Politechnika Wrocławska

Wydział Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki

# Kierunek: EiT

## PRACA DYPLOMOWA

## INŻYNIERSKA

Promotor:

#### Oprogramowanie stanowiska do pomiarów krzywych fotometrycznych oraz całkowitego strumienia świetlnego

#### The software for photometric curves and total luminous flux measurements

AUTOR: Tomasz Wilk

Tomasz Wilk

# Dr inż. Damian Pucicki

Ocena pracy i podpis promotora:

WROCŁAW

Spis treści

[1. Wprowadzenie 2](#_Toc469260158)

[1.1. Opis dostępnych rozwiązań 2](#_Toc469260159)

[1.1.1. QLumEdit2 3](#_Toc469260160)

[1.1.2. IESviewer 4](#_Toc469260161)

[1.1.3. Photometrics Pro - Luminaire Analysis Software 4](#_Toc469260162)

[1.1.4. Podsumowanie 5](#_Toc469260163)

[1.2. Wprowadzenie teoretyczne 6](#_Toc469260164)

[1.2.1. Bryła fotometryczna 6](#_Toc469260165)

[1.2.2. Krzywa fotometryczna 7](#_Toc469260166)

[1.2.3. Strumień świetlny 7](#_Toc469260167)

[2. Opis Stanowiska i projekt aplikacji 9](#_Toc469260168)

[2.1. Opis stanowiska pomiarowego 9](#_Toc469260169)

[2.2. Założenia projektowe 10](#_Toc469260170)

[2.3. Architektura aplikacji 12](#_Toc469260171)

[2.4. Uzasadnienie wyboru narzędzi oraz technik programistycznych 12](#_Toc469260172)

[3. Testowanie aplikacji 12](#_Toc469260173)

[3.1. Testy funkcjonalne 12](#_Toc469260174)

[3.1.1. Przedstawienie pomiaru całkowitego strumienia świetlnego 12](#_Toc469260175)

[3.1.2. Przedstawienie pomiaru krzywych fotometrycznych w całym spektrum 12](#_Toc469260176)

[3.1.3. Przedstawienie pomiaru krzywych fotometrycznych w ograniczonym zakresie widma 12](#_Toc469260177)

[3.2. Testy niefunkcjonalne 12](#_Toc469260178)

[3.2.1. Raport jakościowy aplikacji ze Statycznego Analizatora kodu Clang 12](#_Toc469260179)

[3.2.2. Raport z analizy wykorzystania pamięci (Valgrind) 12](#_Toc469260180)

[3.2.3. Raport z pokrycia testami kodu aplikacji (GCOV) 12](#_Toc469260181)

[4. Wnioski i podsumowanie 12](#_Toc469260182)

[Literatura 12](#_Toc469260183)

[Załączniki 13](#_Toc469260184)

# Wprowadzenie

Na Wydziale Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki na Politechnice Wrocławskiej w ramach pracy inżynierskiej skonstruowano stanowisko do pomiarów krzywych fotometrycznych i całkowitego strumienia świetlnego oraz arkusz kalkulacyjny do przetwarzania wyników pomiarów uzyskiwanych na w/w stanowisku [1].

Przeznaczeniem stanowiska utworzonego w Wydziałowym Zakładzie Mikroelektroniki i Nanotechnologii jest prowadzenie zajęć dydaktycznych mających na celu zapoznanie studentów z pojęciami z zakresu fotometrii. Studenci podczas ćwiczeń z aparaturą zapoznają się z podstawowymi pojęciami techniki świetlnej oraz nowoczesnymi metodami pomiarów fotometrycznych, prowadzonych przy pomocy obiektywnego detektora jakim jest spektrometr. Budowa stanowiska umożliwia przede wszystkim pomiar bryły fotometrycznej, a więc rozkładu oświetlenia w przestrzeni, generowanego przez źródła światła montowane bezpośrednio przed stanowiskiem pomiarowym. Pomiary tego typu wykonuje się między innymi celem weryfikacji oraz opisu własności opraw świetlnych. Dane takie w ustandaryzowanych formatach (IES, ELUMDATA) przez organizacje typu Illuminating Engineering Society [2] są ważnymi informacjami pozwalającymi konsumentom dobrać źródła oświetlenia do oczekiwanych efektów. Szczególnie ważne są informacje na temat natężenia oświetlenia, równomierności, stopnia oddawania barw.

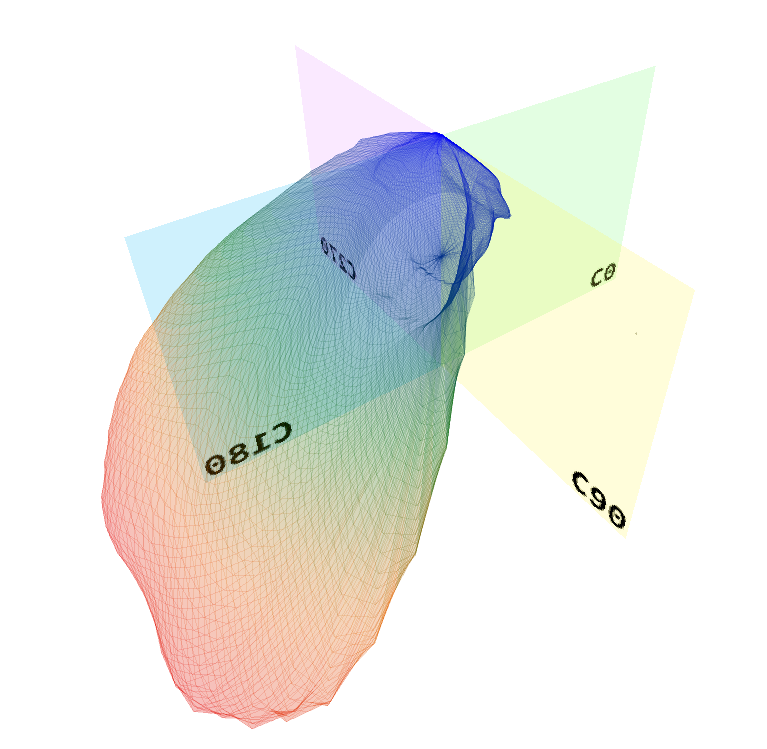
Oprogramowanie wizualizujące rozkład oświetlenia na podstawie danych pomiarowych jest powszechnie dostępne, jednak wykonanie programu przeznaczonego do skonstruowanego stanowiska uwzględni procedurę pomiaru, stosowane jednostki oraz umożliwi w pełni wykonanie celu dydaktycznego jakim jest zrozumienie podstaw techniki świetlnej oraz orientacja w cyfrowych metodach analizy źródeł światła.

## 1.1. Opis dostępnych rozwiązań aplikacji do edycji i prezentacji danych fotometrycznych

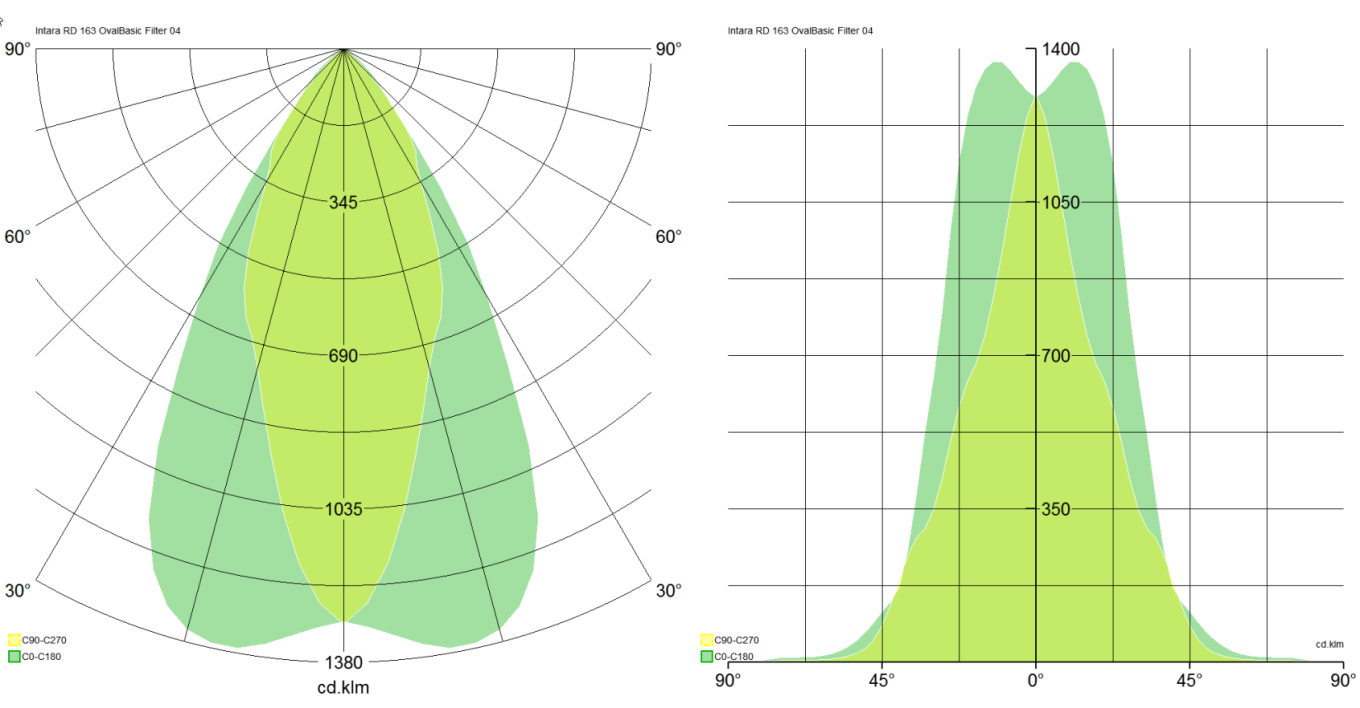
Ogólnodostępne w Internecie aplikacje pozwalają na tworzenie, modyfikacje oraz wyrysowanie wykresów rozkładu oświetlenia z plików w formacie IES,LDT (EULUMDAT) i TM-14 [3]. Poniżej przedstawione zostaną najpopularniejsze rozwiązania.

### 1.1.1. QLumEdit2

Program umożliwia wyświetlanie graficznej reprezentacji plików formatu LDT w przestrzeni trójwymiarowej, wykreślenie wartości luminancji na krzywej stożkowej i w układzie kartezjańskim, tworzenie nowych plików z predefiniowanych szablonów, porównanie dwóch źródeł, wydrukowanie wyników do plików. Aplikacja jest dystrybuowana w oparciu o licencję GPLv2.



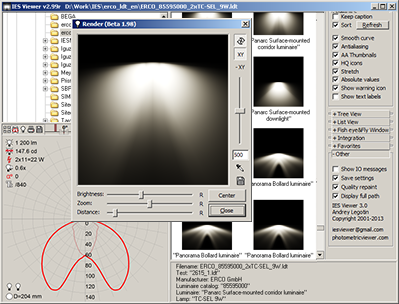
Rysunek 1.Kształt bryły fotometrycznej obrazowanej w programie QLumEdit2[4]



Rysunek 2. Krzywe fotometryczne w układzie biegunowym i liniowym w programie QLumEdit2 [4].

### 1.1.2. IESviewer

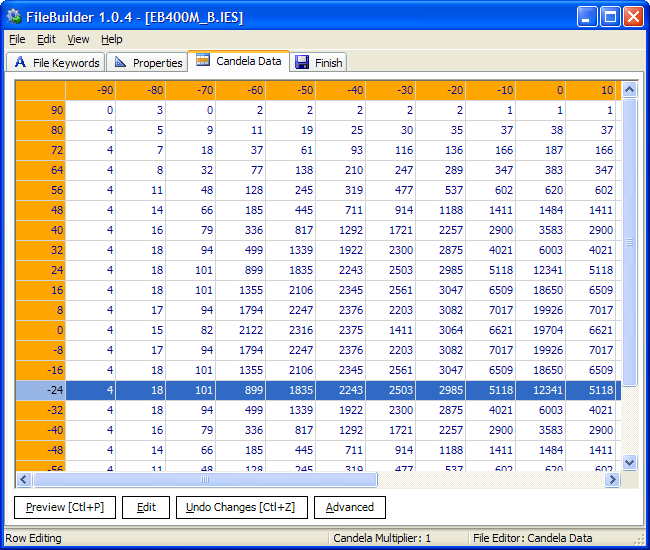
Strona domowa projektu deklaruje, że oprogramowanie jest jednym z najpopularniejszych sposobów prezentowania krzywych fotometrycznych. Dodatkowo umożliwia szybkie przeglądanie plików LDT i IES z uwzględnieniem producenta, numeru katalogowego, opisu źródła, typu fotometrycznego, intensywności, mocy wejściowej, renderowanie w czasie rzeczywistym, porównanie dwóch krzywych, konwersje plików między formatami, integrację z 3ds Max. Jest to bezpłatna aplikacja.



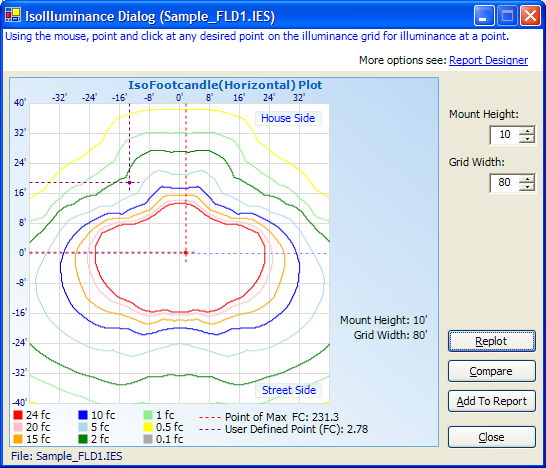
Rysunek 3. Zrzut ekranu głównego okna programu IESVIER obrazujący sposób przechodzenia światła przez konkretną oprawę oraz jej krzywą fotometryczną [5]

### 1.1.3. Photometrics Pro - Luminaire Analysis Software

Oprogramowanie w nowoczesnej formie umożliwia porównywanie krzywych fotometrycznych, generowanie przejrzystych raportów o rozkładzie świetlnym, przeszukiwanie, przeglądanie i organizowanie lokalnych danych fotometrycznych. Pełny, konfigurowalny opis danych (rozmieszczenie, kolory, wygląd), które następnie można porównać dla różnych krzywych. Umożliwia pracę na plikach w formatach IESNA, EULUMDAT. Omawiane oprogramowanie jest oprogramowaniem płatnym i umożliwia szerokie zastosowanie komercyjne [6].



Rysunek 4. Zrzut ekranu okna służącego do edycji pliku opisującego bryłę fotometryczną oprawy świetlnej w programiePhotometrics Pro [6]



Rysunek 5. Wykresy izokandeli w programie Photometrics Pro [6]

### 1.1.4. Podsumowanie

Inne programy z podobną funkcjonalnością to Eulumdat Tools[7] i LDTeditor [8]. Jakkolwiek istnieje wiele komercyjnych i otwartych rozwiązań, żadne nie spełnia wymagań dydaktycznych wymagań stanowiska. Skupiają się one głównie na możliwości porównań charakterystyk fotometrycznych różnych opraw, ale już nie łatwego tworzenia nowych wykresów. Tylko jeden program QLumEdit2 umożliwia prezentację bryły fotometrycznej w przestrzeni trójwymiarowej. Stąd potrzeba zaprojektowania i wykonania oprogramowania uwzględniającego specyfikę stanowiska pomiarowego oraz cel dydaktyczny.

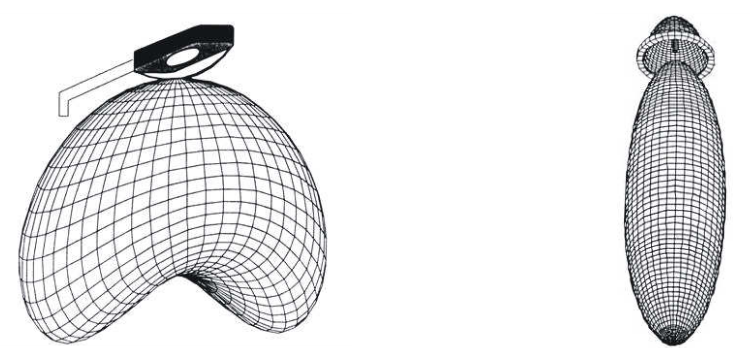
# 1.2. Wprowadzenie teoretyczne

Poniżej krótko zostaną omówione pojęcia wykorzystywane w pracy. Pozwoli to na lepsze zrozumienie pracy na stanowisku a także przyjętych założeń projektowych.

## 1.2.1. Bryła fotometryczna

Najpełniejszym sposobem ukazania właściwości fotometrycznych źródła światła jest prezentacja w przestrzeni trójwymiarowej jej bryły fotometrycznej. Jest to zamknięta powierzchnia, utworzona przez zakończenia wektorów wielkości fotometrycznej (strumienia świetlnego, światłości, luminancji, natężenia oświetlenia) o wspólnym początku w środku świetlnym oprawy, których wartość i kierunek odpowiada wartości światłości w tym kierunku [9].

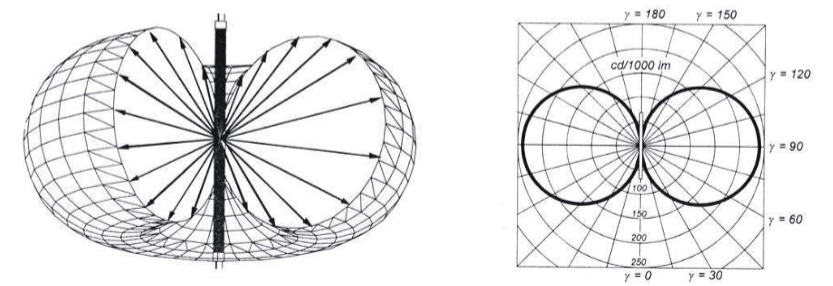
Na przykład dla punktowego źródła światła bryła fotometryczna jest ograniczona sferą o środku w punkcie źródła światła. Oznacza to także, że światłość jest uznawana za taką samą we wszystkich kierunkach.



Rysunek 6. Przykłady bryły fotometrycznej a) bryła fotometryczna oprawy oświetlenia drogowego (bryła nieobrotowo symetryczna); b) bryła fotometryczna reflektora zwierciadlanego (bryła obrotowo-symetryczna) [10]

## 1.2.2. Krzywa fotometryczna

Jednym ze sposobów prezentacji bryły fotometrycznej jest wykreślanie krzywych fotometrycznych (światłości). Taki sposób prezentacji umożliwia pokazanie wycinka bryły – przekroju wykonanego w jednej płaszczyźnie. Jeśli badana bryła fotometryczna charakteryzuje się symetrią obrotową, jest to prosty i jasny sposób przedstawienia bryły. Wykresy światłości typowo przedstawia się w biegunowym układzie współrzędnych, jednakże wykresy w układzie kartezjańskim są również spotykane, jednak zazwyczaj bywają mniej czytelne.



Rysunek 7. Wykres przedstawiający krzywaą fotometryczną linii świetlnej w płaszczyźnie prostopadłej do osi świetlnej [10]

## 1.2.3. Strumień świetlny

Strumień świetlny jest jedną z podstawowych jednostek fotometrycznych charakteryzujących źródło światła. Strumień świetlny **Φ** jest wywiedziony od strumienia energetycznego na podstawie oceny promieniowania za pomocą odbiornika, którego względna czułość widmowa odpowiada czułości widmowej oka przystosowanego do jasności.

(1)

Km = 683 lm/W – fotometryczny równoważnik promieniowania,

Φe,λ – rozkład widmowy mocy promienistej (strumienia energetycznego),

Vλ – względna skuteczność świetlna promieniowania monochromatycznego.

Powyższe wyrażenie różni się od definicji całkowitej mocy promienistej uwzględnieniem skuteczności promieniowania dla zdefiniowanych długości fali Vλ (w przypadku fal widzialnych przez ludzkie oko będzie to 380 - 780 nm). Ze względu na brak jednolitych jednostek energetycznych i świetlnych w równaniu znalazł się również fotometryczny równoważnika promieniowania Km [9].

Wybór metody liczenia całkowitego strumienia świetlnego uzależniony jest od sposobu reprezentacji światłości. Aby policzyć całkowity strumień świetlny zgodnie ze wzorem (1) potrzebna jest znajomość algebraicznej reprezentacji strumienia świetlnego w przestrzeni. Jest to możliwe wyłącznie w teoretycznych przypadkach takich jak liczenie całkowitego strumienia świetlnego, którego źródłem jest punkt bądź linia świetlna.

W praktyce dostępny jest zazwyczaj zmierzony obliczony rozsył światłości, który mógłby być opisany analitycznie jedynie w sposób przybliżony. Najczęściej bazą obliczeń jest znajomość rozkładu natężenia światła oprawy oświetleniowej oraz ich relacje geometryczne (kątowe położenie i odległości) z oświetlanym obiektem. Istnieje kilka metody obliczania całkowitego strumienie świetlnego, m.in. metoda, metoda Wohaluera, metoda Rousseau. Każda z nich przyjmuje pewne uproszczenia, więc nie sprawdzają się one w przypadku rozkładów światłości niesymetrycznych obrotowo.

Aby dokładnie określić całkowity strumień świetlny w rzeczywistych przypadkach, należy uwzględnić sposób pomiaru. Powierzchnię pomiarową dzieli się na drobne obszary, odpowiadające punktom pomiarowym. Tak zdyskretyzowany strumień świetlny przez fragmenty powierzchni można poddać operacji sumy odpowiadający całkowaniu w przypadku analitycznym.

Mając całą powierzchnię S otaczającą źródło światła,

Strumień świetlny ΦS na powierzchni S otaczającej źródło światła można policzyć dzieląc obszar S na podobszary Δs, mierząc strumień światła przechodzący przez pojedynczy obszar, a następnie dokonując operacji sumowania strumieni cząstkowych

(2)

# 2. Opis Stanowiska i projekt aplikacji

Typowo, pomiary strumienia świetlnego wykonuje się za pomocą kuli Ulbrichta. Jednak ta technika nie pozwala na zobrazowanie bryły fotometrycznej. Pełniejsze pomiary zazwyczaj wykonuje się na ławie optycznej lub specjalistycznym goniometrem. Ten sposób umożliwia określenie światłości w wielu miejscach powierzchni otaczającej źródło światła przez obrót przetwornika fotoelektrycznego zamocowanego na ramieniu o stałej długości dookoła nieruchomo zamontowanego źródła światła. Położenie źródła światła zmienia się jedynie przez obrót dookoła osi pionowej o kąt β, natomiast przez obrót ramienia dookoła osi poziomej zmienia się położenie przetwornika fotoelektrycznego o kąt α [11].

# 2.1. Opis stanowiska pomiarowego

Na Wydziale Elektroniki Mikrosystemów w roku akademickim 2015/2016 Pani Ewa Szwaba w ramach swojej pracy dyplomowej [1] zaprojektowała i wykonała stanowisko pomiarowe odbiegające od klasycznych rozwiązań.

Zwyczajowo, pomiary bryły fotometrycznej prowadzone są specjalistycznym goniometrem, jednak p. Szwaba skonstruowała prostszy, bardziej niezawodny mechanizm odpowiadający potrzebom dydaktycznym.

Stanowisko składa się z:

* podstawy montowanej do stołu optycznego (czy ta nazwa jest prawidłowa? Ława?),
* półokrągłej szyny pozwalającej na przesuwanie detektora po „południkach” półsfery pomiarowej w zakresie kątów 5o – 175o stopni z krokiem 5o,
* obrotowej głowicy pomiarowej, która wraz z szyną pozwala na poruszanie się po „równoleżnikach” półsfery,
* spektrofotometru StellarrNet BLUE-Wave z detektorem kosinusoidalnym zamontowanym na półokrągłej szynie,
* komputer umożliwiający odczyt danych ze spektrofotometru oraz obróbkę danych za pomocą programu, który jest przedmiotem tej pracy.

Oprawa świetlna zamontowana jest w ten sposób, aby jej domniemany środek świetlny znajdował się w środku symetrii półsfery pomiarowej, tak więc każdy punkt sfery znajduje się w równej odległości od odprawy. Pozwala to na pomiar natężenia światła detektorem sinusoidalnym z krokiem nie mniejszym niż 5 stopni w każdym kierunku (na „południkach” i „równoleżnikach” półsfery).

Spektrometr, do którego podłączony jest detektor obsługiwany jest przez komputer PC będący częścią stanowiska pomiarowego. Student odczytuje natężenie fali w zadanym zakresie częstotliwości (z reguły 380-780 nm dla światła widzialnego) z oprogramowania SPECTRAWIZ@. Docelowo, uczestnik zajęć dydaktycznych będzie wprowadzał wynik do tabeli w programie „Krzywe Fotometryczne”, którego opisem jest niniejsza praca. Student będzie miał możliwość obserwacji bryły fotometrycznej, krzywych fotometrycznych, przekrojów przez bryłę (przekrój równoległy do płaszczyzny źródła światła) oraz zapoznania się ze strumieniem świetlnym wyliczonym przez aplikację.



Rysunek 8. Wykonane stanowisko do pomiaru krzywych fotometrycznych pomiarów wraz z oprawą świetlną umieszczoną w centralnej części głowicy pomiarowej [1]

# 2.2. Założenia projektowe

Oprogramowanie ma spełniać następujące założenia:

* będzie działać na platformach Windows (używanej w laboratorium) i Linux,
* zostanie wykonane przy wykorzystaniu przenośnych bibliotek i narzędzi programistycznych QT,
* zapewni możliwość stworzenia nowego projektu lub otworzenia już istniejącego z pliku,
* umożliwi eksport danych pomiarowych do pliku
* umożliwi wybór gęstości punktów pomiarowych na sferze (z predefiniowanej listy),
* umożliwi wybór jednostek pomiaru natężenia światła (W/m2, µW/cm2, lm/m2),
* projekt oraz wykresy oznaczone będą nazwą mierzonej oprawy lub źródła światła,
* umożliwi wprowadzenie wartości natężenia światła z detektora umieszczanego w różnych punktach półsfery pomiarowej,
* umożliwi modyfikację danych pomiarowych,
* będzie potrafiło narysować krzywą fotometryczną ze zdefiniowanej płaszczyzny,
* będzie potrafiło narysować bryłę fotometryczną,
* umożliwi policzenie całkowitego strumienia świetlnego padający na półsferę pomiarową,
* umożliwi eksport narysowanych krzywych fotometrycznych i bryły do plików graficznych,
* będzie zawierało pomoc dotyczącą obsługi programu,
* będzie zawierało opisy edukacyjne,
* umożliwi wybór języka interfejsu użytkownika (polski/angielski),
* zostaną zaimplementowane testy jednostkowe dla ważniejszych, testowalnych metod,
* zostaną zaimplementowane testy funkcjonalne ważniejszych komponentów,
* zostanie wykonane zgodnie z nowoczesnymi zasadami inżynierii oprogramowania,
* zostanie sprawdzone statycznymi i dynamicznymi narzędziami do analizy kodu (Clang, Valgrind, gcov).

## 2.3. Architektura aplikacji

## 2.4. Uzasadnienie wyboru narzędzi oraz technik programistycznych

Jako język do napisania programu wybrano C++. Jako powszechnie znany język kompilowalny, ze statyczną kontrolą typów pozwala on na swobodny rozwój aplikacji oraz utrzymywanie jej przez studentów wydziału, którzy zapoznają się z nim na zajęciach. Wraz z wersją C++11 elementem języka stała się również biblioteka standardowa (stdc++), która zawiera dodatkowe struktury danych w stosunku do standardu C++98 (wektory, listy, pary) oraz moduł z prostymi algorytmami (sumą, poszukiwaniem dowolnej wartości w kontenerze, wyszukiwaniem skrajnej wartości w kontenerze, przekształceniem każdej wartości w kontenerze wg określonego wzorca itd.) umożliwiającymi łatwe, intuicyjne manipulowaniem danymi, często redukując skomplikowane wyrażenia do jednej linii.

Założenia projektu wymuszają wykonanie Graficznego Interfejsu Użytkownika (GUI) oraz prezentacji wykresów zarówno dwu- jaki i trójwymiarowych. Rozpatrywano wybór różnych środowisk i bibliotek programistycznych pozwalających uniknąć bezpośredniego użycia OpenGLa:

* Microsoft Foundation Classes (MFC) – działa tylko na systemach operacyjnych firmy Microsoft, do rysowania wykresów należałoby użyć osobnych bibliotek takich jak QCustomPlot, QPlot,
* WxWidgets – biblioteka międzyplatformowa, posiada możliwość rysowania wykresów dwuwymiarowych, jednakże nie jest ona na bieżąco aktualizowana. Wykresy 3D nie są dostępne, ich użycie wymagałoby użycia zewnętrznych bibliotek.
* QT – biblioteka międzyplatformowa. Od wersji 5.7 (najnowszej w chwili pisania aplikacji – stan na przełom 2016/2017 r.) dodano możliwość użycia modułów Data Visualisation i Charts, które idealnie pasują do wstępnych wymagań programu.

QT było więc najlepszym, naturalnym wyborem.

# 3. Testowanie aplikacji

## 3.1. Testy funkcjonalne

### 3.1.1. Przedstawienie pomiaru całkowitego strumienia świetlnego

### 3.1.2. Przedstawienie pomiaru krzywych fotometrycznych w całym spektrum

### 3.1.3. Przedstawienie pomiaru krzywych fotometrycznych w ograniczonym zakresie widma

## 3.2. Testy niefunkcjonalne

### 3.2.1. Raport jakościowy aplikacji ze Statycznego Analizatora kodu Clang

### 3.2.2. Raport z analizy wykorzystania pamięci (Valgrind)

### 3.2.3. Raport z pokrycia testami kodu aplikacji (GCOV)

# 4. Wnioski i podsumowanie

**Zalecenia dla dalszego rozwoju aplikacji:**

* Producent spektrofotometru udostępnia bezpłatną bibliotekę do obsługi przyrządu pomiarowego, więc istnieje możliwość integracji urządzenia z aplikacją do pomiaru krzywych fotometrycznych. <http://www.stellarnet.us/software/#LINUX>
* Dodanie możliwości interpolacji krzywej południka z punktów pomiarowych (metoda Lagrange’a wydaje się tu najodpowiedniejsza ze względu na jej prostotę, dokładność oraz dostępność bibliotek ją implementujących). Umożliwiłoby to znacznie dokładniejsze wyliczenie strumienia świetlnego i rysowanie „gładszej” bryły fotometrycznej.

# Literatura

[1] E. Szwaba, Praca dyplomowa inżynierska„Stanowisko do pomiarów krzywych fotometrycznych oraz całkowitego strumieniaświetlnego”, Wrocław 2015

[2] <http://www.ies.org/>; dostęp dnia 2016-12-04

[3] Talking Photometry: Understanding Photometric Data Formats; <http://www.photometrictesting.co.uk/File/understanding_photometric_data_files.php>; dostępdnia 2016-12-04

[4] Strona domowa programu QLumEdit2 https://sourceforge.net/projects/qlumedit2/ , dostęp dnia 2016-12-04

[5] Strona domowa programuIESviewer <http://www.photometricviewer.com/> dostęp dnia 2016-12-04

[6] Strona domowa producenta Photometrics Pro - Luminaire Analysis Software <http://www.photometricspro.com/index.html>, dostęp dnia 2016-12-04

[7] Strona domowa programuEulumdat Tools <http://eulumdat.blogspot.com/>, dostęp dnia 2016-12-06

[8] Strona domowa programu LDTediitor<http://ldteditor.software.informer.com/>, dostęp dnia 2016-12-06

[9] W. Żagań, Podstawy Techniki Świetlnej, Warszawa 2014, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.

[10] Wyznaczanie Bryły Fotometrycznej Światłości – Instrukcja do ćwiczenia z Podstaw Techniki Świetlnej <http://lumen.iee.put.poznan.pl/studenci/niestacjonarne/Lab-2-bryla_fotom.pdf>, dostęp dnia 2016-12-06

[11] W. Golik i inni, Laboratorium z techniki świetlnej Skrypt nr 1792. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1994.

# Załączniki