

Nichtlinearitätsmessungen an Leuchtdichtemesskameras

A. Zschenker, M. Schuster, D. Lindner, A. Sperling

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

1 Einleitung

Leuchtdichtemesskameras (ILMD: **I**maging **L**uminance **M**easurement **D**evice) werden schon seit mehreren Jahren genutzt, um Leuchtdichteverteilungen örtlich aufgelöst und zugleich schnell messen zu können. So können z. B. in einer Szenerie unterschiedliche Kontraste in einem einzigen Messvorgang erfasst werden, die mit herkömmlichen, integral messenden Ein-Element-Leuchtdichtemessgeräten aufwendig und langsam abgetastet werden müssten. Durch die Möglichkeit, Ladungen zeitlich gesteuert zu erfassen, zu sammeln und auszulesen, lässt sich allein über die Variation der Integrationszeit eine hohe Dynamik im Bereich 10^4 bis 10^5 erreichen. Ein ideales ILMD sollte im gesamten Einsatzbereich linear sein. Die Nichtlinearität realer Leuchtdichtemesskameras wird häufig dadurch gemessen, dass die Menge der akkumulierten Ladungen als Funktion der Integrationszeit variiert wird. Hingegen sieht das standardisierte Verfahren für klassische Empfänger, wie z. B. Photodioden vor, die Eingangsgröße z.B. die Leuchtdichte, zu variieren. Die sog. Leuchtdichtemethode erfordert jedoch einen erhöhten Aufwand bezüglich der Messapparatur. Ein Vergleich beider Methoden, des Integrationszeitverfahrens einerseits und der Leuchtdichtemethode andererseits, soll am Beispiel einer nicht kalibrierten Leuchtdichtemesskamera die Unterschiede beider Verfahren aufzeigen. Weiterhin werden Hinweise zu möglichen Problemen bei der praktischen Bestimmung der Nichtlinearität gegeben.

2 Beschreibung von Nichtlinearität

Der Begriff Linearität bezeichnet das konstante Verhältnis zwischen der Änderung der Ausgangsgröße ΔY (Anzeigewert) zur entsprechenden Änderung der Eingangsgröße ΔX (Bezugsgröße). Bei Messgeräten wird darüber hinaus meist Proportionalität gefordert. Dieses bedeutet, dass der Anzeigewert und gegebenenfalls auch die Bezugsgröße bezüglich ihres Offsets bereinigt werden müssen. In diesem Fall ist eine Dunkelsignalkorrektur notwendig.

Nichtlinearität im Sinne von Proportionalität kann auch als relative Änderung der Empfindlichkeit $s(X) = \frac{Y}{X}$ bei dem Wert der Eingangsgröße X zu der Empfindlichkeit

$s(X_{\text{limit}}) = \frac{Y_{\text{limit}}}{X_{\text{limit}}}$ bei dem Referenzwert X_{limit} angegeben werden. X_{limit} führt zu einem

maximalen Ausgangssignal Y_{limit} des jeweiligen Messbereichs. Für einen Messbereich ergibt sich dann die Nichtlinearität durch:

$$f_{\text{NL}, Y_{\text{limit}}}(X, Y) = \frac{Y}{Y_{\text{limit}}} \frac{X_{\text{limit}}}{X} = \frac{s(X)}{s(X_{\text{limit}})} \quad (1)$$

Dieser Ansatz wird auch in abgewandelter Form in der Definition von Kennwerten zur Nichtlinearität von Empfängern herangezogen, die z. B. in der DIN EN13032 -1 und DIN 5032-6 beschrieben werden. Entsprechende Kennwerte für ILMDs werden derzeit im Fachnormausschuss Licht des DIN vorbereitet. Ziel der in den Normen beschriebenen Kennwerte ist eine Aussage zur Charakterisierung und Klassifizierung eines Gerätes. Im Gegensatz zu (1) sind Kennwerte jedoch im Allgemeinen nicht zur Korrektur einer erkannten Nichtlinearität geeignet.

Da das schlechte Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) an der unteren Grenze eines Messbereichs (MB) scheinbar hohe oder undefinierte Werte [TTNL2008] für eine Nichtlinearität erzeugen kann, deren Ursache aber in erster Linie das Rauschen ist [CIESym2008], ist es sinnvoll, für die Bestimmung der Nichtlinearität eine untere Grenze, z.B. $1\% \cdot Y_{\text{limit}}$, festzulegen.

Eine Nichtlinearität sollte für jeden Messbereich separat angegeben werden. Soll eine Korrektur Anwendung finden, kann sie in der Form einer Tabelle $f^{-1}_{\text{NL}, Y_{\text{limit}}}(Y)$ (auch **Look-up-Table** genannt) für jeden Messbereich Y_{limit} und Messwert Y bzw. Sättigungsgrad (auch Aussteuerung genannt) Y / Y_{limit} hinterlegt werden.

Eine andere Form von Nichtlinearität, die bei einem Messbereichswechsel auftreten kann, behandelt der Messbereichsumschalt- bzw. Abgleichfehler. Er wird bestimmt, indem bei einem Eingangssignal von 90% des empfindlicheren Anzeigebereiches A in den weniger empfindlichen Anzeigebereich B gewechselt und die Eingangsgröße X um den Faktor der Anzeigebereichsumschaltung k erhöht wird, bis der Anzeigewert im weniger empfindlichen Messbereich B ebenso 90% des Anzeigebereichsendwertes beträgt.

Ist $\hat{Y}(B)$ der Anzeigebereichsendwert im unempfindlicheren Messbereich B und $\hat{Y}(A)$ der maximal auslesbare Wert im empfindlicheren Messbereich A , lässt sich schreiben:

$$f_{\text{NL}, \text{MB}}(A, B) = \frac{Y(B)}{k Y(A)} \quad (2)$$

$$k = \frac{\hat{Y}(B)}{\hat{Y}(A)} \quad (3)$$

Für jeden Messbereichswechsel sollte ebenfalls ein Korrekturfaktor $f^{-1}_{\text{NL}, \text{MB}}(A, B)$ angegeben werden.

2.1 Auftreten von Nichtlinearitäten

Als Ursache für Nichtlinearitäten gelten unter anderem die wellenlängenabhängige Eindringtiefe der Strahlung, Substratfehler (sog. Traps), Rauschprozesse und das Sättigungsverhalten (direkte Übersteuerung, Blooming als Sekundäreffekt von Übersteuerung). Weitere Effekte, wie Smear, haben andere Ursachen, können jedoch ähnlich wirken. Ebenso können Fehler der Auswerteelektronik und der Software zu Nichtlinearitäten führen. Viele der aufgeführten Einflüsse können durch Korrekturen berücksichtigt werden. Durch Übersteuerung erzeugte Nichtlinearitäten müssen jedoch

durch geeignete Geräteeinstellungen vermieden werden, da eine nachträgliche Korrektur kaum möglich ist.

Wie im Weiteren gezeigt wird, ist es besonders im Falle von ILMDs sinnvoll die beiden oben beschriebenen Signal- bzw. messbereichsabhängigen Einflüsse auf die Nichtlinearität der Messgeräte näher zu untersuchen, da diese Nichtlinearitäten in drei wichtigen Anwendungsfällen zu berücksichtigen sind:

1. Aufnahme eines Objektes unterschiedlicher Leuchtdichte bei konstantem Messbereich. (Nur sättigungsgradabhängige Nichtlinearitätsfehler, beschrieben durch Formel (1) wirken, da der Messbereich für die Aufnahme des Leuchtdichtebildes nicht verändert wird)
 - Randbedingung
 - i. Integrationszeit: konstant
 - ii. Sättigungsgrad: variabel
 - iii. Leuchtdichte: variabel
 - Aufnahmemodus
 - i. Einzelbildaufnahmen von inhomogenen Objekten führen zu unterschiedlich ausgesteuerten Sensorbereichen
 - ii. zeitlich gemittelte Mehrfachaufnahme
 - Abhängigkeiten
 - i. Sättigungsgradabhängig,
 - ii. Energieabhängig (Leuchtdichte/Strahlungsleistung, Wellenlänge, Modulation)
 - iii. ...
 - Wirkung
 - i. Innerhalb des aufgenommenen Leuchtdichtebildes
2. Aufnahmen eines Objektes unterschiedlicher Leuchtdichten in mehreren unterschiedlichen Messbereichen bei konstantem Sättigungsgrad. (Nichtlinearität aus Anwendungsfall 1 tritt nicht in Erscheinung, jedoch wirkt die messbereichsabhängige Nichtlinearität durch den Messbereichswechsel)
 - Randbedingung
 - i. Integrationszeit: variabel
 - ii. Sättigungsgrad: konstant
 - iii. Leuchtdichte: variabel
 - Aufnahmemodus
 - i. High-Dynamic-Rendering Aufnahmen (HDR), Komposition aus Leuchtdichtebildern, welche in unterschiedlichen Messbereichen aufgenommen werden, um eine konstante und optimale Aussteuerung aller Bereiche des Sensors sicherzustellen
 - ii. Zeitlich gemittelte Mehrfach-HDR-Aufnahmen
 - Abhängigkeiten:
 - i. Integrationszeitabhängig bzw. messbereichsabhängig
 - ii. Energieabhängig (Leuchtdichte/Strahlungsleistung, Wellenlänge, Modulation)
 - iii. „„
 - Wirkung
 - i. Innerhalb des zusammengesetzten Leuchtdichtebildes
 - ii. Beim Vergleich von Leuchtdichtebildern aus Anwendungsfall 1

3. Aufnahme eines Objektes konstanter Leuchtdichte in unterschiedlichen Messbereichen (Integrationszeitmethode). Diese Methode gibt Aussage darüber, ob der Wert einer Eingangsgröße in verschiedenen Messbereichen das gleiche Messergebnis liefert.
 - Randbedingung
 - i. Integrationszeit: variabel
 - ii. Sättigungsgrad: variabel
 - iii. Leuchtdichte: konstant
 - Aufnahmemodus
 - i. Einzelbildaufnahme
 - ii. Zeitlich gemittelte Mehrfachaufnahme
 - Abhängigkeiten:
 - i. Integrationszeitabhängig bzw. messbereichsabhängig
 - ii. Sättigungsgradabhängig
 - Wirkung
 - i. Beim Vergleich von Leuchtdichtebildern

Anwendungsfall 3 ist verglichen mit den Anwendungsfällen 1 und 2 abhängig von beiden Nichtlinearitäten. Der Anwendungsfall 3 wird häufig bei der Charakterisierung eines ILMD eingesetzt wird.

Mit diesen drei Anwendungsfällen lassen sich die meisten Einsatzbedingungen von ILMDs beschreiben.

Im Rahmen dieser Betrachtung wird eine eventuell vorhandene Nichtlinearität vorhandener optisch wirksamer Komponenten (Filter, Glas) nicht berücksichtigt. Ebenso nicht untersucht wurde eine Abhängigkeit der Nichtlinearität hinsichtlich Wellenlänge und Modulation des Lichts.

Bei der Bestimmung von Nichtlinearitäten ist außerdem darauf zu achten, dass alle Einflüsse auf die Signalgröße, die durch die notwendigerweise während der Messreihe zu verändernden Bedingungen entstehen bzw. sich aus einer fehlender Konstanz der Strahlungsquelle ergeben, bekannt sind oder ggf. korrigiert werden.

Tabelle 1: Übersicht zu Nichtlinearitäten

	Entstehungsort	Abhängigkeit	Auftreten
1	<ul style="list-style-type: none"> • Sensor • Ausleseelektronik • Wandlerelektronik 	<ul style="list-style-type: none"> • Sättigungsgrad, • Sensortyp • Strahlungsenergie 	<ul style="list-style-type: none"> • Anwendungsfall 1 • Leuchtdichtemethode • Integrationszeitmethode bei angepassten Messbereichen
2	<ul style="list-style-type: none"> • Messbereichs-elektronik 	<ul style="list-style-type: none"> • Elektronik • Elektroneinstellungen (speziell Integrationszeit) 	<ul style="list-style-type: none"> • Anwendungsfall 2, • Integrationszeitmethode und Leuchtdichtemethode kombiniert

2.2 Nichtlinearität als Funktion des Sättigungsgrades

Integrationszeitmethode

Bei diesem Verfahren wird die Leuchtdichte L_0 als Eingangsgröße (genauer gesagt die auf ein Pixel auftreffende Beleuchtungsstärke) konstant gehalten während der Messbereich, vorgegeben durch die Integrationszeit t_1 , geändert wird, um unterschiedliche Aussteuerungen GW_{mess} (GW = Grauwerte) des Sensors zu erhalten. Begonnen wird im empfindlichsten Messbereich t_{10} , in welchem noch keine Übersteuerung $GW_{\text{mess}} \leq GW_0$ auftritt.

Bei der Integrationszeitmethode, die die Integrationszeit als Referenz verwendet, kann die Berechnung der Nichtlinearität durch Messung der Aussteuerung der CCD in Bezug zur Integrationszeit geschehen (Gleichung (4)). Die Ermittlung der Nichtlinearität mit der Integrationszeitmethode erfordert im Fall einer Auswertung über die Grauwerte (mittlerer Teil der Formel (4)) als auch bei einer Auswertung über die Leuchtdichtebilder (rechter Teil der Gleichung (4)) die Kenntnis der exakten Integrationszeiten t_1 bzw. deren Verhältnisse, da die Messunsicherheit der t_1 direkt in die Unsicherheit des Messergebnisses eingeht. Die berechneten Leuchtdichtewerte enthalten in der Regel Korrekturen c_1 , so dass es für den Anwender i. A. nicht möglich ist, von einer aus Grauwerten ermittelten Nichtlinearität auf die reale Nichtlinearität - bezogen auf das Leuchtdichtebild - zu schließen. In jedem Fall muss die Kurzzeitstabilität der Leuchtdichte L_0 mittels kontinuierlichen

Monitormessungen M über den Korrekturfaktor $M_{\text{Ref}} / M_{\text{ILMD}}$, der die Änderung der Strahlungsquelle zwischen der Referenzmessung und der Messung mit dem ILMD berücksichtigt, korrigiert werden. Die Integrationszeiten sollten außerdem ausreichend stabil sein (Stabilität der Integrationszeit: $\sigma_r(t_1) < 10^{-4}$).

$$f_{\text{NLTyp a, d}}(t_{10}, t_1, GW_0, GW_{\text{mess}}) = \frac{GW_{\text{mess}}}{GW_0} \frac{t_{10}}{t_1} \frac{c_{10}}{c_1} \frac{M_{\text{Ref}}}{M_{\text{ILMD}}} = \frac{L_{\text{mess}}(t_1)}{L_0(t_{10})} \frac{M_{\text{Ref}}}{M_{\text{ILMD}}} \quad (4)$$

Obwohl das Integrationszeitverhältnis (der Messbereichsumschaltfaktor) als Referenz dient, hat der Anwender nicht bei jeder Messkamera Zugriff auf die tatsächlich realisierten Integrationszeiten bzw. Messbereichsumschaltfaktoren. Daher wird es für den Anwender in der Regel schwierig sein die Nichtlinearität über die ansonsten relativ einfach umzusetzende Integrationszeitmethode zu bestimmen. Nur für Kalibrierungen, die sich auf die realen Leuchtdichten und nicht auf die von der Kamerasoftware berechneten Leuchtdichtewerte beziehen, ist die Ermittlung der Nichtlinearität aussagekräftig.

Leuchtdichtemethode

Bei dieser Methode wird der Messbereich während einer Messung nicht verändert. Durch Variation der Leuchtdichte als Eingangsgröße werden hier unterschiedliche Sättigungsgrade des Sensors erreicht.

Dieses Verfahren kann sowohl mit den Grauwerten als auch mit den Leuchtdichtewerten durchgeführt werden. Wegen der oben getroffenen Feststellung ist jedoch auch hier ein

Schluss von einer über Grauwerte bestimmten Nichtlinearität auf die Nichtlinearität im Leuchtdichtebild nicht möglich.

Die Stabilität der Quelle trägt auch hier zur Unsicherheit der Bestimmung bei und kann wieder durch Monitormessungen reduziert werden. Die Eingangsgröße der Messkamera, die Leuchtdichte L des Leuchtdichtenormals, kann durch einen internen oder externen Referenzempfänger oder durch Vergleich mit einer kalibrierten Leuchtdichtequelle angegeben werden.

$$f_{NL, Typ a, L}(L_0, L, L_{mess}) = \frac{GW_{mess}}{GW_0} \frac{t_{10}}{t_1} \frac{c_{10}}{c_1} \frac{L_0}{L} \frac{M_{Ref}}{M_{ILMD}} = \frac{L_{mess}}{L_{mess0}} \frac{L_0}{L} \frac{M_{Ref}}{M_{ILMD}} \quad (5)$$

Um eine vollständige Charakterisierung zu erhalten, sollte die sättigungsgradabhängige Nichtlinearität in allen Messbereichen überprüft werden.

Sind die Integrationszeiten bekannt und erfolgt die Messbereichsanpassung korrekt, so kann in vielen Fällen die Integrationszeitmethode mit dem Ergebnis der Leuchtdichtemethode übereinstimmen.

2.3 Nichtlinearität des Messbereiches

Zur Bestimmung der messbereichsabhängigen Nichtlinearität (Unsicherheit bzw. Fehler in den Messbereichsumschaltfaktoren) ist es sinnvoll, die Leuchtdichte der Quelle für jeden Messbereich so anzupassen, dass der Sättigungsgrad konstant bei ca. 90% liegt. In diesem Fall kann man die Leuchtdichtemethode und die Integrationszeitmethode kombinieren und so beide Nichtlinearitäten nacheinander messen. Zum Vergleich der Verfahren wird die Integrationszeitmethode für verschiedene (maximale) Leuchtdichten und die Leuchtdichtemethode bei verschiedenen (maximalen) Integrationszeiten durchgeführt.

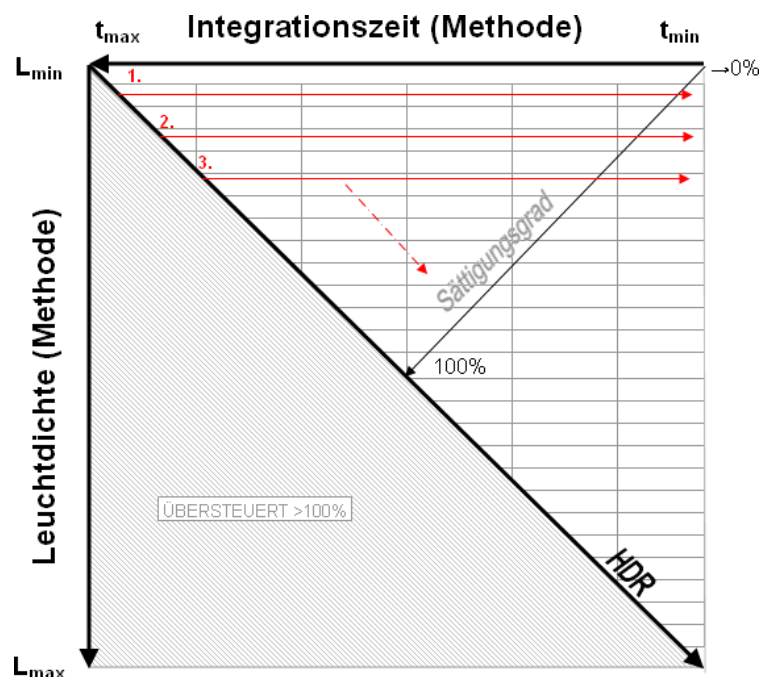


Abbildung 1: Messablaufmatrix zur Nichtlinearität

In Abbildung 1 ist der Zusammenhang der beiden Messverfahren grafisch dargestellt. Um die vom Sättigungsgrad abhängige Nichtlinearität zu messen, kann man die Integrationszeit oder die Leuchtdichte variieren. Die roten nummerierten Pfeile geben die Messreihenfolge und die Änderungsrichtung der Parameter für die Integrationszeitmethode bei unterschiedlichen Leuchtdichten an. Die Vielzahl an Messdaten ermöglichen unterschiedliche Auswertungen in Hinblick auf den jeweiligen Anwendungsfall; Z. B für Anwendungsfall 1: senkrecht, schwarz = Leuchtdichtemethode; Anwendungsfall 3: waagrecht, schwarz = Integrationszeitmethode und für Anwendungsfall 2: diagonal, schwarz bzw. roter Strich-Punkt-Pfeil = Auswertung bei konstantem Sättigungsgrad (HDR, messbereichsabhängigen Nichtlinearität).

$$f_{\text{NL, MB}}(\hat{L}_{A1}, \hat{L}_B) = \frac{L_{\text{mess}}(\hat{L}_B)}{k L_{\text{mess}}(\hat{L}_A)} \quad (6)$$

$$k = \frac{Y(\hat{L}_B)}{Y(\hat{L}_A)} \quad (7)$$

Die kombinierte Messung mit beiden Methoden entspricht einer Vielzahl von Messungen und Messwerten. Eine sinnvolle Zusammenfassung von Intervallen für geeignete Parameter unter Berücksichtigung der geforderten Messunsicherheiten kann hier gegebenenfalls das Datenvolumen reduzieren.

2.4 Praktische Realisierung der Kombinationsmessung

Die kombinierte Messung besteht aus mehreren Zyklen der Integrationszeitmethode bei unterschiedlichen Leuchtdichten. Die Messung erfolgte monochromatisch mit einem CW-Laser bei einer Wellenlänge von 532 nm am Messplatz TULIP (Tuneable Lasers in Photometry [TULIP]) der PTB. Kamerainterne Korrekturen wurden - so weit möglich - abgeschaltet. Lediglich die Korrektur der Hellsignalungleichförmigkeit (normierte, örtliche Hellsignalempfindlichkeit) blieb aktiviert. Dunkelsignale wurden durch Dunkelmessungen bei jeder Messung erfasst und abgezogen. Als Referenz diente eine in der PTB kalibrierte Photodiode. Der Laser wurde leistungsstabilisiert betrieben und über eine Liquid Light Guide in eine Ulbrichtkugel eingekoppelt. Speckle-Effekte wurden durch eine geeignete Konditionierung der Laserstrahlung soweit möglich unterbunden. Die Anzahl der zeitlichen Mittelungen der ILMD-Messung wurde so gewählt, dass die relative Standardabweichung der Einzelwerte bei circa 0,4% lag. Die Variation der Leuchtdichte wurde durch Variation der Laserleistung und Hinzufügen entsprechender Graufilter realisiert.

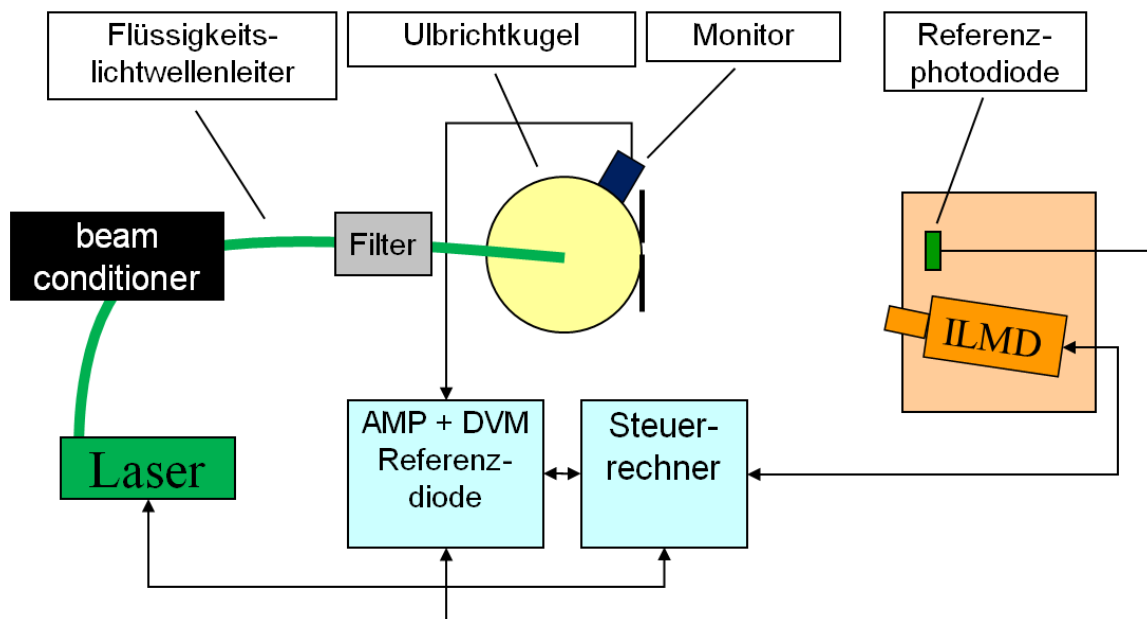


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Messplatzes TULIP. Das Licht wird von oben in die Ulbrichtkugel geführt. Die Empfänger werden indirekt beleuchtet.

Ablauf im Detail:

1. Einstellen einer Leuchtdichte L_{\min} , bei der das ILMD bei großer Integrationszeit t_{\max} voll ausgesteuert ist. Messen mit ILMD und Referenzdetektor.
2. Verringerung der Integrationszeit um den Faktor 1,5 (ein automatisierter Zyklus, roter durchgängiger Pfeil).
3. Messen mit ILMD und Referenzdetektor.
4. weiter mit 2., 3, ... bis kleinste Integrationszeit erreicht.
5. Einstellen der Integrationszeit $\frac{t_{\max}}{1,5^n}$ (n-ter Durchlauf beginnend bei 1). Einstellen der Leuchtdichte auf ungefähr $1,5^n L_{\min}$, sodass ILMD voll ausgesteuert ist. Messen mit ILMD und Referenzdetektor.
6. weiter bei 2. bis $\frac{t_{\max}}{1,5^n} = t_{\min}$

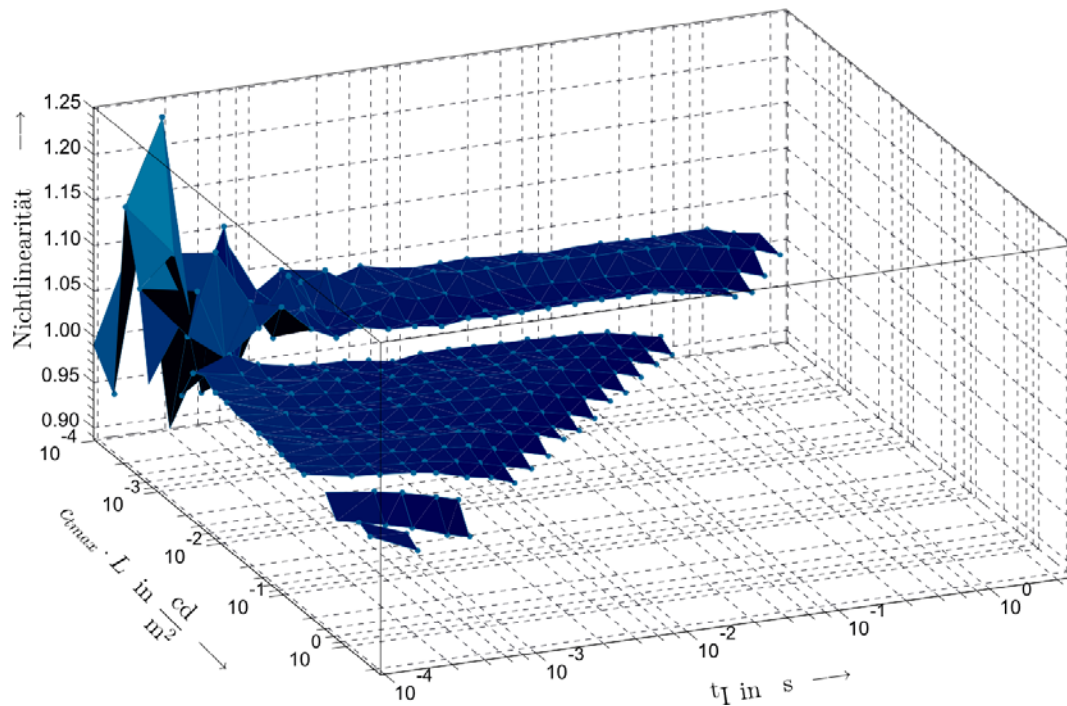


Abbildung 3: 3D-Darstellung der fertigen Messwerte aus Abbildung 1. Zwei Messreihen mussten wegen fehlender Stabilität der Quelle verworfen werden (fehlende Messwerte).

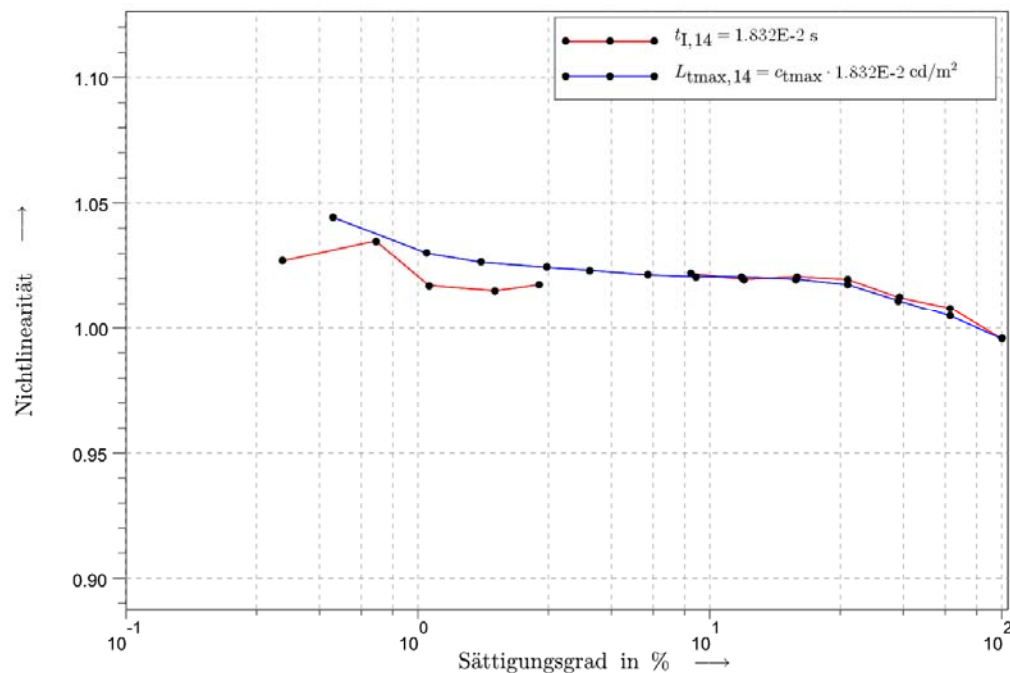


Abbildung 4: Vergleich Integrationszeitmethode (blaue Kurve) und Leuchtdichtemethode (rote Kurve).

Abbildung 4 stellt die Leuchtdichtemethode und die Integrationszeitmethode im gleichen Messbereich (maximale Integrationszeit für die Integrationszeitmethode) gegenüber. Dabei wird die Messwertmatrix (Abbildung 3) entlang der entsprechenden Richtungen (siehe Abbildung 1) ausgewertet.

Die maximale Integrationszeit t_{\max} ist der Messbereich, in dem das ILMD nahezu voll angesteuert war. Da die Integrationszeit bei konstanter Leuchtdichte verringert wird kann statt der Integrationszeit auch der Sättigungsgrad aufgetragen werden. Die Kurven sind unterschiedlich lang, da die verfügbaren Messbereiche begrenzt sind und somit bei dieser Methode nicht jede Aussteuerung für jede Integrationszeit erreicht werden kann (siehe auch Abbildung 1). Ein Vergleich beider Methoden mit gleich vielen Messwerten entlang des Sättigungsgrades ist in unterschiedlichen Messbereichen (Integrationszeiten) möglich (Abbildung 5). Ab circa 0,1% Aussteuerung beginnt der Einfluss des Rauschens signifikant zu werden (Abbildung 5). Außerdem zeigt sich, dass für kleiner werdende Integrationszeiten der angenommene Wert des Messbereichsanpassfaktors oder die angenommene Integrationszeit von den tatsächlichen Werten abweicht (Abbildung 3). Der Anstieg der Nichtlinearitätskurven, ausgehend vom Sättigungsgrad 100%, auf circa 2% bis 4% ist sättigungsgradabhängig da er bei beiden Methoden gleich ist. Bei kleiner werdenden Integrationszeiten, tritt zunehmend das Problem auf, dass die Integrationszeiten nicht mehr stabil genug realisiert werden und für kleine Leuchtdichten, das SNR zu schlecht wird (Abbildung 3).

Für die mittleren Messreihen stimmen beide Methoden innerhalb der Messunsicherheiten überein, da die Integrationszeitverhältnisse durch die Firmware gut realisiert wurden. Für andere Systeme kann dies jedoch anders aussehen.

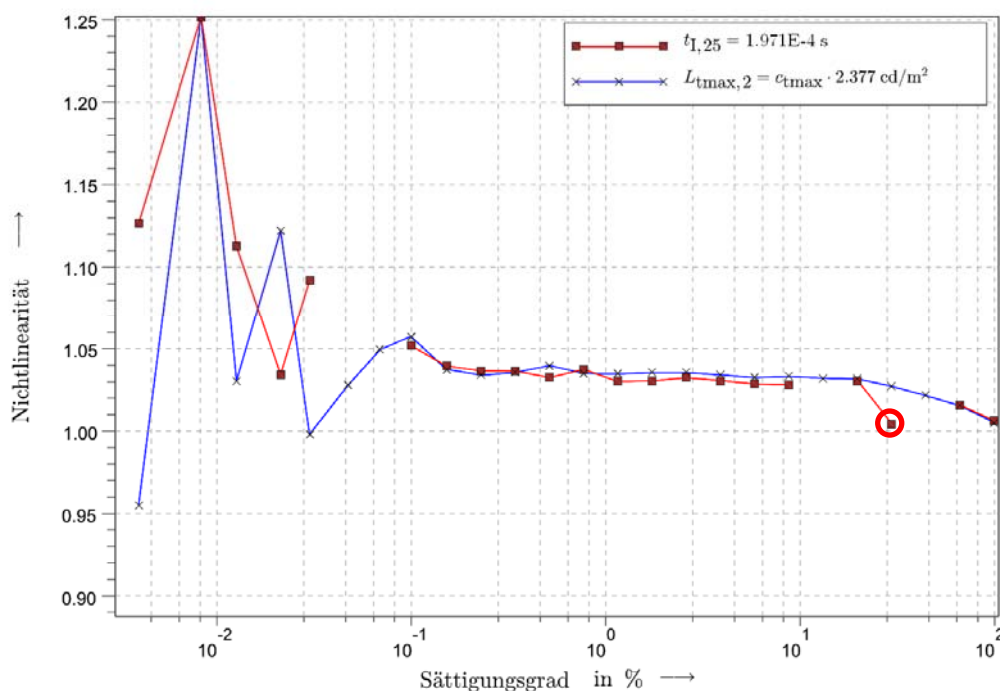


Abbildung 5: Vergleich Integrationszeitmethode (blaue Kurve) und Leuchtdichtemethode (rote Kurve) für ungleiche Integrationszeiten als Funktion der Sättigung. Die zur Berechnung der Ausgangsgröße notwendige Integrationszeit (Messbereichsumschaltfaktor) ist scheinbar ungenau (rote Kreismarkierung). Bei der Integrationszeitmethode befindet sich diese Integrationszeit in diesem Diagramm bei einem Sättigungsgrad zwischen 0,01% und 0,1%

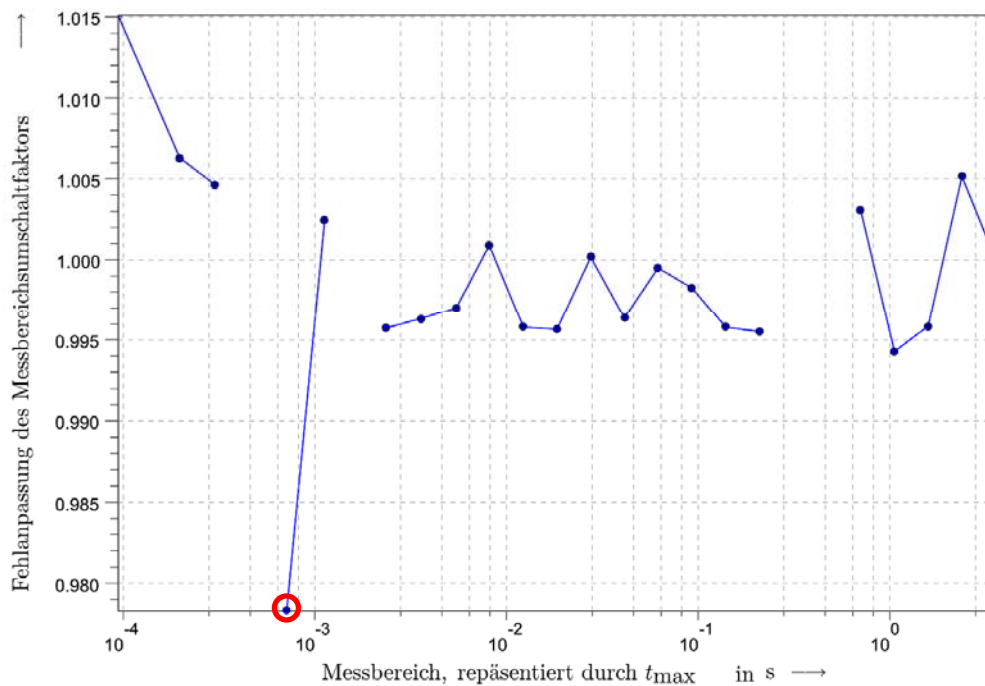


Abbildung 6: Messbereichsanpassung am Messbereichsendwert. Zwei Messreihen wurden wegen ungenügender Stabilität der Quelle verworfen (fehlende Messwerte). Die Abweichung des markierten Wertes (siehe auch Abbildung 5) hat seine Ursache offensichtlich in dem ungenauen Wert des Messbereichsfaktors (Integrationszeit), welcher zur Bestimmung des Ausgangssignals (Grauwert/Integrationszeit) notwendig ist.

Bei 100% Sättigung sollten alle Messbereiche bei optimaler Messbereichsanpassung linear zueinander sein. Abbildung 6 zeigt die gemessene Fehlpassung (Abweichung vom Messbereichsumschaltfaktor in Bezug auf die Änderung der Eingangsgröße, Anwendungsfall 2).

Im gezeigten Fall liegt es auch bei noch nicht erfolgter Korrektur der Messbereichsumschaltfehler relativ niedrig ($<1\%$). Da diese Messwerte bei nahezu gleichem Sättigungsgrad entstanden, lässt sich folgern, dass HDR-Bilder durch sättigungsgradabhängige Nichtlinearitäten nur wenig beeinflusst werden.

Angemerkt sei hier, dass bei ILMDs die Integrationszeit nur eine der Möglichkeiten darstellt, den Messbereich zu wechseln. Eine andere Möglichkeit besteht z.B. in der Variation der Blendeneinstellung, die hier jedoch nicht betrachtet wird.

3 Verfahren zur Variation Eingangsgröße (Leuchtdichtemethode)

Zur Messung der Nichtlinearität muss die Bezugsgröße bekannt sein oder gemessen werden. Dies kann mittels einer bekannten relativen Änderung der Eingangsgröße oder durch einen Vergleich mit einem linearen Referenzempfänger geschehen. Dabei wird die Änderung des ILMD-Signals auf die Änderung des Vergleichsempfängers (Referenzempfängers) bezogen. Bei polychromatischem Licht muss der Referenzempfänger die gleiche spektrale Empfindlichkeit wie die Messkamera besitzen, da sich bei einer Änderung der (i. A. polychromatischen) Leuchtdichte die spektrale Verteilung der angebotenen Strahlung verändern kann. Im Falle ungleicher spektraler

Empfindlichkeiten wäre ein resultierendes ungleiches Verhältnis der Ausgangsgrößen beider Detektoren sonst nicht von einer Nichtlinearität zu unterscheiden. Wird monochromatisches Licht verwendet und bleibt die Wellenlänge konstant, ist eine Anpassung des Referenzempfängers nicht notwendig. Anderenfalls geht die Abweichung der ungleichen Anpassung mit der Änderung der Strahlungsfunktion direkt als Fehler bei der Bestimmung der Nichtlinearität ein.

3.1 Variation der Leuchtdichte

Seit einigen Jahren existieren einstellbare Leuchtdichtequellen, welche planckähnliche Strahlung anbieten, lambert-förmig abstrahlen und sehr hohe Leuchtdichten (z.B. 70000cd/m^2 geeignet für kleine Integrationszeiten) zur Verfügung stellen können.

Als Beispiel wird ein Gerät vorgestellt, bei dem das Licht einer Lampe über eine einstellbare Blende in eine Ulbricht-Kugel eingekoppelt wird (Abbildung 7). Die Betriebsbedingungen der Lampe ändern sich nicht. Instabilitäten der Lampe werden im Prinzip über einen Monitordetektor erfasst und korrigiert.

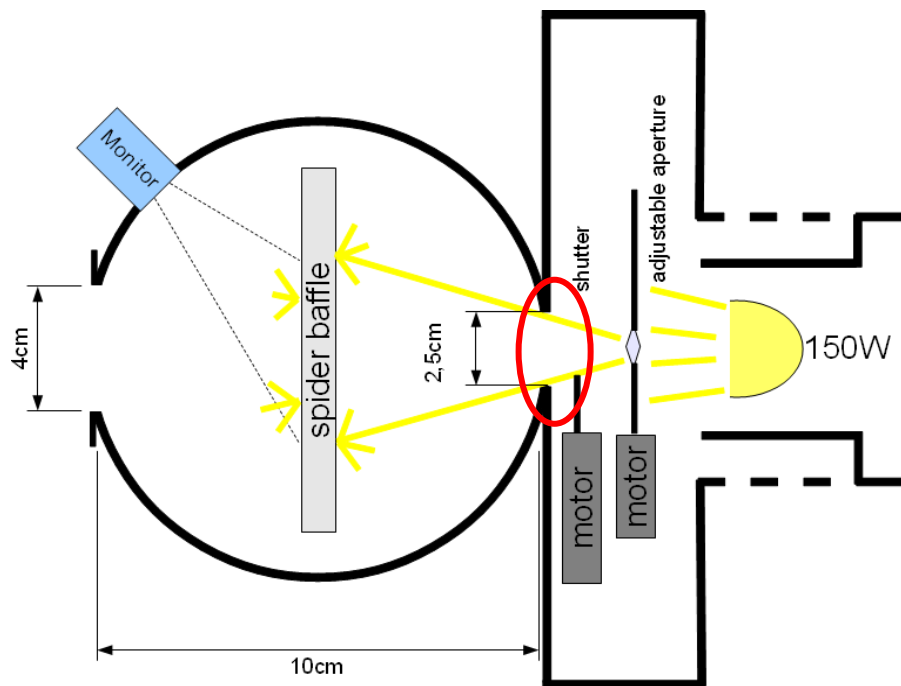


Abbildung 7: Beispielaufbau einer variablen Leuchtdichtequelle, links die Ulbricht-Kugel mit Austrittsöffnung, rechts das Lampengehäuse; rot umrahmt ist der „Shutter“ als Ursache für eine spektral veränderte Rückreflexion: (schwarz eloxierte) spektral nicht unselektiv reflektierende Blende.

Trotzdem zeigt sich das Spektrum am Austrittsport der Kugel als nicht unabhängig von der eingestellten Leuchtdichte. Der wesentliche Grund hierfür ist ein sich ändernder spektraler Kugelfaktor durch den sich öffnenden und schließenden „Shutter“ zur Einstellung der Leuchtdichte.

Abbildung 8 zeigt die relative Änderung des Spektrums bei unterschiedlichen Leuchtdichten, respektive Blendenöffnungen der oben beschriebenen Anordnung. Schon bei Verhältnissen von 1:40 verliert die Strahlung bei Wellenlängen kleiner als 650 nm mindestens 8% an Leistung. Die Messung des Strahldichtefaktors der variablen Blende (Abbildung 9) zeigt das gleiche Verhalten, so dass davon ausgegangen werden kann,

dass die Rückreflexionen an der variablen Blende für die spektrale Veränderung verantwortlich ist.

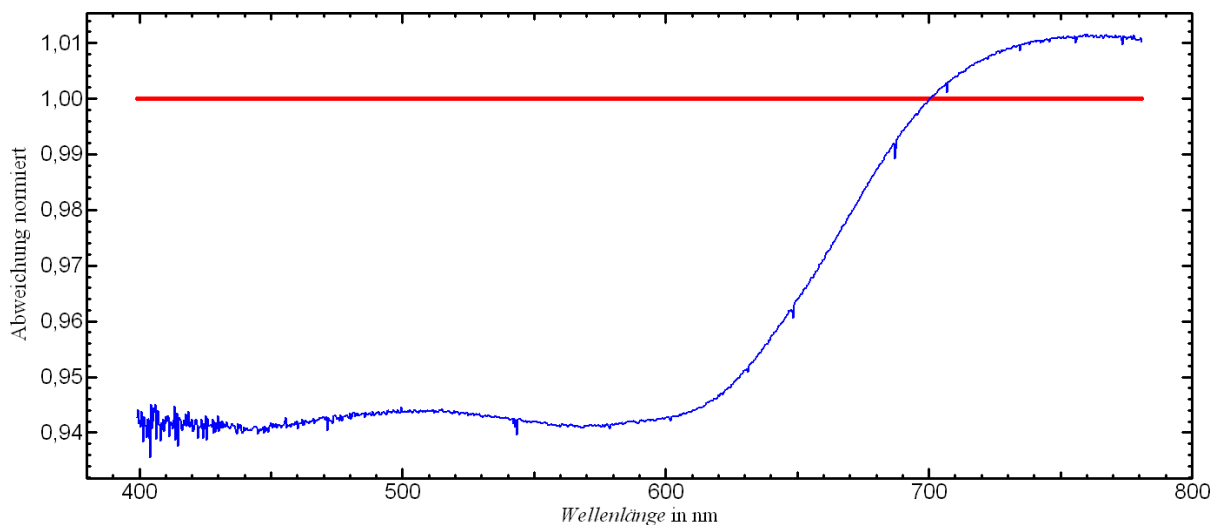


Abbildung 8: Relative Änderung der Strahlungsfunktion der Leuchtdichtequelle, die rote Linie entspricht einer offenen Blende, die blaue Kurve zeigt die spektrale Änderung bei 1/40 der maximalen Leuchtdichte

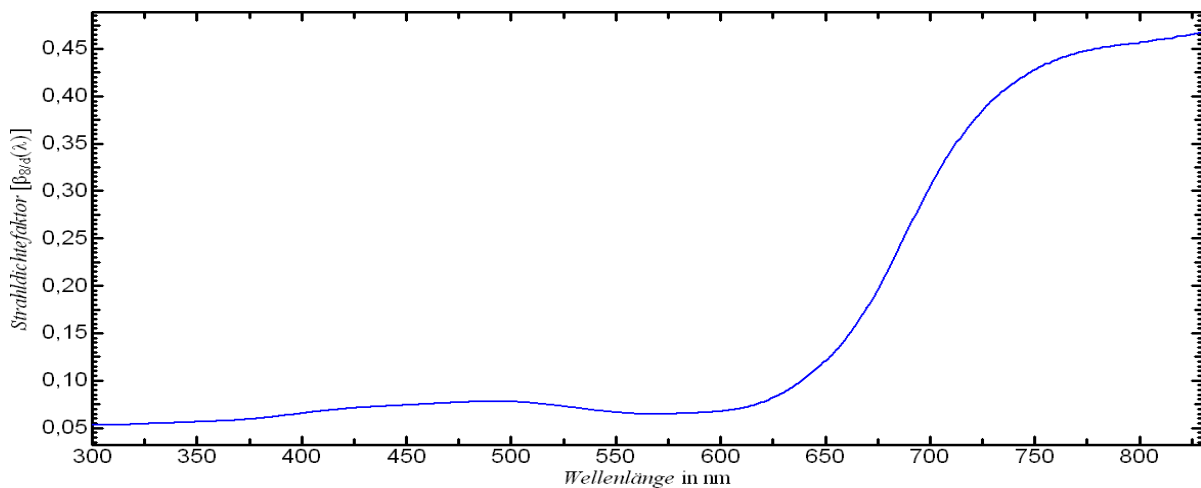


Abbildung 9: Strahldichtefaktor der variablen Blende der einstellbaren Leuchtdichtequelle

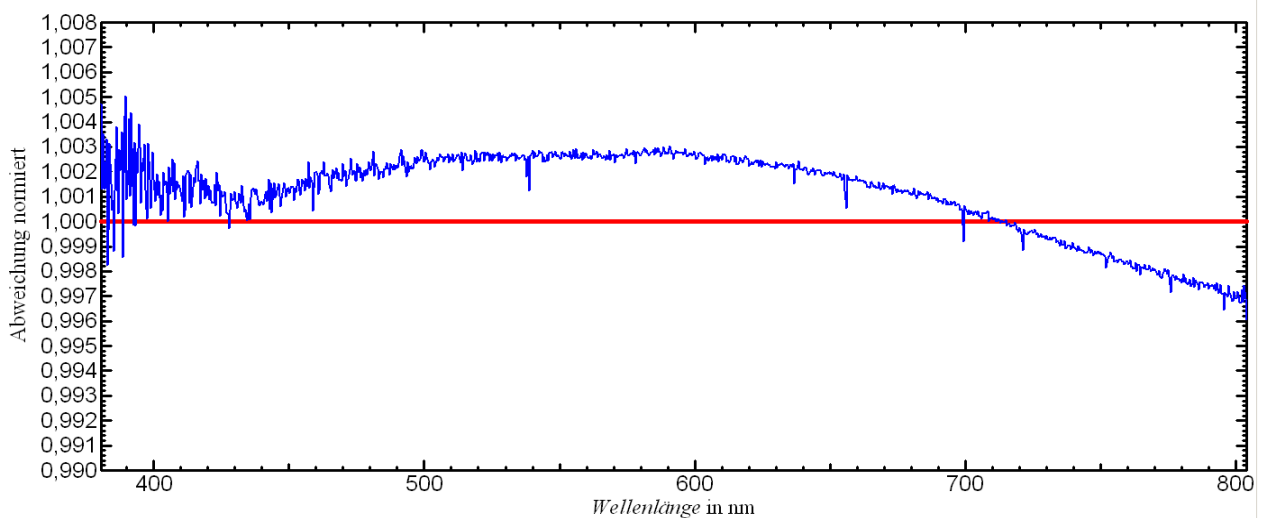


Abbildung 10: Die Änderung der Strahlungsfunktion liegt nach Behandlung der Blende unter 0,3% bei einer Leuchtdichteänderung von 1:40

Gegenüber dem Originalaufbau lässt sich bei geeigneter Wahl des Blendenmaterials das in Abbildung 8 gezeigte Verhalten zwar deutlich (zumindest temporär) verbessern (siehe Abbildung 10), jedoch ist bei dem beschriebenen Gerätetyp die thermische Belastung und die Strahlungsbelastung der Blende derart groß, dass sich alle untersuchten Blendenbeschichtungen mit der Zeit bezüglich ihres Strahldichtefaktors spektral veränderten.

4 Zusammenfassung:

Es konnte gezeigt werden, dass bei bekannten Messbereichsumschaltfaktoren die Integrationszeitmethode im Rahmen der Messunsicherheit die gleichen Ergebnisse wie die Leuchtdichtemethode liefern kann. Voraussetzung ist, dass die Messbereiche gut genug aneinander angepasst sind.

In diesem Fall ist die Integrationszeitmethode für den Anwender einfacher durchzuführen und liefert bei stabilen Integrationszeiten auch eine bessere Reproduzierbarkeit.

Abweichungen zur physikalisch sinnvoller Leuchtdichtemethode treten insbesondere bei geringen Integrationszeiten auf.

Weiterhin wurde gezeigt, dass bei den oft verwendeten einstellbaren Leuchtdichtequellen auf die zeitliche Stabilität und auf die Stabilität der Strahlungsfunktion als Funktion der Leuchtdichte geachtet werden muss. Die Verwendung von in der Wellenlänge durchstimmbarer monochromatischer Laserstrahlung ist hier zwar deutlich aufwendiger aber weniger durch systematische und schwer abschätzbare Messunsicherheiten beeinflusst.

5 Quellenverzeichnis

- | | |
|-----------------|--|
| [CIE 69, 1987] | Internationale Beleuchtungskommission, Methoden zur Charakterisierung von Beleuchtungsmesser und Leuchtdichtemesser von 1987, wird abgelöst |
| [CIESym2008] | Tagungsband, CIE Symposium 2008, TC2-59, Turin |
| [DIN 5032-6] | Deutsche Industrienorm, Lichtmessung - Photometer, Begriffe, Eigenschaften und deren Kennzeichnung |
| [DIN EN13032-1] | Deutsche Industrienorm, Licht und Beleuchtung Messung und Darstellung photometrischer Daten von Lampen und Leuchten Teil 1: Messung und Datenformat;Deutsche Fassung EN 13032-1:2004 |
| [PhoSem2008] | Vortragsunterlagen, Photometrie-Seminar der PTB, 2008 |
| [TTNL2008] | Bericht zur Bewertung der Nichtlinearität-V2.doc/28.02.2008, TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH |
| [TULIP] | Messplatz „Tuneable Lasers in Photometry“ (TuLiP) der Abteilung Optik der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt |