkung vor, wie die Formel 16 zeigt:

$$V_{out} = -R_f \cdot I_d \quad (16)$$

## 3 Konzept

Die folgenden Unterkapitel zeigen auf, wie die entwickelte Schaltung aussehen wird. Hierbei wird vor allem darauf eingegangen, wie eine Time of Flight Elektronik aufgebaut sein kann. Zudem werden weitere Herausforderungen eines solchen Systems und die Bewältigung ebendieser aufgezeigt.

### 3.1 Signalkette

Dieses Unterkapitel soll näherbringen, wie die ToF-Messung realisiert wird. Eine Skizze der Signalkette ist in der Abbildung 4 ersichtlich.

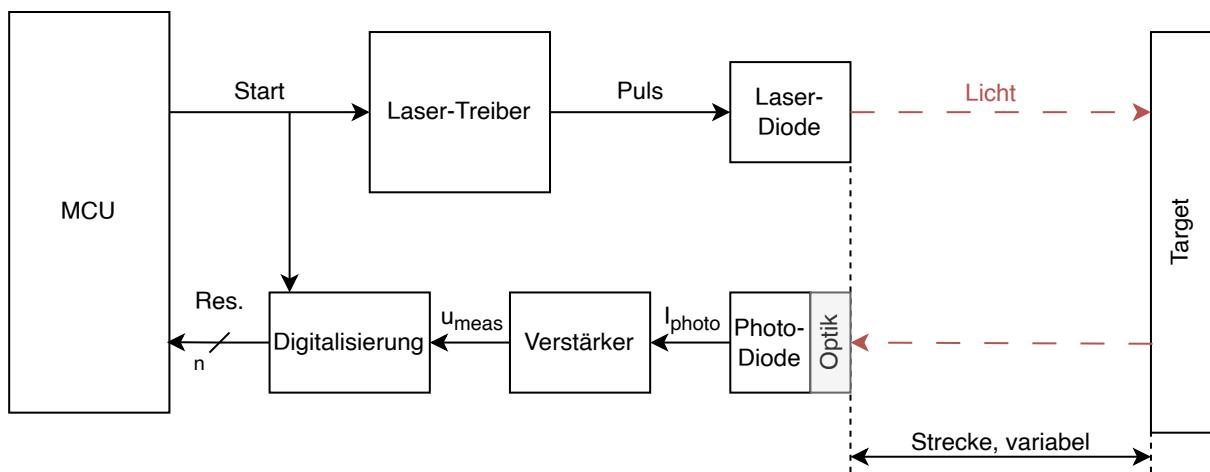


Abbildung 4: Konzeptioneller Signalfad

Eine MCU kümmert sich um das Starten und Auswerten der Messresultate. Das Generieren eines Startsignals hat zur Folge, dass über einen Laser-Treiber eine Laser-Diode mit einem Puls angesteuert wird. Dieser Puls, nach der Laser-Diode in Form eines Lichtpulses, wird dann von einem Target reflektiert, welches in einer variablen Distanz zur Elektronik steht.

Der Reflektierte Lichtpuls kann über eine Optik eingefangen werden und wird anschliessend von einer Photo-Diode in einen Lichtstrom umgewandelt. Dieser Lichtstrom wird von einem Transimpedanzverstärker in eine Spannung umgewandelt. Bevor die MCU diese Spannung auswerten kann, muss diese erst digitalisiert werden. Das passiert unter Verwendung eines Komparators. Dieser kann als 1 bit ADC verstanden werden, da bloss eine Unterscheidung der beiden Zustände "Licht" und "kein Licht" notwendig ist. Es ergibt sich also ein Empfangspuls.

Wird nun die Zeit gemessen zwischen Start- und Empfangspuls, ist es möglich einen Rückschluss zu ziehen über die variable Strecke zwischen Elektronik und Target. Die Zeitmessung unterliegt höchsten Anforderungen. Als Versinnbildlichung: Innert einer Nanosekunde kann Licht eine Distanz von 30 cm zurücklegen. Wie eine solche Zeitmessung realisiert werden kann, soll das nächste Kapitel erklären.

## 3.2 Zeitmessung

Damit ein direct ToF-Signal ausgewertet werden kann, benötigt es eine hochauflöste Zeitmessung. Die Firma Texas Instruments bietet dafür mit dem TDC7200 eine gute Lösung an. Laut Datenblatt (TI, 2016b) kann dieser bis zu 55 ps auflösen, mit einer Standardabweichung von 35 ps. Setzt man nun die Lichtgeschwindigkeit sowie diese minimale zeitliche Auflösung in eine Bewegungsgleichung ein, sollte der Baustein gemäss der Formel 17 folgende räumliche Auflösung erreichen:

$$s_{min} = c \cdot t = 299.8 \cdot 10^6 \frac{m}{s} \cdot 55 \text{ ps} = 16.5 \text{ mm} \quad (17)$$

Prinzipiell soll die ToF-Funktionalität in zwei Schritten in Betrieb genommen werden. In einem ersten Teil soll es rein darum gehen, den TDC7200 IC genauer kennenzulernen.

Bemerkung: In der Realität wird eine solche Auflösung nicht erreichbar sein. Die Herausforderungen bestehen beispielsweise darin, dass in der gesamten Signalkette diverse Verzögerungen vorhanden sind. So spielen zum Beispiel das Einschalten der Laser-Diode, die Bandbreite des Verstärkers sowie die Schaltzeit des Komparators eine grosse Rolle. Auch der Jitter der MCU beim Ein- und Ausschalten ihrer Ausgänge wird bei der minimalen Auflösung ins Gewicht fallen. Im Kapitel 6.1 wird mittels verschiedener Messungen dargestellt, wie nah an die vom TDC7200 vorgegebene Grenze herangekommen wird.

## 3.3 Vorgehensweise

Wie bereits erläutert ist davon auszugehen, dass der gesamte Signalpfad eine Ungenauigkeit in die Messung einbringt, welche weit ausserhalb derjenigen des TDC7200 liegt. Es bietet sich also an, dass diese im Vorfeld untersucht wird. Dazu wird ein zweiter TDC7200 auf der Elektronik eingesetzt, welcher zur Messung eines rein elektrischen Signals zuständig ist.

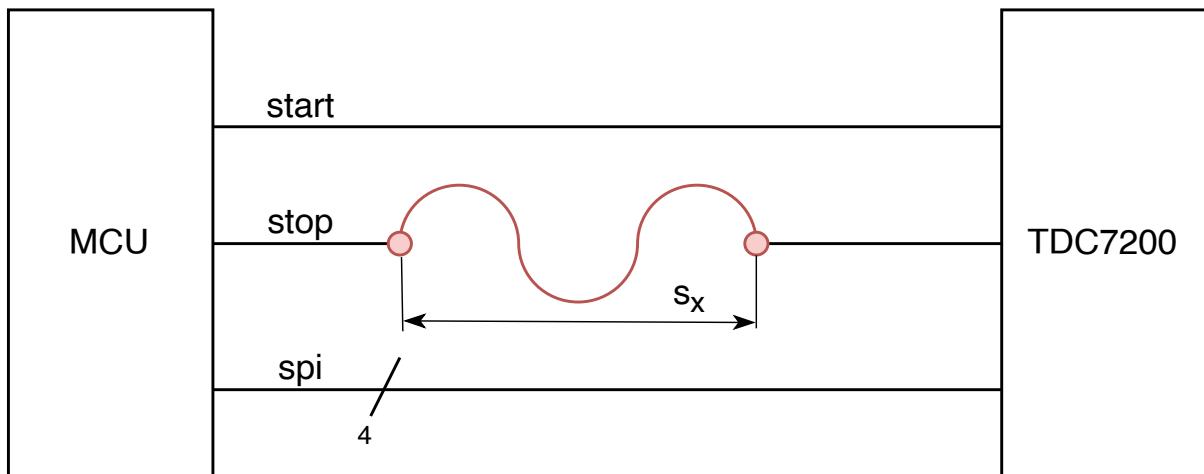


Abbildung 5: Konzept Betrieb TDC rein elektrisch

In Abbildung 5 sei skizziert, wie eine solche Schaltung aussehen könnte. Die gewellte, rot markierte Linie versinnbildlicht dabei einen variablen Messpfad. Über einen Stecker können hier

unterschiedlich lange Kabel angeschlossen werden. Somit ist es möglich, die Messgenauigkeit des TDC7200 rein elektrisch nachzuweisen.

Folgende Punkte können mit einer solchen Erweiterung überprüft werden:

- Messung Jitter der Ausgänge der verwendeten MCU
- Konfiguration und Inbetriebnahme TDC7200 (z.B. verschiedene Messmodi)
- Auswertung der Resultate des TDC7200

## 4 Simulationen

In diesem Kapitel werden die durchgeführten Simulationen dokumentiert.

Zur Simulation wird das Tool "Xpedition AMS" von Siemens verwendet. Wie der Name sagt, unterstützt dieses Tool Analog/Mixed Signal (AMS) Analyse. (Siemens, 2025)

### 4.1 Laser Treiber

In Abbildung 6 ist das Schema für die Simulation des Laser-Treibers dargestellt. Dies entspricht der Schaltung aus Kapitel 5.1.7.

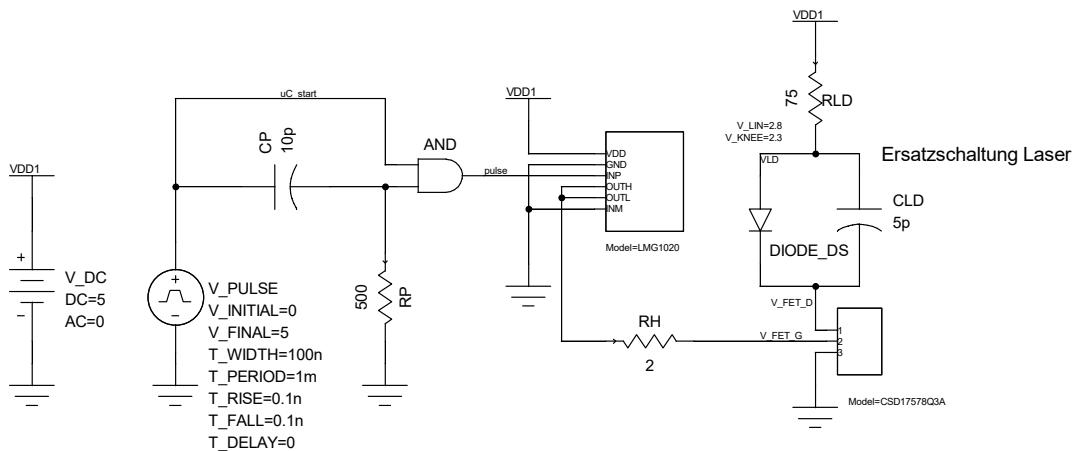


Abbildung 6: Simulation Laser-Treiber - Schema

Das SPICE-Modell des Gate-Treibers LMG1025-Q1 ist dasselbe wie für LMG1020 und wurde von der Website von TI heruntergeladen (TI, 2024b).

Das SPICE-Modell des NexFET CSD17578Q3A wurde ebenfalls von der Website von TI heruntergeladen (TI, 2024a).

Für die Laser-Diode RLD65NZX1 konnte kein SPICE-Modell gefunden werden, es wurde deshalb eine Ersatzschaltung aus Diode und paralleler, parasitärer Kapazität eingefügt.

Das Resultat der Simulation ist in Abbildung 7 dargestellt.

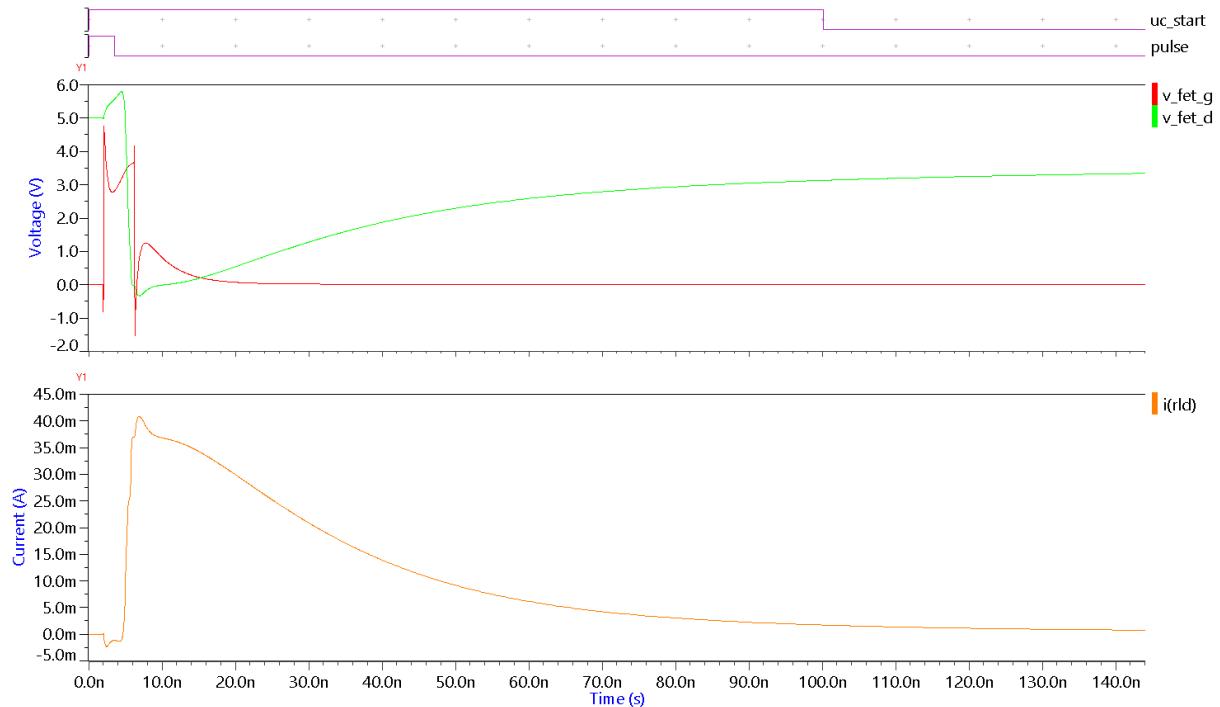


Abbildung 7: Simulation Laser-Treiber - Plot

Es ist zu erkennen, dass der Laser sehr schnell einschalten kann (2 ... 3 ns). Das Ausschalten dauert etwas länger (ca. 100 ns). Da die ToF bis zur ersten Flanke gemessen wird, ist eine längere Ausschaltzeit für diese Anwendung kein Problem.

## 4.2 Transimpedanzverstärker

In Abbildung 8 ist das Schema für die Simulation des Transimpedanzverstärkers dargestellt. Dies entspricht der Schaltung aus Kapitel 5.1.8, ohne den Komparator.

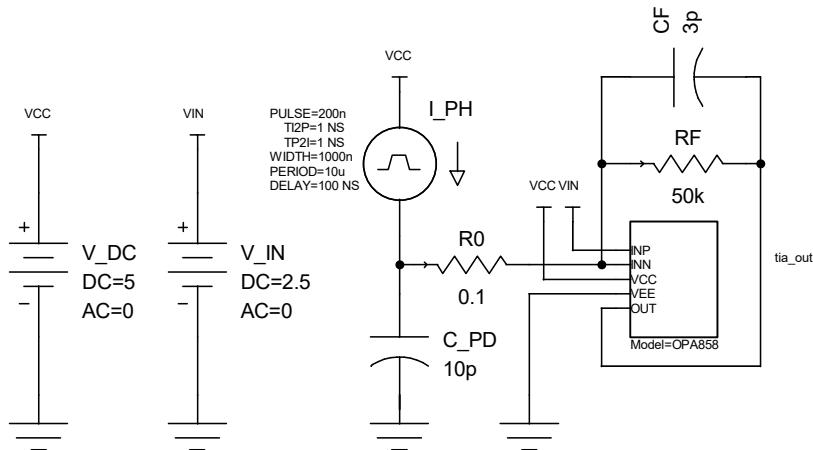


Abbildung 8: Simulation TIA - Schema

Das SPICE-Modell des Operationsverstärkers OPA858 wurde von der Website von TI heruntergeladen (TI, 2024d).

Für die Photo-Diode NJL6401R konnte kein SPICE-Modell gefunden werden, es wurde deshalb eine Ersatzschaltung aus Strompuls-Quelle und paralleler, parasitärer Kapazität eingefügt.

Das Resultat der Simulation ist in Abbildung 9 dargestellt.

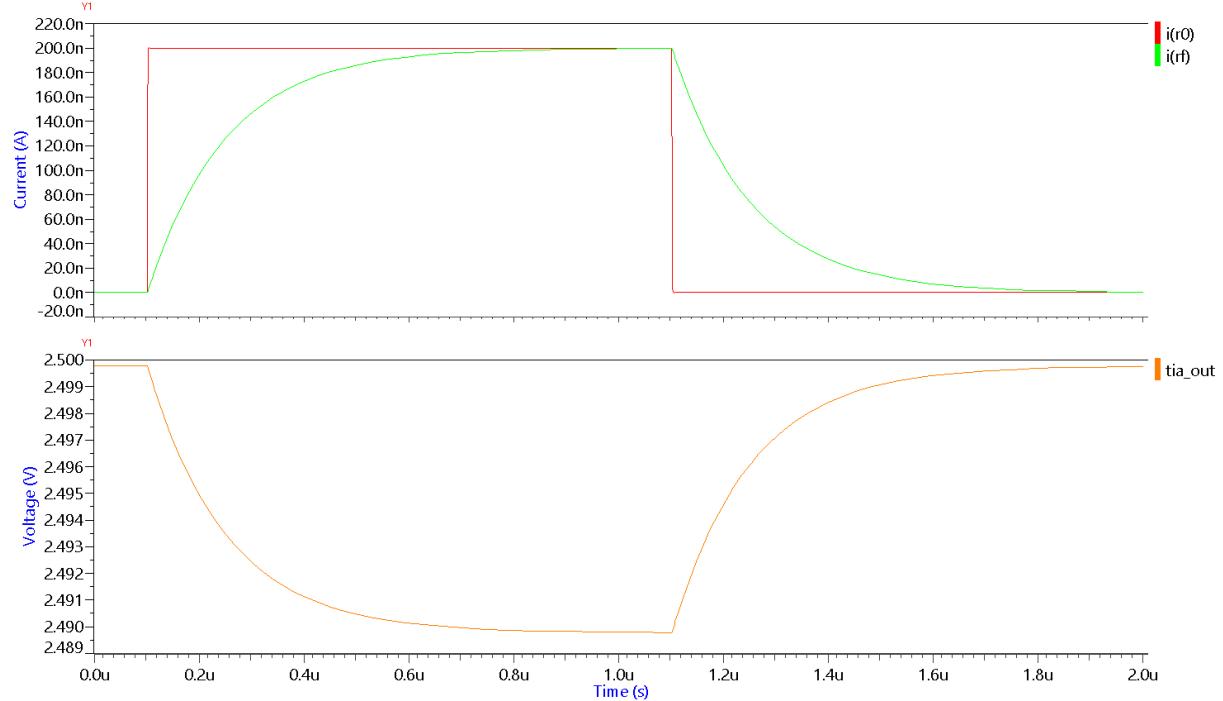


Abbildung 9: Simulation TIA - Plot

Es ist zu erkennen, dass die Zeitkonstante des Stroms durch den Feedback-Widerstand  $R_F$  gemäss Formel 18 bestimmt werden kann.

$$\tau = R_F \cdot C_F = 50 \text{ } k\Omega \cdot 3 \text{ } pF = 150 \text{ } ns \quad (18)$$

Beliebig klein kann der Feedback-Kondensator  $C_F$  jedoch nicht gewählt werden, da die Schaltung sonst schwingt.

In Abbildung 10 ist das Simulations-Resultat ohne den Feedback-Kondensator  $C_F$  dargestellt.

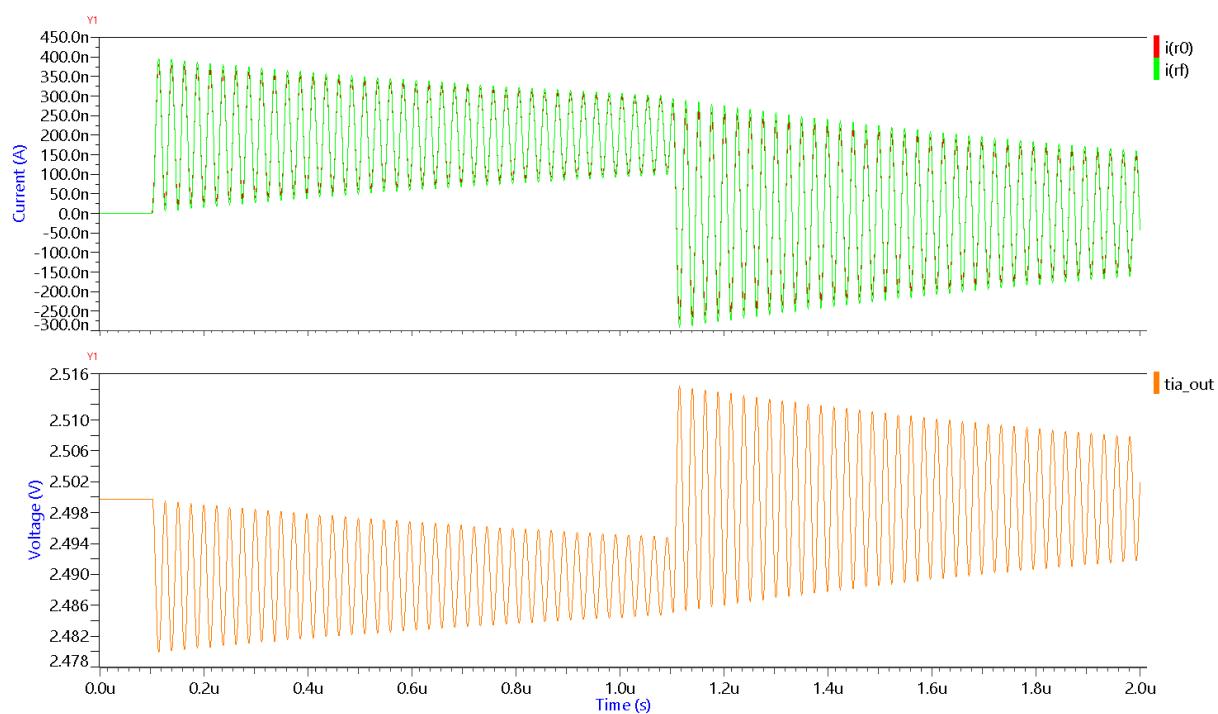


Abbildung 10: Simulation TIA - Plot ohne  $c_F$

Die genaue Dimensionierung von  $c_F$  wird durch Tests mit dem PCB bestimmt werden. Eventuell, je nach parasitären Kapazitäten auf dem PCB, wird  $c_F$  auch gar nicht bestückt werden müssen.

## 5 Umsetzung

In diesem Kapitel wird die Umsetzung der Hardware sowie Firmware des ToF-Demonstrators dokumentiert.

Im Anhang 8.3 bis und mit 8.8 sind sämtliche technischen Dokumente sowie einige Fotos des fabrizierten Demonstrators abgelegt.

### 5.1 Schaltungen

Nachfolgend werden sämtliche Teil-Schaltungen thematisiert, welche für das entwickelten ToF-Evaluationsmodul nötig sind. Ein vollständiges Schema kann dem Anhang 8.3 entnommen werden. Die kompletten Projekt-Dateien sind im elektronischen Anhang dieses Projektes verfügbar.

Designt wurde das Schema mit Hilfe des Open-Source Tools "KiCad EDA 8.0" (KiCad, 2025).

#### 5.1.1 Selective Input Voltage

Abbildung 11 zeigt die Beschaltung zur Selektion der Speisung.

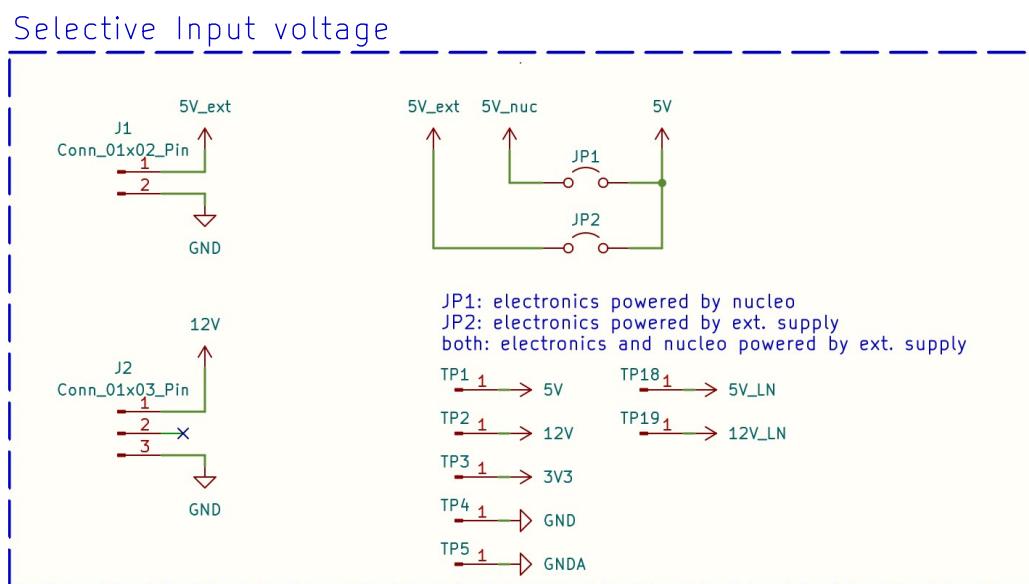


Abbildung 11: Selective Input Voltage

Für die Speisung des Nucleo-Boards bestehen die folgenden Möglichkeiten:

- 5 V von USB-Buchse
- 5 V von externem Power-Supply (JP1 + JP2)
- 12 V von externem Power-Supply (JP3)

Siehe dazu auch Kapitel 5.1.2.

Für die Speisung der 5 V Elektronik bestehen die folgenden Möglichkeiten:

- 5 V von Nucleo-Board (JP1)
- 5 V von externem Power-Supply (JP2)
- 12 V von externem Power-Supply via Nucleo-Board (JP1 + JP3)

Für die Speisung der Photodiode bestehen die folgenden Möglichkeiten:

- 5 V von 5 V-Elektronik (sw2 Position 3)
- 12 V von externem Power-Supply (sw2 Position 1)

Siehe dazu auch Kapitel 5.1.8.

### 5.1.2 Nucleo Board

Die Beschaltung des NUCLEO-F042K6 Boards (ST, 2024) ist in Abbildung 12 gezeigt.

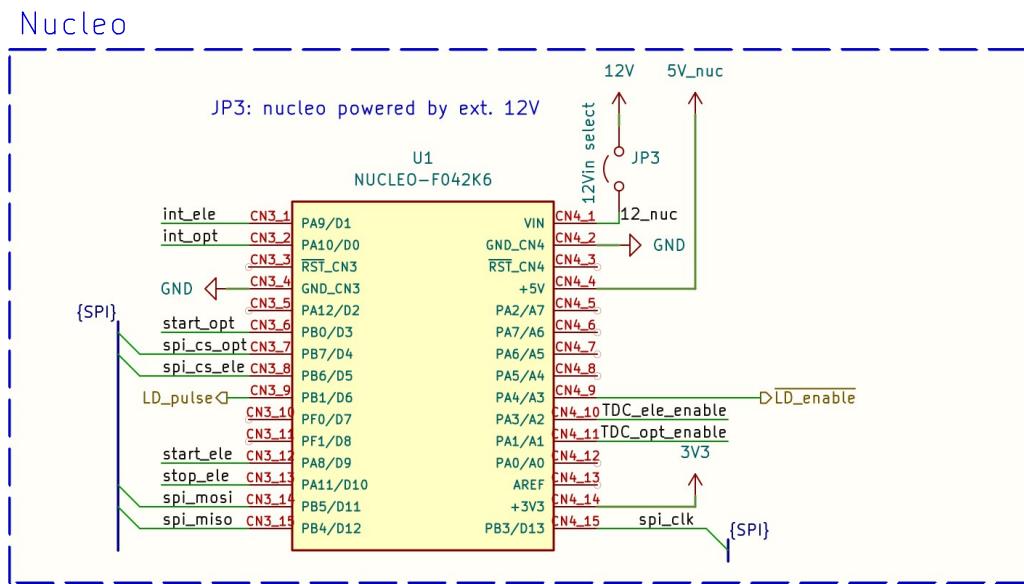


Abbildung 12: Nucleo Board

Das NUCLEO Board ist ein sogenanntes "Development-Kit", welches eine STM32F042K6 MCU beinhaltet. Am Rand des Boards werden diverse Pins der Microcontroller Unit (MCU) via Pin-Header einfach zur Verfügung gestellt. Dies erleichtert die Integration in eine eigene Elektronik enorm. Programmiert wird die MCU über eine USB-Schnittstelle.

In diesem Design wird das Entwicklerboard dazu benötigt, die TDC7200 ICs zu bedienen. Dazu wird einerseits ein Serial Peripheral Interface (SPI) benötigt, um die Mess-ICs zu konfigurieren und auch auszulesen (siehe SPI-Bus in der Abbildung). Weiter können auf beiden TDCs Messungen gestartet werden mit den Signalen `start_ele`, resp. `start_opt`. Für den TDC welcher sich um die elektrischen Signale kümmert kann zudem mit `stop_ele` ein Stopp-Puls generiert werden. Zu guter Letzt ist das NUCLEO dafür zuständig, die Laser-Diode anzusteuern, was mit den Signalen `LD_pulse` sowie `LD_enable` geschieht.

### 5.1.3 TDC Electrical Signal

Die Beschaltung des TDC7200 (TI, 2016b) für den elektrischen Teil ist in Abbildung 13 gezeigt.

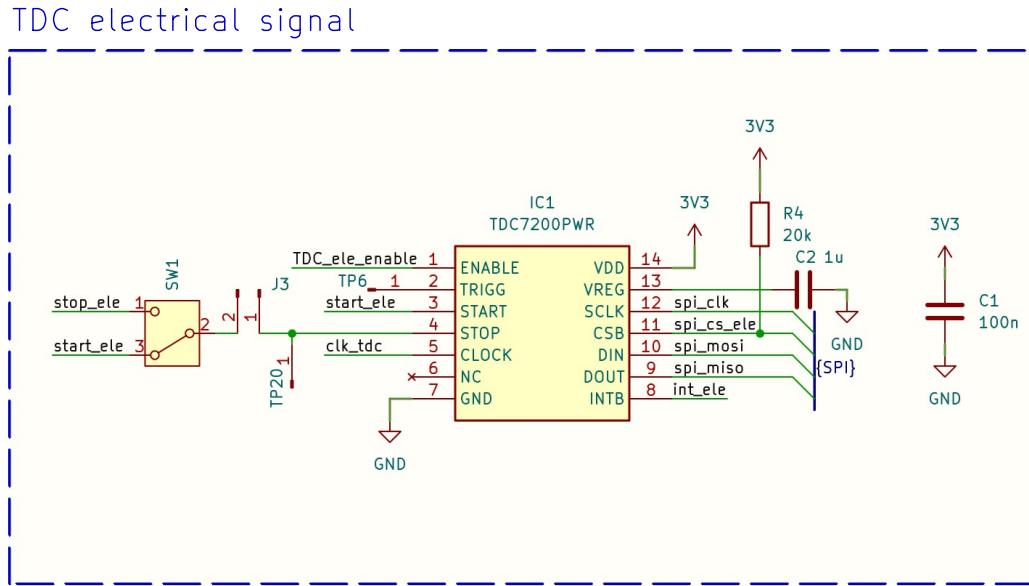


Abbildung 13: TDC Electrical Signal

Der TDC7200 ist über die Start- und Stopp-Leitungen, ein Enable-Signal sowie die SPI-Leitungen mit der MCU verbunden.

Wie bereits im Kapitel 3.3 angesprochen, wird der elektrische TDC dazu verwendet, den Chip erstmalig in Betrieb zu nehmen und sich damit vertraut zu machen. Am Anschluss J3 kann in einem nächsten Schritt ein beliebig langes Kabel angeschlossen werden. Dies ermöglicht es, erste Messresultate, natürlich rein elektrisch, vom TDC7200 auszulesen.

Mittels Schalter SW1 kann das STOP-Signal wahlweise via `stop_ele` oder `start_ele` generiert werden. Dies bietet zum einen die Möglichkeit, die Zeit zwischen dem Schalten von zwei GPIOs zu messen. Zum anderen, kann derselbe GPIO-Pin zum Generieren des START- und STOP-Signals verwendet werden, wodurch von der Verzögerungszeit direkt auf die Kabellänge an J3 geschlossen werden kann.

### 5.1.4 TDC Optical Signal

Die Beschaltung des TDC7200 (TI, 2016b) für den optischen Teil ist in Abbildung 14 gezeigt.

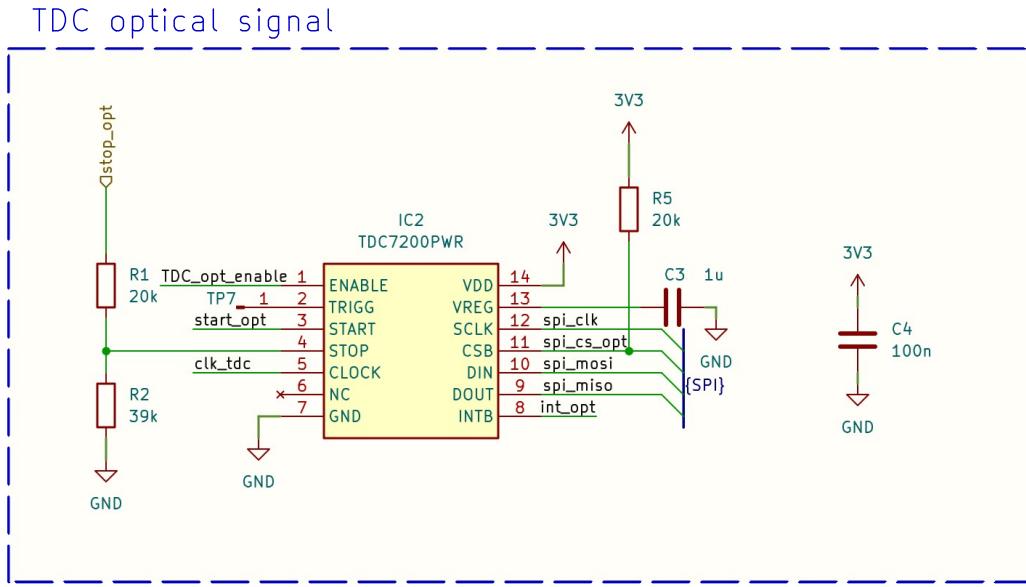


Abbildung 14: TDC Optical Signal

Die Beschaltung des TDCs für die optische Messung gestaltet sich praktisch gleich wie beim elektrischen Gegenstück. Der Hauptunterschied ist, hier aber, dass dessen **STOP**-Signal nicht von der MCU selber generiert wird, sondern von einem Komparator, welcher am Ende des optischen Messpfades steht. Da der Komparator mit einem 5 V Pegel arbeitet, ist der Spannungsteiler  $R_1 / R_2$  vonnöten, welcher den 5 V Puls auf die geeigneten 3.3 V herunterteilt.

### 5.1.5 Oscillator For TDCs

Die Beschaltung des Oszillators für die beiden TDC ist in Abbildung 15 gezeigt. Es handelt sich hierbei um einen normalen Quartz-Oszillatator mit integriertem Schwingkreis. Praktischerweise ist bei diesem also keine weitere Beschaltung notwendig.

Oscillator for TDCs

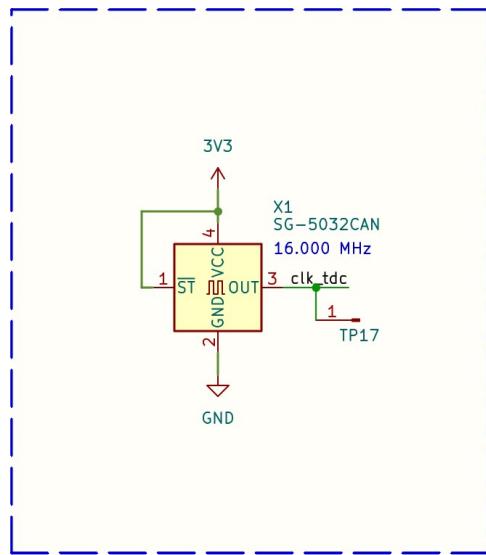


Abbildung 15: Oscillator for TDCs

### 5.1.6 Power Supply Separation

Für die Beschaltung der Photodiode, inkl. TIA und Komparator, macht es Sinn eine Spannungsversorgung mit möglichst wenig Rauschen zu haben.

Dazu wurde die Separierung vorgenommen, welche in Abbildung 16 dargestellt ist.

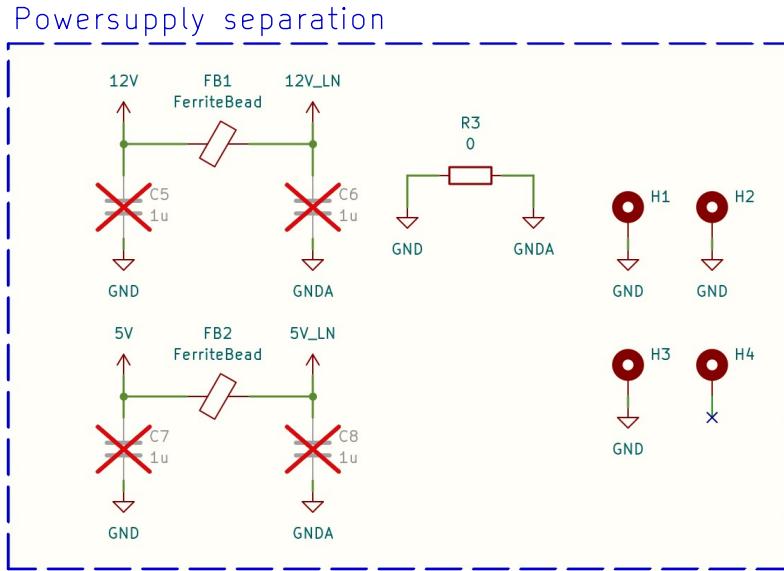


Abbildung 16: Power Supply Separation

Prinzipiell sollen die Speisungen über eine Ferrit-Perle etwas entstört werden. Massgeblich ist hier natürlich auch der physikalische Verlauf des Speisungspfades auf dem Layout. Dazu mehr im entsprechenden Kapitel 5.2. Wahlweise besteht nebst den Ferrit-Perlen die Möglichkeit, mittels

Kondensatoren die Speisung weiter zu entkoppeln. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass dies in einem ersten Schritt nicht notwendig ist.

### 5.1.7 Laser Driver

Die Laser Diode RLD65NZX1 (ROHM, 2019) wird mittels Lasertreiber LMG1025-Q1 (TI, 2024c) und NexFET (TI, 2016a) angesteuert. Für die Generierung eines kurzen Pulses ( $0.5 \dots 100 \text{ ns}$ ) wurde mittels Hochpass und AND-Gatter (Diodes Inc., 2020) implementiert. Siehe dazu Abbildung 17.

Der Widerstand  $R_{25}$  bildet den Vorwiderstand für die Laser-Diode, welcher sich gemäss der Formel 19 berechnet.

$$R_v = \frac{V_{cc} - V_{fld}}{I_{ld}} = \frac{5 \text{ V} - 2 \text{ V}}{40 \text{ mA}} = 75 \Omega \quad (19)$$

Im Schema eingezeichnet ist aktuell ein Platzhalterwert. Während der Inbetriebnahme wird der Widerstand je nach Bedarf verändert. Wird dieser beispielsweise verkleinert, so vergrössert sich der Strom durch die Laser-Diode und somit die ausgesandte Lichtleistung.

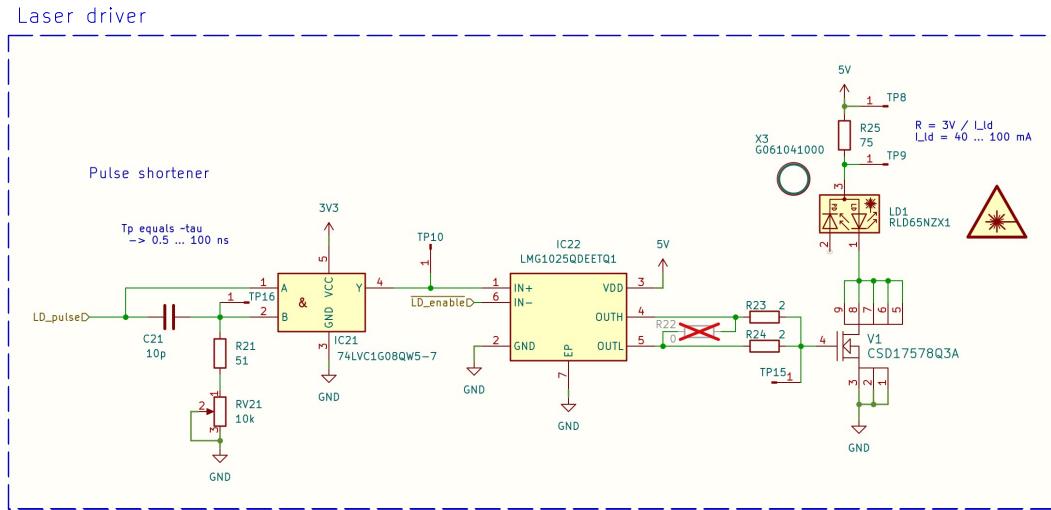


Abbildung 17: Laser Driver

### 5.1.8 Photo Receiver

Um den Photostrom der Photodiode NJL6401R (JRC, 2014) zu verstärken und in eine Spannung umzuwandeln, wurde mit dem Operationsverstärker OPA858 (TI, 2018) ein Transimpedanzverstärker aufgebaut. Der Ausgang des Transimpedanzverstärkers geht auf den Komparator TLV3501 (TI, 2016c), um das stop-Signal für den TDC zu generieren. Siehe dazu Abbildung 18.

Der Feedback-Widerstand  $R_{26}$  kann je nach bedarf verändert werden. Wird dieser vergrössert, so steigt auch der negative Puls am Ausgang des TIAs. Mit  $C_{20}$  kann zudem bei Bedarf eine kleine Kapazität hinzugefügt werden. Diese hat zum Ziel, ein Schwingen des Verstärkers zu unterdrücken, falls dieser eine Neigung zum Schwingen haben sollte.

Der Offset des OPA858 und die Schaltschwelle des TLV3501 werden mit Hilfe der beiden Trimmer RV22 und RV23 einstellbar gemacht. Dies hilft bei der Inbetriebnahme, da im Voraus noch nicht ganz klar ist, wo der Ausgang des Operationsverstärkers aufgrund des gewandelten Dunkelstroms der Photodiode zu liegen kommt.

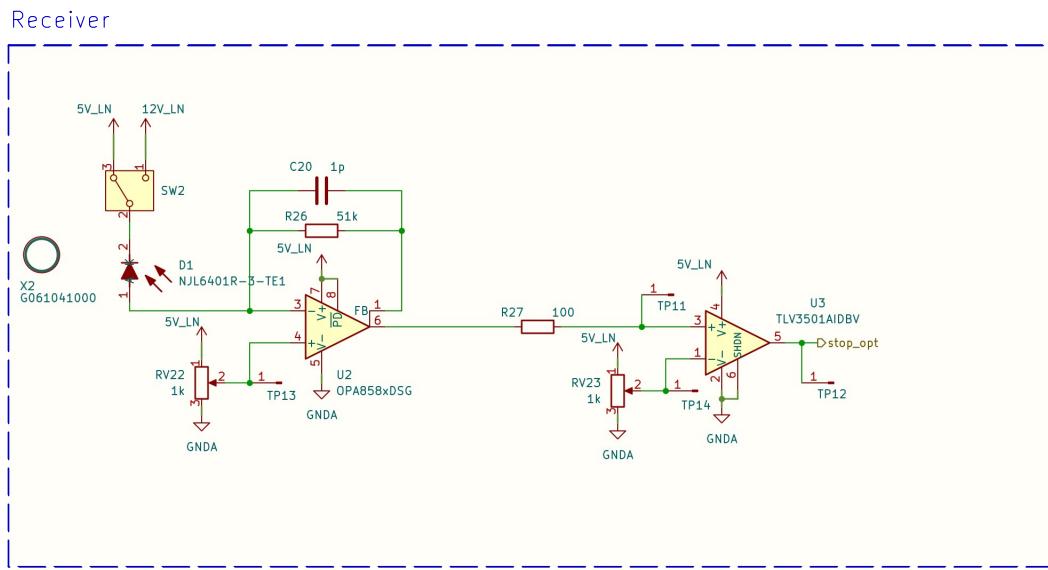


Abbildung 18: Photo Receiver

### 5.1.9 Decoupling Capacitors

Die Beschaltung der Entkopplungs-Kondensatoren ist in Abbildung 19 dargestellt. Die Kondensatoren für den Operationsverstärker OPA858 und für den Komparator TLV3501 wurden dem Vorschlag im Datenblatt entnommen. Zusätzlich wird auch der Gate-Treiber beim Laser-Treiber mit einer zusätzlichen, grösseren Kapazität gestützt, was sich positiv auf die Stabilität der Speisung auswirken sollte.

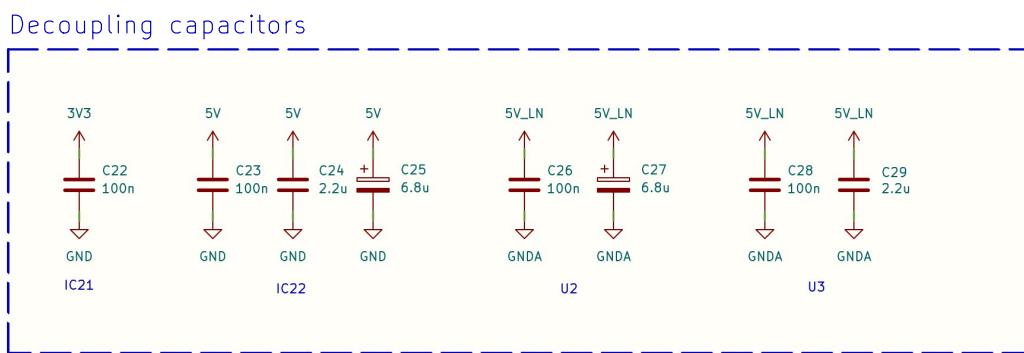


Abbildung 19: Decoupling Capacitors

## 5.2 Layout

Beim Layout wurde ein Augenmerk darauf gelegt, dass die verschiedenen Schaltungen sich auf dem PCB nicht gegenseitig stören. Dafür wurde ein sauberes Speisungskonzept entworfen, welches die Ground- und Power-Planes nach Layer definiert. Prinzipiell sind die vier Lagen der Leiterplatte wie folgt aufgetrennt:

- Top-Layer: Signal und Ground
- Innerer Layer 1: Stromversorgungsebene
- Innerer Layer 2: Signal und Ground
- Bottom-Layer: Signal und Ground

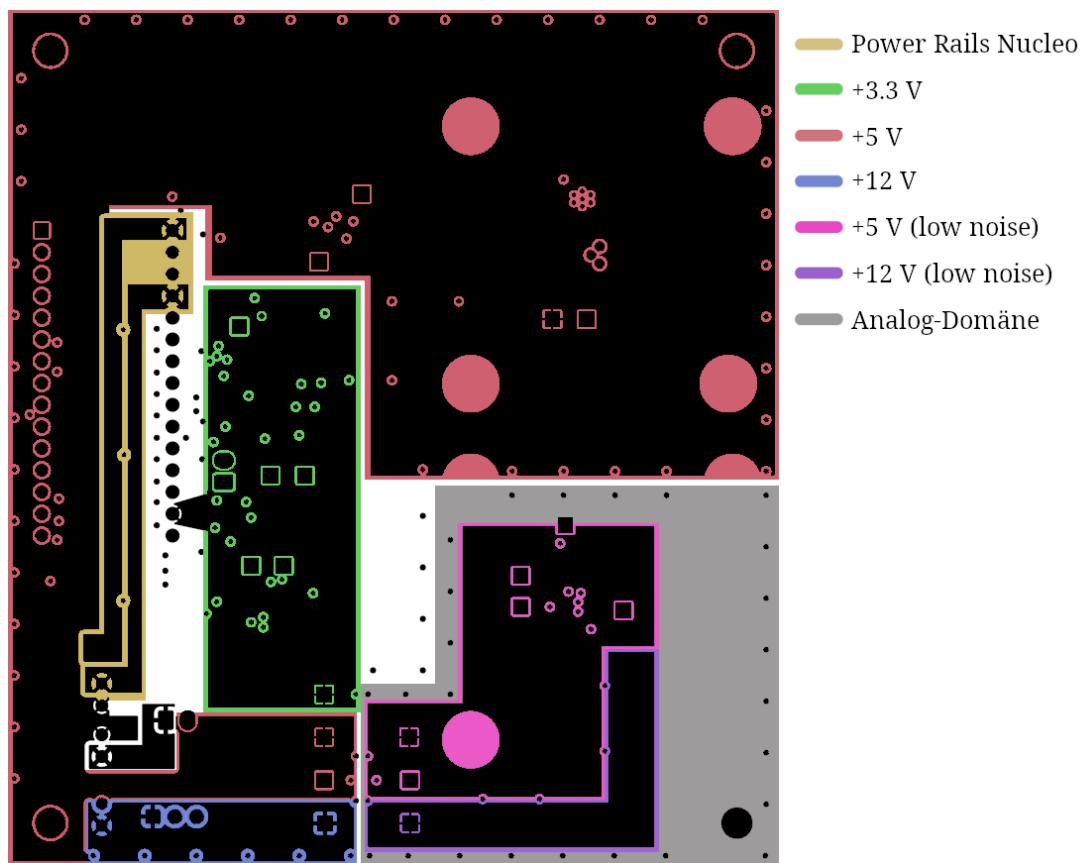


Abbildung 20: Innerer Layer 1 mit Vermerken zum Speisungskonzept

In Abbildung 20 ist die Umsetzung des Speisungskonzeptes ersichtlich. In der unteren, rechten Ecke befindet sich die Analog-Domäne, welche die Photodiode, den TIA und den Komparator beinhaltet. Dieser Abschnitt des PCBs besitzt eigene Ground-Planes sowie entstörte Speisungen. Mit Hilfe von einigen Vias an der Aussengrenze dieses Abschnittes sollte die Analog-Domäne zudem weniger Anfällig auf extern induzierte Störfelder sein.

Solche sogenannten "Stitching-Vias" sind zudem rund um das ganze PCB zur Abschirmung platziert.

Das komplette Layout kann dem Anhang 8.5 entnommen werden.

## 5.3 3D View

Die 3D-Ansicht wirkte beim Design des Layouts und vor allem bei der Komponentenplatzierung insofern unterstützend, da hier ersichtlich ist, wo sich mechanische und elektronische Komponenten in den Weg kommen könnten. Die Abbildung 21 zeigt eine 3D-Wiedergabe der Aufsicht auf den ToF-Demonstrator.

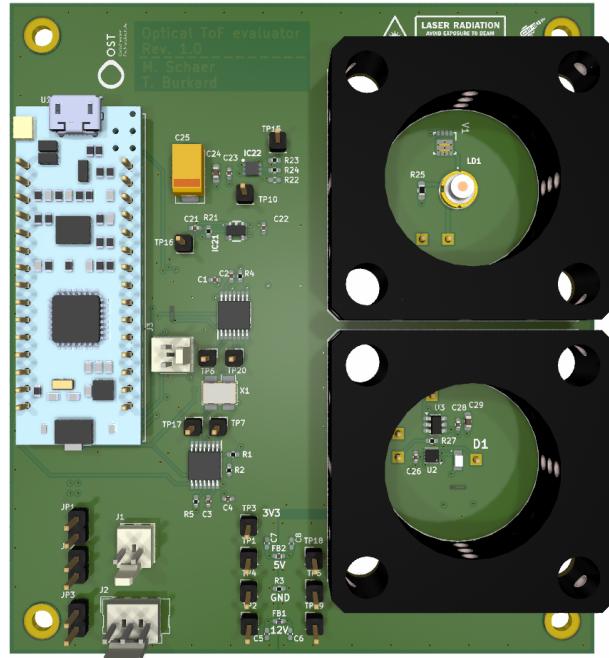


Abbildung 21: 3D View Top

Die Linsenhalterungen wurden mit Hilfe von einer Step-Datei, die von QIOPTIQ zur Verfügung gestellt wird in die Ansicht integriert (Qioptiq, 2024b). In der Abbildung 21 sind diese als schwarze Quader mit zylinderförmigen Ausschnitten dargestellt. Direkt unter diesen Halterungen dürfen sich keine Komponenten befinden, da sich die Halterungen ansonsten nicht montieren lassen.

Bei der Komponentenplatzierung wird zusätzlich auch darauf geachtet, dass sämtliche Testpunkte sowie die Trimmer und Schalter zur Konfiguration gut zugänglich sind. Wenn sich diese Komponenten nahe an den optoelektronischen Komponenten befinden, wurden sie auf der Unterseite platziert. Somit sind sie auch mit montierter Optik verfügbar.

## 5.4 Fabrikation

KiCad 8.0 ermöglicht es, aus dem Layout-Design diverse Fabrikations-Dateien für die verschiedenen Layer zu erzeugen. Diese sogenannten Gerber und NC-Drill Dateien können von einem Leiterplattenhersteller zur Produktion einer Leiterplatte verwendet werden. Wahlweise kann eine Leiterplatte direkt auch bestückt werden, was jedoch zusätzliche Zeit in der Produktion beansprucht.

Da sich die meisten Komponente auf dem PCB relativ gut bestücken lassen, wurde auf eine automatisierte Bestückung verzichtet und die Komponenten wurden von Hand bestückt.

Die Komponenten werden bei Mouser Electronics bestellt, während die Leiterplatten vom chinesischen Hersteller JLCPCB (JLC, 2025) bezogen werden. Mouser erfüllt die erwartete Lieferzeit von einigen Tagen. Die Bestellung von JLCPCB kam mit genau sieben Tagen ebenfalls pünktlich an. Die Ingenieure von JLCPCB mussten keine Rückfragen zum Design stellen, was sich wohl positiv auf die Lieferzeit ausgewirkt hat.

Die fertig bestückte Leiterplatte ist in der Abbildung 22 ersichtlich. Weitere Fotografien des ToF-Demonstrators können dem Anhang 8.8 entnommen werden.



Abbildung 22: Demonstrator von vorne ohne Linse

## 5.5 Firmware

Bei der Firmware wird ein Augenmerk darauf gelegt, dass es eine saubere Trennung zwischen Applikation, Treiber und Peripherie gibt. Dies sorgt für ein möglichst modulares Design. Die FW-Hierarchie ist in der Abbildung 23 nachvollziehbar.

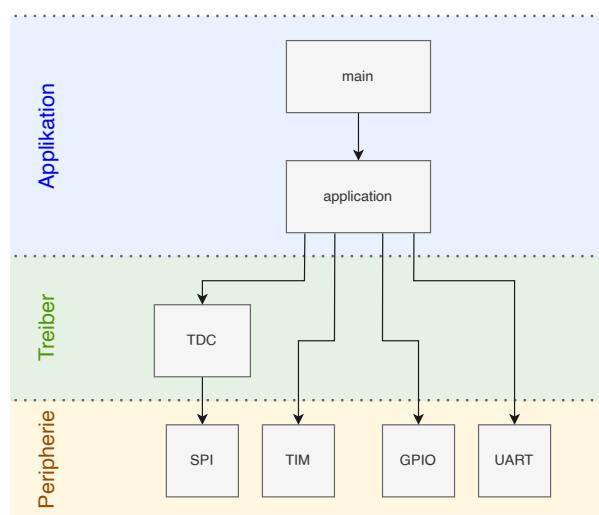


Abbildung 23: Aufbau Firmware-Projekt

Die Applikation ist für das Timing der Messungen verantwortlich. Der Code für das auslösen wurde schrittweise ausgebaut, erst über die Verwendung einfacher GPIOs, bis hin zu optimalem zeitlichen Verhalten unter Einsatz verschiedener Hardware-Timer für das Generieren der Trigger-Pulse für die TDCs. Im Kapitel 6.1 sind die einzelnen Erweiterungsschritte detailliert erklärt.

Der TDC-Treiber stellt Funktionen zur Initialisierung und zum Aktivieren des TDC zur Verfügung. Siehe dazu Code 1.

```
1 TDC_init(&tdc_opt, &hspi1, SPI_CS_OPT_GPIO_Port, SPI_CS_OPT_Pin,  
          TDC_OPT_ENABLE_GPIO_Port, TDC_OPT_ENABLE_Pin);  
  
2  
3 TDC_enable(&tdc_opt);
```

Code 1: TDC Init und Enable mit Treiber

Der TDC-Treiber beinhaltet die komplette Registerdefinition des TDC7200. Der Treiber stellt zudem einfache Lese- und Schreib-Routinen für die Kommunikation via SPI zur Verfügung. Damit kann das Mess- IC mit Leichtigkeit umkonfiguriert, aufgesetzt und ausgelesen werden kann. Ein Beispiel ist in Code 2 dargestellt.

```
1 TDC_read(&tdc_ele, TDC_ADR_CONFIG1, data);  
2  
3 data[0] |= TDC_CONFIG1_MEAS_MODE_2;  
4  
5 TDC_write(&tdc_ele, TDC_ADR_CONFIG1, data);
```

Code 2: TDC Read/Write mit Treiber

Weiter kann der Treiber die Messresultate direkt umrechnen, anhand der im Datenblatt vorgegebenen Formeln. Im Code 3 ist der Beispiel-Code für eine einzelne Messung ersichtlich.

```
1 uint64_t tof_fs = 0;  
2  
3 TDC_start(&tdc_opt);  
4  
5 /* ... generate start and stop signals */  
6  
7 if (TDC_read_result(&tdc_opt, &tof_fs) != TDC_OK) {  
8     for (;;) {} // Error handling...  
9 }  
10  
11 /* tof_fs now holds the measurement result, in [fs] */
```

Code 3: TDC Messung mit Treiber

Der selbst entwickelte Firmware-Treiber für den TDC befindet im Anhang 8.1.

Mit Hilfe der Entwicklungsumgebung STM32CubeIDE / CubeMX (ST, 2025) ist es möglich, das Pinout der MCU grafisch zu konfigurieren. Mit Hilfe eines Code-Generators können die Initialisierungs-Routinen für sämtliche Peripherien automatisiert erzeugt werden. Somit kann während der Entwicklung der Fokus auf den TDC-Treiber sowie die eigentliche Applikation gelegt werden.

Die Pin-Konfiguration ist in der Abbildung 24 ersichtlich.

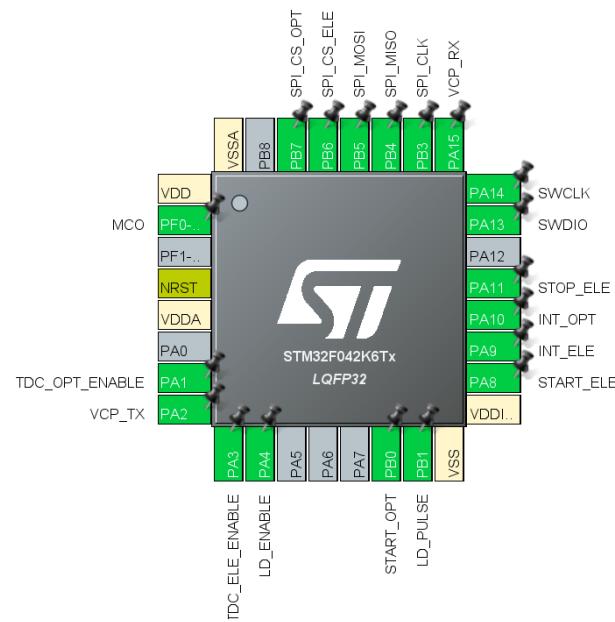


Abbildung 24: Pin-Konfiguration des STM32F042K6

# 6 Messungen

In diesem Kapitel werden die Messresultate dokumentiert.

Die verwendeten Python-Skripte zur Berechnung der statistischen Größen und zum Plotten der Diagramme befinden sich im Anhang 8.2.

## 6.1 Elektrische Messungen

In diesem Teilkapitel werden die Messresultate dokumentiert, welche rein elektrisch (also ohne optischen Teil) erfasst wurde.

Das verwendete Digital Storage Oscilloscope (DSO) ist ein Rohde & Schwarz RTB2004 1.25 GSa/s.

Die Zeitmessenungen werden von `IC1` (siehe Abbildung 13) durchgeführt und von der Firmware, welche auf dem Nucleo Board `U1` (siehe Abbildung 12) getriggert und ausgelesen.

### 6.1.1 GPIO Toggle mit HAL

Als erstes wird gemessen, wie lange es für die CPU der MCU dauert mittels Hardware Abstraction Layer (HAL) - Library (ST, 2020) zwei GPIO-Pins zu schalten.

In Code 4 ist die Firmware-Implementation dazu gezeigt.

```
1 // Configure TDC
2
3 TDC_init(&tdc_ele, &hspi1, SPI_CS_ELE_GPIO_Port, SPI_CS_ELE_Pin,
4           TDC_ELE_ENABLE_GPIO_Port, TDC_ELE_ENABLE_Pin);
5 TDC_enable(&tdc_ele);
6
7 TDC_read(&tdc_ele, TDC_ADR_CONFIG1, data);
8 data[0] |= TDC_CONFIG1_MEAS_MODE_2;
9
10 TDC_write(&tdc_ele, TDC_ADR_CONFIG1, data);
11
12 while (1) {
13     TDC_start(&tdc_ele);
14
15     // Set Pins to High with HAL
16     HAL_GPIO_WritePin(START_ELE_GPIO_Port, START_ELE_Pin, GPIO_PIN_SET);
17     HAL_GPIO_WritePin(STOP_ELE_GPIO_Port, STOP_ELE_Pin, GPIO_PIN_SET);
18
19     TDC_read_result(&tdc_ele, &ttof_fs);
20
21     sprintf(string, "ToF = %lu [ps]\n", tof_fs / 1000);
22     HAL_UART_Transmit(&huart2, (uint8_t *)string, strlen(string), 10000);
23
24     // Set Pins to Low with HAL (preparation for next iteration)
25     HAL_GPIO_WritePin(START_ELE_GPIO_Port, START_ELE_Pin, GPIO_PIN_RESET);
26     HAL_GPIO_WritePin(STOP_ELE_GPIO_Port, STOP_ELE_Pin, GPIO_PIN_RESET);
27
28     HAL_Delay(10); // 10 ms
29 }
```

Code 4: GPIO Toggle mit HAL

Der TDC misst also die Zeit zwischen Zeile 15 und 16 in Code 4. Dazu wird der STOP-Pin des TDC via `sw1` mit `stop_ele` verbunden. Der Kabelanschluss `j3` wird kurzgeschlossen. Siehe Abbildung 13.

Via UART wurden 2000 Messwerte erfasst. Ein Ausschnitt davon ist in Code 5 gezeigt. Die restlichen Daten befinden sich im elektronischen Anhang.

```

1 ToF = 6375779 [ps]
2 ToF = 6374666 [ps]
3 ToF = 6377003 [ps]
4 ToF = 6375333 [ps]
5 ToF = 6377061 [ps]
6 ToF = 6374721 [ps]
7 ToF = 6377504 [ps]
8 ToF = 6374888 [ps]
9 ToF = 6376725 [ps]
10 ToF = 6377005 [ps]
11 ...

```

Code 5: GPIO Toggle mit HAL

Arithmetischer Mittelwert und Standardabweichung sind in Formel 20 aufgeführt.

$$\overline{ToF} = 6'375'888 \text{ ps} \quad (20)$$

$$\sigma = 1'059 \text{ ps}$$

Da die CPU mit 8 MHz läuft, lässt sich daraus schliessen, dass ein Pin-Toggle mit HAL ca. 50 CPU-Cycles benötigt. Dies erscheint plausibel.

Histogramm und Boxplot sind in Abbildung 25 bzw. 26 dargestellt.

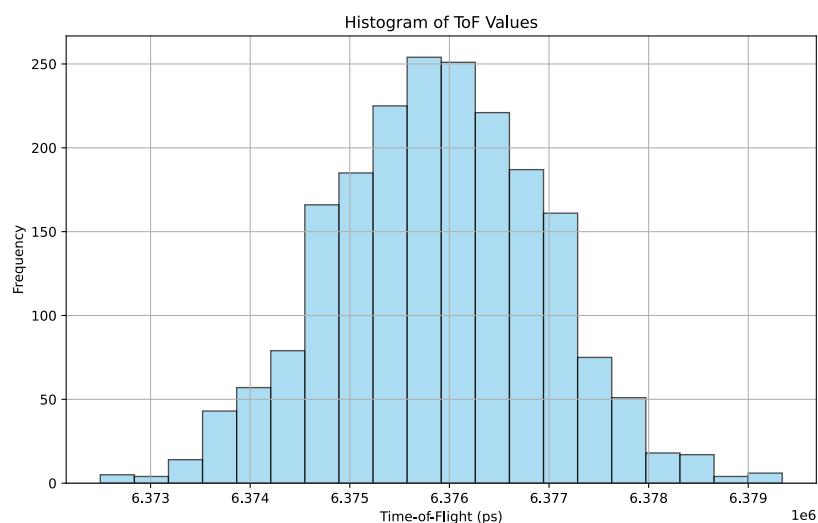


Abbildung 25: GPIO Toggle mit HAL - Histogramm

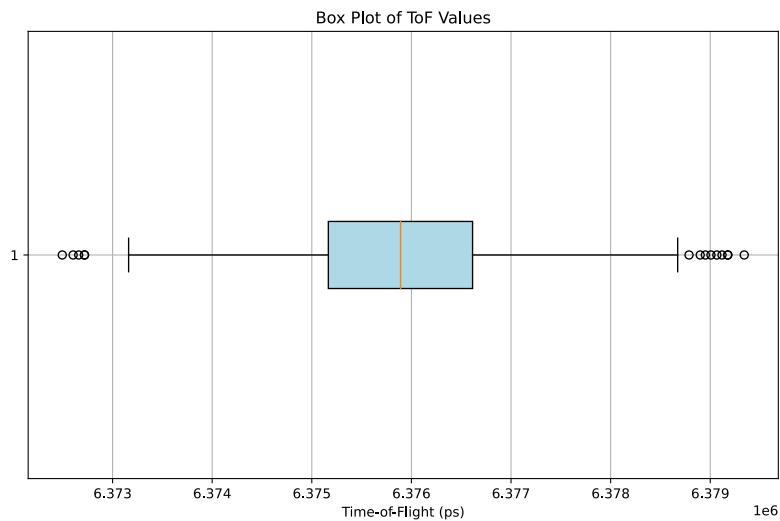


Abbildung 26: GPIO Toggle mit HAL - Boxplot

Um die Resultate des TDC zu validieren, wurde dieselbe Messung auch mittels Digital Storage Oscilloscope (DSO) durchgeführt. Die Messungen sind in Abbildung 27 und 28 dargestellt.



Abbildung 27: GPIO Toggle mit HAL - DSO

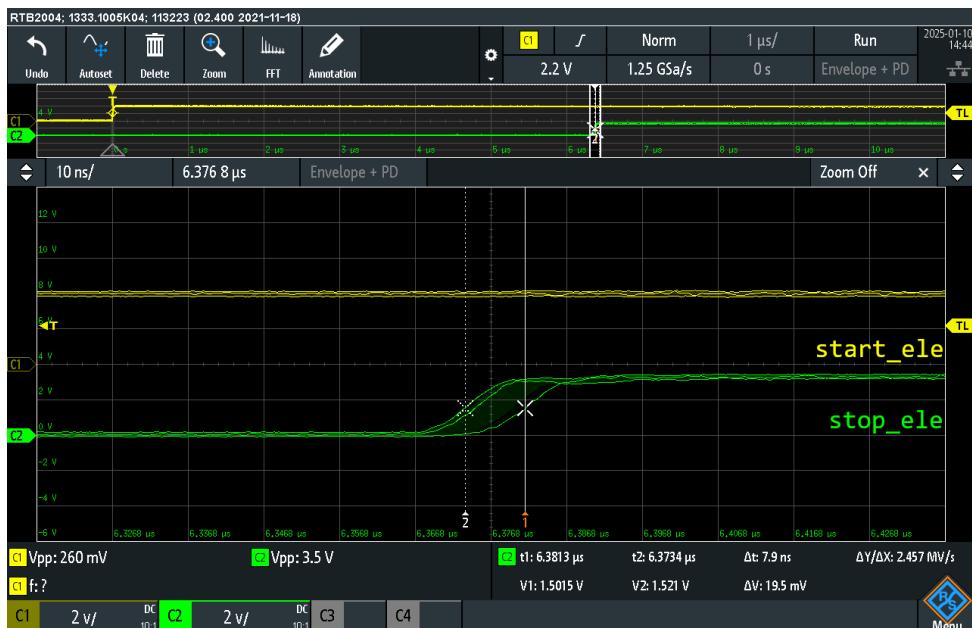


Abbildung 28: GPIO Toggle mit HAL - DSO (Zoom)

### 6.1.2 GPIO Toggle ohne HAL

Als nächstes wird gemessen wie lange es für die CPU der MCU dauert mit direktem Register-Zugriff (via Pointer; ohne HAL-Library) zwei GPIO-Pins zu schalten.

In Code 6 ist die Firmware-Implementation dazu gezeigt.

```

1 // Configure TDC
2
3 TDC_init(&tdc_ele, &hspi1, SPI_CS_ELE_GPIO_Port, SPI_CS_ELE_Pin,
4   TDC_ELE_ENABLE_GPIO_Port, TDC_ELE_ENABLE_Pin);
5 TDC_enable(&tdc_ele);
6
7 TDC_read(&tdc_ele, TDC_ADR_CONFIG1, data);
8 data[0] |= TDC_CONFIG1_MEAS_MODE_2;
9
10 TDC_write(&tdc_ele, TDC_ADR_CONFIG1, data);
11
12 while (1) {
13   TDC_start(&tdc_ele);
14
15   // Set Pins to High with direct register access
16   *((volatile uint32_t*)(GPIOA_BASE + 0x14)) |= (1 << 8); // START_ELE
17   *((volatile uint32_t*)(GPIOA_BASE + 0x14)) |= (1 << 11); // STOP_ELE
18
19   TDC_read_result(&tdc_ele, &tof_fs);
20
21   sprintf(string, "ToF = %lu [ps]\n", tof_fs / 1000);
22   HAL_UART_Transmit(&huart2, (uint8_t *)string, strlen(string), 10000);
23
24   // Set Pins to Low with direct register access (preparation for next
25   // iteration)
26   *((volatile uint32_t*)(GPIOA_BASE + 0x14)) &= ~(1 << 8); // START_ELE
27   *((volatile uint32_t*)(GPIOA_BASE + 0x14)) &= ~(1 << 11); // STOP_ELE
28
29   HAL_Delay(10); // 10 ms

```

### Code 6: GPIO Toggle ohne HAL

Der TDC misst also die Zeit zwischen Zeile 15 und 16 in Code 6. Dazu wird, wie in Kapitel 6.1.1, der STOP-Pin des TDC via `sw1` mit `stop_ele` verbunden. Der Kabelanschluss `j3` wird kurzgeschlossen. Siehe Abbildung 13.

Via UART wurden 2000 Messwerte erfasst. Ein Ausschnitt davon ist in Code 7 gezeigt. Die restlichen Daten befinden sich im elektronischen Anhang.

```

1 ToF = 1377894 [ps]
2 ToF = 1378450 [ps]
3 ToF = 1377615 [ps]
4 ToF = 1377840 [ps]
5 ToF = 1377729 [ps]
6 ToF = 1377615 [ps]
7 ToF = 1377337 [ps]
8 ToF = 1378063 [ps]
9 ToF = 1377949 [ps]
10 ToF = 1377615 [ps]
11 ...

```

### Code 7: GPIO Toggle ohne HAL

Arithmetischer Mittelwert und Standardabweichung sind in Formel 21 aufgeführt.

$$\overline{ToF} = 1'377'773 \text{ ps}$$

$$\sigma = 402 \text{ ps}$$
(21)

Da die CPU mit 8 MHz läuft, lässt sich daraus schliessen, dass ein Pin-Toggle ohne HAL ca. 10 CPU-Cycles benötigt. Dies erscheint plausibel.

Histogramm und Boxplot sind in Abbildung 29 bzw. 30 dargestellt.

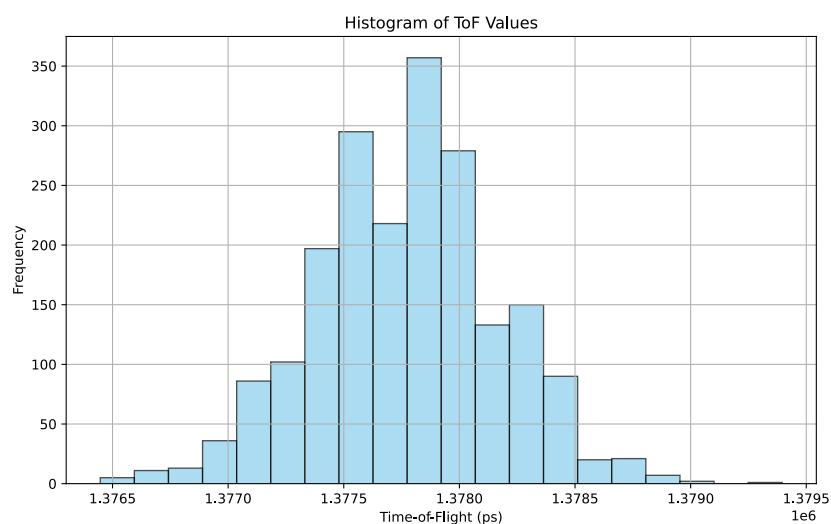


Abbildung 29: GPIO Toggle ohne HAL - Histogramm

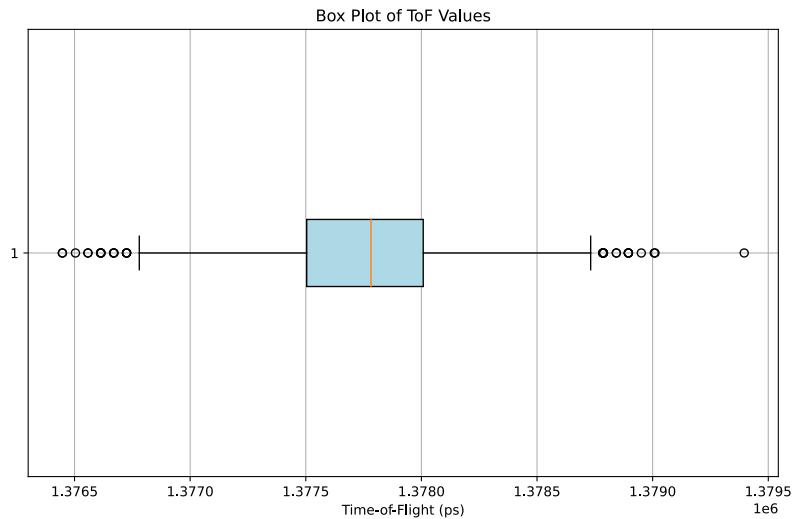


Abbildung 30: GPIO Toggle ohne HAL - Boxplot

Um die Resultate des TDC zu validieren, wurde dieselbe Messung auch mittels Digital Storage Oscilloscope (DSO) durchgeführt. Die Messungen sind in Abbildung 31 und 32 dargestellt.



Abbildung 31: GPIO Toggle ohne HAL - DSO



Abbildung 32: GPIO Toggle ohne HAL - DSO (Zoom)

### 6.1.3 Unterschiedliche Kabellängen

Für diese Messung wird dasselbe Setup wie in Kapitel 6.1.2 verwendet.

Anstelle eines Kurzschlusses von J3 (siehe Abbildung 13) werden nun verschiedene Kabellängen angeschlossen.

Es hat sich herausgestellt, dass eine kreisförmige Anordnung des Kabels wichtig ist. Denn bei einer Überlappung der beiden Kabelenden werden kurze Zeiten gemessen. Dies hat mit der kapazitiven Kopplung zwischen den Leitern zu tun.

Die Resultate sind in Abbildung 33 dargestellt. Die Liste mit den Datenpunkten befindet sich im elektronischen Anhang.

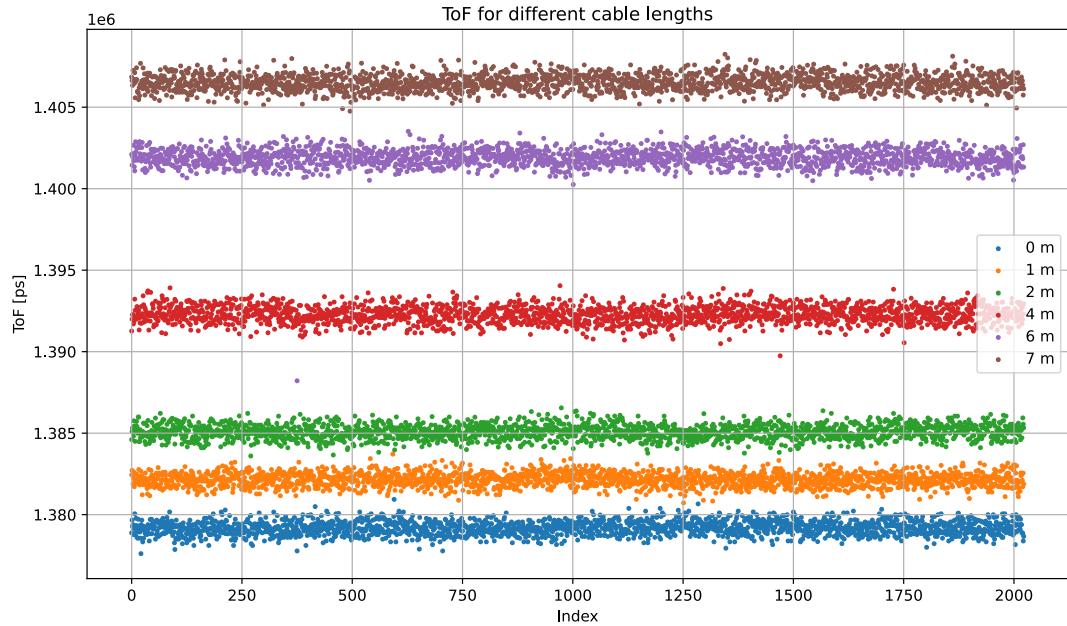


Abbildung 33: Unterschiedliche Kabellängen

Die arithmetischen Mittelwerte und Standardabweichungen sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Länge	Mittelwert	Standardabweichung
0 m	1'379'188 ps	421 ps
1 m	1'382'152 ps	413 ps
2 m	1'385'074 ps	437 ps
4 m	1'392'275 ps	519 ps
6 m	1'401'903 ps	577 ps
7 m	1'406'512 ps	491 ps

Tabelle 1: Unterschiedliche Kabellängen

Die Signal-Ausbreitungsgeschwindigkeit in Kupfer beträgt ca. 2/3 der Lichtgeschwindigkeit (firewall.xc, 2025). Um die Resultate in Tabelle 1 zu validieren, rechnen wir wie in Formel 22 gezeigt, auf die Kabellänge zurück. Die Laufzeit bei 0 m wird dabei abgezogen, um die Verzögerung zu kompensieren, welche durch das Schalten der GPIOs entsteht.

$$c_{cu} \approx \frac{2}{3} \cdot c_0 = \frac{2}{3} \cdot 299'792'458 \frac{m}{s} \approx 200'000'000 \frac{m}{s}$$

$$ToF_n = ToF_{n_{abs}} - ToF_0$$

$$l_n = ToF_n \cdot c_{cu}$$
(22)

Die Resultate sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tatsächliche Länge	ToF_n	Zurückgerechnete Länge
0 m	0 ps	0.6 m
1 m	2'964 ps	0.6 m
2 m	5'886 ps	1.2 m
4 m	13'087 ps	2.6 m
6 m	22'715 ps	4.5 m
7 m	27'324 ps	5.5 m

Tabelle 2: Kabellängen zurückgerechnet

Es fällt auf, dass die Resultate nicht genau übereinstimmen. Dies hat mehrere Ursachen: Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist nicht genau bekannt und die tatsächlichen Kabellängen wurden nicht genau gemessen.

Es ist jedoch eine klare Korrelation zu erkennen.

#### 6.1.4 Mode 1 vs. Mode 2

Der TDC7200 unterstützt zwei Modi mit unterschiedlichen Messbereichen (TI, 2016b):

- Mode 1: 12 ns bis 500 ns
- Mode 2: 250 ns bis 8 ms

Im Mode 1 wird nur der interne Ring-Oszillator des TDC verwendet. Siehe dazu Abbildung 34.

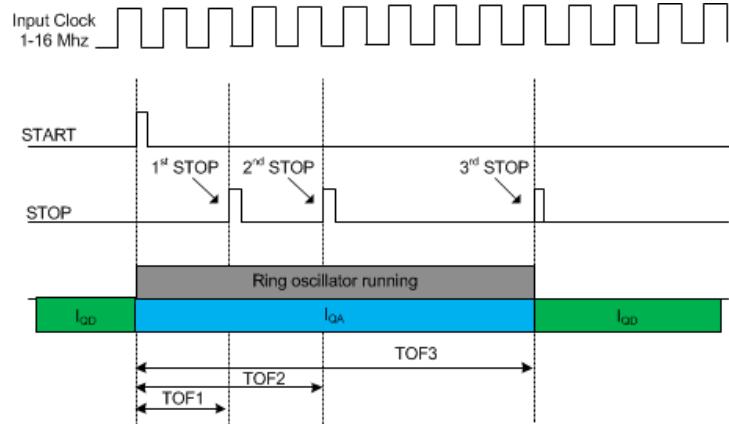


Abbildung 34: TDC Mode 1 (TI, 2016b)

Im Mode 2, um längere Zeiten messen zu können, wird zusätzlich der externe Clock des TDC verwendet. Siehe dazu Abbildung 35.

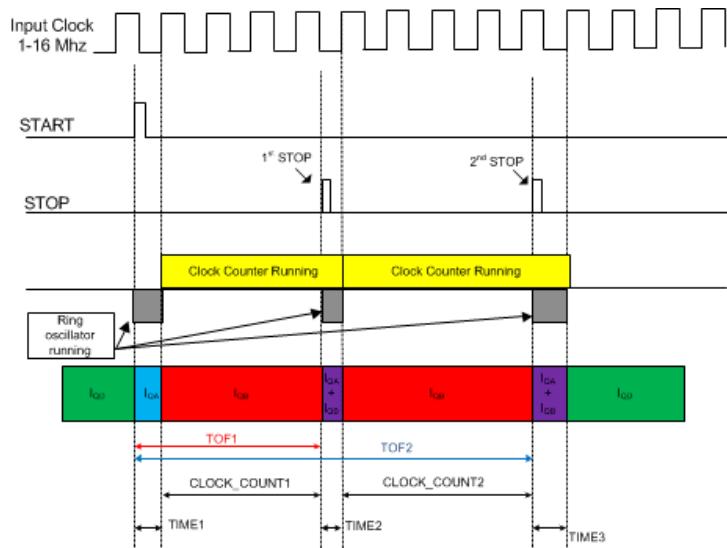


Abbildung 35: TDC Mode 2 (TI, 2016b)

Die bisherigen Messungen (Kapitel 6.1.1, 6.1.2 und 6.1.3) wurden im Mode 2 durchgeführt, da das Schalten der GPIOs mit der CPU mehr als 500 ns brauchte.

In künftigen Messungen soll das Schalten der GPIOs von einem Hardware-Timer der MCU erledigt werden. Damit werden Schaltzeiten von 125 ns bei 8 MHz bzw. 20.8 ns bei 48 MHz möglich sein. Es soll deshalb in diesem Kapitel ein Vergleich der Messresultate der beiden Modi gemacht werden.

Dazu wurden drei Messungen gemacht:

1. GPIO Toggle ohne HAL im Mode 2 mit Kabellänge = 0 m (wie in Kapitel 6.1.2 und 6.1.3)
2. GPIO Toggle ohne HAL im Mode 2 mit Kabellänge = 6 m (wie in Kapitel 6.1.3)
3. Ohne GPIO Toggle Im Mode 1 mit Kabellänge = 6 m

Für die Messung im Mode 1 soll auf die Verzögerung durch das Schalten der GPIOs verzichtet werden. Dazu wird das **START**- und **STOP**-Signal vom selben GPIO-Pin, **start\_ele**, generiert. Dazu wird **SW1** mit **start\_ele** verbunden (siehe Abbildung 13).

In Code 8 ist die Firmware-Implementation für eine Messung im Mode 1 gezeigt.

```

1 // Configure TDC
2
3 TDC_init(&tdc_ele, &hspi1, SPI_CS_ELE_GPIO_Port, SPI_CS_ELE_Pin,
4   TDC_ELE_ENABLE_GPIO_Port, TDC_ELE_ENABLE_Pin);
5 TDC_enable(&tdc_ele);
6
7 TDC_read(&tdc_ele, TDC_ADR_CONFIG1, data);
8 data[0] |= TDC_CONFIG1_MEAS_MODE_1;
9
10 TDC_write(&tdc_ele, TDC_ADR_CONFIG1, data);
11
12 while (1) {
13   TDC_start(&tdc_ele);
14
15   // Set Pin to High
16   *((volatile uint32_t*)(GPIOA_BASE + 0x14)) |= (1 << 8); // START_ELE

```

```

16
17     TDC_read_result(&tdc_ele, &tof_fs);
18
19     sprintf(string, "ToF = %lu [ps]\n", tof_fs / 1000);
20     HAL_UART_Transmit(&huart2, (uint8_t *)string, strlen(string), 10000);
21
22     // Set Pin to Low (preparation for next iteration)
23     *((volatile uint32_t*)(GPIOA_BASE + 0x14)) &= ~(1 << 8); // START_ELE
24
25     HAL_Delay(10); // 10 ms
26 }
```

Code 8: Mode 1

Die Unterschiede im Vergleich zu den Messungen in Kapitel 6.1.2 und 6.1.3 sind:

- Zeile 7: TDC wird im Mode 1 konfiguriert (anstatt Mode 2)
- Zeile 15 und 23: Es wird nur der `start_ele` Pin getoggelt (anstatt `start_ele` und `stop_ele` Pin)

Die Erwartung ist, dass die Differenz aus Messung 1 und Messungen 2 ungefähr dem Resultat aus Messung 3 entspricht.

Die Resultate dieser drei Messungen sind in Tabelle 3 aufgeführt. Die restlichen Daten befinden sich im elektronischen Anhang.

Messung	Mittelwert	Standardabweichung
1	1'378'222 ps	407 ps
2	1'403'224 ps	541 ps
3	25'145 ps	331 ps

Tabelle 3: Mode 1 vs. Mode 2

Die Berechnung in Formel 23 zeigt, dass die Messresultate nahe beieinander liegen.

$$\begin{aligned} \Delta \text{Mode 2} &= 1'403'224 \text{ ps} - 1'378'222 \text{ ps} = 25'001 \text{ ps} \\ \text{Mode 1} &= 25'145 \text{ ps} \end{aligned} \quad (23)$$

Es kann also davon ausgegangen werden, dass Mode 1 und Mode 2 im Firmware-Treiber korrekt implementiert wurden.

Bemerkung: Im Firmware-Treiber (siehe Anhang 8.1) kann für beide Modi dieselbe Funktion `TDC_read_result()` verwendet werden. Für Mode 1 vereinfacht sich die Berechnung, weil `TIME2 = 0` und `CLOCK_COUNT1 = 0`.

### 6.1.5 Timer Output

In Kapitel 6.1.1 und 6.1.2 wurde gezeigt, dass es einige CPU-Cycles dauert, um mittels Software, also mit CPU-Instruktionen, GPIOs zu toggeln.

Eine schnellere Methode ist es, das Toggeln der GPIOs von der Hardware-Peripherie der MCU erledigen zu lassen. Dazu eignen sich Hardware-Timer.

In Abbildung 36 ist die default Clock-Configuration des Nucleo-Boards gezeigt.

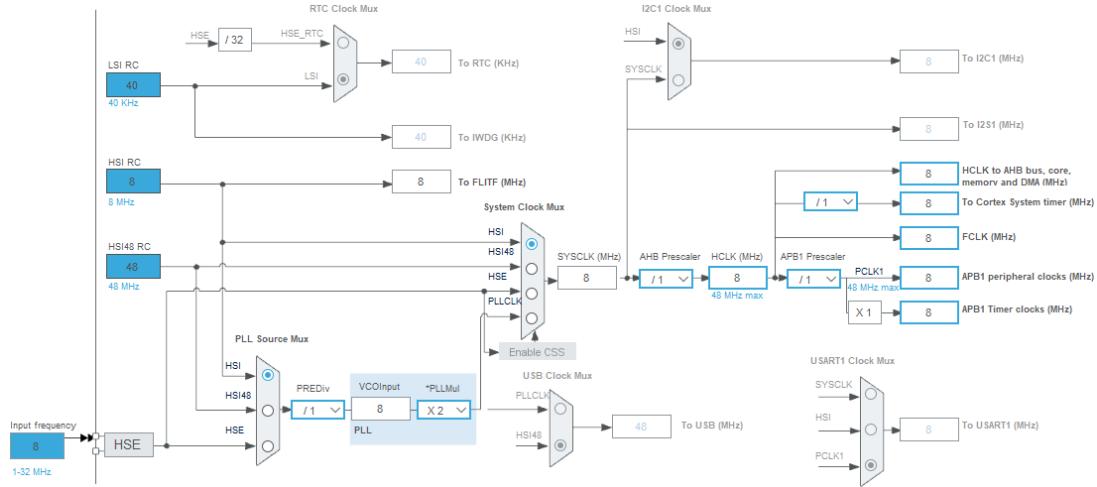


Abbildung 36: Default Clock-Configuration

Per default wird der High Speed Internal (HSI) Clock mit 8 MHz verwendet. Damit sollte es mit Hardware-Timer möglich sein, zwei GPIOs zu schalten mit einer Verzögerung gemäss Formel 24.

$$t = \frac{1}{8 \text{ MHz}} = 125 \text{ ns} \quad (24)$$

Dazu werden Kanal `CH1` und `CH4` des Hardware-Timers `TIM1` im Output Compare Match Modus verwendet. Die zugeordneten GPIO-Pins sind `start_ele` bzw. `stop_ele`.

Erreicht der 16 bit Timer den Wert 32'000 wird `start_ele` auf High geschalten. Beim Erreichen des Werts 32'001 wird `stop_ele` auf High geschalten.

Der TDC wird in Mode 1 konfiguriert. Der STOP-Pin des TDC wird via `sw1` mit `stop_ele` verbunden. Der Kabelanschluss `J3` wird kurzgeschlossen. Siehe Abbildung 13.

In Code 9 ist die Firmware-Implementation dazu gezeigt.

```

1 // Configure TDC
2
3 TDC_init(&tdc_ele, &hspi1, SPI_CS_ELE_GPIO_Port, SPI_CS_ELE_Pin,
           TDC_ELE_ENABLE_GPIO_Port, TDC_ELE_ENABLE_Pin);
4 TDC_enable(&tdc_ele);
5
6 TDC_read(&tdc_ele, TDC_ADR_CONFIG1, data);
7 data[0] |= TDC_CONFIG1_MEAS_MODE_1;
8
9 TDC_write(&tdc_ele, TDC_ADR_CONFIG1, data);
10
11 while (1) {
12     TDC_start(&tdc_ele);
13
14     // Start Timer to toggle Pins from Low to High
15     MX_TIM1_Init();
16     HAL_TIM_OC_Start(&htim1, TIM_CHANNEL_1); // START_ELE
17     HAL_TIM_OC_Start(&htim1, TIM_CHANNEL_4); // STOP_ELE
18 }
```

```

19     HAL_Delay(10); // 10 ms
20
21     TDC_read_result(&tdc_ele, &tof_fs);
22
23     sprintf(string, "ToF = %lu [ps]\n", (uint32_t)(tof_fs / 1000));
24     HAL_UART_Transmit(&huart2, (uint8_t*)string, strlen(string), 10000);
25
26     // Start Timer one more time to toggle Pins from High to Low (preparation
27     // for next iteration)
28     MX_TIM1_Init();
29     HAL_TIM_OC_Start(&htim1, TIM_CHANNEL_1); // START_ELE
30     HAL_TIM_OC_Start(&htim1, TIM_CHANNEL_4); // STOP_ELE
31
32     HAL_Delay(10); // 10 ms
33 }
```

Code 9: GPIO Toggle mit Timer-Output

Der gemessene arithmetische Mittelwert und die Standardabweichung sind in Formel 25 aufgeführt. Die Liste mit den Datenpunkten befindet sich im elektronischen Anhang.

$$\overline{ToF} = 128'108 \text{ ps} \quad (25)$$

$$\sigma = 81 \text{ ps}$$

Erwartungsgemäss dauert das Schalten der GPIOs ca. 125 ns. Die Standardabweichung ist aufgrund der kleineren Anzahl an Clock-Cycles tiefer als in den bisherigen Kapiteln.

### 6.1.6 Unterschiedliche Clock-Konfigurationen

In diesem Teilkapitel werden Messungen mit demselben Setup wie in Kapitel 6.1.5 durchgeführt.

Es werden die arithmetischen Mittelwerte und die Standardabweichungen verschiedener Clock-Quellen des Nucleo-Boards verglichen. Es werden drei Messungen gemacht:

1. HSI: 8 MHz (wie in Kapitel 6.1.5)
2. HSI mit PLL: 16 MHz
3. HSI48: 48 MHz

Die Clock-Konfigurationen für Messung 2 und 3 sind in Abbildung 37 bzw. 38 dargestellt.

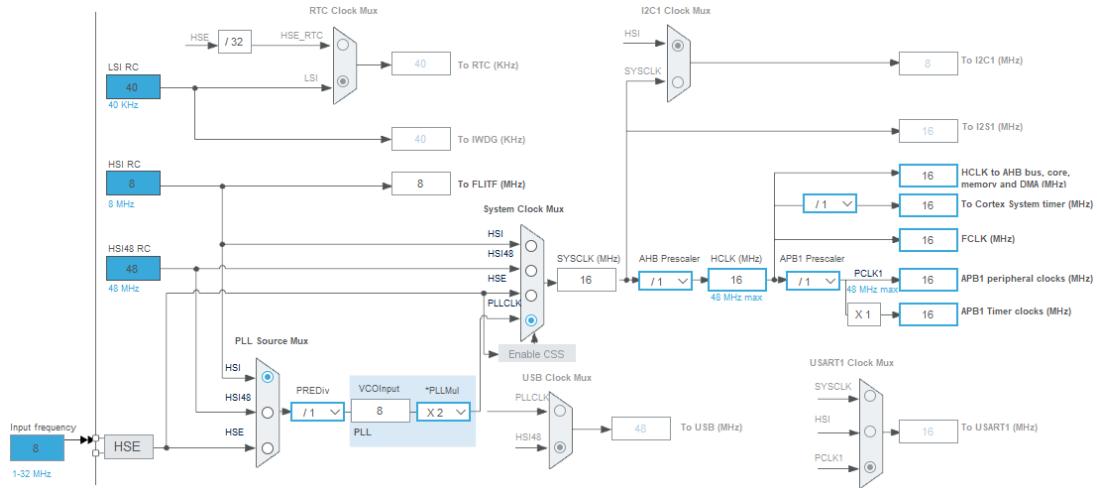


Abbildung 37: Clock-Configuration HSI mit PLL 16 MHz

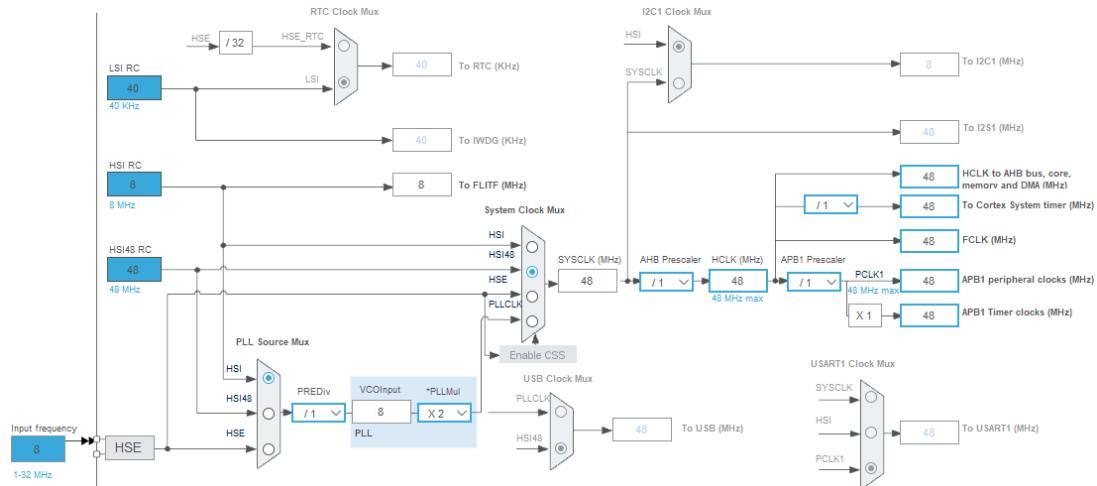


Abbildung 38: Clock-Configuration HSI48 48 MHz

Die arithmetischen Mittelwerte und Standardabweichungen sind in Tabelle 4 dargestellt. Die Liste mit den Datenpunkten befindet sich im elektronischen Anhang.

Messung	Mittelwert	Standardabweichung
1	128'108 ps	81 ps
2	65'694 ps	83 ps
3	24'275 ps	42 ps

Tabelle 4: Unterschiedliche Clock-Quellen

Die Resultate stimmen ungefähr mit den erwarteten Werten aus Formel 26 überein.

$$\begin{aligned} t_1 &= \frac{1}{8 \text{ MHz}} = 125 \text{ ns} \\ t_2 &= \frac{1}{16 \text{ MHz}} = 62.5 \text{ ns} \\ t_3 &= \frac{1}{48 \text{ MHz}} = 20.8 \text{ ns} \end{aligned} \quad (26)$$

Im Datenblatt konnte eine Angabe zum PLL-Jitter gefunden werden, siehe Abbildung 39.

**Table 42. PLL characteristics**

<b>Symbol</b>	<b>Parameter</b>	<b>Value</b>			<b>Unit</b>
		<b>Min</b>	<b>Typ</b>	<b>Max</b>	
$f_{\text{PLL\_IN}}$	PLL input clock <sup>(1)</sup>	1 <sup>(2)</sup>	8.0	24 <sup>(2)</sup>	MHz
	PLL input clock duty cycle	40 <sup>(2)</sup>	-	60 <sup>(2)</sup>	%
$f_{\text{PLL\_OUT}}$	PLL multiplier output clock	16 <sup>(2)</sup>	-	48	MHz
$t_{\text{LOCK}}$	PLL lock time	-	-	200 <sup>(2)</sup>	$\mu\text{s}$
$\text{Jitter}_{\text{PLL}}$	Cycle-to-cycle jitter	-	-	300 <sup>(2)</sup>	ps

1. Take care to use the appropriate multiplier factors to obtain PLL input clock values compatible with the range defined by  $f_{\text{PLL\_OUT}}$ .
2. Guaranteed by design, not tested in production.

Abbildung 39: PLL-Jitter (ST, 2017)

Diese Angabe ist ungefähr in derselben Größenordnung wie die Messresultate.

## 6.2 Optische Messungen

In diesem Teilkapitel werden die Messresultate dokumentiert, welche sich auf den optischen Pfad des Demonstrators beziehen.

Das verwendete DSO ist ein Rohde & Schwarz RTB2004 2.5 GSa/s.

Für die Messungen in diesem Kapitel werden die folgenden Firmware-Konfigurationen verwendet:

- TDC: Modus 1
- Clock: 48 MHz
- Schalten der GPIOs: Timer Output

### 6.2.1 Signalpfad Sender

In diesem Unterkapitel wird der Signalpfad des optischen Sendeteils ausgemessen.

Die Verzögerungszeiten zwischen den MCU-Signalen `start_op` und `LD_pulse` sowie dem Potential am Gate des NexFET (v1 Pin 4 in Abbildung 17) sind in Abbildung 40 dargestellt.



Abbildung 40: Messung Signalpfad Sender: `start_op`, `LD_pulse`, FET-Gate

Die gemessene Verzögerungszeit von 20.4 ns (20.8 ns entsprechen einem Clock-Cycle bei 48 MHz) zwischen `start_op` und `LD_pulse` wurde bewusst eingefügt, um sicherzustellen, dass die minimale Messdauer von 12 ns (TI, 2016b) im Mode 1 garantiert immer eingehalten wird.

Die gemessene Verzögerungszeit von 8.4 ns zwischen **LD\_pulse** und dem FET-Gate (dies entspricht dem Ausgang des Gate-Treibers **IC22**) ist klein und zeigt eine steile Flanke.

In Abbildung 41 ist der Strom durch die Laser-Diode (**LD1** in Abbildung 17) aufgezeigt.



Abbildung 41: Messung Signalpfad Sender: Strom durch Laser-Diode

Der Strom wurde gemäss Formel 27 berechnet.

$$I_{LD} = \frac{V(TP8) - V(TP9)}{R_V} = \frac{V(TP8) - V(TP9)}{5 \Omega} \quad (27)$$

Damit die Verzögerungszeit ersichtlich ist, wurde zusätzlich, wie in Abbildung 40, das Signal **LD\_pulse** und das Potential am FET-Gate aufgezeichnet.

Der gemessene Strom während dem Senden beträgt ca. 174 mA.

Dies ist um einiges weniger als der erwartete Strom von 440 mA aus Formel 12. Dies hat mit der erhöhten Dioden-Spannung zu tun. Während dem Senden erhöht sich die Spannung über der Laser-Diode auf ca. 4 V, die Spannung über Drain-Source des FET ist vernachlässigbar klein. Damit ergibt sich der Strom durch die Diode gemäss Formel 28.

$$I_{LD} = \frac{5 V - V_{LD} - V_{DS}}{R_V} \approx \frac{5 V - 4 V}{5 \Omega} \approx 200 mA \quad (28)$$

### 6.2.2 ToF-Messungen via Spiegel

Damit die Photo-Diode ein möglichst starkes Signal erhält, wurde anstelle einer Wand für diese Messungen ein Spiegel verwendet. Das Setup ist in Abbildung 42 dargestellt.

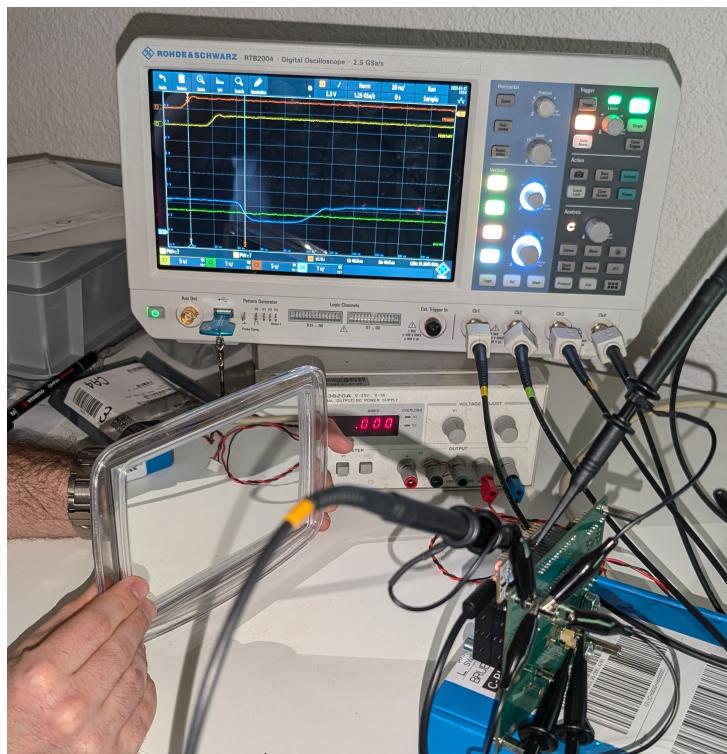


Abbildung 42: Mess-Setup mit Spiegel

Gemäss Datenblatt hat die Laser-Diode eine nicht ideal punktförmige Abstrahl-Charakteristik, siehe Abbildung 43.

Beam divergence	$\theta_{\parallel}$	Po=7mW	7	9	13	deg.
	$\theta_{\perp}$		20	27	35	deg.

Abbildung 43: Laser Abstrahl-Charakteristik (ROHM, 2019)

Es ist aufgefallen, dass mit dem gewählten PCB-Layout die Orientierung der Laser-Diode für eine Spiegel- Messung nicht ganz ideal ist. Der breitere Abstrahlwinkel ist senkrecht zur Linie zwischen Laser- und Photodiode. Siehe dazu Abbildung 44.

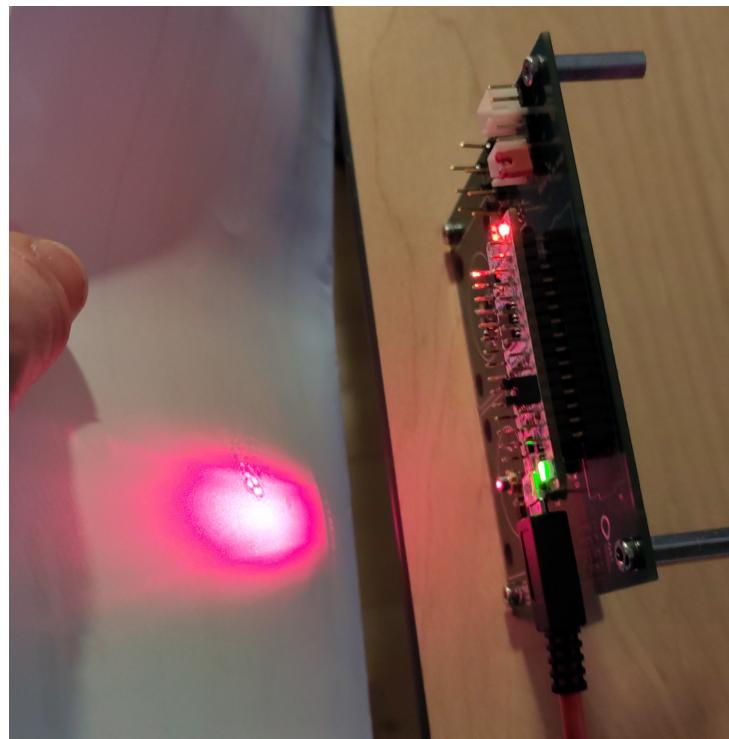


Abbildung 44: Laser-Ausrichtung

Die Laser-Diode wurde deshalb manuell um 90° gedreht, wie in Abbildung 45 dargestellt.



Abbildung 45: Laser-Ausrichtung angepasst

Das DSO-Diagramm einer initialen Spiegel-Messung mit ca. 20 cm Distanz zum Spiegel ist Abbildung 46 dargestellt. Es zeigt den Ausgang des Transimpedanzverstärkers. Zusätzlich, um die Verzögerungszeit zu sehen wurden auch die MCU-Signale `start_op` und `LD_pulse` sowie das Potential am Gate des FET aufgezeichnet.



Abbildung 46: Initiale Spiegelmessung mit DSO

Mit dem Demonstrator wurden Messwerte für drei verschiedene Distanzen aufgezeichnet: 19 cm, 24 cm und 28.5 cm.

Die mit dem optischen TDC erfassten Datenpunkte sind in Abbildung 47 dargestellt. Es wurden je ca. 300 Messwerte erfasst, die Liste mit den Datenpunkten befindet sich im elektronischen Anhang.

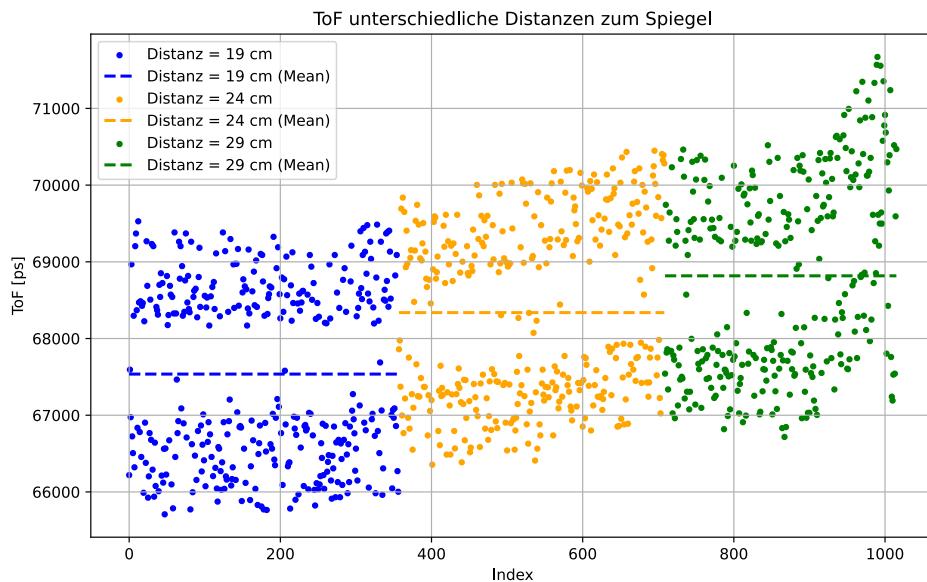


Abbildung 47: Unterschiedliche Distanzen zum Spiegel - Plot

Die arithmetischen Mittelwerte und die Standardabweichungen sind in Tabelle 5 aufgelistet.

Distanz zum Spiegel	Mittelwert	Standardabweichung
19 cm	67'536 ps	1'172 ps
24 cm	68'338 ps	1'191 ps
29 cm	68'817 ps	1'273 ps

Tabelle 5: Unterschiedliche Distanzen zum Spiegel - Statistische Grössen

Eine Spiegeldistanz-Änderung von 5 cm entspricht einer Längen-Änderung von 10 cm.

Die Messungen zeigen für diese Längen-Änderung von 10 cm eine Änderung der Laufzeit von durchschnittlich ca. 0.6 ns.

In Formel 29 wird der theoretisch zu erwartende Laufzeit-Unterschied berechnet.

$$\Delta ToF = \frac{\Delta L}{c} = \frac{10 \text{ cm}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 0.33 \text{ ns} \quad (29)$$

Dieser Unterschied (ca. Faktor 2) könnte mehrere Gründe haben:

- 1.) Eine mögliche Erklärung ist es, dass die Flanke bei grösserer Distanz weniger steil wird und dadurch fälschlicherweise eine etwas längere Laufzeit gemessen wird.
- 2.) Etwas anderes, das in Abbildung 47 auffällt, ist eine Time-Drift während dem Aufzeichnen der Messdaten bei 24 cm und 29 cm. Abbildung 48 soll dies verdeutlichen.

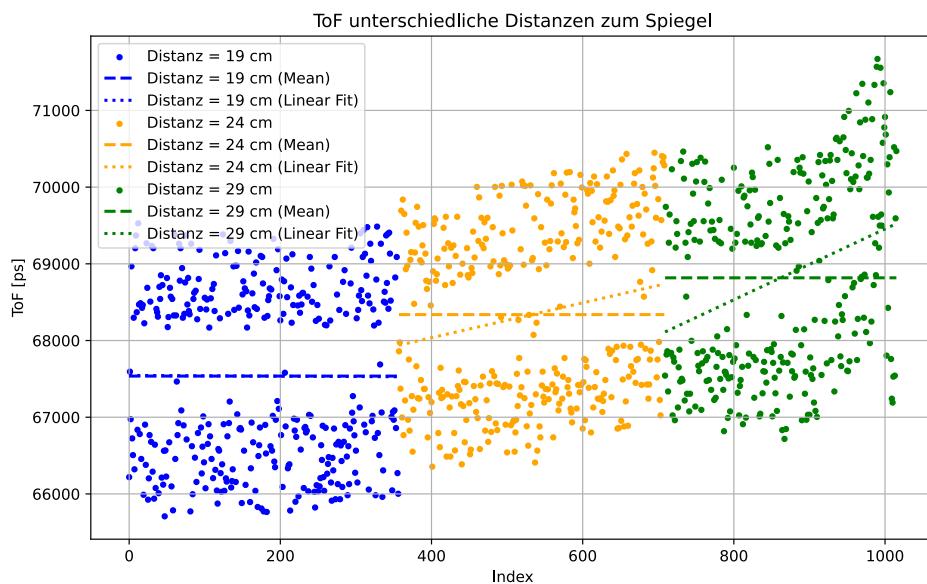


Abbildung 48: Unterschiedliche Distanzen zum Spiegel - Plot mit linearer Interpolation

Diese Time-Drift kann aber den gemessenen Unterschied nicht schlüssig erklären.

Bemerkung: Der Spiegel musste sehr genau ausgerichtet werden und dann sehr stabil gehalten werden, um Resultate mit relativ kleiner Standardabweichung (ca. 1 ns) aufzeichnen zu können.

Bei Distanzen von mehr als 30 cm wird das TDC-Signal unbrauchbar.

Dies hat damit zutun, dass ab dann die Fotodiode nur noch einen kleinen Lichtstrom generiert. Dies führt zu eineren kleineren Aussteuerung am Ausgang des Transimpedanzverstärkers. Somit wird die Schaltschwelle des Komparators nicht mehr oder nur noch ganz knapp erreicht.

Abbildungen 49 und 50 sollen dies verdeutlichen.



Abbildung 49: TIA-Ausgang und Komparator-Schaltschwelle bei 12 cm



Abbildung 50: TIA-Ausgang und Komparator-Schaltschwelle bei 30 cm

Die Abbildungen zeigen, neben den MCU-Signalen `start_op` und `LD_pulse`, den Ausgang des Transimpedanzverstärkers und die Komparator-Schaltschwelle.

Mögliche Verbesserungen dazu sind im Kapitel ?? aufgeführt.

### 6.2.3 ToF-Messungen via Wand

Anstelle des in Kapitel 6.2.2 verwendeten Spiegels, werden in diesem Kapitel Messresultate mit einer weißen Wand als Target aufgezeichnet. Es wurden Distanzen von ca. 10 bis 30 cm ausprobiert.

Es konnten mit diesem Setup in der kurzen zur Verfügung stehenden Zeit keine brauchbaren Messresultate erfasst werden.

Mögliche Verbesserungen dazu sind im Kapitel ?? aufgeführt.

## 7 Fazit

## 8 Anhang

### 8.1 TDC Treiber

In Code 10 und 11 ist der selbst entwickelte Firmware-Treiber für den TDC dargestellt.

```

1  /*
2   * TDC.h
3   *
4   * Driver for TI TDC7200 -- Header file
5   *
6   * (C) T. Burkard | M. Schaeer
7   *
8   */
9
10 #ifndef TDC_H_
11 #define TDC_H_
12
13 #include <stdint.h>
14 #include "stm32f0xx_hal.h"
15
16 #define TDC_CLOCK_PERIOD_FS 62500000 // 16 MHz in [fs]
17
18 /**
19 * Convert 24bit buffer received from SPI to integer
20 */
21 #define TDC_24BIT_BUF_TO_INT(buf) ((buf[0] << 16) + (buf[1] << 8) + buf[2])
22
23 /**
24 * @brief Register addresses of the TDC
25 *
26 */
27 typedef enum {
28     TDC_ADR_CONFIG1          = 0x00, // Configuration Register 1
29     TDC_ADR_CONFIG2          = 0x01, // Configuration Register 2
30     TDC_ADR_INT_STATUS       = 0x02, // Interrupt Status Register
31     TDC_ADR_INT_MASK         = 0x03, // Interrupt Mask Register
32     TDC_ADR_COARSE_CNTR_OVF_H = 0x04, // Coarse Counter Overflow Value High
33     TDC_ADR_COARSE_CNTR_OVF_L = 0x05, // Coarse Counter Overflow Value Low
34     TDC_ADR_CLOCK_CNTR_OVF_H = 0x06, // CLOCK Counter Overflow Value High
35     TDC_ADR_CLOCK_CNTR_OVF_L = 0x07, // CLOCK Counter Overflow Value Low
36     TDC_ADR_CLOCK_CNTR_STOP_MASK_H = 0x08, // CLOCK Counter STOP Mask High
37     TDC_ADR_CLOCK_CNTR_STOP_MASK_L = 0x09, // CLOCK Counter STOP Mask Low
38     TDC_ADR_TIME1             = 0x10, // Measured Time 1
39     TDC_ADR_CLOCK_COUNT1     = 0x11, // CLOCK Counter Value
40     TDC_ADR_TIME2             = 0x12, // Measured Time 2
41     TDC_ADR_CLOCK_COUNT2     = 0x13, // CLOCK Counter Value
42     TDC_ADR_TIME3             = 0x14, // Measured Time 3
43     TDC_ADR_CLOCK_COUNT3     = 0x15, // CLOCK Counter Value
44     TDC_ADR_TIME4             = 0x16, // Measured Time 4
45     TDC_ADR_CLOCK_COUNT4     = 0x17, // CLOCK Counter Value
46     TDC_ADR_TIME5             = 0x18, // Measured Time 5
47     TDC_ADR_CLOCK_COUNT5     = 0x19, // CLOCK Counter Value
48     TDC_ADR_TIME6             = 0x1A, // Measured Time 6
49     TDC_ADR_CALIBRATION1     = 0x1B, // Calibration 1, 1 CLOCK Period
50     TDC_ADR_CALIBRATION2     = 0x1C, // Calibration 2, 2/10/20/40 CLOCK
51     Periods
52     TDC_ADR_AMOUNT // Amount of registers
53 } TDC_adr_t;
```

```

54 /**
55 * @brief Register sizes of the TDC
56 *
57 * Index = Register address (TDC_adr_t)
58 * Value = Register size (in bytes)
59 *
60 */
61 extern const uint8_t TDC_REG_SIZE[TDC_ADR_AMOUNT];
62
63 /**
64 * @brief Bit description of the TDC CONFIG1 register
65 *
66 */
67 typedef enum {
68     TDC_CONFIG1_FORCE_CAL_OFF    = (0b0 << 7), // Calibration is not performed
69     after interrupted measurement (for example, due to counter overflow or
70     missing STOP signal)
71     TDC_CONFIG1_FORCE_CAL_ON    = (0b1 << 7), // Calibration is always
72     performed at the end (for example, after a counter overflow)
73     TDC_CONFIG1_PARITY_EN_OFF   = (0b0 << 6), // Parity bit for Measurement
74     Result Registers disabled (Parity Bit always 0)
75     TDC_CONFIG1_PARITY_EN_ON    = (0b1 << 6), // Parity bit for Measurement
76     Result Registers enabled (Even Parity)
77     TDC_CONFIG1_TRIGG_EDGE_RISE = (0b0 << 5), // TRIGG is output as a Rising
78     edge signal
79     TDC_CONFIG1_TRIGG_EDGE_FALL = (0b1 << 5), // TRIGG is output as a Falling
80     edge signal
81     TDC_CONFIG1_STOP_EDGE_RISE  = (0b0 << 4), // Measurement is stopped on
82     Rising edge of STOP signal
83     TDC_CONFIG1_STOP_EDGE_FALL  = (0b1 << 4), // Measurement is stopped on
84     Falling edge of STOP signal
85     TDC_CONFIG1_START_EDGE_RISE = (0b0 << 3), // Measurement is started on
86     Rising edge of START signal
87     TDC_CONFIG1_START_EDGE_FALL = (0b1 << 3), // Measurement is started on
88     Falling edge of START signal
89     TDC_CONFIG1_MEAS_MODE_1     = (0b00 << 1), // Measurement Mode 1 (for
90     expected time-of-flight < 500 ns).
91     TDC_CONFIG1_MEAS_MODE_2     = (0b01 << 1), // Measurement Mode 2
92     (recommended)
93     TDC_CONFIG1_START_MEAS      = (0b1 << 0), // Start New Measurement.
94     Writing a 1 will clear all bits in the Interrupt Status Register and Start
95     the measurement (by generating an TRIGG signal) and will reset the content
96     of all Measurement Results registers
97 } TDC_config1_t;
98
99 /**
100 * @brief Bit description of the TDC CONFIG2 register
101 *
102 */
103 typedef enum {
104     TDC_CONFIG2_CALIBRATION2_PERIODS_2    = (0b00 << 6), // Measuring 2 CLOCK
105     periods
106     TDC_CONFIG2_CALIBRATION2_PERIODS_10   = (0b01 << 6), // Measuring 10 CLOCK
107     periods
108     TDC_CONFIG2_CALIBRATION2_PERIODS_20   = (0b10 << 6), // Measuring 20 CLOCK
109     periods
110     TDC_CONFIG2_CALIBRATION2_PERIODS_40   = (0b11 << 6), // Measuring 40 CLOCK
111     periods
112     TDC_CONFIG2_AVG_CYCLES_1              = (0b000 << 3), // 1 Measurement Cycle
113     only (no Multi-Cycle Averaging Mode)
114     TDC_CONFIG2_AVG_CYCLES_2              = (0b001 << 3), // 2 Measurement Cycles

```

```
94     TDC_CONFIG2_AVG_CYCLES_4          = (0b010 << 3), // 4 Measurement Cycles
95     TDC_CONFIG2_AVG_CYCLES_8          = (0b011 << 3), // 8 Measurement Cycles
96     TDC_CONFIG2_AVG_CYCLES_16         = (0b100 << 3), // 16 Measurement Cycles
97     TDC_CONFIG2_AVG_CYCLES_32         = (0b101 << 3), // 32 Measurement Cycles
98     TDC_CONFIG2_AVG_CYCLES_64         = (0b110 << 3), // 64 Measurement Cycles
99     TDC_CONFIG2_AVG_CYCLES_128        = (0b111 << 3), // 128 Measurement
100    Cycles
101    TDC_CONFIG2_NUM_STOP_1           = (0b000 << 0), // Single Stop
102    TDC_CONFIG2_NUM_STOP_2           = (0b001 << 0), // Two Stops
103    TDC_CONFIG2_NUM_STOP_3           = (0b010 << 0), // Three Stops
104    TDC_CONFIG2_NUM_STOP_4           = (0b011 << 0), // Four Stops
105    TDC_CONFIG2_NUM_STOP_5           = (0b100 << 0), // Five Stops
106
107 /**
108 * @brief Bit description of the TDC INT_STATUS register
109 *
110 */
111 typedef enum {
112     TDC_STATUS_MEAS_COMPLETE_FLAG   = (1 << 4), // Measurement has completed
113     TDC_STATUS_MEAS_STARTED_FLAG    = (1 << 3), // Measurement has started
114     (START signal received)
115     TDC_STATUS_CLOCK_CNTR_OVF_INT  = (1 << 2), // Clock overflow detected,
116     running measurement will be stopped immediately
117     TDC_STATUS_COARSE_CNTR_OVF_INT = (1 << 1), // Coarse overflow detected,
118     running measurement will be stopped immediately
119     TDC_STATUS_NEW_MEAS_INT        = (1 << 0), // Interrupt detected - New
120     Measurement has been completed
121 }
122 /**
123 * @brief Bit description of the TDC INT_MASK register
124 *
125 */
126 typedef enum {
127     TDC_MASK_CLOCK_CNTR_OVF_MASK_OFF = (0 << 2), // CLOCK Counter Overflow
128     Interrupt disabled
129     TDC_MASK_CLOCK_CNTR_OVF_MASK_ON  = (1 << 2), // CLOCK Counter Overflow
130     Interrupt enabled
131     TDC_MASK_COARSE_CNTR_OVF_MASK_OFF = (0 << 1), // Coarse Counter Overflow
132     Interrupt disabled
133     TDC_MASK_COARSE_CNTR_OVF_MASK_ON  = (1 << 1), // Coarse Counter Overflow
134     Interrupt enabled
135     TDC_MASK_NEW_MEAS_MASK_OFF      = (0 << 0), // New Measurement Interrupt
136     disabled
137     TDC_MASK_NEW_MEAS_MASK_ON       = (1 << 0), // New Measurement Interrupt
138     enabled
139 }
140 /**
141 * @brief Error codes of the TDC module
142 */
143 typedef enum {
144     TDC_OK = 0,
145     TDC_ERROR,
146     TDC_WRONG_ADDRESS,
147     TDC_WRONG_SIZE,
148     TDC_COM_ERROR,
149 }
150 /**
151 * @brief Error codes of the TDC module
152 */
153
```

```

144 /**
145 * @brief Handle for a TDC instance
146 *
147 */
148 typedef struct {
149     SPI_HandleTypeDef* spi;
150     GPIO_TypeDef* cs_port;
151     uint16_t cs_pin;
152     GPIO_TypeDef* en_port;
153     uint16_t en_pin;
154 } TDC_t;
155
156 /**
157 * @brief Initialize a TDC instance
158 *
159 * Note, SPI and GPIOs need to be initialized manually before calling this
160 * function.
161 *
162 * @param [out] tdc -- Pointer to TDC handle
163 * @param [in] spi -- Pointer to SPI handle
164 * @param [in] cs_port -- GPIO port of Chip Select
165 * @param [in] cs_pin -- GPIO pin of Chip Select
166 * @param [in] en_port -- GPIO port of Enable
167 * @param [in] en_pin -- GPIO pin of Enable
168 *
169 * @return TDC_error -- Error code
170 */
171 TDC_error_t TDC_init(TDC_t* tdc, SPI_HandleTypeDef* spi, GPIO_TypeDef* cs_port,
172                      uint16_t cs_pin, GPIO_TypeDef* en_port, uint16_t en_pin);
173
174 /**
175 * @brief Enable the TDC
176 *
177 * @param [in] tdc -- Pointer to TDC handle
178 *
179 * @return TDC_error_t -- Error code
180 */
181 TDC_error_t TDC_enable(TDC_t* tdc);
182
183 /**
184 * @brief Disable the TDC
185 *
186 * @param [in] tdc -- Pointer to TDC handle
187 *
188 * @return TDC_error_t -- Error code
189 */
190 TDC_error_t TDC_disable(TDC_t* tdc);
191
192 /**
193 * @brief Read register data from TDC
194 *
195 * @param [in] tdc -- Pointer to TDC handle
196 * @param [in] address -- Address of the register(s) to read
197 * @param [out] rx_data -- Pointer to data
198 *
199 * @attention @p rx_data needs to provide space for at least TDC_REG_SIZE[ @p
200 * address ] bytes.
201 *
202 * @return TDC_error_t -- Error code
203 */
204 TDC_error_t TDC_read(TDC_t* tdc, TDC_addr_t address, uint8_t* rx_data);

```

```

202 /**
203 * @brief Write register data to TDC
204 *
205 * @param[in] tdc      -- Pointer to TDC handle
206 * @param[in] address -- Address of the register(s) to write
207 * @param[in] tx_data -- Pointer to data
208 *
209 * @attention @p tx_data needs to provide space for at least TDC_REG_SIZE[ @p
210 *           address ] bytes.
211 *
212 * @return TDC_error_t -- Error code
213 */
214 TDC_error_t TDC_write(TDC_t* tdc, TDC_addr_t address, uint8_t* tx_data);
215
216 /**
217 * @brief Start measurement of TDC
218 *
219 * @param[in] tdc -- Pointer to TDC handle
220 *
221 * @return TDC_error_t -- Error code
222 */
223 TDC_error_t TDC_start(TDC_t* tdc);
224
225 /**
226 * @brief Read ToF measurement result from TDC
227 *
228 * @param[in] tdc   -- Pointer to TDC handle
229 * @param[out] tof_fs -- ToF Measurement result [fs]
230 *
231 * @return TDC_error_t -- Error code
232 */
233 TDC_error_t TDC_read_result(TDC_t* tdc, uint64_t* tof_fs);
234
235 #endif /* TDC_H_ */

```

Code 10: TDC Driver (Header)

```

1 /*
2 * TDC.c
3 *
4 * Driver for TI TDC7200 -- Source file
5 *
6 * (C) T. Burkard | M. Schaeer
7 *
8 */
9
10 #include "TDC/TDC.h"
11 #include <stdbool.h>
12
13 #define TDC_AUTO_INC_OFF (0 << 7)
14 #define TDC_AUTO_INC_ON  (1 << 7)
15
16 #define TDC_RW_READ    (0 << 6)
17 #define TDC_RW_WRITE   (1 << 6)
18
19 #define TDC_CMD_READ   (TDC_AUTO_INC_ON | TDC_RW_READ)
20 #define TDC_CMD_WRITE  (TDC_AUTO_INC_ON | TDC_RW_WRITE)
21
22 const uint8_t TDC_REG_SIZE[TDC_ADR_AMOUNT] = {
23     // Register Address             Register Size [bytes]

```

```

24     [TDC_ADR_CONFIG1]          = 1,
25     [TDC_ADR_CONFIG2]          = 1,
26     [TDC_ADR_INT_STATUS]       = 1,
27     [TDC_ADR_INT_MASK]         = 1,
28     [TDC_ADR_COARSE_CNTR_OVF_H] = 1,
29     [TDC_ADR_COARSE_CNTR_OVF_L] = 1,
30     [TDC_ADR_CLOCK_CNTR_OVF_H] = 1,
31     [TDC_ADR_CLOCK_CNTR_OVF_L] = 1,
32     [TDC_ADR_CLOCK_CNTR_STOP_MASK_H] = 1,
33     [TDC_ADR_CLOCK_CNTR_STOP_MASK_L] = 1,
34     [TDC_ADR_TIME1]            = 3,
35     [TDC_ADR_CLOCK_COUNT1]      = 3,
36     [TDC_ADR_TIME2]            = 3,
37     [TDC_ADR_CLOCK_COUNT2]      = 3,
38     [TDC_ADR_TIME3]            = 3,
39     [TDC_ADR_CLOCK_COUNT3]      = 3,
40     [TDC_ADR_TIME4]            = 3,
41     [TDC_ADR_CLOCK_COUNT4]      = 3,
42     [TDC_ADR_TIME5]            = 3,
43     [TDC_ADR_CLOCK_COUNT5]      = 3,
44     [TDC_ADR_TIME6]            = 3,
45     [TDC_ADR_CALIBRATION1]      = 3,
46     [TDC_ADR_CALIBRATION2]      = 3,
47 };
48
49 static TDC_error_t send(TDC_t* tdc, TDC_addr_t address, uint8_t* data, bool
50                         write);
51
52 TDC_error_t TDC_init(TDC_t* tdc, SPI_HandleTypeDef* spi, GPIO_TypeDef* cs_port,
53                      uint16_t cs_pin, GPIO_TypeDef* en_port, uint16_t en_pin)
54 {
55     if ((tdc == NULL) || (spi == NULL) || (cs_port == NULL) || (en_port ==
56         NULL)) {
57         return TDC_ERROR;
58     }
59
60     tdc->spi      = spi;
61     tdc->cs_port  = cs_port;
62     tdc->cs_pin   = cs_pin;
63     tdc->en_port  = en_port;
64     tdc->en_pin   = en_pin;
65
66     return TDC_OK;
67 }
68
69 TDC_error_t TDC_enable(TDC_t* tdc)
70 {
71     if (tdc == NULL) {
72         return TDC_ERROR;
73     }
74
75     HAL_GPIO_WritePin(tdc->en_port, tdc->en_pin, GPIO_PIN_SET);
76
77     return TDC_OK;
78 }
79
80 TDC_error_t TDC_disable(TDC_t* tdc)
81 {
82     if (tdc == NULL) {
83         return TDC_ERROR;
84     }

```

```
82     HAL_GPIO_WritePin(tdc->en_port, tdc->en_pin, GPIO_PIN_RESET);
83
84     return TDC_OK;
85 }
86
87
88 TDC_error_t TDC_write(TDC_t* tdc, TDC_addr_t address, uint8_t* tx_data)
89 {
90     return send(tdc, address, tx_data, true);
91 }
92
93 TDC_error_t TDC_read(TDC_t* tdc, TDC_addr_t address, uint8_t* rx_data)
94 {
95     return send(tdc, address, rx_data, false);
96 }
97
98 TDC_error_t TDC_start(TDC_t* tdc)
99 {
100     uint8_t      data[TDC_REG_SIZE[TDC_ADR_CONFIG1]];
101     TDC_error_t error_code = TDC_OK;
102
103     if ((error_code = TDC_read(tdc, TDC_ADR_CONFIG1, data)) != TDC_OK) {
104         return error_code;
105     }
106
107     data[0] |= TDC_CONFIG1_START_MEAS;
108
109     return TDC_write(tdc, TDC_ADR_CONFIG1, data);
110 }
111
112 TDC_error_t TDC_read_result(TDC_t* tdc, uint64_t* tof_fs)
113 {
114     uint8_t time1_buf[TDC_REG_SIZE[TDC_ADR_TIME1]];
115     uint8_t time2_buf[TDC_REG_SIZE[TDC_ADR_TIME2]];
116     uint8_t clock_count1_buf[TDC_REG_SIZE[TDC_ADR_CLOCK_COUNT1]];
117     uint8_t calibration1_buf[TDC_REG_SIZE[TDC_ADR_CALIBRATION1]];
118     uint8_t calibration2_buf[TDC_REG_SIZE[TDC_ADR_CALIBRATION2]];
119     uint8_t config2_buf[TDC_REG_SIZE[TDC_ADR_CONFIG2]];
120
121     uint32_t time1;
122     uint32_t time2;
123     uint32_t clock_count1;
124     uint32_t calibration1;
125     uint32_t calibration2;
126     uint32_t calibration2_periods;
127
128     TDC_error_t error_code = TDC_OK;
129
130     // Read registers
131
132     if ((error_code = TDC_read(tdc, TDC_ADR_TIME1, time1_buf)) != TDC_OK) {
133         return error_code;
134     }
135
136     time1 = TDC_24BIT_BUF_TO_INT(time1_buf);
137
138     if ((error_code = TDC_read(tdc, TDC_ADR_TIME2, time2_buf)) != TDC_OK) {
139         return error_code;
140     }
141
142     time2 = TDC_24BIT_BUF_TO_INT(time2_buf);
```

```

143     if ((error_code = TDC_read(tdc, TDC_ADR_CLOCK_COUNT1, clock_count1_buf)) !=
144         TDC_OK) {
145         return error_code;
146     }
147
148     clock_count1 = TDC_24BIT_BUF_TO_INT(clock_count1_buf);
149
150     if ((error_code = TDC_read(tdc, TDC_ADR_CALIBRATION1, calibration1_buf)) !=
151         TDC_OK) {
152         return error_code;
153     }
154
155     calibration1 = TDC_24BIT_BUF_TO_INT(calibration1_buf);
156
157     if ((error_code = TDC_read(tdc, TDC_ADR_CALIBRATION2, calibration2_buf)) !=
158         TDC_OK) {
159         return error_code;
160     }
161
162     calibration2 = TDC_24BIT_BUF_TO_INT(calibration2_buf);
163
164     if ((error_code = TDC_read(tdc, TDC_ADR_CONFIG2, config2_buf)) != TDC_OK) {
165         return error_code;
166     }
167
168     if (config2_buf[0] & TDC_CONFIG2_CALIBRATION2_PERIODS_10) {
169         calibration2_periods = 10;
170     } else if (config2_buf[0] & TDC_CONFIG2_CALIBRATION2_PERIODS_20) {
171         calibration2_periods = 20;
172     } else if (config2_buf[0] & TDC_CONFIG2_CALIBRATION2_PERIODS_40) {
173         calibration2_periods = 40;
174     } else { // TDC_CONFIG2_CALIBRATION2_PERIODS_2
175         calibration2_periods = 2;
176     }
177
178     // Calculations
179
180     double cal_count = (double)(calibration2 - calibration1) /
181     (calibration2_periods - 1);
182     uint64_t norm_lsb_fs = (uint64_t)(TDC_CLOCK_PERIOD_FS / cal_count);
183
184     *tof_fs = (int64_t)norm_lsb_fs * ((int64_t)time1 - (int64_t)time2) +
185     ((int64_t)clock_count1 * TDC_CLOCK_PERIOD_FS);
186
187     return TDC_OK;
188 }
189
190 /**
191 * @brief Read/write register data from/to TDC
192 *
193 * Function for both reading and writing register data, depending on @p write
194 * parameter.
195 *
196 * @param[in] tdc -- Pointer to TDC handle
197 * @param[in] address -- Address of the register(s) to read/write
198 * @param[in,out] data -- Pointer to data
199 * @param[in] write -- True = write, false = read
200 *
201 * @attention @p data needs to provide space for at least TDC_REG_SIZE[ @p
202 * address ] bytes.

```

```

197 *
198 * @return TDC_error_t -- Error code
199 */
200 static TDC_error_t send(TDC_t* tdc, TDC_addr_t address, uint8_t* data, bool
201 write)
202 {
203     uint8_t size; // number of data bytes
204     uint8_t cmd = address | (write ? TDC_CMD_WRITE : TDC_CMD_READ);
205
206     if ((tdc == NULL) || (data == NULL)) {
207         return TDC_ERROR;
208     }
209
210     if (address >= TDC_ADR_AMOUNT) {
211         return TDC_WRONG_ADDRESS;
212     }
213
214     size = TDC_REG_SIZE[address];
215
216     HAL_GPIO_WritePin(tdc->cs_port, tdc->cs_pin, GPIO_PIN_RESET);
217     HAL_Delay(1); // 1 ms
218
219     if (HAL_SPI_Transmit(tdc->spi, &cmd, 1, HAL_MAX_DELAY) != HAL_OK) {
220         return TDC_COM_ERROR;
221     }
222
223     if (write) {
224         if (HAL_SPI_Transmit(tdc->spi, data, size, HAL_MAX_DELAY) != HAL_OK) {
225             return TDC_COM_ERROR;
226         }
227     } else {
228         if (HAL_SPI_Receive(tdc->spi, data, size, HAL_MAX_DELAY) != HAL_OK) {
229             return TDC_COM_ERROR;
230         }
231     }
232
233     HAL_GPIO_WritePin(tdc->cs_port, tdc->cs_pin, GPIO_PIN_SET);
234     HAL_Delay(1); // 1 ms
235
236     return TDC_OK;
237 }
```

Code 11: TDC Driver (Source)

## 8.2 Python Analyse

In Code 12 ist das Python-Skript zur Berechnung des arithmetischen Mittelwerts und der Standardabweichung sowie zum Plotten des Histogramms und des Boxplots dargestellt.

```

1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3
4 # Read the data from the log.txt file
5 with open('log.txt', 'r') as file:
6     tof_values = []
7     for line in file:
8         # Extract the ToF value using the pattern 'ToF = <value> [ps]'
9         if 'ToF' in line:
10             tof_value = int(line.split('=')[1].split('[')[0].strip())
11             tof_values.append(tof_value)
```

```

12
13 # Convert the list to a numpy array for easier calculation
14 tof_array = np.array(tof_values)
15
16 # Calculate the arithmetic mean and standard deviation
17 mean_toft = np.mean(tof_array)
18 std_toft = np.std(tof_array)
19
20 # Print the results
21 print(f'Arithmetic Mean of ToF: {mean_toft}')
22 print(f'Standard Deviation of ToF: {std_toft}')
23
24 # Plot a histogram
25 plt.figure(figsize=(10, 6))
26 plt.hist(tof_array, bins=20, color='skyblue', edgecolor='black', alpha=0.7)
27 plt.title('Histogram of ToF Values')
28 plt.xlabel('Time-of-Flight (ps)')
29 plt.ylabel('Frequency')
30 plt.grid(True)
31 plt.show()
32
33 # Plot a box plot
34 plt.figure(figsize=(10, 6))
35 plt.boxplot(tof_array, vert=False, patch_artist=True,
             boxprops=dict(facecolor='lightblue', color='black'))
36 plt.title('Box Plot of ToF Values')
37 plt.xlabel('Time-of-Flight (ps)')
38 plt.grid(True)
39 plt.show()

```

Code 12: Python Analyse

In Code 13 ist das Python-Skript zur Berechnung des arithmetischen Mittelwerts und der Standardabweichung sowie zum Plotten der Werte für mehrere ToF-Datensätze dargestellt.

```

1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3
4 # Load data from logs.txt
5 filename = 'logs.txt'
6 data = np.loadtxt(filename, delimiter=';', dtype=float)
7
8 # Calculate arithmetic mean and standard deviation for each column
9 means = np.mean(data, axis=0)
10 std_devs = np.std(data, axis=0)
11
12 # Print results
13 for i, (mean, std_dev) in enumerate(zip(means, std_devs), start=1):
14     print(f"Column {i}: Mean = {mean:.2f}, Standard Deviation = {std_dev:.2f}")
15
16 # Plot all columns with points
17 plt.figure(figsize=(10, 6))
18 labels = ["0 m", "1 m", "2 m", "4 m", "6 m", "7 m"]
19 for i in range(data.shape[1]):
20     plt.scatter(range(len(data[:, i])), data[:, i], label=labels[i], s=5)
21
22 plt.title('ToF for different cable lengths')
23 plt.xlabel('Index')
24 plt.ylabel('ToF [ps]')
25 plt.legend()
26 plt.grid()

```

```
27 plt.tight_layout()
28 plt.show()
```

Code 13: Python Analyse (Multi ToFs)

In Code 14 ist das Python-Skript zum Plotten der Werte aus mehreren Log-Files dargestellt.

```
1 import matplotlib.pyplot as plt
2 import numpy as np
3
4 # Function to read ToF values from a log file
5 def read_tof_values(filename):
6     tof_values = []
7     with open(filename, 'r') as file:
8         for line in file:
9             if "ToF =" in line:
10                 try:
11                     value = int(line.split('=')[1].split()[0])
12                     tof_values.append(value)
13                 except (IndexError, ValueError):
14                     print(f"Skipping malformed line in {filename}:
{line.strip()}")
15     return tof_values
16
17 # Read ToF values from the three log files
18 log_files = ["log1.txt", "log2.txt", "log3.txt"]
19 datasets = []
20
21 for log_file in log_files:
22     datasets.append(read_tof_values(log_file))
23
24 # Combine all data for plotting and calculate indices
25 data_indices = []
26 offset = 0
27
28 for data in datasets:
29     indices = list(range(offset, offset + len(data)))
30     data_indices.append(indices)
31     offset += len(data)
32
33 # Plot the data
34 plt.figure(figsize=(10, 6))
35 colors = ['blue', 'orange', 'green'] # Colors for the datasets
36 labels = ['19 cm', '24 cm', '29 cm'] # Dataset labels
37
38 for i, (indices, data) in enumerate(zip(data_indices, datasets)):
39     # Scatter plot for the original data points
40     plt.scatter(indices, data, label=f'Distanz = {labels[i]}', color=colors[i],
s=10)
41
42     # Add mean value as a horizontal line within the range of the dataset
43     mean_value = np.mean(data)
44     plt.plot(indices, [mean_value] * len(indices), color=colors[i],
45     linestyle='--', linewidth=2, label=f'Distanz = {labels[i]} (Mean)')
46
47     # Linear fit for the dataset (polynomial of degree 1, i.e., a straight line)
48     slope, intercept = np.polyfit(indices, data, 1) # Fit a line to the data
49     fit_line = np.polyval([slope, intercept], indices) # Calculate the fitted
values
50     plt.plot(indices, fit_line, color=colors[i], linestyle=':', linewidth=2,
label=f'Distanz = {labels[i]} (Linear Fit)')
```

```
51 # Customize the plot
52 plt.title('ToF unterschiedliche Distanzen zum Spiegel')
53 plt.xlabel('Index')
54 plt.ylabel('ToF [ps]')
55 plt.legend()
56 plt.grid(True)
57
58 # Show the plot
59 plt.show()
```

Code 14: Python Analyse (Multi Logs)

## 8.3 Schema

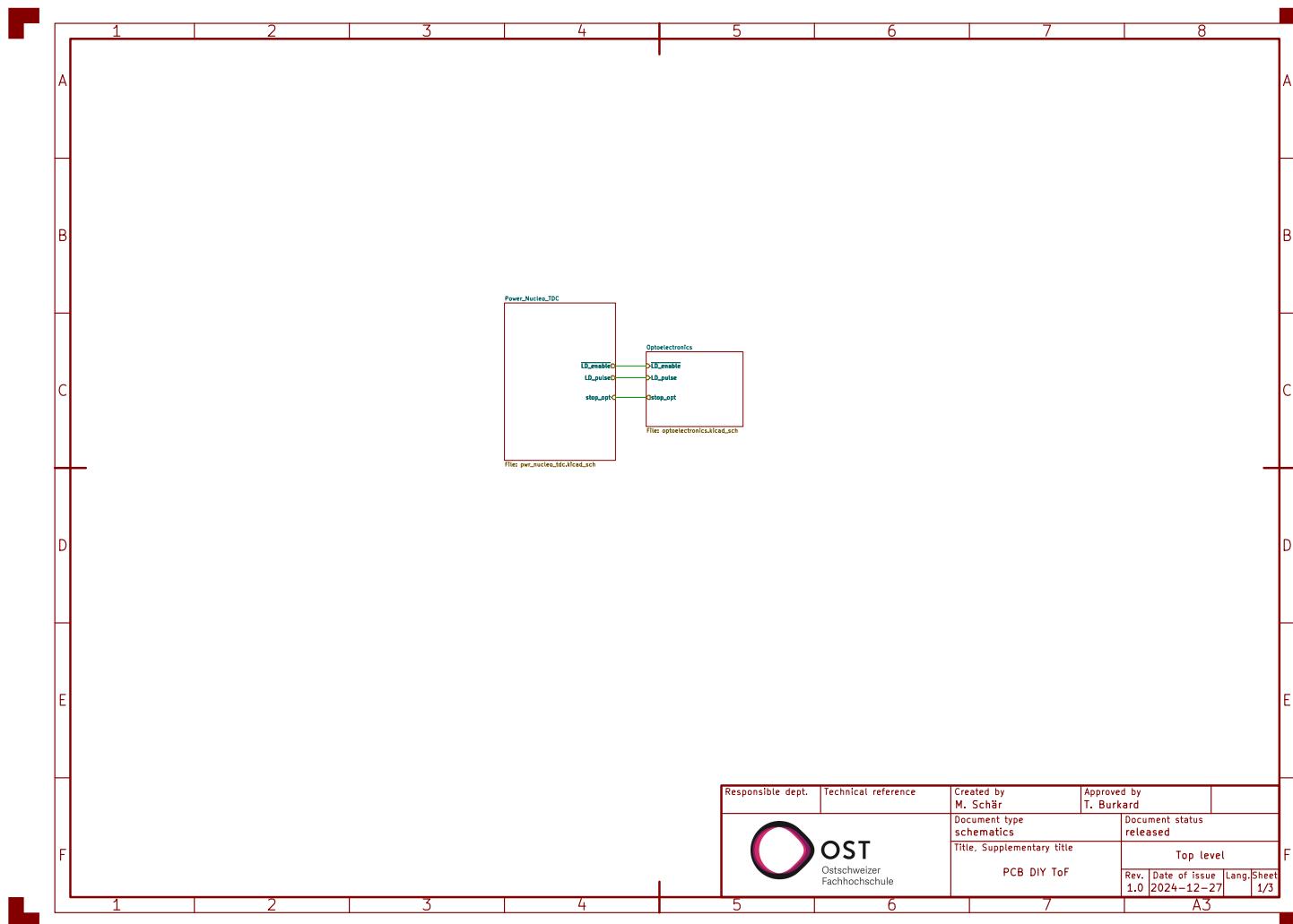


Abbildung 51: Schema S.1/3

# DIY Optische ToF Distanzmessung

## Projektarbeit

OST – Ostschweizer Fachhochschule  
CAS Sensorik und Sensor Signal Conditioning

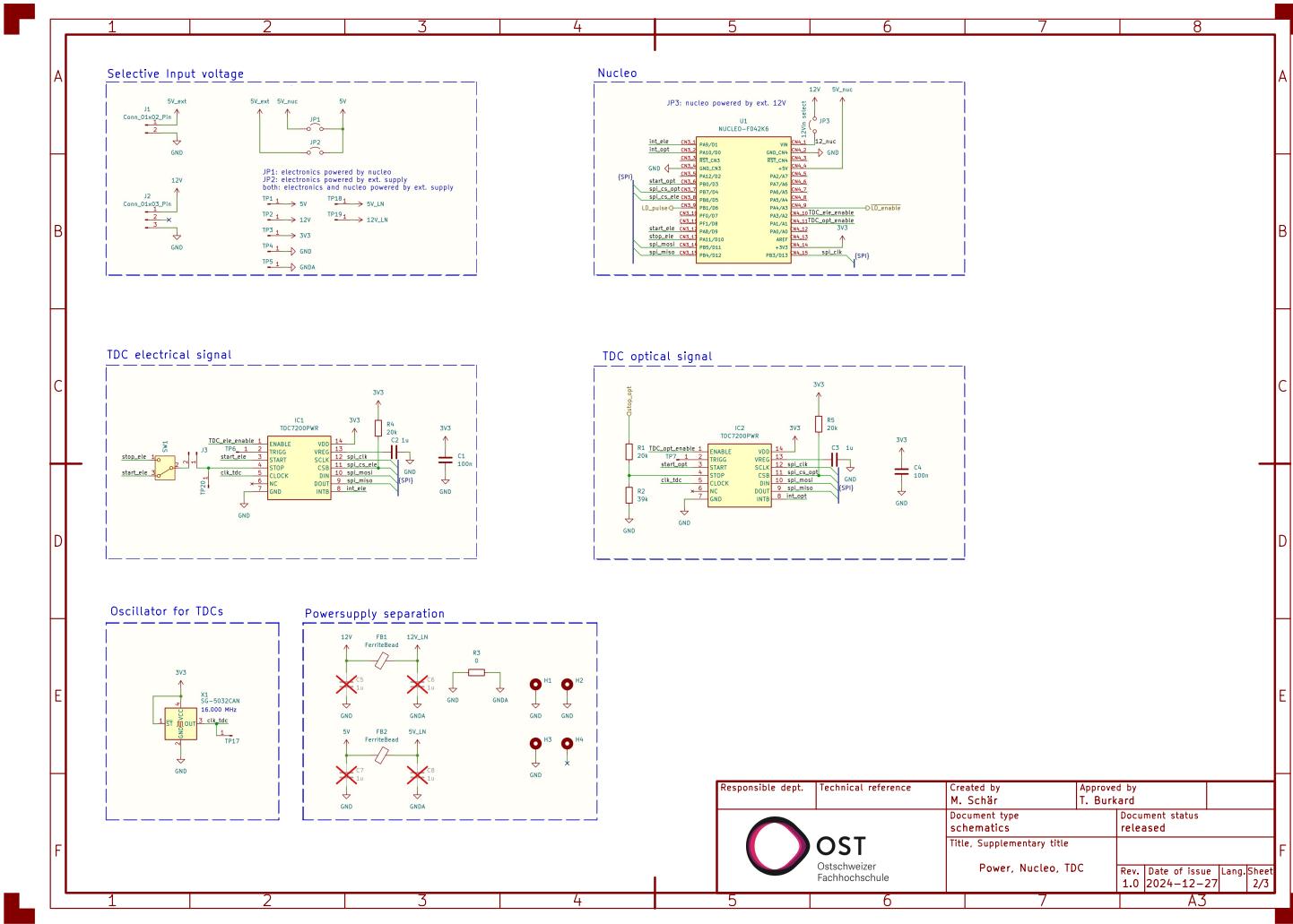


Abbildung 52: Schema S.2/3

# DIY Optische ToF Distanzmessung

Projektarbeit

**OST – Ostschweizer Fachhochschule**  
CAS Sensorik und Sensor Signal Conditioning

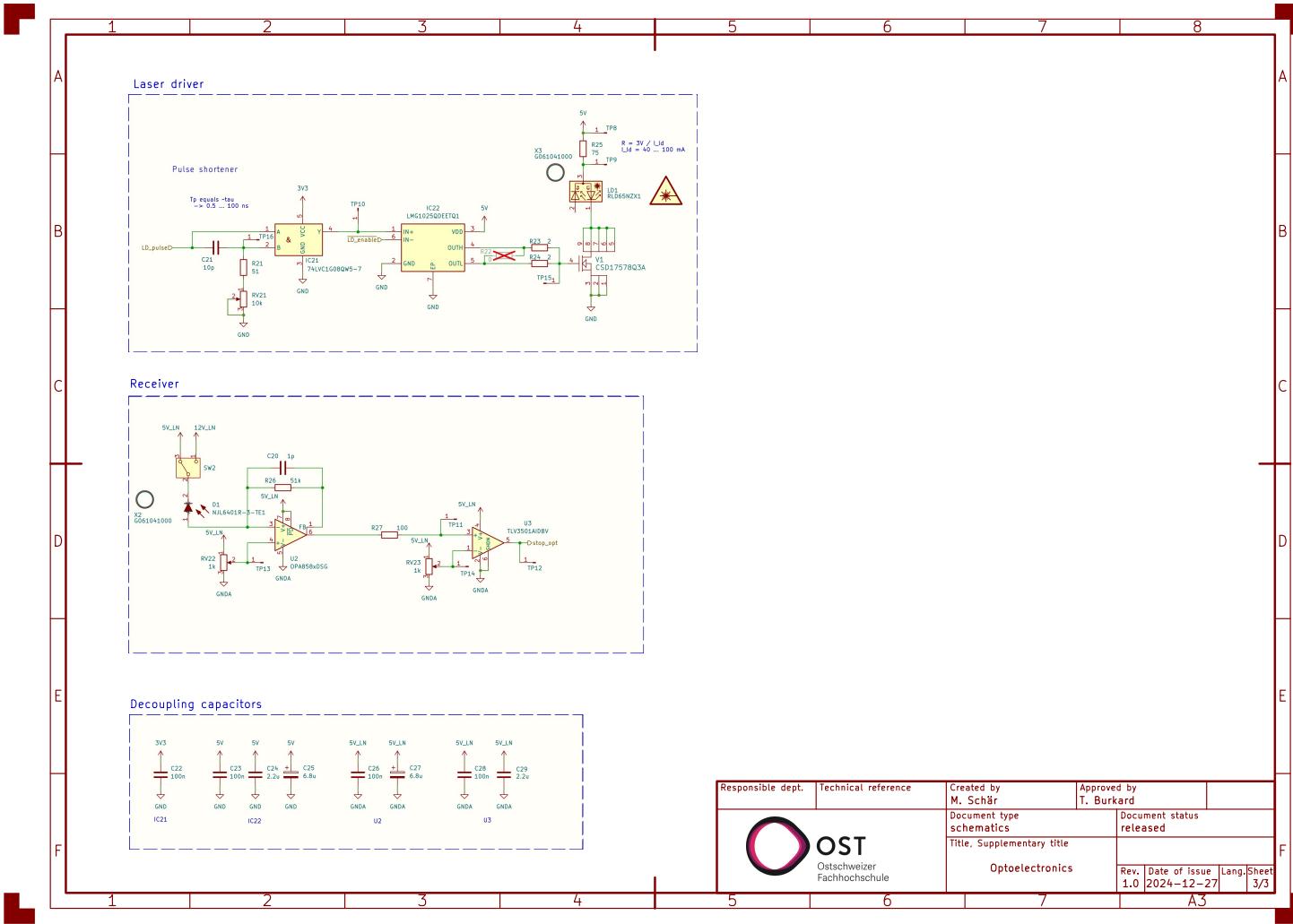


Abbildung 53: Schema S.3/3

## 8.4 Stückliste

Reference	Value	Datasheet	Footprint	Qty	DNP
C1,C4,C22,C23,C26,C28	100n		Capacitor_SMD:C_0402_1005Metric_Pad0.74x0.62mm	6	
C2,C3	1u		Capacitor_SMD:C_0402_1005Metric_Pad0.74x0.62mm	2	
C5,C6,C7,C8	1u		Capacitor_SMD:C_0402_1005Metric_Pad0.74x0.62mm	4	DNP
C20	1p		Capacitor_SMD:C_0402_1005Metric_Pad0.74x0.62mm	1	
C21	10p		Capacitor_SMD:C_0402_1005Metric_Pad0.74x0.62mm	1	
C24,C29	2.2u		Capacitor_SMD:C_0402_1005Metric_Pad0.74x0.62mm	2	
C25,C27	6.8u		Capacitor_SMD:C_0603_1608Metric_Pad1.08x0.95mm	2	
D1	NJL6401R-3-TE1	(JRC, 2014)	Capacitor_Tantal_SMD:CP_EIA-7343-43_Kemet-X_Pad2.25x2.55mm	2	
FB1,FB2	FerriteBead	(TDK, 2019)	NJL6401R3TE1	1	
IC1,IC2	TDC7200PWR	(TI, 2016b)	Inductor_SMD:L_0402_1005Metric_Pad0.77x0.64mm	2	
IC21	74LVC1G08QW5-7	(Diodes Inc., 2020)	SOP65P640X120-14N	2	
IC22	LMG1025QDEETQ1	(TI, 2024c)	74LVC1G08QW57	1	
J1,J3	Conn_01x02_Pin		SON65P200X200X80-7N	1	
J2	Conn_01x03_Pin		Connector:Molex_KK-254_AE-6410-02A_1x02_P2.54mm_Vertical	2	
JP1,JP2	Jumper_2_Open		Connector:Molex_SL_171971-0003_1x03_P2.54mm_Vertical	1	
JP3	12Vin select		TestPoint:TestPoint_2Pads_Pitch2.54mm_Drill0.8mm	2	
LD1	RLD65NZX1-00A	(ROHM, 2019)	TestPoint:TestPoint_2Pads_Pitch2.54mm_Drill0.8mm	1	
R1,R4,R5	20k		RLD65NZX1-00A:RLD85PZJ400A	1	
R2	39k		Resistor_SMD:R_0402_1005Metric_Pad0.72x0.64mm	3	
R3	0		Resistor_SMD:R_0402_1005Metric_Pad0.72x0.64mm	1	
R21	51		Resistor_SMD:R_0402_1005Metric_Pad0.72x0.64mm	1	
R22	0		Resistor_SMD:R_0402_1005Metric_Pad0.72x0.64mm	1	
R23,R24	2		Resistor_SMD:R_0402_1005Metric_Pad0.72x0.64mm	2	DNP
R25	75		Resistor_SMD:R_0603_1608Metric_Pad0.98x0.95mm	1	
R26	51k		Resistor_SMD:R_0402_1005Metric_Pad0.72x0.64mm	1	
R27	100		Resistor_SMD:R_0402_1005Metric_Pad0.72x0.64mm	1	
RV21	10k	(Bourns, 2024)	Potentiometer_SMD:Potentiometer_Bourns_3224W_Vertical	1	
RV22,RV23	1k	(Bourns, 2024)	Potentiometer_SMD:Potentiometer_Bourns_3224W_Vertical	2	
SW1,SW2	SW_Nidec_CAS-120A1	(Nidec Comp., 2024)	Button_Switch_SMD:Nidec_Copal_CAS-120A	2	
TP1..TP20	Conn_01x01_Pin		Connector_2.54mm:PinHeader_1x01_P2.54mm_Vertical	20	
U1	NUCLEO-F042K6	(ST, 2019)	NUCLEO_F042K6:MODULE_NUCLEO-F042K6	1	
U2	OPA858xDSG	(TI, 2018)	Package SON:WSON-8-1EP_2x2mm_P0.5mm_EP0.9x1.6mm	1	
U3	TLV3501AIDBV	(TI, 2016c)	Package TO_SOT_SMD:SOT-23-6	1	
V1	CSD17578Q3A	(TI, 2016a)	DNH0008A	1	
X1	SG-5032CAN	(Epson Timing, 2024)	Oscillator:Oscillator_SMD_SeikoEpson_SG8002LB-4Pin_5.0x3.2mm	1	
X2,X3	G061041000	(Qioptiq, 2024a)	user:Qioptiq-Mount	2	

Tabelle 6: Bill of Material

## 8.5 Layout

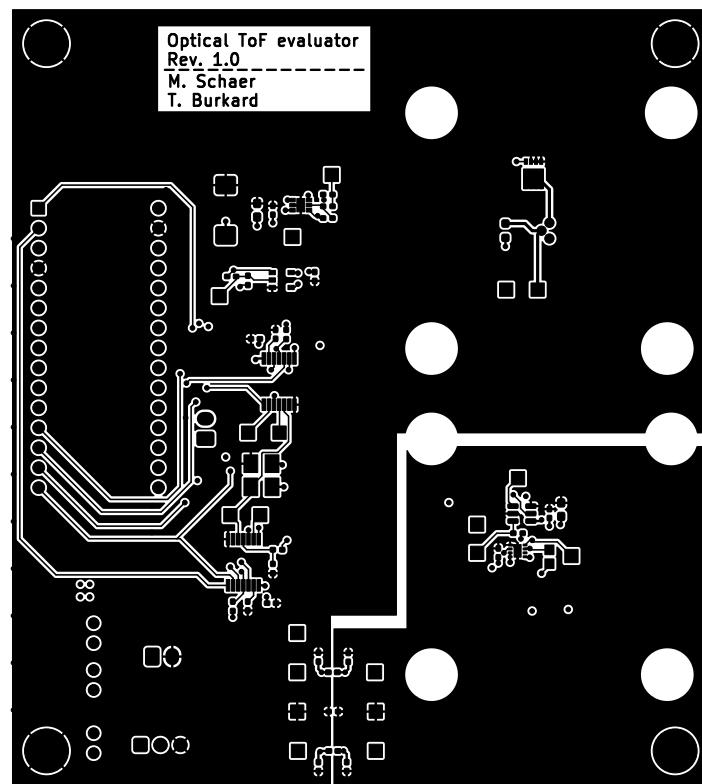


Abbildung 54: PCB Layout Top

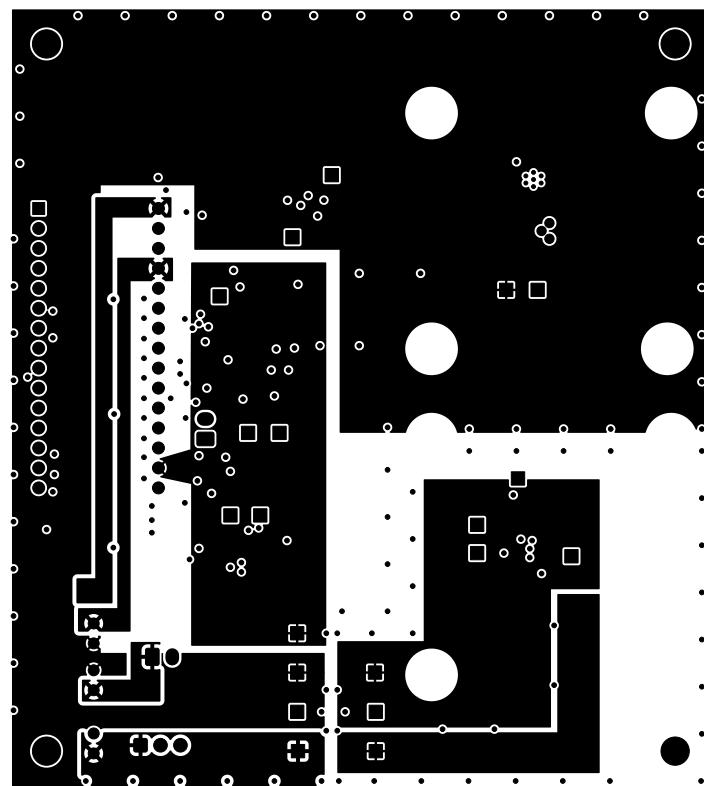


Abbildung 55: PCB Layout Innen 1

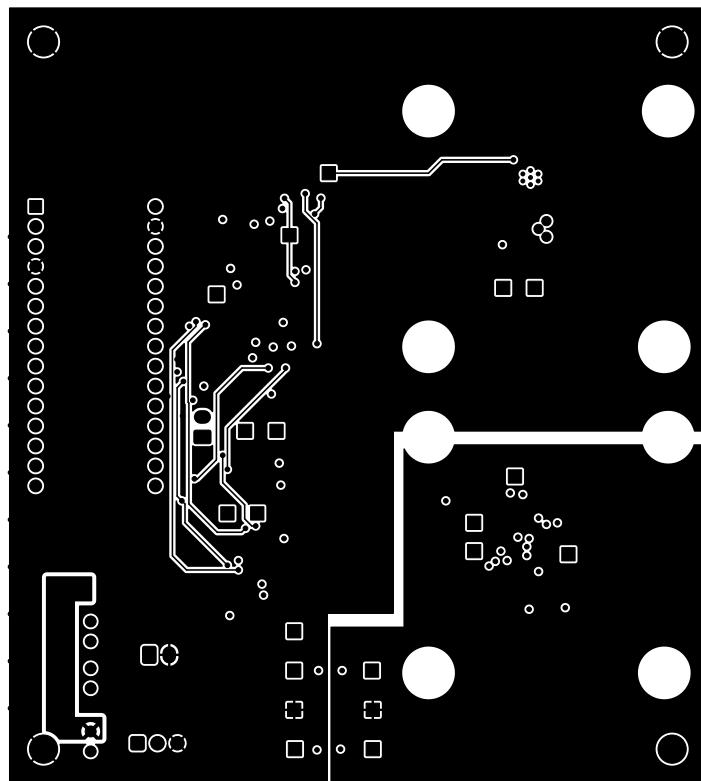


Abbildung 56: PCB Layout Innen 2

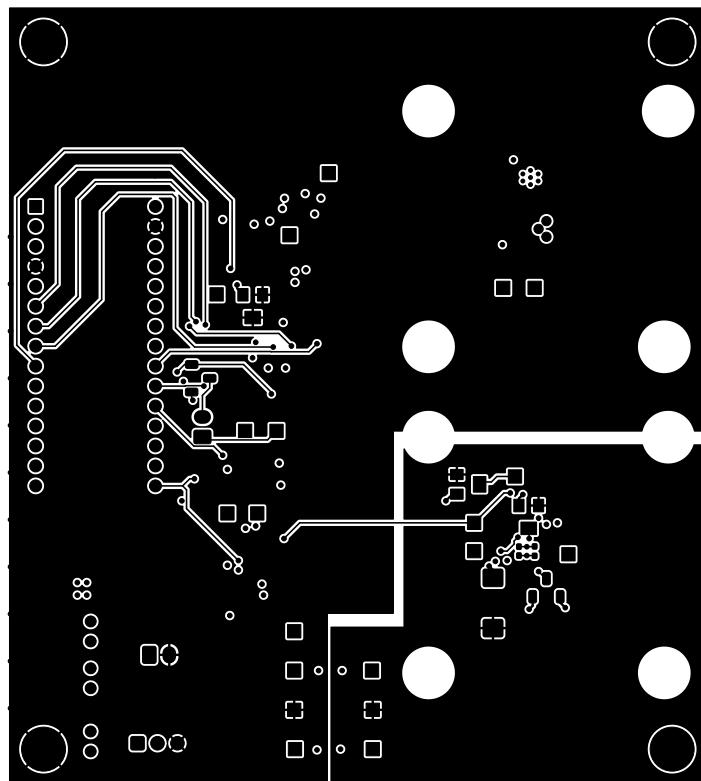


Abbildung 57: PCB Layout Bottom

## 8.6 Komponenten-Platzierung

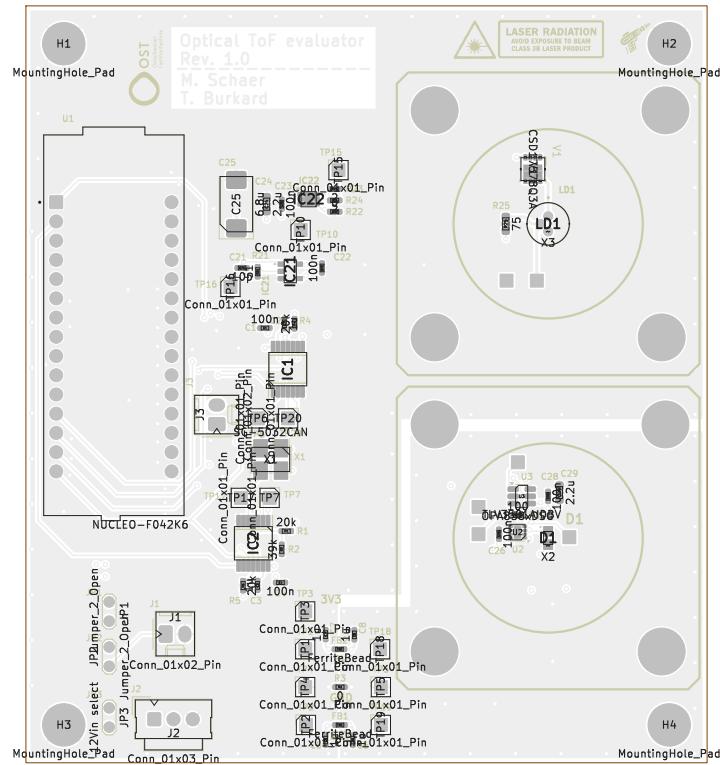


Abbildung 58: PCB Komponenten-Platzierung Top

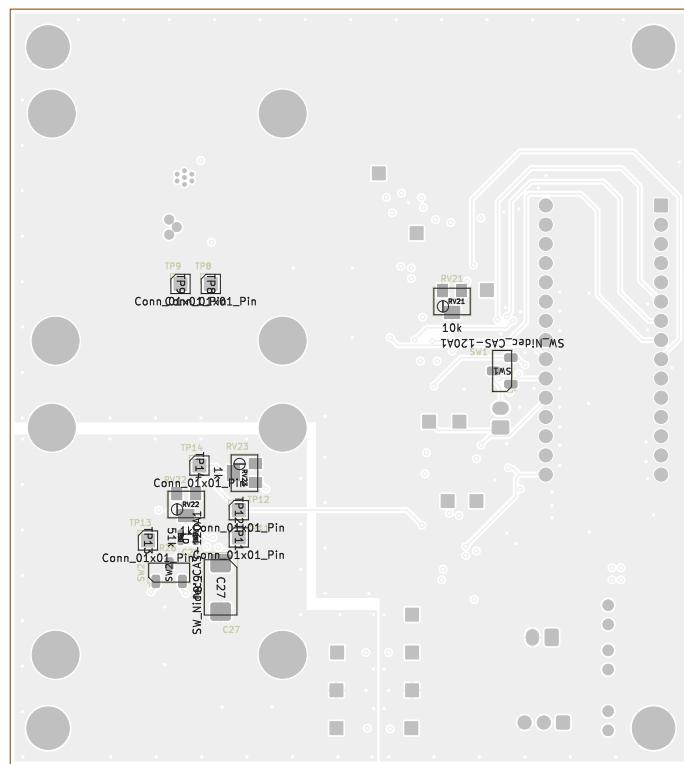


Abbildung 59: PCB Komponenten-Platzierung Bottom

## 8.7 3D View

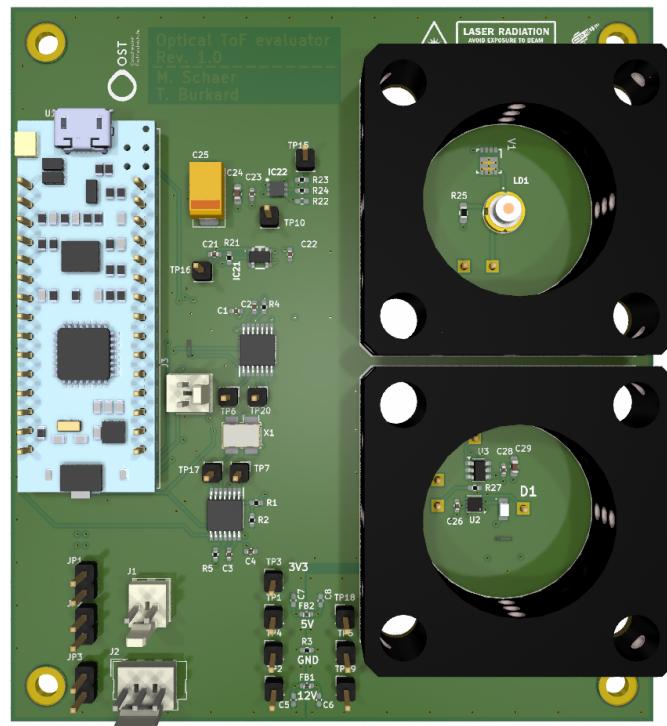


Abbildung 60: 3D View Top

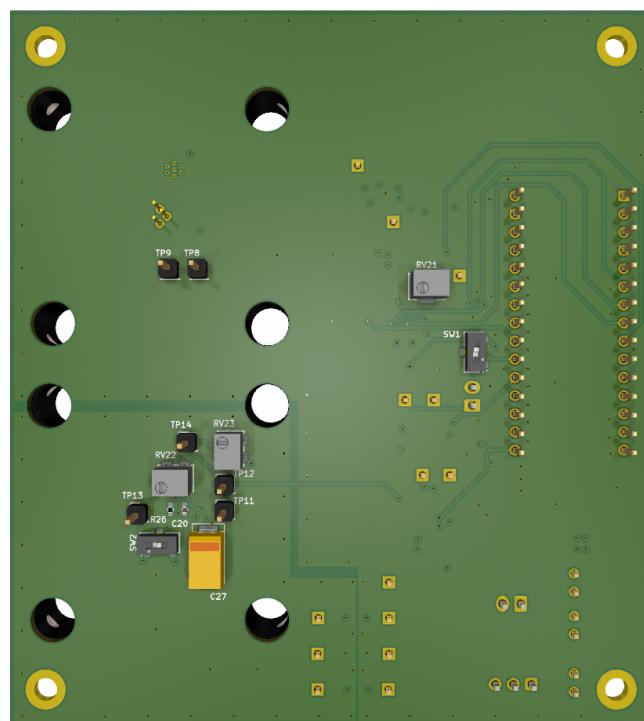


Abbildung 61: 3D View Bottom

## 8.8 Fotos Demonstrator

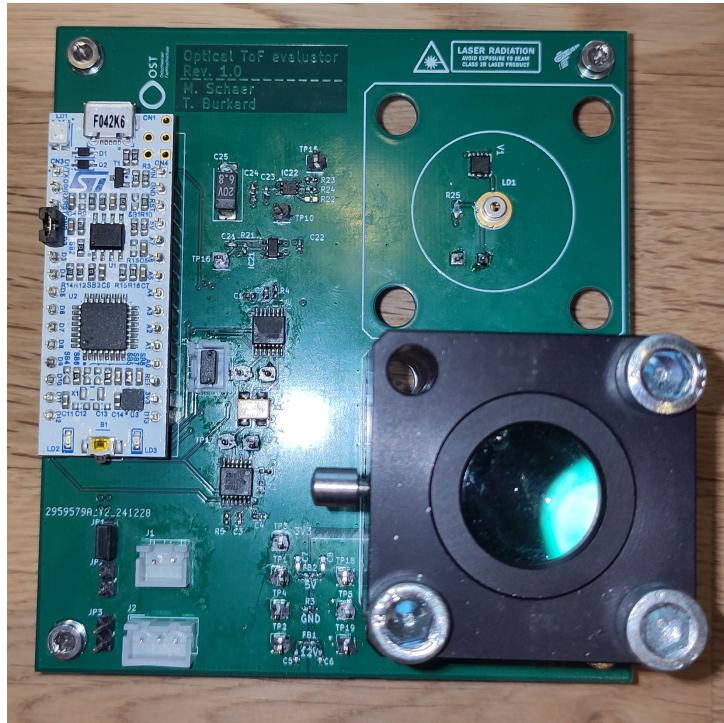


Abbildung 62: Demonstrator von oben

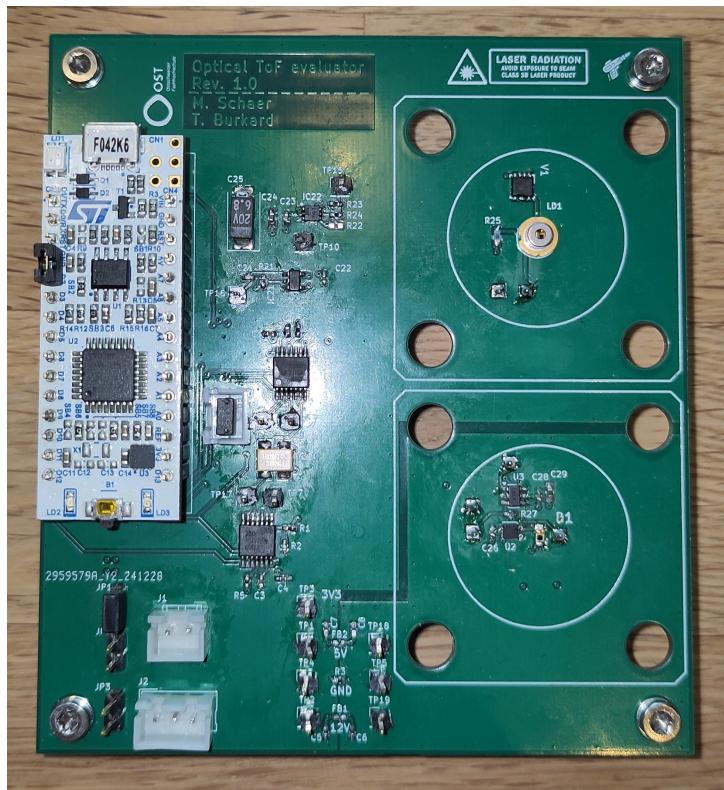


Abbildung 63: Demonstrator von oben ohne Linse

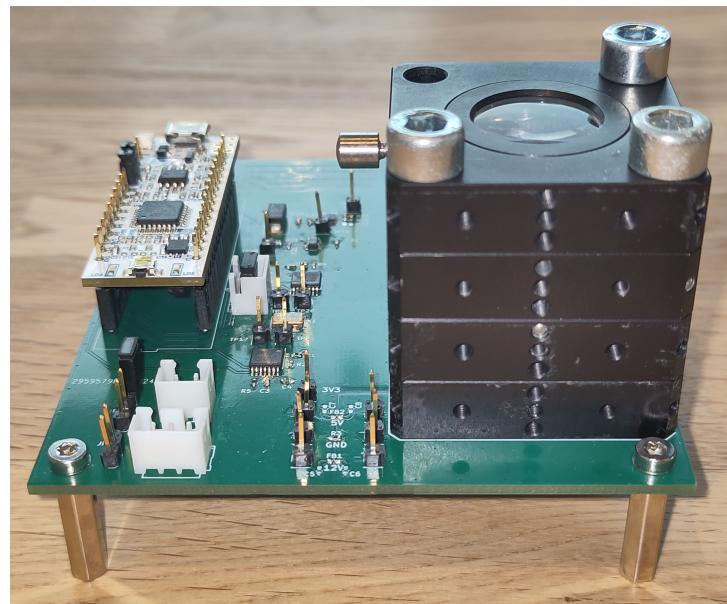


Abbildung 64: Demonstrator von vorne



Abbildung 65: Demonstrator von vorne ohne Linse

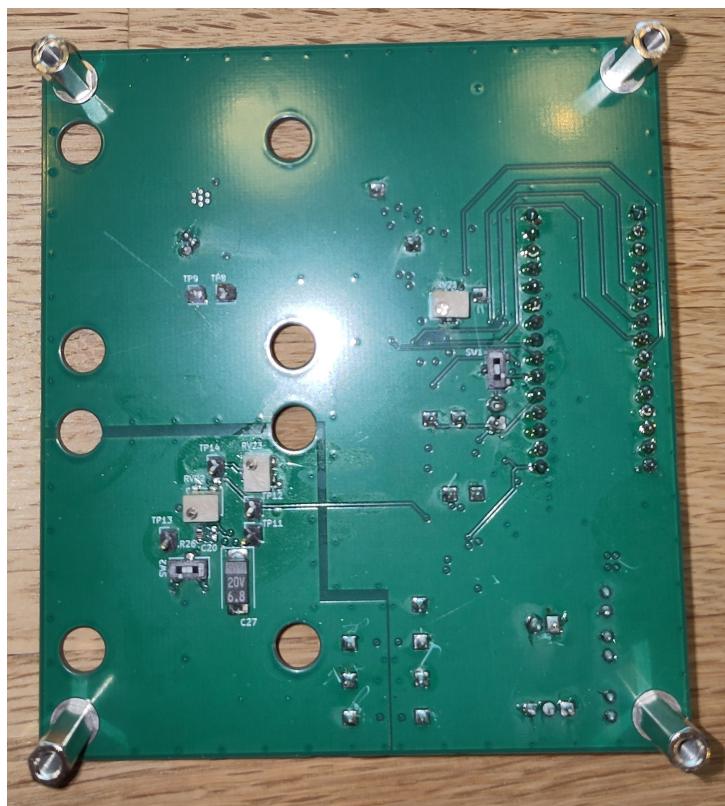


Abbildung 66: Demonstrator von unten

# Quellenverzeichnis

- Bourns. (2024). *3224W-2-10XE Datasheet*. Zugriff auf  
<https://www.mouser.ch/datasheet/2/54/3224-776900.pdf> (aufgerufen am 26.12.2024)
- Diodes Inc. (2020). *74LVC1G08Q Datasheet*. Zugriff auf  
[https://www.mouser.ch/datasheet/2/115/DIOD\\_S\\_A0010762531\\_1-2543394.pdf](https://www.mouser.ch/datasheet/2/115/DIOD_S_A0010762531_1-2543394.pdf) (aufgerufen am 26.12.2024)
- Epson Timing. (2024). *SG5032CAN Datasheet*. Zugriff auf  
[https://www.mouser.ch/datasheet/2/137/SG5032CAN\\_en-961596.pdf](https://www.mouser.ch/datasheet/2/137/SG5032CAN_en-961596.pdf) (aufgerufen am 26.12.2024)
- firewall.xc. (2025). *Propagation Delay*. Zugriff auf  
<https://www.firewall.cx/networking/ethernet/propagation-delay.html> (aufgerufen am 12.01.2025)
- JLC. (2025). *JLCPCB*. Zugriff auf <https://jlcpcb.com/> (aufgerufen am 18.01.2025)
- JRC. (2014). *NJL6401R-3 Datasheet*. Zugriff auf  
[https://www.mouser.ch/datasheet/2/294/NJL6401R\\_3\\_E-1019028.pdf](https://www.mouser.ch/datasheet/2/294/NJL6401R_3_E-1019028.pdf) (aufgerufen am 26.12.2024)
- KiCad. (2025). *KiCad EDA*. Zugriff auf <https://www.kicad.org/> (aufgerufen am 16.01.2025)
- Nidec Comp. (2024). *CAS-120A1 Datasheet*. Zugriff auf  
<https://www.mouser.ch/datasheet/2/972/cas-1628136.pdf> (aufgerufen am 26.12.2024)
- Qioptiq. (2024a). *G061041000 Datasheet*. Zugriff auf <https://mm.digikey.com/Volume0/opasdata/d220001/medias/docus/692/G061041000.pdf> (aufgerufen am 26.12.2024)
- Qioptiq. (2024b). *G061041000 Shop-Seite*. Zugriff auf  
<https://www.qioptiq-shop.com/en/Optomechanics/LINOS-Microbench-30-mm-Cage-System/Mounting-Plates/Mounting-Plate-25-with-Mounting-Holes.html> (aufgerufen am 26.12.2024)
- ROHM. (2019). *RLD65NZZ1 Datasheet*. Zugriff auf [https://fscdn.rohm.com/en/products/databook/datasheet/opto/laser\\_diode/red/rld65nzz100a008-e.pdf](https://fscdn.rohm.com/en/products/databook/datasheet/opto/laser_diode/red/rld65nzz100a008-e.pdf) (aufgerufen am 26.12.2024)
- ROHM. (2020). *RLD94PZJ5 Datasheet*. Zugriff auf [https://fscdn.rohm.com/en/products/databook/datasheet/opto/laser\\_diode/infrared/rld94pj5-e.pdf](https://fscdn.rohm.com/en/products/databook/datasheet/opto/laser_diode/infrared/rld94pj5-e.pdf) (aufgerufen am 26.12.2024)
- Siemens. (2025). *Xpedition AMS*. Zugriff auf  
<https://resources.sw.siemens.com/en-US/fact-sheet-xpedition-ams/> (aufgerufen am 16.01.2025)
- ST. (2017). *STM32F042K6 Datasheet*. Zugriff auf  
<https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f042k6.pdf> (aufgerufen am 13.01.2025)
- ST. (2019). *NUCLEO-F042K6 Datasheet*. Zugriff auf  
<https://www.mouser.ch/datasheet/2/389/nucleo-f031k6-1484037.pdf> (aufgerufen am 26.12.2024)
- ST. (2020). *Description of STM32F0 HAL*. Zugriff auf  
[https://www.st.com/resource/en/user\\_manual/dm00122015-description-of-stm32f0-hal-and-low-layer-drivers-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/user_manual/dm00122015-description-of-stm32f0-hal-and-low-layer-drivers-stmicroelectronics.pdf) (aufgerufen am 12.01.2025)

- ST. (2024). *NUCLEO-F042K6 Usermanual*. Zugriff auf [https://www.st.com/resource/en/user\\_manual/um1956-stm32-nucleo32-boards-mb1180-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/user_manual/um1956-stm32-nucleo32-boards-mb1180-stmicroelectronics.pdf) (aufgerufen am 26.12.2024)
- ST. (2025). *STM32CubeIDE*. Zugriff auf  
<https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html> (aufgerufen am 18.01.2025)
- TDK. (2019). *MPZ0402S100 Datasheet*. Zugriff auf  
[https://product.tdk.com/system/files/dam/doc/product/emc/emc/beads/catalog/beads\\_commercial\\_power\\_mpz0402\\_en.pdf](https://product.tdk.com/system/files/dam/doc/product/emc/emc/beads/catalog/beads_commercial_power_mpz0402_en.pdf) (aufgerufen am 26.12.2024)
- TI. (2016a). *CSD17578Q3A Datasheet*. Zugriff auf  
<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/csd17578q3a.pdf?ts=1735200469410> (aufgerufen am 26.12.2024)
- TI. (2016b). *TDC7200 Datasheet*. Zugriff auf <http://www.ti.com/lit/gpn/tdc7200> (aufgerufen am 25.12.2024)
- TI. (2016c). *TLV3501 Datasheet*. Zugriff auf  
<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlv3501.pdf?ts=1735168630258> (aufgerufen am 26.12.2024)
- TI. (2018). *OPA858 Datasheet*. Zugriff auf  
<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa858.pdf?ts=1735178891996> (aufgerufen am 26.12.2024)
- TI. (2024a). *CSD17578Q3A*. Zugriff auf <https://www.ti.com/product/CSD17578Q3A> (aufgerufen am 28.12.2024)
- TI. (2024b). *LMG1025-Q1*. Zugriff auf <https://www.ti.com/product/LMG1025-Q1> (aufgerufen am 28.12.2024)
- TI. (2024c). *LMG1025-Q1 Datasheet*. Zugriff auf  
<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmg1025-q1.pdf?ts=1735200095732> (aufgerufen am 26.12.2024)
- TI. (2024d). *OPA858*. Zugriff auf <https://www.ti.com/product/OPA858> (aufgerufen am 28.12.2024)
- Vishay Semic. (2024). *BPV23NF Datasheet*. Zugriff auf  
<https://www.vishay.com/docs/81513/bpv23nf.pdf> (aufgerufen am 26.12.2024)