

**BACHELORTHESIS**

Moritz Hüsen

# Konzeption, Konstruktion und Inbetriebnahme eines kompakten Fotogoniometers zur Lichtquellenanalyse mit Evaluation der Messergebnisse

---

**FAKULTÄT TECHNIK UND INFORMATIK**

Department Informations- und Elektrotechnik

Faculty of Engineering and Computer Science

Department of Information and Electrical Eng

---

HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE  
WISSENSCHAFTEN HAMBURG

Hamburg University of Applied Sciences

Moritz Hüsken

Konzeption, Konstruktion und  
Inbetriebnahme eines kompakten  
Fotogoniometers zur Lichtquellenanalyse  
mit Evaluation der Messergebnisse

Bachelorthesis eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung  
im Studiengang Informations- und Elektrotechnik  
am Department Informations- und Elektrotechnik  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr. Holger Gräßner  
Zweitgutachter: Dr. Claudius Noack

Abgegeben am 27. Dezember 2024

**Thema der Bachelorthesis**

Konzeption, Konstruktion und Inbetriebnahme eines kompakten Fotogoniometers zur Lichtquellenanalyse mit Evaluation der Messergebnisse

**Stichworte**

Fotogoniometer, Lichttechnik, Messtechnik, LED-Beleuchtung, Ablaufsteuerung, Lichtstromberechnung, Lichtstärkeverteilungskurve

**Kurzzusammenfassung**

Vorliegende Studie behandelt die Entwicklung eines kompakten Fotogoniometers. Dabei handelt es sich um ein Gerät, das ermittelt wie viel Licht eine Leuchte in welche Richtung abstrahlt. Aus den gewonnenen Werten lässt sich unter anderem der Lichtstrom der Leuchte und der Halbstreuwinkel berechnen.

Eingangs werden einige relevante Grundlagen dargelegt, und die Anforderungen an das Gerät definiert. Danach gilt es, verschiedene Konzepte für den Aufbau des Fotogoniometers miteinander zu vergleichen und die Entwicklung anhand diverser, aufeinander aufbauender Iterationsschritte darzustellen.

Neben der Entwicklung der Mechanik spielt auch die Entwicklung der Elektronik und der Steuerung eines Messablaufs eine zentrale Rolle. Abschließend wird beschrieben, wie aus den erhobenen Daten der Lichtstrom der zu vermessenden Leuchte berechnet werden kann.

Die aufgenommenen Messwerte werden mit den Angaben auf den Datenblättern der gemessenen Leuchten verglichen, um Aussagen über die Eigenschaften und Genauigkeiten des Fotogoniometers treffen zu können.

**Title of the paper**

Conception, design and commissioning of a compact photogoniometer for analysing sources of light with evaluation of measurement results.

**Keywords**

Photogoniometer, lightning technology, measurement, LED-lightning, sequence control, luminous flux calculation, luminous intensity distribution curve

**Abstract**

This report deals with the development of a compact photogoniometer. This is a device used to measure, how much light a lightning fixture emits in a certain direction.

The obtained values can be used to calculate the luminous flux of and the half-scatter angle among other things.

In the beginning some relevant basics are described and the requirements of the device are defined. After that various concepts are compared among each other and the development is being described by looking at successive iteration steps.

In addition to the development of the mechanics of the device the electronics and the sequence control of a measurement play an important role, too.

The calculation of the luminous flux of the fixture by using the measurement results is considered.

Finally the taken measurement series are compared with the datasheets of the lightning fixtures to be able to make a statement regarding the characteristics of the self-build photogoniometer and its accuracy.

# Inhaltsverzeichnis

|                                                                                                    |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildungsverzeichnis .....                                                                        | vii |
| Tabellenverzeichnis .....                                                                          | ix  |
| Abkürzungsverzeichnis .....                                                                        | x   |
| Danksagung .....                                                                                   | xi  |
| 1 Einleitung .....                                                                                 | 1   |
| 2 Grundlagen .....                                                                                 | 2   |
| 2.1 Kugelkoordinaten .....                                                                         | 2   |
| 2.2 Raumwinkel .....                                                                               | 2   |
| 2.3 Lichtstrom .....                                                                               | 3   |
| 2.4 Beleuchtungsstärke .....                                                                       | 4   |
| 2.5 Lichtstärke .....                                                                              | 5   |
| 2.6 Lichtstärkeverteilungskurve .....                                                              | 5   |
| 2.7 Abstrahlwinkel/ Halbstreuwinkel .....                                                          | 7   |
| 2.8 $V(\lambda)$ -Kurve .....                                                                      | 7   |
| 2.9 Methoden zur Lichtstrommessung .....                                                           | 7   |
| 2.9.1 Ulbricht-Kugel .....                                                                         | 8   |
| 2.9.2 Fotogoniometer .....                                                                         | 8   |
| 3 Konzeption des Fotogoniometers .....                                                             | 9   |
| 3.1 Anforderungen .....                                                                            | 9   |
| 3.2 Konzeption .....                                                                               | 10  |
| 3.2.1 Iteration 1 .....                                                                            | 11  |
| 3.2.2 Iteration 2 .....                                                                            | 12  |
| 3.2.3 Iteration 3 .....                                                                            | 13  |
| 3.2.4 Iteration 4 .....                                                                            | 14  |
| 3.3 Entwicklung .....                                                                              | 15  |
| 3.3.1 Methoden zur Kompensation der Größe des Messgeräts .....                                     | 15  |
| 3.3.2 Starre Befestigung der Montagefläche der Leuchte im Mittelpunkt des<br>Fotogoniometers ..... | 16  |
| 4 Konstruktion des Fotogoniometers .....                                                           | 21  |
| 4.1 Rahmen .....                                                                                   | 22  |
| 4.2 Leuchtenhalterung .....                                                                        | 24  |
| 4.3 Sensorhalterung .....                                                                          | 26  |
| 4.3.1 Verformung durch Eigengewicht (Flächenlast) .....                                            | 28  |
| 4.3.2 Verformung durch Gewicht des Sensors (Punktlast) .....                                       | 29  |
| 4.4 Bewegung .....                                                                                 | 30  |
| 4.4.1 Bewegung Leuchte .....                                                                       | 31  |
| 4.4.2 Bewegung Sensor .....                                                                        | 36  |

|       |                                                |     |
|-------|------------------------------------------------|-----|
| 4.5   | Sensorbaugruppe .....                          | 41  |
| 4.5.1 | Anforderungen an die Sensorbaugruppe .....     | 41  |
| 4.5.2 | Auswahl des Sensors .....                      | 42  |
| 4.5.3 | Verstärker .....                               | 43  |
| 4.5.4 | Filter .....                                   | 44  |
| 4.5.5 | AD-Wandler .....                               | 48  |
| 4.5.6 | Spannungsversorgung .....                      | 49  |
| 4.5.7 | PCB-Layout .....                               | 50  |
| 4.5.8 | Herausforderungen bei der Inbetriebnahme ..... | 53  |
| 4.6   | Steuerung -Hardware .....                      | 75  |
| 4.6.1 | Schaltschrank .....                            | 75  |
| 4.6.2 | Schrittmotortreiber .....                      | 76  |
| 4.6.3 | Verdrahtungsplan .....                         | 77  |
| 4.7   | Steuerung -Software .....                      | 83  |
| 4.7.1 | Aufbau der Software .....                      | 83  |
| 4.7.2 | Programmiersprache und Steuerungsauswahl ..... | 84  |
| 4.7.3 | Herausforderung bei Nebenläufigkeit .....      | 96  |
| 5     | Evaluation der Messdaten .....                 | 97  |
| 5.1   | Qualitative Bewertung .....                    | 98  |
| 5.2   | Quantitative Analyse .....                     | 99  |
| 5.2.1 | 0° C-Plane .....                               | 100 |
| 5.2.2 | 45° C-Plane .....                              | 103 |
| 5.2.3 | 90° C-Plane .....                              | 106 |
| 5.2.4 | Beschreibung der Unterschiede .....            | 108 |
| 5.2.5 | Gründe für Abweichungen .....                  | 109 |
| 5.2.6 | Validierung der Messergebnisse .....           | 112 |
| 5.2.7 | Validierung der Absolutwerte .....             | 114 |
| 6     | Fazit und Ausblick .....                       | 116 |
| 6.1   | Fazit .....                                    | 116 |
| 6.2   | Technischer Ausblick .....                     | 118 |
| 7     | Quellenverzeichnis .....                       | 120 |
| 8     | Selbstständigkeitserklärung .....              | 124 |

# Abbildungsverzeichnis

|                                                                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 1: Kugelkoordinaten beschreiben eindeutig einen Punkt auf einer Kugeloberfläche mit dem Radius $R$ [2] .....                                              | 2  |
| Abbildung 2: Anschauliche Darstellung des Raumwinkels, der durch eine Fläche ( $a$ ) und einen Radius ( $R$ ) aufgespannt wird [3].....                             | 3  |
| Abbildung 3: Luxmeter LX1010BS.....                                                                                                                                 | 4  |
| Abbildung 4: Räumliche Anordnung der C-Planes.....                                                                                                                  | 5  |
| Abbildung 5: LVK der Leuchte "Luceos D/H2-L CDP 6500-8TW ETDD 03 (Pendant ZS/ZST+EB3) (DWW)" der Firma TRILUX [9] .....                                             | 6  |
| Abbildung 6: Dreidimensionale Darstellung der LVK in einem Lichtplanungstool [11].....                                                                              | 6  |
| Abbildung 7: Darstellung der $V(\lambda)$ -Kurve für das Tag- und Nachtsehen [13] .....                                                                             | 7  |
| Abbildung 8: Anordnung von Sensor und Leuchte mit Drehachsen für Iteration 1 .....                                                                                  | 11 |
| Abbildung 9: Anordnung von Sensor und Leuchte mit Drehachsen für Iteration 2 .....                                                                                  | 12 |
| Abbildung 10: Anordnung von Sensor und Leuchte mit Drehachsen für Iteration 3 .....                                                                                 | 13 |
| Abbildung 11: Anordnung von Sensor und Leuchte mit Drehachsen Iteration 4.....                                                                                      | 14 |
| Abbildung 12: Fotogoniometer "LSG-1900" der Firma ASMETEC [14].....                                                                                                 | 15 |
| Abbildung 13: Abstandsänderung von Leuchte zu Sensor bei Bewegung des Sensors .....                                                                                 | 16 |
| Abbildung 14: Berechnung des Abstandes $d_n$ durch mathematische Modellierung der Lichtaustrittsfläche und der Sensorkreisbahn .....                                | 17 |
| Abbildung 15: Sensor in verschiedenen Positionen mit schmalen Sichtfenster .....                                                                                    | 19 |
| Abbildung 16: Sensor in verschiedenen Positionen mit weitem (unverändertem) Sichtfenster .....                                                                      | 19 |
| Abbildung 17: Der Fotostrom lässt nach, wenn der Fototransistor von der Seite beleuchtet wird .....                                                                 | 20 |
| Abbildung 18: Rahmenkonstruktion im ITEM Engineering Tool.....                                                                                                      | 23 |
| Abbildung 19: Alu-Profil 40 mm x 40 mm, Nut 8, [17] .....                                                                                                           | 24 |
| Abbildung 20: Gesamte Leuchtenhalterung in CAD .....                                                                                                                | 25 |
| Abbildung 21: Absturzsicherung für Höhenverstellung.....                                                                                                            | 26 |
| Abbildung 22: Zusammenbau der Sensorhalterung mit Gegengewichten und Antrieb .....                                                                                  | 27 |
| Abbildung 23: Abstand der Punktlast $F$ vom Festlager ( $A$ ) im Verhältnis zur Gesamtlänge des Balkens ( $l$ ), [20].....                                          | 29 |
| Abbildung 24: Konstruktion für Anbindung der Leuchtenhalterung am Rahmen mit Antrieb im CAD .....                                                                   | 32 |
| Abbildung 25: Tabelle für Berechnungsfaktoren für Kugellagerlasten, [27, S. 315] .....                                                                              | 34 |
| Abbildung 26: Plot der Berechnungsfaktoren für Kugellagerlasten nach Abb. 23 .....                                                                                  | 35 |
| Abbildung 27: Gegengewicht mit Halterung - in CAD .....                                                                                                             | 40 |
| Abbildung 28: Gegengewicht mit Halterung - Umsetzung in der Praxis .....                                                                                            | 40 |
| Abbildung 29: Schematische Darstellung der zur Erfassung eines Messwerts notwendigen Schritte; orange: Aufgaben, die von der Sensorbaugruppe übernommen werden..... | 41 |
| Abbildung 30: Platine mit Blende an das Alu-Rohr montiert .....                                                                                                     | 43 |
| Abbildung 31: Schaltplan: Fototransistor mit Shuntwiderstand und Verstärker .....                                                                                   | 44 |
| Abbildung 32: Bode Diagramm RC-Tiefpass .....                                                                                                                       | 46 |
| Abbildung 33: Messung vor dem Filter, deutliche Störung mit 2 MHz zu erkennen.....                                                                                  | 47 |
| Abbildung 34: Messung nach dem Filter, die 2 MHz Störung ist nicht mehr zu erkennen .....                                                                           | 47 |
| Abbildung 35: Schaltplan AD-Wandler ADS 1255 mit Zusatzbeschaltung .....                                                                                            | 49 |
| Abbildung 36: Schaltplan: Spannungsregler mit Zusatzkondensatoren .....                                                                                             | 50 |
| Abbildung 37: Sensor PCB, 3D-Ansicht, Aufsicht.....                                                                                                                 | 52 |
| Abbildung 38: Sensor PCB, Layout-Ansicht, Aufsicht .....                                                                                                            | 52 |
| Abbildung 39: Ausschnitt aus dem Datenblatt des OPA827 von Texas Instruments, [33].....                                                                             | 53 |
| Abbildung 40: Figure 29 aus dem Datenblatt des OPA827, [33] .....                                                                                                   | 54 |
| Abbildung 41: Versuchsaufbau: Vergleichsmessung Luxmeter - Sensorbaugruppe .....                                                                                    | 56 |
| Abbildung 42: Darstellung der Messreihe; Beleuchtungsstärken über Spannungswerte .....                                                                              | 57 |
| Abbildung 43: Darstellung des Faktor-Vektors über Sensor-PCB-Spannungswerte.....                                                                                    | 57 |
| Abbildung 44: Rohwerte der Sensor-PCB in 1°-Schritten um die Leuchte herum.....                                                                                     | 61 |
| Abbildung 45: Unterteilung der Originalwerte (blau & rot) und Durchschnitt beider Halbebenen (orange) .....                                                         | 61 |

|                                                                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildung 46: Lichtstärken aus ldt-Datei in Originalauflösung (rot) und in interpolierter 1°-Auflösung (blau)..... | 62  |
| Abbildung 47: Vergleich der skalierten Daten aus ldt-Datei mit Fotogoniometer-Spannungswerten.....                 | 63  |
| Abbildung 48: Plot der Umrechnungsfaktoren über die Spannungswerte .....                                           | 64  |
| Abbildung 49: Verschiedene Polynome werden an den Faktor-Vektor gefittet .....                                     | 65  |
| Abbildung 50: Screenshot aus der Matlab-Ausgabe: Fehler und Anpassungswerte der verschiedenen Polynom-Fits .....   | 65  |
| Abbildung 51: Plot der Polynom-Fits im Spannungsbereich bis 3 V .....                                              | 67  |
| Abbildung 52: Vergleich Lichtstrom verschiedene Leuchten, grün: Maximum: 23,37 klm .....                           | 68  |
| Abbildung 53: Ansteuerung zweier Slaves, [50] .....                                                                | 70  |
| Abbildung 54: Überblick über die Möglichkeiten, das Clock-Signal auszuwerten, [51] .....                           | 71  |
| Abbildung 55: Fehler bei 5000-facher Übertragung desselben Spannungswerts .....                                    | 72  |
| Abbildung 56: Störungen koppeln sich auf single-ended Übertragungsleitungen ein [52].....                          | 73  |
| Abbildung 57: Gleiche Messergebnisse über 5000 einzelne Messungen .....                                            | 74  |
| Abbildung 58: Mockup des Schaltschranks in CAD .....                                                               | 75  |
| Abbildung 59: Fertiger Schaltschrank (bestückt, verdrahtet & montiert).....                                        | 76  |
| Abbildung 60: Schrittmotortreiber mit Schrittmotor für Sensorbewegung .....                                        | 77  |
| Abbildung 61: Verdrahtungsplan Raspberry Pi GPIOs .....                                                            | 78  |
| Abbildung 62: Verdrahtungsplan Endtaster .....                                                                     | 79  |
| Abbildung 63: Grenztaster „Endstop fast“ für die Drehung der Leuchte .....                                         | 80  |
| Abbildung 64: Grenztaster „Endstop precise“ für die Drehung der Leuchte .....                                      | 80  |
| Abbildung 65: Verdrahtungsplan Lüfter .....                                                                        | 81  |
| Abbildung 66: Verdrahtungsplan Sensorbaugruppe .....                                                               | 81  |
| Abbildung 67: Verdrahtungsplan Schrittmotortreiber .....                                                           | 82  |
| Abbildung 68: Mikroschritte einstellbar, abhängig von der Position der DIP-Schalter, [55].....                     | 82  |
| Abbildung 69: User Interface des Fotogoniometers .....                                                             | 87  |
| Abbildung 70: Overlay für manuellen Betriebsmodus .....                                                            | 87  |
| Abbildung 71: UML State Chart der Ablaufsteuerung .....                                                            | 89  |
| Abbildung 72: LVK der Leuchte CENTAURUS 270, breitstrahlend [63].....                                              | 95  |
| Abbildung 73: Beispiel für die grafische Aufbereitung der LVK.....                                                 | 96  |
| Abbildung 74: LVK der Leuchte Nr. 3 aus dem Fotogoniometer, C-Plane 0° .....                                       | 98  |
| Abbildung 75: LVK der Leuchte Nr.3 aus der LDT-Datei (Anhang 1).....                                               | 98  |
| Abbildung 76: LVK Fotogoniometer VS LDT-Datei, Leuchte Nr. 1, 0° C-Plane .....                                     | 100 |
| Abbildung 77: LVK Fotogoniometer VS LDT-Datei, Leuchte Nr. 2, 0° C-Plane .....                                     | 100 |
| Abbildung 78: LVK Fotogoniometer VS LDT-Datei, Leuchte Nr. 3, 0° C-Plane .....                                     | 101 |
| Abbildung 79: LVK Fotogoniometer VS LDT-Datei, Leuchte Nr. 4, 0° C-Plane .....                                     | 101 |
| Abbildung 80: LVK Fotogoniometer VS LDT-Datei, Leuchte Nr. 5, 0° C-Plane .....                                     | 102 |
| Abbildung 81: LVK Fotogoniometer VS LDT-Datei, Leuchte Nr. 6, 0° C-Plane .....                                     | 102 |
| Abbildung 82: LVK Fotogoniometer VS LDT-Datei, Leuchte Nr. 1, 45° C-Plane .....                                    | 103 |
| Abbildung 83: LVK Fotogoniometer VS LDT-Datei, Leuchte Nr. 2, 45° C-Plane .....                                    | 103 |
| Abbildung 84: LVK Fotogoniometer VS LDT-Datei, Leuchte Nr. 3, 45° C-Plane .....                                    | 104 |
| Abbildung 85: LVK Fotogoniometer VS LDT-Datei, Leuchte Nr. 4, 45° C-Plane .....                                    | 104 |
| Abbildung 86: LVK Fotogoniometer VS LDT-Datei, Leuchte Nr. 5, 45° C-Plane .....                                    | 105 |
| Abbildung 87: LVK Fotogoniometer VS LDT-Datei, Leuchte Nr. 6, 45° C-Plane .....                                    | 105 |
| Abbildung 88: LVK Fotogoniometer VS LDT-Datei, Leuchte Nr. 1, 90° C-Plane .....                                    | 106 |
| Abbildung 89: LVK Fotogoniometer VS LDT-Datei, Leuchte Nr. 2, 90° C-Plane .....                                    | 106 |
| Abbildung 90: LVK Fotogoniometer VS LDT-Datei, Leuchte Nr. 3, 90° C-Plane .....                                    | 107 |
| Abbildung 91: LVK Fotogoniometer VS LDT-Datei, Leuchte Nr. 4, 90° C-Plane .....                                    | 107 |
| Abbildung 92: LVK Fotogoniometer VS LDT-Datei, Leuchte Nr. 5, 90° C-Plane .....                                    | 108 |
| Abbildung 93: LVK Fotogoniometer VS LDT-Datei, Leuchte Nr. 6, 90° C-Plane .....                                    | 108 |
| Abbildung 94: Montage der Leuchte Nr. 3 mit Behelfskonstruktion, seitliche Ansicht .....                           | 110 |
| Abbildung 95: Montage der Leuchte Nr. 3 mit Behelfskonstruktion, frontale Ansicht .....                            | 110 |
| Abbildung 96: Verschieben des Sichtfelds des Sensors .....                                                         | 111 |
| Abbildung 97: LVK von Leuchte Nr. 4 aus dem Fotogoniometer, C-Plane 0° .....                                       | 112 |
| Abbildung 98: LVK von Leuchte Nr. 4 aus dem Prüflabor .....                                                        | 112 |

|                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildung 99: LVK in kartesischen Koordinaten von Leuchte Nr. 3 in 0° C-Plane .....            | 113 |
| Abbildung 100: Differenz der Lichtstärken zwischen Fotogoniometer und LDT-Datei .....          | 115 |
| Abbildung 101: Differentielle Signalübertragung ist unanfälliger gegen EMV-Störungen [52]..... | 118 |

## Tabellenverzeichnis

|                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 1: Legende Iteration 1 .....                                                                         | 11 |
| Tabelle 2: Vor- und Nachteile Iteration 1 .....                                                              | 11 |
| Tabelle 3: Legende Iteration 2 .....                                                                         | 12 |
| Tabelle 4: Vor- und Nachteile Iteration 2 .....                                                              | 12 |
| Tabelle 5: Legende Iteration 3 .....                                                                         | 13 |
| Tabelle 6: Vor- und Nachteile Iteration 3 .....                                                              | 13 |
| Tabelle 7: Legende Iteration 4 .....                                                                         | 14 |
| Tabelle 8: Gegenüberstellung Lösungsmöglichkeiten zur Abstandsänderungskompensation .....                    | 18 |
| Tabelle 9: Vergleich Sensorblickfeld .....                                                                   | 19 |
| Tabelle 10: Überblick Baugruppen .....                                                                       | 21 |
| Tabelle 11: Gegenüberstellung Fertiungsverfahren für den Rahmen .....                                        | 22 |
| Tabelle 12: Legende zu Abb. 18: Rahmenkonstruktion .....                                                     | 23 |
| Tabelle 13: Legende zu Abbildung 20 .....                                                                    | 25 |
| Tabelle 14: Legende zu Abb. 22 .....                                                                         | 27 |
| Tabelle 15: Legende zu Abbildung 27 .....                                                                    | 40 |
| Tabelle 16: Legende zu Abbildung 28 .....                                                                    | 40 |
| Tabelle 17: Legende zu Abbildung 41 .....                                                                    | 56 |
| Tabelle 18: Unterschiede zwischen der Fotogoniometer Messreihe, und den LDT-Daten derselben<br>Leuchte ..... | 60 |
| Tabelle 19: Legende zu Abbildung 52 .....                                                                    | 68 |
| Tabelle 20: Signale des SPI-Interfaces .....                                                                 | 70 |
| Tabelle 21: SPI-Modi, [50] .....                                                                             | 71 |
| Tabelle 22: Nennströme der verwendeten Schrittmotoren [25], [30] .....                                       | 77 |
| Tabelle 23: Legende zu Abbildung 60 .....                                                                    | 77 |
| Tabelle 24: Gegenüberstellung GUI-Konzepte .....                                                             | 86 |
| Tabelle 25: Überblick der zu Testzwecken zur Verfügung stehenden Leuchten .....                              | 97 |

# Abkürzungsverzeichnis

|               |                                    |
|---------------|------------------------------------|
| <b>LVK</b>    | Lichtstärkeverteilungskurve        |
| <b>GUI</b>    | engl. Graphical User Interface     |
| <b>SPI</b>    | engl. Serial Peripheral Interface  |
| <b>SMD</b>    | engl. Surface Mount Device         |
| <b>THT</b>    | engl. Through-Hole Technology      |
| <b>PCB</b>    | engl. Printed Circuit Board        |
| <b>EDA</b>    | engl. Electronic Design Automation |
| <b>OP-AMP</b> | engl. Operational Amplifier        |

# Danksagung

Ich möchte diese Gelegenheit nutzen, um allen zu danken, die mich bei der Durchführung des Projekts und der Erstellung der vorliegenden Bachelor-Arbeit unterstützt haben.

Zuerst gilt mein herzlicher Dank meinem Betreuer Prof. Dr. Holger Gräßner, der sofort bereit war, dieses Vorhaben vonseiten der Hochschule zu begleiten.

Ein besonderer Dank ergeht an Dr. Claudius Noack, Lufthansa Industry Solutions AS GmbH, der das Projekt seitens der Lufthansa ermöglichte und als Zweitgutachter der Thesis fungiert. Seine stetige fachliche Beratung und Hilfe beim Aufbau des Fotogoniometers am Standort förderten die Arbeit an wichtigen Schlüsselstellen maßgeblich.

Die Lufthansa Industry Solutions AS GmbH beschäftigte mich als Werkstudent und stellte ein großzügiges Projekt-Budget zur Verfügung.

Des Weiteren sind Jérôme Cadera, Rasmus Bouncken sowie Florian Schweder vom Verein HAWKS Racing e.V. zu nennen. Sie gewährten die Nutzung zahlreicher Materialien für den Bau des Fotogoniometers und standen mir bei der Fertigung einzelner Baugruppen mit Rat und Tat zur Seite. Durch den Verein erhielt ich auch Zugriff auf eine Lötstation und elektronisches Messequipment, das wesentlich zum wissenschaftlichen Mehrwert und zum Gelingen dieser Arbeit beitrug.

Sebastian Gretenkort, ebenfalls Lufthansa Industry Solutions AS GmbH, beschaffte die Leuchten zur Vermessung im Fotogoniometer und gab sein Feedback.

Unkomplizierten fachlichen Austausch ermöglichten Dr. Joachim Kurzhöfer und mein Kommilitone Norbert Brinz.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meinen Eltern sowie Sibylle Bauer bedanken, die mir über all die Jahre stets motivierend und geduldig Rückhalt gaben.

Hamburg, 12.12.2024  
Moritz Hüsken

# 1 Einleitung

Mit dem Umschwung in der Beleuchtungsindustrie auf LED-Technik wächst der Markt für LED-Leuchten enorm, die hauptsächlich in Asien gefertigt werden. Damit steigt auch der Bedarf, Leuchten unabhängig und schnell bewerten zu können.

Im Normalfall findet die lichttechnische Vermessung mit anschließender Beurteilung in einem speziellen Lichtlabor statt. Verschiedene Leuchten für ein konkretes Projekt in einem solchen Lichtlabor miteinander zu vergleichen, ist nicht immer möglich. Neben dem logistischen Aufwand spielen auch die zeitliche Verfügbarkeit des Labors und die Kosten der Vermessung eine wesentliche Rolle. Für ein Projekt mit kurzen Laufzeiten beispielsweise ist es zeitlich nicht vertretbar, mehrere Wochen auf das Laborergebnis zu warten.

Eine der wichtigsten Labormessungen ist die Aufnahme einer Lichtstärkeverteilungskurve (LVK) in einem Fotogoniometer.

In dieser Arbeit wird daher ein miniaturisiertes und kostengünstiges Fotogoniometer beispielhaft für die Lufthansa Industry Solutions AS GmbH entworfen, konstruiert, gefertigt und in Betrieb genommen. Ansprechpartner dort ist Claudius Noack. Mithilfe dieses Fotogoniometers soll es möglich sein, vergleichsweise schnell und einfach mit geringem organisatorischem Aufwand die LVK einer Leuchte aufzunehmen und den Lichtstrom zu ermitteln.

Damit können bei der Beleuchtungsplanung Zeit und Geld eingespart, sowie umfassende Messungen für kurzlaufende Projekte ermöglicht werden.

Die Prüfung und die Vergleiche mit der Theorie kritischer Baugruppen erfolgt während der Inbetriebnahme. Die Ergebnisse der Prüfungen sind im Verlauf der Arbeit dargestellt.

Abschließend werden die so erhaltenen Messwerte einiger Leuchten mit den Angaben in deren Datenblättern verglichen, um so Aussagen über die Eigenschaften des Eigenbau-Fotogoniometers treffen zu können.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Kugelkoordinaten

Kugelkoordinaten sind besonders geeignet, um einen Ort auf einer kugelförmigen Oberfläche (z.B. ein um ein Objekt rotierender Sensor oder den Sonnenstand) eindeutig zu beschreiben. Dabei wird der Radius und der Azimut- bzw. Zenitwinkel verwendet.

Der Zenit- oder Polarwinkel  $\vartheta$  beschreibt den Winkel gegenüber der vertikalen Achse im Bereich von 0 bis  $\pi$  bzw. von  $0^\circ$  bis  $180^\circ$ .

Der Azimutwinkel  $\varphi$  beschreibt den Winkel entlang der horizontalen Achse im Bereich von 0 bis  $2\pi$  bzw.  $0^\circ$  bis  $360^\circ$ .

Der Radius beschreibt den Radius der Kugel und damit direkt den Abstand von Kugelmittelpunkt zu einem Punkt P [1], [2].

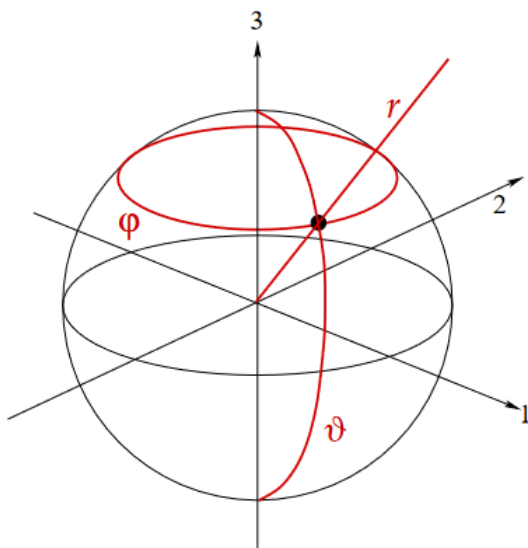


Abbildung 1: Kugelkoordinaten beschreiben eindeutig einen Punkt auf einer Kugeloberfläche mit dem Radius  $R$  [2]

### 2.2 Raumwinkel

Der Raumwinkel beschreibt den Anteil der Oberfläche eines dreidimensionalen Raumes, der von einem von innen auf die Kugeloberfläche projiziertem Kegel oder Pyramidenmantel eingeschlossen wird. Er ist das dreidimensionale Pendant zu einem im zweidimensionalen Raum durch einen Winkel und einen Radius beschriebenen Kreisstück.

Der Raumwinkel ist daher definiert als das Verhältnis der eingeschlossenen Fläche durch das Quadrat des Kugelradius und wird in Steradian (sr) angegeben [3]:

$$\Omega = \frac{a}{R^2}$$

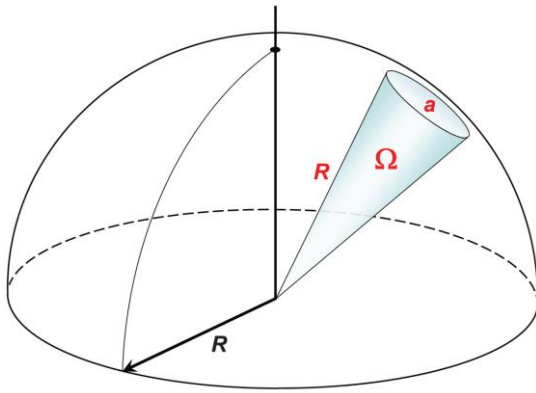


Abbildung 2: Anschauliche Darstellung des Raumwinkels, der durch eine Fläche (a) und einen Radius (R) aufgespannt wird [3]

## 2.3 Lichtstrom

Der Lichtstrom beschreibt die Lichtleistung, die eine Leuchte insgesamt in alle Richtungen abstrahlt. Daher ist diese Größe maßgeblich dafür verantwortlich, wie „hell“ eine Leuchte wahrgenommen wird. Zur Verdeutlichung, dass es sich um eine fotometrische Größe handelt, lautet die Einheit *Lumen* (lm) und nicht Watt. Definiert ist der Lichtstrom als Änderung der ausgesendeten Lichtmenge über die Zeit:

$$\phi_v = \frac{dQ_v}{dt}$$

$Q_v$  beschreibt dabei die sichtbare (Index v für visuell) Lichtmenge.

Anders ausgedrückt lässt sich der Lichtstrom auch als Integral der Lichtstärke über den gesamten Raumwinkel darstellen:

$$\phi_v = \int_{\Omega} I_v(\vartheta) d\Omega$$

[4]

## 2.4 Beleuchtungsstärke

Die Beleuchtungsstärke wird in Lux (lx) angegeben. Sie ist ein Maß dafür, wie viel von einer Leuchte emittierter Lichtstrom auf eine reale oder virtuelle, meist horizontale Ebene fällt (z.B. einen Schreibtisch):

$$E_v = \frac{d\phi_v}{dA}$$

Die gemessene Beleuchtungsstärke auf einer Oberfläche ist abhängig vom Quadrat des Abstands zur Leuchte, die in Richtung der Messeinrichtung eine bestimmte Lichtstärke aussendet:

$$E_v = \frac{I_v}{r^2}$$

Die Beleuchtungsstärke lässt sich direkt mit einem Luxmeter messen:



Abbildung 3: Luxmeter LX1010BS

Der Helligkeitseindruck für uns Menschen, der von einer beleuchteten Fläche ausgeht, wird *nicht* durch die Beleuchtungsstärke beschrieben. Dieser ist auch maßgeblich vom Reflektionsgrad der beleuchteten Oberfläche abhängig. So erscheint für das menschliche Auge eine schwarze Oberfläche, auf der z.B. 500 lx gemessen werden, dunkler als eine weiße Oberfläche mit der gleichen Beleuchtungsstärke.

[4], [5], [6], [7]

## 2.5 Lichtstärke

Im Gegensatz zur Beleuchtungsstärke, die den auf einer Ebene auftreffenden Lichtstrom betrachtet, beschreibt die Lichtstärke (Einheit: Candela, cd) den Anteil des Lichtstroms, der unter einem bestimmten Raumwinkel emittiert wird:

$$I_v = \frac{d\phi_v}{d\Omega}$$

[4], [8]

## 2.6 Lichtstärkeverteilungskurve

Die Lichtstärkeverteilungskurve (LVK) beschreibt, welche Lichtstärke eine Leuchte in welche Richtung abstrahlt. Die LVK ist meist in einem (zweidimensionalen) Polarkoordinatensystem dargestellt. Die Darstellung in Polarkoordinaten findet für eine Leuchte in mehreren sog. C-Planes, also um die Z-Achse gedrehte Ebenen statt. Anhand der LVK lässt sich gut abschätzen, welche Abstrahlcharakteristik eine Leuchte besitzt.

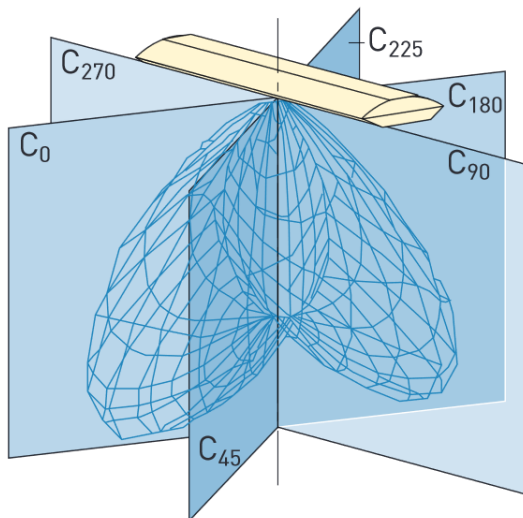


Abbildung 4: Räumliche Anordnung der C-Planes

In einer LVK werden die Lichtstärken für die einzelnen Winkel häufig relativ angegeben, auf den Gesamtlichtstrom der Leuchte bezogen:

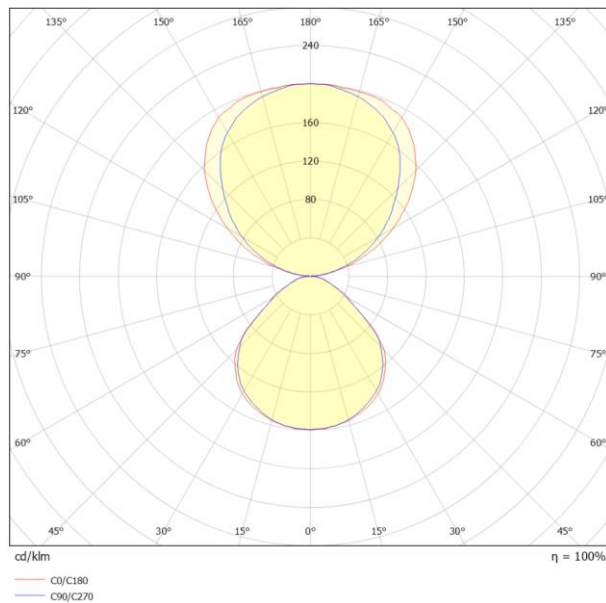


Abbildung 5: LVK der Leuchte "Luceos D/H2-L CDP 6500-8TW ETDD 03 (Pendant ZS/ZST+EB3) (DWW)" der Firma TRILUX [9]

Ist die LVK einer Leuchte (im Idealfall in mehreren C-Planes) bekannt, lässt sich durch numerische Verfahren, die später in dieser Arbeit betrachtet werden, der Gesamtlichtstrom der Leuchte ermitteln sowie die Lichtstärkeverteilung in einem Lichtplanungstool visuell darstellen. Im Lichtplanungstool kann dann berechnet werden, an welcher Stelle im Raum welche Beleuchtungsstärke vorhanden ist [9], [10], [11].



Abbildung 6: Dreidimensionale Darstellung der LVK in einem Lichtplanungstool [11]

## 2.7 Abstrahlwinkel/ Halbstreuwinkel

Der Halbstreuwinkel beschreibt den Winkel, bei dem die Lichtstärke auf die Hälfte ihres Maximums abgesunken ist. Der Halbstreuwinkel lässt sich aus der LVK ermitteln und kann je nach Leuchtencharakteristik für verschiedene C-Planes andere Winkel haben.

[12]

## 2.8 $V(\lambda)$ -Kurve

Der Wellenlängenbereich, der vom menschlichen Auge wahrgenommen werden kann, liegt zwischen 380 nm und 780 nm. Auch innerhalb dieses Spektrums werden nicht alle Wellenlängen gleich gut wahrgenommen. Auskunft darüber, welche Wellenlängen bei Tag und bei Nacht am besten wahrgenommen werden können, liefert die sog. „ $V(\lambda)$ -Kurve“ [10]:

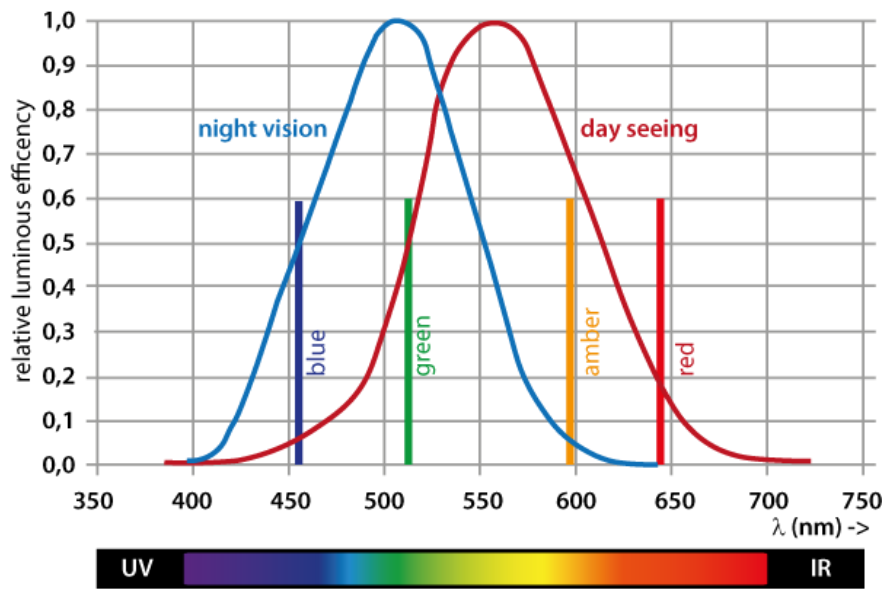


Abbildung 7: Darstellung der  $V(\lambda)$ -Kurve für das Tag- und Nachtsehen [13]

## 2.9 Methoden zur Lichtstrommessung

Um den Lichtstrom messtechnisch zu ermitteln, existieren zwei gängige Methoden: Die Ulbricht-Kugel und ein Fotogoniometer. Für die Messung muss die Lichtstärke über den gesamten Raumwinkel integriert werden:

$$\phi_v = \int_{\Omega} I_v(\vartheta) d\Omega$$

### 2.9.1 Ulbricht-Kugel

Die Ulbricht-Kugel ist eine hohle Kugel, die das Licht der zu vermessenden Leuchte durch diffuse Reflektion ihrem inneren „integriert“. An einem Punkt 90° zum Befestigungspunkt der zu vermessenden Leuchte (Prüfling) wird ein Luxmeter montiert. Das Luxmeter wird außerdem durch eine Blende vor direkter Beleuchtung geschützt, die das Messergebnis verfälschen würde. Durch die Messung an nur einem Punkt ist die Ermittlung des Lichtstroms mithilfe der Ulbricht-Kugel ohne Berücksichtigung der Aufwärmzeit der Leuchte ein sehr schnelles Verfahren (wenige Sekunden). Bei dieser Art der Messung muss allerdings beachtet werden, dass die Oberfläche der Innenseite der Kugel nicht vollständig reflektiert und dass ein Teil des zu messenden Lichtstroms auch auf der Oberfläche der Leuchte selbst absorbiert. Sollen diese Effekte kompensiert werden, muss zusätzlich eine Hilfslichtquelle im Innern der Kugel angebracht werden.

Durch diverse Unbekannte (Selbstabsorption, keine vollständige Reflektion und Hilfslicht) eignet sich die Ulbricht-Kugel nur bedingt, um verschiedene Leuchten zu vermessen (absolute Messung). Für den Vergleich mehrerer identischer Leuchten ist sie jedoch gut geeignet, weil die Messung schnell geht, und die einzelnen Prüflinge dann nur relativ miteinander verglichen werden.

### 2.9.2 Fotogoniometer

Dabei handelt es sich um ein Gerät, das kugelförmig (auf Kreisbahnen in verschiedenen Ebenen) um die Leuchte an verschiedenen Punkten die Beleuchtungsstärke misst. Die durch die Messung erhaltenen Messreihen von Beleuchtungsstärken lassen sich mithilfe des Abstands von Sensor zu Leuchte in Lichtstärken umrechnen. Durch Integrieren aller Lichtstärken kann so der Gesamtlichtstrom der Leuchte ermittelt werden.

Im Gegensatz zur Ulbricht-Kugel verlässt sich das Fotogoniometer rein auf die aufgenommenen Messwerte und deren Integration zur Bestimmung des Lichtstroms. Unbekannte Größen, wie das genaue Reflektionsverhalten der Ulbricht-Kugel und das dort eingesetzte Hilfslicht spielen hier keine Rolle. Daher ist das Fotogoniometer besser für die absolute Messung verschiedener Leuchten geeignet. So lassen sich zum Beispiel die Produkte mehrerer Hersteller anhand der Messergebnisse unabhängig voneinander vergleichen. Durch die im Fotogoniometer erhaltenen Daten lassen sich LVKs in allen vermessenen Ebenen (C-Planes) erstellen.

Das Fotogoniometer ist zudem die einzige Möglichkeit, die LVK einer Leuchte zu erhalten, die für die Lichtplanung zwangsläufig gebraucht wird.

Aus diesen Informationen können nicht nur Rückschlüsse über das Abstrahlverhalten der Leuchte gezogen werden, sondern es lassen sich auch andere Informationen gewinnen, zum Beispiel solche über ihr Blendverhalten [10].

## 3 Konzeption des Fotogoniometers

### 3.1 Anforderungen

Die Kriterien, die das fertige Gerät erfüllen soll, wurden im Vorfeld mit Claudius Noack besprochen.

**Leuchtengröße:** Die maximale horizontale Ausdehnung einer Leuchte, die vermessen werden kann, liegt bei 1500 mm x 600 mm. Diese Werte orientieren sich an Erfahrungswerten für die typische Ausdehnung einer Langfeldleuchte.

**Leuchtengewicht:** Die Konstruktion muss imstande sein, Leuchten bis zu einem Maximalgewicht von 15 kg zuverlässig zu tragen und zu bewegen.

**Maße des Fotogoniometers:** Die maximale Stellfläche des Geräts soll 3500 mm x 3500 mm nicht überschreiten. Eine Limitierung nach oben gibt es nicht, wird jedoch durch die Deckenhöhe am Aufstellungsort auf ein Maximum von 3050 mm festgelegt.

**Messschritte:** Bei der Bewegung des Sensors um die Leuchte soll der Abstand zwischen zwei Messpunkten  $1^\circ$  bei einer Toleranz von  $0,5^\circ$  betragen. Außerdem soll das Gerät so konzipiert werden, dass eine Bewegung des Sensors möglichst weit ( $360^\circ$ ) um die Leuchte möglich ist.

**C-Planes:** Für die Vermessung einer Leuchte soll es dem Benutzer möglich sein, zwischen der Messung mit einer, zwei oder drei C-Planes zu wählen. Bei der Messung mit zwei C-Planes sollen die Winkel  $0^\circ$  und  $90^\circ$  verwendet werden, bei der Messung mit drei C-Planes  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  und  $90^\circ$ .

**Lichtstärkeverteilungskurve:** Nach Abschluss einer Messung soll eine LVK erstellt werden, die am Ende sowohl für Datenblätter als auch für die Lichtplanung und -beurteilung Verwendung finden kann. Aus der LVK soll auch der Abstrahlwinkel der Leuchte ermittelt werden können.

**Lichtstrom:** Anhand der aufgenommenen Daten einer Leuchte soll es möglich sein, den Lichtstrom der Leuchte zu ermitteln.

**V( $\lambda$ )-Kurve:** Da die vermessenen Leuchten für Arbeitsplätze gedacht sind, an denen Menschen arbeiten, sollen die Messergebnisse auch für den für Menschen sichtbaren Wellenlängenbereich angepasst sein.

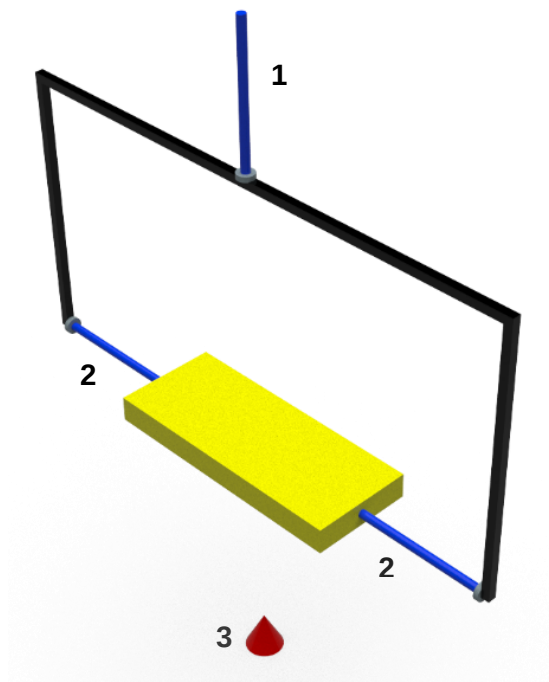
**Benutzeroberfläche:** Damit Eingaben für z.B. die Anzahl der zu vermessenden C-Planes und den Speicherort der Messergebnisse nicht für jede einzelne Messung manuell im Backend passieren müssen, soll es eine GUI geben, die dem User die einzelnen Eingaben abnimmt und im Hintergrund verarbeitet.

## 3.2 Konzeption

Um das Fotogoniometer konstruieren zu können, muss zunächst das Konzept festgelegt werden. Dieses Konzept wird in mehreren Iterationsstufen ausgearbeitet.

Dabei werden verschiedene Anordnungen von Leuchte und Sensor untersucht und hinsichtlich ihrer jeweiligen Vor- und Nachteile analysiert. Dies wird als Grundlage für die nächste Iteration verwendet.

### 3.2.1 Iteration 1



|   |                                               |
|---|-----------------------------------------------|
| 1 | Drehachse Nr. 1 für C-Planes                  |
| 2 | Drehachse Nr. 2 für Messwerterfassung der LVK |
| 3 | Sensor                                        |

Tabelle 1: Legende Iteration 1

Abbildung 8: Anordnung von Sensor und Leuchte mit Drehachsen für Iteration 1

| Vorteile                                           | Nachteile                                                                                                                                                 |
|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Leuchte lässt sich in der 0° C-Plane gut vermessen | Leuchte lässt sich bei 45°- und 90°-C-Plane nicht vermessen<br><br>Messung von Hängeleuchten unmöglich<br><br>Schwierige Montage der Leuchte im Messgerät |

Tabelle 2: Vor- und Nachteile Iteration 1

Die Leuchte lässt sich in zwei der drei geforderten C-Planes nicht vermessen, da der Sensor fest in Richtung der Z-Achse befestigt ist. Auch bei Drehung der Leuchte (Drehachse 1) um 45° oder 90° würden die gleichen Messwerte wie bei der 0° C-Plane aufgenommen werden.

Während der Messung wird die Leuchte um die Drehachse 2 gedreht und ist dabei nicht immer in ihrer gedachten Montageposition. Dies macht zum Beispiel die Vermessung von hängenden Leuchten unmöglich.

Die vielen Freiheitsgrade der Leuchtenbewegung erschweren die Montage der Leuchte im Messgerät.

### 3.2.2 Iteration 2

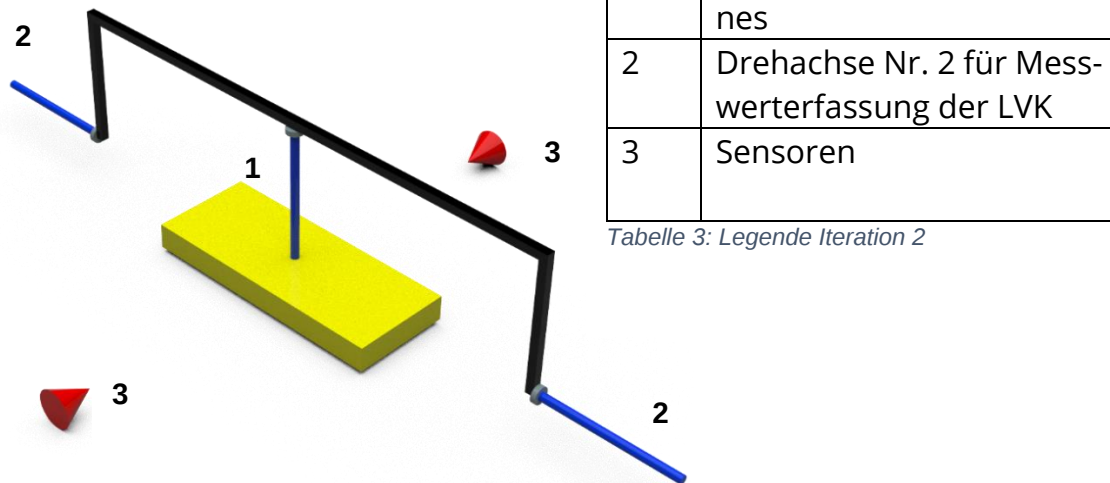


Tabelle 3: Legende Iteration 2

Abbildung 9: Anordnung von Sensor und Leuchte mit Drehachsen für Iteration 2

Dieser Aufbau sieht zwei Sensoren vor. Theoretisch ist auch eine Anordnung mit nur einem Sensor möglich, dann wäre eine Drehung um Achse 2 um 360° erforderlich.

| Vorteile                                                                                                                                         | Nachteile                                                                                                                                                                                   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Messung in allen C-Planes möglich</p> <p>Bei der Verwendung von zwei Sensoren muss die Leuchte bei der Messung nur um 180° gedreht werden</p> | <p>Beide Sensoren müssen gut aufeinander abgestimmt sein</p> <p>Verschattung eines Sensors bei 90° Drehung um Drehachse 2</p> <p>Große Hebelkräfte auf das mittlere Lager (Drehachse 1)</p> |

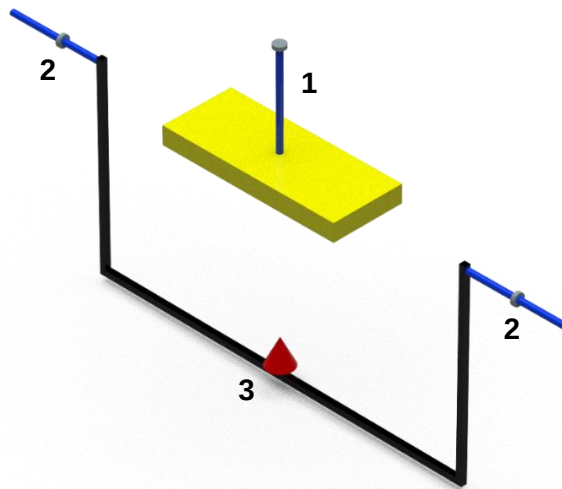
Tabelle 4: Vor- und Nachteile Iteration 2

Durch die Verwendung von zwei Sensoren müssten beide zuverlässig gleiche Ergebnisse bei gleicher Beleuchtungsstärke liefern, da deren Messwerte nach Abschluss einer Messung zu einer Lichtverteilungskurve zusammengefügt werden.

Bei direkter Beleuchtung eines Sensors (Drehachse 2 in 90° Stellung) wird durch die Rahmenkonstruktion der andere Sensor verschattet. Dies beeinträchtigt die Messung 360° um die Leuchte herum.

Die Konstruktion ist mechanisch aufwendig, weil bei direkter Beleuchtung eines Sensors große Hebelkräfte auf das mittlere Lager (Drehachse 1) wirken. Dabei muss eine hohe Torsionssteifigkeit der gesamten Konstruktion gegeben sein, was den schwarz dargestellten Rahmen sehr schwer und teuer macht.

### 3.2.3 Iteration 3



|   |                                               |
|---|-----------------------------------------------|
| 1 | Drehachse Nr. 1 für C-Planes                  |
| 2 | Drehachse Nr. 2 für Messwerterfassung der LVK |
| 3 | Sensor                                        |

Tabelle 5: Legende Iteration 3

Abbildung 10: Anordnung von Sensor und Leuchte mit Drehachsen für Iteration 3

Durch die Befestigung der Leuchte an der „Decke“ des Messgeräts ist der Sensor nicht mehr in einer festgelegten Position, sondern wird während der Messung bewegt.

| Vorteile                                                                                                                                             | Nachteile                                                                                                                                            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Nur noch ein Sensor notwendig</p> <p>Weniger stabiler Rahmen ausreichend</p> <p>Kleinerer Antrieb für Drehachse 2 ausreichend, vgl. Konzept 2</p> | <p>Nur einseitiger Antrieb der Drehachse 2 führt zu Verwindung des Rahmens</p> <p>Große Drehmomente des Antriebs für Drehachse 2 in 90° Stellung</p> |

Tabelle 6: Vor- und Nachteile Iteration 3

Bei nur einem Antrieb auf einer Seite des schwarzen Schwenkarms kann es aufgrund der Größe und mangelnder Steifigkeit der Konstruktion dazu führen, den Sensor nicht genau genug platzieren zu können, weil er nach dem Abbremsvorgang immer noch schwankt, bzw. bei Winkeln um 90° der Rahmen in sich tordiert wird. Der Einsatz von Antrieben auf beiden Seiten der Drehachse 2 löst dieses Problem.

Die Antriebe für die Achse 2 müssen vergleichsweise große Drehmomente aufbringen, um den Sensor zuverlässig platzieren zu können.

Dieses Konzept sieht im Gegensatz zur Iteration 2 nur noch einen Sensor vor, was Geld und Gewicht spart. Deshalb muss auch der Rahmen, der den Sensor führt, nicht mehr so stabil sein wie im vorangehenden Konzept.

### 3.2.4 Iteration 4

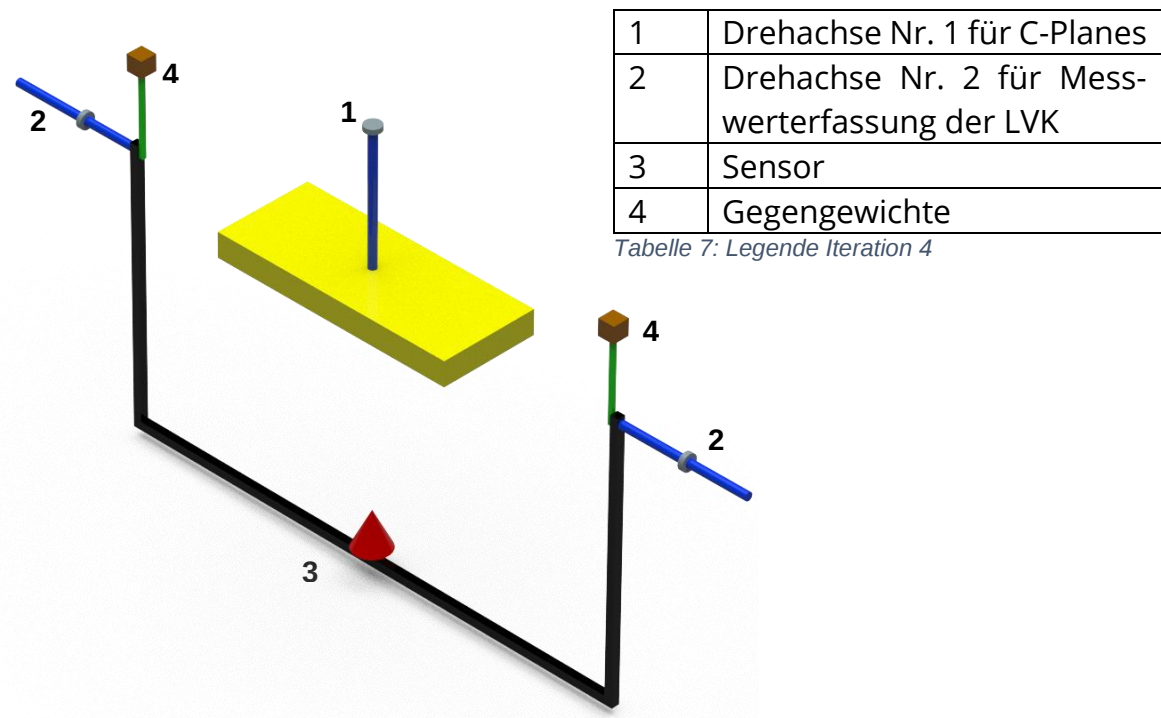


Abbildung 11: Anordnung von Sensor und Leuchte mit Drehachsen Iteration 4

Umsetzung der Verbesserungsmöglichkeiten aus Konzept 3: Mit Gegengewichten lassen sich die Drehmomente für den Antrieb der Achse 2 minimieren. Außerdem werden auf beiden Seiten der Achse Antriebe eingesetzt, um ein Verwinden der Konstruktion in sich während der Messung zu vermeiden. Diese Konstruktion erlaubt die Messung in allen möglichen C-Planes und die Bewegung des Sensors bis auf die Halterung der Leuchte ganz herum.

## 3.3 Entwicklung

### 3.3.1 Methoden zur Kompensation der Größe des Messgeräts

Bevor Konzept aus Iteration 4 in der Praxis umgesetzt werden kann, sind einige Vorüberlegungen nötig.

Kommerzielle Fotogoniometer sind i.d.R. sehr große Geräte. Sie betrachten die Leuchte trotz ihrer physikalischen Ausdehnung als punktförmig (sog. Fernfeldbetrachtung), weshalb es notwendig ist, einen großen Abstand von Leuchte zu Sensor zu wahren (10- bis 12-fache Leuchtengröße). Die Fernfeldbetrachtung liefert dann gute Ergebnisse, wenn die Ausdehnung der Leuchte und damit der variable Abstand von Leuchte zu Sensor keinen, bis wenig Einfluss auf die tatsächlich am Ort des Sensors gemessene Beleuchtungsstärke hat. Die relative Abstandsänderung von Leuchte zu Sensor wird also durch die Größe des Messgeräts so weit verringert, dass sie keinen Einfluss mehr auf die aufgenommene LVK hat [11].

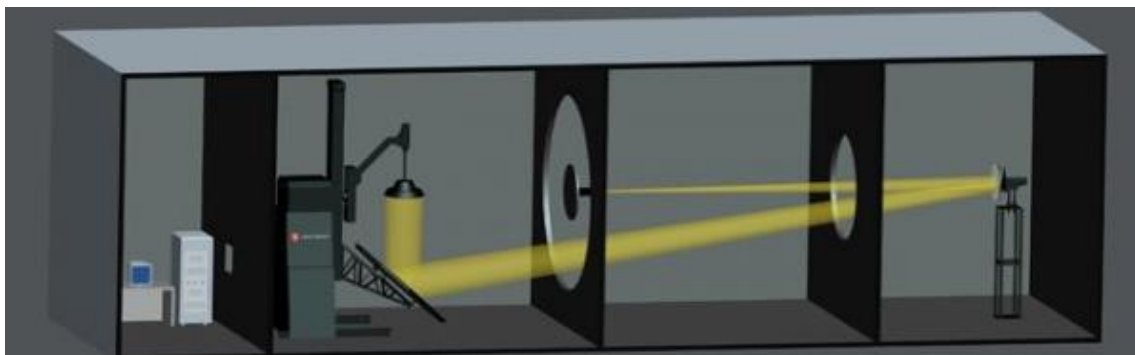


Abbildung 12: Fotogoniometer "LSG-1900" der Firma ASMETEC [14]

In einem miniaturisierten Fotogoniometer (vgl. Anforderung *Maße des Fotogoniometers*) ist die Fernfeldbetrachtung nicht möglich.

Daher besteht die besondere Herausforderung des hier zu entwickelnden Geräts in der vergleichsweise großen Relativänderung durch den geringen Abstand zwischen Leuchte und Sensor. Ansätze zur Lösung dieses Problems liegen in der Art und Weise, wie die Leuchte befestigt wird und wie breit das Sichtfeld des Sensors ist.

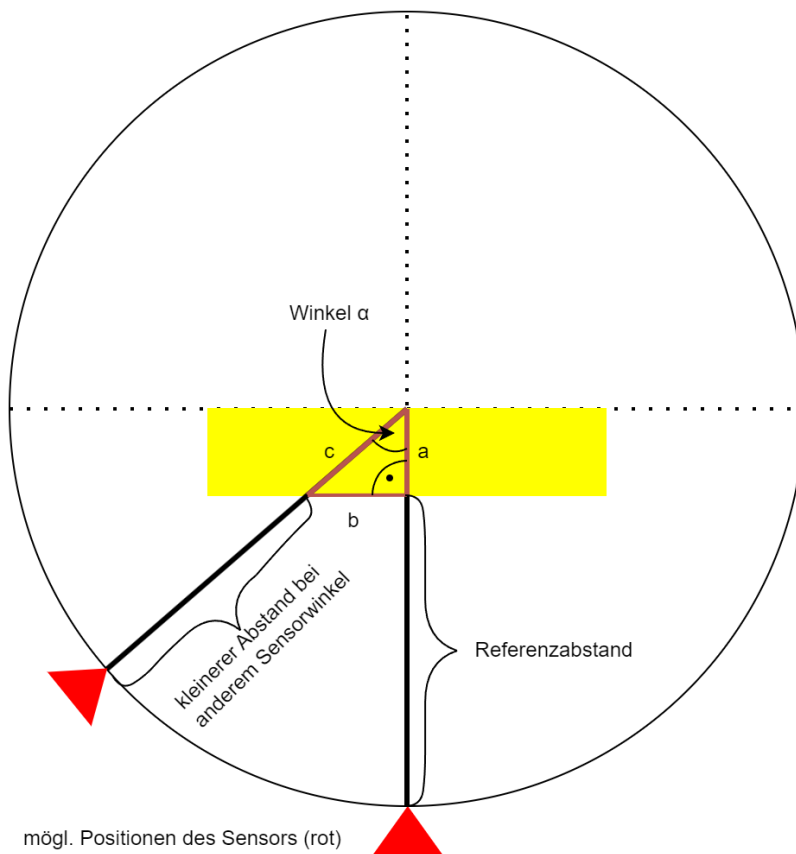


Abbildung 13: Abstandsänderung von Leuchte zu Sensor bei Bewegung des Sensors

### 3.3.2 Starre Befestigung der Montagefläche der Leuchte im Mittelpunkt des Fotogoniometers

Es wird eine Leuchte betrachtet, deren Lichtaustrittsfläche ausschließlich unten ist und die auf ihrer Oberseite eine Montagemöglichkeit bietet. Die Ebene, auf der sich die Montageebene der Leuchte befindet, ist auf Höhe des Drehmittelpunkts des Sensors. In der Software müssen vor Beginn der Messung die Maße der Leuchte in der x- und y-Richtung und der Abstand der Lichtaustrittsfläche von der Montageebene bekannt gemacht werden. Die dann bekannte Abweichung in Z-Richtung kann verwendet werden, um mathematisch den während der Messung variierenden direkten Abstand von Leuchte zu Sensor zu kompensieren. Dazu werden zunächst zwei Ansätze betrachtet.

#### 3.3.2.1 Messfehlerkurve ermitteln und ausgleichen

Während der Drehbewegung des Sensors um die (niedrig hängende) Leuchte wird der Einfluss der Montageart auf den tatsächlichen Messwert erfasst.

Durch die Vermessung mehrerer Leuchten lässt sich die Korrelation zwischen Winkel des Sensors und Messabweichung der Beleuchtungsstärke beschreiben. Die Messfehlerkurve muss die Leuchtenmaße als Parameter erhalten, um dynamisch auf verschiedene Leuchten zu reagieren.

In der Praxis ist jedoch die genaue Ermittlung der Messfehlerkurve äußerst schwierig und könnte nur mit sehr vielen Vergleichsmessungen validiert werden, weil je nach Leuchtenform unterschiedliche Abweichungsverläufe zu erwarten sind.

### 3.3.2.2 Mathematisch-geometrische Kompensation des variierenden Sensorabstands

Bei dieser Art der Kompensation wird die Bahn des Sensors als ein Kreis im Koordinatensystem und die Lichtaustrittsfläche der Leuchte als eine Gerade dargestellt. Durch Erstellen zweier (Konstruktions-) Geraden, die durch den Ursprung des Koordinatensystems und den entsprechenden Sensorwinkel auf der Kreisbahn verlaufen, ergeben sich zwei Schnittpunkte: Einmal mit der Geraden, die die Lichtaustrittsfläche repräsentiert und einmal mit dem Kreis, der die Sensorlaufbahn darstellt. Durch Ermittlung der genauen Lage beider Punkte in der Ebene kann die Änderung des Abstands zwischen Sensor und Leuchte berechnet und so kompensiert werden:

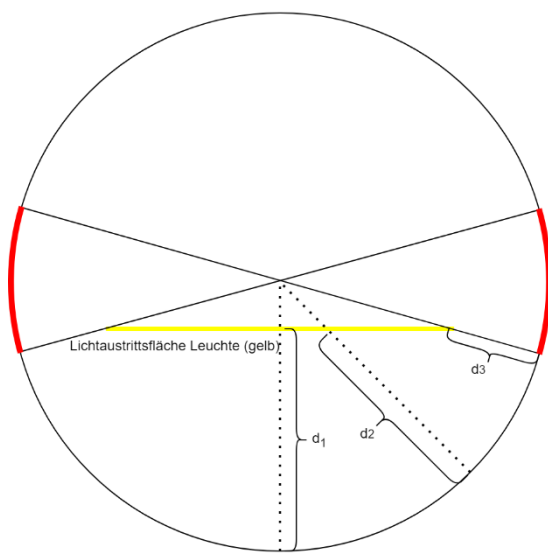


Abbildung 14: Berechnung des Abstandes  $d_n$  durch mathematische Modellierung der Lichtaustrittsfläche und der Sensorkreisbahn

Durch den montagebedingten Offset der Lichtaustrittsfläche in Z-Richtung entstehen hier zwei nicht definierte Bereiche (Abb. 14, rot markiert). Auch

wenn diese Methode leichter umzusetzen ist als Variante 1, löst sie das Problem nicht vollständig und wird daher in der Entscheidungsfindung nicht weiter berücksichtigt.

Bei genauer Betrachtung der Abbildung 14 fällt auf, dass sich die nicht definierten Bereiche vermeiden lassen, wenn die Leuchte so montiert werden könnte, dass deren Lichtaustrittsfläche immer auf Höhe der Drehachse des Sensors liegt.

Zur Lösung des Abstandsproblems kommen zwei Lösungsmöglichkeiten in Betracht:

| <b>Messfehlerkurve aufstellen und kompensieren</b>                                                                                                                                                                                                                                        | <b>Montage der Leuchte so, dass die Lichtaustrittsfläche auf der Höhe der Drehachse des Sensors liegt</b>                                                                                                           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Vorteil:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Einfache Montage der Leuchte immer am gleichen Punkt im Raum</li> </ul>                                                                                                                                                          | <p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Einfacheres und exakteres mathematisches Modell zur Kompensation</li> <li>• Weniger fehleranfällig</li> <li>• Schneller in der Implementierung</li> </ul> |
| <p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufwendige Erstellung und „live-Modellierung“ der Messfehlerkurve mit aktuellen Leuchtendaten (abschnittsweise Definition der Fehlerkurve) um Daten zu validieren</li> <li>• Fehleranfällig bei der Implementierung</li> </ul> | <p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Leuchtenmontage muss in Z-Richtung flexibel sein</li> <li>• Zusätzliche Sicherung der Leuchte gegen Absturz erforderlich</li> </ul>                      |

*Tabelle 8: Gegenüberstellung Lösungsmöglichkeiten zur Abstandsänderungskompensation*

Aufgrund der weniger fehleranfälligen Lösung und voraussichtlich schnelleren Implementierung wird sich für die Variante mit flexibler Montagehöhe der Leuchte entschieden.

Durch die festgelegte Messgerätegeometrie kommen zwei Varianten im Umgang mit den erhobenen Messwerten auf:

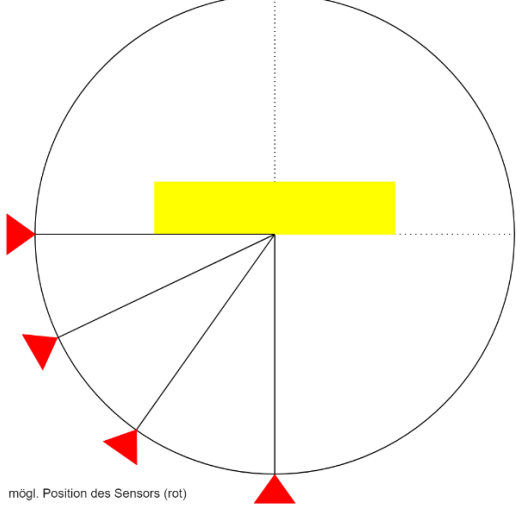
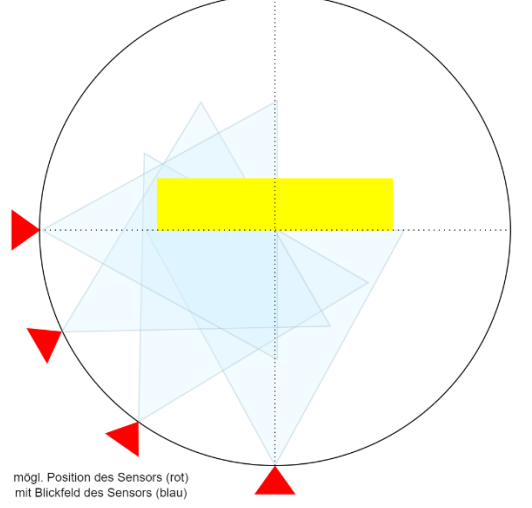
| Variante 1: enges Sichtfeld des Sensors                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Variante 2: weites Sichtfeld des Sensors                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>mögl. Position des Sensors (rot)</p> <p><i>Abbildung 15: Sensor in verschiedenen Positionen mit schmalem Sichtfenster</i></p> <p>Durch Einschränkung des Sensorsichtfelds auf einen sehr schmalen Bereich bliebe der Abstand von Sensor zu Leuchte bei verschiedenen Sensorwinkeln gleich.</p> |  <p>mögl. Position des Sensors (rot)<br/>mit Blickfeld des Sensors (blau)</p> <p><i>Abbildung 16: Sensor in verschiedenen Positionen mit weitem (unverändertem) Sichtfenster</i></p> <p>Bei unveränderter Verwendung des Sensors (mit Original-Sichtfeld) verändert sich der kürzest mögliche Abstand von Sensor zu Leuchte für Sensorwinkel nahe des untersten Punktes. Für Winkel nahe <math>\pm 90^\circ</math> ist der kürzeste Abstand immer zur unteren äußeren Ecke der Leuchte.</p> |

Tabelle 9: Vergleich Sensorblickfeld

Um eine qualifizierte Entscheidung treffen zu können welche Variante besser geeignet ist, müssen die Eigenschaften von Fototransistoren mit in Betracht gezogen werden.

Aufgrund der Gehäuseform des Fototransistors und der Art und Weise, wie die lichtempfindliche Oberfläche im Bauteil platziert ist, reagiert der Transistor mit einem unterschiedlichem Fotostrom auf die gleiche Beleuchtungsstärke aus verschiedenen Richtungen.

Abbildung 17 zeigt beispielhaft am Fototransistor *temt6200* der Firma *Vishay Dale Electronics* [15], um welchen Faktor der Fotostrom nachlässt, wenn der Fototransistor seitlich beleuchtet wird.

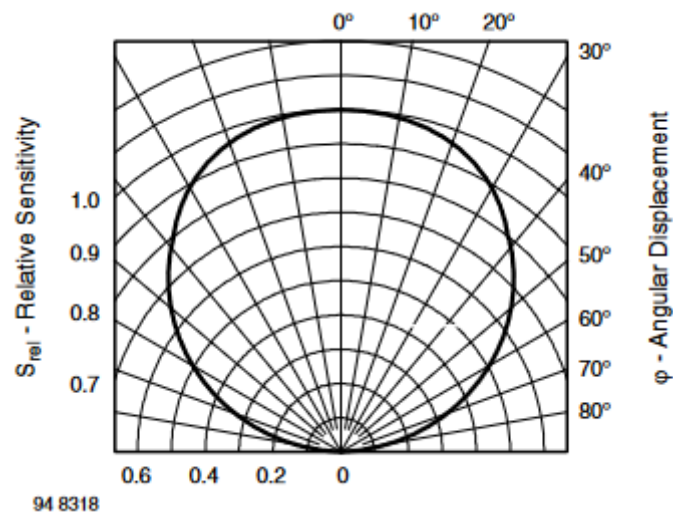


Abbildung 17: Der Fotostrom lässt nach, wenn der Fototransistor von der Seite beleuchtet wird

Die räumliche Ausdehnung der Leuchte sorgt dafür, dass bei uneingeschränktem Sichtfeld des Sensors (Fototransistor) auch Licht schräg von oben auf den Fototransistor fällt. Wird der Sensor aus dem unteren Totpunkt nach links oder rechts bewegt, führt dies zwangsläufig dazu, dass mehr Licht schräg auf den Sensor fällt (vgl. Abbildung 14). Außerdem verkürzt sich der minimale Abstand von Sensor zu Leuchte mit zunehmendem Sensorwinkel. Der vom Fototransistor getriebene Fotostrom ist dann nicht mehr aussagekräftig, um die Beleuchtungsstärke am Ort des Sensors zu bestimmen. Verschiedene Leuchtengeometrien spielen bei der Verfälschung des Fotostroms zusätzlich eine wichtige Rolle.

Bei der Betrachtung dieser Eigenschaft von Fototransistoren fällt auf, dass bei Verwendung eines unveränderten Fototransistors (uneingeschränktes Sichtfeld) zu viele Unbekannte vorhanden sind, um Messungen durchzuführen, die nicht signifikant fehlerbehaftet sind.

Daher wird für die Konstruktion des Fotogoniometers und das Design der Platine, die den Fototransistor enthalten soll, Variante 1 gewählt (enges Sichtfeld des Sensors).

## 4 Konstruktion des Fotogoniometers

Zur Planung der Konstruktion wird das Gerät in Baugruppen eingeteilt, die dann in der Konzeption/ Konstruktionsphase separat betrachtet werden:

| Baugruppe            | Aufgaben                                                                                                                                                            | Besonderheiten                                                                                                                                                                                                                                 |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Rahmen               | Legt die Größe des Messgeräts fest und bildet einen stabilen Rahmen, an den andere Baugruppen montiert werden können. Sorgt auch für eine Abdunklung der Messkammer | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Stabilität</li> <li>• Bei unebenem Boden: nivellierbar</li> <li>• Arbeitslicht im Innern</li> </ul>                                                                                                   |
| Leuchtenbefestigung  | Stellt die Möglichkeit zur Verfügung, die zu vermessende Leuchte zu montieren                                                                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Montagemöglichkeit für sämtliche Leuchten muss gewährleistet sein</li> <li>• Stufenlose Verstellung in Z-Richtung</li> <li>• Absturzsicherung der Verstellmöglichkeit gegen Herunterfallen</li> </ul> |
| Sensorbefestigung    | Schwenkarm für Sensorbewegung und angetriebene Welle für Bewegung der Leuchte (C-Planes)                                                                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bewegung des Sensors und der Leuchte mit ausreichender Genauigkeit (vgl. Abschnitt 3.1 „Anforderungen“)</li> </ul>                                                                                    |
| Sensorbaugruppe      | Messung der Beleuchtungsstärke an einem Punkt                                                                                                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>V(\lambda)</math>-Anpassung des Sensors</li> <li>• Klein und leicht, um Mechanik zu entlasten</li> <li>• Schmales Sichtfeld des Sensors</li> </ul>                                              |
| Steuerung – Hardware | Verwaltung aller zur Messung notwendigen Signale                                                                                                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Zentrales Element zur Bedienung des Fotogoniometers</li> </ul>                                                                                                                                        |
| Steuerung - Software | Sensor-Aktor Interaktion<br>Benutzerführung mit GUI<br>Verarbeitung der Ergebnisse                                                                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Übersichtlich</li> <li>• Gut wartbar</li> <li>• Ablaufsteuerung der gesamten Messung</li> </ul>                                                                                                       |

Tabelle 10: Überblick Baugruppen

## 4.1 Rahmen

Für die Fertigung des Rahmens gibt es mehrere infrage kommende Materialien, die im Folgenden durch den Vergleich ihrer Vor- und Nachteile auf ihre Machbarkeit untersucht werden:

| <b>Fertigungsverfahren</b>         | <b>Vorteile</b>                                                                                                                                                                                         | <b>Nachteile</b>                                                                                                                                                                                                 |
|------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Stahl<br>(schweißen)               | <ul style="list-style-type: none"><li>• Günstig</li><li>• Sehr stabil</li></ul>                                                                                                                         | <ul style="list-style-type: none"><li>• Sehr schwer</li><li>• Ggf. nicht präzise durch Schweißverzug</li><li>• Nur begrenzt flexibel für die Montage anderer Baugruppen oder nachträglicher Änderungen</li></ul> |
| Holzplatten<br>(Schraubverbindung) | <ul style="list-style-type: none"><li>• Günstig</li><li>• Schnell zu fertigen</li></ul>                                                                                                                 | <ul style="list-style-type: none"><li>• Vergleichsweise instabil (Verzug bei schweren Leuchten)</li><li>• Schrauben im Holz können ausreißen</li></ul>                                                           |
| Alu-Profile<br>(Schraubverbindung) | <ul style="list-style-type: none"><li>• Kompromiss aus Präzision und Fertigungsgeschwindigkeit</li><li>• Einfache Montage anderer Baugruppen</li><li>• Flexibel bei nachträglichen Änderungen</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• Teuerste Lösung</li><li>• Lieferzeiten und Verfügbarkeiten müssen vorhanden sein</li></ul>                                                                               |

Tabelle 11: Gegenüberstellung Fertigungsverfahren für den Rahmen

Wegen der Flexibilität und der Präzision eines Rahmens aus Alu-Profilen wird diese Variante umgesetzt. Die Konstruktion des Rahmens findet im browserbasierten CAD-Tool der Firma *ITEM* statt [16].

Der Rahmen bildet die Basis des Fotogoniometers. Oben mittig soll der Mechanismus für die Halterung und die Drehung der Leuchte platziert werden. Dazu dient ein 40 mm x 80 mm Profil. Dieses Profil wird hochkant montiert, um dessen Flächenträgheitsmoment zu erhöhen und so die Biegung an dem Ort zu minimieren, an dem die zu vermessende Leuchte befestigt wird. Auf den beiden mittleren Querstreben, die an der Breitseite des Rahmens verlaufen, wird der Drehmechanismus für den Sensor befestigt.

Zur zusätzlichen Sicherung gegen Schwingung und Durchbiegung wird der gesamte Rahmen am Aufstellungsort mit der Wand und der Decke verschraubt. Mittig auf den Breitseiten dient später jeweils eine 12 mm OSB-Platte zur zusätzlichen Abstützung in Z-Richtung und bietet so auch Montagemöglichkeiten für elektronische Betriebsmittel.

Wenn der Rahmen fertig konstruiert ist, können die CAD-Dateien im .step-Format für die weitere Konstruktion anderer Baugruppen in einem anderen CAD-Programm heruntergeladen werden.

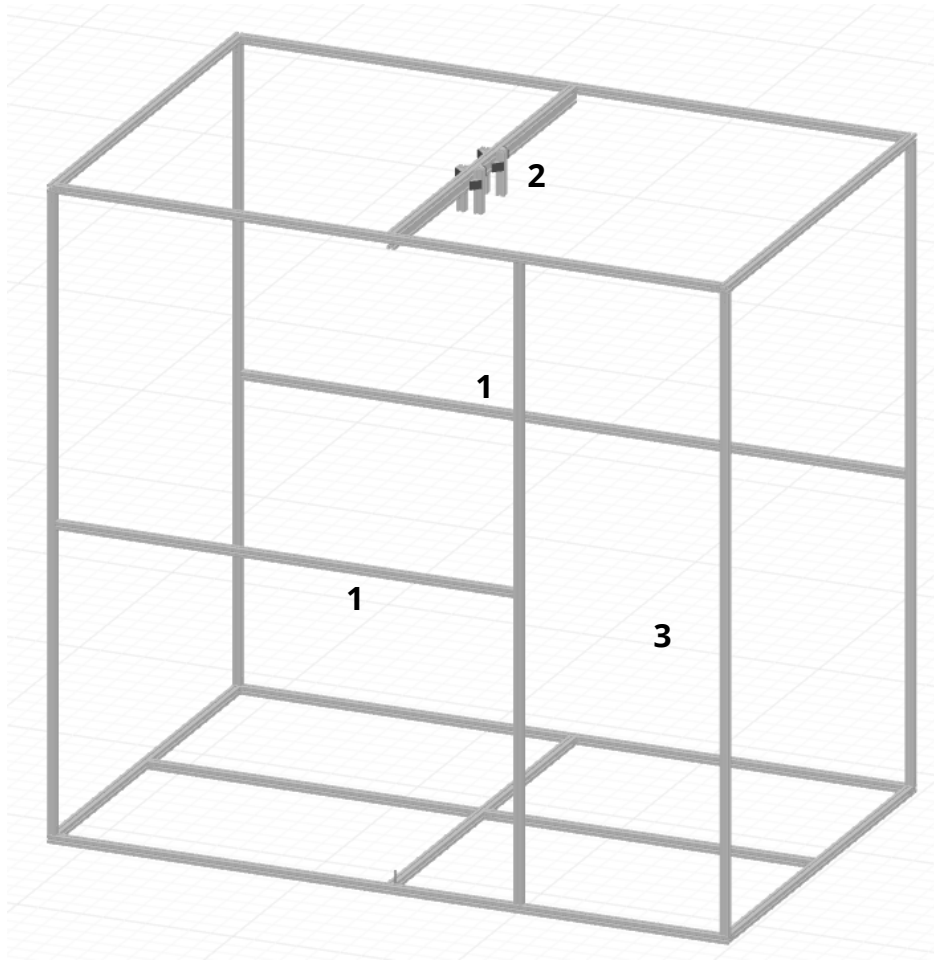


Abbildung 18: Rahmenkonstruktion im ITEM Engineering Tool

|   |                                      |
|---|--------------------------------------|
| 1 | Halterung für Sensorkonstruktion     |
| 2 | Aufnahmepunkte für Leuchtenhalterung |
| 3 | Eingang                              |

Tabelle 12: Legende zu Abb. 18: Rahmenkonstruktion

Der Rahmen wird in das CAD-Programm *Siemens NX1899* importiert, sodass auf dessen Grundlage die Halterung des Sensors und die der Leuchte konstruiert werden können.

## 4.2 Leuchtenhalterung

Die Leuchtenhalterung muss höhenverstellbar, drehbar und in der Lage sein, verschiedene Arten von Leuchten zu befestigen und das Maximalgewicht der Leuchte zuverlässig zu tragen (vgl. Abschnitt 3.1 „Anforderungen“). Außerdem muss sie eine Absturzsicherheit bieten, damit die Leuchte im Falle eines Aufmerksamkeitsdefizits des Benutzers beim Einstellen der Höhe (vgl. Abschnitt 3.3.1 „Methoden zur Kompensation der Größe des Messgeräts“) nicht zu Schaden kommen kann.

Um sicher gehen zu können, dass eine Montagemöglichkeit für sämtliche Leuchten gegeben ist, wird als Befestigungsmöglichkeit ein 40 mm x 40 mm Nut 8 Alu-Profil [17] verwendet.



Abbildung 19: Alu-Profil 40 mm x 40 mm, Nut 8, [17]

Die gängigsten Leuchten, die vermessen werden sollen, sind Decken-, Hänge- und Straßenleuchten. Mit dem Alu-Profil können alle Anwendungsfälle abgedeckt werden:

Leuchten, die direkt an die Decke geschraubt werden, können mithilfe von Nutensteinen unmittelbar am Profil befestigt werden.

Für die Vermessung von Hängeleuchten kann die Leuchtenhalterung nach oben gestellt werden. Danach muss das Drahtseil, an dem die Leuchte hängt, so gekürzt werden, dass die Leuchte eben und deren Lichtaustrittsfläche auf Höhe des Drehpunktes der Sensorhalterung liegt.

Für spezielle Formen von Leuchten (z.B. Straßenbeleuchtung) kann eine passende Haltevorrichtung angefertigt werden, die die Aufnahme der

Leuchte so adaptiert, dass sie in Montageposition mittels Nutensteinen an das Alu-Profil geschraubt werden kann.

Die Höhenverstellbarkeit der Konstruktion lässt sich mit für Alu-Profile passenden Gleitschlitten-Führungen realisieren. Dafür werden zwei Führungen verwendet, jeweils eine ist bei einem Anzugsmoment von 15 Nm in der Lage, eine Kraft in Verstellrichtung von 600N [18] aufzunehmen:

$$f_{ges} = 2 \cdot 600 \text{ N} = 1200 \text{ N}$$

$$\frac{F}{a} = m \rightarrow \frac{1200 \text{ N}}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 122,32 \text{ kg} > 15 \text{ kg}$$

Die Klemmkraft der Gleitschlitten Führungen ist also groß genug, um die Leuchte sicher tragen zu können.

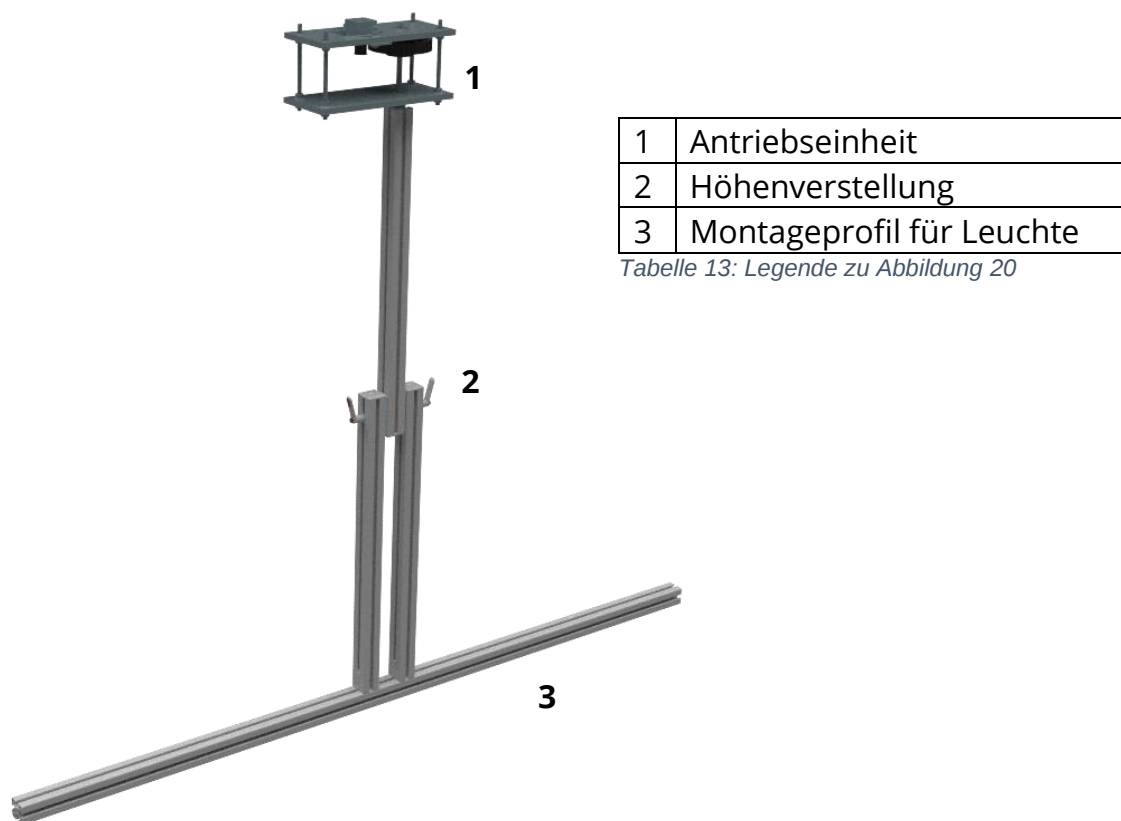


Tabelle 13: Legende zu Abbildung 20

Abbildung 20: Gesamte Leuchtenhalterung in CAD

Die Absturzsicherung der Leuchte wird durch Anbringung einer Abschlussplatte aus AlMg3 gewährleistet, die verhindert, dass die Nutensteine der Gleitschlitten-Führungen nach unten herausrutschen können:

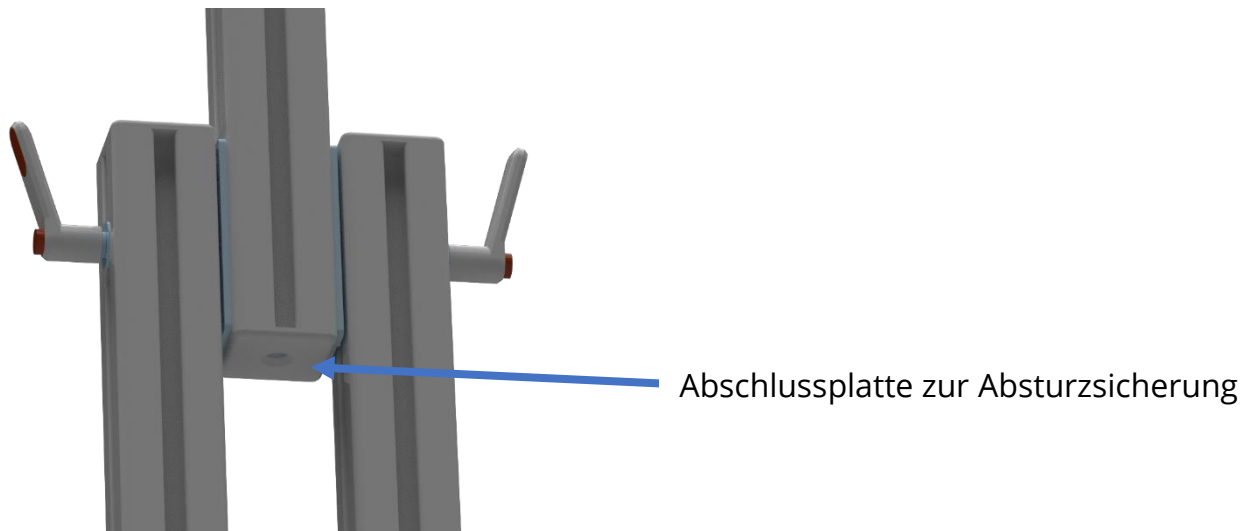


Abbildung 21: Absturzsicherung für Höhenverstellung

## 4.3 Sensorhalterung

Der Sensor soll sich auf einer Kreisbahn mit möglichst großem Radius (ca. 1,5 m) um die Leuchte bewegen. Dabei wird dieser mittig unter der Leuchte hindurchgeführt, sodass auch die Vermessung sehr schmaler Leuchten in der 90° C-Plane problemlos erfolgen kann. Um die genauen Maße der Sensorhalterung passend festzulegen, wird der Rahmen in Siemens NX 1899 importiert, sodass dessen Geometrie für die weitere Konstruktion nutzbar ist.

Grundsätzlich beschreibt die Form der Sensorhalterung ein eckiges „U“, in dessen Mitte der Sensor platziert werden soll.

Bei der Konstruktion der Sensorhalterung muss die Toleranz der Positionierungsgenauigkeit beachtet werden. Die gesamte Halterung soll einerseits leicht sein, sodass kleine und kostengünstige Motoren verwendet werden können. Andererseits muss sie stabil genug sein, damit sie sich nicht unter ihrem Eigengewicht so stark verbiegt, dass die Positionierungstoleranzen nicht eingehalten werden können.

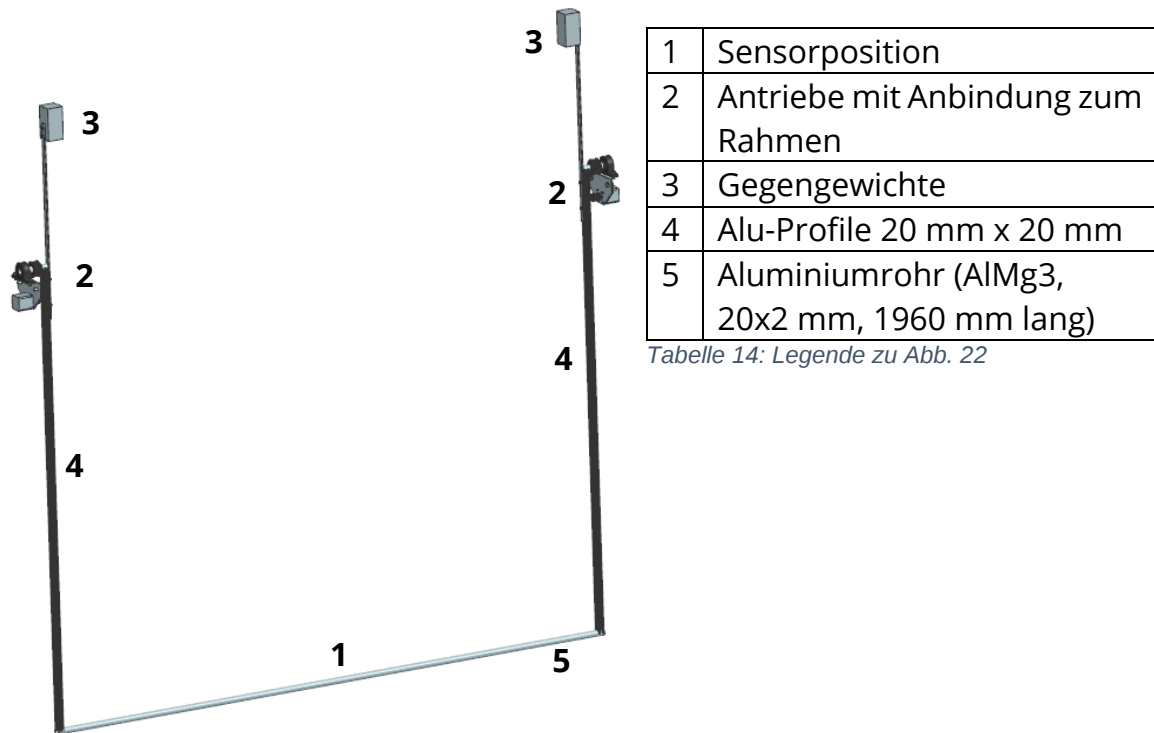


Tabelle 14: Legende zu Abb. 22

Abbildung 22: Zusammenbau der Sensorhalterung mit Gegengewichten und Antrieb

Bei der Berechnung der Durchbiegung fällt das fragilste Bauteil am stärksten ins Gewicht. In dieser Konstruktion ist dies ein Aluminiumrohr (Position 5 in Abb. 22), das die beiden äußeren vertikalen Alu-Profile miteinander verbindet und auf dem auch der Sensor sitzt. Das Rohr verbiegt sich einmal aufgrund seines Eigengewichts (Flächenlast) und einmal aufgrund des Gewichts der Platine mit Sensor, das hier exemplarisch mit 200 g angenommen wird.

Für die Berechnung der Lastfälle wird eine Los-Los-Lagerung angenommen. Die Berechnung der Durchbiegung gleicht der einer Fest-Los-Lagerung, weil die Last in beiden Fällen gleichmäßig und symmetrisch wirkt und weil die Durchbiegung in beiden Fällen parabolisch erfolgt.

Da anzunehmen ist, dass sich die Verformung des Rohrs noch im elastischen Bereich befindet und sich die Geometrie des Rohrs nicht durch die Durchbiegung ändert, können die beiden Lastfälle separat voneinander betrachtet werden:

### 4.3.1 Verformung durch Eigengewicht (Flächenlast)

Für die Masse des Rohrs gilt:

$$m[g] = V_{Rohr} \cdot \rho_{AlMg3} = \left\{ \left\{ \left( \frac{2,0 \text{ cm}}{2} \right)^2 \cdot \pi \right\} - \left\{ \left( \frac{1,6 \text{ cm}}{2} \right)^2 \cdot \pi \right\} \right\} \cdot 196 \text{ cm} \cdot \frac{2,7 \text{ g}}{\text{cm}^3}$$

$$m[g] = \left\{ \left\{ \left( \frac{2,0 \text{ cm}}{2} \right)^2 \cdot \pi \right\} - \left\{ \left( \frac{1,6 \text{ cm}}{2} \right)^2 \cdot \pi \right\} \right\} \cdot 196 \text{ cm} \cdot \frac{2,7 \text{ g}}{\text{cm}^3}$$

$$m[g] = 598,51 \text{ g} \rightarrow m_{Rohr} = 0,59851 \text{ kg}$$

[19]

Damit folgt für die Streckenlast  $q$  in  $\frac{N}{mm}$ :

$$q = \frac{F}{l} = \frac{0,59851 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}}{1960 \text{ mm}} = \frac{5,871 \text{ N}}{1960 \text{ mm}} = 2,995 \cdot 10^{-3} \frac{N}{mm}$$

[20]

Für das Elastizitätsmodul  $E$  in  $GPa$  (Giga Pascal) gilt:

$$E_{Aluminium} = 70 \text{ GPa} = 70 \cdot 10^9 \frac{N}{m^2} = 70 \cdot 10^3 \frac{N}{mm^2}$$

[21]

Für das Flächenträgheitsmoment des Rohrs (Hohlwelle) gilt:

$$I_y = \frac{\pi}{64} \cdot (D^4 - d^4) = \frac{\pi}{64} \cdot ((20 \text{ mm})^4 - (16 \text{ mm})^4) = 1476\pi \text{ mm}^4$$

[22]

Mit diesen Werten lässt sich die Gesamtdurchbiegung  $f_m$  in  $mm$  in der Mitte ausrechnen:

$$f_{m1} = \frac{5 \cdot q \cdot l^4}{384 \cdot E \cdot I_y} = \frac{5 \cdot 2,995 \cdot 10^{-3} \frac{N}{mm} \cdot 1960 mm^4}{384 \cdot 70 \cdot 10^3 \frac{N}{mm^2} \cdot 1476\pi mm^4} = 1,77 mm$$

#### 4.3.2 Verformung durch Gewicht des Sensors (Punktlast)

Das Gewicht des Sensors wird als Punktlast angenommen.

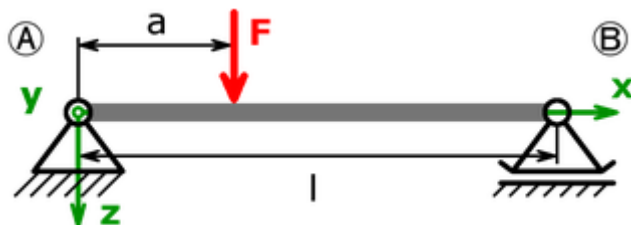


Abbildung 23: Abstand der Punktlast  $F$  vom Festlager (A) im Verhältnis zur Gesamtlänge des Balkens ( $l$ ), [20]

Diese Punktlast greift in der Mitte des Balkens an. Daher gilt:

$$a = \frac{l}{2}$$

Die Formel zur Berechnung der maximalen Durchbiegung  $f_m$  in  $mm$  vereinfacht sich dadurch von:

$$f_m = \frac{F \cdot a \cdot \sqrt{(l^2 - a^2)^3}}{9 \cdot \sqrt{3} \cdot E \cdot I_y \cdot l}$$

auf:

$$f_m = \frac{F \cdot l^3}{E \cdot I_y \cdot 48}$$

Für die angreifende Kraft  $F$  gilt:

$$F = m \cdot g = 0,2 kg \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} = 1,962 N$$

Die Werte für die Länge  $l$  des Balkens, das Elastizitätsmodul  $E$  und das Flächenträgheitsmoment  $I_y$  können aus der Berechnung der Durchbiegung unter Eigengewicht entnommen werden.

Für die Durchbiegung unter dem Gewicht der Platine gilt somit:

$$f_{m2} = \frac{1,962 \text{ N} \cdot 1960 \text{ mm}^3}{E 70 \cdot 10^3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 1476\pi \text{ mm}^4 \cdot 48} = 0,948 \text{ mm}$$

Für die Gesamtdurchbiegung des Aluminiumrohrs nach dem Superpositionsprinzip gilt somit:

$$f_{m,gesamt} = f_{m1} + f_{m2} = 1,77 \text{ mm} + 0,948 \text{ mm} = 2,718 \text{ mm}$$

Um die ausgerechnete Gesamtdurchbiegung beurteilen zu können, muss sie mit der Positionierungstoleranz (vgl. Abschnitt 3.1 „Anforderungen“) von  $0,5^\circ$  verglichen werden.

Die beiden Alu-Profile, die das Rohr halten (Position 4 in Abb. 22), haben jeweils eine Länge von  $l = 1445 \text{ mm}$ . Mit dem bekannten Toleranzwinkel lässt sich die Länge eines Kreisstücks auf der Bahn berechnen, auf der sich der Sensor bewegt:

$$S = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \frac{\theta}{360^\circ} = 2 \cdot \pi \cdot 1445 \text{ mm} \cdot \frac{0,5^\circ}{360^\circ} = 12,610 \text{ mm}$$

$$f_{m,gesamt} \ll S$$

Die Gesamtdurchbiegung ist sehr viel kleiner als von der Toleranz erlaubt, die Konstruktion ist also in Ordnung - vorausgesetzt der Sensor ist nicht sehr viel schwerer als 200 g.

## 4.4 Bewegung

In diesem Abschnitt werden die für die Bewegung des Sensors und der Leuchte relevanten Größen berechnet. Dabei handelt es sich vor allem um die erforderlichen Drehmomente, die ausschlaggebend für die Wahl des richtigen Motors sind, sowie bei der Bewegung der Leuchte die Kugellagerauslegung, weil hier ein Kugellager verwendet werden muss, das den axialen Kräf-

ten standhalten kann, die durch das Gewicht der Leuchte samt ihrer Halterung entstehen. Bei der Bewegung des Sensors spielt zusätzlich noch die Berechnung der Gegengewichte eine wichtige Rolle.

## 4.4.1 Bewegung Leuchte

### 4.4.1.1 Motorauslegung

Der Motor, der für das Drehen der Leuchte zuständig ist, muss diese nicht besonders schnell drehen, und auch nicht besonders schnell beschleunigen können. Allerdings müssen die zu vermessenden C-Plane Winkel ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  und  $90^\circ$ ) zuverlässig eingehalten werden. Daher ist eine Referenzfahrt vor dem Start der Messung notwendig (siehe Abschnitt 4.6.3 „Verdrahtungsplan“). In einem Versuch mit einem Stab, der die Leuchtenhalterung repräsentiert, wurde festgestellt, dass es ausreichend schnell ist,  $45^\circ$ -Drehwinkel in sechs Sekunden bei konstanter Winkelgeschwindigkeit zurückzulegen. Ein weiteres Ergebnis des Versuchs ist, dass es ausreicht, wenn diese Winkelgeschwindigkeit innerhalb von zwei Sekunden erreicht wird. Mit diesen Anforderungen und den bekannten zu bewegenden Massen und physikalischen Ausdehnungen des zu bewegenden Körpers (Leuchte mit Halterung) kann das erforderliche Drehmoment des Motors bestimmt werden.

$$45^\circ \text{ in } 60 \text{ sec} \leftrightarrow 360^\circ \text{ in } 48 \text{ sec}$$

$$\omega = \frac{2\pi \text{ rad}}{T \text{ sec}} = \frac{2\pi \text{ rad}}{48 \text{ sec}}$$

Diese Winkelgeschwindigkeit soll innerhalb von zwei Sekunden erreicht werden. Damit lässt sich die erforderliche Winkelbeschleunigung ausrechnen:

$$\alpha = \frac{\Delta\omega \text{ rad}}{\Delta t \text{ sec}^2} = \frac{\frac{2\pi}{48} \text{ rad}}{2 \text{ sec}^2} = \frac{\pi}{48} \frac{\text{rad}}{\text{sec}^2}$$

Zur Berechnung des erforderlichen Drehmoments ist zusätzlich noch das Trägheitsmoment nötig. Dabei wird die gesamte Konstruktion aus Leuchte samt Halterung vereinfacht als massiver Quader mit einem Gewicht von 25 kg und der Drehachse senkrecht zur Oberfläche sowie durch den Mittelpunkt verlaufend angenommen. Das Trägheitsmoment ergibt sich so zu:

$$J = \frac{1}{12} \cdot m \cdot (b^2 + c^2) = \frac{1}{12} \cdot 25 \text{ kg} \cdot \{(1,705 \text{ m})^2 + (0,6 \text{ m})^2\} = 6,814 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

[23, S. 149]

Für die Berechnung des Drehmoments gilt folgender Zusammenhang:

$$M = J \cdot \alpha = 6,814 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \frac{\pi}{48} \frac{\text{rad}}{\text{sec}^2} = 0,445 \text{ Nm}$$

[24]

Aufgrund der geringeren Kosten fällt die Entscheidung für den Motor auf einen Schrittmotor der Firma *IGUS*, Modell *MOT-AN-S-060-002-042-L-A-AAAO*. Dieser Motor hat ein maximales Drehmoment von 0,2 Nm [25]. Um bei Adaption auf das erforderliche Drehmoment noch eine Reserve zu haben, wird eine Untersetzung mit Hilfe von Zahnriemenscheiben im Verhältnis  $ü = \frac{72}{14}$  gewählt.

#### 4.4.1.2 Kugellagerauslegung

Der Wellendurchmesser für die Leuchtenhalterung beträgt 10 mm. Dementsprechend muss der Innendurchmesser des Lagers identisch sein. Aufgrund der geringen Kosten wird das Modell *6000* der Firma *SKF* in Betracht gezogen [26].

Die Halterung der Welle, die die Drehbewegung ermöglicht, besteht aus zwei übereinander angeordneten AlMg3-Platten:

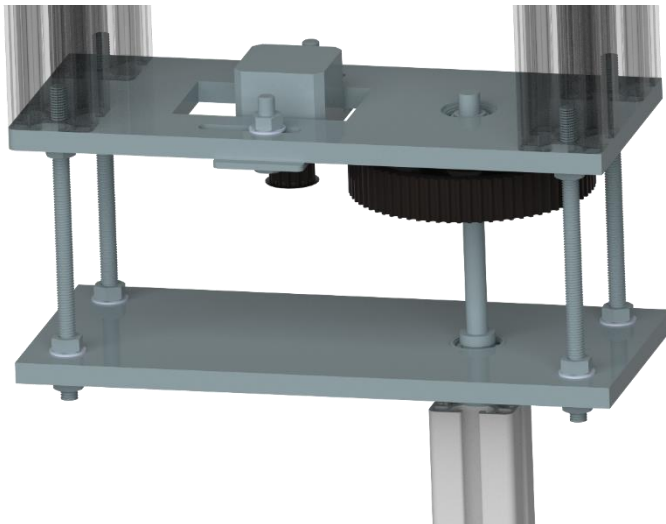


Abbildung 24: Konstruktion für Anbindung der Leuchtenhalterung am Rahmen mit Antrieb im CAD

Das Festlager zur Montage der Welle, die die Leuchte dreht, wird auch axial belastet. Daher wird die Wahl des Lagers durch eine Rechnung verifiziert. Dafür muss zunächst die radiale und axiale Kraft auf das Lager berechnet werden.

#### 4.4.1.2.1 Radiale Kraft

Für das Drehmoment des Motors gilt:

$$m_{Motor} = 0,2 \text{ Nm}$$

[25]

Das Übersetzungsverhältnis wurde mit  $\ddot{u} = \frac{72}{14}$  festgelegt.

Daraus folgt für das Drehmoment an der Welle:

$$m_{Welle} = \ddot{u} \cdot m_{Motor} = 0,2 \text{ Nm} \cdot \frac{72}{14} = 1,028 \text{ Nm}$$

Der Radius, der für den Antrieb verwendeten Zahnriemenscheibe beträgt:

$$r = 113,45 \text{ mm}$$

Mit dem bekannten Drehmoment an der Welle und dem Radius der Zahnriemenscheibe lässt sich die radiale Komponente der Lagerkraft berechnen:

$$F_r = \frac{m_{Welle}}{r} = \frac{1,028 \text{ Nm}}{113,45 \text{ mm}} = 9,061 \text{ N}$$

#### 4.4.1.2.2 Axiale Kraft

Für die Berechnung der axialen Kraft ist das maximal zulässige Gesamtgewicht der zu vermessenden Leuchte und das Eigengewicht der Leuchtenhalterung maßgeblich ausschlaggebend. Dazu soll noch eine gewisse Sicherheitsreserve beachtet werden, sodass andere Halterungen zur Aufnahme spezieller Leuchten ebenfalls kein Problem darstellen. Das Gewicht der Leuchte lässt sich aus dem Online-CAD-Tool zur Konstruktion mit Alu-Profilen der Firma *ITEM* ermitteln.

$$\begin{aligned} m_{ges,axial,ohne\ Sicherheit} &= m_{Leuchtenhalterung} + m_{Leuchte,max} = 6,617 \text{ kg} + 15 \text{ kg} \\ &= 21,617 \text{ kg} \end{aligned}$$

Unter Beachtung einer gewissen Sicherheitsreserve wird für die axiale Kraft ein Maximalgewicht von  $m_{max,axial} = 25 \text{ kg}$  angenommen.

Für die axiale Kraft gilt also:

$$F_a = 25 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 245,25 \text{ N}$$

Mit den nun bekannten radialen und axialen Kräften lässt sich eine äquivalente dynamische Lagerbelastung  $P$  berechnen, die dann mit der dynamischen Tragzahl des Lagers  $C$  verglichen werden kann:

$$P = X \cdot F_r + Y \cdot F_a$$

[27, S. 316]

Die Berechnungsfaktoren  $X$  und  $Y$  lassen sich gemäß der Tabelle in Abbildung 25 berechnen:

| Berechnungsfaktoren                                  |      |      |      |
|------------------------------------------------------|------|------|------|
| Einreihige und zweireihige Lager<br>Lagerluft Normal |      |      |      |
| $f_0 F_a / C_0$                                      | $e$  | $X$  | $Y$  |
| 0,172                                                | 0,19 | 0,56 | 2,3  |
| 0,345                                                | 0,22 | 0,56 | 1,99 |
| 0,689                                                | 0,26 | 0,56 | 1,71 |
| 1,03                                                 | 0,28 | 0,56 | 1,55 |
| 1,38                                                 | 0,3  | 0,56 | 1,45 |
| 2,07                                                 | 0,34 | 0,56 | 1,31 |
| 3,45                                                 | 0,38 | 0,56 | 1,15 |
| 5,17                                                 | 0,42 | 0,56 | 1,04 |
| 6,89                                                 | 0,44 | 0,56 | 1    |

Abbildung 25: Tabelle für Berechnungsfaktoren für Kugellagerlasten, [27, S. 315]

Das gewählte Lager hat eine statische Tragzahl von  $4,75 \text{ kN}$  (Quelle [23]). Damit gilt für  $f_0$ :

$$f_0 = \frac{F_a}{C_0} = \frac{245,25 \text{ N}}{4,75 \text{ kN}} = 7,991 \approx 8$$

Da der berechnete Wert nicht mehr auf der Tabelle ist, muss der Berechnungsfaktor  $Y$  abgeschätzt werden. Dazu werden die Werte für  $f_0$  und  $Y$  geplottet:

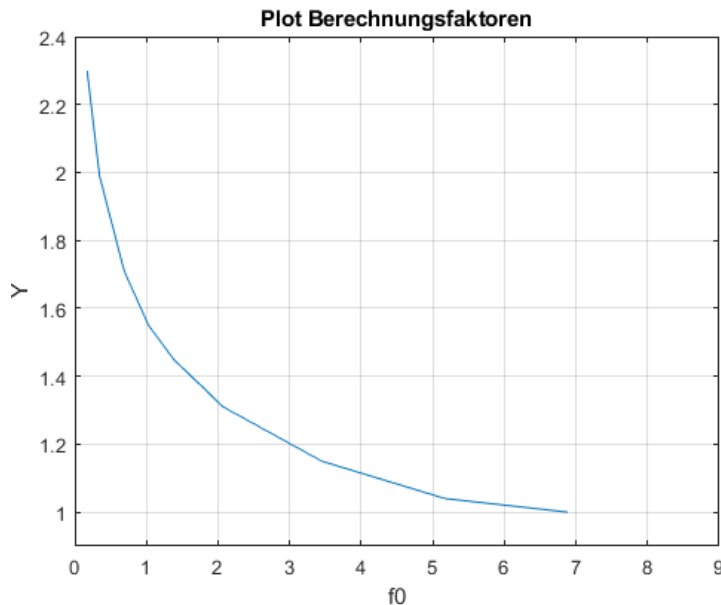


Abbildung 26: Plot der Berechnungsfaktoren für Kugellagerlasten nach Abb. 23

Der entsprechende Wert für  $Y$  wird mithilfe der Abbildung 26 bei  $f_0 = 8$  auf 0,9 geschätzt.

Jetzt kann die Lagerbelastung ausgerechnet werden, wobei beachtet werden muss, dass die Radialbelastung auf beide Lager verteilt wird:

$$P = X \cdot F_r \cdot 0,5 + Y \cdot F_a = 0,56 \cdot 9,061 \text{ N} \cdot 0,5 + 0,9 \cdot 245,25 \text{ N} = 223,26 \text{ N}$$

Die dynamische Tragzahl des Lagers sind  $c = 4,75 \text{ kN}$  [26] und damit wesentlich größer als die tatsächliche Lagerbelastung. Das Lager ist also ausreichend stabil.

Um langfristig Schäden am Lager durch Schlupf zu vermeiden, ist eine gewisse Mindestbelastung in radialer oder axialer Richtung erforderlich [28]. Für Rillenkugellager gilt:

$$P > \frac{C_0}{100}$$

$$223,26 \text{ N} > \frac{1,96 \text{ kN}}{100} = 19,6 \text{ N}$$

Diese Bedingung ist erfüllt, daher sind keine Schäden durch Schlupf zu erwarten.

Die zu erwartende Lagerreibung kann mithilfe eines Online-Tools der Firma SKF berechnet werden [29]. Dazu kann im Online-Tool das Lager anhand seiner Außenmaße ausgewählt werden. Anschließend müssen die berechneten Werte für die radiale, und axiale Last sowie die zu erwartende Drehzahl (vgl. Abschnitt 4.4.1.1 „Motorauslegung“) und Umgebungstemperatur (hier Raumtemperatur, 25 °C) eingegeben werden. Anschließend werden die Werte für die Lagerreibung berechnet. In diesem Fall sind das 7,57 Nmm pro Lager. Dieser Wert ist hinreichend gering, um die Wahl des Motors nicht nachträglich zu beeinflussen.

## 4.4.2 Bewegung Sensor

Das Antriebskonzept zur Sensorbewegung sieht eine Konstruktion mit Gegengewichten und einem Antrieb auf jeder Seite der Konstruktion vor (siehe Kapitel 3 „Konzeption des Fotogoniometers“). Zur Dimensionierung des Antriebs wird zunächst das für die Drehung des Systems ohne Gegengewicht notwendige Drehmoment berechnet. Danach wird das Gegengewicht festgelegt und die Länge seines Hebelarms bestimmt. Abschließend erfolgt die Berechnung des notwendigen Drehmoments des Antriebs mithilfe des zuerst berechneten Drehmoments und der dann bekannten Gegengewichte. Danach wird der Motor ausgewählt.

### 4.4.2.1 Drehmoment ohne Gegengewichte

Das erforderliche Drehmoment zum Bewegen der Sensorhalterung samt Sensor ist dann am größten, wenn die Konstruktion horizontal (90° gegenüber der Ausgangsposition) gedreht ist.

Für dessen Berechnung wird das Gewicht des Sensors, wie bereits erläutert, mit 200 g angenommen. Das Gewicht des Aluminiumrohrs, das den Sensor trägt, beläuft sich auf 598,51 g. Mithilfe des Online-CAD-Tools der Firma ITEM lässt sich das Gewicht der beiden seitlichen Alu-Profile ermitteln [16]. Dies beträgt bei der Länge der Profile (jeweils 20 x 20 x 1445 mm) 0,71 kg pro Profil.

Erforderliches Drehmoment, um das Aluminiumrohr und den Sensor zu halten:

$$\begin{aligned} M_1 &= (m_{\text{Rohr}} + m_{\text{Sensor}}) \cdot g \cdot l = (0,59851 + 0,2) \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1,445 \text{ m} \\ &= 11,32 \text{ Nm} \end{aligned}$$

[23]

Erforderliches Drehmoment, um ein Alu-Profil zu halten:

$$M_2 = \frac{M_{\text{Profil}}}{2} \cdot g \cdot l = \frac{0,71 \text{ kg}}{2} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1,445 \text{ m} = 5,032 \text{ Nm}$$

Gesamtes erforderliches Drehmoment pro Motor, um die Konstruktion aus zwei Alu-Profilen, dem Rohr und den Sensor zu halten:

$$M_{\text{ges},1} = \frac{M_1}{2} + M_2 = \frac{11,32 \text{ Nm}}{2} + 5,032 \text{ Nm} = 10,69 \text{ Nm}$$

Das Gegengewicht und seine Halterung soll aus einem Vierkant-Stahl bestehen. Die Größe des Gegengewichts wurde aus fertigungstechnischen Gründen auf 50 x 50 x 100 mm festgelegt. Der Stab, der das Gegengewicht halten soll, hat die Außenmaße 12 x 5 mm. Damit gilt für die gesamte Konstruktion:

$$M_{\text{Gegengewicht}} + M_{\text{Stab}} \leq M_{\text{ges},1}$$

Die Drehmomente für das Gegengewicht und den Stab lassen sich mithilfe der Dichte von Stahl und ihres Volumens in Abhängigkeit der Hebellänge  $l$  berechnen:

$$(V_{\text{Gegengewicht}} \cdot \rho_{\text{Stahl}} \cdot g \cdot l) + \frac{V_{\text{Stab}} \cdot \rho_{\text{Stahl}} \cdot g \cdot l}{2} \leq M_{\text{ges},1}$$

$$\left\{ (5 \cdot 5 \cdot 10) \text{ cm}^3 \cdot 7,87 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \cdot \frac{1}{1000} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot l \right\} + \left\{ \frac{(1,2 \cdot 0,5 \cdot l \cdot 100) \text{ cm}^3 \cdot 7,87 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \cdot \frac{1}{1000} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot l}{2} \right\} \leq 10,69 \text{ Nm}$$

$$19,301 \text{ N} \cdot l + 2,316 \text{ N} \cdot l^2 \leq 10,69 \text{ Nm}$$

$$2,316 \text{ N} \cdot l^2 + 19,301 \text{ N} \cdot l - 10,69 \text{ Nm} \leq 0$$

$$l \leq 0,5212 \text{ m}$$

Bei ausgeschalteten Motoren soll der Sensor immer ganz unten sein. Daher beträgt die gewählte Länge für die Halterung des Gegengewichts:  $l = 0,5 \text{ m}$ .

#### 4.4.2.2 Motorauslegung

Mit der gewählten Länge für den Stab, der das Gegengewicht hält, kann jetzt das Drehmoment ausgerechnet werden, das für die Drehung des Sensors erforderlich ist.

Drehmoment durch Aluprofile, Rohr und Sensor pro Antrieb:

$$M_{1,ges} = 10,69 \text{ Nm}$$

Gegendrehmoment durch Gegengewicht und Stab zur Halterung mit der Länge  $l = 0,5 \text{ m}$ :

$$M_{2,ges} = 19,301 \text{ N} \cdot 0,5 \text{ m} + 2,316 \text{ N} \cdot \frac{0,5 \text{ m}}{2} = 9,651 \text{ Nm} + 0,579 \text{ Nm} = 10,23 \text{ Nm}$$

Für den Antrieb ergibt sich so ein erforderliches Mindestdrehmoment von:

$$M_{Antrieb} = M_{1,ges} - M_{2,ges} = 10,69 \text{ Nm} - 10,23 \text{ Nm} = 0,46 \text{ Nm}$$

Mit diesem Antriebsmoment wird folgender Schrittmotor gewählt: *IGUS MOT-AN-S-060-005-042-L-A-AAAA* [30]. Dieser Motor hat ein maximales Drehmoment von  $M_{Motor} = 0,5 \text{ Nm}$ .

Damit ergibt sich ein Sicherheitsfaktor für den Antrieb:

$$S = \frac{M_{Motor}}{M_{Antrieb}} = \frac{0,5 \text{ Nm}}{0,46 \text{ Nm}} = 1,09$$

Weil dieser Sicherheitsfaktor nur knapp über 1 liegt und zur Erleichterung der Montage, wird der Antrieb über eine Untersetzung mittels Zahnriemenscheiben im Verhältnis  $\ddot{u} = \frac{2}{1}$  realisiert. Der Sicherheitsfaktor erhöht sich so auf:

$$S_{neu} = S \cdot \ddot{u} = 1,09 \cdot 2 = 2,18$$

#### 4.4.2.3 Umsetzung in der Praxis

Die Halbzeuge, mit denen der Bewegungsapparat des Sensors geplant wurde, beziehen sich auf zum Konstruktionszeitpunkt verfügbare Produkte der Firma *H.Kleineberg GmbH*. Nach Aufgabe der Bestellung stellt sich entge-

gen einer vorher telefonisch eingeholten Information heraus, dass Halbzeuge grundsätzlich nur in einer Länge von mindestens sechs Metern geliefert werden. Dies bedeutet, dass erhebliche Mengen einer möglichen Bestellung vorerst als Verschnitt ungenutzt blieben. Dazu ist der Preis wesentlich höher als ursprünglich kalkuliert.

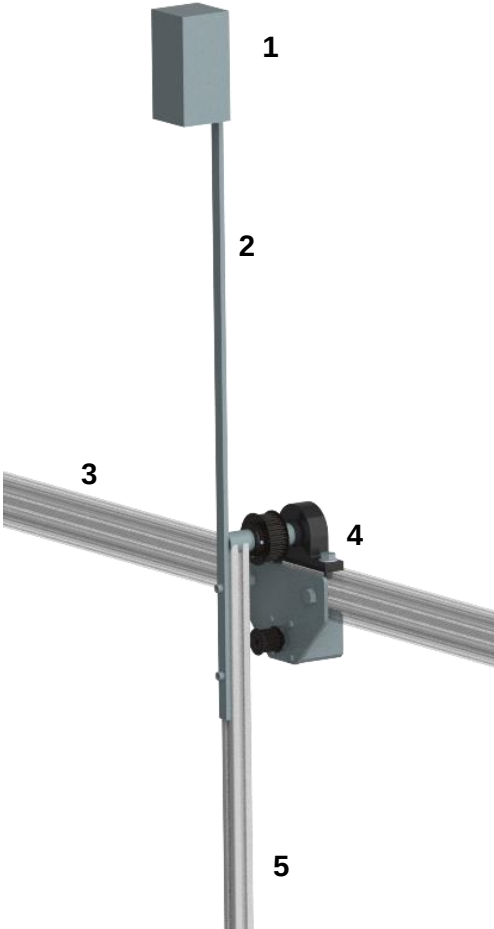
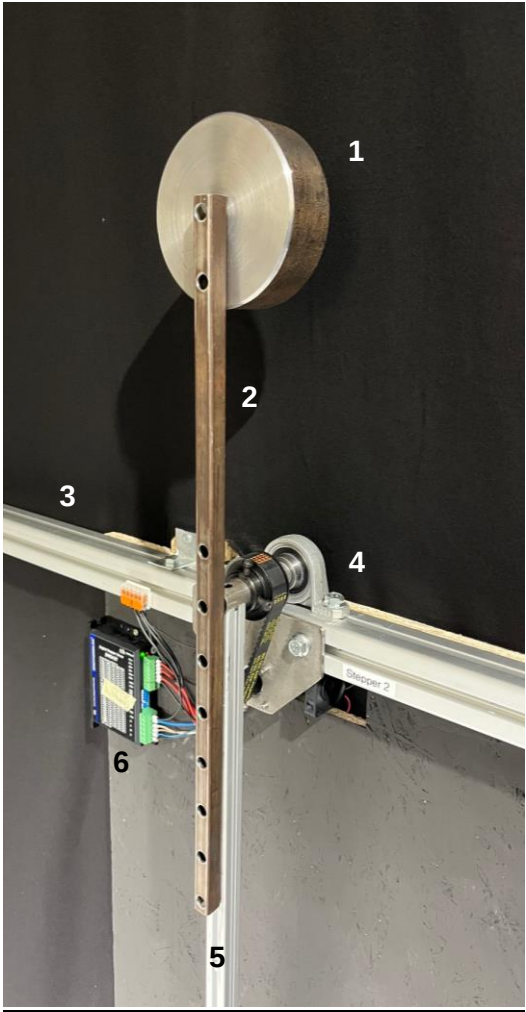
Daher wird die Bestellung storniert und die Fertigung erfolgt ausschließlich mit Halbzeugen, die bereits verfügbar sind. Konkret handelt es sich dabei um alten Lagerbestand von HAWKS Racing e.V., Hamburg.

Für die Verwendung der Materialien wurde von der zum Zeitpunkt der Fertigung verantwortlichen Person eine Erlaubnis eingeholt.

Bei einer Bestandsaufnahme im Materiallager stellt sich heraus, dass nahezu alle Materialien, die für die Planung verwendet wurden, nicht ohne erheblichen zusätzlichen Fertigungsaufwand verfügbar sind.

Daher müssen alternative Lösungen in Betracht gezogen werden, die denselben Zweck erfüllen.

Die Gegengewichte werden aus einem Rundmaterialgefertigt, das so gedreht wurde, dass sie ähnlich schwer, wie die ursprünglich kalkulierten Gewichte sind. Außerdem ist die Halterung dieser Gewichte aus einem Vierkantrohr gefertigt, das mit Nutensteinen flexibel am 20 mm x 20 mm ITEM-Profil befestigt wird. Dies ermöglicht eine stufenlose Einstellung der Hebellänge für die Gegengewichte und so mehr Flexibilität bei der Montage und Justierung der Konstruktion.

| Konstruktion im CAD                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Umsetzung in der Praxis                                                                                                                                       |              |   |                            |   |        |   |                                              |   |                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |   |              |   |                                         |   |        |   |                                              |   |                                           |   |                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|---|----------------------------|---|--------|---|----------------------------------------------|---|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|--------------|---|-----------------------------------------|---|--------|---|----------------------------------------------|---|-------------------------------------------|---|---------------------|
|  <p>Abbildung 27: Gegengewicht mit Halterung - in CAD</p>                                                                                                                                                                                                                   |  <p>Abbildung 28: Gegengewicht mit Halterung - Umsetzung in der Praxis</p> |              |   |                            |   |        |   |                                              |   |                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |   |              |   |                                         |   |        |   |                                              |   |                                           |   |                     |
| <table border="1"> <tr> <td>1</td><td>Gegengewicht</td></tr> <tr> <td>2</td><td>Halterung für Gegengewicht</td></tr> <tr> <td>3</td><td>Rahmen</td></tr> <tr> <td>4</td><td>Antriebseinheit (Motor, Untersetzung, Lager)</td></tr> <tr> <td>5</td><td>20 x 20 mm Alu-Profil für Sensorhalterung</td></tr> </table> <p>Tabelle 15: Legende zu Abbildung 27</p> | 1                                                                                                                                                             | Gegengewicht | 2 | Halterung für Gegengewicht | 3 | Rahmen | 4 | Antriebseinheit (Motor, Untersetzung, Lager) | 5 | 20 x 20 mm Alu-Profil für Sensorhalterung | <table border="1"> <tr> <td>1</td><td>Gegengewicht</td></tr> <tr> <td>2</td><td>Halterung für Gegengewicht, verstellbar</td></tr> <tr> <td>3</td><td>Rahmen</td></tr> <tr> <td>4</td><td>Antriebseinheit (Motor, Untersetzung, Lager)</td></tr> <tr> <td>5</td><td>20 x 20 mm Alu-Profil für Sensorhalterung</td></tr> <tr> <td>6</td><td>Schrittmotortreiber</td></tr> </table> <p>Tabelle 16: Legende zu Abbildung 28</p> | 1 | Gegengewicht | 2 | Halterung für Gegengewicht, verstellbar | 3 | Rahmen | 4 | Antriebseinheit (Motor, Untersetzung, Lager) | 5 | 20 x 20 mm Alu-Profil für Sensorhalterung | 6 | Schrittmotortreiber |
| 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Gegengewicht                                                                                                                                                  |              |   |                            |   |        |   |                                              |   |                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |   |              |   |                                         |   |        |   |                                              |   |                                           |   |                     |
| 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Halterung für Gegengewicht                                                                                                                                    |              |   |                            |   |        |   |                                              |   |                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |   |              |   |                                         |   |        |   |                                              |   |                                           |   |                     |
| 3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Rahmen                                                                                                                                                        |              |   |                            |   |        |   |                                              |   |                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |   |              |   |                                         |   |        |   |                                              |   |                                           |   |                     |
| 4                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Antriebseinheit (Motor, Untersetzung, Lager)                                                                                                                  |              |   |                            |   |        |   |                                              |   |                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |   |              |   |                                         |   |        |   |                                              |   |                                           |   |                     |
| 5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 20 x 20 mm Alu-Profil für Sensorhalterung                                                                                                                     |              |   |                            |   |        |   |                                              |   |                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |   |              |   |                                         |   |        |   |                                              |   |                                           |   |                     |
| 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Gegengewicht                                                                                                                                                  |              |   |                            |   |        |   |                                              |   |                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |   |              |   |                                         |   |        |   |                                              |   |                                           |   |                     |
| 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Halterung für Gegengewicht, verstellbar                                                                                                                       |              |   |                            |   |        |   |                                              |   |                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |   |              |   |                                         |   |        |   |                                              |   |                                           |   |                     |
| 3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Rahmen                                                                                                                                                        |              |   |                            |   |        |   |                                              |   |                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |   |              |   |                                         |   |        |   |                                              |   |                                           |   |                     |
| 4                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Antriebseinheit (Motor, Untersetzung, Lager)                                                                                                                  |              |   |                            |   |        |   |                                              |   |                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |   |              |   |                                         |   |        |   |                                              |   |                                           |   |                     |
| 5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 20 x 20 mm Alu-Profil für Sensorhalterung                                                                                                                     |              |   |                            |   |        |   |                                              |   |                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |   |              |   |                                         |   |        |   |                                              |   |                                           |   |                     |
| 6                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Schrittmotortreiber                                                                                                                                           |              |   |                            |   |        |   |                                              |   |                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |   |              |   |                                         |   |        |   |                                              |   |                                           |   |                     |

## 4.5 Sensorbaugruppe

Der sog. „Sensor“ ist jene Baugruppe, welche die Beleuchtungsstärke erfasst und diesen Messwert zur weiteren Verarbeitung durch andere Baugruppen zur Verfügung stellt.

Im Folgenden wird mit „Sensor“ lediglich das Bauteil bezeichnet, das als Messwertumwandler von Beleuchtungsstärke zu einem elektrischen Signal (Fotostrom) dient.

Der Ausdruck „Sensorbaugruppe“ steht für die gesamte Baugruppe, welche die orange hinterlegten Aufgaben nach Abbildung 29 erledigt:

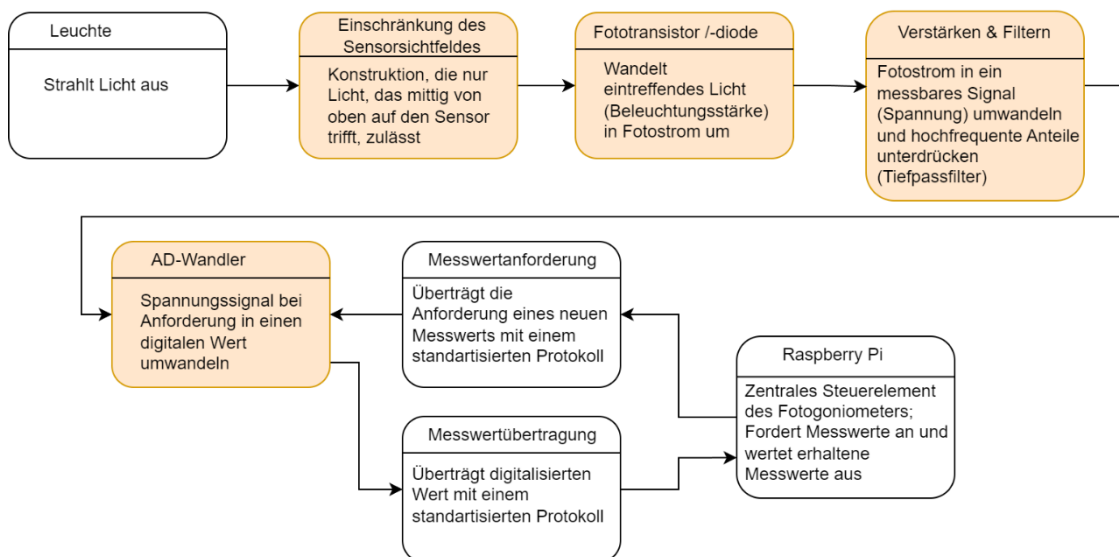


Abbildung 29: Schematische Darstellung der zur Erfassung eines Messwerts notwendigen Schritte; orange: Aufgaben, die von der Sensorbaugruppe übernommen werden

### 4.5.1 Anforderungen an die Sensorbaugruppe

Aus den Anforderungen an das Fotogoniometer und den bereits konstruierten Baugruppen resultieren einige Ansprüche an den Sensor:

1. Je nach Abstrahlcharakteristik der Leuchte muss eine sehr große Bandbreite an Beleuchtungsstärken erfasst werden können.
2. Die Lichtempfindlichkeit des menschlichen Auges für verschiedene Wellenlängen ( $V(\lambda)$ -Kurve) muss durch den Sensor abgebildet werden.
3. Das Gesamtgewicht der Sensorbaugruppe darf 200 g nicht übersteigen, weil sonst die Auslegung der Gegengewichte nicht mehr stimmt.
4. Das „Blickfeld“ des Sensors muss möglichst schmal sein (vgl. Abschnitt 3.3.1 „Methoden zur Kompensation der Größe des Messgeräts“). Trotz

dieser Einschränkung müssen die Beleuchtungsstärken zuverlässig gemessen werden.

5. Der Sensor darf sich nicht durch EMV-Störquellen stören lassen, z.B. Vorschaltgeräte der Leuchten.
6. Der Messwert muss über eine ca. 3 m lange Leitung zum Raspberry Pi übertragen werden können.

Die Konstruktion und Elektronikentwicklung der Sensorbaugruppe wird im Folgenden chronologisch anhand Abbildung 29 erläutert. Dabei wird vom aktuellen Schritt teilweise auf das Element davor oder danach zugegriffen, um die Zusammenhänge innerhalb der Baugruppe zu verdeutlichen.

## 4.5.2 Auswahl des Sensors

Um abschätzen zu können, welche maximale Beleuchtungsstärke vom verwendeten Fototransistor gemessen werden kann, muss grob ermittelt werden, welche Beleuchtungsstärken mit zur Verfügung stehenden „Probeleuchten“ erreicht werden können.

Die hellste, zum Konstruktionszeitpunkt des Fotogoniometers vor Ort verfügbare Leuchte ist das Modell *Arena 1200 Weiss Medium 23370lm* der Firma *sg* [31]. Deren hellster Punkt ist mit  $757,73 \frac{\text{cd}}{\text{klm}}$  angegeben (C-Plane  $50^\circ$ , Sensorwinkel  $17,5^\circ$  [31]). Daraus lässt sich mithilfe des Abstands von Sensor zu Leuchte im Fotogoniometer, der aus dem CAD entnommen werden kann, und dem Gesamtlichtstrom der Leuchte (23,37 klm [31]) die maximale Beleuchtungsstärke am Ort des Sensors ermitteln:

$$E_{v,max} = \frac{I_v}{r^2} = \frac{757,73 \frac{\text{cd}}{\text{klm}} \cdot 23,370 \text{ klm}}{(1,377 \text{ m})^2} = 9339,1 \text{ lux}$$

Dieser Wert soll als Referenzwert für die Beleuchtungsstärken dienen, die vom Fototransistor abgedeckt werden können. Dabei muss beachtet werden, dass in Zukunft auch noch Leuchten vermessen werden könnten, die in eine Richtung noch höhere Lichtstärken emittieren, also heller bzw. gerichteter sind.

Als Fototransistor wird das Modell *TEMT6200* der Firma *Vishay* verwendet. Dabei handelt es sich um einen SMD Fototransistor, er ist also kleiner und leichter als vergleichbare THT-Bauteile.

Das Bauteil kann maximal eine Beleuchtungsstärke von ca. 100000 Lux [32] messen und ist daher auch für sehr helle/ gerichtete Leuchten geeignet. Der Fotostrom des *TEMT6200* ist außerdem an die  $V(\lambda)$ -Kurve angepasst. Dessen Sichtfeld jedoch ist recht weitwinklig, mit nachlassender Lichtempfindlichkeit bei steigenden Winkeln (siehe Abb. 16). Um das Sichtfeld zwangsläufig auf einen kleinen Bereich einzuschränken, wird eine Abdeckung/ Blende für den Fototransistor konstruiert und 3D-gedruckt. Oben, über der Fotodiode ist ein Loch in der Blende. Zur Vermeidung von Reflektion innerhalb der Blende, wird für den Druck schwarzes Filament verwendet. Die Blende wird im Zusammenbau auf die Platine geschraubt. Dafür werden im Platinendesign entsprechende Löcher vorgesehen (vgl. Abschnitt 4.5.7 „PCB-Layout“).

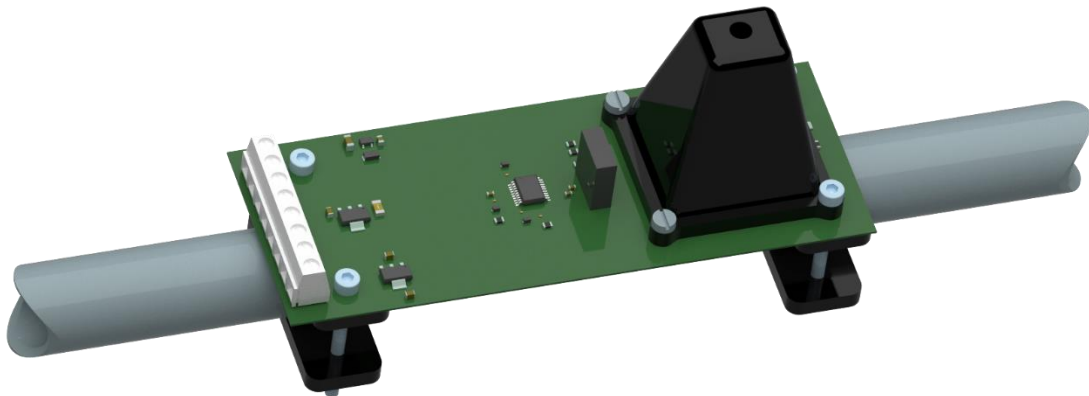


Abbildung 30: Platine mit Blende an das Alu-Rohr montiert

### 4.5.3 Verstärker

Der Fotostrom der Platine wird an einem Shunt-Widerstand in eine Spannung umgewandelt, die über einen nicht invertierenden Verstärker (Operationsverstärkerschaltung) auf die Spannung verstärkt wird, die dann über den Tiefpassfilter am analogen Eingang des AD-Wandlers anliegt. Verwendet wird hier ein Operationsverstärker vom Typ OPA827 der Firma *Texas Instruments* [33].

Das System aus Shunt-Widerstand und Verstärker ist so dimensioniert, dass bei einem maximalen Fotostrom von 18 mA [32] der Ausgang des Verstärkers auch die für den AD-Wandler maximale Spannung (5 V) annimmt.

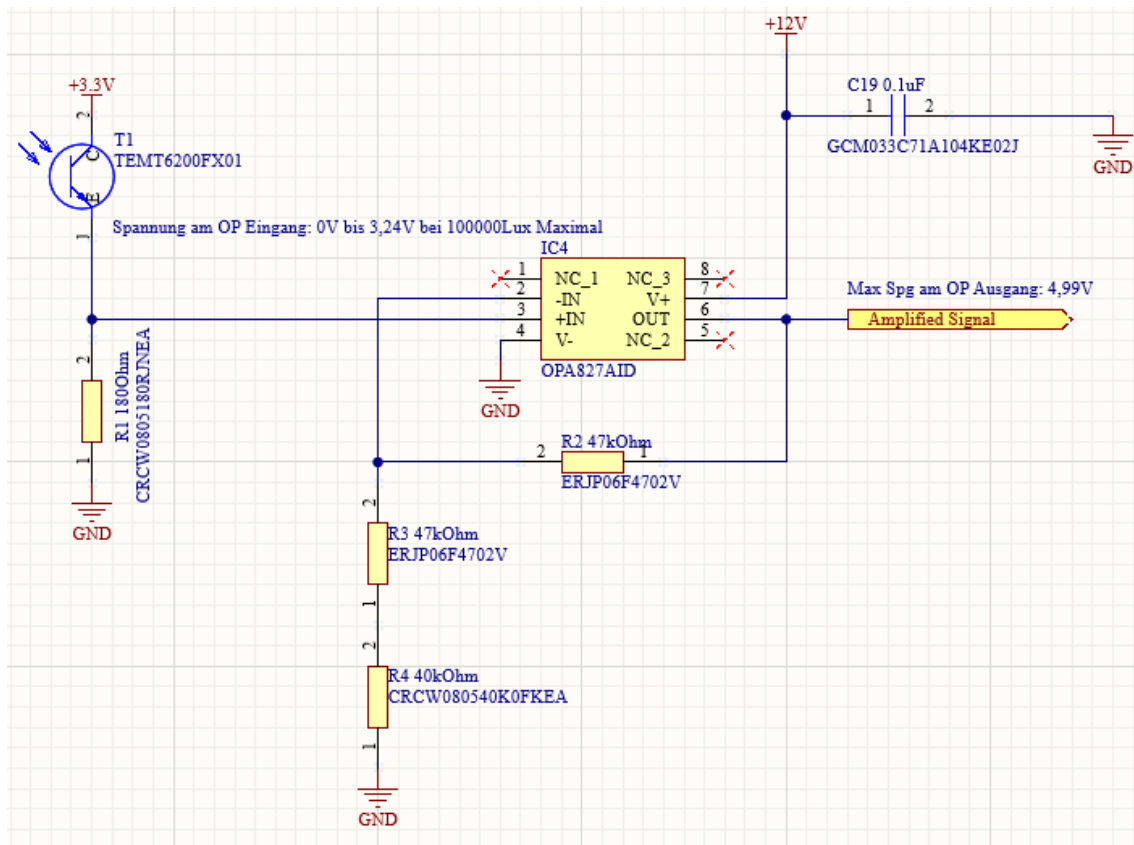


Abbildung 31: Schaltplan: Fototransistor mit Shuntwiderstand und Verstärker

Bei einem Fotostrom von 18 mA gilt für die Spannung am nicht invertierenden Eingang des Operationsverstärkers:

$$U_1 = R_1 \cdot I_{ph} = 18 \text{ mA} \cdot 180 \Omega = 3,24 \text{ V}$$

Für die Spannung am Ausgang des Operationsverstärkers gilt dann [34]:

$$U_2 = V_U \cdot U_1 = \frac{R_3 + R_4 + R_2}{R_3 + R_4} \cdot U_1 = \frac{47 \text{ k}\Omega + 40 \text{ k}\Omega + 47 \Omega}{47 \text{ k}\Omega + 40 \text{ k}\Omega} \cdot 3,24 \text{ V} = 4,99 \text{ V} \approx 5 \text{ V}$$

#### 4.5.4 Filter

Um Aliasing zu vermeiden, müssen hochfrequente Signalanteile vor dem Eingang in den AD-Wandler unterdrückt werden. Aliasing passiert, wenn die Frequenz eines Signals schneller als die Hälfte der Abtastfrequenz des AD-Wandlers (Nyquist-Frequenz) ist. Dann kann das ursprüngliche Signal aus den Abtastwerten nicht mehr wieder hergestellt werden [35].

Mit einem RC-Tiefpass-Filter sollen daher Signalanteile, deren Frequenzen höher als die Nyquist-Frequenz sind, so stark gedämpft werden, dass sie vom

AD-Wandler nicht mehr erfasst werden können. Der ADS1255 hat eine Auflösung von 24 Bit [36], das entspricht  $2^{24}$  möglichen Werten. Dementsprechend müssen herauszufilternde Signalanteile mit einem Verstärkungsfaktor von  $2^{-24}$  unterdrückt werden.

$$A_{dB} = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{U_a}{U_e} \right) = 20 \cdot \log_{10}(2^{-24}) = -144,49 \text{ dB}$$

Das Optimierungskriterium für den Tiefpass-Filter lautet also wie folgt:

$$\frac{f_{abtast}}{2} = F_{nyquist} \triangleq -144,49 \text{ dB Dämpfung}$$

Der ADS1255 hat eine Abtastfrequenz von 30 kHz [36]. Damit liegt die Nyquistfrequenz bei 15 kHz.

Die Übertragungsfunktion eines RC-Tiefpasses lautet wie folgt [37]):

$$\frac{U_a}{U_e} = \frac{1}{\sqrt{1 + (2 \cdot \pi \cdot f \cdot R \cdot C)^2}}$$

Setzt man die Übertragungsfunktion in die Formel für die Verstärkung in Dezibel ein, erhält man:

$$A_{dB} = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{1}{\sqrt{1 + (2 \cdot \pi \cdot f \cdot R \cdot C)^2}} \right)$$

Mithilfe von Umformungen lässt sich aus diesem Zusammenhang eine Gleichung für die Kapazität  $C$  erstellen, die bei gegebener Frequenz, Verstärkung und Widerstand berechnet werden kann:

$$C = \sqrt{\left( \frac{1}{10^{\frac{A_{dB}}{20}}} \right)^2 - 1} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R}$$

Für  $A_{dB}$  werden die vorher berechneten  $-144,49 \text{ dB}$  eingesetzt. Die Frequenz  $f$  entspricht der Nyquistfrequenz von 15 kHz. Der Widerstand ist frei wählbar und wird durch Ausprobieren der Werte der E12 Normreihe [38] so angenommen, dass sich eine Kapazität ergibt, die ebenfalls grob der E12 Reihe entspricht, sodass sie leicht verfügbar ist.

Für einen Widerstand von  $R = 3,9 \text{ M}\Omega$  ergibt sich für die Kapazität:

$$C = \sqrt{\left(\frac{1}{10^{\frac{-144,49}{20}}}\right)^2 - 1} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 15 \text{ kHz} \cdot 3,9 \text{ M}\Omega} = 45,6 \text{ }\mu\text{F} \approx 47 \text{ }\mu\text{F}$$

Für die gewählten Werte für Widerstand und Kondensator lässt sich mithilfe eines Bode-Diagramms des Tiefpassfilters die Rechnung validieren:

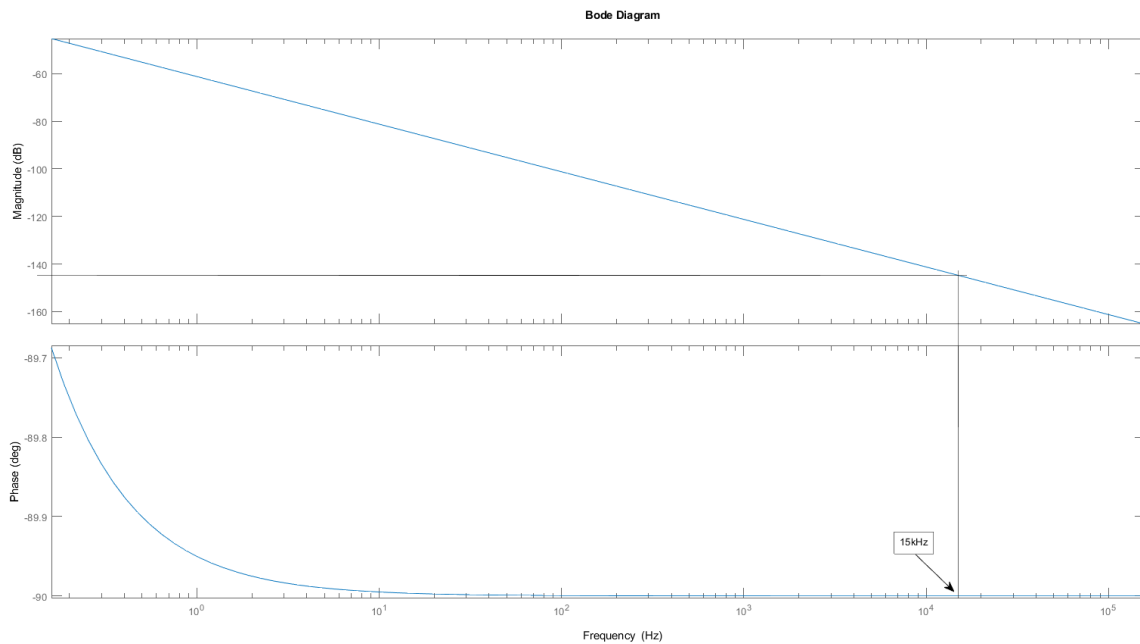


Abbildung 32: Bode Diagramm RC-Tiefpass

Das Bode-Diagramm zeigt, dass Frequenzanteile die höher als 15 kHz sind, mit ca. -144 dB gedämpft werden.

Bei der Inbetriebnahme der Platine wird der analoge Wert einmal direkt am Eingang des AD-Wandlers, also nach dem Filter, gemessen und einmal vor dem Filter:



Abbildung 33: Messung vor dem Filter, deutliche Störung mit 2 MHz zu erkennen

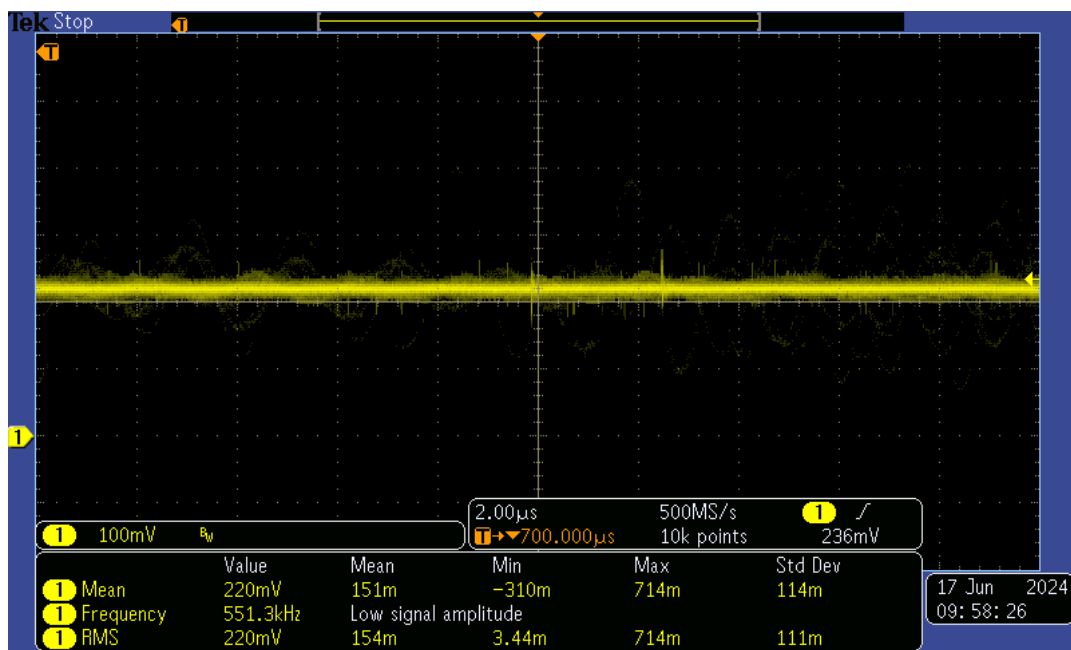


Abbildung 34: Messung nach dem Filter, die 2 MHz Störung ist nicht mehr zu erkennen

Abbildungen 33 und 34 zeigen, dass der Filter funktioniert und unerwünschte Störfrequenzen (hier 2 MHz) herausgefiltert werden.

## 4.5.5 AD-Wandler

Bei der Wahl des AD-Wandlers ist eine hohe Auflösung erforderlich, um den vollen Dynamikbereich des Fototransistors auch ausreichend detailliert abbilden zu können. Dies ist wichtig, um auch Leuchten, die nur einen Teil des durch Fototransistor und Verstärkerschaltung zur Verfügung stehenden Dynamikbereichs nutzen, ausreichend detailliert messen zu können. Außerdem soll der AD-Wandler ein standardisiertes Übertragungsprotokoll zur Übermittlung der Messwerte an den Raspberry Pi nutzen. Dies erleichtert die Implementierung und Fehlersuche bei der Inbetriebnahme des Systems. Für den AD-Wandler ist es in diesem Fall ausreichend, nur einen analogen Eingang zu haben.

Aufgrund der guten Dokumentation und bereits existierenden Codes für die grundlegende Kommunikation mit dem AD-Wandler vom Typ *ADS1256* der Firma *Texas Instruments* [36], wird sich für ein AD-Wandler aus der *ADS1255/56* Familie entschieden. Ein Beispielcode für die Kommunikation mit dem AD-Wandler *ADS1256* auf einem Evaluationsboard ist online auf der Homepage der Firma *Waveshare* verfügbar [39].

Der *ADS 1255* ist mit zwei analogen Eingängen der kleinste und günstigste verfügbare Wandler der Familie, der eine hohe Auflösung von 24 Bit bietet.

Um die korrekte Funktionsweise des AD-Wandlers zu gewährleisten, ist Zusatzbeschaltung notwendig [36]:

1. An allen Eingängen müssen hochfrequente Signale abgeschirmt werden. Dazu ist ein kleiner Keramik Kondensator parallel mit einem größeren Tantal- oder Keramik-Kondensator mit niedriger Nennspannung zu verwenden.
2. Die digitale Versorgungsspannung soll so niedrig wie möglich sein (3,3 V) um Rückkopplungen auf analoge Stromkreise zu vermeiden.
3. An den digitalen Eingängen (SCLK, DIN und CS) werden 100  $\Omega$  Widerstände verwendet, um im Fehlerfall den Strom zu begrenzen.
4. Die Pins „REST“, „SYNC“ und „PDWN“ werden nicht verwendet, weshalb sie mit dem Pluspol der digitalen Spannung verbunden werden.
5. Um die Referenzspannung (2,5 V) so präzise wie möglich zu halten, wird die Spannung direkt nach ihrer Quelle zusätzlich mit einem möglichst großen Kondensator und Reihenwiderständen an beiden Polen stabilisiert.

6. Am analogen Eingang soll ein RC-Tiefpass verwendet werden (bereits ausgelegt, siehe Abschnitt 4.5.4 „Filter“).
7. Für den Betrieb des Wandlers ist auch ein Quarz mit 7,68 MHz und 18 pF Kondensatoren erforderlich.

Aus diesen Anforderungen kann im EDA-Programm *Altium Designer* der Schaltplan für den AD-Wandler erstellt werden:

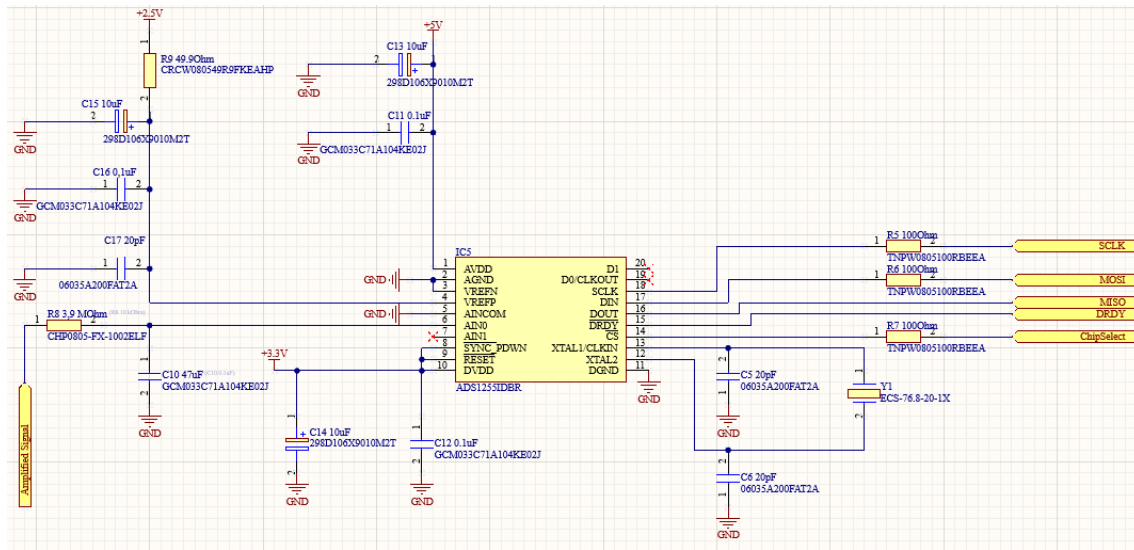


Abbildung 35: Schaltplan AD-Wandler ADS 1255 mit Zusatzbeschaltung

## 4.5.6 Spannungsversorgung

Die gesamte Platine wird mit 12 V von einem Netzteil versorgt.

Für die Zurverfügungstellung der notwendigen Spannungen für die einzelnen Bauteile auf der Platine (2,5 V, 3,3 V und 5 V) werden sog. „Low Drop Out“ (LDO) Spannungsregler verwendet. Diese benötigen für die korrekte Funktionsweise Kondensatoren mit den richtigen Reihenwiderständen (ESR-Wert, engl. „Equivalent Series Resistance“, parasitärer Nebeneffekt eines Kondensators, der durch den inneren Verlustwiderstand entsteht). Dieser Wert ist wichtig, da er den Spannungsregler dämpft und so ungewollte Überschwin- ger vermeidet.

Die konkreten Zahlenwerte, die für die Kapazität und den ESR-Wert der Zusatzkondensatoren an den Spannungsreglern erforderlich sind, sind in deren Datenblättern zu finden [40], [41], [42].

Für das Layout ist es wichtig zu beachten, dass diese Kondensatoren nah an den Spannungsreglern platziert werden. Damit wird verhindert, dass Leitungswiderstände eine zu große Rolle spielen können und so das Verhalten des Spannungsreglers ungewollt beeinflussen.

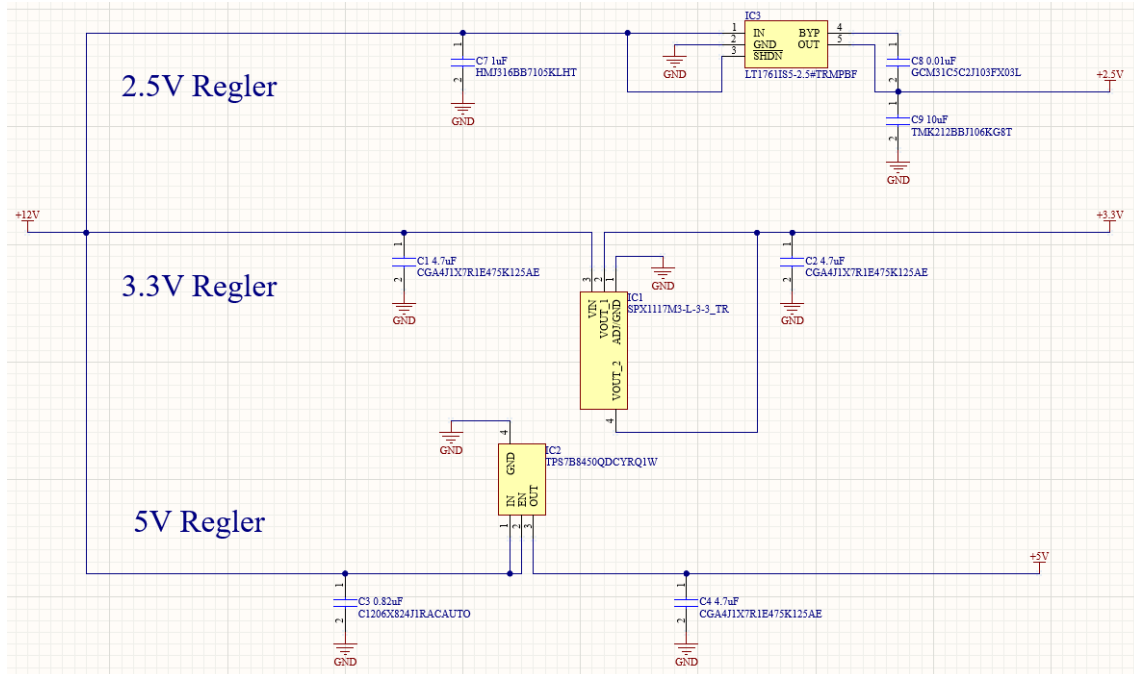


Abbildung 36: Schaltplan: Spannungsregler mit Zusatzkondensatoren

#### 4.5.7 PCB-Layout

Das Layout einer Platine beschreibt, wie die einzelnen Bauteile darauf angeordnet sind, wo Leiterbahnen verlaufen, welche Maße die Platine hat und viele weitere Details.

Im Folgenden wird beim Platinen-Layout vor allem auf die Platzierung der Bauteile, den Verlauf von Leiterbahnen und die mechanischen Eigenschaften der Platine (Maße und Löcher) eingegangen.

Besonders für den AD-Wandler ergeben sich aufgrund der Notwendigkeit vieler verschiedener Signale und Spannungen auf kleinem Raum besondere Anforderungen an das Layout [36], die im Folgenden zusammengefasst sind:

1. Eine GND-Plane gemeinsam für analoge und digitale Signale. Es darf durch das Layout kein Spannungsunterschied zwischen analogem GND und digitalem GND entstehen.
2. Die kleinen Keramik-Kondensatoren zur Abschirmung hochfrequenter Signale sollten möglichst nah am AD-Wandler platziert sein.
3. Die Leitung zum analogen Eingang soll nicht länger als nötig sein.
4. Unter dem AD-Wandler sollen keine hochfrequenten Signale verlaufen.

Die Bauteile müssen so auf der Platine angeordnet sein, dass mittig über dem Fototransistor die Blende befestigt werden kann (siehe Abschnitt 4.5.1 „Anforderungen an die Sensorbaugruppe“). In der Nähe des Fototransistors dürfen sich daher keine hohen, oder reflektierenden Bauteile befinden (zum Beispiel der für den Betrieb des AD-Wandlers erforderliche Quarz), da dieser die Montage der Blende verhindern und durch seine helle Oberfläche zusätzlich für Reflektion innerhalb der Blende sorgen würden.

Für die einfachere Inbetriebnahme und eine übersichtliche Fehlersuche sind sämtliche Bauteile auf der Oberseite platziert. Außerdem wird die Platine in drei Hauptbereiche eingeteilt:

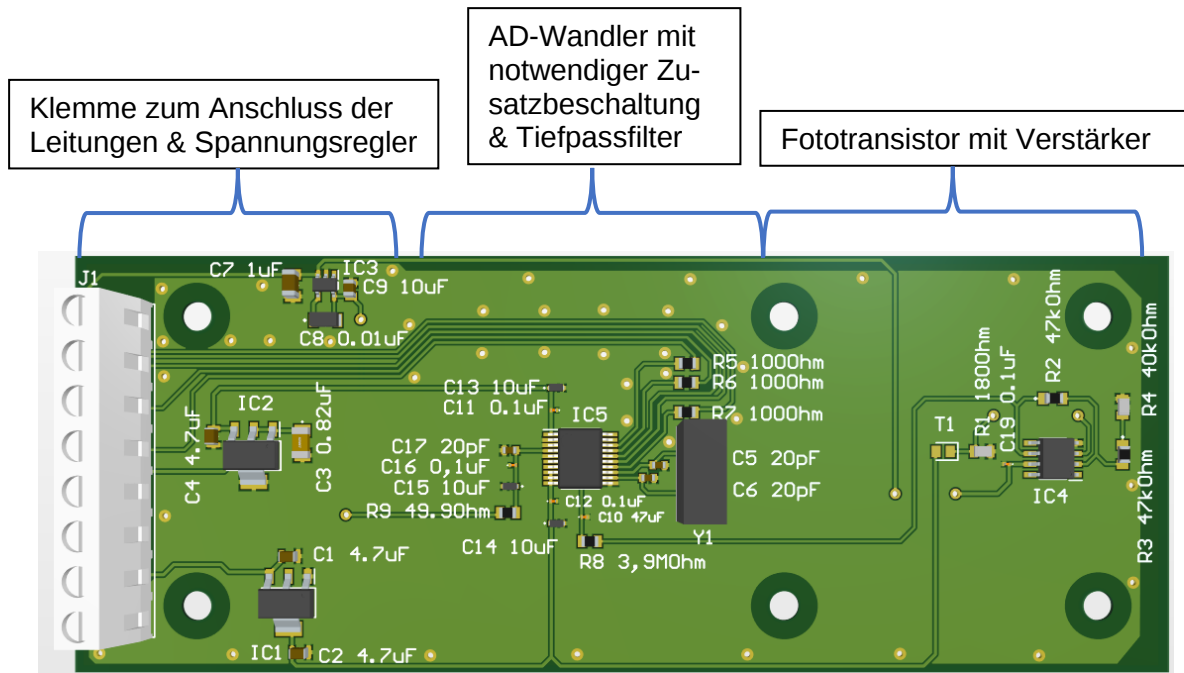


Abbildung 37: Sensor PCB, 3D-Ansicht, Aufsicht

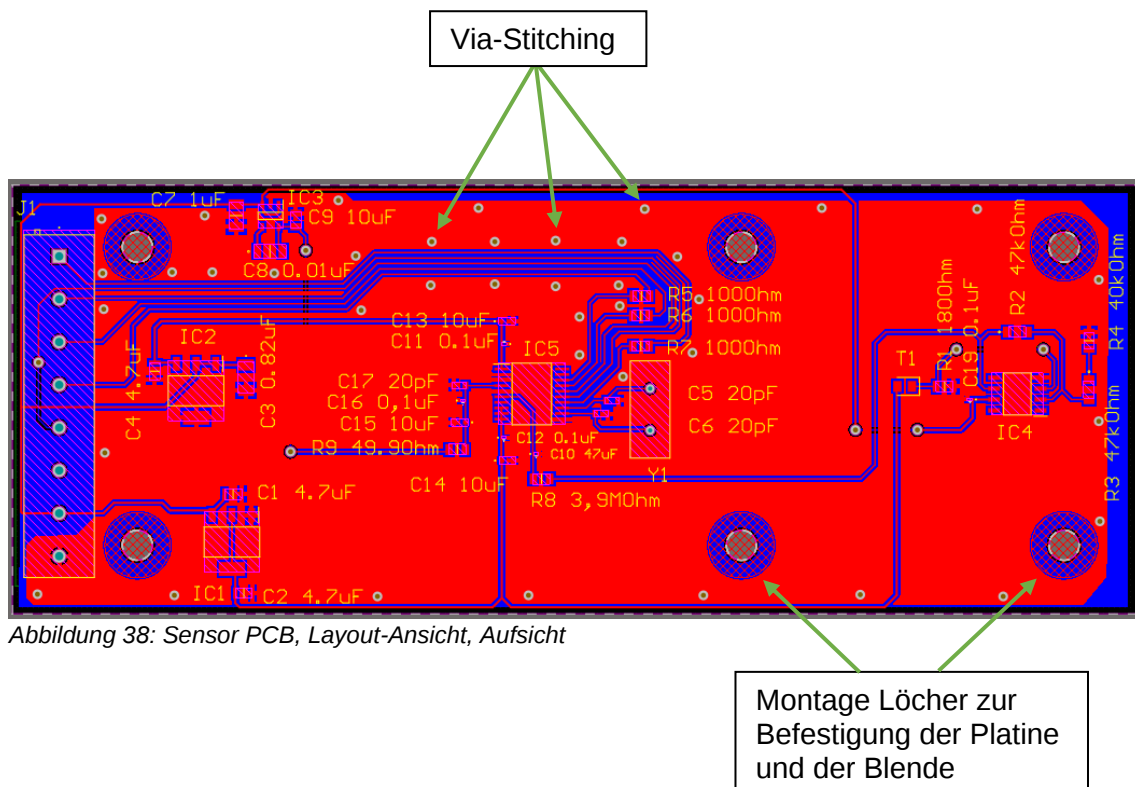


Abbildung 38: Sensor PCB, Layout-Ansicht, Aufsicht

Das „Via-Stitching“ ist eine Methode, um eine Platine unempfindlicher gegen elektromagnetische Störungen zu gestalten. Dabei wird oben und unten auf

der Platine großflächig eine Kupferfläche angelegt, die in regelmäßigen Abständen mit Durchkontaktierungen (sog. Vias) verbunden sind. Dabei entsteht für die Elektronik im Innern ein Faraday'scher Käfig, der die Signale von der „Außenwelt“ abschirmt (vgl. Abschnitt 4.5.1 „Anforderungen an die Sensorbaugruppe“, Anforderung Nr. 5).

## 4.5.8 Herausforderungen bei der Inbetriebnahme

Nach Abschluss der Lötarbeiten und während der sukzessiven Inbetriebnahme der Platine fielen einige Probleme auf, die im Folgenden näher beschrieben werden. Neben der Darlegung dieser Schwierigkeiten wird auch auf deren Ursachen und Lösungen eingegangen.

### 4.5.8.1 Operationsverstärker

#### Problem:

Bei der Messung der verstärkten Spannung (Ausgang des OP-Amps) fällt auf, dass Eingangsspannungswerte, die nahe an der unteren Grenze der möglichen Bandbreite sind, nicht verstärkt werden. Erst bei Eingangsspannungen, die einen gewissen Wert überschreiten, findet die geplante lineare Verstärkung von Eingangs- zu Ausgangsspannung statt.

#### Ursache:

Beim ausgewählten OP-Amp handelt es sich nicht um einen sog. *Rail-to-Rail*-Operationsverstärker.

Rail-to-Rail-Operationsverstärker (auch *full-swing op amps* genannt) zeichnen sich dadurch aus, dass die Ausgangsspannung den nahezu vollen Bereich der Versorgungsspannung ausnutzen kann [43].

Beim auf der Sensor-PCB verwendeten Operationsverstärker (Texas Instruments OPA827) handelt es sich nicht um einen solchen.

| PARAMETER            |                                                                                                         | TEST CONDITIONS                                  | MIN                                         | TYP      | MAX         | UNIT |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------|----------|-------------|------|
| OUTPUT               |                                                                                                         |                                                  |                                             |          |             |      |
| Voltage output swing | $R_L = 1\text{ k}\Omega$ , $A_{OL} > 120\text{ dB}$                                                     |                                                  | $(V_-) + 3$                                 |          | $(V_+) - 3$ | V    |
|                      | $R_L = 1\text{ k}\Omega$ , $A_{OL} > 114\text{ dB}$<br>$T_A = -40^\circ\text{C}$ to $125^\circ\text{C}$ |                                                  | $(V_-) + 3$                                 |          | $(V_+) - 3$ |      |
| $I_{OUT}$            | Output current                                                                                          | $ V_S - V_{OUT}  < 3\text{ V}$                   |                                             | 30       |             | mA   |
| $I_{SC}$             | Short-circuit current                                                                                   |                                                  | $\pm 55$                                    | $\pm 65$ |             | mA   |
| $C_{LOAD}$           | Capacitive load drive                                                                                   |                                                  | See <a href="#">Typical Characteristics</a> |          |             |      |
| $Z_O$                | Open-loop output impedance                                                                              |                                                  | See <a href="#">Typical Characteristics</a> |          |             |      |
| POWER SUPPLY         |                                                                                                         |                                                  |                                             |          |             |      |
| $V_S$                | Specified voltage                                                                                       |                                                  | $\pm 4$                                     |          | $\pm 18$    | V    |
| $I_Q$                | Quiescent current (per amplifier)                                                                       | $I_{OUT} = 0\text{ A}$                           |                                             | 4.8      | 5.2         | mA   |
|                      |                                                                                                         | $T_A = -40^\circ\text{C}$ to $125^\circ\text{C}$ |                                             |          | 6           |      |

Abbildung 39: Ausschnitt aus dem Datenblatt des OPA827 von Texas Instruments, [33]

Dies geht auch aus dem Datenblatt hervor (rot markiert). Die Ausgangsspannung kann nur bis auf eine Differenz von maximal 3 V zur Versorgungsspannung ansteigen.

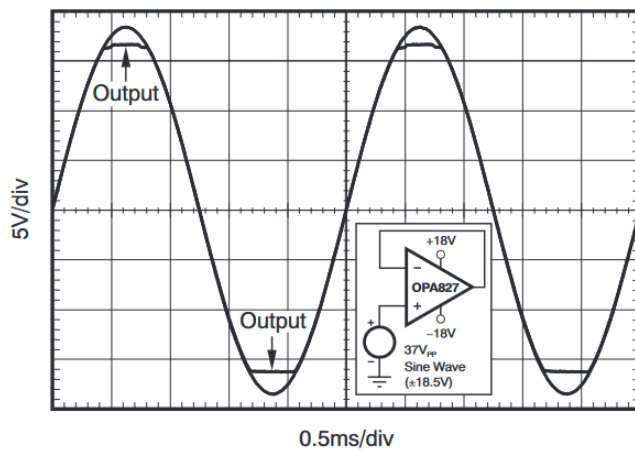


Abbildung 40: Figure 29 aus dem Datenblatt des OPA827, [33]

Figure 29 im Datenblatt des OP-Amps (hier Abbildung 40) zeigt dies als Darstellung der Spannungen über die Zeit:

Hier ist der Operationsverstärker ohne Widerstände auf den invertierenden Eingang zurückgekoppelt und hat somit einen Verstärkungsfaktor von  $V_U = 1$ . Am nicht-invertierenden Eingang liegt eine Sinusspannung von 37 V Spitze-Spitze an. Die Versorgungsspannung liegt mit  $\pm 18$  V an. Somit ist der Spitzenwert der Eingangsspannung höher als die Versorgungsspannung:

$$\frac{37V}{2} = 18,5V > 18V$$

Dennoch ist nahe den Spitzenwerten die Ausgangsspannung geringer als die Eingangsspannung. Dazwischen folgt die Ausgangsspannung der Eingangsspannung, wie es der Verstärkungsfaktor von  $V_U = 1$  vorgibt.

Dieser Effekt lässt sich auch auf der Sensor-PCB betrachten: Die Versorgungsspannung am OP beträgt  $V_{(+)} = 12$  V und  $V_{(-)} = 0$  V = GND. Die Ausgangsspannungen sollen (in der Theorie) 0 V bis 5 V betragen. Die obere Grenze (5 V) wird zwar erreicht, allerdings kann die untere Grenze (0 V) nicht erreicht werden.

### Lösung:

Ein Rail-to-Rail-Operationsverstärker mit gleichem Footprint (gleiches Gehäuse und gleiches Pinout) und gleichen elektronischen Eigenschaften ist nicht in angemessener Zeit verfügbar. Daher muss eine alternative Lösung gefunden werden. Bei Betrachtung des Gesamtsystems aus Fototransistor

und Operationsverstärkerschaltung fällt auf, dass sich beide Bauteile linear verhalten [15], [32]. Somit kann die Operationsverstärkerschaltung entfallen, wenn der Shunt-Widerstand am Fototransistor so angepasst wird, dass im zu erwartenden Bereich des Fotostroms Spannungen von 0 -5 V an ihm abfallen.

Die Auswahl eines geeigneten Shunt-Widerstands wird im nächsten Abschnitt, „Blende“, behandelt.

Diese Lösung lässt sich auf der Platine durch Ablöten der OP-Amp Schaltung, Lötbrücken zwischen einigen Pads und das Auftrennen einer Leiterbahn umsetzen. Die Spannung, die am Shunt-Widerstand abfällt, wird jetzt direkt in den RC-Tiefpass-Filter gespeist.

#### 4.5.8.2 Blende

##### Problem:

Bei der Inbetriebnahme sollen die von der Sensorbaugruppe erfassten (Spannungs-) Werte mit der tatsächlichen am Ort des Sensors vorherrschenden Beleuchtungsstärke verglichen werden. Ziel ist es, das Verhalten der Sensorbaugruppe zu validieren.

Dabei wird mit dem Handluxmeter LX1010BS (vgl. Abbildung 3) an verschiedenen Orten auf der Sensorkreisbahn bei eingeschalteter, zu vermessender Leuchte die Beleuchtungsstärke gemessen (Messreihe 1). Parallel werden die durch den AD-Wandler gemessenen Spannungen aufgezeichnet (Messreihe 2). Erwartet wird ein linearer Zusammenhang zwischen Messreihe 1 und 2.

## Versuchsaufbau:

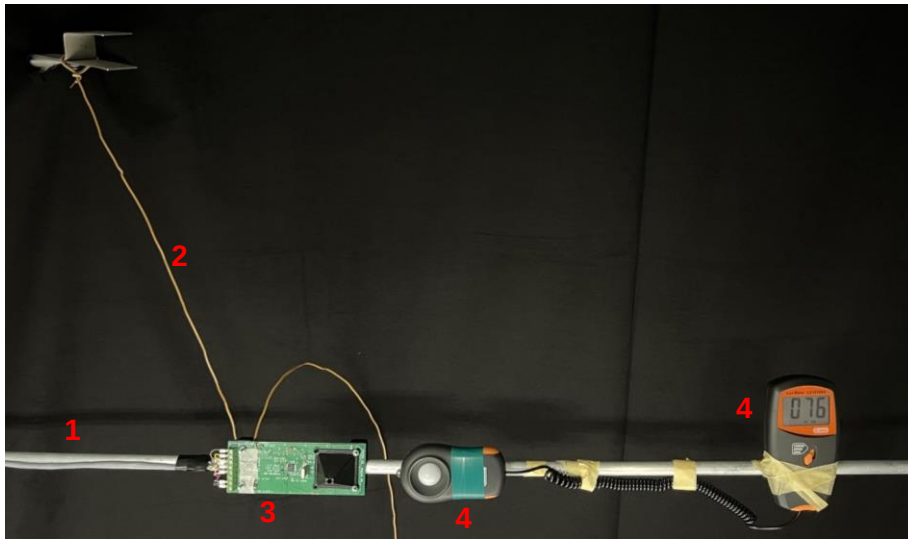


Abbildung 41: Versuchsaufbau: Vergleichsmessung Luxmeter - Sensorbaugruppe

|   |                                                                       |
|---|-----------------------------------------------------------------------|
| 1 | Aluminiumrohr zur Halterung der Sensorbaugruppe und des Handluxmeters |
| 2 | Draht zur Fixierung der Sensoren an mehreren Stellen um die Leuchte   |
| 3 | Sensorbaugruppe                                                       |
| 4 | Handluxmeter LX1010BS                                                 |

Tabelle 17: Legende zu Abbildung 41

Bei der Aufnahme der Messreihe muss besonders darauf geachtet werden, dass Sensorbaugruppe und Handluxmeter direkt (orthogonal) zum Mittelpunkt der Lichtaustrittsfläche der zu vermessenden Leuchte ausgerichtet sind. Außerdem darf ein Messwert erst abgelesen werden, wenn die Konstruktion nach händischer Bewegung nicht mehr nachschwingt.

Die aufgenommenen Messreihen werden in Matlab importiert und anschließend dargestellt:

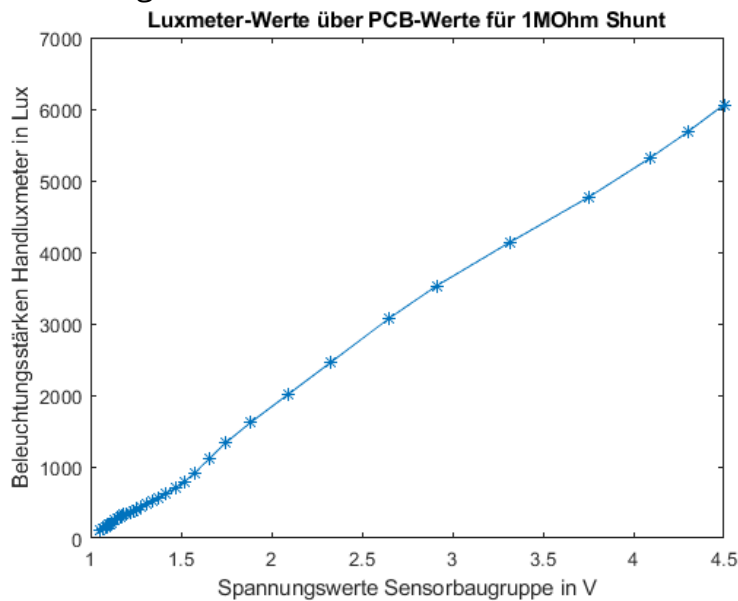


Abbildung 42: Darstellung der Messreihe; Beleuchtungsstärken über Spannungswerte

Der Zusammenhang zwischen den Spannungswerten, die von der Sensorbaugruppe erfasst werden und den mit dem Handluxmeter gemessenen Beleuchtungsstärken sieht zunächst recht linear aus.

Daher wird im nächsten Schritt ein sog. „Faktor-Vektor“ erstellt, der für jeden Messpunkt einen Faktor darstellt, mit dem der jeweilige Spannungswert multipliziert werden muss, um die entsprechende Beleuchtungsstärke zu erhalten. Aufgrund des recht linearen Zusammenhangs in Abbildung 42 wird für die Darstellung des Faktor-Vektors über die Sensor-PCB-Spannungswerte eine Parallele zur Abszisse erwartet:

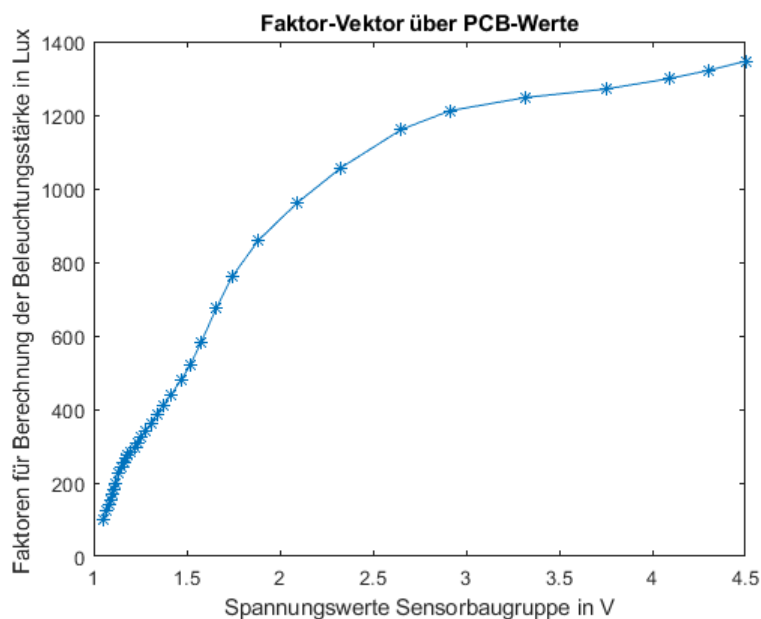


Abbildung 43: Darstellung des Faktor-Vektors über Sensor-PCB-Spannungswerte

Die Darstellung der Faktoren (Faktor-Vektor, Abbildung 43) entspricht nicht der Erwartung. Die Kurve ist keine Parallele zur Abszisse, sondern steigt für kleinere Spannungen stärker an als für große.

Dies führt zur Schlussfolgerung, dass die Ausgangswerte der Sensorbaugruppe nicht linear der tatsächlichen Beleuchtungsstärke folgen.

#### Ursache:

Zur Eruierung der Ursache werden die relevanten Verarbeitungsschritte auf der Sensorbaugruppe (vgl. Abbildung 29) untersucht:

1. Blende zur Abschirmung schräg einfallenden Lichts
2. Fototransistor
3. Shunt-Widerstand

Nach dem Ausschlussprinzip kann keiner der Verarbeitungsschritte allein für die Nicht-Linearität verantwortlich sein.

Jedoch sorgt die Kombination aus Blende und Fototransistor dafür, dass seitlich kein Licht auf das Bauteil treffen kann (was dem Sinn der Blende entspricht).

Das im Datenblatt des Fototransistors angegebene lineare Verhalten [15], [32] kann jedoch nur erreicht werden, wenn der Fototransistor uneingeschränkt beleuchtet wird.

#### Auswahl des Shunt-Widerstands:

Weil sich aus Sicht des Fototransistors die Umgebungsbedingungen geändert haben, ist das Verhältnis von Fotostrom zu Beleuchtungsstärke nicht mehr so, wie im Datenblatt angegeben. Daher kann die Größe des Shunt-Widerstands nicht mehr rechnerisch ermittelt werden, sondern wird durch strukturiertes Ausprobieren festgelegt.

Der Shunt-Widerstand soll so festgelegt werden, dass die verwendete hellste verfügbare Leuchte den Wertebereich des AD-Wandlers ca. bis zur Hälfte ausreizt, damit noch ausreichend Spielraum nach oben für noch hellere/ gerichtete Leuchten bleibt.

Um den Fototransistor nicht unnötig zu belasten, wird mit dem größten verfügbaren Widerstand begonnen und dieser Schritt für Schritt gegen kleinere Widerstände ausgetauscht, bis der gewünschte Spannungswert am Eingang des AD-Wandlers anliegt.

Bei einem Wert von  $R_{shunt} = 47 \text{ k}\Omega$  beträgt die Maximalspannung 2,49083 V. Damit ist das Ziel erreicht.

### Lösung:

Die Aufgabe der Sensorbaugruppe ist es, Beleuchtungsstärken unter einem schmalen Blickwinkel aufzunehmen. Durch die Nicht-Linearität der Sensor-Blende-Kombination ist eine Kalibrierung nötig.

Eine Kalibrierung der Sensorwerte auf Beleuchtungsstärken hat jedoch zwei Nachteile:

1. Die LVK, die vom Fotogoniometer erzeugt werden soll, muss aus einzelnen Lichtstärken, nicht Beleuchtungsstärken, bezogen auf den Gesamtlichtstrom der Leuchte bestehen (vgl. Abschnitt 4.7.2.2 „Ablaufsteuerung“). Daher ist in der Software später eine Umrechnung auf die Lichtstärken mithilfe des bekannten Abstands von Lichtaustrittsfläche zu Sensor nötig. Durch fehlerhafte Montage der Leuchte im Fotogoniometer (Lichtaustrittsfläche nicht im Drehzentrum des Sensors) kann die Umrechnung verfälscht sein, weil der Abstand nicht mehr stimmt.
2. Vergleichsmessungen bezüglich der Beleuchtungsstärke der Sensorbaugruppe und dem Handluxmeter sind nur begrenzt sinnvoll, weil das Handluxmeter eine andere Messgeometrie besitzt. Der Sensor im Handluxmeter ähnelt vom Aufbau und der Geometrie her eher der des menschlichen Auges. Schräg einfallendes Licht beeinträchtigt also das Messergebnis. Die Sensorbaugruppe im Fotogoniometer hingegen berücksichtigt wegen der Blende schräg einfallendes Licht nicht.

Daher ist es sinnvoll, die notwendige Kalibrierung nicht mithilfe des Handluxmeters auf Beleuchtungsstärken vorzunehmen, sondern direkt die gemessenen Spannungswerte des AD-Wandlers auf Lichtstärken zu mappen. Die Umrechnung über den Abstand kann somit entfallen. Außerdem kann die Aufnahme der für die Kalibrierung wichtigen Messreihe automatisch erfolgen, da das Handluxmeter nicht mit dem Sensor mitgeführt werden muss, und deshalb die Motoren mit den Gegengewichten die Sensorbaugruppe bewegen können, so wie es bei einer „richtigen“ Messung abläuft.

Als Vergleichswerte für die Lichtstärken wird eine bereits bekannte LVK einer Leuchte verwendet.

Um für die Kalibrierung eine möglichst große Bandbreite abzudecken ist es sinnvoll, dafür die zum entsprechenden Zeitpunkt hellste verfügbare Leuchte zu verwenden. In diesem Fall ist das die Leuchte *Arena 1200 Weiss Medium* 23370lm der Firma sg [31]. Auf der Herstellerwebsite [31] kann deren ldt-Datei heruntergeladen werden. Diese enthält neben geometrischen und technischen auch fotometrische Daten, wie zum Beispiel die LVK in verschiedenen C-Planes.

Die Leuchte wird im Fotogoniometer bei der C-Plane 0° vermessen (1. Messreihe). Aus der LDT-Datei können die Werte der LVK für die 0° C-Plane entnommen werden (2. Messreihe).

Beide Messreihen werden in Matlab importiert. Um die beiden Messreihen miteinander vergleichen zu können ist es wichtig, dass die Messpunkte im gleichen Abstand sind und die Winkel, die vom Sensor abgedeckt werden, den gleichen Bereichen entsprechen. Nachfolgende Tabelle beschreibt die Unterschiede bezüglich der Sensorwinkel und des Abstands zweier Messpunkte vom Fotogoniometer zu den aus der ldt-Datei gewonnenen Daten:

|                                          | <b>Fotogoniometer</b> | <b>LVK aus LDT-Datei</b> |
|------------------------------------------|-----------------------|--------------------------|
| <b>Sensorwinkel</b>                      | 0° - 360°             | 0° - 180°                |
| <b>Abstand zwischen zwei Messpunkten</b> | 1°                    | 2,5°                     |

*Tabelle 18: Unterschiede zwischen der Fotogoniometer Messreihe, und den LDT-Daten derselben Leuchte*

Zunächst wird der abgedeckte Sensorwinkel der Messreihe aus dem Fotogrammeter an die aus der ldt-Datei angepasst. Dazu werden die 360 aufgenommenen Einzelwerte in zwei jeweils 180 Werte lange Vektoren geteilt und die zweite Hälfte der Werte wird über die erste Hälfte gespiegelt. Um für die Kalibrierung möglichst genaue Ergebnisse zu erzielen, wird der Durchschnitt dieser beiden Halbwerte betrachtet.

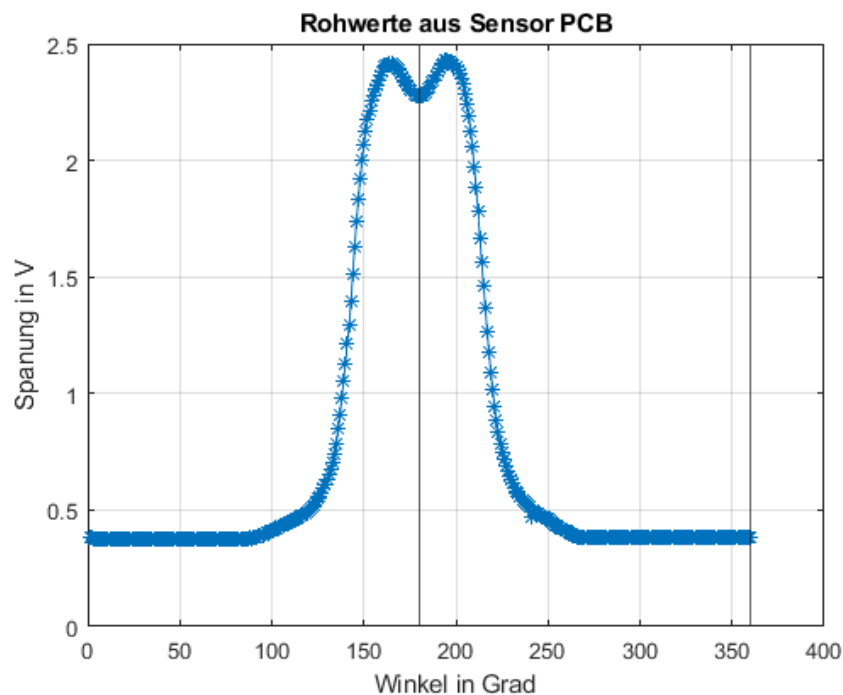


Abbildung 44: Rohwerte der Sensor-PCB in 1°-Schritten um die Leuchte herum

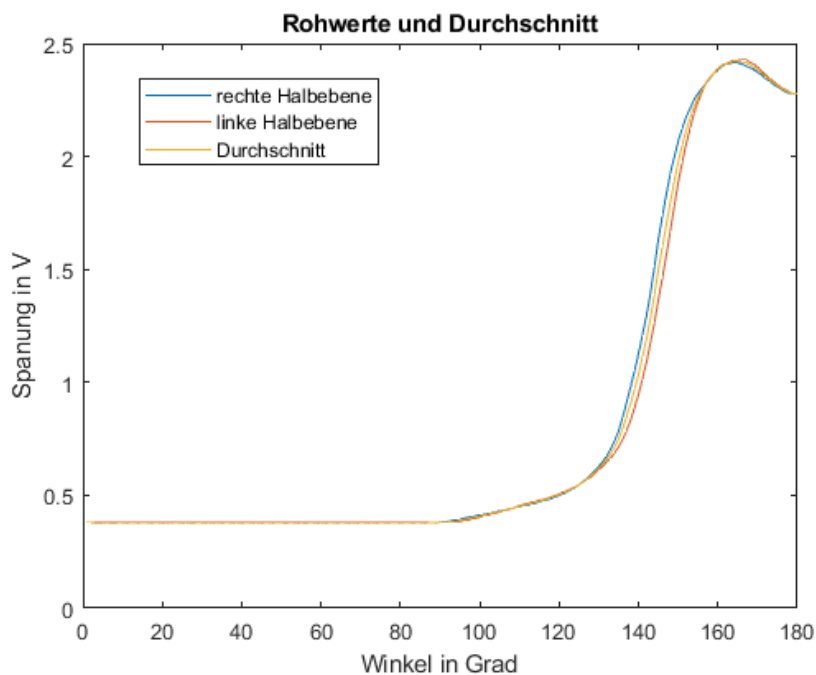


Abbildung 45: Unterteilung der Originalwerte (blau & rot) und Durchschnitt beider Halbebenen (orange)

Nach der Anpassung des Wertebereichs beider Messreihen muss der Abstand zwischen zwei Messpunkten der beiden Messreihen aufeinander angepasst werden. Dazu bietet es sich an, die gröbere Auflösung (aus der ldt-Datei) auf die höhere Auflösung des Fotogoniometers anzuheben.

Dafür müssen zunächst die Messwerte aus der ldt-Datei in Lichtstärken umgerechnet werden, da hier nur Lichtstärken in Bezug auf den Lichtstrom der Leuchte enthalten sind (Werte in Candela pro Kilolumen). Die Leuchte ist in ihrem Datenblatt [31] mit einem Lichtstrom von 23,37 klm angegeben. Der Vektor wird also elementweise mit dem Gesamtlichtstrom multipliziert, um einzelne Werte für die Lichtstärke zu erhalten.

Jetzt kann die Anpassung der Auflösung (Abstand zwischen zwei Messpunkten) erfolgen. Dazu wird der Vektor mithilfe von Splines im Wertebereich der angepassten Fotogoniometer Werte (180 Werte, 1°-Auflösung) interpoliert. Die Approximation mit Splines ist eine abschnittsweise Beschreibung der Messwerte, wobei an den Nahtstellen die Funktionen immer zweimal stetig differenzierbar sind. Steigung und Krümmung der Splines stimmen also an den Nahtstellen überein. Daher ist dies hier die beste Art der Approximation, weil das Ergebnis den Originalwerten sehr gut folgt, jedoch Krümmung und Steigung zwischen zwei Messpunkten für die Interpolation berücksichtigt werden.

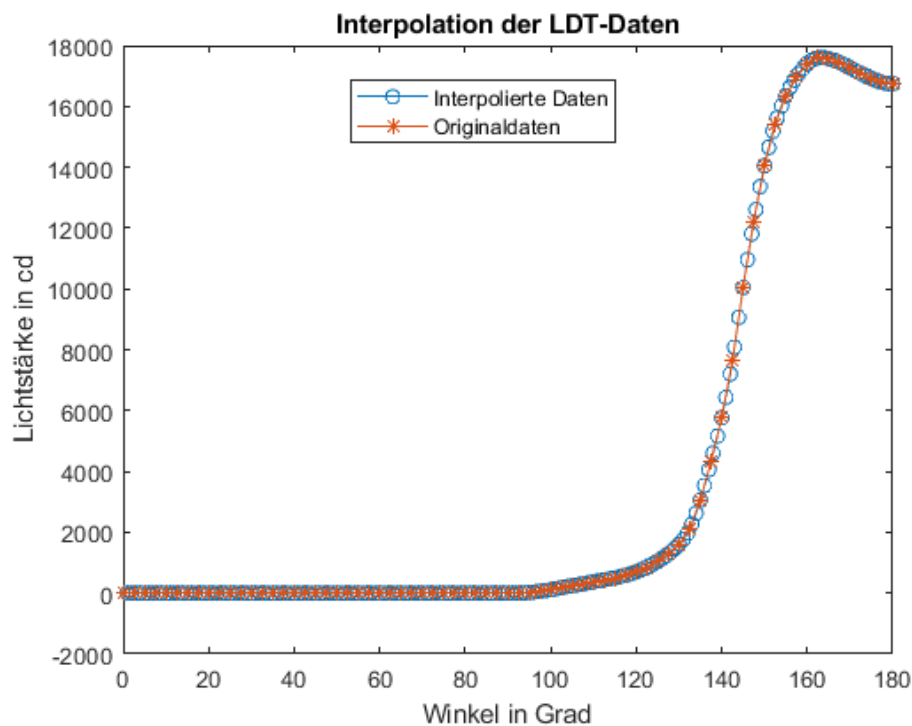


Abbildung 46: Lichtstärken aus ldt-Datei in Originalauflösung (rot) und in interpolierter 1°-Auflösung (blau)

Die Leuchte strahlt aufgrund ihrer Bauart nur Licht nach unten ab. Daher entsprechen die Werte der ersten 90° der Sensorbewegung nahezu null Can-

dela. Um Rechenaufwand zu reduzieren und viele ähnliche Messwerte (Bereich  $0^\circ$  bis  $90^\circ$ ), die in der weiteren Betrachtung zu undefiniertem Rauschen führen würden, werden die ersten 90 Werte „abgeschnitten“, also nicht weiter betrachtet.

Folgende Abbildung zeigt die Spannungswerte des Fotogoniometers im Bereich  $90^\circ$  bis  $180^\circ$  Sensorwinkel und die interpolierten Werte aus der ldt-Datei im selben Winkelbereich mit der interpolierten Auflösung. Zur besseren grafischen Darstellung sind die Lichtstärken in Abbildung 47 betragsmäßig auf das Maximum der Spannungswerte aus der Sensor-PCB skaliert.

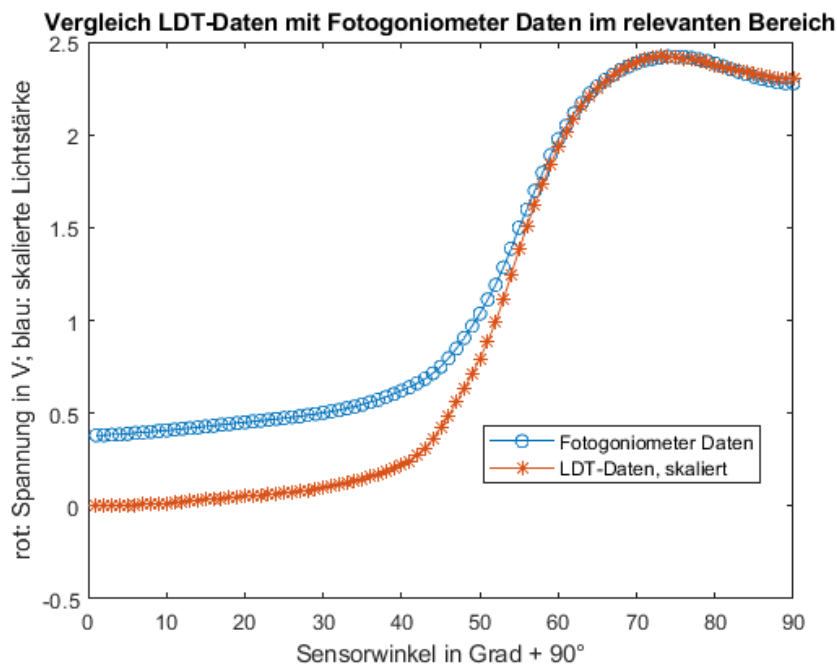


Abbildung 47: Vergleich der skalierten Daten aus ldt-Datei mit Fotogoniometer-Spannungswerten

Die Vorbereitungsarbeiten (Angleichen der beiden Messreihen aneinander) sind damit abgeschlossen.

Für die Berechnung der Lichtstärke aus den aufgenommenen Spannungswerten müssen die aufgenommenen Spannungen nach einer eindeutigen mathematischen Berechnungsvorschrift umgerechnet werden. Aus bereits aufgenommenen Messreihen (Abbildung 43) ist bereits bekannt, dass dieser Zusammenhang nicht linear ist.

Zunächst wird ein Vektor erstellt, der für jeden einzelnen gemessenen Spannungswert einen Faktor enthält, mithilfe dessen die korrekte Lichtstärke berechnet werden kann.

Dazu wird der Vektor, der die Messwerte aus der ldt-Datei enthält, elementweise durch den Vektor mit den Spannungswerten der Sensor-PCB geteilt. Daraus ergibt sich ein „Faktor-Vektor“. Dieser Faktor-Vektor wird anschließend über die Spannungswerte geplottet:

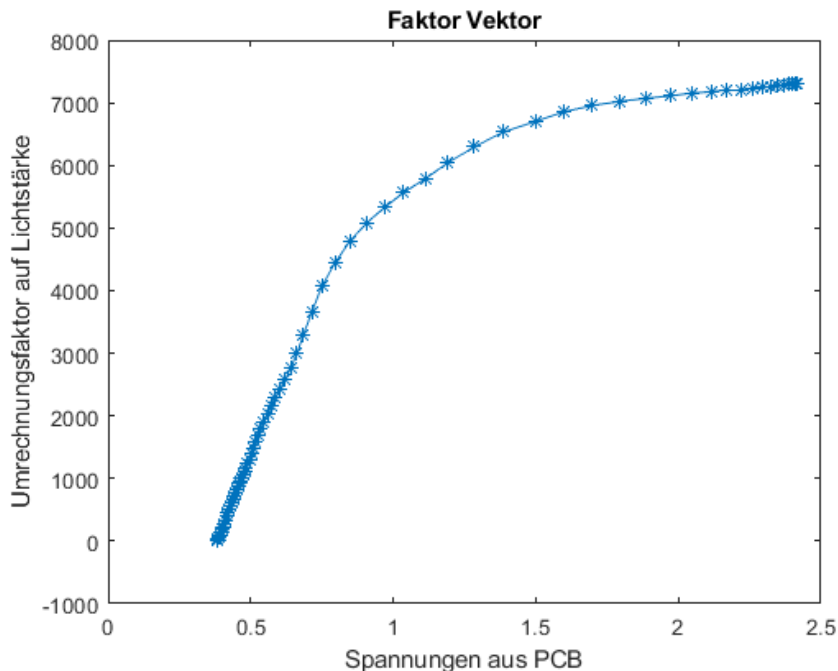


Abbildung 48: Plot der Umrechnungsfaktoren über die Spannungswerte

Für die Aufstellung einer eindeutigen mathematischen Berechnungsvorschrift muss die Darstellung in Abbildung 48 mathematisch modelliert werden.

Dazu wird der „Faktor-Vektor“ mit verschiedenen Polynomen dritten bis achten Grades angefitet (angepasst). Die Annäherung mit Polynomen ist hier sinnvoll, weil die gewünschte eindeutige Berechnungsvorschrift eindeutig durch das Polynom beschrieben wird.

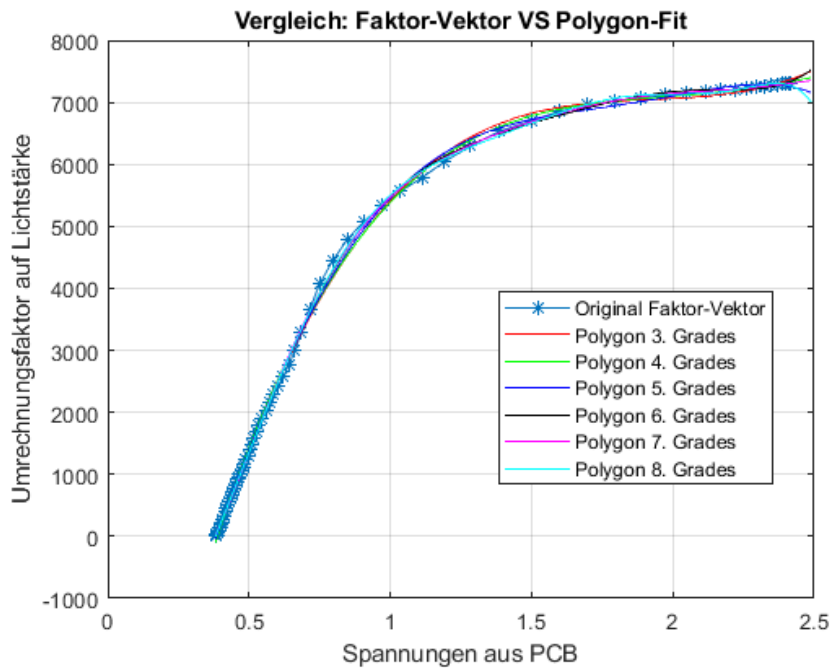


Abbildung 49: Verschiedene Polynome werden an den Faktor-Vektor gefittet

Zur Beurteilung, welches der gefitteten Polynome den Faktor-Vektor am besten beschreibt, werden die Abweichungen der einzelnen Fits zum Faktor-Vektor betrachtet:

|   |                          | sse        | rsquare | dfe | adjrsquare | rmse    |
|---|--------------------------|------------|---------|-----|------------|---------|
| 1 | Fehler Polygon 3. Grades | 4.8411e+05 | 0.9992  | 69  | 0.9991     | 83.7617 |
| 2 | Fehler Polygon 4. Grades | 4.4489e+05 | 0.9992  | 68  | 0.9992     | 80.8861 |
| 3 | Fehler Polygon 5. Grades | 3.3152e+05 | 0.9994  | 67  | 0.9994     | 70.3427 |
| 4 | Fehler Polygon 6. Grades | 2.0349e+05 | 0.9996  | 66  | 0.9996     | 55.5258 |
| 5 | Fehler Polygon 7. Grades | 1.8955e+05 | 0.9997  | 65  | 0.9996     | 54.0020 |
| 6 | Fehler Polygon 8. Grades | 1.6379e+05 | 0.9997  | 64  | 0.9997     | 50.5893 |

Abbildung 50: Screenshot aus der Matlab-Ausgabe: Fehler und Anpassungswerte der verschieden Polynom-Fits

#### SSE:

Steht für *Sum of Squares Due to Error* und gibt an, wie groß die Summe der quadratischen Abweichungen über den alle Fit-Werte gegenüber den Originaldaten (Faktor-Vektor) ist [44].

#### RSQUARE:

Ist ein Wert zwischen 0 und 1, der angibt, wie gut der jeweilige Fit die Variabilität der Originaldaten wiedergibt. Je näher der Wert an 1 liegt, desto besser spiegelt der Fit die Gesamtvariabilität im Durchschnitt über den gesamten Bereich wider [44].

DFE:

Steht für *Degrees of Freedom* und beschreibt, wie viele Datenpunkte nicht für die Erstellung des Fits verwendet wurden [44].

ADJRSQUARE:

Ist eine angepasste Version, von *RSQUARE*, welche die Anzahl verwendeter Datenpunkte berücksichtigt [44].

RMSE:

Steht für *Root Mean Squared Error* und beschreibt die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (Abweichung von Fit zu Originaldaten), [44].

Bei Betrachtung der Werte in Abbildung 50 fällt auf, dass sich Unterschiede zwischen den einzelnen Fits bei *rsquare*, *dfe* und *adjrsquare* in einem sehr kleinen Rahmen bewegen.

Jedoch ist die Summe der quadratischen Abweichungen (*sse*) und der *rmse*-Wert beim Polygon achten Grades am geringsten.

Rein mathematisch beschreibt es also im angegebenen Wertebereich (0,3808V bis 2,4908V) den Faktor-Vektor am besten.

Für die Auswahl des richtigen Fits müssen jedoch auch Leuchten betrachtet werden, die (noch) heller als die für die Erstellung des Faktor-Vektors verwendete Leuchte sind. Daher wird das Maximum des betrachteten Spannungsbereichs (Ausgangswert der Sensorbaugruppe) auf 3 V angehoben.

Die verschiedenen Polynom-Fits werden erneut im erweiterten Spannungsbereich geplottet:

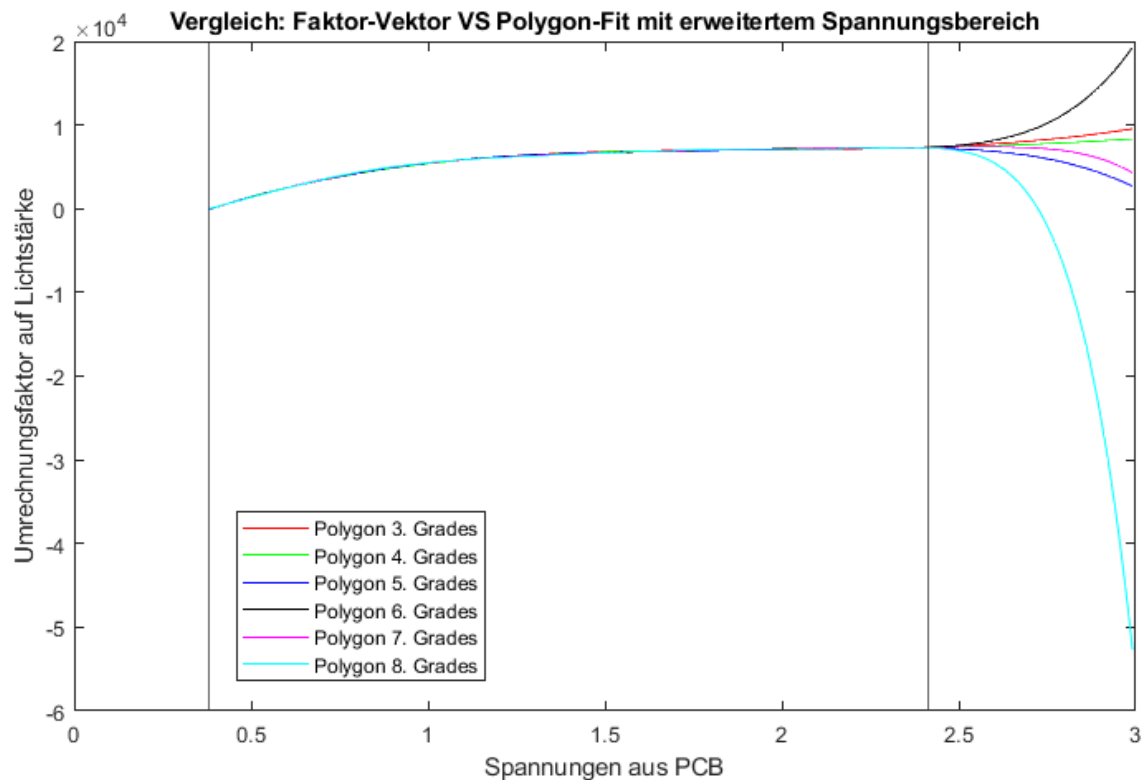


Abbildung 51: Plot der Polynom-Fits im Spannungsbereich bis 3 V

Die beiden horizontalen Linien markieren den Minimal- und Maximalauschlag der Sensorbaugruppe bei der Vermessung der Leuchte *Arena 1200 Weiss Medium 23370lm* der Firma *sg* [31]. Sie liegen bei 0,3808 V und 2,4908 V.

Das mathematisch gut passende Polynom achten Grades erweist sich jetzt als unbrauchbar, weil im höheren Spannungsbereich der Graph wieder abfällt, er wird sogar negativ.

Die Erwartungshaltung ist, dass der Faktor-Vektor mit steigender Spannung auch weiter streng monoton steigt, entsprechend dem Verhalten im bereits abgedeckten Spannungsbereich.

Im erweiterten Spannungsbereich bildet das Polynom vierten Grades die weitere Steigung am logischsten ab, da es die Steigung ohne große Änderung beibehält.

Für die Entscheidung, welches Polynom als Umrechnungsvorschrift von Spannungswerten auf Lichtstärken verwendet werden soll, bietet sich ein Kompromiss aus beidem an (guter mathematischer fit *und* sinnvolle Werte bei höheren Spannungen).

Wichtig ist auch zu erwähnen, dass die hier zur Erstellung des Faktor-Vektors genutzte Leuchte bereits verglichen mit anderen zur Verfügung stehenden

Leuchten sehr hell ist (23,37 klm, [31]). Die Wahrscheinlichkeit, dass die Leuchten, die in Zukunft im Fotogoniometer vermessen werden, einen niedrigeren Lichtstrom als 23,37 klm haben, ist recht hoch. Im Folgenden sind zur besseren Beurteilung der Situation sämtliche eindeutig identifizierbaren und zum Inbetriebnahmezeitpunkt (17.09.2024) zur Verfügung stehenden Leuchten mit ihrem jeweiligen Lichtstrom aufgelistet. Die Datenblätter der Leuchten befinden sich in Anhang 1. Der Anhang zur Arbeit befindet sich auf CD und kann beim Erstgutachter eingesehen werden.

| Nr. | Bezeichnung der Leuchte                               | Lichtstrom in klm | Quelle |
|-----|-------------------------------------------------------|-------------------|--------|
| 1   | Trilux 7651IP HE LW 100-840ETDD L15001                | 10,50             | [45]   |
| 2   | Trilux 7651 HE LN 80-840ETDD L15001                   | 8,40              | [46]   |
| 3   | AuraLight Renett 68W 90deg 840 DALI                   | 9,60              | [47]   |
| 4   | Glamox REDOX1524 10250 DALI 840 NB L1                 | 10,25             | [48]   |
| 5   | sg Arena 1200 Weiss Medium 9000lm 4000K Ra>80 On/Off  | 9,00              | [49]   |
| 6   | sg Arena 1200 Weiss Medium 23370lm 4000K Ra>80 On/Off | 23,37             | [31]   |

Tabelle 19: Legende zu Abbildung 52

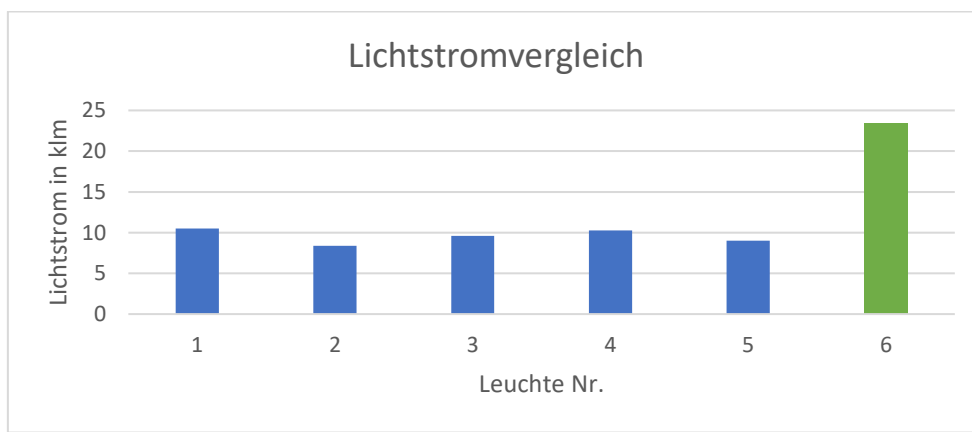


Abbildung 52: Vergleich Lichtstrom verschiedene Leuchten, grün: Maximum: 23,37 klm

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Referenzleuchte (Nr. 6, grün) einen wesentlich höheren Lichtstrom als die anderen Leuchten hat.

Die Anpassung des Polygons an den bereits abgedeckten Wertebereich wiegt deshalb schwerer als die Extrapolation der Polynome über den erreichten Maximalspannungswert von 2,4908 V hinaus.

Die Entscheidung, welches Polynom verwendet wird, fällt auf das des siebten Grades; es repräsentiert die Werte im vorliegenden Bereich hinreichend gut, liefert aber auch für Werte, die das Maximum nur wenig überschreiten, noch ausreichend genaue Ergebnisse, um eine qualitative Beurteilung der zu vermessenden Leuchte vornehmen zu können.

Das Polynom siebten Grades lautet wie folgt:

$$f_7(x) = -1252,4718 x^7 + 14012,3032 x^6 - 64411,3975 x^5 + 155951,4064 x^4 \\ - 210095 x^3 + 148620,5046 x^2 - 39745,0408 x + 2390,5318$$

Der Funktionswert an der Stelle  $x$  (gemessene Spannung Sensor-PCB) ist der Faktor, mit dem der Spannungswert multipliziert werden muss, um die Lichtstärke zu erhalten.

Abbildung 49 zeigt, dass die Spannung am Eingang des AD-Wandlers nicht unter 0,380835 V fällt, selbst wenn der Sensor in vollständiger Dunkelheit ist. Daher ist es mit der aktuellen Sensor-PCB nicht möglich, Werte unter einem gewissen Mindestlichtstrom aufzunehmen.

Der Mindestlichtstrom lässt sich berechnen, indem der niedrigste gemessene Wert in das gewählte Polynom  $f_7(x)$  eingesetzt wird, und der Funktionswert mit dem Spannungswerte multipliziert wird:

$$f_7(0,380835) = 10,6715 \frac{cd}{V}$$

Für den Mindestlichtstrom gilt dann:

$$\phi_{min} = 0,380835 V \cdot 10,6715 \frac{cd}{V} = 4,065 cd$$

#### 4.5.8.3 Leitungslänge

Der AD-Wandler nutzt zur Übertragung der Daten das *SPI*- Protokoll [36]. Dabei handelt es sich um eine weit verbreitete Schnittstelle zur Kommunikation zwischen Mikrocontrollern und IC's.

*SPI* steht für „Serial Peripheral Interface“. Die Übertragung basiert auf dem Master-Slave-Prinzip; es gibt genau einen Master und (theoretisch) unendlich viele Slaves. Die Anzahl der Slaves ist in der Praxis von der Anzahl der zur Verfügung stehenden GPIO's des Masters abhängig, die als Chip-Select Pins verwendet werden können.

Für eine erfolgreiche Datenübertragung sind folgende Ein- und Ausgänge erforderlich:

|      |                                                                                                                                                |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CS   | <b>Chip-Select</b> ; aktiviert den entsprechenden Slave, wenn digital eine Null anliegt                                                        |
| SCLK | <b>System Clock</b> ; stellt die Zeitbasis für die Übertragung und ist maßgeblich für die Übertragungsgeschwindigkeit entscheidend             |
| MOSI | <b>Master Out Slave In</b> ; Datenübertragung von Master zum Slave, wenn dessen CS-Signal logisch Null ist.                                    |
| MISO | <b>Master In Slave Out</b> ; Datenübertragung von Slave zu Master, es antwortet der Slave, der vorher über die MOSI-Leitung angesprochen wurde |

Tabelle 20: Signale des SPI-Interfaces

Aus Tabelle 20 geht hervor, dass die Kommunikation immer vom Master aus geht. Dieser fordert einen Slave an, Daten bereit zu stellen, oder GPIO Ausgänge zu beschalten. Danach antwortet der Slave, zum Beispiel mit ausgelesenen Daten.

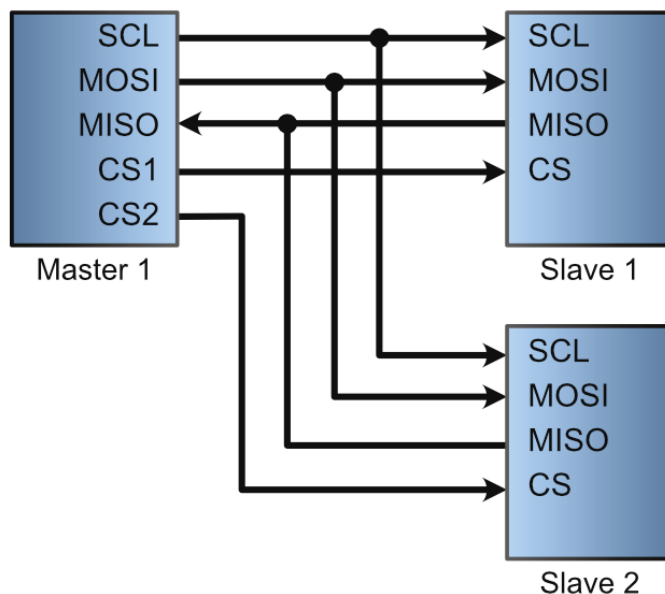


Abbildung 53: Ansteuerung zweier Slaves, [50]

Der Master ist für die Erzeugung des Clock Signals zuständig. Außerdem muss er die Clock so implementieren, wie sie der Slave vorgibt. Um das Clock-Signal eindeutig festzulegen, wird zwischen *Clock Polarity* (CPOL) und *Clock Phase* (CPHA) unterschieden [51]:

- CPOL gibt vor, ob die Clock digital gleich Null sein soll, wenn die Clock-Leitung im Ruhezustand Low (CPOL = 0) oder High (CPOL = 1) ist.
- CPHA entscheidet darüber, ob ein Clock-Signal über die erste (CPHA = 0) oder die zweite (CPHA = 1) Flanke ausgelesen werden soll.

Insgesamt gibt es daher vier Möglichkeiten, das Clock-Signal auszuwerten.

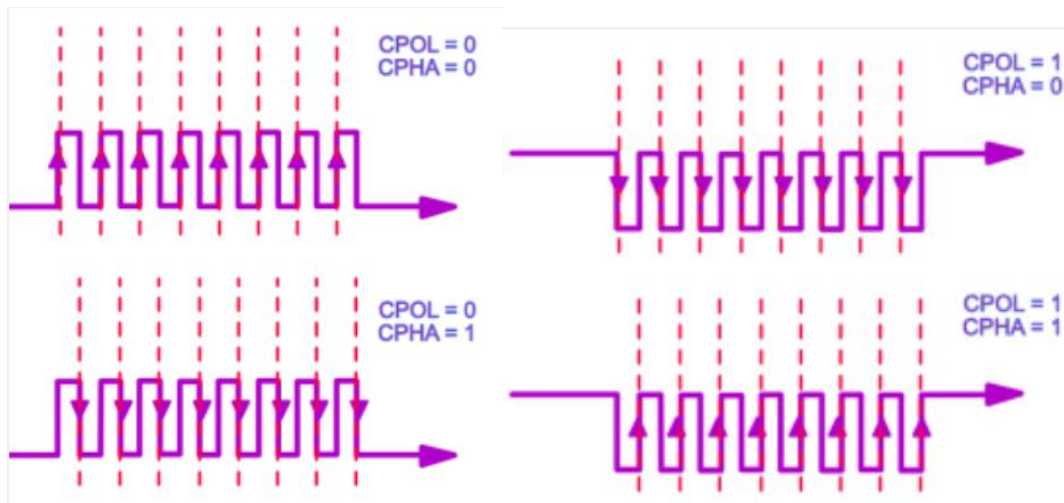


Abbildung 54: Überblick über die Möglichkeiten, das Clock-Signal auszuwerten, [51]

Die Möglichkeiten sind entsprechend der folgenden Tabelle nummeriert:

| SPI-Modus | CPOL | CPHA |
|-----------|------|------|
| 0         | 0    | 0    |
| 1         | 0    | 1    |
| 2         | 1    | 0    |
| 3         | 1    | 1    |

Tabelle 21: SPI-Modi, [50]

Welche dieser Möglichkeiten genutzt wird, legt der Slave fest. In diesem Fall ist das AD-Wandler ADS1255 der Slave, in dessen Datenblatt für die Implementierung der Clock angegeben wird: CPOL = 0, CPHA = 1 [36]. Dies entspricht dem Modus 1.

Der Raspberry Pi, der die Steuerung des Fotogoniometers übernimmt, unterstützt ebenfalls das SPI-Protokoll. Damit ist grundlegend die Voraussetzung dafür geschaffen, dass Steuerung und Sensorbaugruppe miteinander kommunizieren können.

#### Problem:

Aufgrund der Kommunikation per SPI und der Leitungslänge entstehen an beiden Enden der Übertragung Unterschiede zwischen den gesendeten und empfangenen Informationen.

Der Raspberry Pi empfängt vom AD-Wandler bei mehrfacher Messung unterschiedliche Spannungswerte, obwohl am Eingang des ADS1255 konstant eine unveränderte Spannung größer 0 V anliegt.

Auf der anderen Seite reagiert der AD-Wandler nicht immer auf die Anforderung des Masters, einen neuen Spannungswert zu digitalisieren und an den Raspberry Pi zu senden.

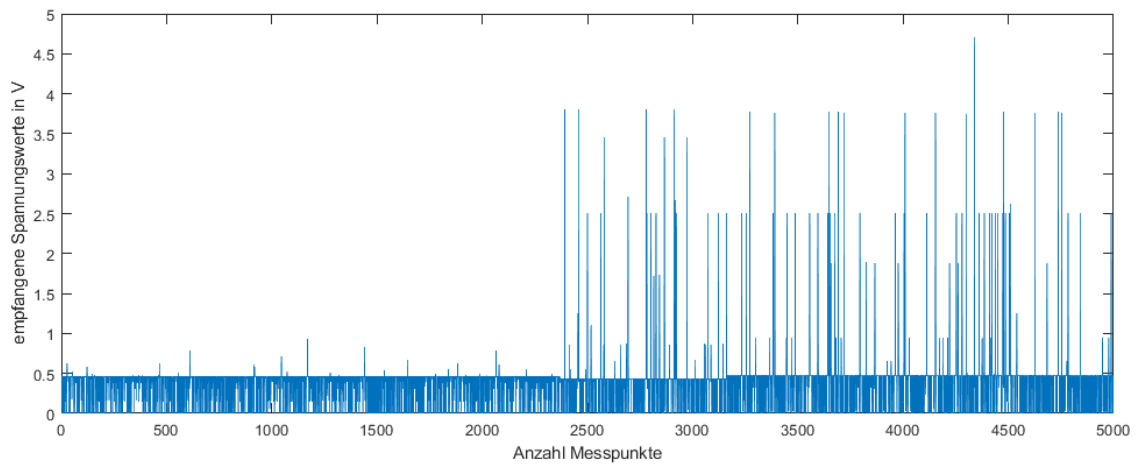


Abbildung 55: Fehler bei 5000-facher Übertragung desselben Spannungswerts

#### Ursache:

Weil für die Übertragung von Informationen in beide Richtungen nur eine Leitung (MOSI oder MISO) verwendet wird, handelt es sich um eine sog. *single-ended* Übertragung. Die einzelnen Informationen (Bits, bzw. Spannungswerte) werden hier auf der jeweiligen Empfängerseite gegenüber dem Minuspol (GND) ausgewertet.

Bei einer single-ended Übertragung lässt sich das empfangene Signal durch elektromagnetische Störungen (EMV/EMF) beeinflussen, da diese mit auf die Übertragungsleitung eingekoppelt werden. Ist dies der Fall, schleichen sich bei digitalen Übertragungssystemen (z.B. SPI) Fehler ein, und der Empfänger empfängt uneindeutige Signalpegel oder fehlerhafte Bits.

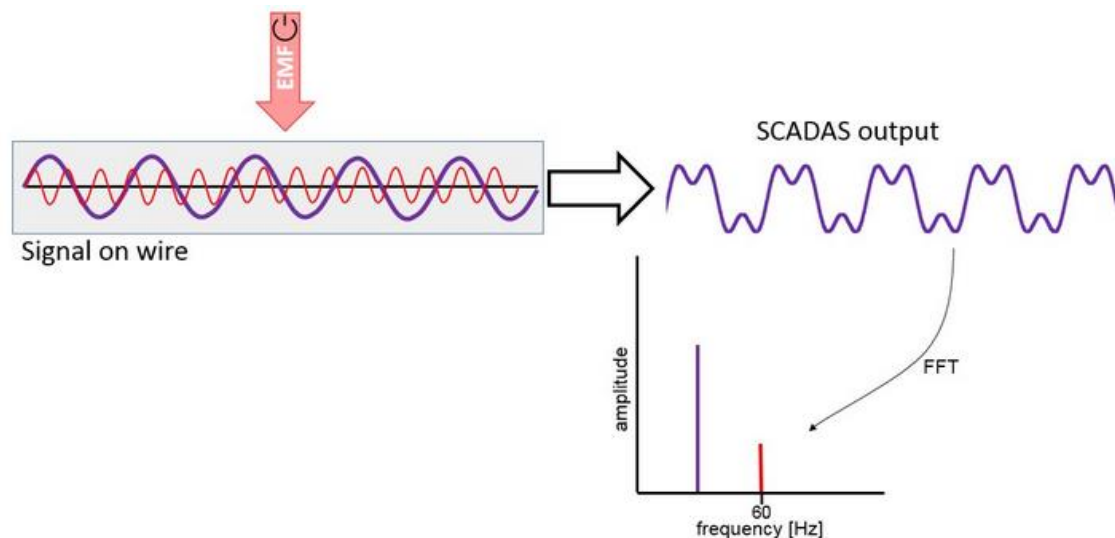


Abbildung 56: Störungen koppeln sich auf single-ended Übertragungsleitungen ein [52]

Die Länge und Verlegeart der Übertragungsleitung ist maßgeblich dafür entscheidend, wie anfällig die Leitung für elektromagnetische Störungen ist (in Abbildung 56 mit „EMF“ gekennzeichnet). Im Fotogoniometer ist die Leitung von Sensor-PCB zum Raspberry Pi ca. 3,5 m lang.

Dies führt dazu, dass einzelne Messwerte nicht richtig übertragen werden. Der AD-Wandler sendet dann aus Sicht des Raspberry Pi 0 V, was nicht dem tatsächlich übermittelten Spannungswert entspricht.

Aufgrund der Übertragungsart und Leitungslänge entstehen also auf beiden Seiten Unterschiede zwischen den gesendeten und empfangenen Informationen.

#### Lösung:

Dem Empfangen uneindeutiger Informationen kann auf verschiedene Arten entgegengewirkt werden:

1. Busgeschwindigkeit: die Taktung des SCLK-Signals wird von 20 KHz auf 5 KHz herabgesetzt. Die Leitung hält durch ihre Kapazität Signalpegel aufrecht, die erst „abgebaut“ bzw. entladen werden müssen. Die niedrigere Übertragungsgeschwindigkeit wirkt der parasitären Kapazität der langen Leitung entgegen, weil Signalpegel bei niedrigerer Taktung mehr Zeit haben, einen eindeutig definierten Zustand einzunehmen.
2. Geschirmte Leitung: Anstelle von Einzeladern wird eine geschirmte Leitung verwendet. Der Schirm ist auf der Seite des Masters an GND angeschlossen und erschwert das Einkoppeln von Störungssignalen auf die Leitung.

3. Das Problem, dass der AD-Wandler teilweise nicht auf eine Anfrage des Masters reagiert, liegt daran, dass die Chip-Select-Leitung auf der Seite des AD-Wandlers nicht das Niveau erreicht, das einer logischen Null entspricht. Die Kapazität der Leitung führt dazu, dass Ladung nicht schnell genug abgebaut werden kann. Mithilfe eines 2 k $\Omega$  Pulldown-Widerstands am Chip-Select Pin des ADS1255 wird ein eindeutiges Spannungsniveau erreicht und der AD-Wandler problemlos angesprochen.
4. Median aus 50 Werten: Trotz der bereits getroffenen Maßnahmen kann es noch vereinzelt zu Ausreißern im empfangenen Messwert kommen. Um diesen Fehlern keinen später in der LVK verwendeten Messwert zuzuordnen, werden bei der Anforderung eines Spannungswerts für die Berechnung der Lichtstärke 50 Messwerte an einer Sensorposition genommen und der Median dieser Messwerte zur weiteren Berechnung in der LVK verwendet.

Die Kombination dieser vier Maßnahmen führt zu einer viel zuverlässigeren Übertragung der ADC-Messwerte:

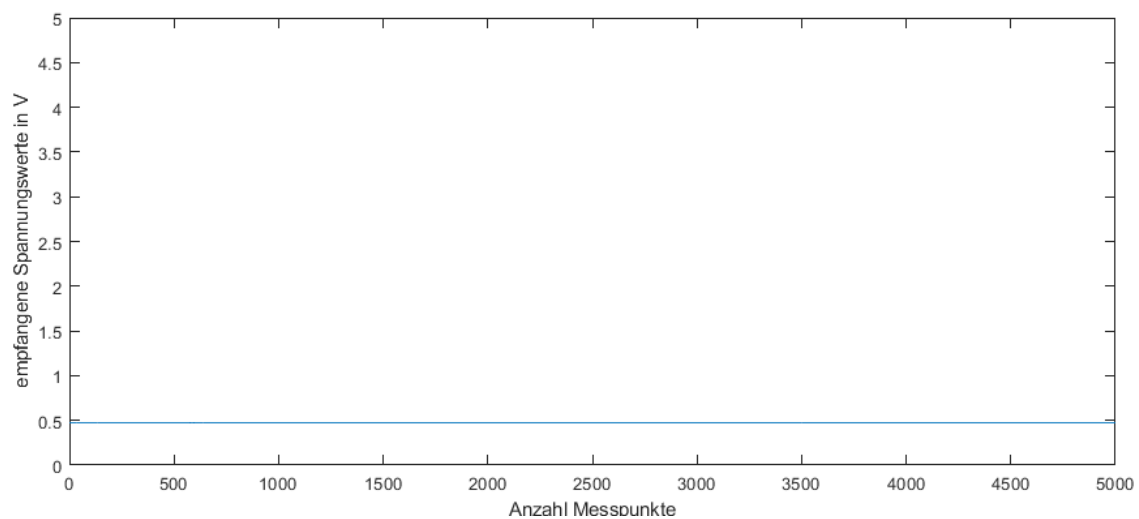


Abbildung 57: Gleiche Messergebnisse über 5000 einzelne Messungen

## 4.6 Steuerung-Hardware

### 4.6.1 Schaltschrank

Steuerung und Bedienung des Fotogoniometers sollen zur einfachen Handhabung an einem zentralen Ort erfolgen.

Dazu muss es einen Platz geben, der die Steuerungs- und Auswerte-Elektronik unterbringt, vor grobem Staub schützt und die Bedienung ermöglicht.

Dazu bietet sich ein Schaltschrank an. In seinem Innern lassen sich die Betriebsmittel übersichtlich montieren und verdrahten.

Die Tabelle in Anhang 2 fasst die erforderlichen Komponenten im Inneren des Schaltschranks zusammen.

Um die Betriebsmittel übersichtlich im Schaltschrank anzuordnen und eine sinnvolle Größe festzulegen, wird in CAD ein digitaler Zwilling eines Schaltschrankzusammenbaus angelegt. Mithilfe des CAD-Modells kann die Größe des Schaltschranks festgelegt und das Modell vervollständigt werden:

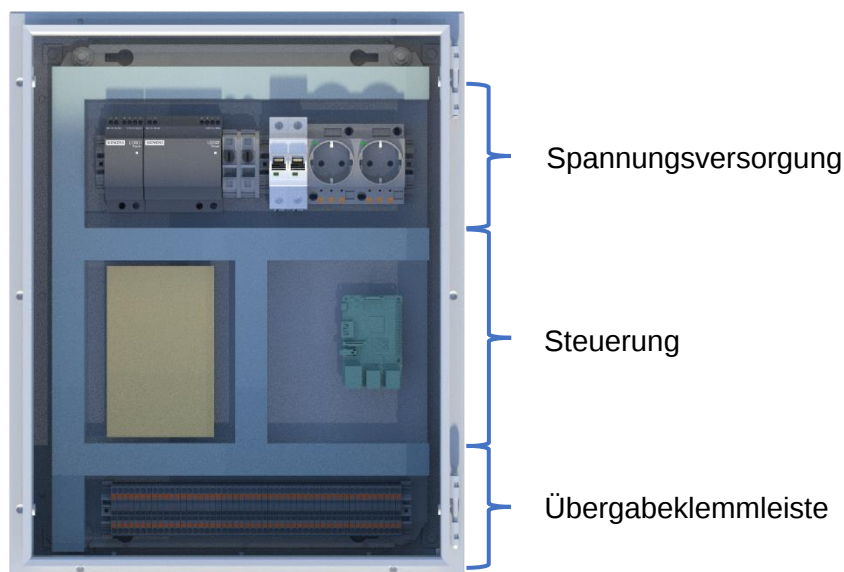


Abbildung 58: Mockup des Schaltschranks in CAD

Der digitale Zwilling dient als Vorlage für den Zusammenbau des tatsächlichen Schaltschranks:



Abbildung 59: Fertiger Schaltschrank (bestückt, verdrahtet & montiert)

#### 4.6.2 Schrittmotortreiber

In einem Schrittmotor gibt es zwei versetzt angeordnete Spulen, die ein Magnetfeld erzeugen, wenn sie mit Strom durchflossen werden.

Je nachdem, welche Spule in welche Richtung bestromt wird, richtet sich die Welle des Schrittmotors aus, so entsteht ein „Schritt“. Eine typische Schrittweite für solche Motoren ist  $1,8^\circ$ . Durch fortgeschrittene Ansteuerungen lassen sich auch Zwischenschritte realisieren (sog. *Microstepping*).

Werden die Spulen gezielt in einer bestimmten Reihenfolge und Polarität nacheinander angesteuert, ergibt sich eine Drehbewegung. Für diese Ansteuerung ist ein sog. *Schrittmotortreiber* zuständig.

Dieser erhält neben einer Spannungsversorgung Signale für die Drehrichtung, einen Schritt, und die Freigabe für das Bestromen der Spulen, sodass ein Haltemoment anliegt [53].

Für die Auswahl passender Schrittmotortreiber ist vor allem der maximal zulässige Spulenstrom für den anzusteuernenden Schrittmotor relevant.

In Abschnitt 4.4 „Bewegung“ sind die Motoren für die Bewegung des Sensors und der Leuchte festgelegt.

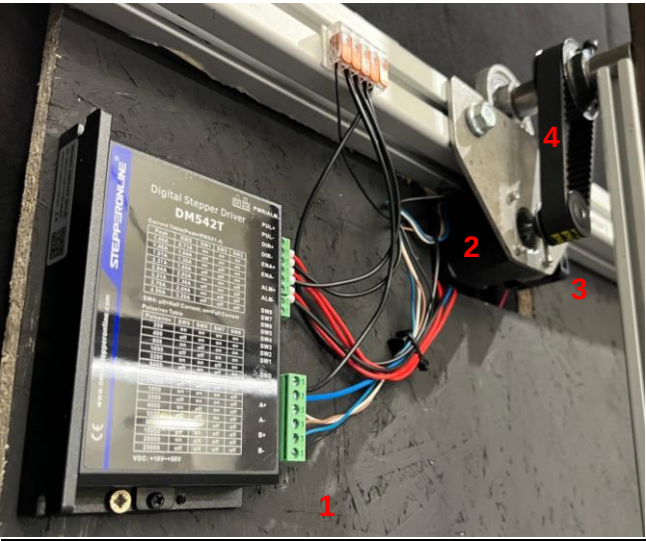
Der Nennstrom der Motoren ist in deren Datenblättern zu finden.

| Schrittmotor Typ                   | Nennstrom |
|------------------------------------|-----------|
| IGUS MOT-AN-S-060-002-042-L-A-AAAO | 1,4 A     |
| IGUS MOT-AN-S-060-005-042-L-A-AAAA | 1,8 A     |

Tabelle 22: Nennströme der verwendeten Schrittmotoren [25], [30]

Die Schrittmotortreiber vom Typ der Firma *Stepperonline* sind für die Aufgabe gut geeignet. Mit leicht zugänglichen DIP-Schaltern lässt sich der Motorstrom und das Microstepping konfigurieren. Außerdem bietet der Treiber sehr gute Montagemöglichkeiten, sodass er sicher im Fotogoniometer untergebracht werden kann.

Die Schrittmotortreiber sind nicht im Schaltschrank bei der restlichen Steuerelektronik untergebracht, sondern in direkter Nähe der Motoren montiert. Dies hat die Vorteile, dass die Leitungen, die die Spulenströme der Motoren führen kurz sind. Damit ist der Spannungsfall und so auch der Leistungsverlust zum Motor hin geringer. Außerdem sind die Motorleitungen wegen ihrer ständig wechselnden Stromrichtungen elektromagnetische Störsender. Durch Minimierung des Abstands zwischen Motortreiber und Motor verbessert sich das EMV-Verhalten des Gesamtsystems.



|   |                                                |
|---|------------------------------------------------|
| 1 | Schrittmotortreiber                            |
| 2 | Schrittmotor                                   |
| 3 | Lüfter                                         |
| 4 | Untersetzung und Anbindung für Sensorhalterung |

Tabelle 23: Legende zu Abbildung 60

Abbildung 60: Schrittmotortreiber mit Schrittmotor für Sensorbewegung

### 4.6.3 Verdrahtungsplan

Ein übersichtlicher Verdrahtungsplan des gesamten Fotogoniometers ist essenziell für eine schnelle Verdrahtung sowie die spätere Fehlersuche bei der Inbetriebnahme. Außerdem erleichtert er anderen Personen die Arbeit, die

eventuell nach Abschluss vorliegender Dokumentation am Fotogoniometer weitere Funktionalitäten ergänzen.

Im Verdrahtungsplan sind alle für den Betrieb relevanten Betriebsmittel enthalten. Um Übersichtlichkeit zu wahren, werden dort die Betriebsmittel in einzelne Gruppen eingeteilt, die dann übersichtlich miteinander verbunden werden können.

Für dessen Erstellung wird die EDA-Software *Altium Designer* verwendet. Die Pläne sind zusätzlich zu den folgenden Abbildungen auch in Anhang 3 verfügbar.

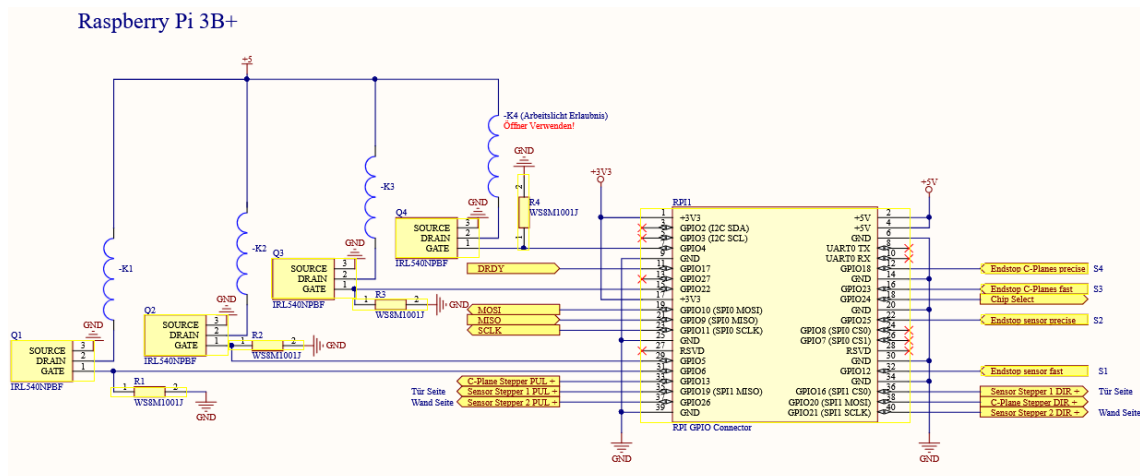


Abbildung 61: Verdrahtungsplan Raspberry Pi GPIOs

Der Raspberry Pi als zentrales Steuerelement kommuniziert mit der Sensorbaugruppe, steuert die Schrittmotoren an und wertet Informationen von Grenztastern aus. Die Aufgaben des Raspberry Pi werden in Abschnitt 4.7 „Steuerung – Software“ mithilfe eines UML-Diagramms näher erläutert.

Zur Aktivierung der Schrittmotortreiber (ENA-Eingang, siehe Abbildung 67) und zur Ansteuerung des Arbeitslichts im Fotogoniometer werden Relais verwendet. Um die erforderliche Spulenspannung der Relais (5 V DC, [54]) zu schalten werden MOSFETs verwendet, deren Gate direkt mit dem 3,3 V der GPIOs des Raspberry Pi angesteuert wird. Damit die in der Gate-Kapazität gespeicherte Ladung wieder abgebaut werden kann, wenn der GPIO logisch Null ist, sind 1 kΩ Widerstände vom Gate gegenüber Masse (GND) verbaut. Ohne die Gate-Widerstände würde das Relais, wenn es abfallen soll, noch einige unbestimmte Zeit angezogen bleiben, bis sich die Gate-Ladung über unbekannte parasitäre Widerstände entladen hat.

## Endstops

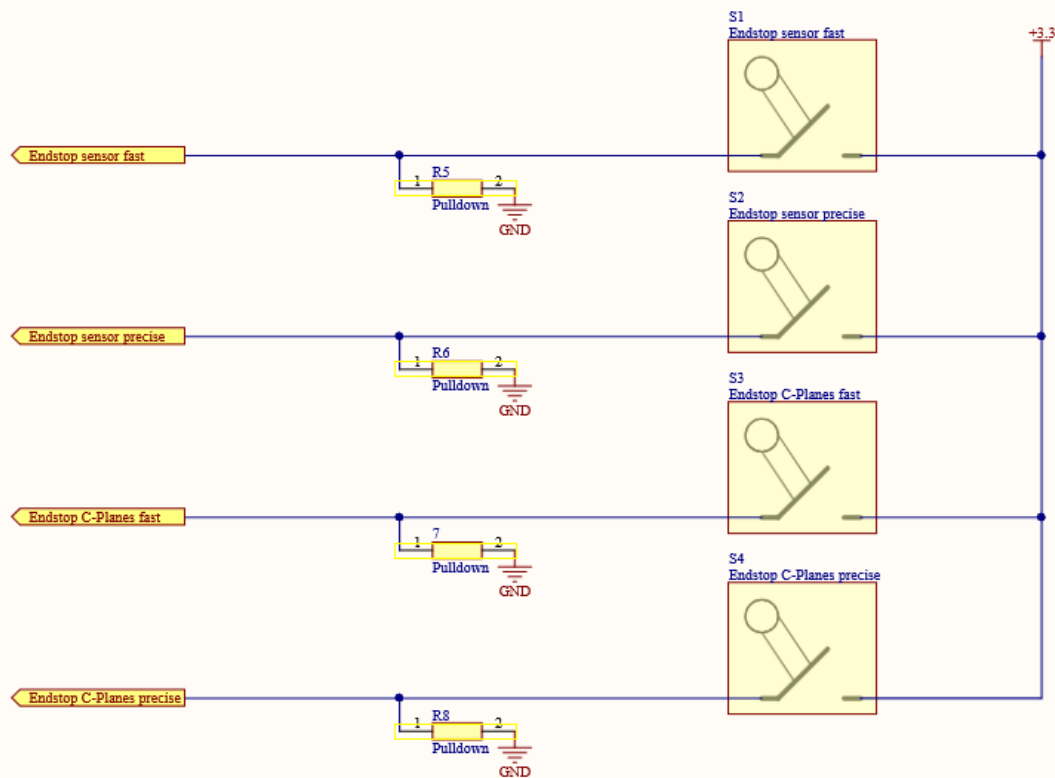


Abbildung 62: Verdrahtungsplan Endtaster

Zu Beginn jeder Messung muss eine Referenzfahrt durchgeführt werden, damit die Nullpunkte der jeweiligen Drehachse bekannt sind. Die Grenztaster sollen bei jeder Referenzfahrt langsam und damit präzise angefahren werden. Um die gesamte Referenzfahrt nicht unnötig in die Länge zu ziehen, gibt es für jede Drehachse zwei Grenztaster:

Der erste (*Endstop fast*) befindet sich weiter vom Nullpunkt entfernt als der zweite Grenztaster. Dieser ist so montiert, dass er die Achse nicht in ihren Freiheitsgraden einschränkt, jedoch betätigt wird, wenn sich der Sensor oder die Leuchte an der entsprechenden Stelle vorbei bewegt. Ist der erste Grenztaster betätigt, wird die entsprechende Achse wesentlich langsamer weiter bewegt, bis sie schließlich den zweiten Grenztaster (*Endstop precise*) auslöst. Mithilfe dieser Konstellation kann eine schnelle und dennoch präzise Referenzfahrt durchgeführt werden.



Abbildung 63: Grenztaster „Endstop fast“ für die Drehung der Leuchte

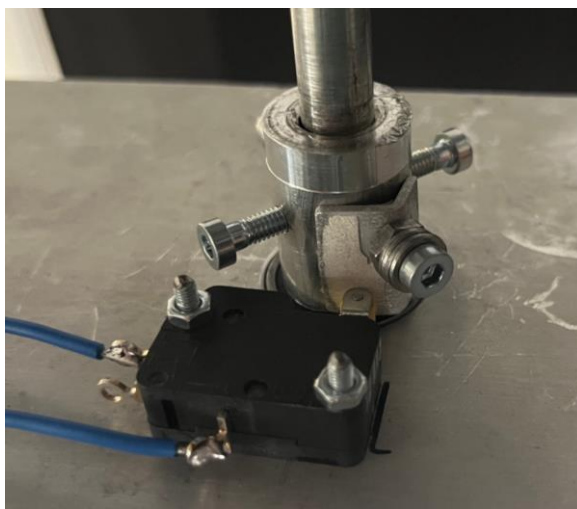


Abbildung 64: Grenztaster „Endstop precise“ für die Drehung der Leuchte

Ob ein Grenztaster ausgelöst hat oder nicht, wird von den GPIO-Pins des Raspberry Pi überwacht, an die der jeweilige Grenztaster angeschlossen ist. Im Ruhezustand ist keiner der Taster betätigt. Um dennoch ein eindeutiges Signal für den Raspberry Pi zur Verfügung zu stellen, wird jede Zuleitung zu den GPIOs mit einem Pullown-Widerstand gegen Masse (GND) gezogen.

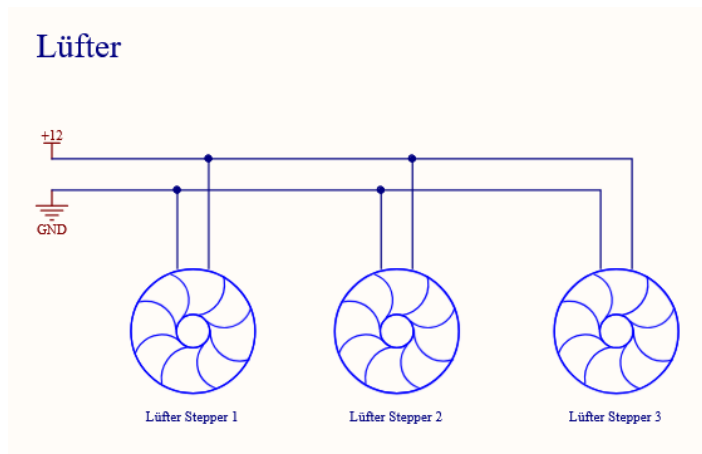


Abbildung 65: Verdrahtungsplan Lüfter

Um ein Überhitzen der Motoren bei langen Betriebszeiten auszuschließen, wird jeder Motor einzeln zusätzlich aktiv mit einem kleinen Lüfter gekühlt.

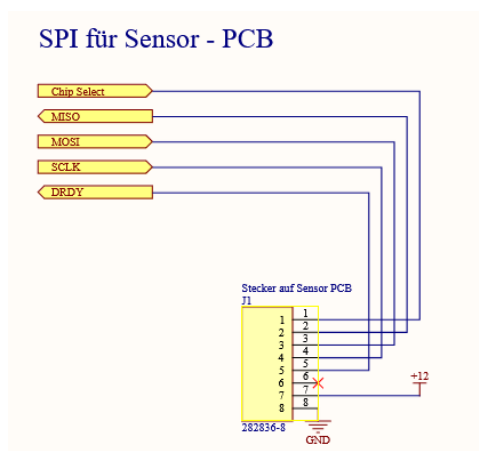


Abbildung 66: Verdrahtungsplan Sensorbaugruppe

Die Sensor PCB wird, wie in Abschnitt 4.5 „Sensorbaugruppe“ beschrieben, mit 12 V versorgt. Die Kommunikation mittels SPI erfolgt auch über GPIOs auf dem Raspberry Pi.

## Stepper Drivers & Motors

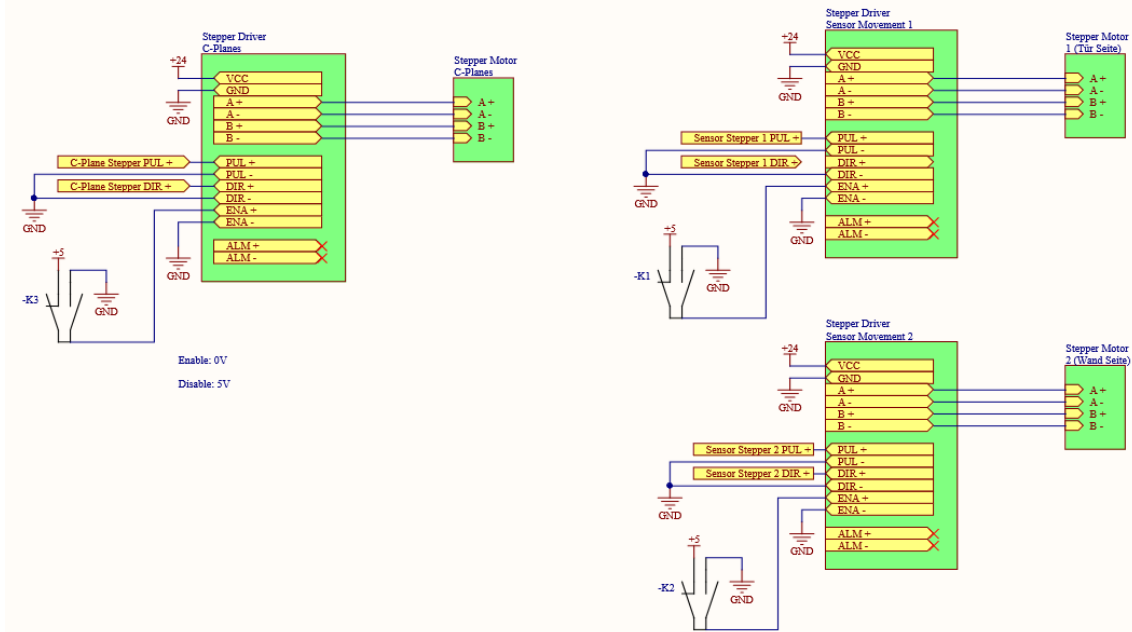


Abbildung 67: Verdrahtungsplan Schrittmotortreiber

Die Treiber der Schrittmotoren werden gemäß Datenblatt [55] angesteuert. Jeder Treiber hat neben der Spannungsversorgung und dem Anschluss für den Motor drei differenzielle Eingänge:

1. PUL+ / PUL-: Bei einem Spannungspuls dreht der Motor um einen Schritt weiter. Bei den gewählten Motoren beträgt die Schrittweite  $1,8^\circ$  Drehwinkel der Welle [25], [30]. An den Schrittmotortreibern kann mit Hilfe von DIP-Schaltern das Microstepping aktiviert werden, womit sich der Motor noch genauer positionieren lässt:

| Microstep | Steps/rev.(for 1.8°motor) | SW5 | SW6 | SW7 | SW8 |
|-----------|---------------------------|-----|-----|-----|-----|
| 1         | 200                       | ON  | ON  | ON  | ON  |
| 2         | 400                       | OFF | ON  | ON  | ON  |
| 4         | 800                       | ON  | OFF | ON  | ON  |
| 8         | 1600                      | OFF | OFF | ON  | ON  |
| 16        | 3200                      | ON  | ON  | OFF | ON  |
| 32        | 6400                      | OFF | ON  | OFF | ON  |
| 64        | 12800                     | ON  | OFF | OFF | ON  |
| 128       | 25600                     | OFF | OFF | OFF | ON  |
| 5         | 1000                      | ON  | ON  | ON  | OFF |
| 10        | 2000                      | OFF | ON  | ON  | OFF |
| 20        | 4000                      | ON  | OFF | ON  | OFF |
| 25        | 5000                      | OFF | OFF | ON  | OFF |
| 40        | 8000                      | ON  | ON  | OFF | OFF |
| 50        | 10000                     | OFF | ON  | OFF | OFF |
| 100       | 20000                     | ON  | OFF | OFF | OFF |
| 125       | 25000                     | OFF | OFF | OFF | OFF |

Abbildung 68: Mikroschritte einstellbar, abhängig von der Position der DIP-Schalter, [55]

Um eine präzise Positionierung des Sensors und der Leuchte zu ermöglichen, wird mithilfe der Mikroschritte eine Auflösung von 25000 Schritten pro Umdrehung gewählt.

2. DIR+ / DIR- : Abhängig davon, ob hier eine Spannung anliegt oder nicht, bewegt sich der Schrittmotor links- oder rechtsherum.
3. ENA+ / ENA- : Der Enable-Eingang aktiviert den Motor. Liegt hier eine Spannung an, werden die Motorspulen mit dem eingestellten Nennstrom bestromt. Damit liegt auch ein Drehmoment an der Motorwelle an. Sollen die Motoren zum Beispiel beim Wechsel der zu vermessenden Leuchte händisch bewegt werden können, müssen sie deaktiviert sein.

[55]

Die Signaleingänge PUL, DIR und ENA für die Schrittmotortreiber können direkt von den GPIOs des Raspberry Pi angesteuert werden.

Als Indikator für Fehler besitzt jeder Treiber eine rote LED, die verschiedene Fehlerzustände markiert sowie einen Alarmausgang, der zum Beispiel zum Ausspielen einer akustischen Warnung oder dem Abschalten des Motors (ENA+ / ENA- Eingang) genutzt werden kann. Der Alarmausgang wird jedoch aufgrund der guten Sichtbarkeit der roten LED an jedem einzelnen Schrittmotor nicht verwendet.

Die Signalausgänge der Treiber könnten direkt von den GPIOs des Raspberry Pi ausgelesen werden.

## 4.7 Steuerung-Software

### 4.7.1 Aufbau der Software

Der Softwareteil der Steuerung besteht im Wesentlichen aus zwei Hauptbestandteilen: Ein User-Interface (GUI) für die Bedienung des Fotogoniometers und einer Ablaufsteuerung für die Vermessung der Leuchten.

Um diese beiden großen Software-Teile näher spezifizieren zu können, werden aus den in Abschnitt 3.1 „Anforderungen“ dargestellten Ansprüchen genauere Vorgaben für jeden Software-Teil erstellt.

#### 4.7.1.1 Anforderungen User-Interface

1. Die Parameter, die zum Abspeichern der Messergebnisse erforderlich sind, müssen vom Benutzer abgefragt werden. Das ist insbesondere der Ort, an dem ein Ordner mit den Messergebnissen erstellt wird, sowie der Name dieses Ordners.
2. Die Anzahl der zu erfassenden C-Planes muss abgefragt werden.
3. Wenn alle Parameter erfasst wurden, soll die Messung gestartet werden können.
4. Für Wartungs- und Inbetriebnahmezwecke soll es einen manuellen Modus geben, der auf alle wesentlichen Funktionen des Fotogoniometers zugreifen kann.

#### 4.7.1.2 Anforderungen Ablaufsteuerung

1. Abhängig von den in der GUI getätigten Eingaben, soll die Messung (auch in mehreren C-Planes) vollständig automatisch ablaufen
2. Vor Beginn der Messwertaufnahme ist eine Referenzfahrt notwendig.
3. Nach Abschluss der Messungen müssen die Messergebnisse aufbereitet und am vorgegebenen Ort abgespeichert werden.

### 4.7.2 Programmiersprache und Steuerungsauswahl

Zur Entwicklung der Software, die den Messablauf steuert und die GUI bereitstellt, gibt es mehrere Optionen, von denen hier drei bekannte Vertreter untereinander abgewogen werden:

Industriesteuerungen sind sehr langlebige und robust gebaute Steuerungen, die dafür ausgelegt sind, im Dauerbetrieb sicher zuverlässig zu arbeiten. Je nach Hersteller (Siemens, Wago, Beckhoff etc.) lassen sie sich in verschiedenen Entwicklungsumgebungen programmieren. Abhängig vom jeweiligen Anwendungsfall lässt sich eine Steuerung so konfektionieren, dass sie auf ihre Aufgabe passend zugeschnitten ist. Weil diese Steuerungen sehr hohe Anforderungen erfüllen müssen, sind sie vergleichsweise teuer (Siemens S7-1200 CPU: ca. 240€, Stand 28.11.2024, [56]).

Je nach Hersteller fallen für die Entwicklungsumgebung noch Lizenzkosten an. Industriesteuerungen sind also eine sehr zuverlässige und robuste, dafür teure Lösungsvariante.

Die Programmiersprache *Python* dagegen ist eine Open-source-Programmiersprache, die neben der rein funktionalen Programmierung auch einen objektorientierten Ansatz liefert. Die Programmiersprache wird von der non-

profit-Organisation *Python Software Foundation* verwaltet und lizenziert [57], [58].

Aufgrund des Open-source-Ansatzes sind für Python umfangreiche Bibliotheken sowie eine große Community im Internet frei verfügbar. Python verfolgt zudem den Ansatz, den Programmierstil einfach und gut lesbar zu halten [59].

Eine mögliche Alternative zu Python ist die Programmiersprache *Java*. Ihr Vorteil ist ihre Plattformunabhängigkeit. Programme können also ohne Änderungen auf verschiedenen Endgeräten mit verschiedenen Betriebssystemen verwendet werden. Die Nutzung vom *Java Development Kit (JDK)* ist mit dem *Oracle Open JDK* kostenlos, soll das *Oracle JDK* verwendet werden, ist zwar ein Support mit enthalten, jedoch fallen für die kommerzielle Nutzung Lizenzgebühren an. Für die private Nutzung und zu Testzwecken ist auch das *Oracle JDK* kostenlos verfügbar.

Der Einsatz im Fotogoniometer erfordert weder eine besondere Plattformunabhängigkeit noch extreme Zuverlässigkeit oder Robustheit der Steuerung. Für die Nutzung des Messgeräts ist es ausreichend, wenn die Software ausschließlich auf der verwendeten Plattform läuft, weil die Messergebnisse am Ende in Form universeller Dateiformate (PDF, CSV etc.) auf einem Datenträger gespeichert werden können.

Hinzu kommt, dass das Fotogoniometer nach seiner Fertigstellung nicht im Dauerbetrieb arbeiten wird. Es wird für eine Messung eingeschaltet und danach wieder heruntergefahren.

Der Einsatz der Programmiersprache Python hat den zusätzlichen Vorteil, dass als zentrales Steuerelement ein *Raspberry Pi* verwendet werden kann. Dies ist ein Einplatinencomputer, der neben den gängigen Schnittstellen auch GPIOs zur Verfügung stellt. Diese können zum Beispiel für Steuerung der Schrittmotoren oder das Auslesen der Endschalter verwendet werden. Eine für die Sensorbaugruppe passende SPI-Schnittstelle (MISO, MOSI) wird ebenfalls mithilfe der GPIOs zur Verfügung gestellt. Den Raspberry Pi gibt es in mehreren Varianten, die sich hauptsächlich in ihrer Rechenleistung, Bauart, Anzahl der GPIOs und im Preis unterscheiden. Die Steuerungsaufgabe und das Bereitstellen der GUI ist nicht besonders rechenintensiv, allerdings ist es für die Verwendung eines Displays praktisch, wenn ein HDMI-Port vorhanden ist. Zudem muss der Computer mindestens vier USB-Anschlüsse zur Verfügung stellen (Tastatur, Maus, Touch-Eingaben vom Display und USB-Verlängerung für USB-Stick zum Abspeichern der Messergebnisse). Der günstigste Raspberry Pi, der diese Anforderungen erfüllt und ausreichend viele GPIOs zur Verfügung stellt, damit nachträgliche Änderungen noch eingeführt werden können, ist das Modell 3 B+ [60].

Die Programmierung kann direkt in einer Entwicklungsumgebung auf dem Pi stattfinden. Auch eine Remotedesktopverbindung mit *TeamViewer* oder dem *Real VNC Viewer* ist möglich.

#### 4.7.2.1 User Interface

Für die Konzeptionierung der GUI gibt es zwei Optionen:

| Möglichkeit 1                                                                                                                                                                                                                                             | Möglichkeit 2                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ein Hauptbildschirm, der alle notwendigen Daten abfragt und die Möglichkeit gibt, die Messung zu starten, wenn alle Daten erfasst sind.                                                                                                                   | Die GUI begleitet den User während der Benutzung des Fotogoniometers. Dabei werden verschiedene Prüfungen durchgeführt (Prüfling eingeschaltet, Arbeitslicht aus, wie viele C-Planes, etc.). Der Nutzer erhält so immer die nächste Handlungsempfehlung durch die GUI. |
| <u>Vorteile:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Der Nutzer sieht auf einen Blick, welche Informationen von ihm gefordert werden</li> <li>• Weniger aufwendig zu implementieren.</li> <li>• Schnellere Bedienung bei geübten Nutzern.</li> </ul> | <u>Vorteile:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Der Nutzer weiß für jeden Schritt genau, was zu tun ist.</li> <li>• Bei Fehleingaben kann ein Schritt zurückgesprungen werden.</li> </ul>                                                                    |
| <u>Nachteile:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bei Fehleingaben muss ggf. von vorne begonnen werden.</li> <li>• Überforderung von unerfahrenen Nutzern.</li> </ul>                                                                            | <u>Nachteil:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Erheblich mehr Aufwand zur Implementierung.</li> </ul>                                                                                                                                                       |

Tabelle 24: Gegenüberstellung GUI-Konzepte

Der Personenkreis, der mit dem Fotogoniometer interagiert, werden zum Zeitpunkt der Planung (13.06.2024) ausschließlich qualifizierte Mitarbeiter der Firma *Lufthansa Industry Solutions AS GmbH* sein. Weil in diesem Personenkreis ein gewisses Grundwissen bereits vorhanden, und der Implementierungsaufwand für die Variante mit einem Hauptbildschirm geringer ist, fällt die Entscheidung auf die Möglichkeit 1. Der Mehrwert, den eine schrittweise Benutzerführung durch die Messung (Möglichkeit 2) bietet, wird hier nicht benötigt.

In Python ist standardmäßig eine Bibliothek namens „tkinter“ zum Erstellen grafischer Benutzeroberflächen enthalten [61]. Diese wird genutzt, um die Benutzeroberfläche zu gestalten. Mithilfe von Frames mit verschiedenen Inhalten, die im Fenster gitterförmig angeordnet werden, lässt sich eine übersichtliche Struktur auf einer Seite schaffen:

The image shows the main user interface of the 'LHIND Fotogoniometer'. It features a dark blue header bar with a logo on the left, the title 'LHIND Fotogoniometer' in the center, and 'RESET' and 'START' buttons on the right. Below the header, there are three main input sections arranged in a grid. The first section is for '1. Name Messdaten Ordner:' with a text input field and an 'OK' button. The second section is for '2. Speicherort für Messergebnisse:' with a text input field and a 'Laufwerk wählen' button. The third section is for '3. Anzahl zu vermessenden C-Planes:' with three buttons labeled '1', '2', and '3'. A 'manueller Modus' button is located on the left side of the grid.

Abbildung 69: User Interface des Fotogoniometers

Bei Betätigung des Buttons für den manuellen Modus wird ein großer Frame eingeblendet, der die Steuerungselemente enthält. Ist die manuelle Steuerung abgeschlossen, kann der Frame mit Hilfe des Kreuzes in der oberen rechten Ecke wieder ausgeblendet werden:

The image shows the 'Overlay für manuellen Betriebsmodus'. It is a large window with a light gray background and a dark blue border. In the top right corner, there is a close button labeled 'X'. The interface is organized into a grid of controls. The first three rows each have a label on the left and two buttons ('EIN' and 'AUS') on the right: 'Arbeitslicht', 'Antrieb C-Planes', and 'Antrieb Sensor'. The next two rows have a label on the left and a single 'Start' button on the right: 'Home C-Planes' and 'Home Sensor'. The following row has a label on the left, a 'Start' button, and an 'Initialwert' text input field: 'Lichtstärke Messen (Candela)'. The last two rows have a label on the left, a text input field with a question mark, and two buttons ('Start Linksum' and 'Start Rechtsrum') on the right: 'Leuchte drehen (Grad)' and 'Sensor drehen (Grad)'.

Abbildung 70: Overlay für manuellen Betriebsmodus

Jeder Button in der GUI erhält außerdem eine separate Funktion, mit der er sich aktivieren und deaktivieren lässt. Damit hat die Ablaufsteuerung später die Möglichkeit, Usereingaben zu unterbinden, während eine Messung läuft. Dies schafft zusätzlich die Möglichkeit die Messung erst dann zu starten, wenn alle notwendigen Eingaben erfolgt sind.

Beim Betätigen eines Buttons wird eine Funktion (sog. *Callback*) aufgerufen. Bei der Wahl der Befehle innerhalb eines Callbacks sind keine Grenzen gesetzt. In der GUI werden die Callbacks dafür verwendet, andere Buttons zu aktivieren oder zu deaktivieren, oder um Variablen in einem anderen Python Skript zu beschreiben. Damit dies möglich ist, muss das Python Skript, das angesprochen werden soll, importiert werden. Erst dann kann auf Variablen oder Funktionen des importierten Skripts zugegriffen werden.

Der Code für die GUI („GUI\_work.py“) befindet sich mit dem Code für die Ablaufsteuerung in Anhang 4 dieser Thesis.

#### 4.7.2.2 Ablaufsteuerung

Die Modellierung eines Messablaufs findet zunächst mit einem UML-Diagramm statt. Mit dessen Hilfe ist es möglich eine State-Machine aufzusetzen, welche die im UML-Diagramm festgelegten Funktionalitäten erfüllt.

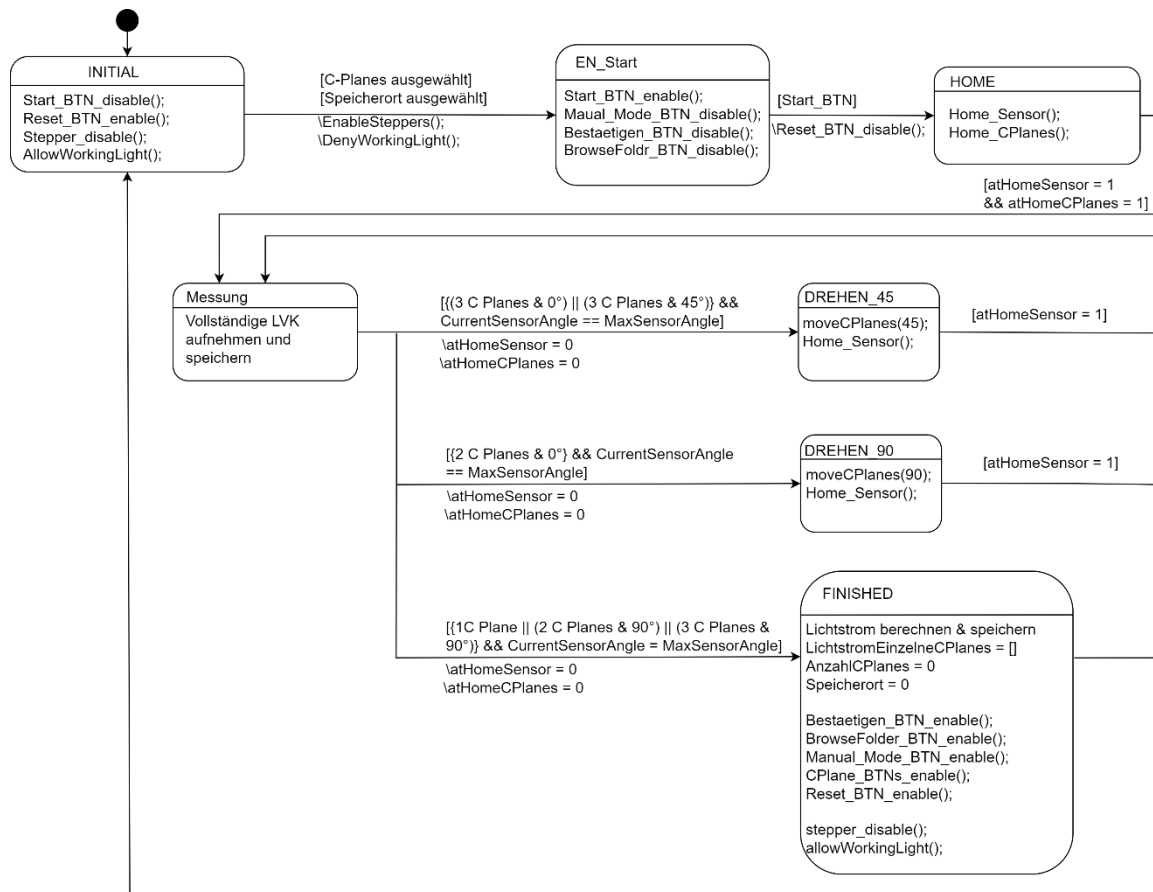


Abbildung 71: UML State Chart der Ablaufsteuerung

Der Messablauf wird mithilfe des State-Charts in mehrere Einzelschritte unterteilt, die im Folgenden näher beschrieben werden:

**INITIAL:**

Dies ist der Ausgangszustand der State-Machine, nachdem sie gestartet wurde. Ausschließlich hier hat der Benutzer die Möglichkeit, in den manuellen Modus zu wechseln und so gezielt auf einzelne Funktionalitäten des Fotogoniometers zuzugreifen. Außerdem können hier die für eine Leuchtenmessung relevanten Parameter übergeben werden. Dabei handelt es sich konkret um den Namen und den Ort eines Ordners, in dem die Messergebnisse abgelegt werden. Außerdem muss die Anzahl der zu vermessenden C-Planes (1/2/3) festgelegt werden.

**EN\_Start:**

Dieser Zustand wird betreten, sobald alle Parameter für eine Messung eingegeben wurden. Hier wird der „Start“-Button aktiviert, sodass der User jetzt erst die Möglichkeit hat, die Messung zu starten. Der manuelle Modus kann jetzt nicht mehr betreten werden. Außerdem werden alle anderen Buttons für die Parametereingabe deaktiviert.

**HOME:**

Durch Drücken des „Start“-Buttons erfolgt der Wechsel in diesen Zustand. Hier wird zunächst die Sensorbaugruppe mit Hilfe der beiden Endschalter „Endstop\_sensor\_fast“ und „Endstop\_sensor\_precise“ in die Ausgangsposition gebracht, danach erfolgt das gleiche für die Drehachse der Leuchte. Sind beide Drehachsen in der Grundstellung, wird eine Flag gesetzt, die den Übergang in den nächsten Zustand markiert.

**MESSUNG:**

In diesem Zustand werden die tatsächlichen Messwerte aufgenommen. Dabei nimmt die Sensorbaugruppe einen Messwert auf und wird danach  $1^\circ$  um die Leuchte bewegt. Danach wird wieder ein Messwert genommen. Die Messwerte werden in einem mehrdimensionalen Array in einem separaten Python Skript abgelegt. Die erste Dimension des Arrays ist die Anzahl der zu vermessenden C-Planes, die zweite Dimension sind die einzelnen Messwerte in  $1^\circ$ -Schritten um die Leuchte herum.

Ein Messwert wird dabei wie in Abschnitt 4.5 „Sensorbaugruppe“ unter Beachtung der dort geschilderten Herausforderungen aufgenommen.

Aufgrund der Anbindung der Leuchtenaufhängung am Rahmen des Messgeräts ist es dem Sensor nicht möglich,  $360^\circ$  um die Leuchte herum zu messen. Die Werte der Winkel, die von der Sensorbaugruppe nicht erfasst werden können, werden mit Ersatzmesswerten ergänzt. Dabei handelt es sich um den Durchschnitt der beiden direkt an den „toten Bereich“ angrenzenden Werte.

**Drehen 45/90:**

Die Leuchte wird um  $45^\circ$  oder  $90^\circ$  gedreht, um die Messung in der nächsten C-Plane zu erreichen. Nach der Drehung wird wieder in den Zustand „Messung“ gewechselt.

## FINISHED:

Dieser Zustand wird betreten, wenn alle Messungen in den gewünschten C-Planes beendet sind. Hier findet die Aufbereitung der Messwerte und das abschließende Zurücknehmen aller zwischenzeitlich gesetzten Flags statt. Zusätzlich wird das Arbeitslicht im Fotogoniometer eingeschaltet und alle Schrittmotoren deaktiviert.

Die Aufbereitung der Messwerte erfolgt schrittweise. Zunächst muss aus den einzelnen Lichtstärken der Lichtstrom der Leuchte errechnet werden. Danach werden die einzelnen Lichtstärken in Bezug auf den Lichtstrom als LVK zur Verfügung gestellt. Zusätzlich werden die für die Erstellung der LVK verwendeten Rohwerte als CSV-Datei abgespeichert. Sind all diese Operationen abgeschlossen, wechselt die State-Machine wieder in den Anfangszustand „INITIAL“.

Die Herleitung der Berechnungsvorschrift für den Lichtstrom ist im Folgenden erklärt. Sie bezieht sich auf die in Kapitel 2 „Grundlagen“ vorliegender Studie behandelten mathematischen Gesetzmäßigkeiten.

Die Lichtstärke allgemein ist eine differentielle Größe [8].

Wenn die Lichtstärke die Ableitung des Lichtstroms für einen infinitesimal kleinen Raumwinkel ist, dann ist der Lichtstrom das Integral der Lichtstärke über den Raumwinkel [62]. Für den gesamten Lichtstrom einer allgemeinen Lichtquelle gilt also:

$$\phi_V = \int_{\Omega} I_V(\vartheta) d\Omega$$

Formelzeichen:

- $\vartheta$ : Winkel unter dem die Lichtstärke gemessen wird

Um diese Formel lösen zu können, muss zunächst der differentielle Raumwinkel  $d\Omega$  betrachtet werden:

Für den Raumwinkel allgemein gilt:

$$\Omega = \frac{A}{r^2}$$

Für den differentiellen Raumwinkel gilt also:

$$d\Omega = \frac{dA}{r^2}$$

Die differentielle Fläche  $dA$  (ein infinitesimal kleines Flächenelement auf der Kugeloberfläche) kann näherungsweise als Rechteck betrachtet werden. Für den Flächeninhalt eines Rechtecks mit der Höhe  $a$  und der Breite  $b$  gilt:

$$A_{\text{Rechteck}} = a \cdot b$$

Die Höhe  $a$  eines Rechtecks, das durch einen kleinen Winkel  $d\vartheta$  auf eine Kugel (im Schnitt betrachtet eine Kreisbahn) projiziert wird, lässt sich näherungsweise als die Länge eines Kreisstücks mit dem Radius  $r$  und dem Winkel  $d\vartheta$  (in Radiant). Damit gilt:

$$a = r \cdot d\vartheta$$

Die Breite  $b$  des auf die Kugeloberfläche projizierten Rechtecks ist zusätzlich vom Sinus des Zenitwinkels  $\vartheta$  abhängig:

$$b = r \cdot d\varphi \cdot \sin(\vartheta)$$

Formelzeichen Erklärung:

- $d\varphi$ : sehr kleiner Azimutwinkel in Radiant
- $\vartheta$ : Zenitwinkel in Radiant, unter dem das sehr kleine Rechteck auf die Kugel projiziert wird

Der differentielle Raumwinkel kann also betrachtet werden als:

$$d\Omega = \frac{dA}{r^2} = \frac{(r \cdot d\vartheta) \cdot (r \cdot d\varphi \cdot \sin(\vartheta))}{r^2} = d\vartheta \cdot d\varphi \cdot \sin(\vartheta)$$

[3]

Durch die erhaltene Beschreibung des differentiellen Raumwinkels lässt sich die Formel für den Lichtstrom folgendermaßen umschreiben:

$$\phi_V = \int_{\Omega} I_V(\vartheta) d\Omega = \int_{\Omega} I_V(\vartheta) \cdot d\vartheta \cdot d\varphi \cdot \sin(\vartheta)$$

Um das Integral zu lösen, wird zunächst eine um die C-Achse (C-Planes) rotationssymmetrische Beleuchtung (z.B. Glühbirne) postuliert. Die Lichtstärke ist so nur noch vom Zenitwinkel  $\vartheta$  und nicht mehr vom Azimutwinkel  $\varphi$  abhängig.

Das Integral über den gesamten Raumwinkel wird daher in seine Bestandteile zerlegt und als Integrationsgrenzen die maximal möglichen Winkel in Kugelkoordinaten für Azimut- und Zenitwinkel eingesetzt:

$$\phi_V = \int_{\Omega} I_V(\vartheta) \cdot d\vartheta \cdot d\varphi \cdot \sin(\vartheta) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} I_V(\vartheta) \cdot \sin(\vartheta) d\vartheta d\varphi$$

Umschreiben des Integrals führt zu:

$$\phi_V = \int_0^{2\pi} 1 d\varphi \cdot \int_0^{\pi} I_V(\vartheta) \cdot \sin(\vartheta) d\vartheta = 2\pi \cdot \int_0^{\pi} I_V(\vartheta) \cdot \sin(\vartheta) d\vartheta$$

[4]

Durch die diskrete Messung im Fotogoniometer in 1°-Schritten lässt sich das Integral näherungsweise als Summe betrachten:

$$\phi_V \approx 2\pi \cdot \sum_{\vartheta=0}^{180} I_V(\vartheta) \cdot \sin(\vartheta) \cdot \Delta\vartheta$$

Formelzeichen:

- $\Delta\vartheta$ : Winkel zwischen zwei Messpunkten in Radiant

Die Formel beschreibt, dass der Sensor nur halb um die Leuchte bewegt wird. In der Praxis ist dies jedoch nicht machbar, weil die zu vermessende Leuchte:

1. in den meisten Fällen keine um die C Achse rotationssymmetrische Lichtstärke ausstrahlt.
2. Selbst bei einer um die C-Achse rotationssymmetrischen Lichtstärkeverteilung nur eine Hälfte der Leuchte gemessen werden würde. Dabei können wichtige Bereiche bei der Messung ausgelassen werden.

Für die Berechnung des Lichtstroms ergibt sich dafür folgender Unterschied zwischen Formel (Theorie) und Fotogoniometer (Praxis):

Im Fotogoniometer fährt der Sensor ganz um die Leuchte herum, während in der Formel nur der Zenitwinkel 0° bis 180°, also die Hälfte, betrachtet wird. Außerdem ist der Bereich des sinnvollen Azimutwinkels im Fotogoniometer 0° bis 90° und nicht 0° bis 360° wie in der Formel. Um die beiden nicht abgedeckten Segmente noch zu berücksichtigen, wird der Faktor  $\pi$  und nicht  $\frac{\pi}{2}$  angesetzt.

$$\phi_V = \pi \cdot \int_0^{2\pi} I_V(\vartheta) \cdot |\sin(\vartheta)| d\vartheta$$

Da für Winkel  $\pi < \vartheta < 2\pi$  der Wert des Sinus negativ wird, muss hier der Betrag verwendet werden. Diese Formel beschreibt nun den Gesamtlichtstrom der Leuchte, wenn genau eine C-Plane gemessen wird und vereinfacht sich durch diskrete Messung auf:

$$\phi_V \approx \pi \cdot \sum_{\vartheta=0}^{360} I_V(\vartheta) \cdot |\sin(\vartheta)| \cdot \Delta\vartheta$$

Mithilfe der Messung mehrerer C-Planes kann der Lichtstrom noch genauer bestimmt werden. Dabei wird die jetzt erhaltene Formel auf jede gemessene C-Plane angewandt und die Ergebnisse aufsummiert. Die so erhaltene Gesamtsumme muss dann noch mit dem Kehrwert der Anzahl der gemessenen C-Planes gewichtet werden.

Beispiel:

- 1 C-Plane: gemessener Lichtstrom 1. C Plane:  $n \text{ lm}$  → Gesamtlichtstrom der Leuchte:  $\frac{1}{1} \cdot n \text{ lm} = n \text{ lm}$
- 3 C-Planes:
  - Gemessener Lichtstrom 1. C-Plane:  $n \text{ lm}$
  - Gemessener Lichtstrom 2. C-Plane:  $m \text{ lm}$
  - Gemessener Lichtstrom 3. C-Plane:  $x \text{ lm}$
  - Gesamtlichtstrom der Leuchte:  $\frac{1}{3} \cdot (n + m + x) \text{ lm}$

Wurde der Lichtstrom der Leuchte berechnet, werden die einzelnen Lichtstärken durch den Lichtstrom der Leuchte in Kilolumen geteilt. Damit wird eine Vergleichbarkeit der Zahlenwerte verschiedener Leuchten untereinander erreicht.

Der Lichtstrom der gesamten Leuchte, die errechneten Lichtströme pro C-Plane und die einzelnen Helligkeiten in  $\frac{\text{cd}}{\text{klm}}$  für jeden Messpunkt in allen C-Planes werden am dafür vorgesehenen Ort abgespeichert.

Die einzelnen Helligkeiten für jede C-Plane werden zusätzlich als LVK visuell aufbereitet und als PDF gespeichert.

Damit in der LVK auf einen Blick alle wichtigen Daten zu erkennen sind, ergeben sich einige Anforderungen an die Aufbereitung. Dabei wird sich beispielhaft an der LVK der Leuchte *CENTAURUS 270 DDP\_Prismenscheibe, 27020 lm, 159W, ESG glasklar, breitstrahlend* der Firma *Norka* [63] orientiert:

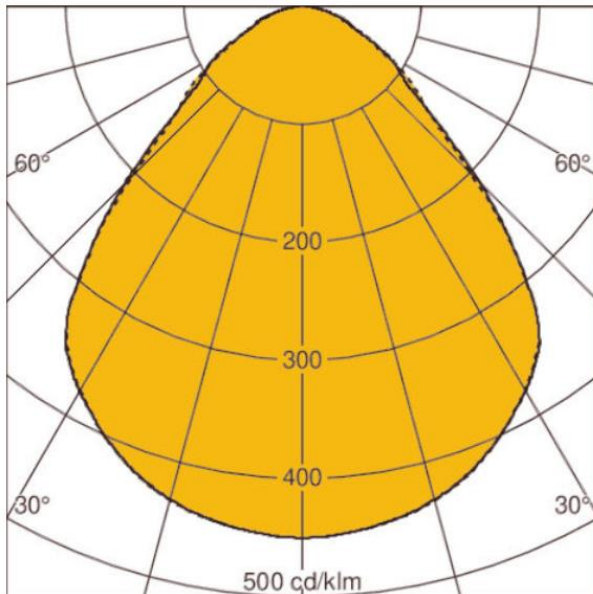


Abbildung 72: LVK der Leuchte *CENTAURUS 270, breitstrahlend* [63]

Anhand des Beispiels lassen sich wichtige Merkmale von Lichtverteilungskurven ableiten:

- Verwendet wird ein Polarkoordinatensystem mit dem Ursprung des Lichts oben in der Mitte.
- Die Beleuchtungsstärke abhängig vom Winkel ist mit einer dickeren, schwarzen Linie gekennzeichnet.
- Der geschlossene Bereich innerhalb der Linie ist farblich markiert, damit dem Leser des Diagramms klar wird, welche Bereiche „beleuchtet“ sind.

Diese Eigenschaften lassen sich gut auf die aufgenommenen Werte einer Leuchte anwenden. Mithilfe der Bibliothek „matplotlib“ in Python [64] lassen sich Datensätze plotten.

Beispielhaft ist hier die Abbildung der LVK der Leuchte 7651 HE LN 80-840ETDD L1500 der Firma Trilux abgebildet, die mit dem Fotogoniometer aufgenommen wurde:

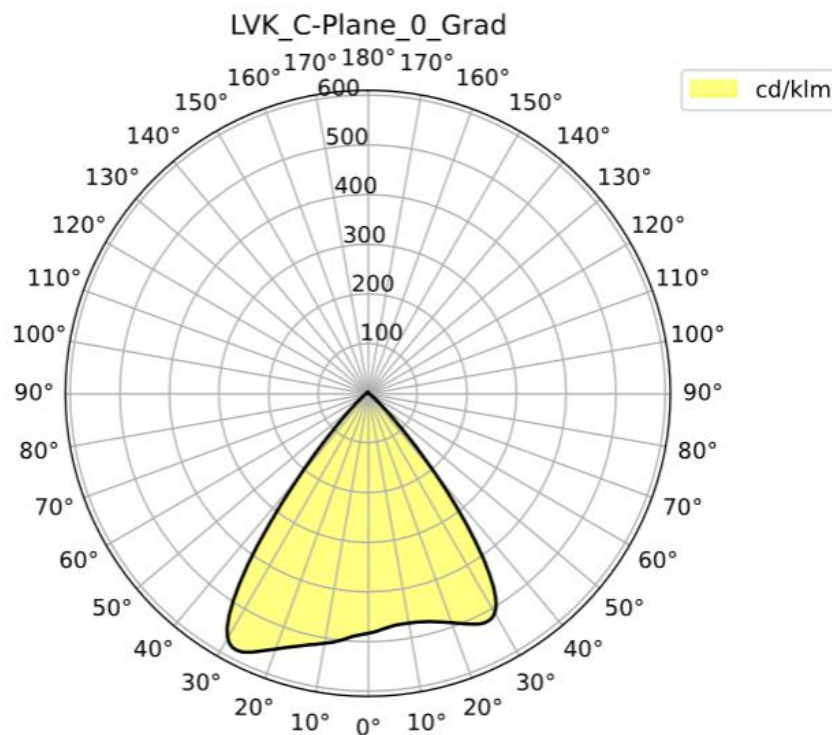


Abbildung 73: Beispiel für die grafische Aufbereitung der LVK

Der Ursprung des Polarkoordinatensystems ist hier nicht oben mittig, wie Abbildung 72 zeigt, sondern zentriert in der Darstellung. Dies bietet zusätzlich die Möglichkeit, auch LVKs von Leuchten abzubilden, die nach oben strahlen.

#### 4.7.3 Herausforderung bei Nebenläufigkeit

Der Raspberry Pi kann immer nur einen Python-Befehl pro Thread zurzeit ausführen. Wenn der Start des State-Machine Skripts zuerst die GUI startet, verhindert das den Aufruf anderer Skripte, da die GUI permanent im Vordergrund läuft und auf Usereingaben wartet. Das Problem lässt sich lösen, indem die GUI in einem separaten Thread im „Hintergrund“ gestartet wird, sodass die State-Machine den Aufruf anderer Skripte und Funktionen weiterhin regeln kann.

Damit bleibt sowohl die State-Machine als auch die GUI reaktiv. Das User-Interface arbeitet aus Sicht der CPU im Hintergrund.

## 5 Evaluation der Messdaten

Für die Beurteilung des gebauten Fotogoniometers und den Vergleich mit den Angaben der Leuchtenhersteller liegen sechs Leuchten samt Datenblätter und LDT-Dateien vor:

| Leuchte Nr. | Hersteller | Bezeichnung                                       | Quelle |
|-------------|------------|---------------------------------------------------|--------|
| 1           | Trilux     | 7651IP HE LW 100-840ETDD L15001                   | [45]   |
| 2           | Trilux     | 7651 HE LN 80-840ETDD L15001                      | [46]   |
| 3           | AuraLight  | Renett GT-68W-Dali 840-90°                        | [47]   |
| 4           | Glamox     | REDOX1524 10250 DALI 840 NB L1                    | [48]   |
| 5           | sg         | Arena1200 Weiss Medium 9000lm 4000K Ra>80 On/Off  | [49]   |
| 6           | sg         | Arena1200 Weiss Medium 23370lm 4000K Ra>80 On/Off | [31]   |

*Tabelle 25: Überblick der zu Testzwecken zur Verfügung stehenden Leuchten*

Die Datenblätter der Leuchten aus Tabelle 25, LDT-Dateien, Screenshots der LVKs aus den LDT-Dateien und die LVKs der Leuchten für 0°-, 45°- und 90°-C-Planes als CSV-Datei sind in Anhang 1 dieser Arbeit zu finden.

Alle in Tabelle 25 gelisteten Leuchten werden im Fotogoniometer in drei C-Planes vermessen.

Im Folgenden werden die optisch aufbereiteten Rohdaten des Fotogoniometers (PDF-Dateien) auszugsweise abgebildet; die vollständigen Messergebnisse befinden sich in Anhang 5.

Die Messergebnisse werden einer qualitativen und einer quantitativen Analyse unterzogen.

## 5.1 Qualitative Bewertung

Hier wird vor allem auf den Formvergleich zwischen der aufgenommenen LVK und der vom Leuchtenhersteller bereitgestellten LDT-Datei eingegangen.

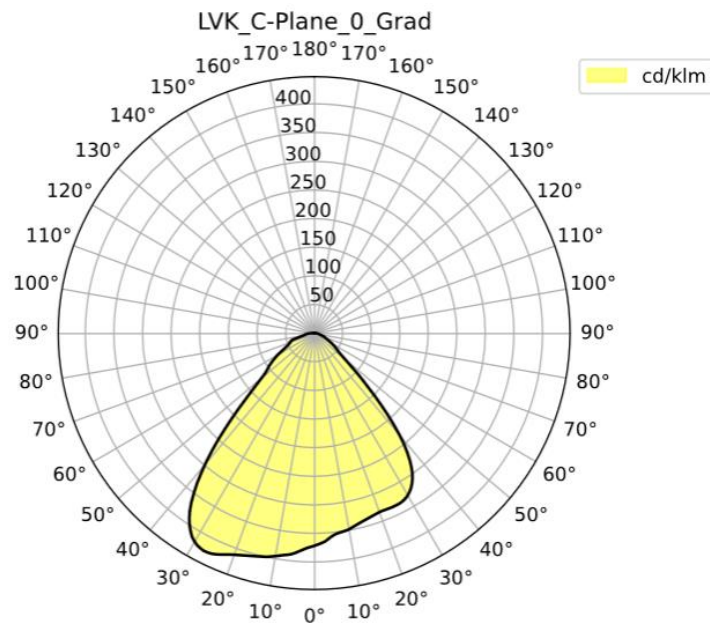


Abbildung 74: LVK der Leuchte Nr. 3 aus dem Fotogoniometer, C-Plane 0°

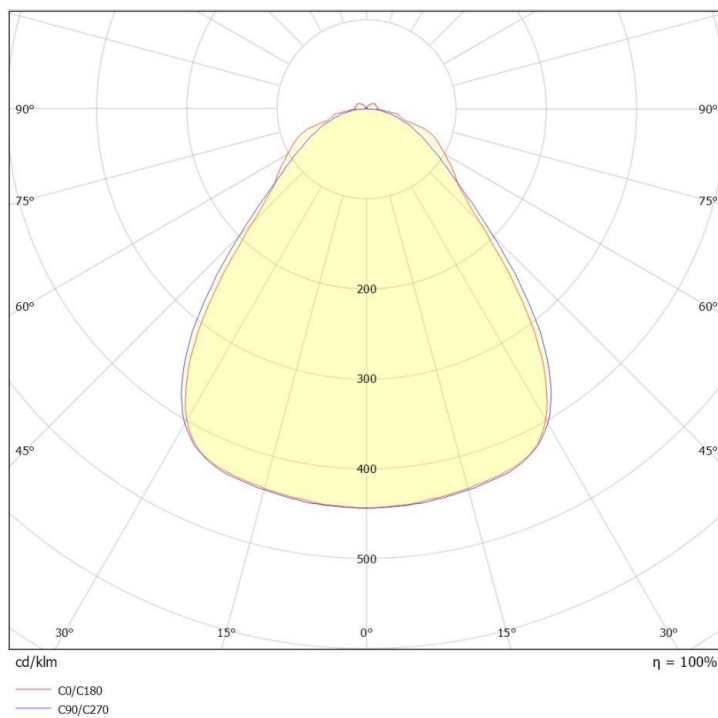


Abbildung 75: LVK der Leuchte Nr.3 aus der LDT-Datei (Anhang 1)

Beim Betrachten der aufgenommenen LVKs in der  $0^\circ$  C-Plane der vermessenen Leuchten fällt auf, dass sie bis auf die der Leuchte Nr. 4 in der linken Halbebene höhere Werte zeigen als in der rechten Halbebene. Dennoch lässt sich feststellen, dass die grundsätzliche Form weitestgehend übereinstimmt.

Bei den LVKs der  $45^\circ$ - und  $90^\circ$ -C-Planes lässt sich nicht mehr über die vermessenen Leuchten hinweg ein Trend zur vorrangigen Links-Rechts-Gewichtung der Werte feststellen. Jedoch sind auch hier Unterschiede zu erkennen. Die Symmetrie, welche die LDT-Datei vorgibt, lässt sich bei den Messungen im Fotogoniometer also nicht nachweisen.

Ein detaillierter Vergleich ist dann möglich, wenn die tatsächlichen Zahlenwerte miteinander verglichen werden.

## 5.2 Quantitative Analyse

Zur besseren Beurteilung der qualitativ festgestellten Unterschiede der LVKs zu ihren jeweiligen Datenblättern/ LDT-Dateien werden die tatsächlich aufgenommenen Werte untereinander verglichen. Dazu wird die CSV-Datei, die das Fotogoniometer als Grundlage für das Erstellen der optisch aufbereiteten LVK verwendet, in Matlab importiert. Für die entsprechenden Vergleichswerte werden die Zahlenwerte aus den jeweiligen LDT-Dateien herangezogen. Viele der LDT-Dateien beinhalten nur Messwerte über eine Halbebene. Damit eine Vergleichbarkeit hergestellt werden kann, werden diese Werte auf die andere Halbebene gespiegelt. Damit lässt sich die Form der LVK aus den Datenblättern und den LDT-Dateien rekonstruieren.

Die Zahlenwerte einer LVK beziehen sich dabei auf den Lichtstrom der Leuchte. Um eventuelle Fehler bei der Berechnung des Lichtstroms im Fotogoniometer zunächst nicht zu gewichten, werden aufgenommene und bereitgestellte LVKs einer Leuchte so skaliert, dass ihr Maximum bei 1 liegt. Damit lassen sich Unterschiede in der Form der LVK gut herausstellen.

In den folgenden drei Unterkapiteln werden auf die hier beschriebene Art und Weise die Herstellerangaben mit den im Fotogoniometer gewonnenen Daten verglichen.

### 5.2.1 0° C-Plane

- Leuchte Nr. 1:

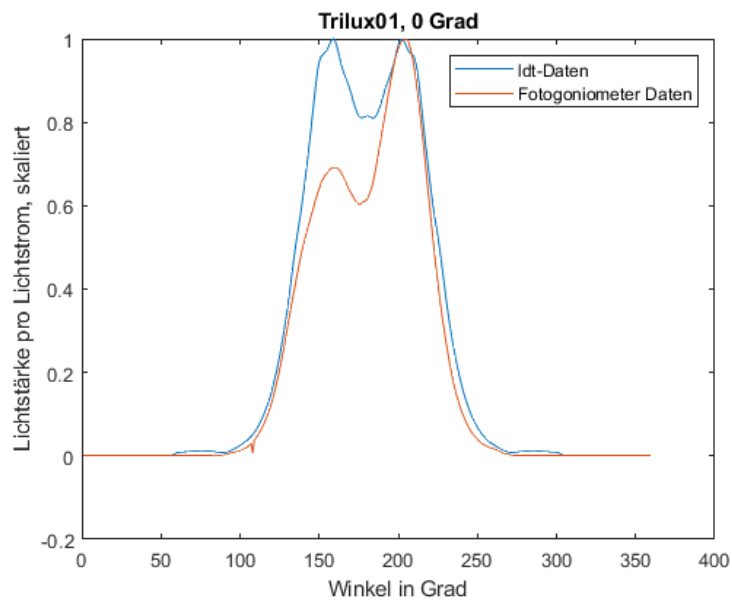


Abbildung 76: LVK Fotogoniometer VS LDT-Datei, Leuchte Nr. 1, 0° C-Plane

- Leuchte Nr. 2:

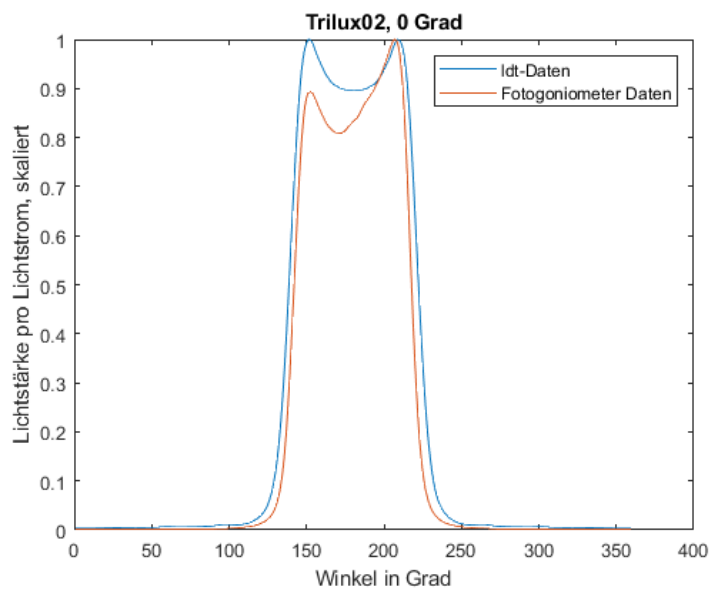


Abbildung 77: LVK Fotogoniometer VS LDT-Datei, Leuchte Nr. 2, 0° C-Plane

- Leuchte Nr. 3:

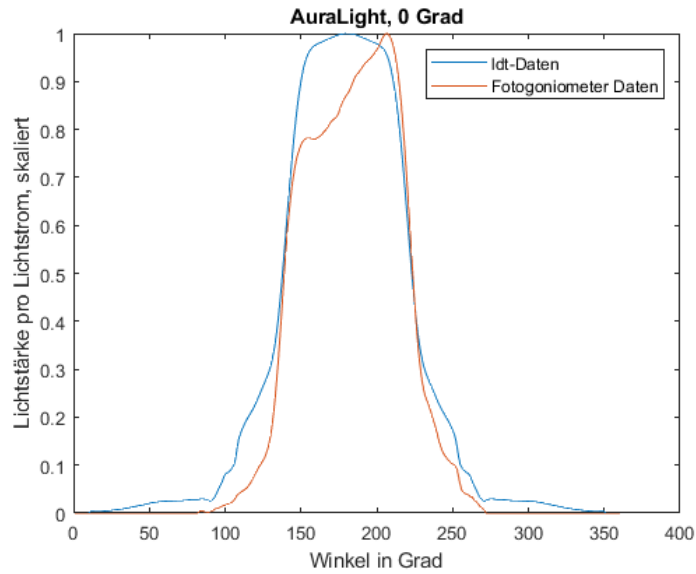


Abbildung 78: LVK Fotogoniometer VS LDT-Datei, Leuchte Nr. 3, 0° C-Plane

- Leuchte Nr. 4:

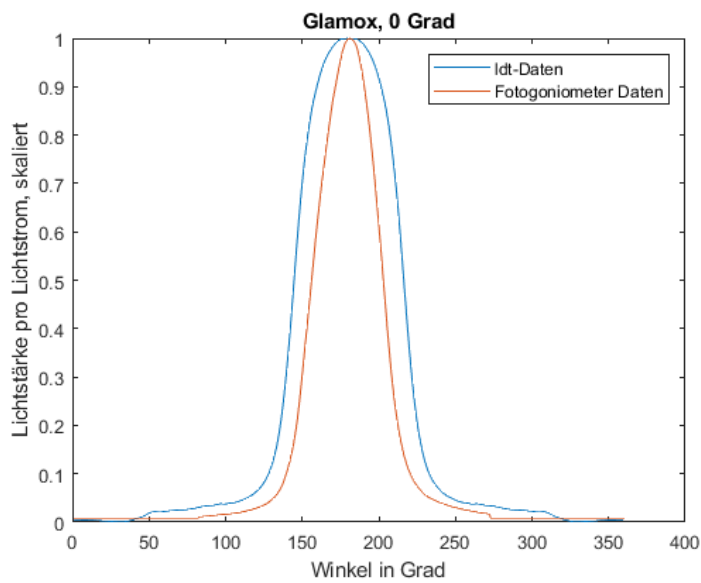


Abbildung 79: LVK Fotogoniometer VS LDT-Datei, Leuchte Nr. 4, 0° C-Plane

- Leuchte Nr. 5:

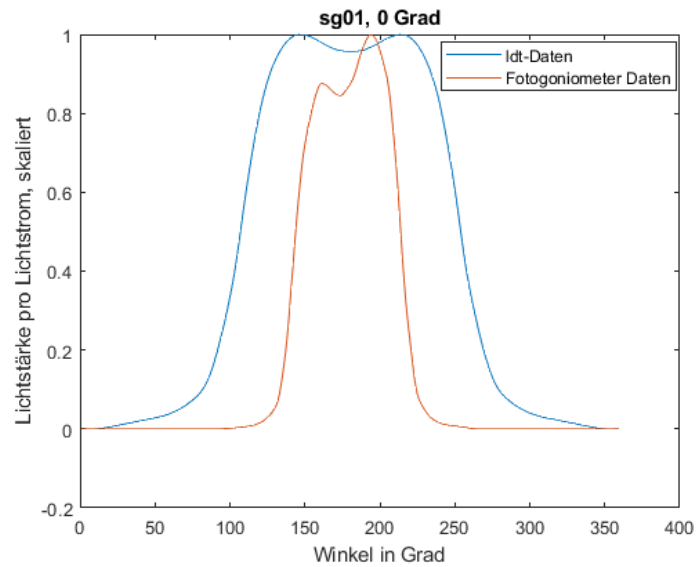


Abbildung 80: LVK Fotogoniometer VS LDT-Datei, Leuchte Nr. 5, 0° C-Plane

- Leuchte Nr. 6:

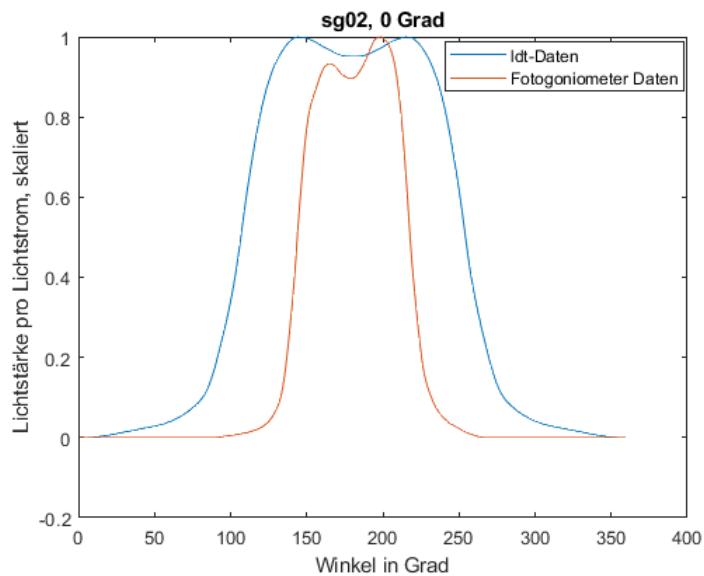


Abbildung 81: LVK Fotogoniometer VS LDT-Datei, Leuchte Nr. 6, 0° C-Plane

## 5.2.2 45° C-Plane

- Leuchte Nr. 1:

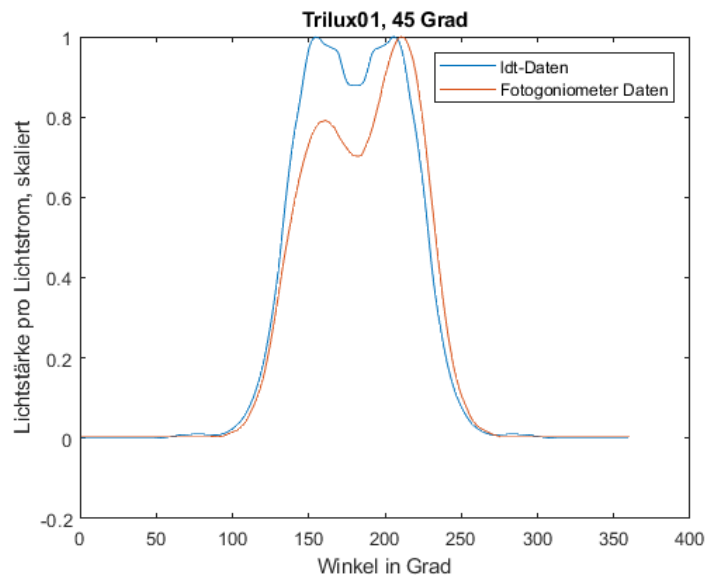


Abbildung 82: LVK Fotogoniometer VS LDT-Datei, Leuchte Nr. 1, 45° C-Plane

- Leuchte Nr. 2:

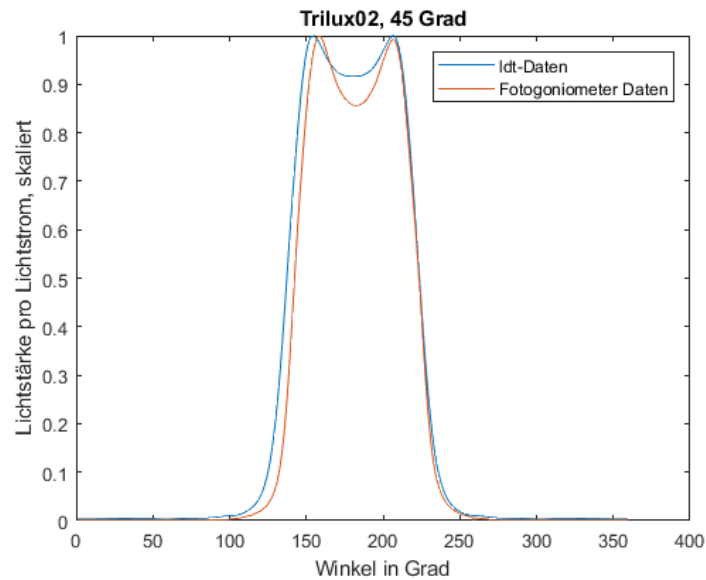


Abbildung 83: LVK Fotogoniometer VS LDT-Datei, Leuchte Nr. 2, 45° C-Plane

- Leuchte Nr. 3:

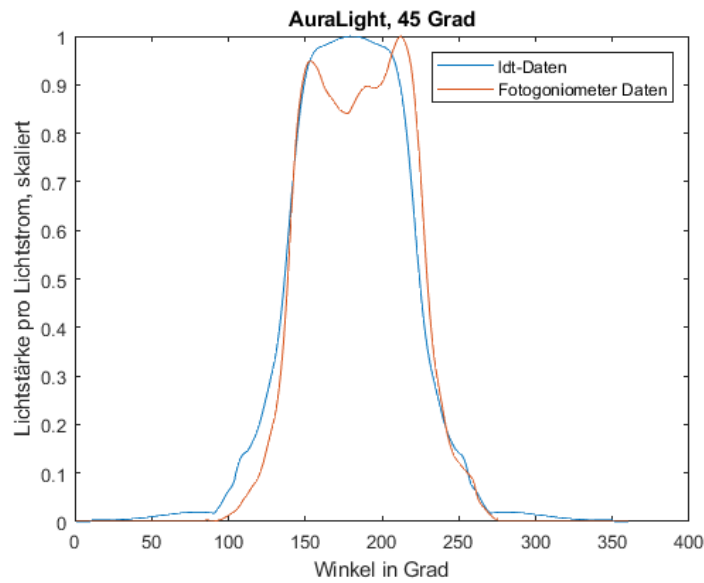


Abbildung 84: LVK Fotogoniometer VS LDT-Datei, Leuchte Nr. 3, 45° C-Plane

- Leuchte Nr. 4:

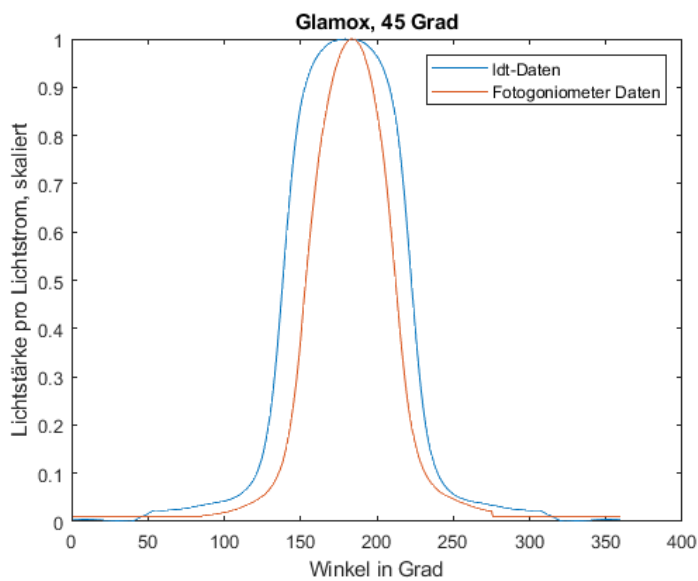


Abbildung 85: LVK Fotogoniometer VS LDT-Datei, Leuchte Nr. 4, 45° C-Plane

- Leuchte Nr. 5:

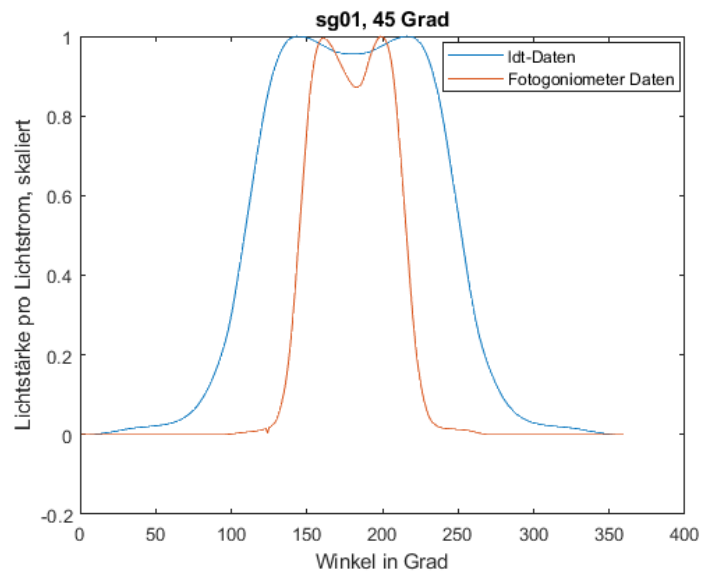


Abbildung 86: LVK Fotogoniometer VS LDT-Datei, Leuchte Nr. 5, 45° C-Plane

- Leuchte Nr. 6:

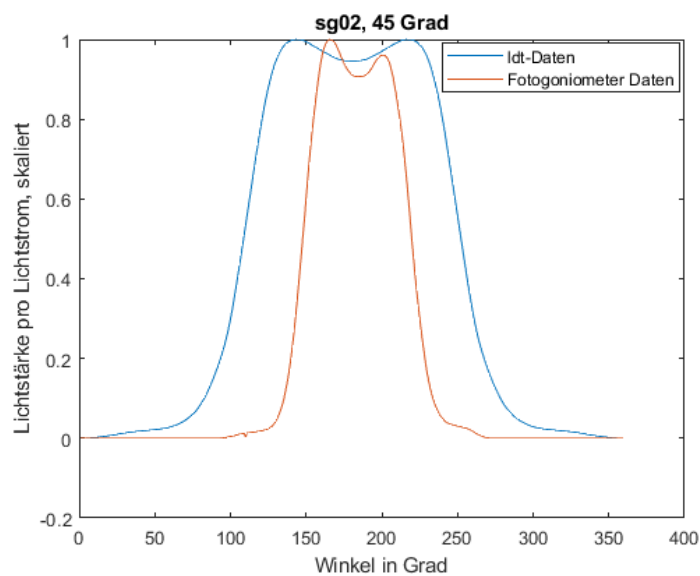


Abbildung 87: LVK Fotogoniometer VS LDT-Datei, Leuchte Nr. 6, 45° C-Plane

### 5.2.3 90° C-Plane

- Leuchte Nr.1:

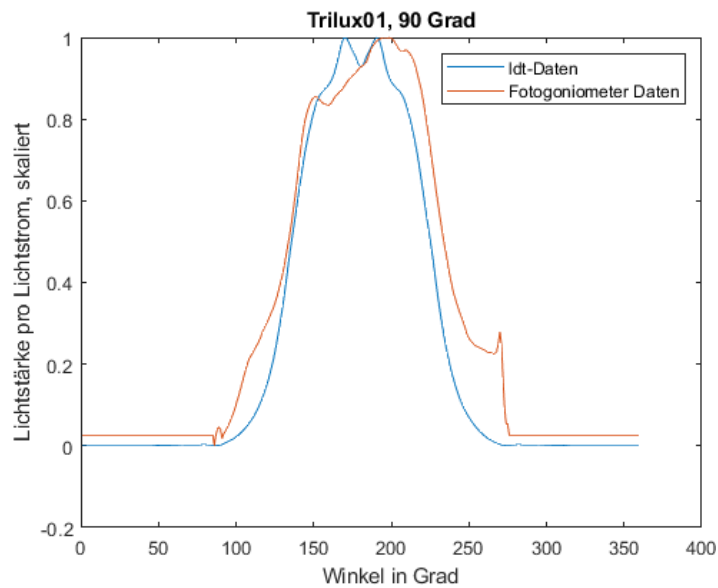


Abbildung 88: LVK Fotogoniometer VS LDT-Datei, Leuchte Nr. 1, 90° C-Plane

- Leuchte Nr. 2:

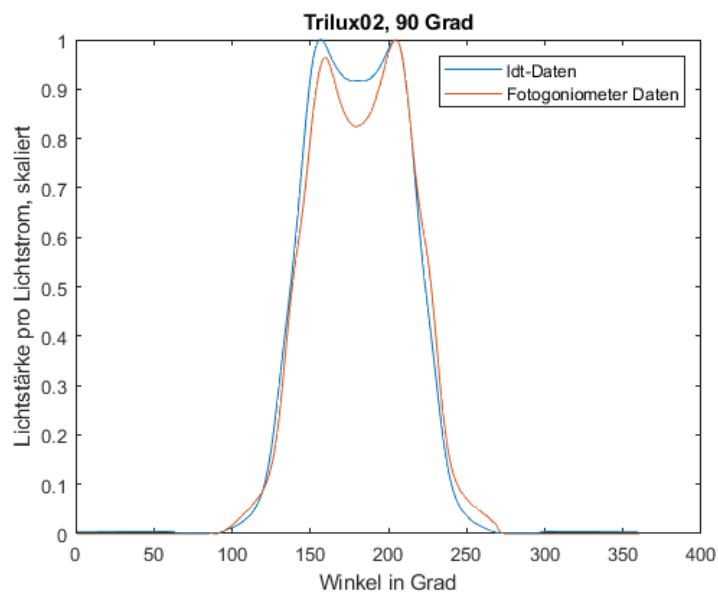


Abbildung 89: LVK Fotogoniometer VS LDT-Datei, Leuchte Nr. 2, 90° C-Plane

- Leuchte Nr. 3:

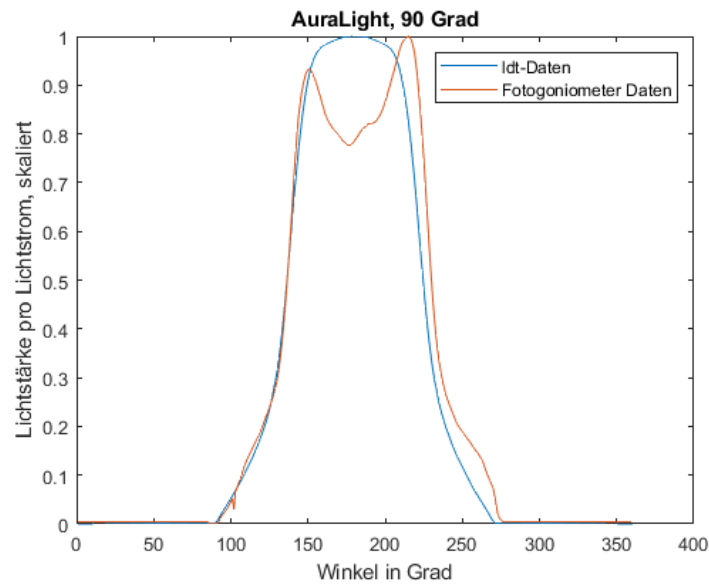


Abbildung 90: LVK Fotogoniometer VS LDT-Datei, Leuchte Nr. 3, 90° C-Plane

- Leuchte Nr. 4:

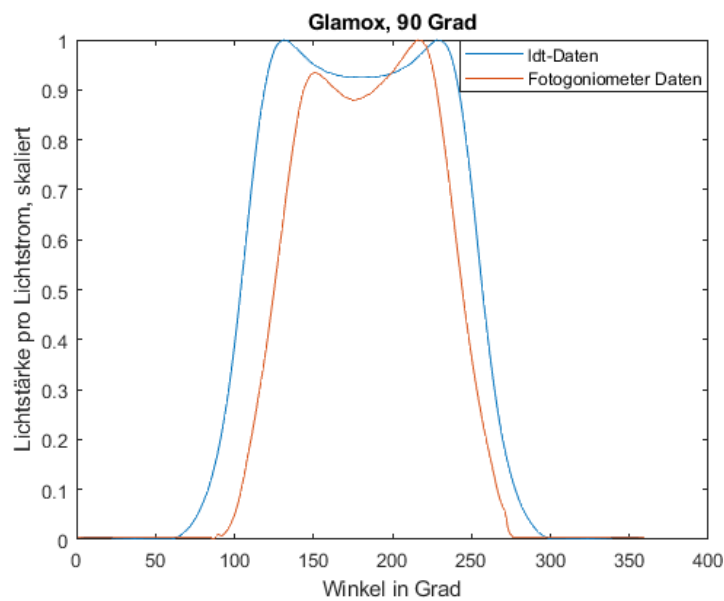


Abbildung 91: LVK Fotogoniometer VS LDT-Datei, Leuchte Nr. 4, 90° C-Plane

- Leuchte Nr. 5:

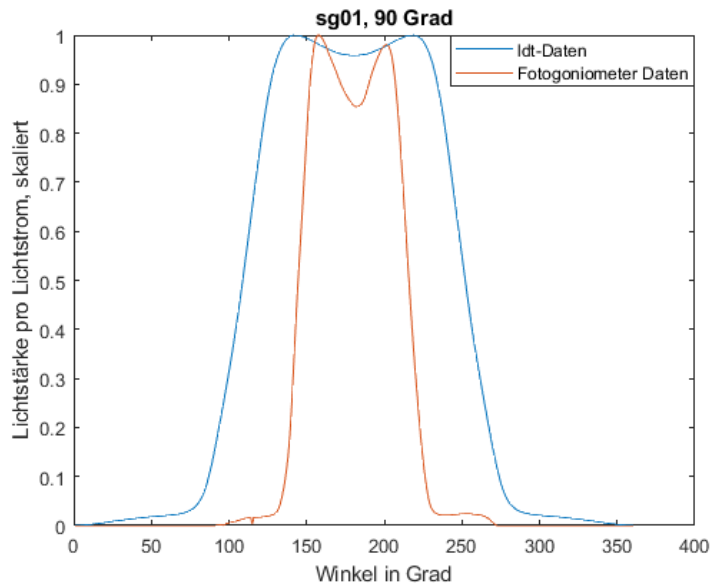


Abbildung 92: LVK Fotogoniometer VS LDT-Datei, Leuchte Nr. 5, 90° C-Plane

- Leuchte Nr. 6:

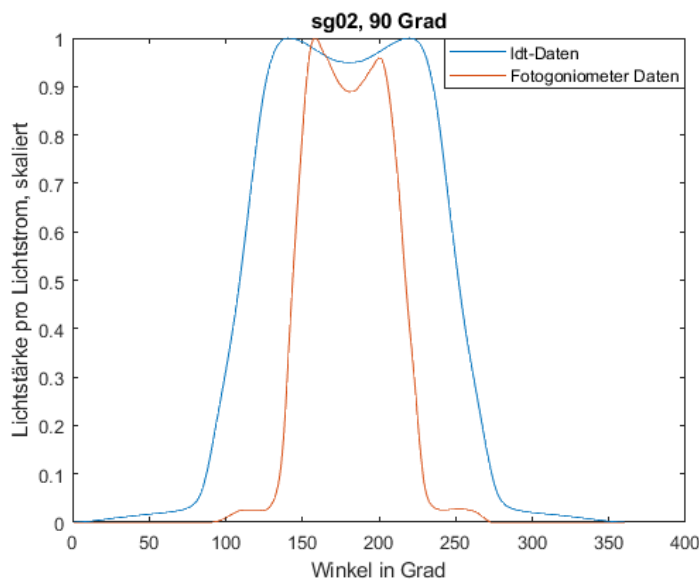


Abbildung 93: LVK Fotogoniometer VS LDT-Datei, Leuchte Nr. 6, 90° C-Plane

## 5.2.4 Beschreibung der Unterschiede

Beim direkten Vergleich der gegebenen und gemessenen LVK ein und derselben Leuchte bestätigt sich, dass das symmetrische Abstrahlverhalten der Leuchten, so wie es die LDT-Dateien und die Datenblätter vorgeben, nicht mit den Messergebnissen rekonstruiert werden kann. Nur bei Leuchte Nr. 4 kann

mit dem Fotogoniometer in der 0° und 45° C-Plane ein ähnliches Symmetrieverhalten nachgewiesen werden.

Bei der Betrachtung der Vergleichsbilder für die 0° C-Plane fällt auf, dass der Unterschied der beiden Kurven bei ca. 150° Sensorwinkel am größten ist. Dies entspricht einer Auslenkung des Sensors um 30° nach rechts vom unteren Totpunkt aus, wenn das Fotogoniometer frontal aus der Richtung des Schaltschranks betrachtet wird.

## 5.2.5 Gründe für Abweichungen

Die Abweichungen können auf verschiedenen Ursachen beruhen. Im Folgenden werden daher Gründe hinsichtlich der Leuchtenhersteller und des gebauten Fotogoniometers erörtert:

### 5.2.5.1 Leuchtenhersteller

Die Unterschiede der beiden Kurven in den Unterkapiteln 5.2.1 bis 5.2.3 können durch Fertigungstoleranzen der einzelnen Leuchten entstehen. Um diesen Punkt weiter zu prüfen, müssten mehrere gleiche Leuchten nacheinander vermessen werden. Da von jeder Leuchte genau ein Exemplar vorliegt, ist dies leider im Rahmen vorliegender Arbeit nicht möglich.

Eine weitere Erklärung für die großen Unterschiede wäre, dass die vom Leuchtenhersteller bereitgestellten LVKs u.U. nicht der Realität entsprechen. Diese könnten zum Beispiel mithilfe von CAD-Dateien simulativ erstellt worden sein. Außerdem ist es möglich, dass dem Kunden „idealisierte“ LVKs zur Verfügung gestellt werden, um die Lichtplanung mit einem Lichtplanungstool wie DIALux oder Relux zu erleichtern.

### 5.2.5.2 Fotogoniometer

Die praktische Arbeit mit dem Fotogoniometer zeigt, dass Einstellungen sehr sorgfältig vorgenommen werden müssen, um aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen. Die Möglichkeiten zur Einstellungsoptimierung werden im Folgenden gezeigt:

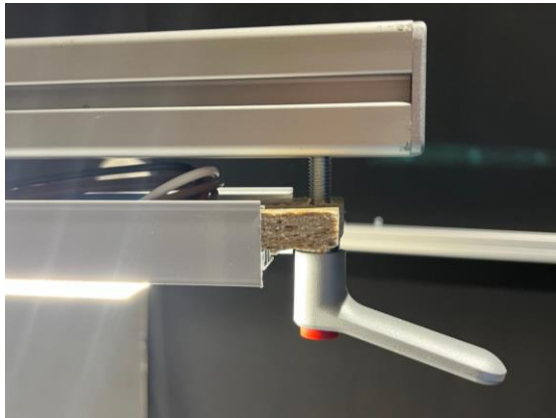
#### Hinweis 1:

Die Leuchte ist abweichend zur Horizontalen im Fotogoniometer montiert. Dies könnte zum Beispiel entstehen, wenn die Leuchtenhalterung in sich verbogen ist. Dann ist die Leuchte selbst bei planer Montage an der Halterung nicht horizontal.

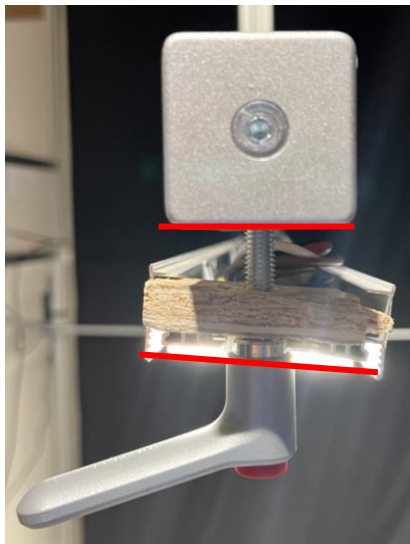
### Hinweis 2:

Die Leuchtenhalterung ist so konstruiert, dass sie den am Anfang dieser Arbeit gestellten Anforderungen entspricht.

Bei konstruktiv außerhalb der Anforderung liegenden Leuchten sind entsprechende Behelfskonstruktionen zur Befestigung erforderlich. Deshalb muss die Leuchte Nr. 4 mit Klebeband befestigt werden. Von der Leuchte Nr. 3 steht nur das eigentliche „Lichtband“ zur Verfügung. Die Montageschiene, in der das Lichtband befestigt wird, liegt nicht vor. Daher muss diese Leuchte mit einer Behelfskonstruktion vermessen werden, die zusätzliche Toleranzen birgt:



*Abbildung 94: Montage der Leuchte Nr. 3 mit Behelfskonstruktion, seitliche Ansicht*



*Abbildung 95: Montage der Leuchte Nr. 3 mit Behelfskonstruktion, frontale Ansicht*

Abbildung 95 zeigt deutlich, dass die Lichtaustrittsfläche nicht parallel zur Montagefläche ist.

Für die Aufnahme repräsentativer LVKs gilt es, dies zu vermeiden.

### Hinweis 3:

Die Blendenöffnung der Sensorbaugruppe muss sich *genau* in einer Flucht mit dem Fototransistor und dem Mittelpunkt der Lichtaustrittsfläche der Leuchte befinden. Anderenfalls verschattet die Blende den Fototransistor für einige Winkel stärker als für andere, vor allem in der 90° C-Plane. Dies beeinflusst die Messergebnisse massiv. Daher ist die Ausrichtung der Sensorbaugruppe äußerst präzise vorzunehmen. Hierfür wird die Halterung der Sensor-PCB um eine mit M3-Schrauben fixierte, und mit Federn vorgespannte Montageplatte ergänzt. Diese Montageplatte kann mithilfe der Schrauben weitaus genauer im Ausrichtungswinkel eingestellt werden als die in Abbildung 30 (vgl. Abschnitt 4.5 „Sensorbaugruppe“) gezeigte Konstruktion.

Eine schräg eingestellte Sensorbaugruppe verschattet den Fototransistor in Abhängigkeit des Sensorwinkels. Dies verstärkt das nichtlineare Verhalten des Sensors. Damit verändert sich das Mapping der Spannungswerte auf Lichtstärken.

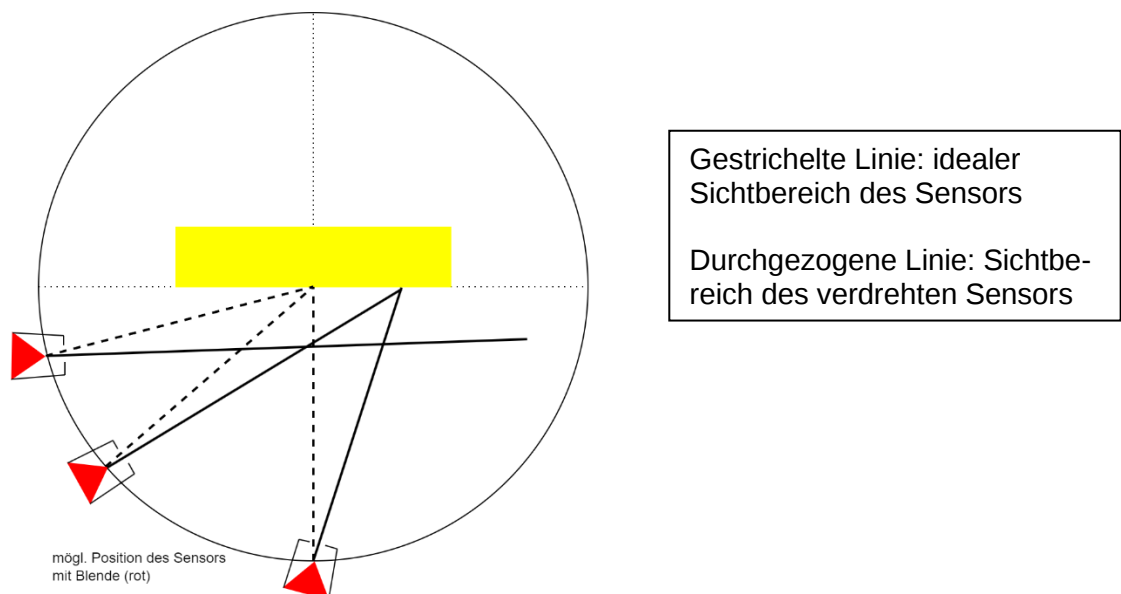


Abbildung 96: Vershobenem Sichtfeld des Sensors

Abbildung 96 verdeutlicht, dass eine verdreht auf dem Rohr montierte Sensorbaugruppe bei Sensorwinkeln nahe 90° Sensorwinkel nicht mehr den relevanten Bereich misst. Analog dazu werden auch die Messwerte in der rechten Halbebene verzerrt erfasst.

Da die Abweichung der in den Abschnitten 5.2.1 bis 5.2.3 dargestellten Kurven über die meisten angestellten Vergleiche in ähnlichen Sensorwinkelbereichen maximal sind, könnte damit auf eine außermittige Ausrichtung der Sensorbaugruppe auf dem Rohr der Sensorhalterung (vgl. Unterkapitel 4.3 „Sensorhalterung“) geschlossen werden.

## 5.2.6 Validierung der Messergebnisse

### 5.2.6.1 Vergleich mit unabhängigem Lichtlabor

Zur weiteren Analyse der Unterschiede wird ein vorliegender Prüfbericht aus einem unabhängigen Lichtlabor der Leuchte Nr. 4 herangezogen.

Mit dessen Hilfe lässt sich die Form der gewonnenen LVK unabhängig von den Herstellerangaben überprüfen. Der Prüfbericht befindet sich in Anhang 6.

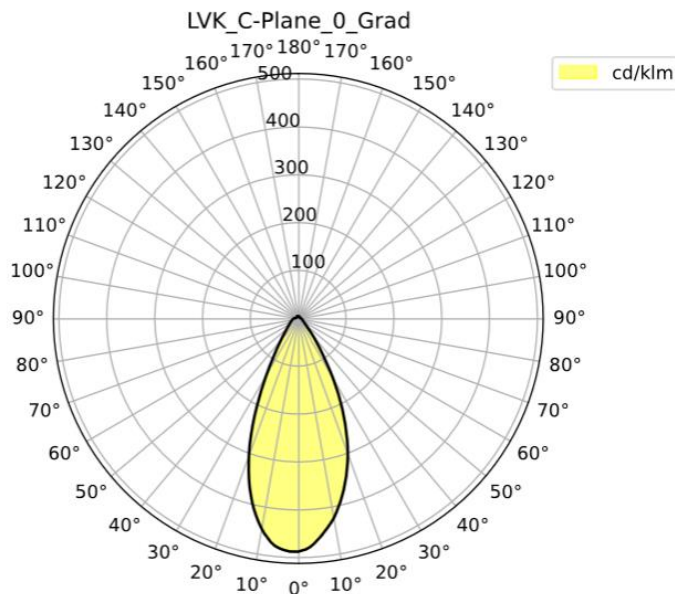


Abbildung 97: LVK von Leuchte Nr. 4 aus dem Fotogoniometer, C-Plane 0°

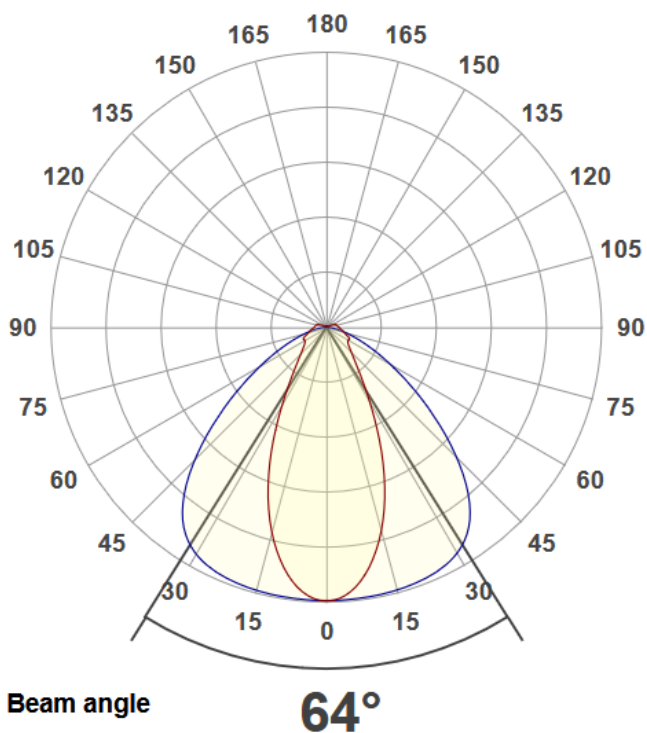


Abbildung 98: LVK von Leuchte Nr. 4 aus dem Prüflabor

Beim Vergleich der beiden LVKs fällt auf, dass deren Form für die 0° C-Plane (rote Kurve in Abb. 92) weitestgehend übereinstimmt und beide Messergebnisse auffallend ähnlich symmetrisch sind.

Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die in Abschnitt 5.2.5.2 aufgestellte Theorie zur mangelhaften Ausrichtung der Sensorbaugruppe nicht stimmt.

#### 5.2.6.2 Nachweis der Asymmetrie

Mithilfe des manuellen Modus wird das vermeintlich symmetrische Abstrahlverhalten am Beispiel der Leuchte Nr. 3 geprüft: Der Sensor wird dazu an einer Stelle platziert, an der große Abweichungen festgestellt wurden. Dies entspricht zum Beispiel einem Sensorwinkel von 150°. Daraufhin werden Lichtstärken der Leuchte bei 0°- und 180°-Ausrichtung gemessen. Die symmetrische Form der LVK in den Datenblättern und LDT-Dateien ließe vermuten, dass hier jeweils gleiche Lichtstärken gemessen werden sollten. Jedoch weichen die Messergebnisse aber teilweise erheblich voneinander ab.

Abbildung 99 zeigt stark vergrößert die aufgenommene LVK der Leuchte Nr. 3 in der 0° C-Plane. Die Messwerte in Candela sind für die Sensorwinkel 150° und 210° markiert.

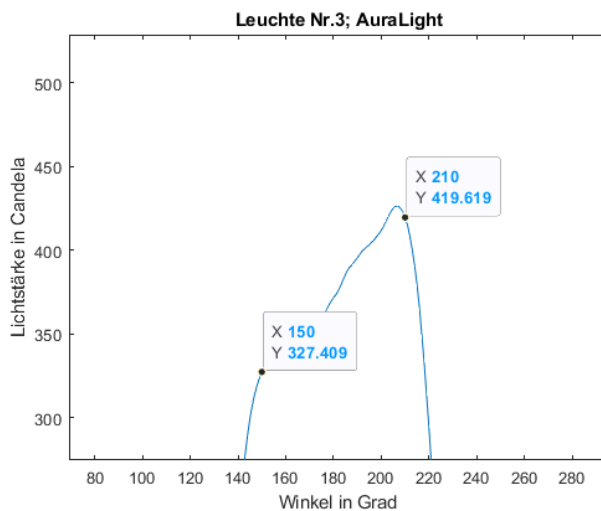


Abbildung 99: LVK in kartesischen Koordinaten von Leuchte Nr. 3 in 0° C-Plane

Mit der Hilfe von Matlab wird die Abbildung Nr. 78 (LVK der Leuchte Nr. 3; 0° C-Plane) genauer untersucht: 30° links und rechts vom unteren Totpunkt (180°) werden bei der Erfassung der LVK  $327,4 \frac{cd}{klm}$  und  $419,62 \frac{cd}{klm}$  gemessen.

Um die Werte für die Lichtstärken zu erhalten, müssen die Messwerte mit dem vom Fotogoniometer berechneten Lichtstrom (16,241 klm) multipliziert werden. Dies ergibt:

- Sensorwinkel 150°:  $327,4 \frac{cd}{klm} \cdot 16,241 klm = 5317,30 cd$
- Sensorwinkel 210°:  $419,62 \frac{cd}{klm} \cdot 16,241 klm = 6815,05 cd$

Die vom Fotogoniometer erfassten Messwerte sollten sich rekonstruieren lassen, wenn der Sensor an der 150° Position verbleibt und die Leuchte in der 0° und 180° Ausrichtung vermessen wird:

- Messwert bei Leuchtenposition 0°: 5562,73 cd
- Messwert bei Leuchtenposition 180°: 7011,54 cd

Die manuell aufgenommenen Werte spiegeln das Abstrahlverhalten der Leuchte wider, das schon zuvor mit dem Fotogoniometer aufgenommen wurde. Die Abstrahlcharakteristik dieser Leuchte ist also tatsächlich nicht symmetrisch, wie es die Herstellerangaben vermuten lassen. Darüber hinaus ist zu erwähnen, dass die Ergebnisse zwar in den gleichen Größenordnungen liegen, jedoch in den Absolutwerten nicht übereinstimmen.

Dies liegt an den zwischenzeitlich vorgenommenen Optimierungen der Einstellungen des Fotogoniometers, siehe Kapitel 5.2.5.2.

## 5.2.7 Validierung der Absolutwerte

Neben der Betrachtung der reinen Form der LVKs müssen auch die Zahlenwerte der Lichtstärken verglichen werden. In LVKs werden die Helligkeiten immer in Bezug auf den Lichtstrom der Leuchte angegeben. Die einzelnen Lichtstärken lassen sich also berechnen, indem man den jeweiligen Wert mit dem Lichtstrom der Leuchte in Kilolumen multipliziert.

Die so erhaltenen Lichtstärken aus dem Fotogoniometer und den LDT-Dateien werden anschließend voneinander subtrahiert, um die tatsächlichen Abweichungen darzustellen.

Da in den Abbildungen in den Abschnitten 5.2.1 bis 5.2.3 bereits erkennbar ist, dass hier teilweise deutliche Unterschiede vorhanden sind, wird dies hier exemplarisch anhand der Leuchte Nr. 2 gezeigt:

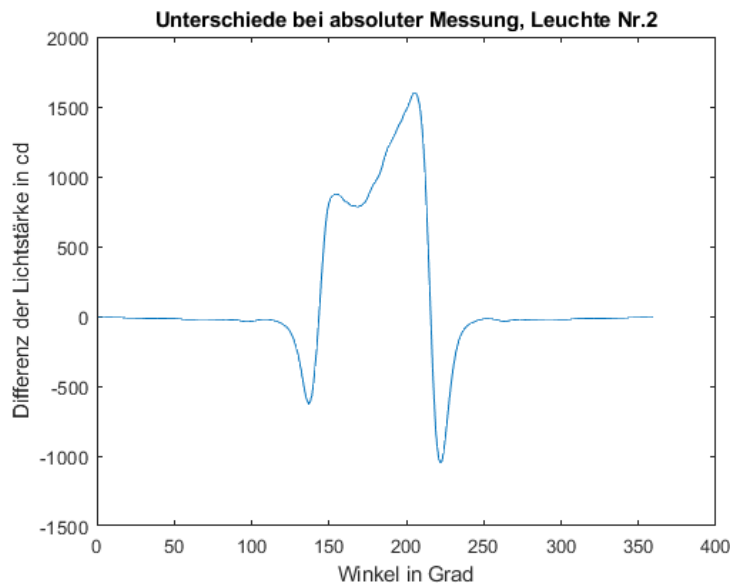


Abbildung 100: Differenz der Lichtstärken zwischen Fotogoniometer und LDT-Datei

Ist die Differenz positiv, sind die Werte des Fotogoniometers größer als die der LDT-Datei.

Die Lichtstärken, die das Fotogoniometer gemessen hat, weichen deutlich von jenen aus der LDT-Datei ab. Die Berechnung der Lichtstärke an einem Punkt findet mithilfe eines Polynoms statt, dessen Funktionswert als Faktor für die gemessene Spannung verwendet wird. Das Polynom ist so geformt, dass das Ergebnis der Berechnung die Lichtstärke widerspiegelt.

Den hier gezeigten Abweichungen liegt die noch nicht optimierte Sensorausrichtung zu Grunde.

Das Mapping der Spannungswerte auf die Lichtstärken muss also zukünftig für die „neue“ Ausrichtung des Sensors wiederholt werden. Damit wird eine deutliche Reduzierung erwartet.

#### Berechnung des Lichtstroms:

Die korrekte Funktionsweise der Software für die Berechnung des Lichtstroms lässt sich unabhängig von den hier noch vorliegenden Abweichungen der Absolutwerte zeigen:

Als Eingangsparameter dienen nicht die vom Fotogoniometer erfassten Lichtstärken, sondern die Daten aus der LDT-Datei einer Leuchte. Je nach Winkelabstand der Messpunkte in der LDT-Datei müssen diese Werte vorher auf eine 1°-Auflösung interpoliert werden, sodass sie den Messabständen des Fotogoniometers entsprechen.

Das Ergebnis der Berechnung entspricht bis auf kleine Abweichungen dem im Datenblatt angegebenen Lichtstrom, weil hier nur eine C-Plane betrachtet wird. Je mehr C-Planes in die Berechnung einbezogen und entsprechend gewichtet werden, desto näher kommt das Ergebnis dem Wert im Datenblatt.

## 6 Fazit und Ausblick

### 6.1 Fazit

Ziel dieser Arbeit ist es, ein kleineres Fotogoniometer zu konstruieren, zu fertigen und in Betrieb zu nehmen, sowie die Messergebnisse mit den Angaben verschiedener Leuchtenhersteller zu vergleichen.

Die Konzeption, Fertigung und Inbetriebnahme des Geräts zusammen mit dem Aufbau eines digitalen Zwillings in CAD ist erfolgreich abgeschlossen. Um dies detaillierter beurteilen zu können, werden die eingangs gestellten Anforderungen dahingehend untersucht, ob sie erfüllt sind oder nicht.

- Leuchtengröße (erfüllt): Die Halterung im Fotogoniometer erlaubt es, Leuchten beliebiger Form bis zu einer horizontalen Maximalgröße von 1500 mm x 600 mm zu montieren. Auch Hängeleuchten oder andere speziell geformte Leuchten können mit Behelfskonstruktionen montiert werden.
- Leuchtengewicht (erfüllt): Die verwendeten Kugellager, der Antrieb und die Höhenverstellung sind so ausgelegt, dass sie einem maximalen Leuchtengewicht von 15 kg standhalten.
- Maße des Fotogoniometers (erfüllt): Die Grundmaße des Fotogoniometers überschreiten nicht den Maximalwert von 3500 mm x 3500 mm
- Messschritte (erfüllt): Die Positioniergenauigkeit des Sensors wird mithilfe eines Klebestreifens auf dem Boden des Fotogoniometers überprüft. Damit wird die Position des Sensors bei 180° markiert. Nach willkürlicher Bewegung des Sensors im manuellen Modus und anschließendem Zurückkehren in die 180°-Position wird diese innerhalb der vorgegebenen Toleranzen erreicht.
- C-Planes (erfüllt): Das Fotogoniometer kann mithilfe der GUI und State-Machine Leuchten wahlweise in einer, zwei oder drei C-Planes vermessen; die Ergebnisse werden dabei für jede C-Plane separat gespeichert.

Die Messergebnisse aller C-Planes einer vermessenen Leuchte werden am Ende der Messung verwendet, um den Lichtstrom zu ermitteln.

- Lichtstärkeverteilungskurve (erfüllt): Für jede vermessene C-Plane wird eine optisch aufbereitete LVK erstellt, die zum Beispiel in Datenblättern von Leuchten verwendet werden kann. Zusätzlich zur LVK werden auch die Rohwerte als CSV-Datei abgespeichert. Aus diesen Daten lässt sich der Abstrahlwinkel einer Leuchte ermitteln.
- Lichtstrom (erfüllt): Anhand der aufgenommenen Daten ist es mit dem beschriebenen Integrationsalgorithmus möglich, den Lichtstrom einer Leuchte zu berechnen.
- $V(\lambda)$ -Kurve (erfüllt): Der in der Sensorbaugruppe verwendete Fototransistor berücksichtigt bei dem von ihm getriebenen Fotostrom die  $V(\lambda)$ -Kurve. Damit entspricht das Helligkeitsempfinden dem des menschlichen Auges.
- Benutzeroberfläche (erfüllt): Die notwendige Dateneingabe, um eine Leuchte gemäß den gestellten Anforderungen zu vermessen, findet vollständig in einer grafischen Benutzeroberfläche statt. Für solche Messungen muss der Benutzer den Code nicht ändern.

Die einzelnen Anforderungen an das Messgerät sind sachlich betrachtet erfüllt.

Allerdings muss auch die Qualität der erhaltenen Messergebnisse beurteilt werden. Die Tatsache, dass die Ausrichtung des Sensors kritisch für die aufgenommenen Lichtstärken ist, macht das Kalibrieren des Fotogoniometers sehr empfindlich. Die Validation der LVK der Leuchte Nr. 3 zeigt jedoch, dass trotz der empfindlichen Sensorausrichtung das Fotogoniometer Ergebnisse liefert, die denen eines unabhängigen Prüflabors weitestgehend entsprechen.

Damit neben der Form der LVK auch die Zahlenwerte der Lichtstärken und des am Ende berechneten Lichtstroms übereinstimmen, ist nach der Feinjustierung der Sensorbaugruppe nun erneut eine Einstellfahrt zur Erstellung eines neuen Polygons notwendig, das Spannungen auf Lichtstärken mappt. In der Inbetriebnahmephase stellt sich heraus, dass die Leuchten auf dem Markt nicht immer das Abstrahlverhalten haben, das die Hersteller vorgeben. Je nach Modell sind hier deutliche Unterschiede zwischen den beiden Halbebenen in jeder betrachteten C-Plane erkennbar.

Die wesentliche Innovation des hier dokumentierten Projektes liegt in der Miniaturisierung des Fotogoniometers und der damit wegfallenden Fernfeldbetrachtung der Leuchte. Dies wird mit einem schmalen Blickfeld des Sensors und einer höhenverstellbaren Halterung der Leuchte kompensiert. Die damit erzielten Ergebnisse sind repräsentativ, um das tatsächliche Verhalten einer Leuchte messtechnisch abzubilden. Damit ist eine kostengünstige, kleinere und schnellere Vermessung von Leuchten als mit einem externen Prüflabor möglich. Dies ist gerade bei zeitkritischen Projekten eine Erleichterung, da diese sonst auf solche Messungen verzichten müssten. Das kleine Fotogoniometer hat aufgrund seiner Innovationskraft enormes Potential, und liefert Ergebnisse, die mit denen kommerziell verfügbarer und um ein vielfaches teurerer Geräte durchaus vergleichbar sind.

## 6.2 Technischer Ausblick

Auch wenn die Sensor-PCB bereits zuverlässig Werte liefert, gibt es hier noch Verbesserungspotential:

- Das **Kommunikationsprotokoll** mit dem Raspberry Pi mit der Sensorbaugruppe kommuniziert (SPI) könnte durch eines mit differenzieller Übertragungsart ausgetauscht werden. Dies resultiert in weniger Übertragungsfehlern und macht das System unanfälliger gegen EMV-Störquellen, da hier die Differenz zweier Signale betrachtet wird und nicht ein Signal mit einem fest definiertem Spannungsniveau (zum Beispiel GND) verglichen wird.

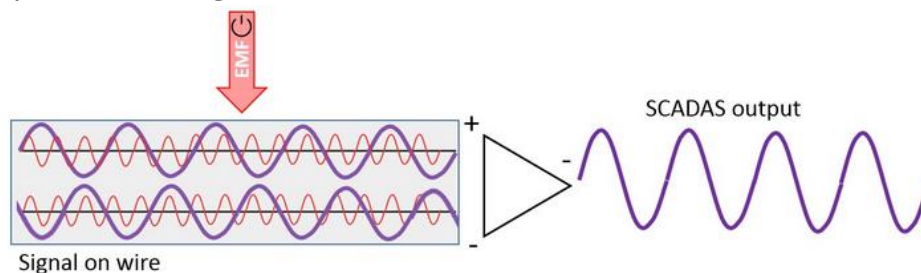


Abbildung 101: Differenzielle Signalübertragung ist unanfälliger gegen EMV-Störungen [52]

Als Bussystem für die Übertragung kommt hier zum Beispiel der aus dem Automobilbereich bekannte CAN-Bus infrage.

- Der **Shunt-Widerstand**, über den der AD-Wandler die Spannung erfasst, ermöglicht zwar die zuverlässige Aufnahme der Werte, beansprucht jedoch aufgrund der vergleichsweise hohen Ströme den Fototransistor mehr, als ein (Rail-to-Rail)-Operationsverstärker. Der Austausch des ursprünglich gedachten Operationsverstärkers gegen ein

Rail-to-Rail-Modell, das auch mit einer negativen Versorgungsspannung vorgespannt ist, ist sinnvoll. Um dem Operationsverstärker eine repräsentative Eingangsspannung zur Verfügung zu stellen, ist ein Transimpedanzverstärker aufgrund seiner hohen Eingangsimpedanz zwischen Fototransistor und Operationsverstärker auch besser geeignet als ein Shunt Widerstand.

- **Blende:** Das Mapping der gemessenen Spannungswerte auf Lichtstärken kann entfallen, wenn sich der Fototransistor so verhält wie im Datenblatt angegeben. Eine Abschirmung von seitlich eintreffendem Licht ist zwar immer noch notwendig, um die Größe des Messgeräts zu kompensieren, jedoch kann eventuell mit einer in Brennweite und Fokus einstellbaren Linsenkonstruktion (also einem Objektiv) datenblattkonformes Verhalten des Fototransistors erreicht werden.

## 7 Quellenverzeichnis

- [1] DIN EN ISO 80000-2; Größen und Einheiten – Teil 2: Mathematik (ISO 80000-2:2019, Korrigierte Fassung 2021-11); Deutsche Fassung EN ISO 80000-2:2019.
- [2] D. H. Rischke, „Theoretische Physik I: Mathematische Grundlagen der Theoretischen Physik“, Zugriffen: 9. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: [https://itp.uni-frankfurt.de/~drischke/Skript\\_Mechanik\\_I\\_SoSe2013.pdf](https://itp.uni-frankfurt.de/~drischke/Skript_Mechanik_I_SoSe2013.pdf)
- [3] „Fernerkundung mit Lasern“. Zugriffen: 9. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://seos-project.eu/laser-rs/laser-rs-c03-s02-p02.de.html>
- [4] DIN EN 12665, Licht und Beleuchtung –Grundlegende Begriffe und Kriterien für die Festlegung von Anforderungen an die Beleuchtung; Deutsche Fassung EN 12665:2024.
- [5] DIN EN 12464-1, Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten – Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen; Deutsche Fassung EN 12464-1:2021.
- [6] „Beleuchtungsstärke | licht.de“. Zugriffen: 9. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.licht.de/de/grundlagen/lichtlexikon/details-lichtlexikon/beleuchtungsstaerke>
- [7] „Formeln und Berechnungen › Production Partner WIKI“. Zugriffen: 9. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://wiki.production-partner.de/licht/formeln-und-berechnungen/>
- [8] „Lichtstärke (Photometrie)“, Wikipedia. 30. September 2024. Zugriffen: 4. Dezember 2024. [Online]. Verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Lichtst%C3%A4rke\\_\(Photometrie\)&oldid=249021768](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Lichtst%C3%A4rke_(Photometrie)&oldid=249021768)
- [9] „Luceos D/H2-L CDP 6500-840 ETDD 03 › Modul D/H2, 1490 mm symmetrisch › Luceos D LED-Anbauleuchte › Anbauleuchten › Innenbeleuchtung | LED Beleuchtung und individuelle Lichtlösungen | TRILUX“. Zugriffen: 10. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.trilux.com/products/de/Luceos-D-H2-L-CDP-6500-840-ETDD-03>
- [10] GOSSEN Foto- und Lichtmesstechnik GmbH, „Kompendium der Lichtmesstechnik“, Zugriffen: 9. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: [https://gossen-photo.de/wp-content/uploads/DL/LMT/Kompendium\\_der\\_Lichtmesstechnik\\_DE.pdf](https://gossen-photo.de/wp-content/uploads/DL/LMT/Kompendium_der_Lichtmesstechnik_DE.pdf)
- [11] Trilux GmbH & Co.KG, „Beleuchtungspraxis“, Zugriffen: 9. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.trilux.com/de/service/knowledge/beleuchtungspraxis/beleuchtungspraxis-pdf/>
- [12] DIN 5040-4; Leuchten für Beleuchtungszwecke Teil 4: Beleuchtungsscheinwerfer Begriffe und lichttechnische Bewertungsgrößen.
- [13] M. Woita, „Rotlicht“, prebit yacht lighting - premium light manufacturer. Zugriffen: 11. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.prebit.eu/de/info-center/tag-nachtsehen>
- [14] „Goniophotometer LSG-1900“, Asmetec - LED-Lichttechnik, Reinraum\_ESD-Technik und mehr. Zugriffen: 6. Dezember 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.asmetec-shop.de/de/LSG-1900.html>
- [15] „TEM6200FX01 Vishay Semiconductors | Mouser“, Mouser Electronics. Zugriffen: 12. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mouser.de/ProductDetail/Vishay-Semiconductors/TEM6200FX01?qs=%2Fjqivxn91cdDbKNzRLt-BUw%3D%3D>
- [16] „ITEM Engineeringtool“. Zugriffen: 14. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://item.engineering/DEde/tools/engineeringtool>
- [17] „Profil 8 40x40 – item“. Zugriffen: 15. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.item24.com/de-de/profil-8-40x40-leicht-natur-2633>

- [18] „Gleitschlitten-Führung 8 – item“. Zugriffen: 15. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.item24.com/de-de/gleitschlitten-fuehrung-8-80x40-mit-schlittenklemmung-62668#description>
- [19] „Dichte von Aluminium und Al-Legierungen“. Zugriffen: 15. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/aluminium/376-dichte-alu>
- [20] „Formeln für Auflagerreaktionen, Durchbiegung & Winkel - DI Strommer“, Website von Johannes Strommer. Zugriffen: 15. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.johannes-strommer.com/formeln/auflagerreaktionen-durchbiegung-winkel/>
- [21] „Elastizitätsmodul“, Wikipedia. 8. Oktober 2024. Zugriffen: 15. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Elastizit%C3%A4tsmodul&oldid=249260069>
- [22] „Flächenträgheitsmoment Tabelle“, INGTUTOR. Zugriffen: 15. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ingtutor.de/flaechentraegheitsmoment-tabelle/>
- [23] W. Demtröder und W. Demtröder, Experimentalphysik 1: Mechanik und Wärme. Berlin/Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [24] Hochschule München, „Trägheitsmoment und Winkelbeschleunigung (TMW)“, Zugriffen: 16. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: [http://dodo.fb06.fh-muenchen.de/lab\\_didaktik/pdf/web-massentraegheitsmoment.pdf](http://dodo.fb06.fh-muenchen.de/lab_didaktik/pdf/web-massentraegheitsmoment.pdf)
- [25] „drylin® E Schrittmotor, Litzen mit JST-Stecker, kurze Bauform, NEMA 17“. Zugriffen: 16. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.igus.de/product/MOT-AN-S-060-002-042-L-A-AAAO?artnr=MOT-AN-S-060-002-042-L-A-AAAO>
- [26] „6000 - Rillenkugellager | SKF“. Zugriffen: 16. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.skf.com/de/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-6000>
- [27] SKF GmbH, „Wälzlager“. Zugriffen: 16. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: [https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d1968035fe76/pdf\\_preview\\_medium/0901d1968035fe76\\_pdf\\_preview\\_medium.pdf](https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d1968035fe76/pdf_preview_medium/0901d1968035fe76_pdf_preview_medium.pdf)
- [28] „Tragfähigkeit und Lebensdauer | Schaeffler medias“. Zugriffen: 16. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://medias.schaeffler.de/de/load-carrying-capacity-and-life#20712987403>
- [29] „SKF Product select“. Zugriffen: 16. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://productselect.skf.com/rollingbearings/index.html#/single-bearing/search/>
- [30] „drylin® E Schrittmotor mit Litzen, NEMA 17“. Zugriffen: 17. Dezember 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.igus.de/product/MOT-AN-S-060-005-042-L-A-AAAA?artnr=MOT-AN-S-060-005-042-L-A-AAAA>
- [31] „Produkte | Arena 1200 Weiss Medium 23370lm 4000K Ra>80 On/Off“. Zugriffen: 11. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sg-as.com/de/produkte/arena/8246093860>
- [32] Vishay Intertechnology Inc., „Ambient Light Sensors - Circuit and Window Design“, Zugriffen: 18. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vishay.com/docs/84154/appnotesensors.pdf>
- [33] Texas Instruments Inc., „Texas Instruments OPA827, OPA827 Low-Noise, High-Precision, JFET-Input Operational Amplifier“, Zugriffen: 21. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.ti.com/lit/ds/sym-link/opa827.pdf?ts=1720526243745&ref\\_url=https%253A%252F%252Fnl.mouser.com%252F](https://www.ti.com/lit/ds/sym-link/opa827.pdf?ts=1720526243745&ref_url=https%253A%252F%252Fnl.mouser.com%252F)
- [34] „Nichtinvertierender Verstärker (Operationsverstärker)“. Zugriffen: 19. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/slt/0210151.htm>

- [35] „Die Grundlagen von Anti-Aliasing-Tiefpassfiltern (und warum sie mit dem ADC abgestimmt werden müssen)“, DigiKey. Zugriffen: 19. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.digikey.de/de/articles/the-basics-of-anti-aliasing-low-pass-filters>
- [36] Texas Instruments Inc., „Very Low Noise, 24-Bit Analog-to-Digital Converter“.
- [37] „Passive RC- und RL-Tiefpässe“. Zugriffen: 20. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.elektroniktutor.de/analogtechnik/tiefpass.html>
- [38] „Widerstandsreihen (E3, E6, E12, E24, E48, E96)“. Zugriffen: 20. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.elektronik-kompendium.de/sites/bau/1109071.htm>
- [39] „High-Precision AD/DA Board - Waveshare Wiki“. Zugriffen: 20. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.waveshare.com/wiki/High-Precision\\_AD/DA\\_Board](https://www.waveshare.com/wiki/High-Precision_AD/DA_Board)
- [40] MaxLinear Inc., „MaxLinear SPX1117 800mA Low Dropout Voltage Regulator“, Zugriffen: 20. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mouser.de/datasheet/2/146/SPX1117-1889129.pdf>
- [41] Texas Instruments Inc., „Texas Instruments, TPS7B84-Q1 150-mA, 40-V, Adjustable, Low-Dropout Regulator“, Zugriffen: 20. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps7b84-q1.pdf?ts=1732116546470&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.mouser.de%252F](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps7b84-q1.pdf?ts=1732116546470&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.mouser.de%252F)
- [42] Linear Technology Inc., „LinearTechnology LT1761 Series, 100mA, Low Noise, LDO Micropower Regulators in TSOT-23“, Zugriffen: 20. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mouser.de/datasheet/2/609/1761sff-2954081.pdf>
- [43] „What does rail-to-rail mean (Rail-to-Rail Op amp) ? | Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation | Asia-English“. Zugriffen: 20. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: [https://toshiba.semicon-storage.com/ap-en/semiconductor/knowledge/faq/linear\\_opamp/what-does-rail-to-rail-mean.html](https://toshiba.semicon-storage.com/ap-en/semiconductor/knowledge/faq/linear_opamp/what-does-rail-to-rail-mean.html)
- [44] „Evaluating Goodness of Fit“. Zugriffen: 22. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.mathworks.com/help/curvefit/evaluating-goodness-of-fit.html>
- [45] „7651IP HE LW 100-840ETDD L150 01 › 1500 mm › E-Line Next › Lichtbandleuchten und Lichtleisten › Innenbeleuchtung | LED Beleuchtung und individuelle Lichtlösungen | TRILUX“. Zugriffen: 4. Dezember 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.trilux.com/products/de/7651IP-HE-LW-100-840ETDD-L150-01>
- [46] „7651 HE LN 80-840ETDD L150 01 › 1500 mm › E-Line Next › Lichtbandleuchten und Lichtleisten › Innenbeleuchtung | LED Beleuchtung und individuelle Lichtlösungen | TRILUX“. Zugriffen: 4. Dezember 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.trilux.com/products/de/7651-HE-LN-80-840ETDD-L150-01>
- [47] „LED-Nachrüstungseinsatz | LED-Lichtbandeinsatz | Energieeffiziente Renovierung | Aura Light“, | Aura Light. Zugriffen: 4. Dezember 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.auralight.com/de/leuchten/renett>
- [48] „REDOX-1524 10250 DALI 840 NB L1“, Glamox Prod. Zugriffen: 4. Dezember 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.glamox.com/de/pbs/produkte/innenbeleuchtung-/lineare-leuchten/rdx903005/>
- [49] „Produkte | Arena 1200 Weiss Medium 9000lm 4000K Ra>80 On/Off“. Zugriffen: 4. Dezember 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sg-as.com/de/produkte/arena/8246093527>
- [50] EDI, „Wie funktioniert SPI – einfach erklärt! – Edis Techlab“. Zugriffen: 25. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://edistechlab.com/wie-funktioniert-spi/>
- [51] „SPI - serielle Kommunikation - CPOL - CPHA - Bit Banging - Arduino UNO - Unterricht - Lernmaterial - Mikrocontroller - Physik - MINT“. Zugriffen: 25. November

2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.rahner-edu.de/grundlagen/signale-richtig-verstehen/spi-besser-verstehen-1/>
- [52] „Single Ended vs Differential Inputs“. Zugegriffen: 25. Dezember 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://community.sw.siemens.com/s/article/single-ended-vs-differential-inputs>
- [53] M. V. S. Import, „Was sind Schrittmotoren, welche Typen gibt es und wie funktionieren sie?“, KEM. Zugegriffen: 29. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://kem.industrie.de/elektromotoren/was-sind-schrittmotoren-welche-typen-gibt-es-und-wie-funktionieren-sie/>
- [54] reichelt elektronik G. I. Team (webmaster@reichelt.de), „FIN 40.52.9 5V - Steckrelais, 2x UM, 250V/8A, 5V, RM 5,0mm“, Elektronik und Technik bei reichelt elektronik günstig bestellen. Zugegriffen: 29. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.reichelt.de/steckrelais-2x-um-250v-8a-5v-rm-5-0mm-fin-40-52-9-5v-p271337.html>
- [55] „Digitaler Schrittmotortreiber 1.0-4.5A 18-50VDC für Nema 17, 23, 24 Schrittmotor - DM542T|STEPPERONLINE“. Zugegriffen: 29. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.omc-stepperonline.com/de/digitaler-schrittmotortreiber-1-0-4-2a-20-50vdc-fuer-nema-17-23-24-schrittmotor-dm542t>
- [56] reichelt elektronik G. I. Team (webmaster@reichelt.de), „S7 1211 DC - SIMATIC S7-1200, CPU 1211C,DC/DC“, Elektronik und Technik bei reichelt elektronik günstig bestellen. Zugegriffen: 28. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.reichelt.de/simatic-s7-1200-cpu-1211c-dc-dc-s7-1211-dc-p381717.html>
- [57] „Welcome to Python.org“, Python.org. Zugegriffen: 28. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.python.org/about/>
- [58] „Mission“, Python.org. Zugegriffen: 28. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.python.org/psf/mission/>
- [59] „What is Python? Executive Summary“, Python.org. Zugegriffen: 28. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.python.org/doc/essays/blurb/>
- [60] R. P. Ltd, „Buy a Raspberry Pi 3 Model B+“, Raspberry Pi. Zugegriffen: 29. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/>
- [61] „tkinter — Python interface to Tcl/Tk“, Python documentation. Zugegriffen: 30. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://docs.python.org/3/library/tkinter.html>
- [62] „Grundlegende photometrische Größen Gigahertz-Optik“. Zugegriffen: 4. Dezember 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.gigahertz-optik.com/de-de/service-und-support/informationsportal/grundlagen-lichtmesstechnik/licht-farbe/photometrie-groessen/>
- [63] „CENTAURUS 270, DDP-Prismenscheibe, 27020 lm, 159 W, ESG glasklar, breitstrahlend, Schwenkbügel | NORKA: Beleuchtung für extreme Bedingungen“. Zugegriffen: 2. Dezember 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://norka.com/de/products/families/centaurus/9152704462-H1>
- [64] „Using Matplotlib — Matplotlib 3.9.3 documentation“. Zugegriffen: 2. Dezember 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://matplotlib.org/stable/users/index>

### **Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

*Hamburg, den* \_\_\_\_\_