

Vermessung realer Lichtszenen mit einem Open-Source-Lichtichtungsmessgerät

Jan Krüger
TÜV SÜD Product Service GmbH
Deutschland, 85748 Garching, Daimlerstraße 11

Zusammenfassung

Die Konzepte des Lichtvektors sowie des Beleuchtungsverteilungskörpers zur dreidimensionalen Beschreibung von Licht in einem Raumpunkt sind in der Theorie lange bekannt [1]. Umsetzungen dieser Konzepte in praktische Messbeispiele existieren hingegen kaum oder sind zu zweidimensionalen Sonderfällen vereinfacht. Eine Ursache dafür liegt darin, dass keine kommerziell erhältlichen Messgeräte hierfür existieren, trotzdem, dass die Messprinzipien veröffentlicht sind. Vor diesem Hintergrund wird ein Open-Source-Messgerät vorgestellt und dessen Anwendbarkeit in verschiedenen Lichtszenen demonstriert. Vermessungen an Punktlichtquellen, Flächenlichtquellen sowie im vollkommen diffusen Raum verdeutlichen die Chancen und Limitationen des Gerätes und geben einen Ausblick auf kommende Weiterentwicklungen.

1. Einleitung

Im Beitrag wird ein Messgerät vorgestellt, welches auf dem Prinzip des „Light Vectors“ [1] basiert. Das Gerät dient der dreidimensionalen Beschreibung des Lichtfeldes im Raum. Es charakterisiert das Licht als Funktion von Position und Richtung. Hierdurch ist es möglich, das Erscheinungsbild von dreidimensionalen Objekten und deren Schattierungen in einer Lichtszene zu beschreiben [2]. Weiterhin erlaubt diese Betrachtungsweise die Quantifizierung von Gerichtetheit und Diffusität an einem Raumpunkt. Die Aussagen zur Gerichtetheit und Diffusität werden aus dem „Beleuchtungsverteilungskörper“ (BVK) [3] abgeleitet.

Die theoretischen Grundlagen für den BVK werden in Lingenfelser [3] beschrieben. Lingenfelser macht in seiner Arbeit darauf aufmerksam, dass die ursprüngliche Idee auf Leonhard Weber [4] zurückgeht. Der Beleuchtungsverteilungskörper beschreibt die „auf einem beliebig gelagerten Flächenelement“ [3] (S.314) erzeugten Beleuchtungsstärken in alle Raumrichtungen in einem festen Raumpunkt. Hierzu schildert Lingenfelser „ein Flächenelement, das durch Drehung um den Punkt in alle denkbaren Lagen gebracht werden kann“ (S.314).

Einige Jahre nach Lingenfelser [3] und Gershun [1] greift Cuttle [5] die Idee des BVK („Illumination Solid“) wieder auf. Cuttle beschreibt, dass dieser in zwei separate Komponenten aufgeteilt werden kann, nämlich eine vektorielle Komponente und eine symmetrische Komponente.

An dieser Stelle sei darauf aufmerksam gemacht, dass der BVK bzw. der Illumination Solid lediglich einen Auftrag gemessener Beleuchtungsstärken in alle Raumrichtungen darstellt, wohingegen die vektorielle und symmetrische Komponente eigene Verteilungskörper („Vector Distribution“ und „Symmetric Solid“) darstellen [5], welche durch Subtraktion von Beleuchtungsstärken aus dem Illumination Solid hervorgegangen sind.

Hierbei beschreibt die vektorielle Komponente (Vector Distribution) den gerichteten Teil der Beleuchtung im Bewertungspunkt, welcher durch die Subtraktion von entgegengesetzten Beleuchtungsstärken mit gleicher Richtung entsteht. Die Vector Distribution stellt eine Vektorschaar dar, welche aus einer Vielzahl einzelner Lichtvektoren („light vector“) aufgebaut ist. Gershun [1] beschreibt den „light vector“ als: „difference in illumination of the two sides of a plane element“ (S.90).

Demgegenüber beschreibt die symmetrische Komponente (Symmetric Solid) entgegengesetzte Beleuchtungsstärken mit gleicher Richtung und gleichem Betrag, welche sich bei Subtraktion auslöschen.

Im Abschnitt 3 werden diese Zusammenhänge nochmals graphisch an realen Messbeispielen dargestellt.

2. Messmethode

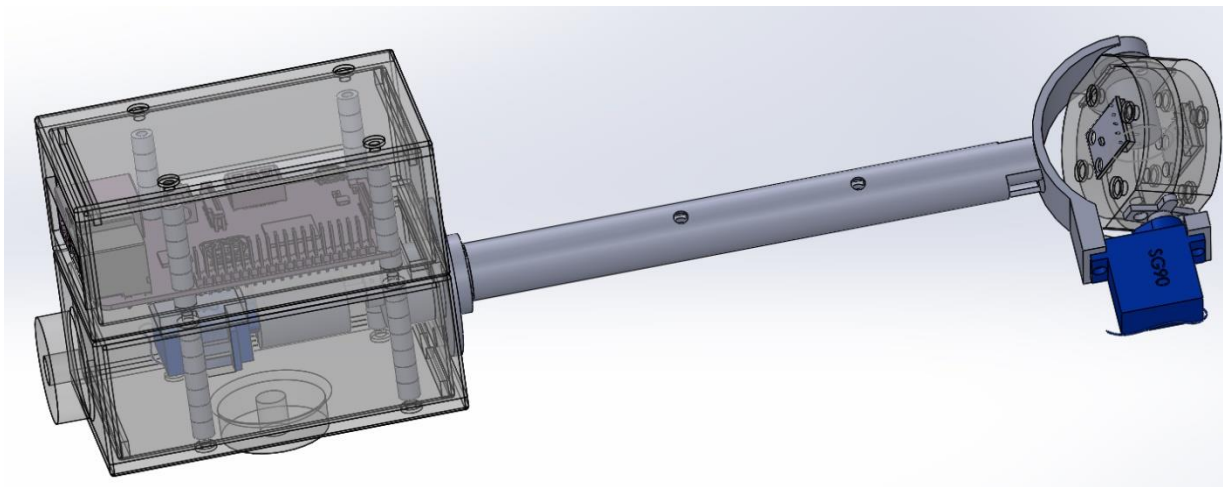


Abb. 1: Aufbau Open-Source-Lichtichtungsmessgerät

Erste theoretische Beschreibungen eines Messgerätes mit einem zweiseitigen Photoelement sind in Gershun [1] enthalten. In seiner Schrift „the light field“ beschreibt Gershun ein Messgerät zur Messung des Lichtvektors. Weiterhin verweist er auf die Existenz des Gerätes „the vectorscope“, welches auf M.M. Gurevitch vom Optical Institute zurückgeht. 1967 veröffentlicht Cuttle [5] ein Schaltbild von zwei subtrahierend messenden Photometern, welche entgegengesetzt angeordnet sind. Weiterhin stellt Häger in seiner Dissertation ein Messgerät zur Bestimmung des Lichtvektors vor, bei welchem die Photometer bereits über eine Motorsteuerung in ihrer Orientierung eingestellt werden konnten [6].

In der jüngeren Vergangenheit wurden Messgeräte wie der „Plenopter“ zur Vermessung des Lichtfeldes vorgestellt [7]. Hierbei handelt es sich um ein ballförmiges Messgerät mit 12 Einzelsensoren, welches den Raumwinkel von 4π in 12 gleichgroße Raumwinkel aufteilt. Für die Messung der kubischen Beleuchtungsstärke nach Cuttle [8] stellte Bálský [9] ein Messgerät auf Arduino Basis vor.

Ähnlich wie bei Bálský wurde für den vorliegenden Beitrag ein Messgerät auf Basis einer Single-Board-Platine benutzt [10]. Hierbei handelt es sich um ein Open-Source-Projekt im Entwicklungsstadium. Die Konstruktionsdaten, der Python Code mit grafischer Benutzer-

oberfläche, die Schaltpläne mit Datenblättern der Sensoren, Motoren sowie ein Octave-Programm zum Betrachten der Messergebnisse sind auf GitHub bereitgestellt und frei zugänglich [11].

Das Lichtichtungsmessgerät in Abbildung 1 besteht aus einer Photometereinheit, mit zwei beidseitig angeordneten Lichtsensoren zur Bestimmung der Beleuchtungsstärke. Die Photometereinheit kann durch Drehung in einem Bewertungsraumpunkt in jede beliebige Position gebracht werden. Für die Messung kann das Gerät auf ein Stativ montiert werden. Zwei Servoeinheiten ermöglichen die automatische Drehung der Photometereinheit um zwei Achsen. Während der Rotation der Photometereinheit werden die Beleuchtungsstärken in alle Raumrichtungen abgescannt. Die ermittelten Beleuchtungsstärken werden gemeinsam mit den aktuellen Drehwinkeln der Drehachsen an einen Raspberry Pi [12] übermittelt.

Aus den übertragenen Werten (Beleuchtungsstärke Sensoroberseite, Beleuchtungsstärke Sensorunterseite, Drehwinkel Achse 1, Drehwinkel Achse 2) wird der BVK [3] bzw. der Illumination Solid [2] berechnet. Weiterhin lässt sich ein Lichtvektor für jede Raumrichtung ableiten. Die Richtung ergibt sich hierbei aus den Drehwinkeln der Servomotoren. Der Betrag ergibt sich durch Subtraktion entgegengesetzter Beleuchtungsstärken einer Raumrichtung. Neben dem BVK kann damit die Vector Distribution [2] dargestellt werden.

Der Datensatz erlaubt neben den grafischen Darstellungen der Verteilungskörper die Berechnung der kubischen Beleuchtungsstärke eines diagonal angeordneten Würfels nach Cuttle [8]. Mithilfe des Vector/Scalar Ratios können Aussagen zur Gerichtetheit und Diffusität gewonnen werden, wobei ein Vector/Scalar Ratio von 4 auf stark gerichtetes Licht hinweist und ein Vector/Scalar Ratio von 0 auf schattenfreie indirekte Beleuchtung.

Um eine bessere Vorstellung darüber zu bekommen, wie das Gerät funktioniert und welche Eigenschaften es besitzt, werden im nachfolgenden Abschnitt Messergebnisse aus drei verschiedenen Lichtszenen vorgestellt.

3. Ergebnisse

Zwei Punktlichtquellen

Im nachfolgenden Beispiel wird der Anwendungsfall für zwei Punktlichtquellen betrachtet. Abbildung 2 zeigt den Messaufbau. Das Messgerät befindet sich mittig zwischen zwei Strahlern gleicher Leistung. Während der Messung waren die Strahler in der oberen, linken und rechten Ecke eingeschalten. Abbildung 3 zeigt den Illumination Solid (linke Seite) und die Vector Distribution (rechte Seite). Im Illumination Solid ist eine deutliche Zweiteilung des Verteilungskörpers zu erkennen, welche auf die Positionen der Strahler zurückgeführt werden kann. Die Vector Distribution zeigt hingegen die Verteilung einer „virtuellen Ersatzlichtquelle“ [2], welche durch Vektoraddition von den Beleuchtungsstärken der Einzellichtquellen entstanden ist.



Abb. 2: Messaufbau - Punktlichtquellen

Die Hauptlichtrichtung der Ersatzlichtquelle deutet in eine Richtung, in welcher sich keine physische Lichtquelle befindet. Auch wenn dieses Ergebnis technisch nicht sinnvoll erscheint, ist es von Bedeutung für die visuelle Wahrnehmung. Nach Cuttle [2] würde eine Beleuchtung mit dieser „Ersatzlichtquelle“ die erzeugten Schattierungen auf einer matten weißen Kugel in diesem Punkt reproduzieren. Neben den graphischen Repräsentationen berechnete das Gerät für diese Beleuchtungssituation ein Vector/Scalar Ratio von 2,1, was auf moderat gerichtetes Licht hindeutet. Wurde bei diesem Aufbau nur eine der beiden Leuchten eingeschaltet, ergab sich ein Vector/Scalar Ratio von 3,9.

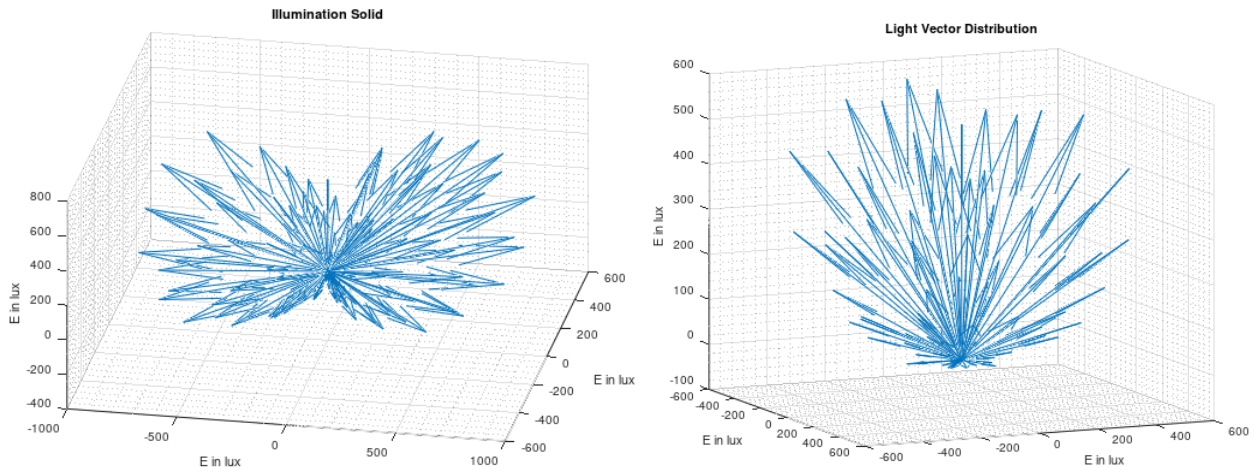


Abb. 3: Links: Illumination Solid - Punktlichtquellen, Rechts: Light Vector Distribution – Punktlichtquellen

Ulbricht-Kugel

In der zweiten Lichtszene wurde das Lichtfeld innerhalb einer Ulbricht-Kugel untersucht. Auf die Innenfläche der Ulbricht-Kugel ist ein diffus reflektierender Anstrich aufgebracht. Das im Inneren der Kugel ausgestrahlte Licht wird in Wechselwirkung mit der Innenfläche von den Wänden diffus reflektiert. Damit ergibt sich ein nahezu diffuses Lichtfeld in der Kugel.

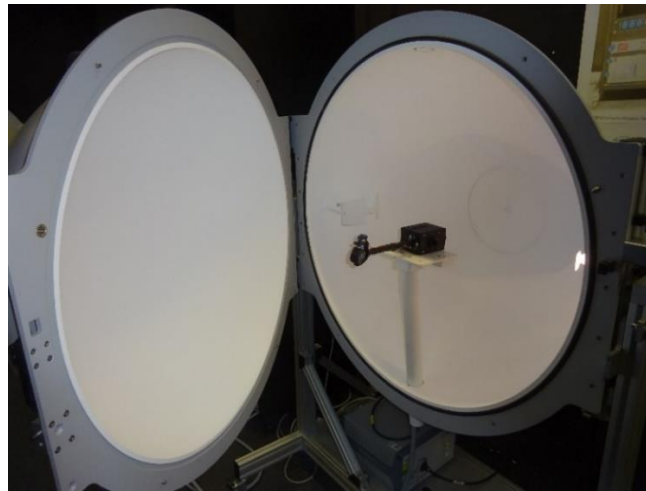


Abb. 4: Messaufbau - Ulbricht-Kugel

Vernachlässigt man die Inhomogenitäten der Kugel (z.B. Geometrie), so ist für die Messung des Illumination Solid eine Kugelverteilung zu erwarten. Hingegen sollte die vektorielle Verteilung gegen Null gehen, da im Inneren keine gerichtete Komponente zu erwarten ist.

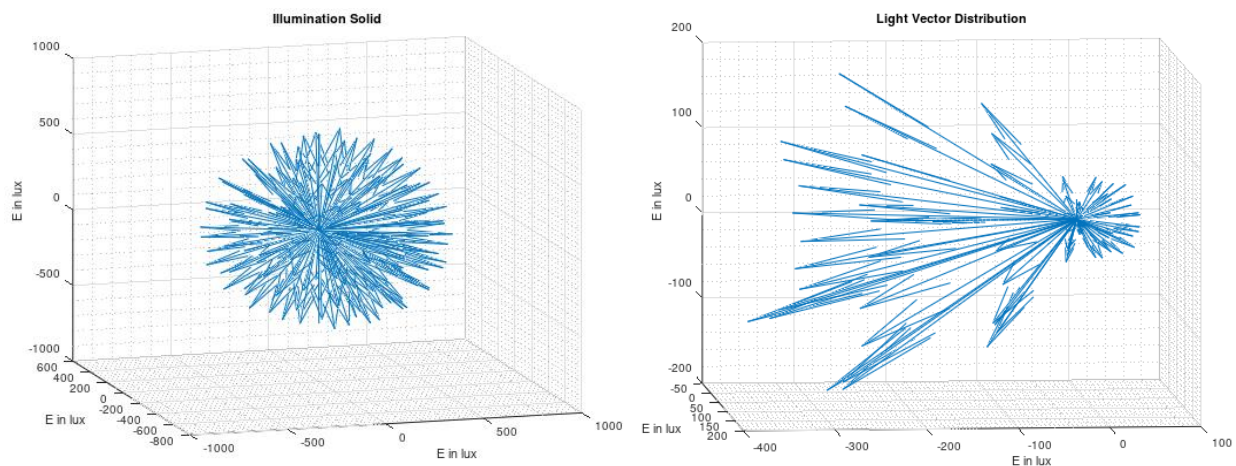


Abb. 5: Links: Illumination Solid – Ulbricht-Kugel, Rechts: Light Vector Distribution – Ulbricht-Kugel

Betrachtet man die Messergebnisse in Abbildung 5, zeigt der Illumination Solid wie erwartet eine Kugelverteilung. Die Vector Distribution zeigt hingegen eine deutliche Abweichung vom erwarteten Ergebnis. Die kleineren Vektoren auf der rechten Seite der Verteilung könnten auf Inhomogenitäten der Kugeloberfläche zurückzuführen sein. Beleuchtungsstärken gegenüberliegender Kugelseiten könnten sich bei der Berechnung des Lichtvektors nicht vollständig ausgelöscht haben. Die größeren Vektoren auf der linken Seite der Verteilung sind jedoch nicht auf Kugelinhomogenitäten zurückführbar. Hierbei handelt es sich um Artefakte, die durch das Messgerät verursacht werden. Eine tiefergehende Analyse der Vector Distribution sowie Simulationen in Octave ergaben, dass die dargestellte Verteilung durch Abschattungseffekte der Haltekonstruktion nachgebildet werden kann. Abbildung 6 (rechts) zeigt die Abschattung des Lichtsensors durch die Gabelkonstruktion des Messgerätes. Weiterhin zeigt Abbildung 6 (links) den Illumination Solid als Hüllkurve. Die Abschattungseffekte sind hier deutlicher erkennbar als in der Darstellung der Vektorschaar (Abbildung 5, links).

Die Berechnung des Vector/Scalar Ratios ergab einen Messwert von 0,16, was auf eine flache, schattenfreie Beleuchtung hindeutet.

Die Messergebnisse der Ulbricht-Kugel zeigen weiterhin, dass diese ein geeignetes Instrument zur Validierung des Messprinzips darstellt, da in der Vector Distribution Auffälligkeiten in der Verteilung leicht erkannt werden können.

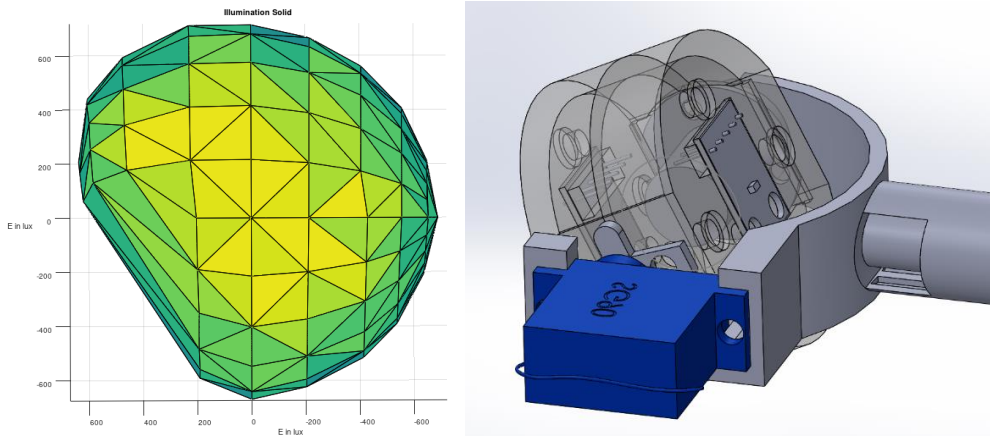


Abb. 6: Links: Illumination Solid mit Hüllkurve – Ulbricht Kugel, Rechts: Konstruktiv bedingte Abschattung des Lichtsensors

Flächenlichtquelle

In der dritten Beispielmessung wurde das Lichtfeld vor einer Flächenlichtquelle untersucht. Der Messaufbau ist in Abbildung 7 dargestellt. Während der Messung war das Gerät nicht mittig vor der leuchtenden Fläche positioniert, sondern leicht zum rechten Leuchtenrand verschoben.



Abb. 7: Messaufbau – Flächenlichtquelle

Die Abbildung 8 zeigt den Illumination Solid sowie die Vector Distribution für eine Flächenlichtquelle. Die Vektorschaar zeigt in Richtung der Lichtquelle. Für die Vector Distribution (Abb. 8, rechts) wurde eine andere Darstellungsform gewählt, damit die Besonderheiten der Messergebnisse verdeutlicht werden können. Aus der Grafik der Vector Distribution kann abgelesen werden, dass die Vektorschaar zur linken Seite weniger stark ausgeprägt ist als

zur rechten Seite. Dieser Effekt entsteht durch die außermittige Positionierung des Messgerätes vor der Leuchte.

Im Vergleich zur Punktlichtquelle tritt bei der Flächenlichtquelle das zusätzliche Phänomen der Flächenein- bzw. Ausblendung auf, welches die Beleuchtungsstärke am Sensor bestimmt. Eine einzelne Punktlichtquelle erzeugt im Bewertungspunkt immer dieselbe Beleuchtungsstärke, wobei sich durch die Rotation des Lichtsensors lediglich der Betrag der Beleuchtungsstärke mit der Cosinus-Bewertung des Sensors bei unterschiedlichen Einfallswinkeln verändert. Bei der Flächenlichtquelle kommt eine weitere Besonderheit hinzu. Die Beleuchtungsstärke im Bewertungspunkt wird durch die Leuchtdichte und den vektoriellen Raumwinkel der leuchtenden Fläche bestimmt. Da sich bei der Rotation des Sensors eine Ausblendung/Einblendung der leuchtenden Fläche und damit eine Verkleinerung/Vergrößerung des Raumwinkels der leuchtenden Fläche ergibt, resultiert dies in einer Reduktion/Vergrößerung der Beleuchtungsstärke am Sensor. Zusätzlich findet analog zur Punktlichtquelle, die Cosinus-Bewertung mit dem Einfallswinkel statt.

Bildlich ausgedrückt bedeutet dies, dass der Lichtsensor bei bestimmten Rotationswinkeln nur einen Teil der leuchtenden Fläche „sehen kann“, was in einer reduzierten Beleuchtungsstärke resultiert. Die Ausblendungseffekte sind in der Vector Distribution des Messbeispiels deutlich erkennbar. Wegen der außermittigen Positionierung blendet der Sensor bei Rotation zur linken Seite in den dunklen Raum aus. Auf der rechten Seite wird hingegen eine größere leuchtende Fläche wirksam, welche in größeren Beträgen des Lichtvektors resultiert. Durch die Positionierung des Messgerätes in der unteren Hälfte der leuchtenden Fläche sollte dieser Effekt auch entlang der vertikalen Höhenausdehnung der Leuchte sichtbar werden. Der Effekt ist jedoch durch Reflexionen vom Boden reduziert.

Die Berechnung des Vector/Scalar Ratios ergab für diese Lichtszene einen Wert von 2,4

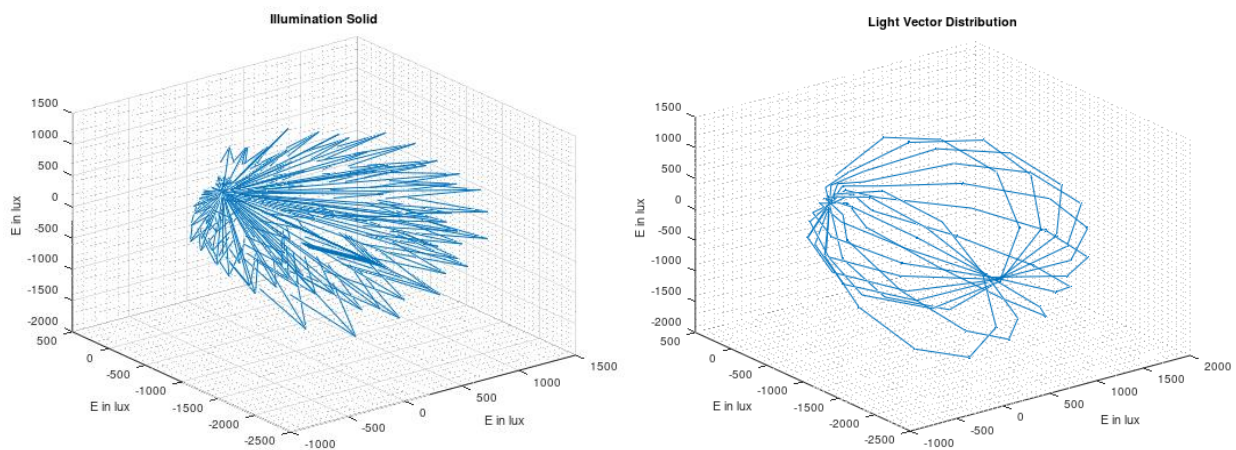


Abb. 8: Links: Illumination Solid – Flächenlichtquelle, Rechts: Light Vector Distribution in anderer Darstellungsform – Flächenlichtquelle

4. Ausblick

Die Messbeispiele verdeutlichen den Innovationsgrad aber gleichzeitig die Limitationen des Messgerätes. Besonders am Beispiel der Ulbricht-Kugel wird deutlich, dass die Abschattungen durch Gehäusekomponenten eine signifikante Limitation darstellen. Aus diesem Grund ist aktuell ein dritter Prototyp in Planung, welcher Abschattungseffekte konstruktiv reduziert. Demgegenüber zeigen die Messbeispiele zur Punktlichtquelle und zur

Flächenlichtquelle, dass diese Einflüsse durch eine geeignete Positionierung des Messgerätes in der Lichtszene minimiert werden können.

Des Weiteren finden erste Versuche mit Sensoraufsätzen statt, welche durch eine Tubus-Linse-Kombination den Raumwinkel während der Messung begrenzen und damit Lichtstärkemessungen in verschiedene Raumrichtungen erlauben. Aus den Messdaten kann anschließend der „Incidence Solid“ nach Liedtke [13] berechnet werden. Dieser erlaubt eine feinere Abtastung des Raumes und umgeht das Problem, dass Beleuchtungsstärkesensoren bei jeder Messung das einfallende Licht aus dem Halbraum integrieren.

Neben den Anpassungen am Messgerät sind Erweiterungen des Anwendungsbereiches geplant. Ergänzend zu den Einzelpunktmessungen soll das Gerät die Vermessung von dreidimensionalen Messrastern unterstützen und damit die Repräsentation des Vektorfeldes im Raum erlauben. Hierbei wird der „Flow of Light“ [14] in Form von Feldlinien im dreidimensionalen Raum dargestellt. Die Open-Source-Software zur Darstellung des Lichtfeldes wurde bereits 2019 von Kartashova [15] vorgestellt. Das Messgerät dient lediglich als Datenquelle mit angepassten Exporteigenschaften für diese Software. Das Exportfile beinhaltet die Koordinaten der Messpunkte im 3D-Raster mit den zugehörigen Messwerten der kubischen Beleuchtungsstärke in Form von sechs Einzelbeleuchtungsstärken pro Messpunkt. Alle Entwicklungsfortschritte werden in regelmäßigen Abständen auf GitHub bereitgestellt [11].

5. Literatur

- [1] A. Gershun, „The light field,“ *Journal of Mathematics and Physics*, vol. 18, no. 1-4, pp. 51–151, 1939.
- [2] C. Cuttle, *Lighting by Design (1st ed.)*. Burlington, MA: Architectural Press, 2003.
- [3] H. Lingenfelser, „Über den diffusen Anteil der Beleuchtung und ihre Schattigkeit,“ *Licht und Lampe*, vol. 9, pp. 313-318, 1928.
- [4] L. Weber, „Intensitätsmessungen des diffusen Tageslichtes,“ *Annalen der Physik*, vol. 262, no. 11, pp. 374–389, 1885.
- [5] C. Cuttle, W.B. Valentine, J.A. Lynes, W. Burt, „Beyond the working plane“ In Proc. 16th CIE Session, Washington DC, 1967, pp. 471-482.
- [6] F. Haeger, „Schattigkeit: Eine Analyse lichttechnischer Definitionen und subjektiver Bewertungen von Schlagschatten-Situationen,“ PhD thesis, Technische Universität Berlin, 1975.
- [7] A. A. Mury, S. C. Pont, J. J. Koenderink, „Structure of light fields in natural scenes,“ *Applied optics*, vol. 48, no. 28, pp. 5386–5395, 2009.
- [8] C. Cuttle, „Research Note: A practical approach to cubic illuminance measurement,“ *Lighting Research & Technology*, vol. 46, no. 1, pp.31-34, 2014.
- [9] M. Bálský, M. Kozlok, R. Bayer, "Application of Arduino Platform for Light Field Analysis," In Proc. VII. Lighting Conference of the Visegrad Countries (Lumen V4), Trebic, Czech Republic, 2018, pp. 1-4.

- [10] J. Krüger, "Measurement of the light vector and the illumination-distribution solid using Raspberry Pi," In Proc. 11th International Conference on Energy Efficiency in Domestic Appliances and Lighting & 17th International Symposium on the Science and Technology of Lighting (EEDAL/LS:17), Toulouse, France, 2022, pp. 1-3.
- [11] J. Krüger, "Device for the measurement of light direction based on Raspberry Pi" [Online]. Available: <https://github.com/Open-Source-Light-Measurement/light-direction-measurement-device>. [Accessed Feb. 23, 2023].
- [12] Raspberry Pi Foundation, "Raspberry Pi 3 Model B+" [Online], Available: <https://datasheets.raspberrypi.com/rpi3/raspberry-pi-3-b-plus-product-brief.pdf>. [Accessed Feb. 23, 2023].
- [13] C. Liedtke, S. Völker, M. Knoop, (2013). "The light direction and directional light - towards a new quantification of an essential lighting quality criterion," In Proc. CIE x038:2013, Proceedings of the CIE Centenary Conference, Towards a new century of light, April 15-16, Paris, France, 2013, pp. 542–551.
- [14] J. A. Lynes, W. Burt, G. K. Jackson, C. Cuttle, "The Flow of Light into Buildings," *Transactions of the Illuminating Engineering Society*, vol. 31, pp. 65-91, 1966.
- [15] T. Kartashova, H. de Ridder, S. te Pas, S. Pont, "A toolbox for volumetric visualization of light properties," *Lighting Research & Technology*, vol. 51, no. 6, pp. 838-857, 2019.