



Software- handbuch

DUGR Calculator



Inhalt

1	Abbildungsverzeichnis	2
2	Einleitung.....	3
3	UGR – Unified Glare Rating.....	4
3.1	Grundlagen	4
3.2	Korrigiertes UGR-Verfahren nach CIE 232:2019.....	4
4	Realisierung des Verfahrens nach CIE 232:2019 mit dem DUGR Calculator ..	7
4.1	Leuchtdichtebilder.....	7
4.2	Kamerakoordinatensystem	7
4.3	Filterung.....	8
4.3.1	<i>Anwendung auf perspektivisch verzerrte Bilder</i>	<i>8</i>
4.3.2	<i>Anwendung auf perspektivisch entzerrte Bilder</i>	<i>9</i>
4.4	Leuchtdichte – Schwellwertoperation und Auswertung.....	9
5	DUGR Calculator	10
5.1	Grundlagen	10
5.2	Grundeinstellungen	11
5.3	Projektdateien	12
5.3.1	<i>Parameter</i>	<i>12</i>
5.3.2	<i>Quellbilder.....</i>	<i>12</i>
5.4	Allgemeine Projektparameter	12
5.5	Aufnahmeparameter	12
5.6	Lichtaustrittsfläche	13
5.7	Laden von Leuchtdichtebildern	13
5.8	Auswertung.....	14
5.8.1	<i>Quellbild und ROI Festlegung.....</i>	<i>14</i>
5.8.2	<i>Festlegung der Leuchtenparameter.....</i>	<i>16</i>
5.8.3	<i>Ausführen der Berechnung</i>	<i>16</i>
5.8.4	<i>Ergebnisse und Plausibilitätstest</i>	<i>16</i>
6	Literaturverzeichnis	19

1 **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Beleuchtungssituation aus Beobachterraichtung	6
Abbildung 2: Positionierung der Leuchtdichtemesskamera	7
Abbildung 3: Kamerakoordinatensystem.....	7
Abbildung 4: Programmoberfläche nach dem Start (Standardmodus ohne Entzerrung)	10
Abbildung 5: Programmoberfläche für den Modus Bildentzerrung	11
Abbildung 6: Dialog mit Grundeinstellungen	11
Abbildung 7: Allgemeine Aufnahmeparameter	12
Abbildung 8: Angaben zur Lichtaustrittsfläche	13
Abbildung 9: Beispiel TXT Bilddatei.....	14
Abbildung 10: Quellbildanzeige	15
Abbildung 11: Polygon ROI.....	15
Abbildung 12: Präzise Polygonpositionierung.....	15
Abbildung 13: Einzelne ROI im ROI-Bereich	16
Abbildung 14: Beispiel mit zwei ROIs	16
Abbildung 15: Gefiltertes Bild	16
Abbildung 16: Schwellwertbild	16
Abbildung 17: Ergebnisse	17
Abbildung 18: Plausibilitätstest.....	18

3 UGR – Unified Glare Rating

3.1 Grundlagen

Das UGR (Unified Glare Rating) Verfahren wurde 1995 durch die CIE entwickelt (CIE, 1995). Hierbei wird der Blendungsgrad der psychologischen Direktblendung einer Beleuchtungsanlage aus einer Beobachterposition bestimmt. Die UGR Kennzahl berechnet sich mit folgender Formel:

$$R_{UG} = 8 \cdot \log_{10} \frac{0.25}{L_b} \sum_{i=1}^n \frac{L_{s,i}^2 \cdot \omega_i}{p_i^2} \quad (1)$$

Dabei ist

R_{UG}	der UGR Blendwert ($10 \leq R_{UG} \leq 31$);
L_b	die Hintergrundleuchtdichte;
n	die Anzahl der Lichtquellen;
$L_{s,i}$	die mittlere Leuchtdichte der Lichtquelle i ;
ω_i	der Raumwinkel unter dem die Lichtquelle gesehen wird;
p_i	der Positionsindex der Lichtquelle i in Bezug zur Blickrichtung des Beobachters nach Guth.

Der UGR Wert bezieht sich immer auf eine Beleuchtungssituation mit n Leuchten von einer von einer Beobachterposition aus und ist somit keine feste Kenngröße einer Leuchte. Eine Möglichkeit zur UGR Berechnung besteht darin, ein Modell für eine Beleuchtungsanlage in einem Standardraum zu definieren und daraus die erforderlichen Größen abzuleiten. Dies wird in der sogenannten Tabellenmethode entsprechend CIE 117:1995 (CIE, 1995) realisiert. Damit besteht die Möglichkeit verschiedene Leuchten hinsichtlich ihres Blendungsgrades anhand einer Standardanordnung zu vergleichen.

Eine weitere Möglichkeit besteht in der direkten Messung einer realen Beleuchtungssituation mit Hilfe einer Leuchtdichtemesskamera (ILMD - imaging luminance measuring device)¹, siehe (Porsch, et al., 2015), (Porsch & Schmidt, 2007), (Schmidt, et al., 2006).

3.2 Korrigiertes UGR-Verfahren nach CIE 232:2019

Das UGR Verfahren wurde ursprünglich für die in den 90er Jahren üblichen Lichtquellen konzipiert, also Leuchten mit Leuchtstofflampen, Glühlampen oder Halogenlampen. Der gültige Raumwinkelbereich ist daher auf 0,0003 sr bis 0,1 sr begrenzt. Auch wenn mit der CIE 147:2002 (CIE, 2002) eine Erweiterung des Verfahrens für kleinere und größere Leuchten geschaffen wurde, ist eine Anwendung auf komplexe und inhomogene Leuchtdichteverteilungen nicht berücksichtigt. Hier bietet sich die Anwendung der bildauflösenden Leuchtdichtemesstechnik an. Mit der CIE 232:2019 (CIE, 2019) wird ein Verfahren vorgestellt, welches eine Korrektur der klassischen UGR Kennwerte auf Basis von gemessenen Leuchtdichtebildern realisiert.

¹ https://www.technoteam.de/produkte/photometer_colorimeter/index_ger.html

Zur Anpassung der Leuchtdichteverteilungen an die menschliche Wahrnehmung werden die Verteilungen entsprechend der Sehschärfe bzw. der Größe der rezeptiven Felder auf der Netzhaut mit Hilfe eines Gaußfilters gefiltert. Anschließend werden nur Leuchtdichten oberhalb einer bestimmten für die psychologische Blendung relevanten Leuchtdichte berücksichtigt.

Basierend auf der Gleichung (1) wird zur Berechnung des korrigierten UGR Wertes $R_{UG,corr}$ ein Korrekturfaktor k^2 eingeführt. Zur Vereinfachung wird im Folgenden nur die Berechnung für eine Leuchte betrachtet.

$$R_{UG,corr} = 8 \cdot \log_{10} \left(\frac{0.25}{L_b} k^2 \frac{L_s^2 \cdot \omega}{p^2} \right). \quad (2)$$

Ebenso ergibt sich $R_{UG,corr}$ auch direkt aus der für die Blendung relevanten effektiven Leuchtdichten L_{eff} und dem zugehörigen effektiven Raumwinkel ω_{eff} :

$$R_{UG,corr} = 8 \cdot \log_{10} \left(\frac{0.25}{L_b} k^2 \frac{L_{eff}^2 \cdot \omega_{eff}}{p^2} \right). \quad (3)$$

Der Korrekturfaktor k^2 ergibt sich dann aus (2) und (3) zu

$$k^2 = \frac{L_{eff}^2 \cdot \omega_{eff}}{L_s^2 \cdot \omega} = \frac{L_{eff}^2 \cdot A_{p,eff}}{L_s^2 \cdot A_p} = \frac{L_{eff}^2 \cdot A_{eff}}{L_s^2 \cdot A}. \quad (4)$$

Dabei ist

- A_{eff} die effektive Fläche der Blendungsrelevanten Leuchtdichten;
- $A_{p,eff}$ die aus Beobachtungswinkel projizierte effektive Fläche;
- A die zur mittleren Leuchtdichte L_s zugeordneten Fläche („Lichtaustrittsfläche“);
- A_p die aus Beobachtungswinkel projizierte Lichtaustrittsfläche
 $A_p = A \cos \alpha_E$.

Berechnet man die mittlere Leuchtdichte L_s aus der Lichtstärke I in Beobachterraichtung mit

$$L_s = \frac{I}{A_p}, \quad (5)$$

ergibt sich

$$k^2 = \frac{L_{eff}^2 \cdot A_{eff} \cdot A_p}{I^2}. \quad (6)$$

Es wird nun eine korrigierte Flächengröße A_{new} bzw. die projizierte Fläche $A_{p,new}$ eingeführt, mit der sich der korrigierte UGR Wert $R_{UG,corr}$ aus der klassischen UGR Formel (1) ergeben würde.

$$A_{new} = \frac{A}{k^2}. \quad (7)$$

A_{new} ist also nun die Fläche, die man anstelle der vereinfacht angenommen Lichtaustrittsfläche verwendet um den Korrigierten UGR Wert zu erhalten. Der UGR Differenzwert $DUGR$ ergibt sich direkt aus k^2 :

$$DUGR = 8 \cdot \log_{10} k^2. \quad (8)$$

Das CIE 232:2019 Verfahren sieht die Berechnung der DUGR Werte für die Beobachterwinkel α_E $25^\circ \pm 5^\circ$ und $40^\circ \pm 5^\circ$ vor. Bei asymmetrischen Verteilungen erfolgen die Messungen jeweils in Längs- und Querrichtung zur Leuchte. Als Ergebnis wird der größte Ermittelte $DUGR$ Wert verwendet.

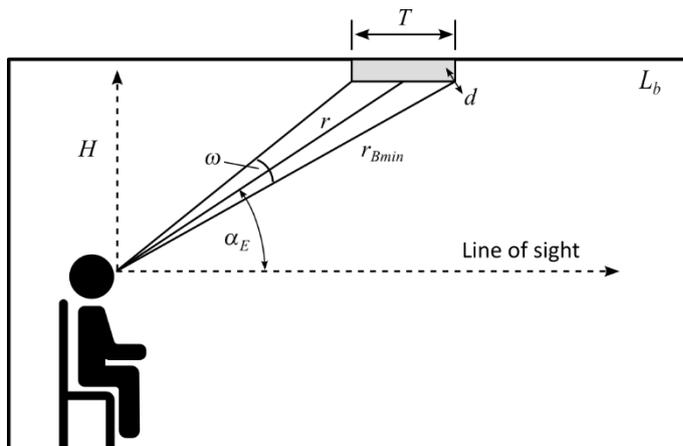


Abbildung 1: Beleuchtungssituation aus Beobachterrichtung

Ein praktischer Leitfaden zur Umsetzung des Verfahrens nach CIE 232:2019 steht beispielsweise mit der CIE TN 014:2023 (CIE, 2023) und (Funke, et al., 2021) zur Verfügung.

4 Realisierung des Verfahrens nach CIE 232:2019 mit dem DUGR Calculator

4.1 Leuchtdichtebilder

Der *DUGR Calculator* setzt Leuchtdichteaufnahmen entsprechend nebenstehender Aufnahmesituation voraus. Die Leuchtdichtemesskamera befindet sich im Abstand r und im Winkel α_E zur Leuchte, wobei die zentrale Blickrichtung (optische Achse) auf die Mitte der Lichtaustrittsfläche ausgerichtet ist.

Der Kameraabstand r muss mindestens das 4,1-fache der maximalen Ausdehnung D der Lichtaustrittsfläche betragen.

In CIE232:2019 wurde die Mindestauflösung des Leuchtdichtebilds auf $d = 12 \text{ mm}$ festgelegt. Zur Ableitung dieses Maßes siehe A.1 (CIE, 2019). Bei der messtechnischen Erfassung der Leuchtdichten sollte eine Bildauflösung von mindestens $d / 10\text{px} = 1.2 \text{ mm/px}$ gewährleistet werden.

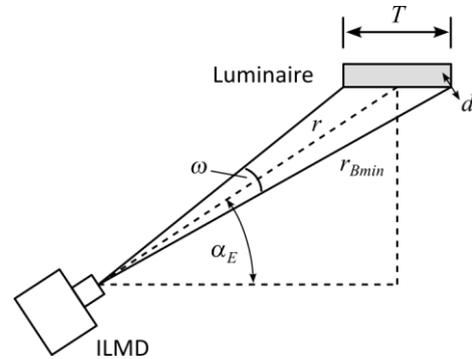


Abbildung 2: Positionierung der Leuchtdichtemesskamera

4.2 Kamerakoordinatensystem

Für das Kamerakoordinatensystem wird im DUGR Calculator das Modell der Zentralprojektion verwendet (Abbildung 3).

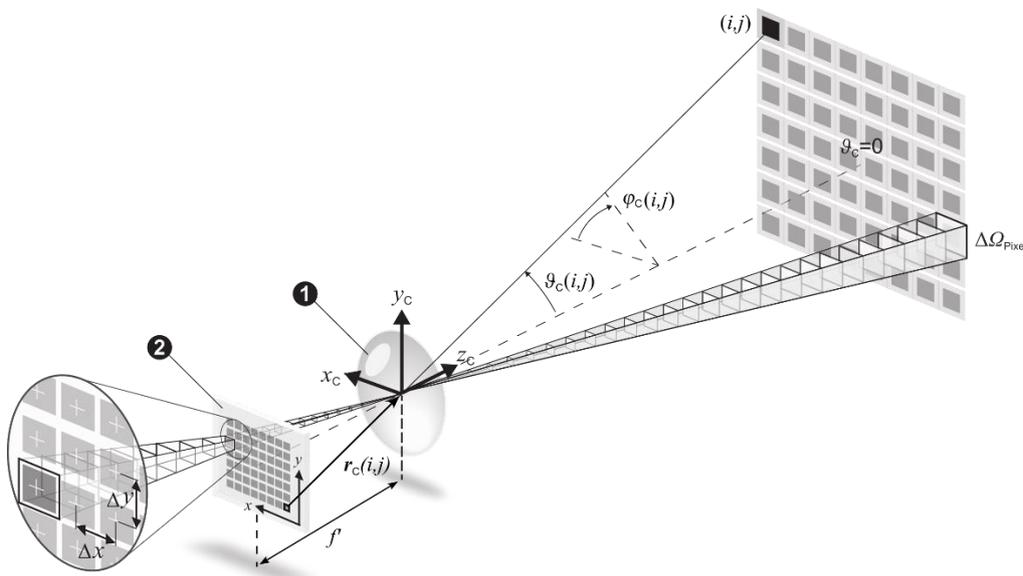


Abbildung 3: Kamerakoordinatensystem

Dabei sind

- x, y die Sensorkoordinaten;
- $\Delta x, \Delta y$ die Pixelabstände, wobei $\Delta x = \Delta y$ vorausgesetzt wird;

- f' die bildseitige Brennweite des Objektivs;
 $\Delta\Omega_{\text{Pixel}}$ der Raumwinkel eines Pixels;
 $r_c(i, j)$ der Vektor von einem Pixel zum Projektionszentrum;
 $\vartheta_c(i, j), \varphi_c(i, j)$ die Winkel von $r_c(i, j)$ in Kugelkoordinaten.

Das Projektionszentrum ist die Eintrittspupille des Objektivs, d.h., bei der Bestimmung des Kameraabstandes muss die Lage der Eintrittspupille bekannt sein. Ebenso muss die bildseitige Brennweite des Objektivs möglichst genau stimmen, da hieraus die Winkel und korrespondierenden Raumwinkelelemente berechnet werden (siehe Plausibilitätstest in 5.8.4).

4.3 Filterung

Die Filterung des Bildes dient der Anpassung an das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges. Die Halbwertbreite des Filters wurde für die Auswertungskonstellation der CIE232:2019 auf 12 mm festgelegt (siehe 4.1). Die Auswertung kann auf perspektivisch verzerrten und entzerrten Bildern stattfinden.

4.3.1 Anwendung auf perspektivisch verzerrte Bilder

Zur Bestimmung der Filterbreite des Gaußfilters wird zunächst die Mindest-Messauflösung $R_{o,\min}$ berechnet:

$$R_{o,\min} = \frac{\arctan\left(\frac{d}{r_{B\min}}\right)}{10\text{px}}, \quad (9)$$

mit

$$r_{B\min} = \sqrt{r^2 + \left(\frac{T}{2}\right)^2 + r \cdot T \cdot \cos \alpha_E}. \quad (10)$$

Dabei ist

- $r_{B\min}$ der maximale Abstand vom Projektionszentrum zur Grenze der Lichtaustrittsfläche;
 T die größte Ausdehnung der leuchtenden Fläche aus der Beobachterrichtung α_E .

Die Filter –Halbwertbreite (in Pixel) ergibt sich dann mit

$$FWHM_o = \frac{R_{o,\min}}{R_o}. \quad (11)$$

Für die Standardabweichung σ_o und die Filterlänge F_o in Pixeln erhält man nun

$$\sigma_o = \frac{FWHM_o}{2.3548} \quad (12)$$

und

$$F_o = 2 \cdot \lceil 3 \cdot \sigma_o \rceil + 1. \quad (13)$$

Das Leuchtdichtebild wird nun mittels Gaußfilter mit der berechneten Filterlänge gefiltert.

4.3.2 Anwendung auf perspektivisch entzerrte Bilder

Bei perspektivisch entzerrten Bildern ist die Pixelauflösung R_{mm} in mm/px konstant, d.h., die Filterhalbwertbreite ergibt sich dann direkt aus

$$FWHM_{12mm} = \frac{12mm}{R_{mm}} \quad (14)$$

und die Standardabweichung σ_{12mm} sowie die Filterlänge F_{12mm} äquivalent zu (12) und (13).

4.4 Leuchtdichte – Schwellwertoperation und Auswertung

Entsprechend der CIE232:2019 sind nun nur Leuchtdichten oberhalb der Schwelle von 500 cd/m^2 zu berücksichtigen. Nach der Schwellwertoperation erhält man ein Leuchtdichtebild, aus dem man mit Hilfe des Kamerakoordinatensystems bzw. bei entzerrtem Bild mit der Pixelauflösung R_{mm} die effektiven Größen A_{eff} bzw. $A_{p,eff}$, L_{eff} und ω_{eff} ermitteln kann.

Für die Berechnung von k^2 gibt es verschiedene Ansätze. Nach Gleichung (4) werden nur Größen verwendet, die sich aus dem Leuchtdichtebild ableiten lassen, also auch die mittlere Leuchtdichte L_s der gesamten Lichtaustrittsfläche. Diese Leuchtdichte wird beim klassischen UGR Tabellenverfahren (CIE, 1995) mit der einfachen Berechnung nach Gleichung (5) aus der Lichtstärke in die entsprechende Richtung gewonnen. Nun wird in der CIE232:2019 mit Gleichung (6) die Berechnung von k^2 über die Lichtstärke mit der Berechnung über die gemessene Leuchtdichte L_s gleichgesetzt obwohl der Messabstand ggf. deutlich innerhalb der photometrischen Grenzentfernung liegt ((CIE, 2015), (Jacobs, et al., 2015)). Hier ist also Vorsicht geboten und die Ergebnisse beider Ansätze zu prüfen.

Insbesondere bei flachen Winkeln und gut entblendeten Leuchten ist die Lichtstärke in diese Richtungen bereits sehr klein und damit können sich Messfehler und vor allem kleine Abweichungen in den Leuchtenausrichtungen stark auf das Ergebnis auswirken. Es stellt sich auch die Frage, woher man die Lichtstärken nehmen soll, denn die „offiziellen“ Produktdaten wurden ggf. mit einer anderen Leuchte gemessen und die Daten wurden ggf. nachbearbeitet (symmetrisiert, geglättet, Messauflösung verändert usw.), womit sich in diesen kritischen Bereichen größere Unsicherheiten bei der Anwendung von Gleichung (6) ergeben. Andererseits soll ja ein DUGR Wert ermittelt werden, der sich auf die mit den „offiziellen“ Produktdaten berechneten UGR Werte (UGR Tabellenverfahren) bezieht.

Daher wäre es optimal, die Messung der Lichtstärkeverteilung und die Leuchtdichtemessung in einem Messaufbau vorzunehmen, beispielsweise mit einem *RiGO801 Goniophotometer*².

² https://www.technoteam.de/produkte/goniophotometer_rigo801/index_ger.html

5 DUGR Calculator

5.1 Grundlagen

Wie bereits in der Einleitung erläutert, ist der *DUGR Calculator* ein in quelloffenes in Python geschriebenes Programm. Zur Verwendung des Programms können mit entsprechenden Kenntnissen direkt die Pythonquellen verwendet werden oder man greift auf den Installer zurück. Der Installer beinhaltet die mit dem *PyInstaller* Tool erstellte eigenständig lauffähige Distribution aller benötigter Komponenten.

Das Programm startet mit der folgenden Ansicht.

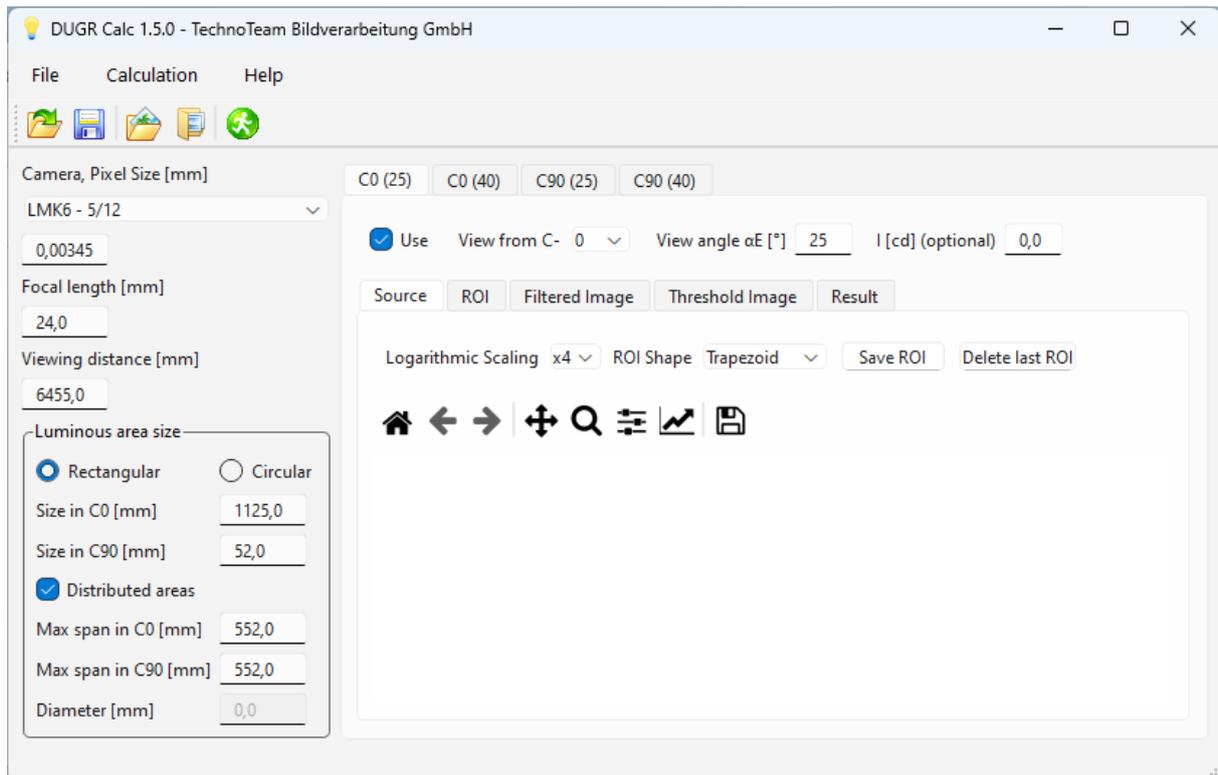


Abbildung 4: Programmoberfläche nach dem Start (Standardmodus ohne Entzerrung)

Dies ist der Standardmodus, bei dem die Leuchtdichteaufnahmen nicht entzerrt werden. Auf die Variante mit perspektivischer Bildentzerrung wird über den Menüpunkt *Calculation – Projective rectification mode* gewechselt (siehe Abbildung 5). Dieser Modus wurde seit langer Zeit nicht überarbeitet und befindet sich noch in einem experimentellen Stadium. Im Folgenden wird daher hauptsächlich auf den Standardmodus eingegangen.

Die Standardansicht ist in zwei Bereiche eingeteilt. Im linken Bereich werden die allgemeinen Angaben zum Auswertungsprojekt vorgenommen und im rechten Bereich befinden sich 4 Registerkarten mit eigenen Auswertungsbereichen für die genutzten Kameraorientierungen.

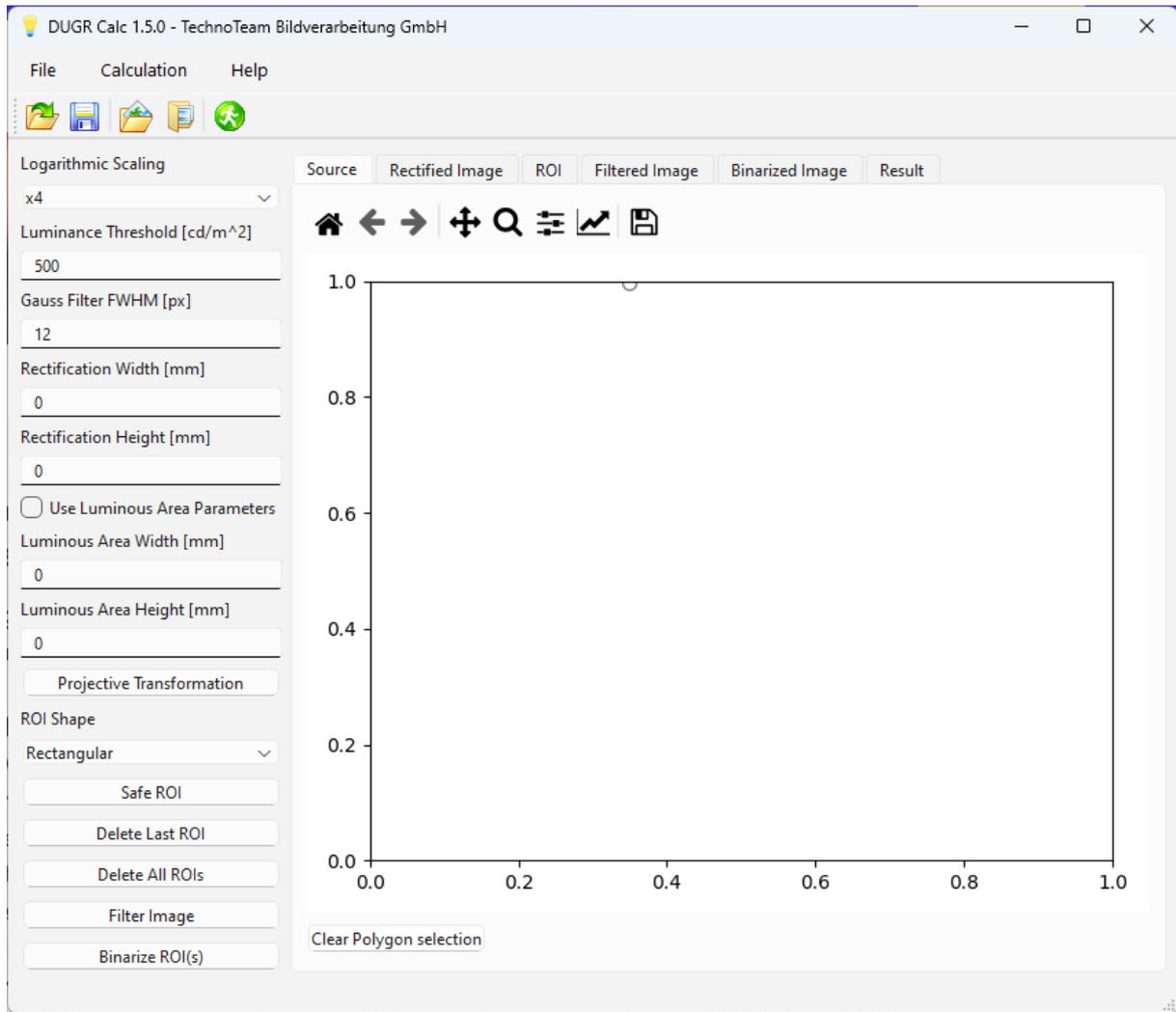


Abbildung 5: Programmoberfläche für den Modus Bildentzerrung

5.2 Grundeinstellungen

Die Grundeinstellungen sind über den Menüpunkt *File – Settings ...* erreichbar. Hierbei handelt es sich bisher um die Leuchtdichteschwelle (Standard ist 500 cd/m^2), die „Augenauflösung“ als Parameter d [mm] (Standard ist 12 mm, siehe 4.1) und die Option *Evaluation only inside ROI*. Diese Option ermöglicht es, zwei Sichtweisen der Auswertung der gefilterten Leuchtdichtebilder zu berücksichtigen. Für die Auswertung der Lichtaustrittsregionen werden diese Regionen umrandet (siehe 5.8.1).

Nach der Filterung können ggf. außerhalb dieser Grenzen Leuchtdichten vorhanden sein. Nun stellt sich die Frage, ob man die Auswertung nur innerhalb der Grenzen vornimmt oder auch die außerhalb liegenden Leuchtdichteanteile berücksichtigt. Der *DUGR Calculator* geht davon aus, dass beim menschlichen Auge ja auch eine „Filterung“ über die Grenzen der Lichtaustrittsfläche hinaus vorliegt und schaltet diese Option standardmäßig aus. Da ggf. nicht jeder dieser Ansicht ist und die CIE232:2019 anders interpretiert, kann die Option in diesem Fall aktiviert werden.

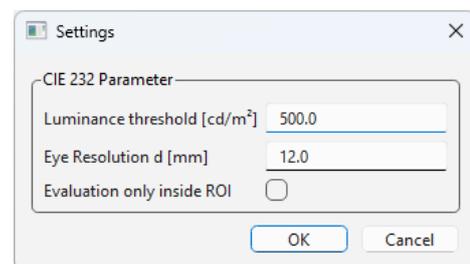


Abbildung 6: Dialog mit Grundeinstellungen

5.3 Projektdateien

Eine wesentliche Erleichterung bei der Handhabung des *DUGR Calculator* besteht in der Möglichkeit komplette Projekte zu speichern und wieder zu laden (Menü *File load/save project*). Alle zum Projekt gehörenden Daten, also Einstellungen, Leuchtdichtebilder und Auswertungsregionen werden dabei zu einer TAR – Datei zusammengestellt. So sind bei Bedarf auch die Rohdaten unabhängig vom *DUGR Calculator* einsehbar.

5.3.1 Parameter

Die Parameter werden in JSON Dateien abgelegt. Es gibt allgemeine Parameter (*common_param.json*), Parameter für die 4 Auswertungen (*{Bildindex}_param.json*) und für jede Auswertung die Parameter der verwendeten ROI (Region of Interest) Bereiche (*{Bildindex}_roi{roi index}.json*).

```

"common": {
  "camera_id": "LMK6",
  "focal_length": 24.0,
  "lum_area_C0": 250.0,
  "lum_area_C90": 250.0,
  "lum_area_d": 0.0,
  "lum_area_distributed": true,
  "lum_area_span_C0": 290.0,
  "lum_area_span_C90": 290.0,
  "lum_area_type": 0,
  "pixel_size": 0.00345,
  "viewing_distance": 1800.0
}
common_param.json

"eval": {
  "c_angle": 0,
  "luminous_intensity": 0.0,
  "use_flag": true,
  "viewing_angle": 25
}
{Bildindex}_param.json

"roi": {
  "id": "TrapezoidRoi",
  "num_vertices": 4,
  "v0_x": 1613,
  "v0_y": 1363,
  "v1_x": 2659,
  "v1_y": 1365,
  "v2_x": 2748,
  "v2_y": 1838,
  "v3_x": 1542,
  "v3_y": 1842
}
({Bildindex}_roi{roi index}.json

```

5.3.2 Quellbilder

Die Leuchtdichte-Quellbilder werden als Numpy Arrays im *.npy* Format gespeichert. Zugehörig wird eine Parameterdatei (*{Bildindex}_srcimg_param.json*) abgelegt.

```

"img": {
  "columns": 4089,
  "first_column": 8,
  "first_line": 16,
  "lines": 2998
}

```

5.4 Allgemeine Projektparameter

Die Eingabefelder der allgemeinen Projektparameter befinden sich im linken Bereich des Programmfensters. Im oberen Bereich erfolgen die Angaben zur Kamera und zum Messabstand und im unteren Bereich sind die geometrischen Parameter zur Leuchte bzw. zur Lichtaustrittsfläche anzugeben.

5.5 Aufnahmeparameter

Der *DUGR Calculator* benötigt genaue Angaben zum Kameramodell (siehe 4.2) und zum Messabstand. Zunächst muss der Pixelabstand in mm angegeben werden. Zur Vereinfachung beinhaltet der Eingabebereich eine vordefinierte Liste von Kameras und zugehörigen Pixelabständen. Für nicht aufgeführte Kameras ist „Custom camera“ zu wählen und dann der entsprechende Pixelabstand einzutragen.

The screenshot shows a software window titled "Camera, Pixel Size [mm]". It contains three input fields: a dropdown menu for "Camera" with "LMK6 - 5/12" selected, a text input for "Pixel size [mm]" with the value "0,00345", a text input for "Focal length [mm]" with the value "24,0", and a text input for "Viewing distance [mm]" with the value "6455,0".

Abbildung 7: Allgemeine Aufnahmeparameter

Für den Messabstand ist der Abstand zwischen Eintrittspupille des Objektivs und Drehzentrum der Leuchte zu wählen (siehe 4.1).

5.6 Lichtaustrittsfläche

Die Größenangaben zur Lichtaustrittsfläche werden zur Berechnung von A (siehe Gleichung (4)) verwendet aber auch für die Berechnung der Filtergröße (siehe 4.3). Nun gibt es Leuchten mit verteilten Lichtaustrittsflächen, bei denen normalerweise nur die Summe der Einzelflächen und nicht die umspannende Gesamtfläche für die klassische UGR Berechnung angegeben wird (Eulumdat / IES Dateien). Diese Flächenangaben müssen so gewählt werden wie sie für das UGR Tabellenverfahren eingesetzt wurden damit der ermittelte DUGR Wert einen korrekten Bezug hat.

Abbildung 8: Angaben zur Lichtaustrittsfläche

Da die Auswertungen automatisch für alle Kameraorientierungen erfolgen können und der Algorithmus die jeweils gesehenen Abmessungen kennen muss, wird bei der Angabe der Abmessungen zwischen der Länge der (netto) Lichtaustrittsfläche in C0 und in C90 unterschieden. Falls es nur eine Lichtaustrittsfläche gibt, sind diese Angaben für die Berechnung von $r_{B\min}$ (siehe 4.3) relevant. Bei verteilten Lichtaustrittsflächen muss die Option *Distributed areas* aktiviert und die umschließenden maximalen Außenabmessungen der Lichtaustrittsflächen in den *Max span* Feldern angegeben werden. In diesem Fall erfolgt die Berechnung von A aus den oberen Angaben und die Berechnung von $r_{B\min}$ aus den unteren Angaben.

Bei kreisförmigen Lichtaustrittsflächen ist aktuell keine Berücksichtigung von verteilten Flächen vorgesehen. Hier ist nur die Angabe des Kreisdurchmessers möglich. Falls dennoch verteilte Kreisflächen vorliegen, kann man sich mit der Angabe von äquivalenten Rechteckflächen behelfen.

5.7 Laden von Leuchtdichtebildern

Im *File* Menü gibt es zwei Möglichkeiten zum Laden von Leuchtdichtebildern. Mit *Open image ...* wird ein Bild in die aktuelle Auswertungsregisterkarte geladen. Die Funktion *Open TT image series ...* ermöglicht es TechnoTeam Leuchtdichte-Aufnahmeserien zu laden und dabei automatisch die Bilder der Normpositionen (25° und 40° in C0 und C90) auszuwählen und in die zugehörigen Auswertungen zu übertragen. Diese Aufnahmeserien werden mit der Software *LMK LabSoft*³ positionsgesteuert generiert.

Unterstützte Dateiformate sind das TechnoTeam .pf Bildformat und ein .txt Format, welches als *Numpy* Array mit folgenden Programmzeilen eingelesen wird:

```
with open(image_file, 'r') as file_object:
    pixel_values = file_object.read().replace(', ', '.').split('\n')[2:-1]

image_array = np.genfromtxt(pixel_values, dtype=np.float32, delimiter='\t')
```

³ https://www.technoteam.de/produkte/lmk_software/labsoft/index_ger.html

Es handelt sich also um eine ASCII Datei, bei der die ersten beiden Zeilen und die letzte Zeile ignoriert werden. Die Leuchtdichtewerte sind mit Tabulator zu trennen. Werte mit Kommata als Dezimalseparatoren werden durch Punkte ersetzt, so dass sie von *Numpy* korrekt eingelesen werden.

```

First.lineCRLF
Second.lineCRLF
1→2→3→4→5CRLF
6→6→6→6→6CRLF
7→7→8→9→10CRLF
11→8→8→8→8CRLF
7→6→5→4→3CRLF
Empty.line

```

Abbildung 9: Beispiel TXT Bilddatei

5.8 Auswertung

Der *DUGR Calculator* stellt 4 Auswertungsfenster in Registerkarten zur Verfügung. Im oberen Bereich eines Auswertungsfensters gibt es die Option *Use*, welche festlegt, ob dieser Auswertungsbereich verwendet werden soll, die Angabe der C-Ebene und den Aufnahmewinkel (siehe Abbildung 1 in Abschnitt 3.2). Die optionale Angabe der Lichtstärke muss mit Bedacht erfolgen (siehe Abschnitt 4.4). Falls hier eine Lichtstärke angegeben wird, erfolgt die Berechnung der mittleren Leuchtdichte aus der Lichtstärke und nicht aus dem Bild.

Unterhalb dieser Eingabefelder befinden sich mehrere Registerkarten mit dem Quellbild (*Source*), den ausgewählten Lichtaustrittsflächen (*ROI*), dem gefilterten Bild (*Filtered Image*), dem Schwellwertbild (*Threshold Image*) und schließlich der Ergebnisseite (*Result*).

5.8.1 Quellbild und ROI Festlegung

Ein Leuchtdichtebild wird nach dem Laden in der Quellbildansicht dargestellt. Hier gibt es die Möglichkeit die Skalierung der Farbpalette zwischen logarithmisch 2 und 7 umzuschalten.

Zur Steuerung der Ansicht ist eine Iconleiste eingeblendet. Diese Funktionen wie auch die Bildanzeige werden von der Python Bibliothek Matplotlib bereitgestellt und haben ein etwas gewöhnungsbedürftiges Verhalten. Zum Zoomen wird das Lupen-Icon genutzt. Ein Klick auf das Icon aktiviert den Zoom-Modus, welcher durch einen Kreuz-Mauscursor signalisiert wird. Es kann nun mit gedrückter linker Maustaste eine Region aufgezoogen werden auf die Vergrößert wird. Mit den Pfeil-Icons wechselt die Anzeige zwischen den vorgenommenen Ansichten. Zum Beenden des Zoom-Modus wieder auf die Lupe klicken. Das Haus-Icon setzt die Ansicht wieder zurück. Die verbleibenden Icons mit Einstellungen zur Ansicht und zu den Achsen sollten nicht verwendet werden.

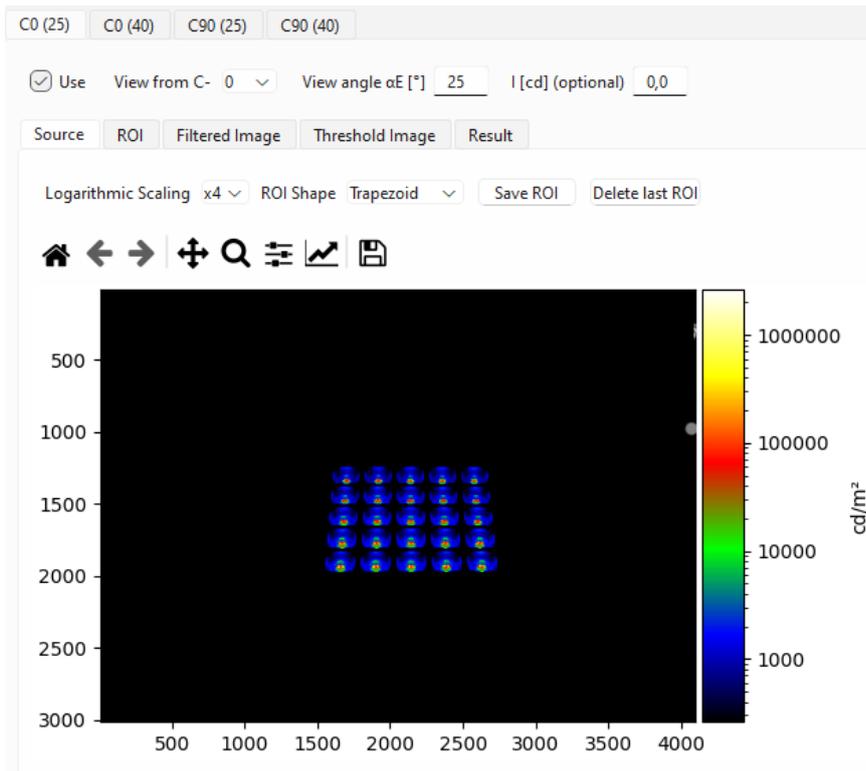


Abbildung 10: Quellbildanzeige

Ziel ist es nun im Quellbild die Lichtaustrittsbereiche festzulegen, welche hier als ROI bezeichnet werden. In diesem Fall gibt es nur eine zusammenhängende Lichtaustrittsfläche mit kleinen Unterbrechungen, so dass dieser Bereich entsprechend vergrößert wird. Es empfiehlt sich eine größere logarithmische Skalierung um die Ränder zu sehen. Für perspektivisch abgebildete rechteckige Flächen bietet sich die Wahl des Polygon-Auswahlwerkzeuges, hier bezeichnet als „Trapezoid“, in der Auswahlliste *ROI Shape* an. Der Modus zum Einzeichnen einer ROI ist durch einen kleinen runden Mauscursor gekennzeichnet.

Zunächst wird ein Polygonzug durch Anklicken der 4 Eckpunkte näherungsweise um den Bereich gelegt. Eine präzisere Festlegung der Position kann in vergrößerten Ansichten erfolgen. Die ESC-Taste löscht die eingezeichnete Region komplett.

Diese ROI wird nun mittels *Save ROI* gespeichert und in die Registerkarte *ROI* übertragen (Abbildung 13). Bei verteilten Lichtaustrittsbereichen können mehrere ROIs gespeichert werden (Abbildung 14). Das Löschen der letzten ROI kann über *Delete last ROI* erfolgen.

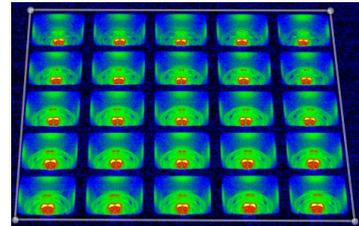


Abbildung 11: Polygon ROI

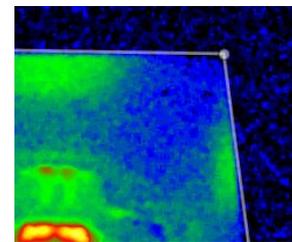


Abbildung 12: Präzise Polygonpositionierung

Source ROI Filtered Image Threshold Image Result

Logarithmic Scaling x4

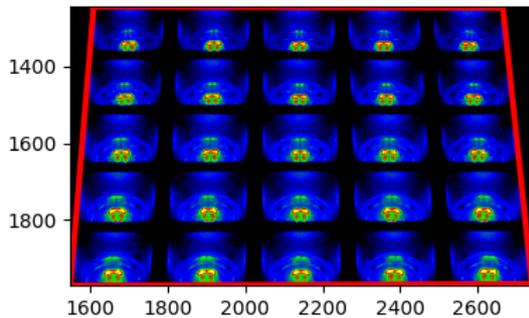


Abbildung 13: Einzelne ROI im ROI-Bereich

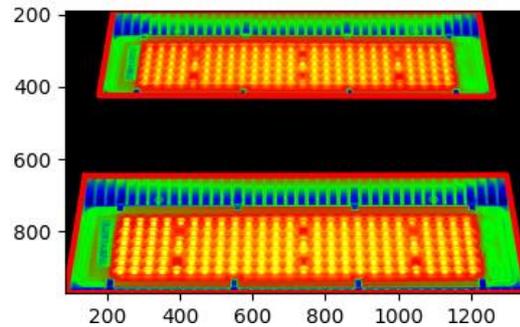


Abbildung 14: Beispiel mit zwei ROIs

5.8.2 Festlegung der Leuchtenparameter

Bevor die DUGR Berechnung erfolgen kann müssen die Maße der Lichtaustrittsfläche eingegeben werden. Bei der Leuchte aus Abbildung 13 liegt der Fall von verteilten Lichtaustrittsflächen vor. Der Hersteller hat in den veröffentlichten Daten eine Lichtaustrittsfläche von 250 mm x 250 mm angegeben, wobei die äußeren Abmessungen 290 mm x 290 mm sind. Es wurden also korrekterweise die Trennstage ausgelassen. Der *DUGR Calculator* muss aber beide Größen kennen, daher erfolgt die Eingabe entsprechend Abbildung 8.

5.8.3 Ausführen der Berechnung

Über den Menüpunkt *Calculation – Execute* oder das  - Icon wird die Berechnung entsprechend Abschnitt 4 gestartet. Das gefilterte Bild ist nun in der Registerkarte *Filtered Image* dargestellt. Der Rand wurde um die Filterbreite erweitert, damit die über den Rand hinausragenden Leuchtdichten auch berücksichtigt werden können (siehe Abschnitt 5.2). Das Bild nach der Schwellwertoperation befindet sich in der Registerkarte *Threshold Image*.

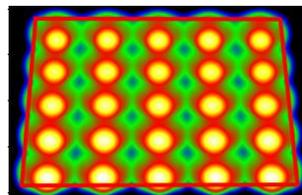


Abbildung 15: Gefiltertes Bild

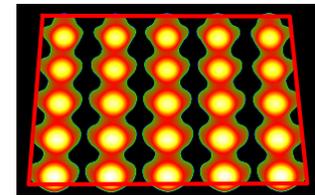


Abbildung 16: Schwellwertbild

5.8.4 Ergebnisse und Plausibilitätstest

Die Ergebnisausgabe erfolgt in die Registerkarte *Result* (Abbildung 17). Hier sind alle wesentlichen Berechnungsergebnisse aufgelistet, wobei letztendlich die Werte von k^2 bzw. DUGR von Interesse sind. Die DUGR Bezeichnung ist mit dem Index „L“ oder „I“ versehen. Hier wird das Verfahren zur Ermittlung von L_s über das Leuchtdichtebild oder die Lichtstärke gekennzeichnet (siehe Abschnitt 4.4).

In diesem Beispiel wurde ein DUGR_L Wert von -0.1 berechnet. Die Auswertungen für die anderen Kamerapositionen ergeben ähnliche kleine Werte, d.h., es besteht kein Änderungsbedarf an der UGR Klassifizierung dieser Leuchte.

DUGR_L	-0.1
k^2_L	1.0
A_p_new_L	40764 [mm^2]
A_p	40174 [mm^2]
A_new_L	63417 [mm^2]
A	62500 [mm^2]
A_eff	38517 [mm^2]
Effective luminance (L_eff)	5276.92 [cd/m^2]
Mean Luminaire luminance (L_mean)	5196.04 [cd/m^2]
Effective solid angle (ω_{eff})	0.011888 [sr]
Luminaire solid angle ($\omega_{luminaire}$)	0.012441 [sr]
Measurement angle αE	40 [°]
Viewing distance	1800.0 [mm]
Luminous area size in C0	250.0 [mm]
Luminous area size in C90	250.0 [mm]
lum_th	500.0 [cd/m^2]
d	12.0 [mm]
Calculated optical resolution	0.00822 [°/px]
FWHM	43.74 [px]
Filter width	113 [px]
Filter sigma	18.575 [px]
rb min	1913.35 [mm]
ro min	0.03593 [°/px]

Abbildung 17: Ergebnisse

Nun stellt sich die Frage nach der Plausibilität der Ergebnisse. Da neben hochqualitativen Leuchtdichtemessungen vor allem auch die exakten Parametrierungen des geometrischen Kameramodells und des Messaufbaus entscheidend für die Genauigkeit der Ergebnisse sind, wurde im *DUGR Calculator* ein Plausibilitätstest integriert. Hier wird die angegebene Fläche A bzw. die daraus resultierende projizierte Fläche A_p mit der aus $A_p = \omega_p \cdot r^2$ ermittelten Fläche verglichen. Dazu wird mit Hilfe der aus dem Kameramodell gewonnenen Raumwinkelanteile der Pixel das Integral aller Raumwinkelanteile innerhalb der ROI(s) ermittelt. Die beiden Flächen sollten theoretisch identisch sein. Der Aufruf des Plausibilitätstests erfolgt über den Menüpunkt *Calculation – Plausibility test*. In diesem Beispiel gibt es eine Differenz von 0.3 % (Abbildung 18).

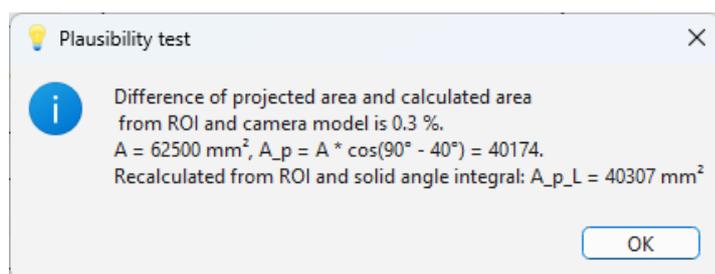


Abbildung 18: Plausibilitätstest

In der aktuellen Version werden die Ergebnisse noch für jede Auswertung, also für jede Kameraorientierung separat ausgegeben. Ein Export als PDF ist jeweils mit der Schaltfläche *Generate PDF report* möglich. Auch der Datenexport als JSON oder CSV- Datei ist möglich.

6 Literaturverzeichnis

CIE, 1995. *Discomfort glare in interior lighting*, Vienna: CIE.

CIE, 2002. *CIE 147:2002 Glare from Small, Large and Complex Sources*, Vienna: CIE.

CIE, 2015. *CIE S 025:2015: Test Method for LED Lamps, LED Luminaires and LED Modules*, Vienna: CIE.

CIE, 2019. *CIE 232:2019 Discomfort Caused by Glare from Luminaires with a Non-Uniform Source Luminance*, Vienna: CIE.

CIE, 2023. *CIE TN 014:2023 Example Luminance Measurement Setup for UGR*, Vienna: CIE.

Funke, C., Vandahl, C., Dehoff, P. U. & Ruggaber, B., 2021. *Praktische Anwendung der CIE 232:2019 – Korrigiertes UGR-Verfahren zur Bewertung der Direktblendung von inhomogenen Leuchten*. LICHT 2021, Tagungsband zum 24. Europäischen Lichtkongress - Berlin, S. 110-120, Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V. (LITG).

Jacobs, V. et al., 2015. *ANALYSES OF ERRORS ASSOCIATED WITH PHOTOMETRIC DISTANCE IN GONIOPHOTOMETRY*, Manchester: 28th CIE SESSION.

Porsch, T., Funke, C., Schmidt, F. & Schierz, C., 2015. Measurement of the unified glare rating (UGR) based on using ILMD. *Proceedings of the 28th CIE Session*, pp. 536-542.

Porsch, T. & Schmidt, F., 2007. *Blendungsbewertung mit bildauflösender Lichtmesstechnik in Theorie und Praxis*. Ilmenau, Lux-Junior.

Schmidt, F., Krüger, U. & Porsch, T., 2006. *Erfassung von Blendwerten mittels bildauflösender Leuchtdichtemesstechnik*. Bern, LICHT 2006 Tagungsband.

Wolf, S., 2004. *Entwicklung und Aufbau eines Leuchtdichte-Analysators, Dissertation*. Publikationsreihe des FG Lichttechnik der TU Ilmenau Nr. 7 Hrsg. Osnabrück: Der Andere Verlag.