

# Einfluss von Tuben zur Abschirmung von Streulicht bei photometrischen Messungen

Laura Kallenbach, Johannes Ledig, Thorsten Gerloff

Fachbereich 4.1 Photometrie und Spektroradiometrie

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig, Germany

Laura.Kallenbach@ptb.de

## Abstrakt

In diesem Beitrag wird der Einfluss von Tuben zur Streulichtreduzierung auf Messungen von photometrischen und radiometrischen Größen untersucht. Dazu wurden Messungen mit einer grünen 5 mm LED sowie einem Leuchtdichtenormal mit einer Halogenglühlampe und einer Lichtaustrittsfläche von 70 mm im Durchmesser durchgeführt. Zum Einsatz kamen sechs verschiedene Empfänger (drei Photometer und drei Radiometer), welche jeweils mit sechs verschiedenen Tuben sowie ohne Tubus eingesetzt wurden. Die Tuben unterscheiden sich in ihren matt schwarzen bzw. schwarz eloxierten (glänzenden) Ringblenden, der Blendenposition im Tubus, dem Fasenwinkel und der Ausrichtung der Faser zur Lichtquelle bzw. zum Empfänger. Die Messungen erfolgten in einer reflexionsarmen Umgebung. Die Ergebnisse wurden im Anschluss analysiert und graphisch aufgearbeitet. Dabei sind Unstimmigkeiten im Bezug zu einem Empfänger aufgetreten, die im Weiteren mit zusätzlichen Messungen untersucht wurden.

## 1 Einleitung

Der Einsatz von Tuben bei photometrischen und radiometrischen Messungen ist weit verbreitet und in der Messtechnik zur Reduktion von Streulicht allgegenwärtig. Hierbei stellt sich die Frage, welche Auswirkungen Tuben auf die jeweilige Messgröße haben. Diese Arbeit untersucht hierbei exemplarisch den Einfluss von Tuben hinsichtlich der – aus dem Detektorsignal berechneten – Licht- bzw. Bestrahlungsstärke bei der Messung unterschiedlicher Lichtquellen in verschiedenen Distanzen.

Abbildung 1 zeigt den typischen Aufbau eines Photometers mit Eingangsoberatur inklusive (optionalem) Tubus, dabei sind diese Zeichnung und folgenden Darstellungen nicht maßstabsgetreu abgebildet. In lila sind die begrenzende Ringblende des Photometers sowie das durch die Ringblenden im Tubus eingeschränkte Sichtfeld dargestellt. Die Blenden im Tubus sind dabei so angeordnet,



dass ihre Kanten in einer Linie zum eingeschränkten Sichtfeld liegen. Der von der gesamten Photodiode sichtbare Bereich wird dabei hellgrün und der gegenüber der Photodiode durch die Ringblende teilweise verschattete Bereich etwas dunkler in einem Balken rechts dargestellt.

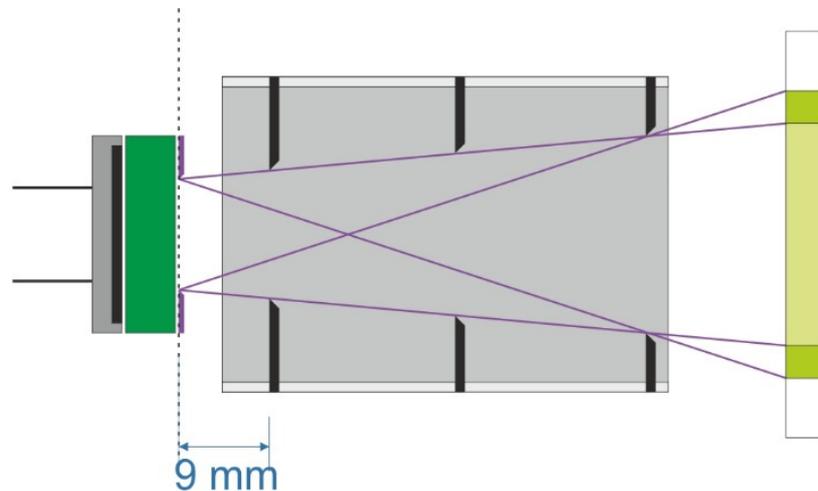


Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines Photometers mit Tubus und Gesichtsfeld im Querschnitt

Der durch die Siliziumphotodiode erzeugte Photostrom kann bei bekannter photometrischer Empfindlichkeit des Photometerkopfes genutzt werden, um hieraus die Beleuchtungsstärke  $E_v$  zu bestimmen. Die betrachtete Lichtstärke  $I_v$  kann durch die gemessene Beleuchtungsstärke  $E_v(r)$  unter Berücksichtigung des Abstands  $r$  und des Einheitsraumwinkels  $\Omega_0$  unter Verwendung von Gleichung 1 berechnet werden.

$$I_v = \frac{E_v(r) \cdot r^2}{\Omega_0} \quad (1)$$

Ein ähnlicher Zusammenhang gilt auch für die Messung des radiometrischen Äquivalents, der Strahlstärke. Streng genommen gilt dieser Zusammenhang nur für punktförmige Lichtquellen und infinitesimale Empfängerflächen. Näherungsweise, bei Akzeptanz eines definierten Restfehlers, gilt dieser Zusammenhang auch bei ausreichend großem Abstand zwischen ausgedehnten Lichtquellen und endlich großen Empfängerflächen. Die minimale Distanz bei einem noch akzeptablen Restfehler wird als photometrische Grenzentfernung bezeichnet.

Im Folgenden wird untersucht, welchen Einfluss der Einsatz verschiedener Tuben auf die photometrischen und radiometrischen Messungen hat.

In Tabelle 1 sind die verschiedenen verwendeten Empfänger aufgeführt. In der weiteren Diskussion werden nur die in blau geschriebenen Empfänger herangezogen, da die Verläufe der Empfänger P1, P2, R2 und R3 vergleichbar sind und lediglich P3 und R1 von diesen Ergebnissen abweichen und daher separat diskutiert werden.

Tabelle 1: Übersicht der untersuchten Empfänger

Bezeichnung	Durchmesser der Empfängerfläche	Diffusorglas	$V(\lambda)$ - Filter
P1	11,3 mm	Nein	Ja
P2	11,3 mm	Nein	Ja
P3	10 mm	Ja	Ja
R1	11,3 mm	Nein	Nein
R2	11,3 mm	Nein	Nein
R3	11,3 mm	Nein	Nein

## 2 Einfluss der Tuben bei LED-Messungen

Die ersten Untersuchungen erfolgten mit den verschiedenen Empfänger-Tuben-Kombinationen an LEDs als Lichtquelle. Dabei wurde der Abstand zwischen den LEDs und dem Empfänger von 100 mm bis 1000 mm variiert. Abbildung 2 zeigt dabei beispielhaft am Empfänger P1 einen typischen Verlauf der vermeintlichen Lichtstärke berechnet nach  $E_v(r) \cdot r^2$  in Abhängigkeit des Abstands. Die Fehlerbalken stellen die Standardmessunsicherheit ohne Berücksichtigung des Streulichts dar.

Hierbei fällt die Variation der vermeintlichen Lichtstärke im geringen Abstand von 100 mm auf. Dies ist eine in der CIE 127:2007 „Measurement of LEDs“ empfohlene und weit verbreitete Geometrie in der LEDs gemessen werden, die als „Averaged LED Intensity ILED B“ bezeichnet wird. Der Anstieg der vermeintlichen Lichtstärke lässt sich durch die geringe Distanz erklären, da hier noch nicht die photometrische Grenzentfernung erreicht wurde, um ähnlich einer Punktlichtquelle wirken zu können. Dieses zeigt, dass die erhaltenen Werte der Messbedingungen für ILED A (316 mm) und ILED B (100 mm) in der Regel nicht der physikalischen Größe der Lichtstärke zugeordnet werden können und daher als Größe „LED-Intensitätsmittelwert“ (engl. Averaged LED Intensity) bezeichnet werden müssen. Die Einheit beider Größen ist jedoch identisch (Candela).

Der relative Verlauf der vermeintlichen Lichtstärke gegenüber der Distanz zwischen Empfänger und Lichtquelle ist bei Messungen mit unterschiedlichen Tuben sehr ähnlich, lediglich der Absolutwert der ermittelten Lichtstärke weicht voneinander ab. Dieser Umstand kommt dadurch zustande, dass die photometrische Empfindlichkeit lediglich für eine Tuben-Empfängerkombination kalibriert wurde und diese in allen Messungen Anwendung fand. Die Kalibrierung einer Kombination lässt sich demnach

nicht auf andere Tuben übertragen. Insbesondere ist das Photometersignal ohne Einsatz eines Tubus größer. Grund dafür ist der vermehrte Beitrag von Streulicht des Raumes.

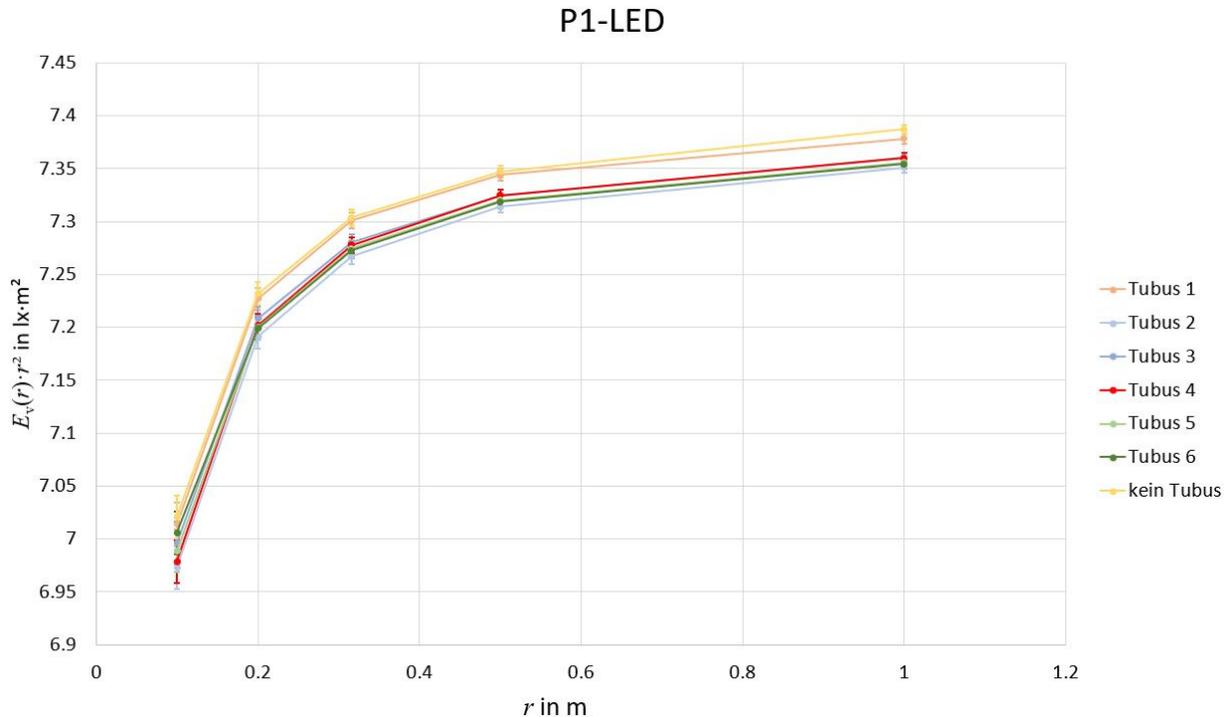


Abbildung 2: Mit Empfänger P1 bestimmtes  $E_v(r) \cdot r^2$  bei unterschiedlichem Abstand zur LED  
(Die Fehlerbalken stellen die Standardmessunsicherheit ohne Berücksichtigung des Streulichts dar.)

### 3 Einfluss der Tuben bei ausgedehnten Lichtquellen

Um auch die Auswirkungen von Tuben auf die Lichtstärke bei ausgedehnten Lichtquellen zu untersuchen, wurde ein Leuchtdichtenormal basierend auf einer lichtstromgeregelten Halogenglühlampe als Lichtquelle verwendet. Das Leuchtdichtennormal weist eine leuchtende Fläche von 70 mm im Durchmesser und eine annähernd lambertsche Abstrahlcharakteristik auf. Der Verlauf der in verschiedenen Abständen vom Empfänger P1 ermittelten Lichtstärke ist in Abbildung 3 dargestellt. Wie bei den LEDs ist auch hier ein vermeintlicher Anstieg der Lichtstärke mit zunehmendem Abstand zu erkennen. Es sind erst Messung ab einem Abstand von 500 mm dargestellt, da bei kleineren Abständen der Rand der großen Lichtaustrittsöffnung mit einem Durchmesser von 70 mm durch das Sichtfeld der Ringblenden abgeschnitten wird. Für einen zugelassenen Fehler von z.B. 0,2% ist die photometrische Grenzentfernung in einer Distanz von einem halben Meter noch nicht erreicht. Darüber hinaus führt bei der Bestimmung der Lichtstärke allein die Unsicherheit der Abstandsmessung von 1 mm bereits zu einem Messunsicherheitsbeitrag von 0,4%, der in den Messwerten dargestellt ist. Zusätzlich lässt sich ohne Einsatz eines Tubus wieder ein deutlich größeres Photometersignal des Empfängers feststellen. Eine weitere Auffälligkeit, die auch bei anderen Empfängern bei Verwendung des Tubus 4

auftrat, ist der starke Abfall der berechneten vermeintlichen Lichtstärke bzw. Strahlstärke bei einem Abstand von nur einem halben Meter.

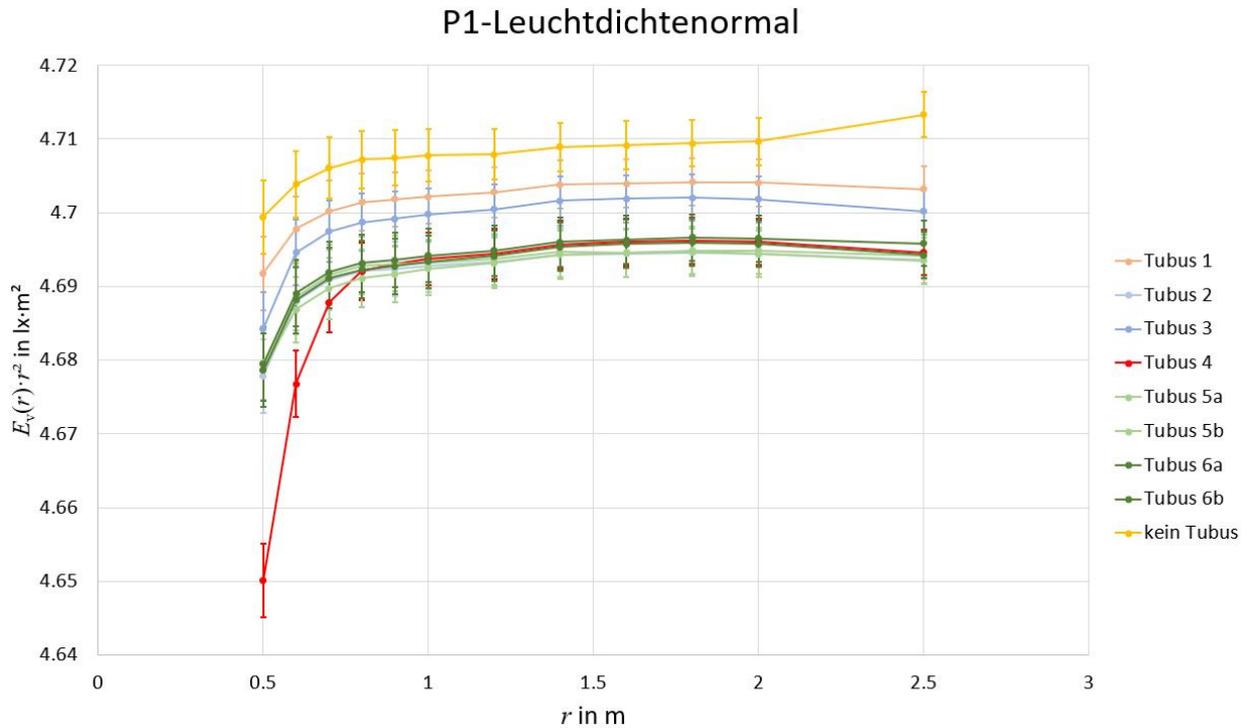


Abbildung 3: Mit Empfänger P1 bestimmtes  $E_v(r) \cdot r^2$  eines Leuchtdichtenormals bei unterschiedlichem Abstand (Die Fehlerbalken stellen die Standardmessunsicherheit ohne Berücksichtigung des Streulichts dar.)

Ein Vergleich von Tubus 1 und Tubus 4 zeigt, dass der Abstand des Tubus zur Photometerapertur um 3 mm größer ist als bei Tubus 1, weshalb die erste Blende das Sichtfeld des Empfängers mehr einschränkt. Zur Veranschaulichung stellt Abbildung 4 in lila das nicht verschattete Sichtfeld der Empfänger-Tuben-Kombination P1 dar.

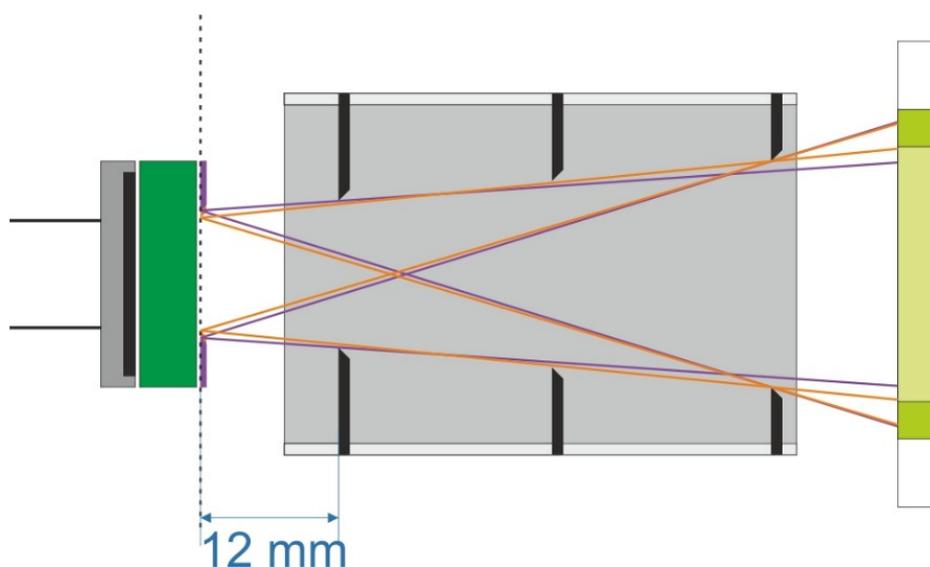


Abbildung 4: Schematischer Aufbau eines Empfängers mit Sichtfeld bei vergrößertem Abstand des Tubus (lila) sowie eines Empfängers mit verkleinerter Empfängerapertur (orange)

Die hellgrüne Balkendarstellung des sichtbaren Bereichs der Kombination P1 mit Tubus 1 wurde aus Abbildung 1 übernommen. Es ist gut zu erkennen, wie das Sichtfeld des Empfängers durch Verschieben des Tubus verkleinert wird.

Dieser Effekt ist bei Empfänger P3 in Abbildung 5 nicht festzustellen, da dieser eine Empfängerapertur von nur 10 mm Durchmesser besitzt. Durch die kleinere Empfängerfläche hat die erste Blende im Tubus bei dieser Konstellation noch keine abschneidende Wirkung, wie bei den anderen Empfängern. Beispielhaft wird das Sichtfeld dieses Empfängers in Abbildung 4 in orange dargestellt.

Zusätzlich hat dieser Empfänger im Vergleich zu den anderen Empfängern noch einen Diffusor vor dem Filterglas, um ein homogenes Strahlungsfeld für die Photodiode zu erzeugen. Der Empfänger erfasst durch den Diffusor bei 2,5 m Abstand ohne Tubus mehr Streulicht des Raumes, als der Empfänger P1 ohne Diffusor (vergleiche Abbildung 5 mit Abbildung 3).

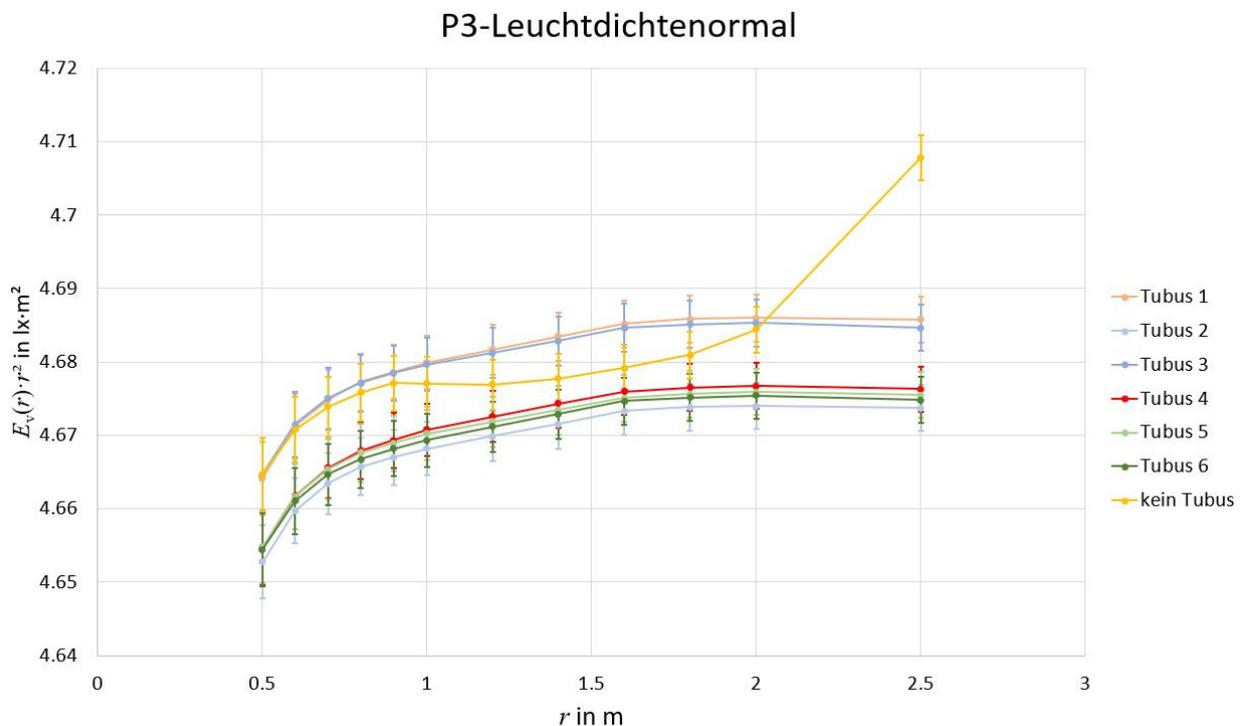


Abbildung 5: Mit Empfänger P3 bestimmtes  $E_v(r) \cdot r^2$  eines Leuchtdichtenormals bei Abstandsvariation (Die Fehlerbalken stellen die Standardmessunsicherheit ohne Berücksichtigung des Streulichts dar.)

Die Abstandsabhängigkeit der ohne Tubus bestimmten Lichtstärke kann durch einen Beitrag von Streulicht im Raum erklärt werden, welcher mit größerem Abstand zunimmt. Anders sieht das bei dem Kurvenverlauf des Radiometers R1 in Abbildung 6 aus. Hier ist ein Unterschied zwischen den Messungen mit Tubus und ohne Tubus von 3 % zu erkennen, weshalb für die Konfiguration ohne Tubus das Streulicht im Raum mit Hilfe einer zusätzlichen Messung bestimmt wurde. Dabei wurde eine kleine kreisrunde Blende zwischen Empfänger und Lichtquelle positioniert, die die Lichtquelle gegenüber der Empfängerapertur abschattet, aber nicht den Raum. Dadurch kann das

Streulicht des Raumes bestimmt und vom Photometersignal abgezogen werden. Der Beitrag liegt für die dargestellten Messungen bei unter 1%. Die signifikante Differenz zwischen den Messungen mit und ohne Tubus wurde auch schon bei den LED-Messungen festgestellt. Eine mögliche Ursache sind Interreflektionen zwischen Empfänger R1 und Tubusblenden, weshalb weitere Untersuchungen durchgeführt wurden.

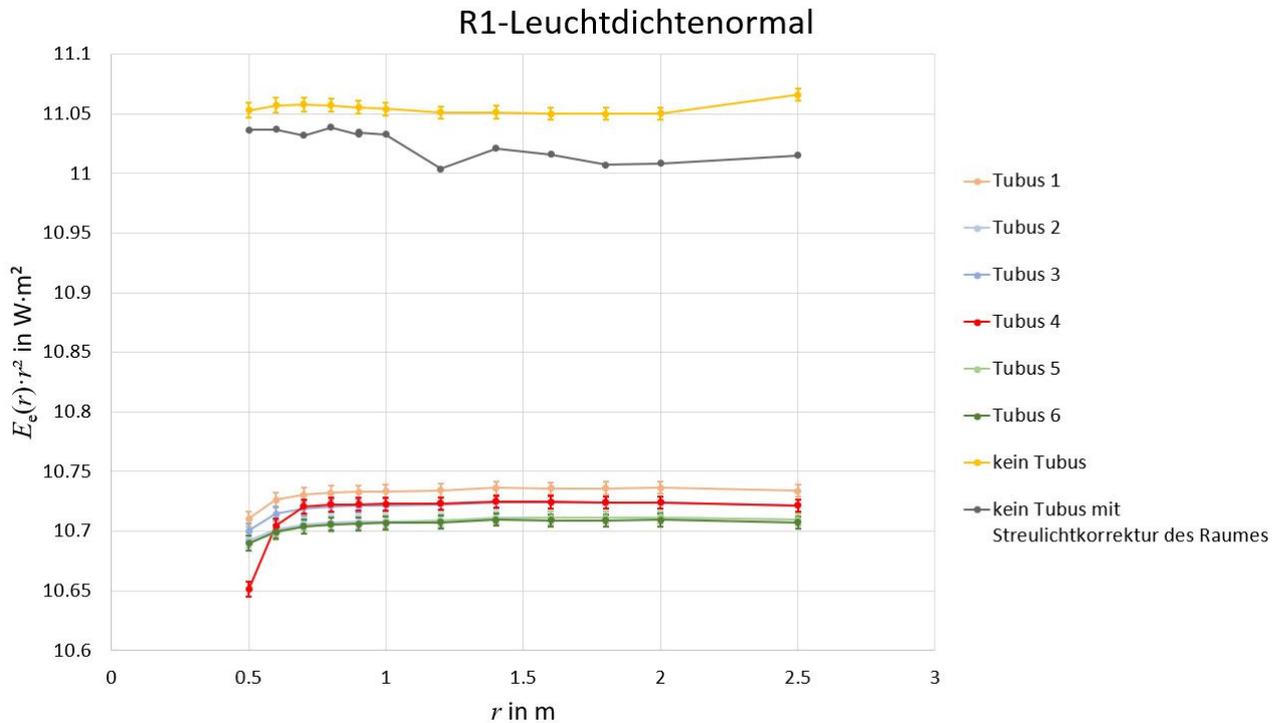


Abbildung 6: Mit Empfänger R1 bestimmtes  $E_e(r) \cdot r^2$  eines Leuchtdichtenormals bei unterschiedlichem Abstand (Die Fehlerbalken stellen die Standardmessunsicherheit ohne Berücksichtigung des Streulichts dar.)

#### 4 Untersuchung des Empfängers R1

Um weitere Erkenntnisse über den Empfänger R1 zu erlangen wurde auf diesen ein Spezialtubus mit einer verstellbaren Blendenöffnung geschraubt. In Abbildung 7 ist der mit Hilfe einer Leuchtdichtemesskamera aufgenommene Aufbau (Radiometer R1 mit Spezialtubus zur Variierung des Blendendurchmessers) dargestellt. Dabei zeigt die Farbdarstellung der einzelnen Flächen indirekt deren Reflexionsverhalten in Richtung der Lichtquelle.

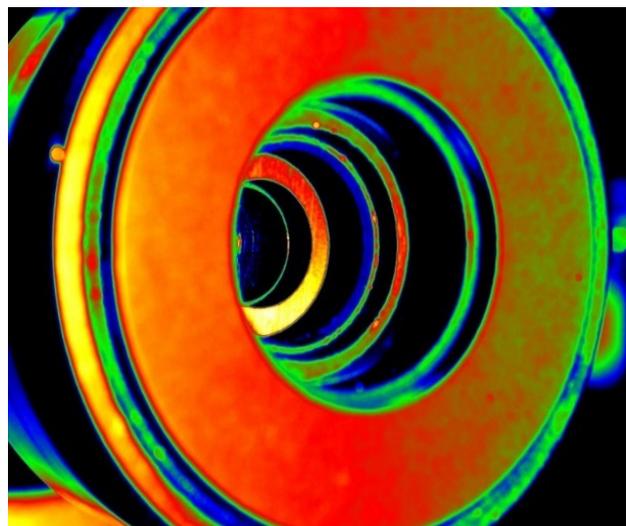


Abbildung 7: Leuchtdichtebild des R1 mit Spezialtubus

Ein Problem bei der Darstellung des Leuchtdichtebildes ist die Blickrichtung der Kamera. Diese schaut von vorne auf den Aufbau und nimmt nicht den Blickwinkel des Empfängers ein, dessen Signalunterschiede untersucht werden soll.

Aus diesem Grund wurde eine weitere Messreihe aufgenommen, in der der Blendendurchmesser Schritt für Schritt verkleinert und gleichzeitig das Signal des Empfängers notiert wurde. In Abbildung 8 sind beispielhaft zwei Fotos mit unterschiedlichem Blendendurchmesser dargestellt. Am linken Bild kann man verschiedene reflektierende Kanten erkennen. Die dritte Kante stammt vom Übergang des Empfängers R1 zum Spezialtubus mit verstellbarer Blende. Die anderen beiden Reflexionskanten kommen durch Blenden in der Lichteintrittsöffnung des Empfängers zu Stande. In der rechten Abbildung kann man die verstellbare Blende erkennen, deren Durchmesser mit aufgezeichnet wurde.

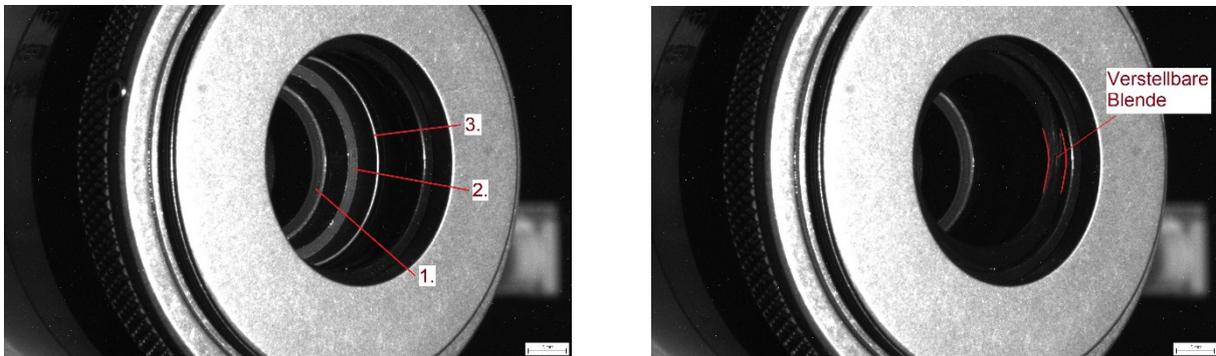


Abbildung 8: Fotos des reflektierten Lichteinfalls bei unterschiedlicher Blendeneröffnung (links: Blendeneröffnung maximal; rechts: Blendendurchmesser verkleinert)

Durch den Schattenwurf der verstellbaren Blende und der berechneten Strahlstärke erhält man den Kurvenverlauf in Abbildung 9. Daran sind deutlich die gesuchten 3% Veränderung in der Strahlstärke zwischen einem Blendendurchmesser von 21 mm

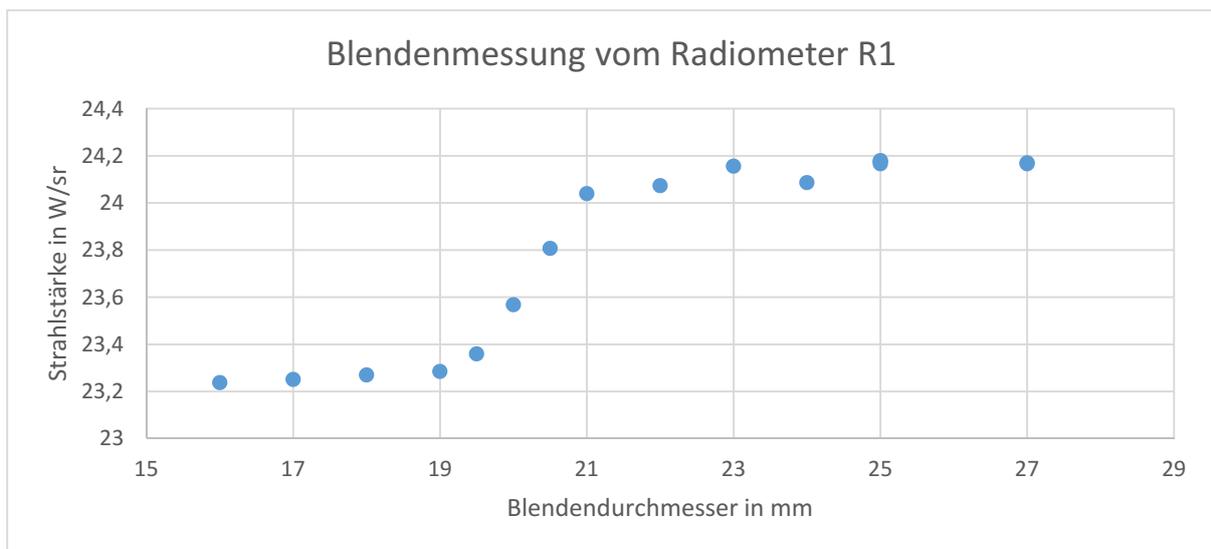


Abbildung 9: Strahlstärke des Empfängers R1 bei Variation des Blendendurchmessers

und 19 mm erkennbar. Gleichzeitig aufgenommene Bilder des Schattenwurfs der Blende geben Aufschluss über die Ursache des Signalunterschieds. Der Schattenwurf erstreckt sich bei einem Blendendurchmesser von 21 mm bis zur dritten Reflexionskante, so dass diese gerade noch im Schatten der Blende liegt. Bei einem Durchmesser von 19 mm fängt der Schattenwurf der Blende an, die zweiten Reflexionskante zu verdecken. Auch wenn der Bereich zwischen der zweiten und dritten Reflexionskante in der Abbildung 8 schwarz erscheint, so reflektiert er doch an seiner glatten, zylinderförmigen Oberfläche Licht, welches fälschlicherweise vom Empfänger als zusätzliches Signal detektiert wird. Diese Reflexion wird durch einen Tubus auf dem Empfänger unterdrückt, da dessen Blenden diese Fläche gegenüber der Lichtquelle verdecken.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurden verschiedene Messergebnisse im Bezug zur Tubennutzung bei photometrischen Messungen diskutiert. Dabei wird die Empfehlung ausgesprochen, solche Messungen auch mit seinen eigenen Empfängern durchzuführen um deren messtechnisches Verhalten besser einschätzen zu können. Im Anschluss können dann die passenden Empfänger für die jeweilige Lichtquelle ausgewählt werden. Ideal ist ein Substitutionsprinzip, bei dem Lichtquelle gegen Lichtquelle bzw. Empfänger gegen Empfänger kalibriert wird. Da dies nicht immer möglich ist, ist es umso wichtiger seine Empfänger-Tuben-Kombination genau zu charakterisieren.

Ein Tubus muss als Bestandteil des Empfängers betrachtet werden und daher auch während der Kalibrierung angebracht sein, damit sein Einfluss berücksichtigt („mitkalibriert“) wird. Am Beispiel des Radiometers R1 kann man dies deutlich erkennen.