

DIY Optische ToF Distanzmessung

CAS Sensorik und Sensor Signal Conditioning

Matthias Schär, Timon Burkard
OST – Ostschweizer Fachhochschule

27. Dezember 2024



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

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

Abstract

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

Ort, Datum Rapperswil, 27. Dezember 2024
© 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

1	Einleitung	9
2	Theorie	10
2.1	Time of Flight	10
2.2	Photostrom	11
2.2.1	Berechnung mit RLD94PZJ5 und BPV23NF	11
2.2.2	Berechnung mit RLD65NZX1 and NJL6401R-3	12
2.3	Transimpedanzverstärker	13
3	Umsetzung	14
3.1	Firmware	14
3.2	Schaltungen	15
3.2.1	Selective Input Voltage	15
3.2.2	Nucleo Board	15
3.2.3	TDC Electrical Signal	16
3.2.4	TDC Optical Signal	16
3.2.5	Oscillator For TDCs	17
3.2.6	Power Supply Separation	17
3.2.7	Laser Driver	18
3.2.8	Photo Receiver	18
3.2.9	Decoupling Capacitors	19
3.3	Layout	20
3.3.1	Kupfer-Layer	20
3.3.2	Komponenten-Platzierung	24
3.4	3D View	26
3.5	Komponenten	28
4	Simulationen	29
4.1	Laser Treiber	29
4.2	Transimpedanzverstärker	29
5	Messungen	30
6	Fazit	31
7	Anhang	32

Abkürzungsverzeichnis

DIY Do It Yourself. 9

PCB Printed Circuit Board. 20

TDC Time to Digital Converter. 9, 17, 19

TIA Trans-Impedance Amplifier. 13, 17

ToF Time of Flight. 9, 10

Abbildungsverzeichnis

1	Selective Input Voltage	15
2	Nucleo Board	16
3	TDC Electrical Signal	16
4	TDC Optical Signal	17
5	Oscillator for TDCs	17
6	Power Supply Separation	18
7	Laser Driver	18
8	Photo Receiver	19
9	Decoupling Capacitors	19
10	PCB Layout Top	20
11	PCB Layout Bottom	21
12	PCB Layout Innen 1	22
13	PCB Layout Innen 2	23
14	PCB Komponenten-Platzierung Top	24
15	PCB Komponenten-Platzierung Bottom	25
16	3D View Top	26
17	3D View Bottom	27

Formelverzeichnis

1	Eintreffende Lichtleistung	11
2	Strahlungsintensität	11
3	Raumwinkel	11
4	Photostrom	11
5	Werte des RLD94PZJ5	11
6	Werte des BPV23NF	11
7	Nummerische Resultate mit RLD94PZJ5 und BPV23NF	12
8	Werte des RLD65NZX1	12
9	Werte des NJL6401R-3	12
10	Nummerische Resultate mit RLD65NZX1 and NJL6401R-3	12

Tabellenverzeichnis

1	Bill of Material	28
---	----------------------------	----

Codeverzeichnis

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

2.1 Time of Flight

Bei ToF handelt es sich um ...

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 sich die Streuung nicht uniform verteilen, sondern in der Mitte stärker konzentriert sein. Die folgende Berechnung zeigt also den worst case.

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

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

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

$$\Omega = \frac{4 \cdot \pi \cdot 0.5}{d} \quad (3)$$

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

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.

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

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

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

$$\begin{aligned}
 I_e &= \frac{P_{out}}{\Omega} = \frac{285 \text{ mW}}{\frac{4 \cdot \pi \cdot 0.5}{d}} = \frac{285 \text{ mW}}{\frac{4 \cdot \pi \cdot 0.5}{10 \text{ m}}} = 45 \frac{\text{mW}}{\text{sr}} \\
 P_{in} &= \frac{I_e}{r^2} \cdot A = 45 \frac{\text{mW}}{\text{sr}} \cdot 4.4 \text{ mm}^2 = 2 \text{ nW} \\
 I_{ph} &= S \cdot P_{in} = 0.6 \frac{\text{A}}{\text{W}} \cdot 2 \text{ nW} = 1.2 \text{ nA}
 \end{aligned} \tag{7}$$

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). Ge- paart wird sie mit der Photodiode NJL6401R-3 (JRC, 2014). Die folgenden Berechnungen wur- den 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.

$$\begin{aligned}
 I_e &= \frac{P_{out}}{\Omega} = \frac{10 \text{ mW}}{\frac{4 \cdot \pi \cdot 0.5}{d}} = \frac{10 \text{ mW}}{\frac{4 \cdot \pi \cdot 0.5}{10 \text{ m}}} = 1.6 \frac{\text{mW}}{\text{sr}} \\
 P_{in} &= \frac{I_e}{r^2} \cdot A = 1.6 \frac{\text{mW}}{\text{sr}} \cdot 0.49 \text{ mm}^2 = 8 \text{ pW} \\
 I_{ph} &= S \cdot P_{in} = 0.42 \frac{\text{A}}{\text{W}} \cdot 8 \text{ pW} = 3.3 \text{ pA}
 \end{aligned} \tag{10}$$

2.3 Transimpedanzverstärker

Bei einem Trans-Impedance Amplifier (TIA) handelt es sich um ...

3 Umsetzung

3.1 Firmware

3.2 Schaltungen

3.2.1 Selective Input Voltage

Abbildung 1 zeigt die Beschaltung zur Selektion der Speisung.

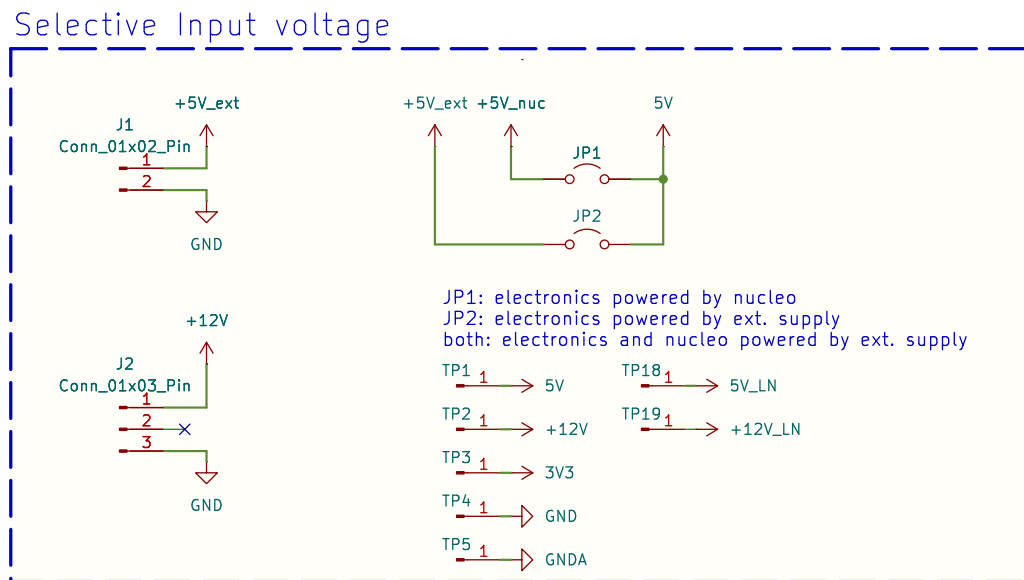


Abbildung 1: Selective Input Voltage

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

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

Siehe dazu auch Kapitel 3.2.2.

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

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

Für die Speisung der Photodiode bestehen die folgenden Möglichkeiten:

- 5V von 5V-Elektronik (SW2 Position 3)
- 12V von externem Power-Supply (SW2 Position 1)

Siehe dazu auch Kapitel 3.2.8.

3.2.2 Nucleo Board

Die Beschaltung des NUCLEO-F042K6 Boards (ST, 2024) ist in Abbildung 2 gezeigt.

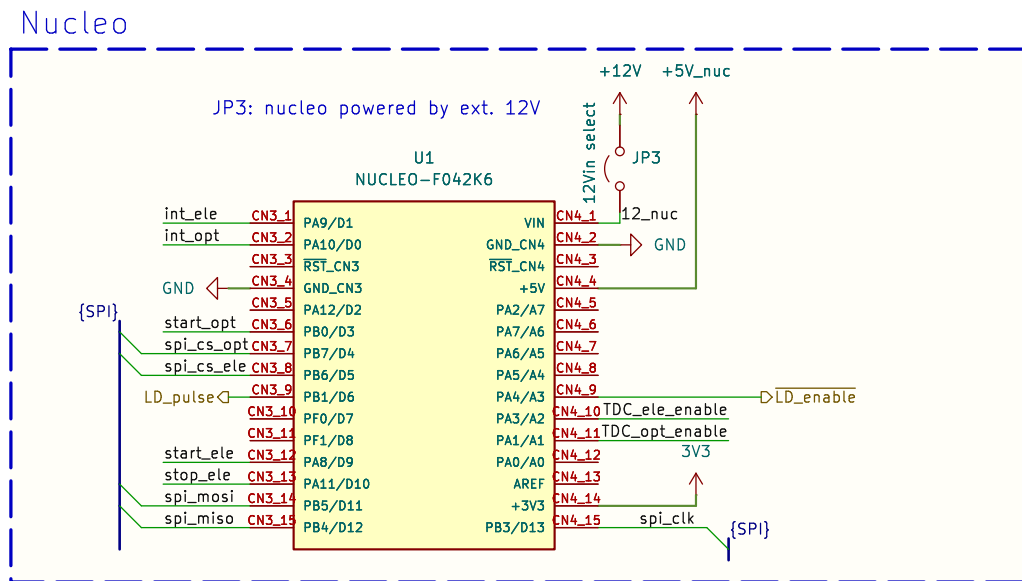


Abbildung 2: Nucleo Board

3.2.3 TDC Electrical Signal

Die Beschaltung des TDC7200 (TI, 2016b) für den elektrischen Teil ist in Abbildung 3 gezeigt.

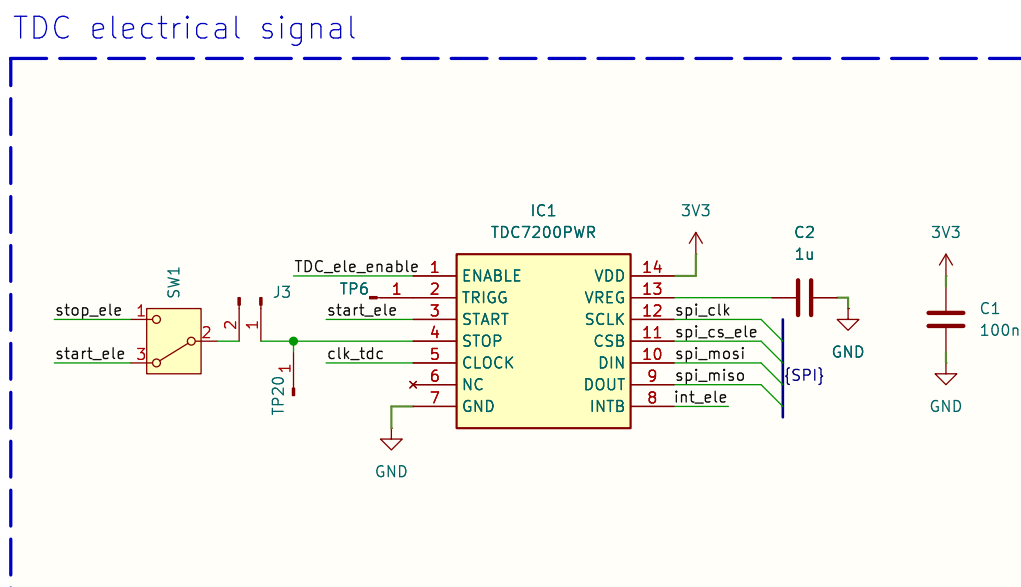
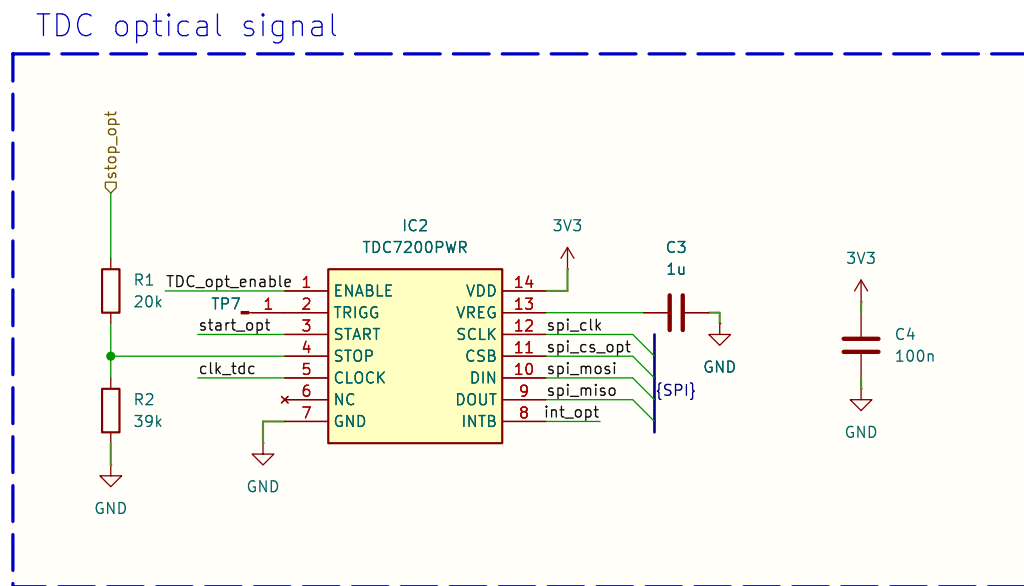


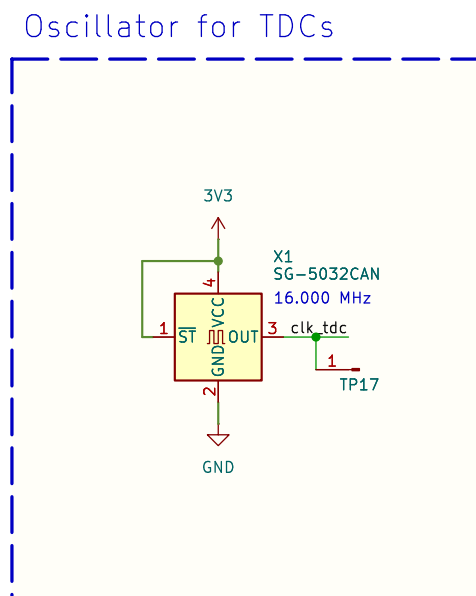
Abbildung 3: TDC Electrical Signal

3.2.4 TDC Optical Signal

Die Beschaltung des TDC7200 (TI, 2016b) für den optischen Teil ist in Abbildung 4 gezeigt.



3.2.5 Oscillator For TDCs



3.2.6 Power Supply Separation

Dazu wurde die Separierung vorgenommen, welche in Abbildung 6 dargestellt ist.

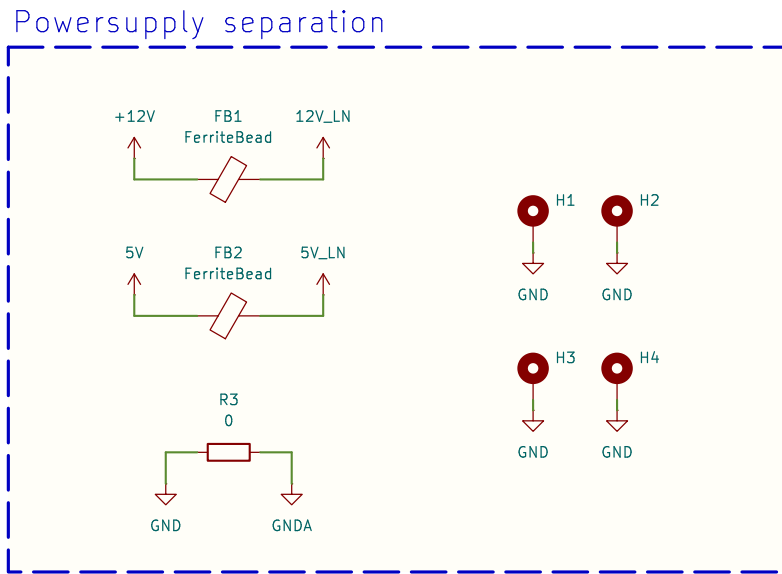


Abbildung 6: Power Supply Separation

3.2.7 Laser Driver

Die Laser Diode RLD65NZX1 (ROHM, 2019) wird mittels Lasertreiber LMG1025-Q1 (TI, 2024) und NexFET (TI, 2016a) angesteuert. Für die Generierung eines kurzen Pulses (0.5 ... 100 ns) wurde mittels Hochpass und AND-Gatter (Diodes Inc., 2020) implementiert. Siehe dazu Abbildung 7.

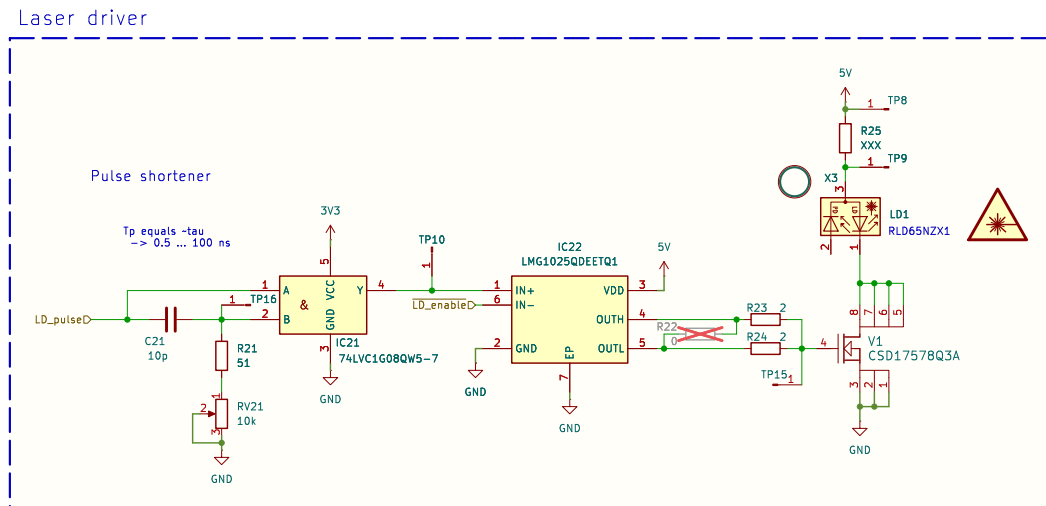


Abbildung 7: Laser Driver

3.2.8 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 Ausgangs des Transimpedanzverstärkers geht auf den Komparator

TLV3501 (TI, 2016c), um das STOP-Signal für den TDC zu generieren. Siehe dazu Abbildung 8.

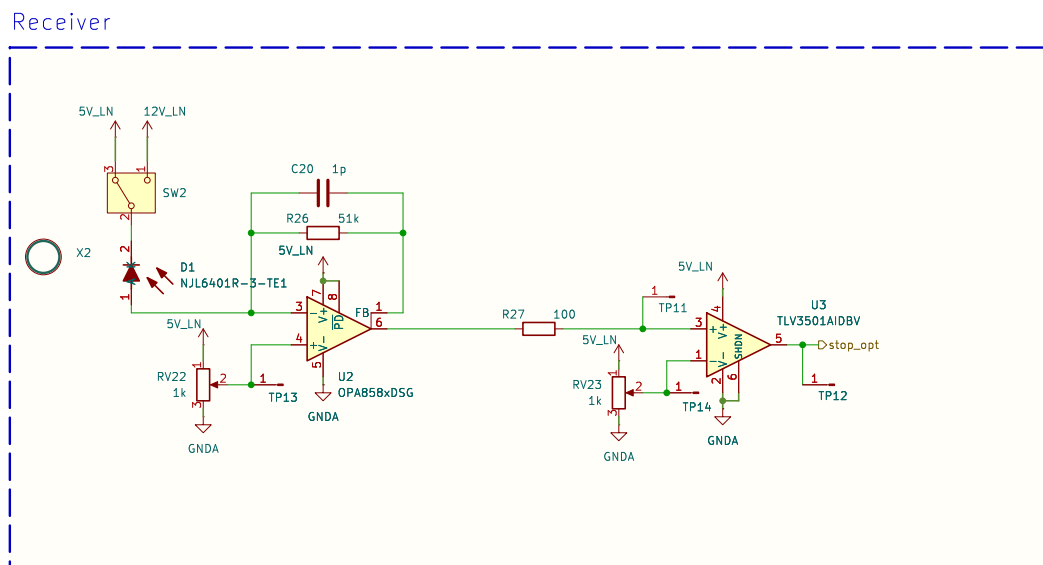


Abbildung 8: Photo Receiver

3.2.9 Decoupling Capacitors

Die Beschaltung der Entkopplungs-Kondensatoren ist in Abbildung 9 dargestellt.

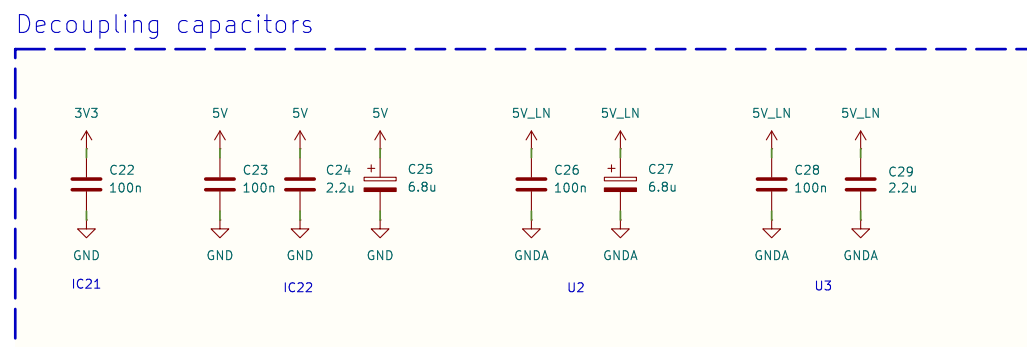


Abbildung 9: Decoupling Capacitors

3.3 Layout

In diesem Kapitel werden die PCB-Layouts dokumentiert.

3.3.1 Kupfer-Layer

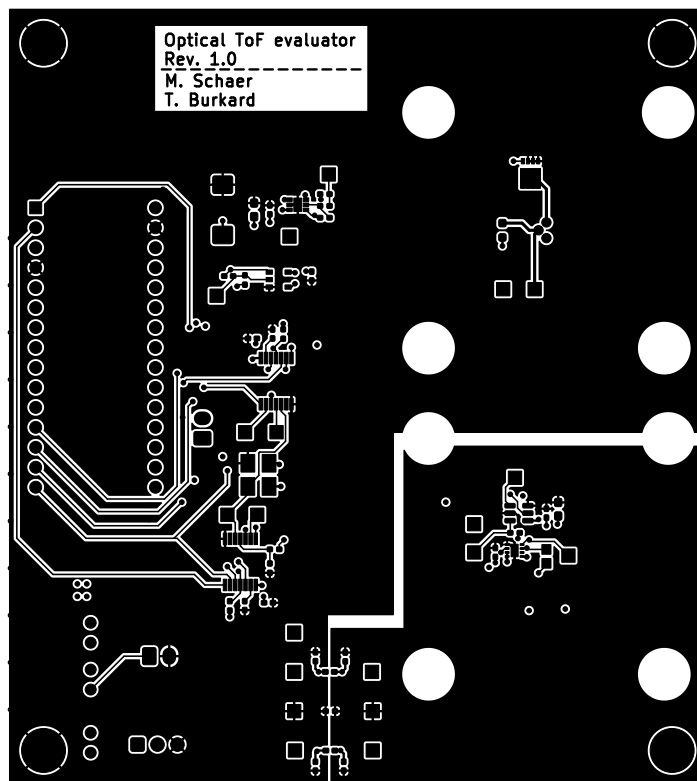


Abbildung 10: PCB Layout Top

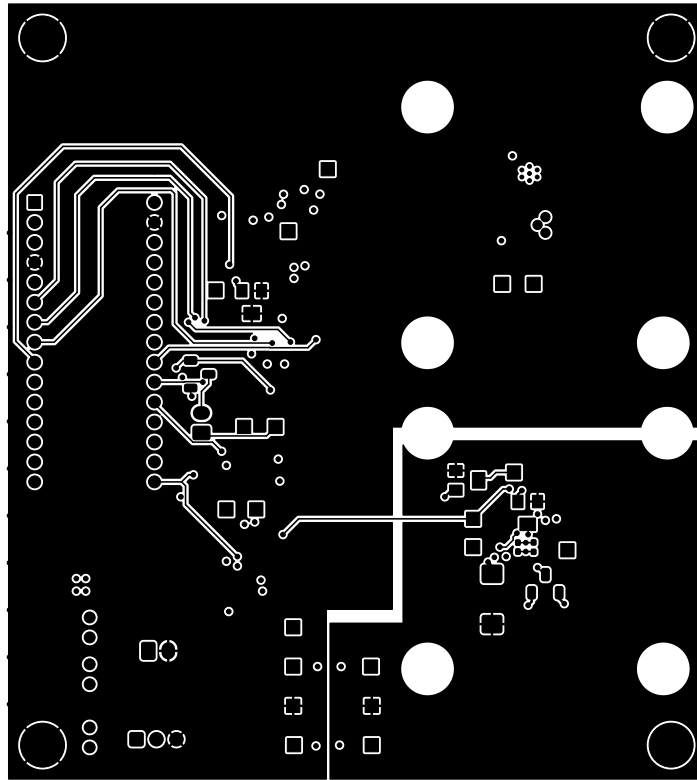


Abbildung 11: PCB Layout Bottom

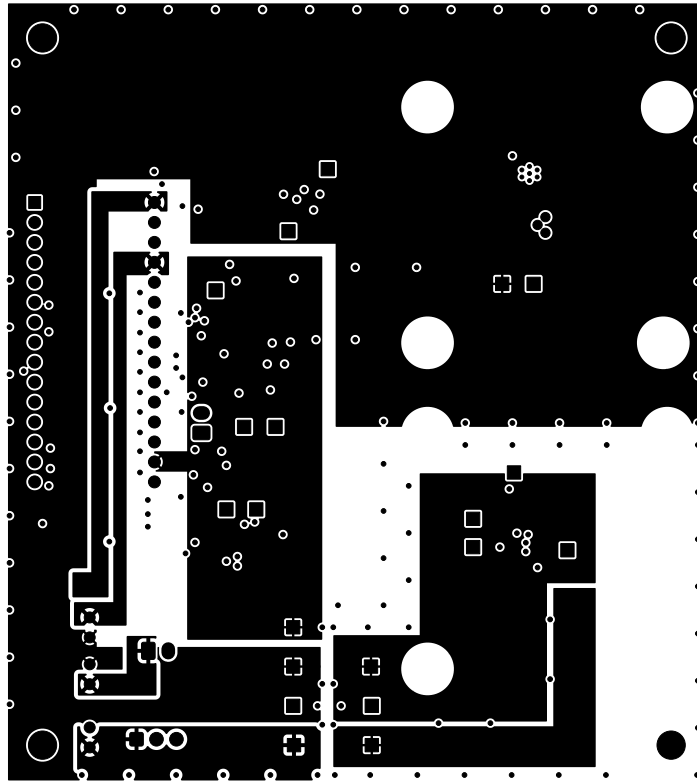


Abbildung 12: PCB Layout Innen 1

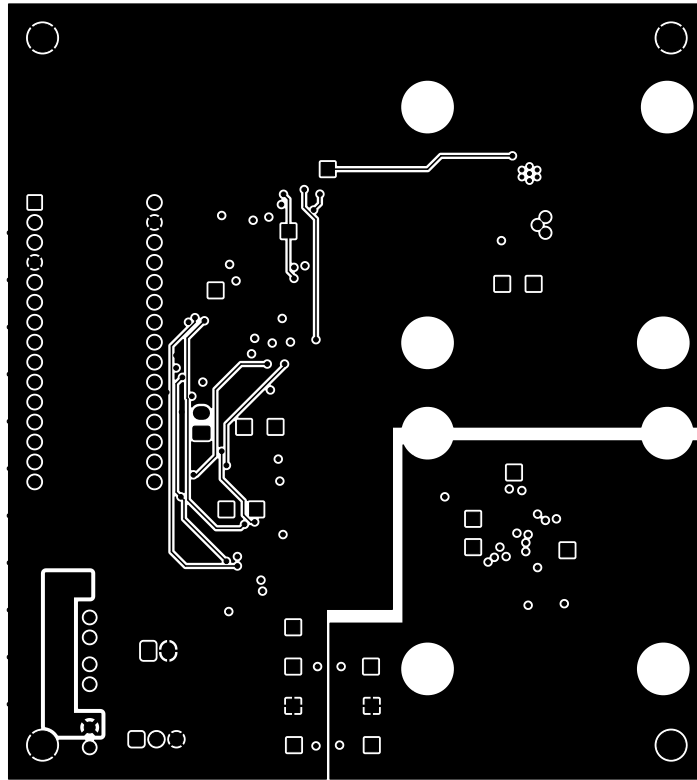


Abbildung 13: PCB Layout Innen 2

3.3.2 Komponenten-Platzierung

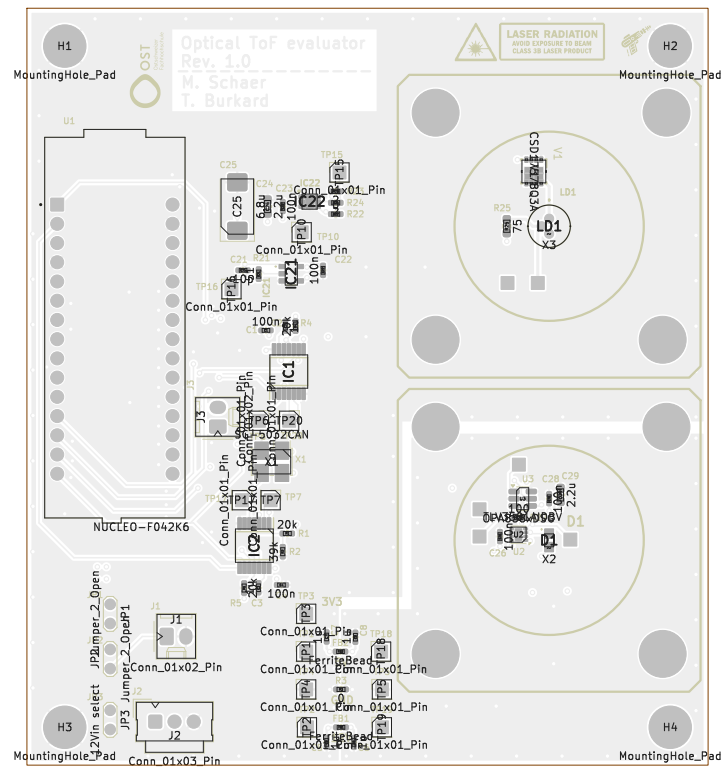


Abbildung 14: PCB Komponenten-Platzierung Top



3.4 3D View

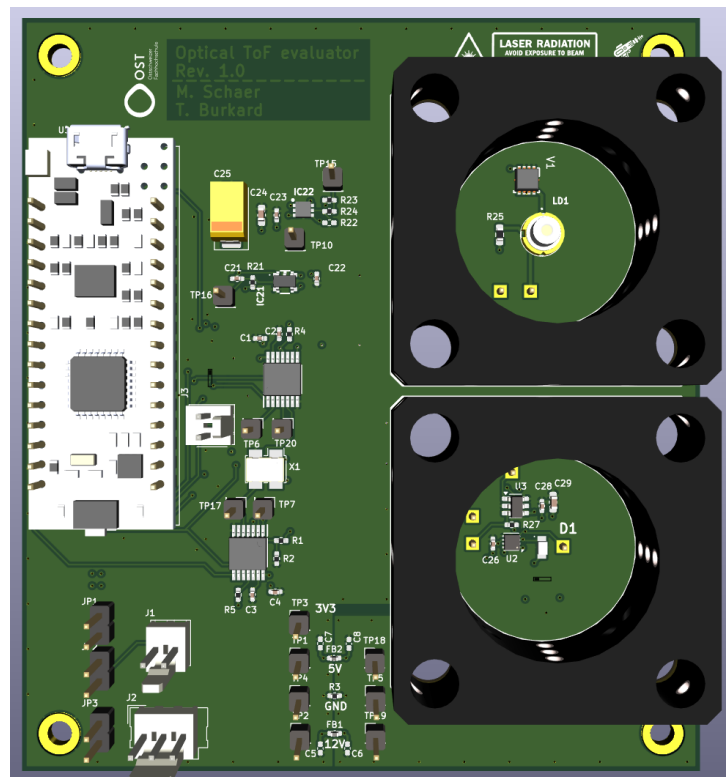


Abbildung 16: 3D View Top

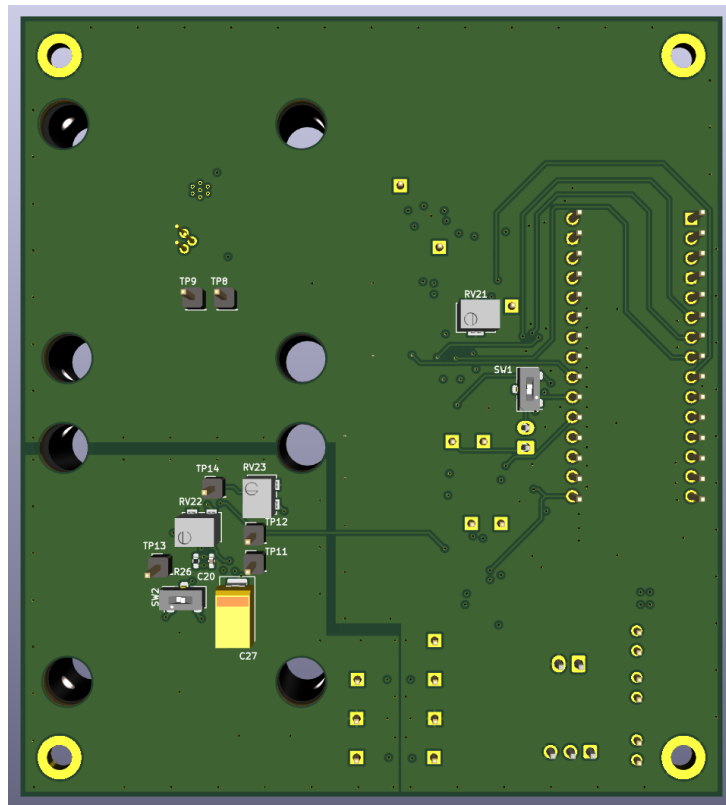


Abbildung 17: 3D View Bottom

3.5 Komponenten

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.0603_1608Metric_Pad1.08x0.95mm	2	
C25,C27	6.8u		Capacitor_Tantal_SMD:CP_EIA-7343-43_Kemet-X_Pad2.25x2.55mm	2	
D1	NJL6401R-3-TE1	(JRC, 2014)	NJL6401R3TE1	1	
FB1,FB2	FerriteBead	(TDK, 2019)	Inductor_SMD:L.0402_1005Metric_Pad0.77x0.64mm	2	
IC1,IC2	TDC7200PWR	(TI, 2016b)	SOP65P640X120-14N	2	
IC21	74LVC1G08QW5-7	(Diodes Inc., 2020)	74LVC1G08QW57	1	
IC22	LMG1025QDEETQ1	(TI, 2024)	SON65P200X200X80-7N	1	
J1,J3	Conn_01x02_Pin		Connector:Molex_KK-254_AE-6410-02A_1x02_P2.54mm_Vertical	2	
J2	Conn_01x03_Pin		Connector:Molex_SL_171971-0003_1x03_P2.54mm_Vertical	1	
JP1,JP2	Jumper_2_Open		TestPoint:TestPoint_2Pads_Pitch2.54mm_Drill0.8mm	2	
JP3	12Vin select		TestPoint:TestPoint_2Pads_Pitch2.54mm_Drill0.8mm	1	
LD1	RLD65NZX1-00A	(ROHM, 2019)	RLD65NZX1-00A:RLD85PZJ400A	1	
R1,R4,R5	20k		Resistor_SMD:R.0402_1005Metric_Pad0.72x0.64mm	3	
R2	39k		Resistor_SMD:R.0402_1005Metric_Pad0.72x0.64mm	1	
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.0402_1005Metric_Pad0.72x0.64mm	1	
R26	51k		Resistor_SMD:R.0603_1608Metric_Pad0.98x0.95mm	1	
R27	100		Resistor_SMD:R.0402_1005Metric_Pad0.72x0.64mm	1	
RV21	10k		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	(Bourns, 2024)	Button_Switch_SMD:Nidec_Copal_CAS-120A	2	
TP1..TP20	Conn_01x01_Pin	(Nidec Comp., 2024)	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:SMD_SeikoEpson_SG8002LB-4Pin_5.0x3.2mm	1	
X2,X3	G061041000	(Qioptiq, 2024)	user:Qioptiq_Mount	2	

Tabelle 1: Bill of Material

4 Simulationen

4.1 Laser Treiber

4.2 Transimpedanzverstärker

5 Messungen

6 Fazit

7 Anhang

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/DI0D_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 (aufgerufen am 26.12.2024)
- JRC. (2014). *NJL6401R-3 Datasheet*. Zugriff auf https://www.mouser.ch/datasheet/2/294/NJL6401R_3_E-1019028.pdf (aufgerufen am 26.12.2024)
- Nidec Comp. (2024). *CAS-120A1 Datasheet*. Zugriff auf <https://www.mouser.ch/datasheet/2/972/cas-1628136.pdf> (aufgerufen am 26.12.2024)
- Qioptiq. (2024). *G061041000 Datasheet*. Zugriff auf <https://mm.digikey.com/Volume0/opasdata/d220001/medias/docus/692/G061041000.pdf> (aufgerufen am 26.12.2024)
- ROHM. (2019). *RLD65NZX1 Datasheet*. Zugriff auf https://fscdn.rohm.com/en/products/databook/datasheet/opto/laser_diode/red/rld65nzx100a008-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/rld94pzj5-e.pdf (aufgerufen am 26.12.2024)
- ST. (2019). *NUCLEO-F042K6 Datasheet*. Zugriff auf <https://www.mouser.ch/datasheet/2/389/nucleo-f031k6-1484037.pdf> (aufgerufen am 26.12.2024)
- ST. (2024). *NUCLEO-F042K6 Usermanual*. Zugriff auf https://www.st.com/resource/en/user_manual/um1956-stm32-nucleo32-boards-mb1180-stmicroelectronics.pdf (aufgerufen am 26.12.2024)
- 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 (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. (2024). *LMG1025-Q1 Datasheet*. Zugriff auf <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmg1025-q1.pdf?ts=1735200095732> (aufgerufen am 26.12.2024)

Vishay Semic. (2024). *BPV23NF Datasheet*. Zugriff auf
<https://www.vishay.com/docs/81513/bpv23nf.pdf> (aufgerufen am 26.12.2024)