

# Messung der Blendeigenschaften von PV-Modulen mit einer Fotokamera

22. Schweizer Photovoltaik-Tagung, 21. – 22. März 2024, Lausanne

Christof Bucher, Donat Hess, Labor für Photovoltaiksysteme, Berner Fachhochschule BFH, Burgdorf, christof.bucher@bfh.ch

Ein Foto einer handelsüblichen Kamera beinhaltet die Informationen zur Helligkeit und damit zur möglichen Blendwirkung einer Oberfläche. Verschiedene Filterfunktionen sowie der selbst bei teuren Kameras stark eingeschränkte dynamische Umfang erschweren jedoch die Verwendung einer Kamera als Messgerät. In diesem Poster wird gezeigt, wie eine Kamera als Leuchtdichtemessgerät für PV-Anlagen verwendet werden kann.

## Hintergrund

In Blendgutachten wird in der Regel keine Angabe zur Intensität (Leuchtdichte in  $\text{cd}/\text{m}^2$ ) der Blendung gemacht. Falls doch, sind die Unsicherheiten oft sehr gross, da unterschiedliche Oberflächen unterschiedliche Blendeigenschaften aufweisen. Nur selten geben Hersteller von PV-Modulen Informationen zu den Blendeigenschaften an.

Bei herkömmlichen Blendmessungen wird die Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) bestimmt. Die BRDF beschreibt die Verteilung der Blendstrahlen in die Hemisphäre bei unterschiedlichen Lichteinfallswinkeln. Gängige Verfahren zur Bestimmung der BRDF erfassen jedoch nur ein wenige  $\text{cm}^2$  grosses Segment eines PV-Moduls. Eine Fotokamera hingegen ermöglicht die Messung eines ganzen Moduls oder einer PV-Anlage, abhängig von der Messdistanz.

## Helligkeitsinformation im RGB-Bild

Das RGB-Format ist eine gängige Methode zur Darstellung von Bildern, bei der jedes Pixel Informationen über seine Helligkeit sowie über die Intensität von Rot, Grün und Blau enthält. Die Helligkeitsinformation wird durch die Kombination der drei Farbkanäle repräsentiert. Ein Pixel mit höheren Werten in allen drei Kanälen wird als heller wahrgenommen, während ein Pixel mit niedrigeren Werten in allen drei Kanälen als dunkler erscheint.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Helligkeitsinformation mithilfe der Software iQ-Luminance aus den RGB-Bildern extrahiert.

## Linearität der RGB-Bilder

Die Helligkeitsinformationen sind jedoch nicht linear zu den RGB-Werten. Bei hohen und tiefen Werten gehen die Bildinformationen in eine Sättigung über. Tabelle 1 zeigt, in welchen Bereichen des RGB-Bildes die Helligkeitsinformationen verwertet werden können (geringe Abweichung der Helligkeitsinformation vom effektiven Wert).

Tabelle 1: Messfehler bei verschiedenen Blenden und Belichtungszeiten

Leuchtdichte Mavo-Spot	Blenden Öffnung					
	5 $\text{cd}/\text{m}^2$	100 $\text{cd}/\text{m}^2$	1'000 $\text{cd}/\text{m}^2$	3'000 $\text{cd}/\text{m}^2$	30'000 $\text{cd}/\text{m}^2$	100'000 $\text{cd}/\text{m}^2$
F/3.5 1/30s	R: 14-22 G: 10-16 B: 4-9	R: 200-216 G: 183-200 B: 133-154	R: 255-255 G: 255-255 B: 255-255	R: 255-255 G: 255-255 B: 255-255		
F/4 1/60s	R: 5-10 G: 3-7 B: 0-5	R: 132-150 G: 114-133 B: 74-96	R: 255-255 G: 255-255 B: 255-255		R: 255-255 G: 255-255 B: 255-255	
F/5.6 1/125s	R: 0-4 G: 0-2 B: 0-3	R: 26-34 G: 20-28 B: 13-20	R: 172-193 G: 195-213 B: 195-213	R: 210-224 G: 232-244 B: 234-248		
F/8 1/250s	R: 0-3 G: 0-1 B: 0-1	R: 5-10 G: 4-7 B: 1-6	R: 54-68 G: 69-79 B: 68-80	R: 147-175 G: 173-198 B: 174-198	R: 242-255 G: 243-255 B: 245-255	R: 255-255 G: 255-255 B: 255-255
F/11 1/500s		R: 1-3 G: 0-3 B: 0-4	R: 14-20 G: 18-23 B: 17-24	R: 41-54 G: 52-63 B: 54-64	R: 185-209 G: 210-233 B: 214-237	R: 241-255 G: 242-255 B: 244-255
F/16 1/1000s		R: 1-4 G: 0-4 B: 0-7	R: 1-6 G: 1-7 B: 1-7	R: 8-13 G: 11-15 B: 10-17	R: 124-155 G: 146-180 B: 147-182	R: 129-215 G: 154-236 B: 156-241
F/11 1/2000s			R: 1-4 G: 0-4 B: 0-7		R: 129-162 G: 153-185 B: 155-198	R: 138-214 G: 162-237 B: 165-240
F/16 1/4000s			R: 0-3 G: 0-4 B: 0-4		R: 25-46 G: 33-56 B: 32-57	R: 138-185 G: 158-208 B: 161-211

Abw. < 5% Abw. 5%-10% Abw. > 10%

## Superposition mehrerer Bilder

Die Helligkeitsinformation in einem Bild ist nur für ca. eine Dekade verwertbar. Ein blendendes PV-Modul weist jedoch Leuchtdichten über ca. sechs Dekaden auf. Nachfolgend ist der Prozess zur Superposition mehrerer Bilder zur Beurteilung gezeigt:

- Je 3 Fotos mit und ohne Graufilter, 3 Belichtungszeiten (1/2 s, 1/15 s, 1/125 s)
- Alle Fotos mit Software iQ-Luminance in Leuchtdichtebilder transformiert
- Definition verwertbarer Bereiche je Bild (RGB-Pixelwerte 15 bis 240)
- Berechnung des Gewichtungsfaktors  $w_i$  je Bild  $i$  und Pixel
  - $w_i = 1$  für Pixelwerte von 255/2
  - $w_i = 0$  für Pixelwerte von 15 respektive 240
  - Dazwischen linear interpoliert
- Berechnung der Leuchtdichte je Pixel

$$L = \exp\left(\frac{\sum_i w_i \ln(L_i)}{\sum_i w_i}\right)$$

Abbildung 1 zeigt die Superposition von sechs Leuchtdichtebildern zu einem Gesamtbild. Abbildung 2 zeigt die Messergebnisse von 5 Solargläsern. Abbildung 3 vergleicht die Messungen zwischen BRDF-Messung (SPF Rapperswil) und Indoor-Kameramessungen.

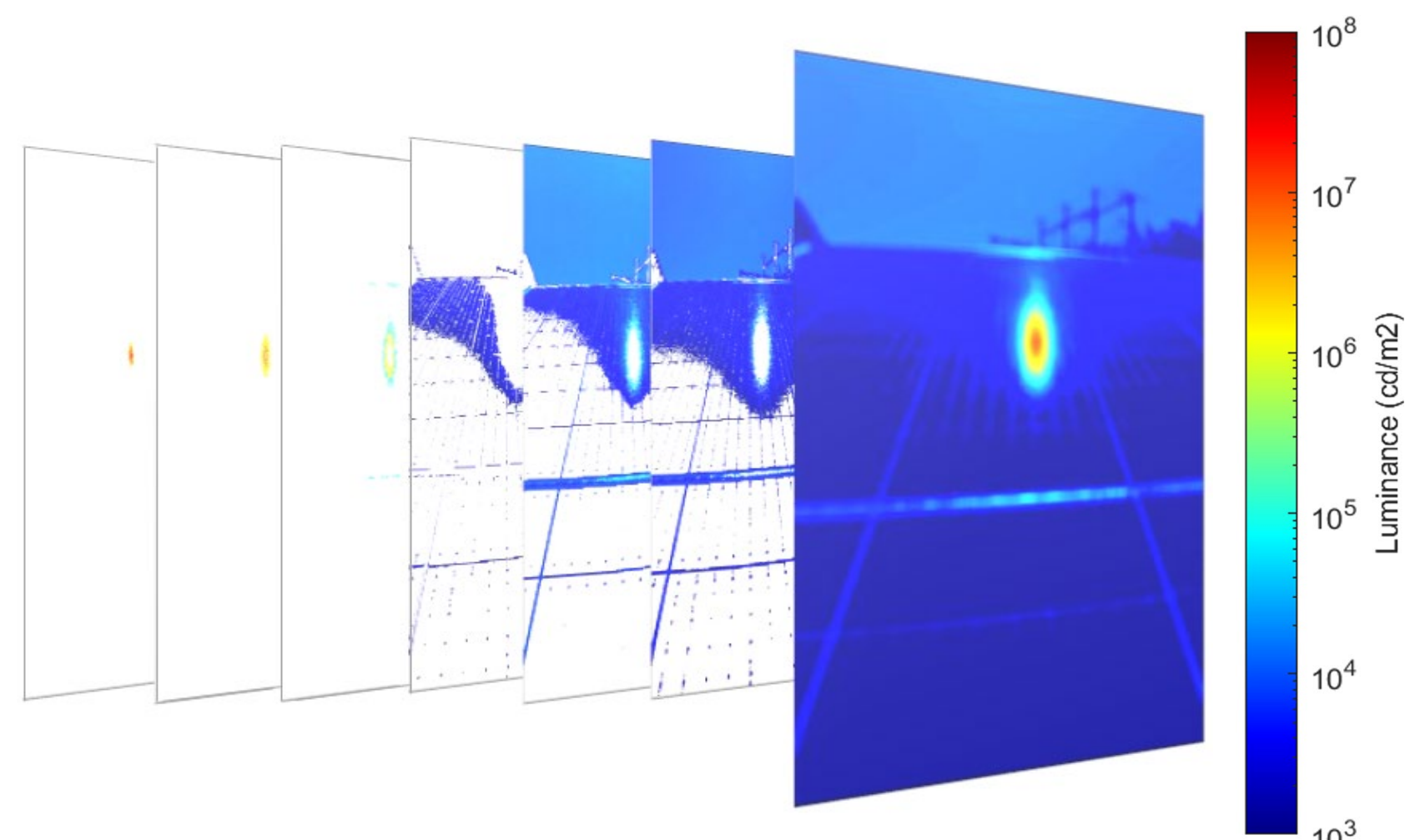


Abbildung 1: Superposition von sechs Bildern mit jeweils ausreichend genauen Leuchtdichteinformationen.

## Resultate

Abbildung 2 und Abbildung 3 zeigen Resultate der Leuchtdichtemessungen mittels Fotokamera. In beiden Grafiken werden die Messungen mit kalibrierten Messungen des SPF verglichen.

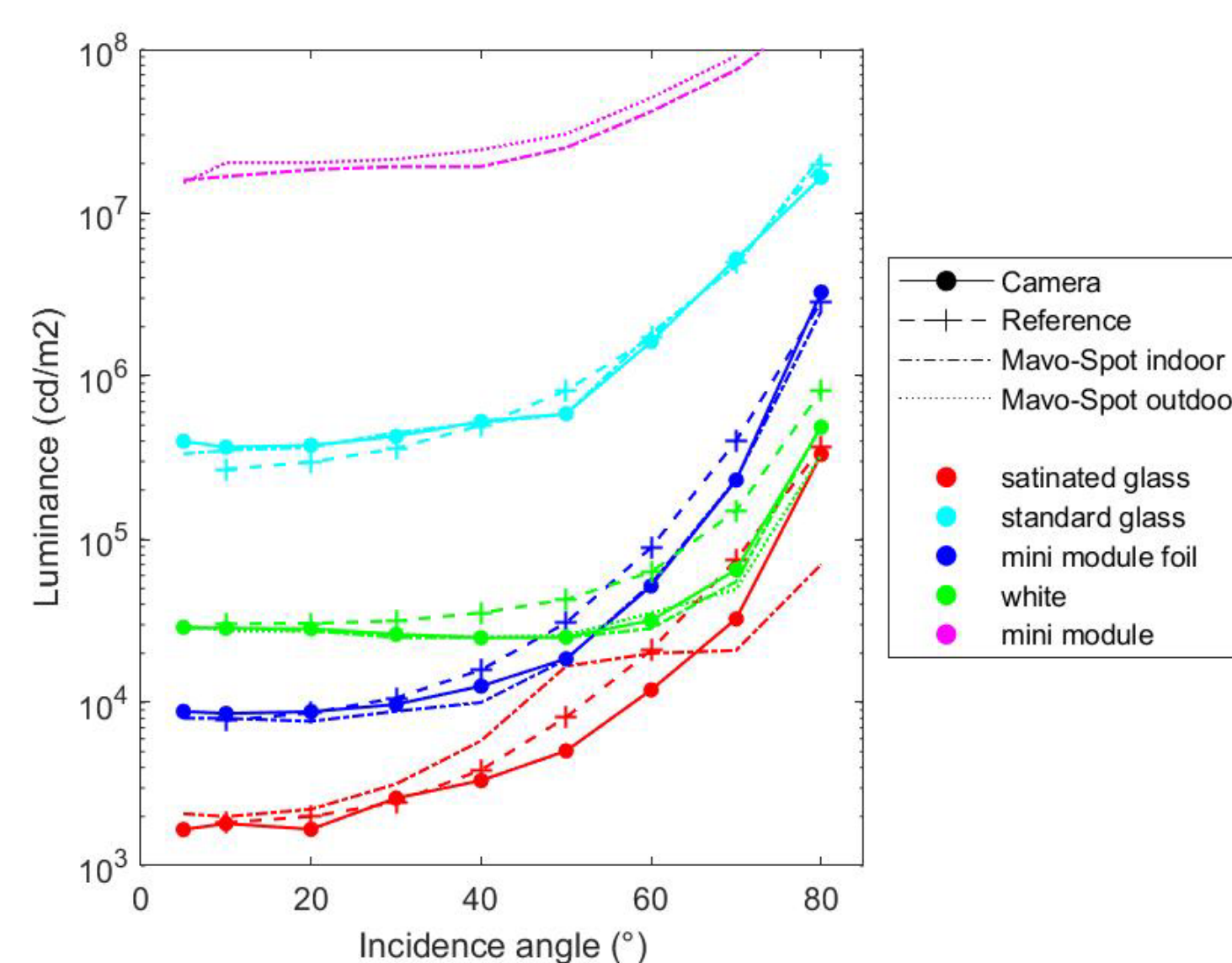


Abbildung 2: Vergleich der Leuchtdichtemessungen mittels Fotokamera mit BRDF- sowie Leuchtdichtemessgerät (Mavo Spot 2)

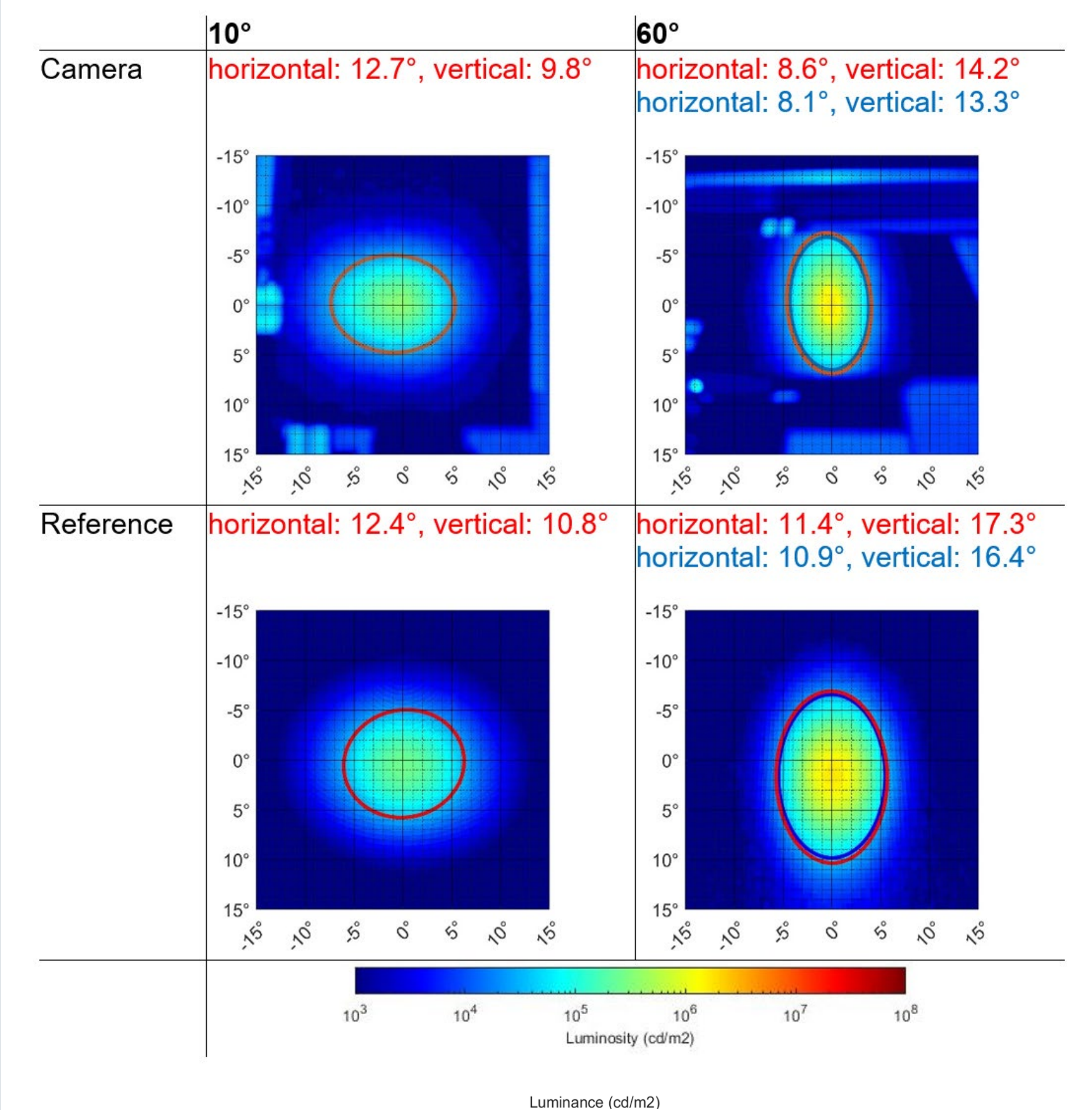


Abbildung 3: Vergleich der Kamera-Messung mit einer BRDF-Messung des SPF Rapperswil. Die Ellipsen kennzeichnen den Bereich des Glanzflecks gemäss zweien Definitionen (rot > 30'000  $\text{cd}/\text{m}^2$ , bei 60° : blau > 40'000  $\text{cd}/\text{m}^2$ ).

## Fazit

Die Leuchtdichte einer Oberfläche und damit die Blendung einer PV-Anlage kann mit einer Fotokamera gemessen werden, wenn mehrere Bilder gemacht und jeweils die Helligkeitsinformationen von weder- über noch untersättigten Bereichen extrahiert und superponiert werden.

Die Messgenauigkeit dürfte für viele Praxisanwendungen ausreichend sein, weist jedoch im Einfallswinkelbereich um 60° noch nicht erklärbare Abweichungen auf.

## Ausblick

Am PV-Labor der BFH soll eine Software zur automatischen Auswertung von Kamerabildern geschrieben und zur freien Verwendung zur Verfügung gestellt werden. Zudem sollen Messgenauigkeit und Messfehler genauer verstanden und berücksichtigt werden, insbesondere für Outdoor-Messungen.

## Referenzen

- D. Hess et al., Characterisation of the glare properties of photovoltaic modules and PV systems using a photographic camera, 39. PV-Symposium Bad-Staffelstein, 2024
- Ch. Bucher et al., Two-Dimensional Representation of the Bidirectional Reflectance Distribution Function of Photovoltaic modules, EUPVSEC, Lissabon, 2023