

Bildauflösende Leuchtdichte- und Farbmessstechnik für LEDs und LED-Applikationen

Udo Krüger, Franz Schmidt

1 Zusammenfassung

Für die Messung und Bewertung von LED sind Regeln und Vorschriften vorhanden, die Messverfahren und Messmittel für die Ermittlung einer Vielzahl von wichtigen Parametern an LED vorgeben [1], [2], [3]. National und international wird daran gearbeitet, diese Messverfahren weiter zu standardisieren (siehe auch Vorträge von Herrn Lindner und Herrn Steudtner).

Alle diese Messverfahren betrachten die LED als Punktquelle.

Die LED selbst, aber erst recht auch die damit realisierten Systeme (Anzeigen, Leuchten, Scheinwerfer) sind örtlich ausgedehnte, leuchtende Objekte. Dafür ist Messtechnik erforderlich, die lichttechnische Parameter in Abhängigkeit vom Ort, d.h. Leuchtdichteverteilungen bzw. Leuchtdichtebilder $L(x, y)$ und in Abhängigkeit von den Ausstrahlrichtungen $L(x, y, \vartheta, \varphi)$ erfassen kann.

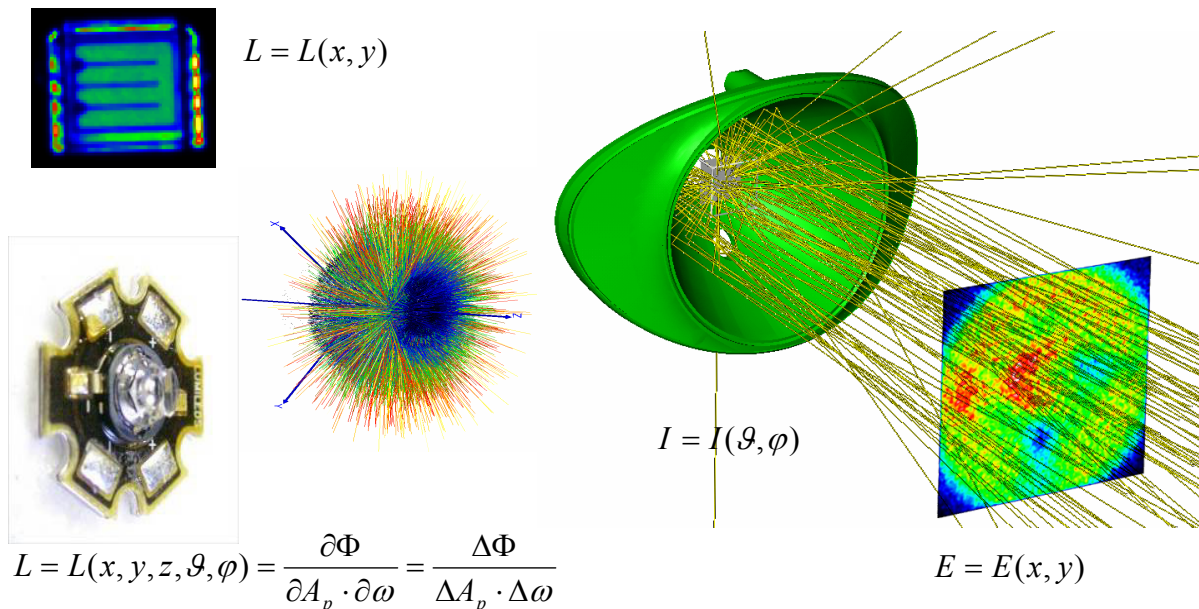


Abb. 1: LED mit ihrer Ausstrahlcharakteristik (Strahlendaten) sowie im Einsatz in einer Applikation

Für die Beschreibung von LED sowie von lichttechnischen Baugruppen mit LED sind die Parameter Leuchtdichte, Lichtstärke, Beleuchtungsstärke und Lichtstrom sowie abgeleitete Größen (z.B. Verhältnisse wie der Wirkungsgrad) wichtig und damit auch zu messen.

So werden im Kfz heute Baugruppen von vielen unterschiedlichen Herstellern eingesetzt (Kombiinstrumente, Klimaregelung, Autoradio, Navigationssystem, usw.). Sowohl für die Entwicklung als auch die Produktion von Systemen oder Baugruppen sind Leuchtdichten und Kontraste sowie die Farbwerte in engen Grenzen zu halten. Zwischen den Herstellern und den Automobilbauern sind zur Sicherung einer ausreichenden Qualität ständig Messwerte auszutauschen. In diesem Bereich haben sich bildauflösende Leuchtdichte- und Farbmesskameras (LMK) etabliert. Der Einsatz solcher Leuchtdichtemesskameras in Nahfeldgoniophotometern erlaubt die Messung von Strahlungsfeldern (Leuchtdichteverteilungen) und damit die vollständige Beschreibung von LED bzw. LED-Baugruppen und stellt Daten (Ray-files) für die Simulation zur Verfügung.

Die Messung von lichttechnischen Größen mit bildauflösenden Leuchtdichte- oder Farbmessgeräten erfordert entsprechende Kenntnisse über die Funktionsweise sowie über die Möglichkeiten und Grenzen der Messgeräte. Deshalb erfolgt in diesem Artikel vor der Erläuterung von Messaufgaben an LED und ihrer Umsetzung eine ausführliche Beschreibung der Messtechnik.

2 Bildauflösende Leuchtdichte- und Farbmessstechnik [4]

Bildauflösende Leuchtdichtemesser liefern mit einer Messung eine Vielzahl von Leuchtdichtewerten. Die Verwendung dieser Messwerte erfordert zwingend den Einsatz von Rechentechnik, sowohl zur Aufbereitung (Korrektur von Abweichungen vom idealen Verhalten) als auch zur Auswertung.

Im Gegensatz zu punktwise messenden Leuchtdichtemessern ist bei bildauflösenden Leuchtdichtemessern die Software zur Verrechnung der Kamerabildsignale zu Leuchtdichtebildern Bestandteil des Messgerätes.

2.1 Grundlagen

Werden in einem Leuchtdichtemesser entsprechend DIN 5032 Teil 7 qualifizierte, strukturierte Sensoren eingesetzt, können mit einer Messung eine Vielzahl von Leuchtdichten (ca. $n \cdot 10^6$ Messwerte), d.h. Leuchtdichteverteilungen/Leuchtdichtebilder gemessen werden.

Für den Einsatz als Leuchtdichtemesser werden bevorzugt Interline-Transfer-CCD-Sensoren mit Progressiv-Scan-Auslesemode eingesetzt. Diese Interline-Transfer-CCD-Sensoren wandeln die, während der (durch das Taktregime vorgegeben) Integrationszeit in die Pixel einfallenden, Photonen in Elektronen. Mit Ende der Integrationszeit werden diese eingesammelten Elektronen gleichzeitig in lichtabgedeckte Schieberegister transferiert und in diesen dann zu einem gemeinsamen Ausgangsverstärker (Ladungsspannungswandler) geschoben (Abb. 2).

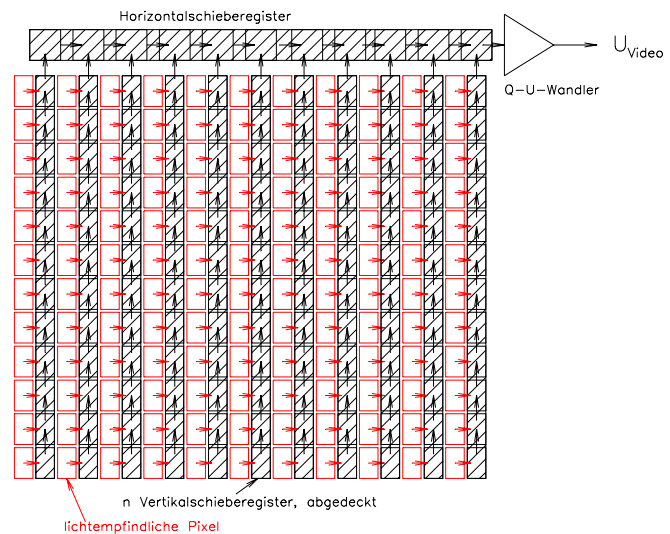


Abb. 2: CCD- Interline-Transfer Matrix

Bildauflösende Leuchtdichtemesser setzen i. d. R. auf hochwertigen CCD-Digitalkameras auf, von denen jede einzelne entsprechend aufwendig analysiert, kalibriert und an die Lichtmessung angepasst wird. Die Signalwerte im Bild lassen sich dann direkt in Leuchtdichtewerte umrechnen.

Die Signalgenerierung und –wandlungen sowie die verschiedenen Störeinflüsse in einer CCD-Kamera lassen sich in der folgenden Grundstruktur zusammenfassen (Abb. 3),

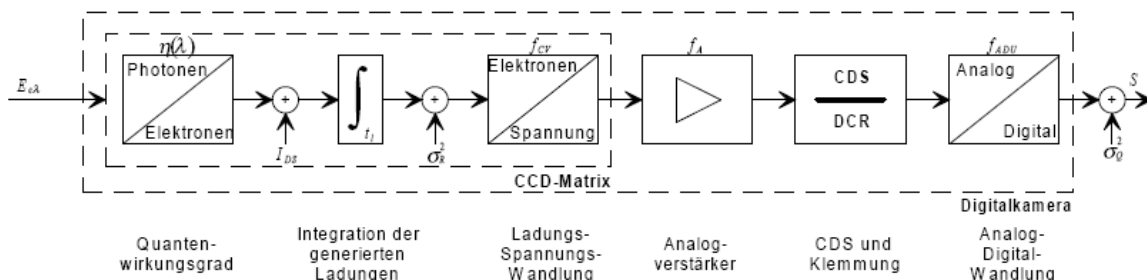


Abb. 3: Signalfluss in einer CCD-Kamera

Leuchtdichtemesskameras besitzen wie alle technischen Geräte von idealen Modellen abweichende Eigenschaften. Diese Abweichungen lassen sich in systematische und stochastische Komponenten einteilen. Abweichungen der Messwerte vom idealen Verhalten, die determiniert sind, von weiteren Parametern abhängen und immer in der gleichen Art auftreten, werden als systematische Abweichungen bezeichnet. Sie können erfasst und in Abhängigkeit von den Parametern korrigiert werden. Damit bleiben nur noch Restfehler.

Die systematischen Restabweichungen nach der Korrektur werden in ihrer Größe durch die **technologischen Voraussetzungen**, die **vorhandenen Normale** und die **Sorgfalt** beim Einmessen bestimmt. Als stochastische Komponenten existieren signalabhängiges und signalunabhängiges Rauschen.

Zur Beurteilung von bildauflösenden Leuchtdichtemessern ist also jeweils das Gesamtsystem Leuchtdichtemesskamera und Datenauswertesoftware zu bewerten.

Bildaufösende Leuchtdichtemesskameras (Leuchtdichteanalysator [1]) realisieren eine Abbildung des Objektraumes in eine Bildfeldebene und damit auch die Abbildung von Richtungen im Raum auf Orte in der Bildfeldebene entsprechend Abb. 4.

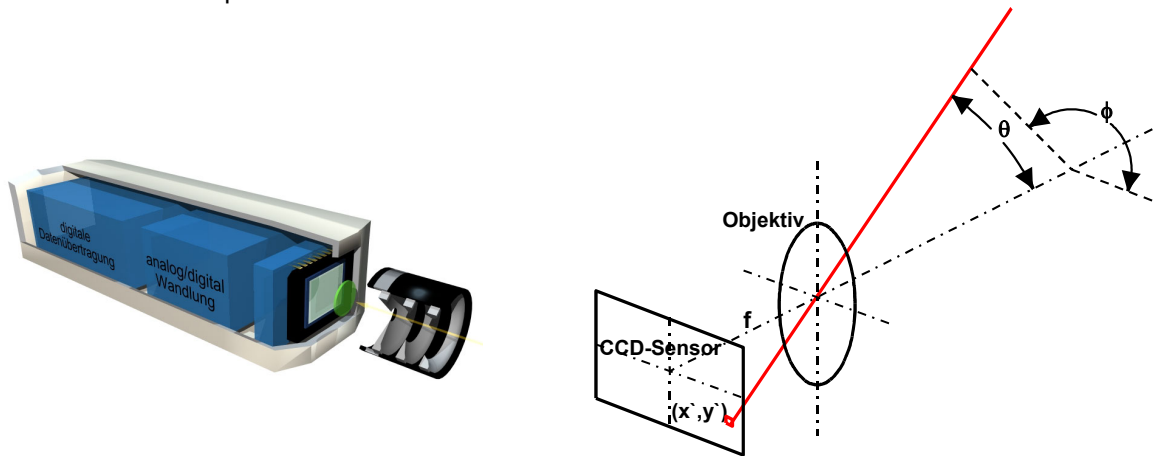


Abb. 4: Zusammenhänge der geometrischen Abbildung

Für verzeichnungsarme Objektive kann jedem Leuchtdichtemesselement (Pixel im Leuchtdichtebild) ein Raumwinkelinkrement zugeordnet werden.

$$\Delta\Omega_{Pixel\,i,j} = \Omega_0 \cdot \frac{\Delta x_{Pixel} \cdot \Delta y_{Pixel}}{f^2} \cdot \cos^3 \theta = k \cdot \cos^3 \theta$$

$$\cos \theta = \frac{\sqrt{((i-i_0)\Delta x)^2 + ((j-j_0)\Delta y)^2}}{f} = \frac{\sqrt{((i-i_0)k_1)^2 + ((j-j_0)k_2)^2}}{f}$$

Gleichung 1

$i_0, j_0 = \text{Mittelpunkt}$

2.2 Eigenschaften bildauflösender Leuchtdichtemesser

Bei bildauflösenden Leuchtdichtemessern kommen gegenüber punktwise messenden Leuchtdichtemessern wichtige Eigenschaften dazu, die die Orts- oder Winkelabhängigkeit von Parametern beschreiben.

2.2.1 Eigenschaften des Dunkelsignals

Neben der Generation von Ladungen durch den photoelektrischen Effekt werden thermisch Ladungen generiert. Das sich daraus ergebende Signal wird als Dunkelsignal bezeichnet. Dieses Signal beschränkt die Kapazität der Pixel für die durch Photonen generierten Ladungen und besitzt eine dem Signal proportionale Rauschkomponente.

Das Dunkelsignal hängt sehr stark von der Temperatur ab (Verdopplung des Dunkelsignals alle 6-8°K) Abb. 5. Deshalb wird in zahlreichen Applikationen die CCD-Matrix gekühlt.

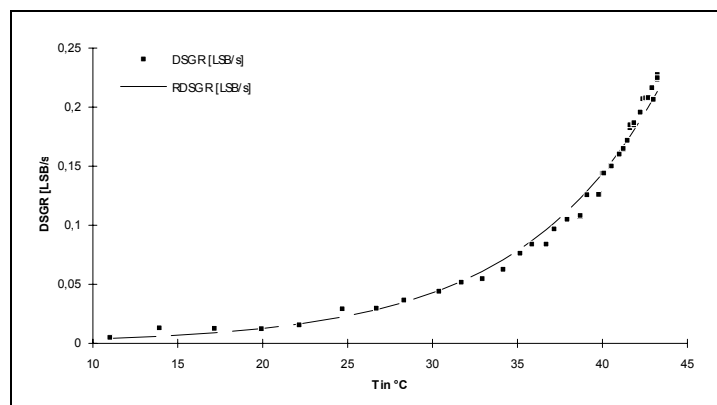


Abb. 5: Dunkelsignalsgenerationsrate als Funktion der Temperatur

Bei modernen CCD-Matrizen) beträgt die Dunkelsignalgenerationsrate bei 35 .. 40 °C jedoch nur ca. 5 e-/s im Vergleich zur Vollaussteuerung von ca. 30.000 ... 45.000 e-. Selbst bei höheren Integrationszeiten bis zu mehreren Minuten kann bei den niedrigen thermischen Ladungsgenerationsraten auf eine Kühlung verzichtet werden, die Signalkapazität bleibt ausreichend. Wesentlich ist aber, dass das Dunkelsignal und damit der „Nullpunkt“ des Leuchtdichtemessers temperaturabhängig ist. Da aber eine Vielzahl von weiteren Parametern ebenfalls den „Nullpunkt“ des Messgerätes bestimmen (Offset der Verstärker, untere Referenzspannung des ADU u. a.), muss entweder die komplette Kamera gekühlt oder wenigstens thermisch stabil gehalten werden **oder es wird für jede Messung der „Nullpunkt“ aus den Messdaten selbst bestimmt** und die Messwerte darauf bezogen. Eine Möglichkeit ist, vor jeder Messung ein Dunkelreferenzbild zu erfassen.

Die notwendigen Informationen über das Dunkelsignal im aktuellen Bild lassen sich bei geeigneter Schaltungstechnik und Datenauswertung aber auch aus abgedeckten Pixeln auf der CCD-Matrix ermitteln. Das zu subtrahierende Dunkelsignalbild kann dann durch einen pixelabhängigen stabilen Anteil (Dunkelsignalungleichförmigkeit DSNU) und einen aktuellen Offset (Dunkelsignalreferenz - aktuell in jedem Bild bestimmbar) realisiert werden.

Diese Dunkelsignalreferenz kann aus dem Mittelwert einer abgedeckten Spalte (Abb. 6) gewonnen werden.

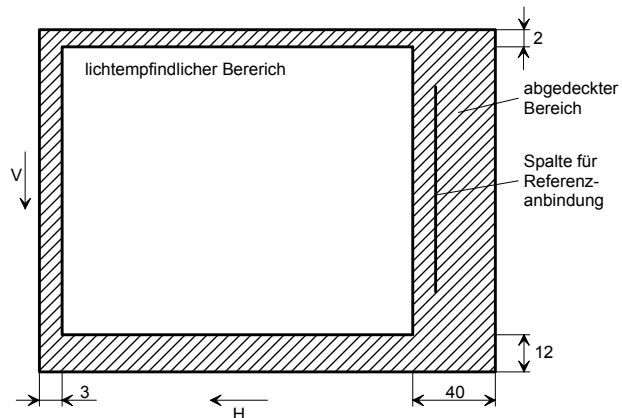


Abb. 6: Pixelanordnung auf einer Matrix

2.2.1.1 Defektpixelbild

CCD-Matrix-Sensoren bestehen i.d.R. aus einer bis mehreren Millionen Pixeln. Da diese Pixel aus photometrischer Sicht (Empfindlichkeit bei endlichen Integrationszeiten) nicht „beliebig klein“ gemacht werden können (ca. $n \mu\text{m} \times n \mu\text{m}$) benötigen die CCD-Sensoren große Siliziumflächen (.... 100 mm²). Auf diesen Sensoren ist deshalb immer mit abweichenden Strukturen zu rechnen. CCD-Matrizen mit direkten Pixel- oder Spaltenausfällen sind heute extrem selten geworden und können aussortiert werden. Strukturfehler im Silizium (Gitterversatz o.ä.) führen aber zu teilweise abweichendem Verhalten bei der Dunkelsignalgeneration. Diese Pixel, die ein stark erhöhtes Dunkelsignal bei längeren Integrationszeiten oder auch bei höheren Temperaturen aufweisen, werden Defektpixel genannt.

Diese Bildpunkte werden bei den Umrechnungen in Leuchtdichtemesswerte nicht verwendet. Für die Standardmatrizen von Sony werden ca. 0,3 bis 0,6 % der Bildpunkte als Defektpixel markiert.

Das Dunkelsignal hat weiterhin einen ortsfesten Signalanteil, die Dunkelsignalungleichförmigkeit (DSNU). Die DSNU kann erfasst und korrigiert werden.

2.2.2 CCD-Hellsignaleigenschaften

2.2.2.1 Hellsignalungleichförmigkeit (PRNU)

Die PRNU ist ein Maß für die unterschiedliche Empfindlichkeit der Pixel einer Matrix. In die PRNU kann die örtliche Streuung der einzelnen Pixel und das Shading (Vignettierung des Objektivs) einbezogen werden.

Bei der Bestimmung der PRNU muss eine Beleuchtungsanordnung zu Verfügung stehen, die eine sehr gleichmäßige Ausleuchtung des Sensors garantiert.

2.2.2.2 Smear

Interline-Transfer-Matrizen besitzen für den Ladungstransport abgedeckte Transportregister. Nach einer Integrationszeit werden die generierten Ladungen in die Transportregister verschoben und dort zum Ausgang transportiert. Abweichend vom Idealmodell können durch das auffallende Licht auch hier Ladungsträger generiert werden (Transmission der Abdeckung $\neq 0$, schräg einfallende Lichtstrahlen). Die in den lichtempfindlichen Pixeln während der Integrationszeit generierten Ladungspakete werden beim Transport durch Gebiete, wo Licht auf die Schieberegister fällt, „verschmiert“. Die Generationsrate in den Schieberegistern ist etwa um den Faktor 20000 kleiner als in den lichtempfindlichen Pixeln. Besonders bei kleinen Integrationszeiten ($< 250 \mu\text{s}$) und großem Dynamikumfang in der örtlichen Verteilung führt der Effekt zu Fehlern und ist zu beachten und gegebenenfalls zu korrigieren. Die Smearladung selbst ist nur von der

Transportzeit und nicht von der Integrationszeit abhängig. Bei kleinen Integrationszeiten ist aber das Verhältnis von Auslesezeit/Integrationszeit sehr groß, sodass die Auswirkungen im Bild relativ gesehen mit kleiner werdenden Integrationszeiten größer werden.

$$SMEAR = V_{SM} \cdot \frac{t_{Auslesen}}{t_{Belichten}}$$

Gleichung 2

mit:

V_{Bild} vertikaler Smear-Faktor (für Interline Transfermatrizen typisch 1/20000)

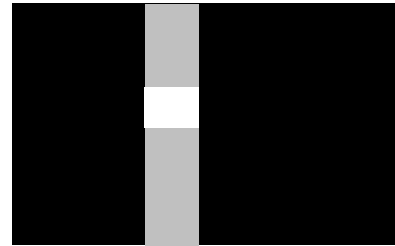


Abb. 7: Smear-Erscheinung bei hohen Übersteuerungen

2.2.2.3 Übersteuerung, Blooming

CCD-Matrizen haben eine endliche Aufnahmefähigkeit für Ladungsträger (Full Well Kapazität ca. 30.000 ... 45.000 bei Standardmatrizen). Dies bedeutet, dass die Empfindlichkeitskennlinie ab einer bestimmten Beleuchtungsstärke Sättigungscharakter hat. Bei sehr starker Übersteuerung können die generierten Ladungen in benachbarte Pixel „überlaufen“ (Blooming). Moderne CCD-Matrizen haben vielfältige Schaltdetails (z.B. Anit Blooming Gates) zum Abfangen der überschüssigen Elektronen, sodass Bloomingeffekte erst bei sehr hohen Übersteuerungen und lokal begrenzt auftreten. Diese „Bloomingfestigkeit“ ist allerdings sehr stark herstellerabhängig. Die Auswirkungen von Blooming in Bildern lassen sich für messtechnische Zwecke nicht korrigieren. Blooming muss in der Messtechnik also verhindert werden!

2.2.2.4 Nichtlinearität

Die mögliche fotometrische Genauigkeit wird wesentlich durch die Nichtlinearität der gesamten Anordnung (CCD, Kameraelektronik, A/D-Wandlung) bestimmt. Die CCD-Matrix ist auf Grund ihres Funktionsprinzips ein lineares Bauelement. Durch geeignete Auslegung der weiteren Komponenten kann eine nahezu lineare Übertragungskennlinie erreicht werden. Für fotometrische Anwendungen sind die Restabweichungen von der Linearität zu bestimmen und zu korrigieren.

2.2.2.5 Kameraelektronik

Die Ladungsträgerpakete werden auf der CCD-Matrix in einem on-Chip-Verstärker in eine Spannung umgesetzt, die über mehrere Stufen einer analogen Elektronik geführt (weitere Verstärkung, Sample&Hold, Klemmung) und mittels Analog-Digital-Wandler in maschinenlesbare Signale umgesetzt wird. Die eingesetzte Analogelektronik ist in Bezug auf geringes Rauschen, definiertes thermisches Verhalten und stabile Spannungen (Arbeitspunkte, Referenzspannungen) zu optimieren. Die Abweichungen vom idealen Verhalten (Nichtlinearität, Offset, Drift) mit ihren Einflussgrößen (Temperatur) müssen erfasst und korrigiert werden.

2.2.2.6 Messbereiche - Integrationszeiten

Die Signalladungen sind direkt der Integrationszeit proportional (solange keine Sättigung auftritt). Für die Ermittlung der Leuchtdichten, die zu diesen Signalladungen geführt haben, sind diese Integrationszeiten wesentlich.

Über die Steuerung der Integrationszeiten kann in weiten Grenzen eine Messbereichseinstellung erfolgen. Die Integrationszeiten werden vom Taktregime vorgegeben. Dieses Taktregime ist heute ausschließlich quartzgesteuert und damit hinreichend stabil. Wichtig ist aber die genaue Kenntnis der Integrationszeiten, die u.U. deutlich von den eingestellten oder vom Kamerahersteller angegebenen abweichen können. Für den Einsatz von CCD-Matrizen im Bereich der Leuchtdichtemesstechnik sind Integrationszeiten von maximal 10 s oft ausreichend. Damit sind Leuchtdichten von ca. 0,2 cd/m² bei Vollaussteuerung der Matrix messbar. Für Sonderanwendungen kann durch Binning (Zusammenfassung von Signalelektronen aus mehreren Pixeln zu einem Signalwert) sowie durch Erhöhung der Verstärkung der Analogelektronik die Empfindlichkeit nochmals gesteigert werden. Damit sind dann Leuchtdichten bis zu 0,001 cd/m² noch sicher zu messen.

2.3 Spektrale Anpassung von bildauflösenden Sensoren

Die CCD-Matrix als strahlungsempfindlicher Sensor wandelt die einfallenden Strahlstromanteile in Signalladungen entsprechend ihrer spektralen Empfindlichkeit $S(\lambda)$. Soll das System photometrisch, d.h.

Leuchtdichten, messen, muss die spektrale Empfindlichkeit des Gesamtsystems $V(\lambda)$ sein. Dazu wird für jede Kamera ein Vollfilter $F(\lambda)$ eingesetzt, das mit der spektralen Empfindlichkeit der jeweiligen CCD-Matrix und der spektralen Durchlässigkeit des Objektivs insgesamt die normgerechte Empfindlichkeit des menschlichen Auges $V(\lambda)$ ergibt (siehe **Abb. 10**). Die spektralen Empfindlichkeiten $s(\lambda)$ der CCD-Matrizen müssen für jedes Exemplar gemessen werden, da selbst Exemplare einer Charge stark streuen können (siehe **Abb. 8** und **Abb. 9**). Die Ortsabhängigkeit auf dem CCD-Chip selbst ist verschwindend, die Abhängigkeit der spektralen Empfindlichkeit vom Einfallswinkel der Lichtstrahlen (bildseitige Feldwinkel der eingesetzten Objektive) ist zu prüfen und gegebenenfalls beim Filterdesign zu berücksichtigen.

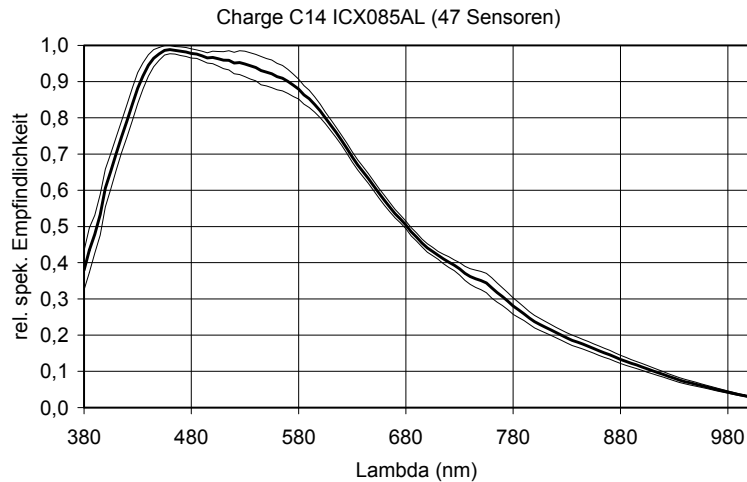


Abb. 8: Relative spektrale Empfindlichkeit mit Variationsbreite (Sigma) einer Charge von 47 SW-Sensoren des Typs Sony ICX085AL

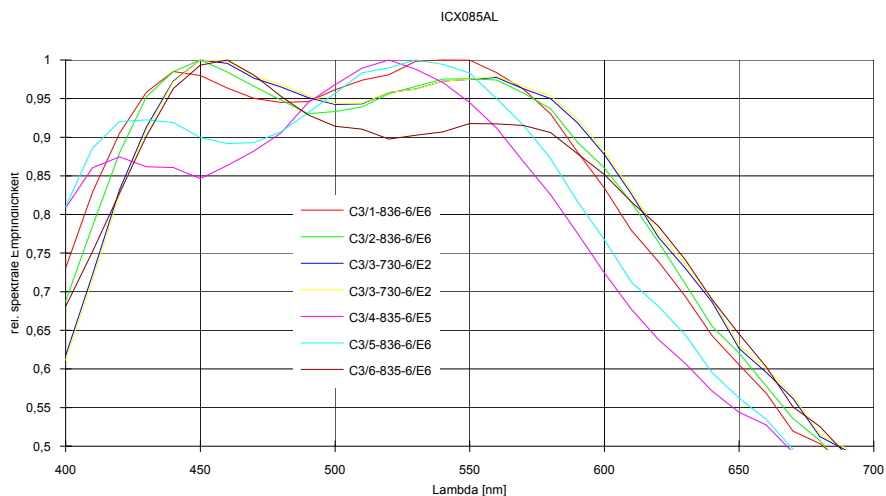


Abb. 9: Spektrale Empfindlichkeiten unterschiedlicher Exemplare von CCD-Matrizen eines Typs

Die spektralen Transmissionen der eingesetzten Objektive sind i.d.R. typabhängig, sodass die spektralen Transmissionen eines Typs bestimmt werden müssen. Da aber die Objektivhersteller gegebenenfalls die Antireflexbeschichtungen ändern, ohne dies mitzuteilen, können auch hier Überraschungen auftreten. Stichprobenmessungen sind also auch hier wichtig.

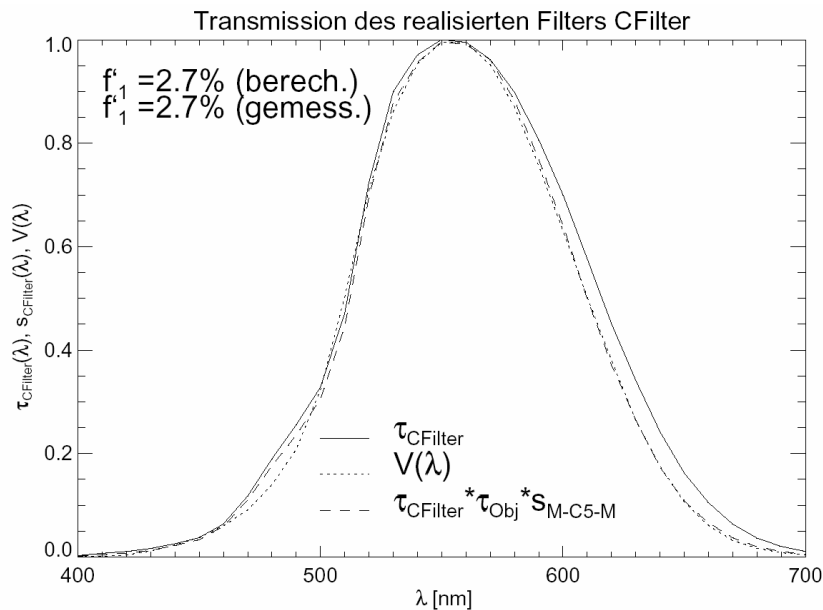


Abb. 10: $V(\lambda)$ -Anpassung

Ist die gewünschte spektrale Transmissionskurve des notwendigen Filters ermittelt, kann eine Optimierung der Gläser und ihrer Dicken erfolgen, um ein optimales Filter zu berechnen. Die Fertigung erfordert hohe Sorgfalt bei der Realisierung der vorgegebenen Dicken. Voraussetzung für eine Filteroptimierung ist die genaue Kenntnis der Eigenschaften der einzusetzenden Farbgeläser.

2.4 Auflösung und Dynamik

Wesentlich für ein Messgerät sind die Datenauflösung und der erreichbare Dynamikumfang. Bei Einzelaufnahmen wird die Auflösung durch die Datenbreite des AD-Wandlers und das Rauschen der Signale bestimmt. Die Messwertauflösung kann durch Mittelwertbildung über benachbarte Pixel auf der Matrix (Binning) oder per Software (Makropixel) oder über mehrere, nacheinander erfasste und gemittelte Bilder (Mehrfachmessung) auf etwa

$$n = n_0 + \frac{\lg N}{2} \quad N = \text{Anzahl der Mittelungen (Pixel, Bilder)}$$

$n = \text{erreichbare Auflösung in bit}$
 $n_0 = \text{Grundauflösung}$

Gleichung 3

gesteigert werden.

Leuchtdichteszenen sind vielfach durch sehr hohen Dynamikumfang (z.B. Leuchten und beleuchtete Szene gemeinsam im Bild) gekennzeichnet. Der mit einer Leuchtdichtemesskamera erfassbare Dynamikumfang kann durch eine HighDynMessung, bei der die Szene mehrfach und mit unterschiedlichen Integrationszeiten aufgenommen wird, erhöht werden. Die Messwerte werden dann jeweils aus den Bildern mit dem besten Signal-Rausch-Abstand gewonnen und zu einem gemeinsamen Leuchtdichtebild verrechnet. Damit sind mit bildauflösenden Leuchtdichtemessern Dynamikumfänge von 10^6 und Messabweichungen bis 10^{-2} erreichbar.

2.5 Auswahl eines Abbildungssystems

Die Leuchtdichte $L(x, y, \vartheta, \varphi)$ ist eine ortsabhängige (differenzielle) Messgröße und erfordert demzufolge ihre Abbildung auf den Sensor, bei punktförmig messenden Sensoren die Abbildung des vorgegebenen Messflecks, bei bildauflösenden Leuchtdichtemessern die Abbildung der entsprechenden Szene auf den Bildsensor (CCD-Matrix). Bildauflösende Leuchtdichtemesser werden bevorzugt mit Wechselobjektiven verwendet. Dann sind für jedes Objektiv spezifische Korrekturdaten erforderlich.

Standardobjektive bilden Ebenen im Objektraum in Ebenen im Bildraum – auf den Sensor ab. Ein wesentlicher Parameter dabei ist der Abbildungsmaßstab $\beta' = \text{Bildgröße/Objektgröße}$.

Der Abbildungsmaßstab ist normalerweise von der Fokuseinstellung, d.h. von der Objektweite abhängig, auf die scharf gestellt ist (entweder vom Nutzer bei fokussierbaren Objektiven oder fest eingestellt bei der Herstellung bei Festobjektiven). Daneben gibt es eine Reihe von Sonderobjektiven, die davon abweichende Eigenschaften haben. Z.B. werden Halbraumobjektive eingesetzt, die Objektwinkel in Bildhöhe abbilden. Das Objektfeld ist dabei der gesamte Halbraum vor dem Objektiv ($\vartheta = \text{ca. } +90^\circ$). Mit konoskopischen (hyperzentrischen) Objektiven können Ausstrahlrichtungen von einem Punkt (bzw. Messfleck) in Bilddaten umgesetzt werden. Prinzip und Realisierung sind in **Abb. 12** dargestellt.



Abb. 11: Abbildung mit Halbraumobjektiv

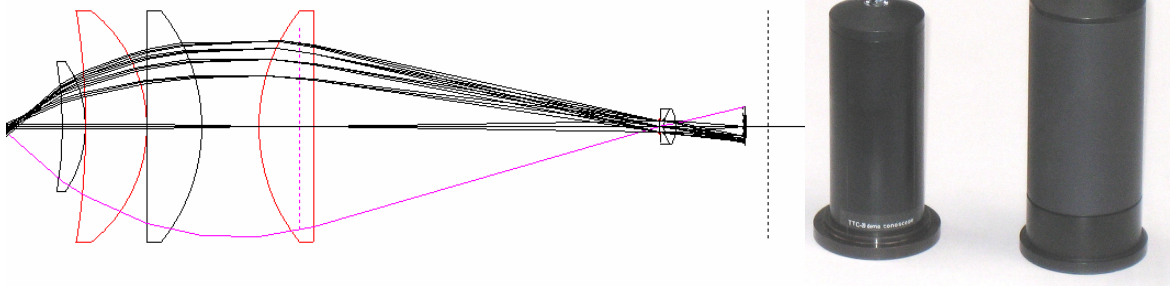


Abb. 12: Konoskopische Objektive (Strahlenverlauf – links; Ausführungen – rechts)

Die Abbildung von Punkten der Objektebene in Punkte der Bildebene erfolgt durch Strahlenbündel, die durch die Öffnungsblende mit Durchmesser D begrenzt werden. Die Abbildung ist immer nur einem begrenzten Bereich scharf (Tiefenschärfe). Wird aus davon abweichenden Objektebenen abgebildet, entstehen unscharfe Abbildungen, die auch zu abweichenden Leuchtdichtemesswerten führen können (siehe **Abb. 13**).

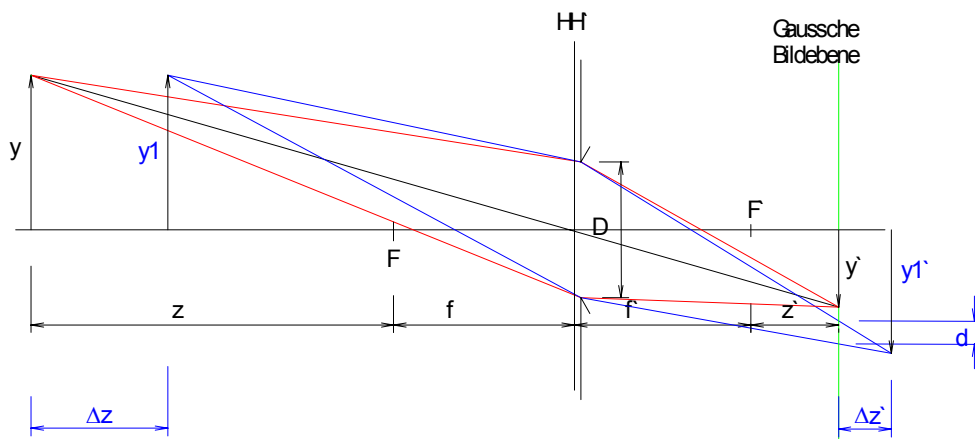


Abb. 13: Strahlenverläufe bei Abbildung aus unterschiedlich entfernten Objektebenen

Das Objektiv sei für die Abbildung von y nach y' eingestellt (fokussiert), d.h. ein Objektpunkt wird in der Bildebene in einen scharfen Bildpunkt abgebildet (Beugung und Abbildungsfehler jetzt nicht betrachtet). Wird nun das Objekt nach y_1 verschoben, entsteht das scharfe Bild bei y_1' . In der Bildebene, in der sich der Sensor (CCD-Matrix) befindet, entsteht eine unscharfe Abbildung mit dem Zerstreuungskreis d (Defokussierung -> geometrisch optische Unschärfe).

Die Auswirkungen der geometrisch-optischen Unschärfe sind beim Vergleich von scharfer und unscharfer Abbildung an Streifenstrukturen zu erkennen:

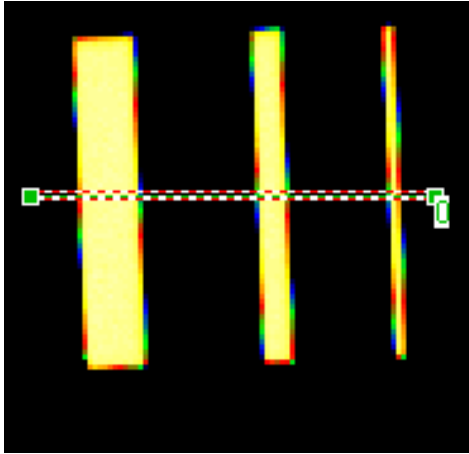


Abb. 14: Scharfe Abbildung

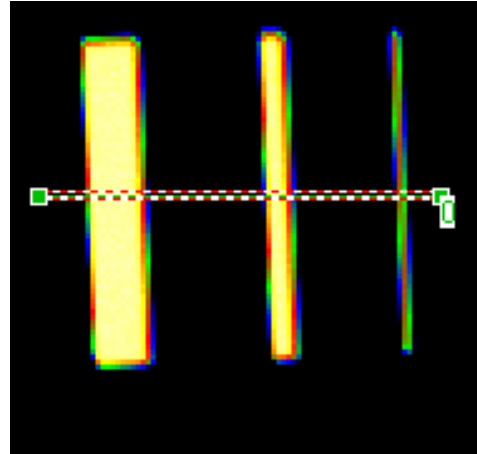


Abb. 15: Unscharfe Abbildung

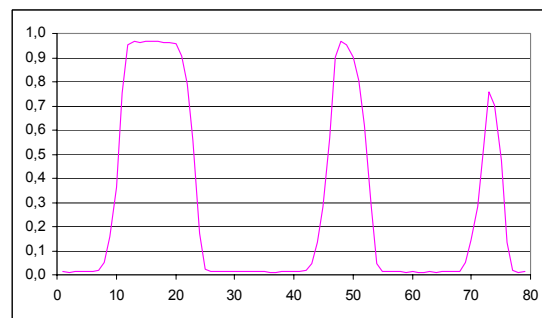
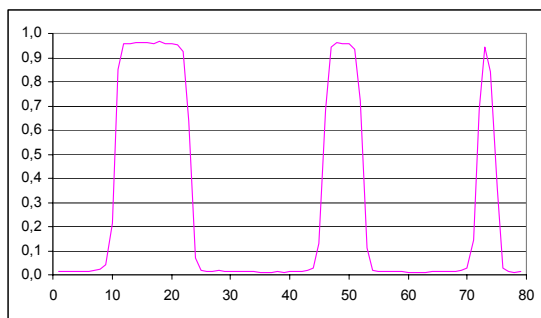


Abb. 16: Schnitte durch die Struktur der Streifen in der scharfen/ unscharfen Abbildung

Bei der unscharfen Abbildung ist neben der stärkeren Verschleifung von Objektkanten die Reduktion der maximal erreichbaren Leuchtdichte für kleine Strukturbreiten zu erkennen.

Aus den Darstellungen der Streifenmuster ist ersichtlich, dass bei Unschärfe an den Kanten (Hell-Dunkel-Sprünge), Licht in die dunklen Randbereiche transportiert wird, das in den hellen Bildbereichen fehlt. Bei kleinen Strukturbreiten gibt es dann auch in einem ggf. vorhandenen Plateau keine Pixel mehr, die die tatsächlich vorhandene Leuchtdichte repräsentieren.

Die Unschärfe führt zur Verringerung der gemessenen Leuchtdichten, sobald die Strukturbreiten zu klein werden. Eine gute Einstellung der Objektentfernung führt zu Kantenanstiegen von etwa 2...3 Pixel. Die ungenaue Einstellung des Systems oder die Abbildung von Objekten außerhalb des Tiefenschärfebereichs führt schnell zu Kantenanstiegen von 5 und mehr Pixeln und damit zum Absinken der gemessenen Leuchtdichten.

Für die Erfassung von Leuchtdichten an kleinen Strukturen ist eine Mindestanzahl von Bildpunkten (Pixel) je Strukturbreite erforderlich. Als notwendige Bildpunktzahlen haben sich 5 Pixel als untere Grenze herausgestellt, 10 Pixel sollten angestrebt werden.

2.6 Modulation

Bei der Auswahl geeigneter Leuchtdichtemessbereiche (über Einstellung der Integrationszeiten) ist neben der zu vermessenden Leuchtdichte im Messobjekt auch das Zeitverhalten der Leuchtdichte (z.B. Flimmern bei Netzbetrieb von Lampen oder PWM bei LED) zu beachten.

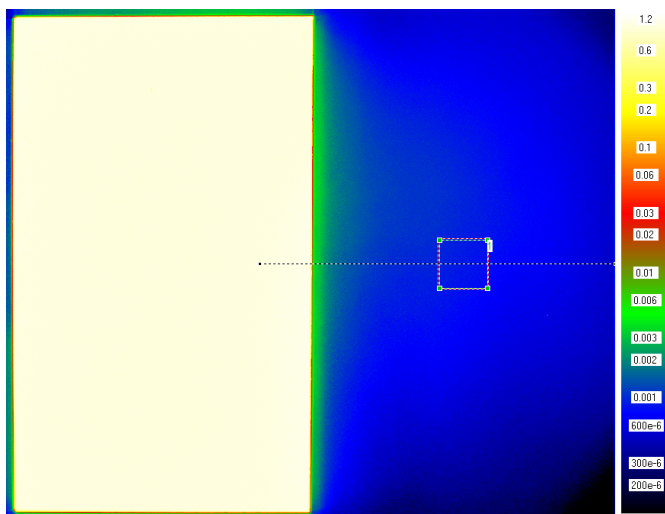
Die Messabweichungen durch die Erfassung einer nicht ganzzahligen Anzahl von Perioden lassen sich folgendermaßen beeinflussen:

- Durch die Vergrößerung der Integrationszeit kann die Anzahl der erfassten Perioden vergrößert werden. Mit größer werdender Periodenanzahl wird die Messunsicherheit kleiner. Die Anpassung der Integrationszeiten an den zu messenden Leuchtdichtebereich kann durch die Wahl der Blende bei der Fertigung des Objektivs oder durch den Einsatz von kalibrierten Neutralgraufiltern erfolgen.
- Bei bekannter Flimmerfrequenz kann die Integrationszeit so gewählt werden, dass sie eine ganzzahlige Anzahl von Perioden erfasst, womit die Messunsicherheiten für modulierte Licht klein

bleiben. Bei sinusförmiger Ansteuerung, z.B. mit Netzfrequenz, gehen die Abweichungen gegen Null. Bei rechteckförmiger Ansteuerung, z.B. durch PWM, erreicht man sehr kleine Messabweichungen.

2.7 Streulicht

Jedes abbildende System erzeugt einen mehr oder weniger großen Anteil an Streu- oder Falschlicht. Das abbildende System besteht aus Linsen oder Spiegeln, die neben ihrer idealen Funktion (Linsen - Brechung bei Lichtdurchgang; Spiegel - Reflexion) auch nichtideales Verhalten haben. Glas-Luft-Grenzflächen brechen nicht nur, sondern reflektieren auch Licht (ca. 4%), und Spiegel reflektieren nicht nur gerichtet, sondern auch diffus. Licht kann an Linsenfassungen und Blenden gestreut werden. Damit wird Licht vom Objekt nicht nur an die Stellen übertragen, die sich aus der geometrischen Optik ergeben (Abbildung), sondern gelangt auch an ganz andere Stellen. Weiterhin hat der Sensor selbst ein endliches Reflexionsvermögen (Silizium 30 ...65 %). D.h. das auf den Sensor abgebildete Licht wird zu beträchtlichen Teilen reflektiert und "geistert im Objektiv herum". Alle diese Effekte führen zu einem mehr oder weniger starken "Streulichtteppich".



$$L_{\text{Dunkel}} = 0.00093$$

$$L_{\text{Hell}} = 1.000$$

$$f_2(e) = 1:1070$$

Die Leuchtdichten sind auf

$$L_{\text{Hell}} = 1 \text{ normiert.}$$

Abb. 17: Leuchtdichtebild einer Maske (Hälfte hell, Hälfte dunkel; Darstellung pseudocoloriert; logarithmisch – 4 Dekaden

Für den Einsatz an bildauflösenden Leuchtdichtemessern sind die Abbildungssysteme unter diesem Gesichtspunkt auszuwählen. Mit der Auswahl streulichtarmer Objektive sowie weiterer Maßnahmen (Streulichtblenden, Antireflexbeschichtungen von Filtern und Fenstern, Gestaltung des Bildraumes) erreicht man ca. 1 ...2 % Streulicht, aber nicht Null.

Damit sind zwei wesentliche Messprobleme verbunden:

- Großflächig ausgeleuchtete Objekte erhalten auf Grund des Streulichtes einen etwas größeren Messwert (abhängig von der Ausleuchtung des Objektfeldes insgesamt).
- In dunklen Bereichen misst man zusätzlich Streulicht, d.h. gemessene Kontraste sind stets kleiner als die tatsächlich vorhandenen (ebenfalls abhängig von der Ausleuchtung des Objektfeldes insgesamt). Wichtig ist dies vor allem bei der Beurteilung von Negativkontrasten, d.h. kleine dunkle Strukturen vor großem hellen Hintergrund.

Sind bei hochdynamischen Szenen auch die niedrigen Leuchtdichten mit geringer Messabweichung zu bestimmen, müssen die Zusammenhänge der Streulichtentstehung erfasst werden. Damit können dann Algorithmen zur Streulichtkorrektur bereitgestellt werden, z.B. zur Vermessung von Lichtstärkeverteilungen an Kfz-Scheinwerfern über die Leuchtdichteverteilung an einer Messwand oder die Messung von Kontrasten kleiner dunkler Symbole auf Displays zu ihrer hellen Umgebung.

3 Farbmesskamera [4] [5] [6]

Für die Farbmessung sind spektrale Empfindlichkeiten entsprechend der Normfarbwerte oder Linearkombinationen davon erforderlich. Mit einem Filterradsystem können mit an die spektralen Empfindlichkeiten der jeweils eingesetzten CCD-Matrizen angepassten Filter sequentiell Bilder in den einzelnen Kanälen erfasst und zu Farbbildern verrechnet werden. Das in Abb. 18 vorgestellte Filterradsystem hat sechs Filteröffnungen. Damit stehen neben Filtern für die Normspektralwerte X, Y, Z weitere für $V'(\lambda)$, circadiane Wirkungen oder Wirkungen nach der blue light hazard -Kurve zur Verfügung. [9]

Für die Berechnung und Optimierung von Farbraumtransformationen bzw. als Grundlage für das Design der Farbfilter eines Filtrerrades ist die Erfassung der relativen spektralen Empfindlichkeit der Bildsensoren notwendig.

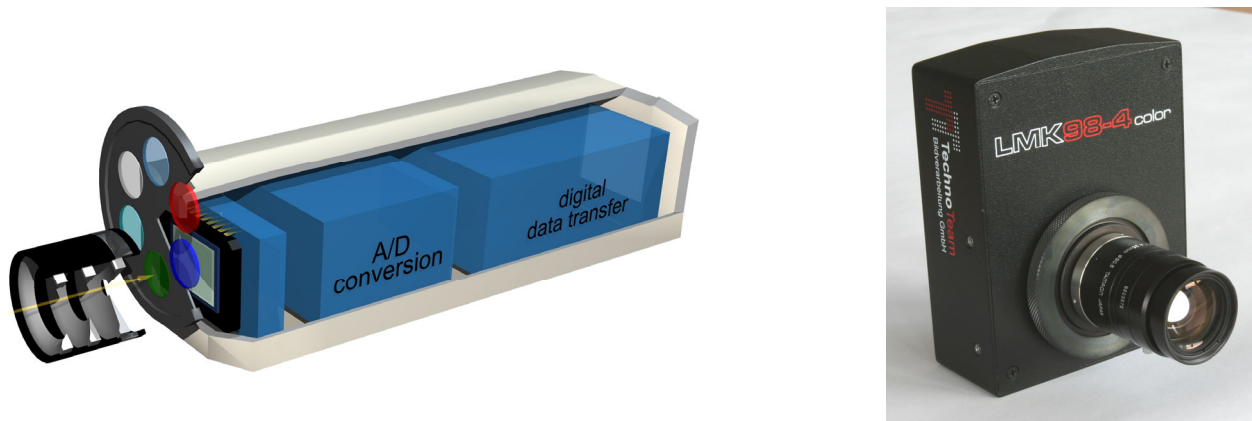


Abb. 18: Schematische Darstellung einer Filtrerradkamera (links) und Realisierung einer LMK98-4 Color

Aus den Messdaten in **Abb. 8** und **Abb. 9** kann man erkennen, dass die Streuung der Matrixdaten in einer Charge so groß ist, dass für die spektrale Anpassung bzw. für die Berechnung von Farbraumtransformationen in einer Applikation die Daten jeder einzelnen CCD-Matrix zu bestimmen sind. Nach entsprechend optimierter Transformation können die in **Abb. 19** dargestellten relativen spektralen Empfindlichkeiten im Vergleich zu den Normspektralwertkurven des 2°-Normalbeobachters erreicht werden.

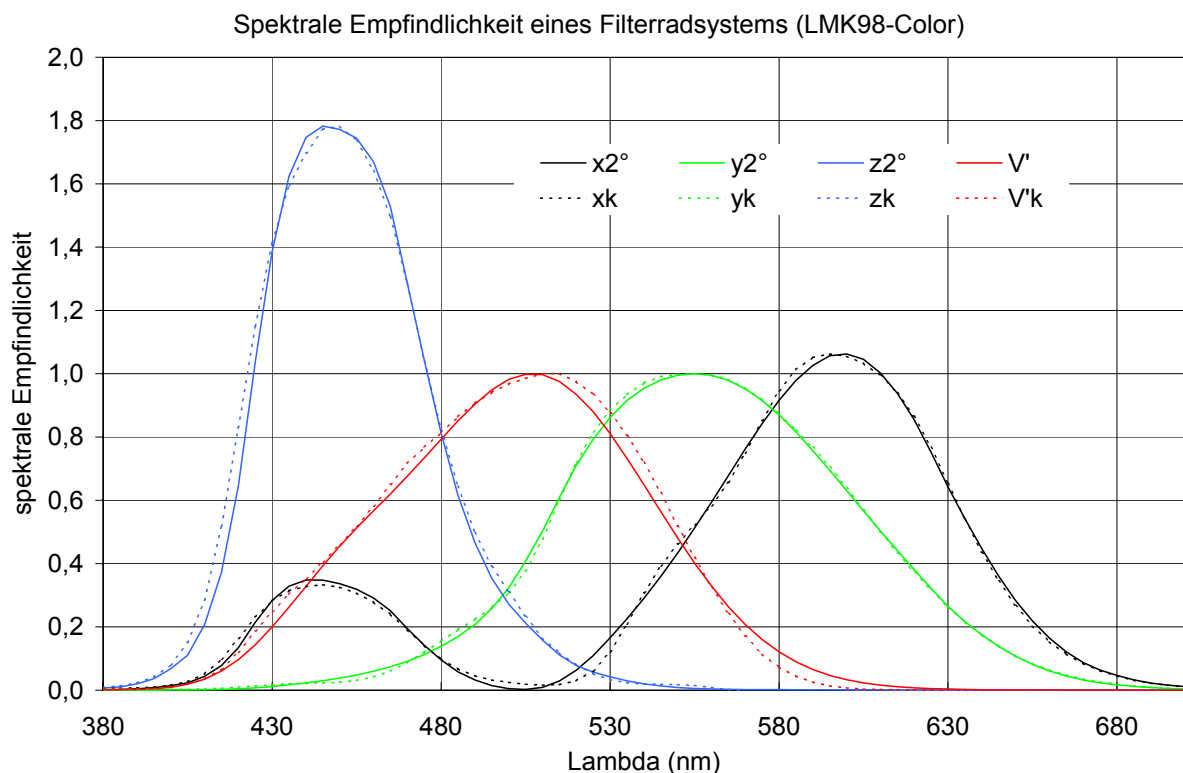


Abb. 19: Spektrale Empfindlichkeit eines Filtrerradsystems LMK98 Color

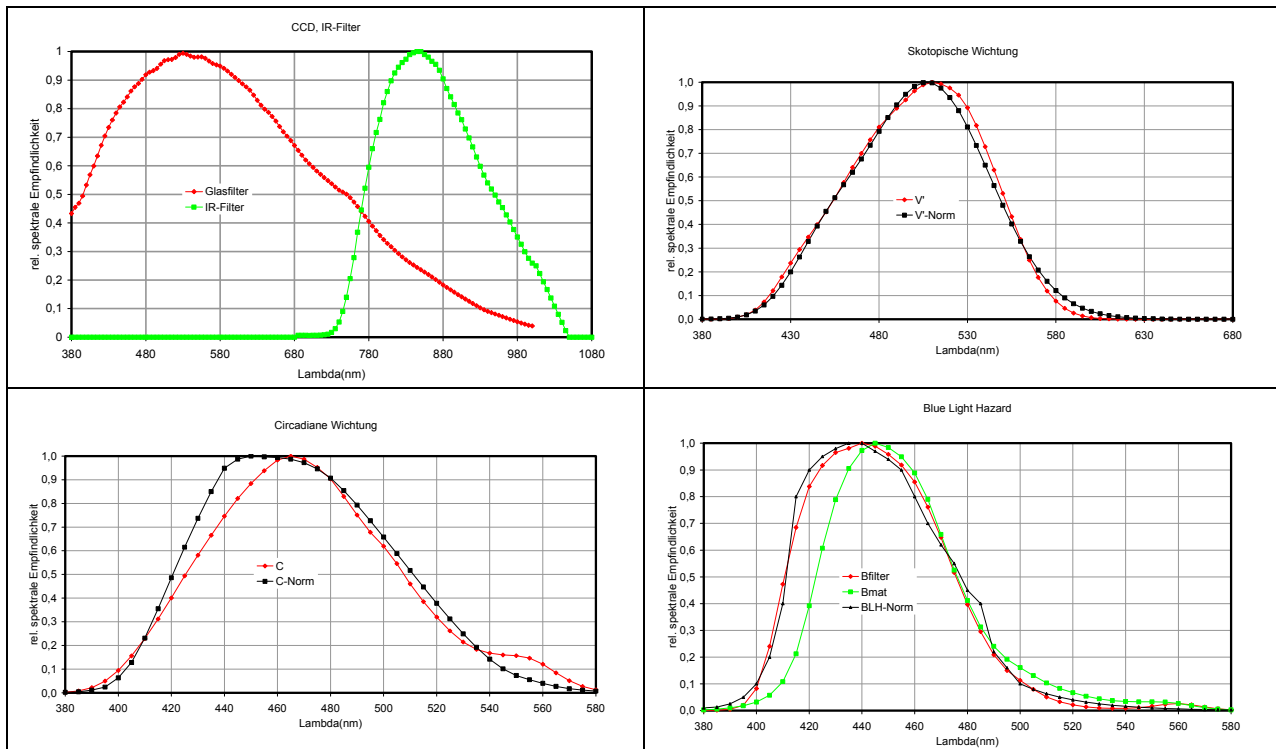


Abb. 20: Spektrale Empfindlichkeit eines Filtrerradsystems LMK98 Color (Filter Glas, nahes InfraRot, skotopische Anpassung $V'(\lambda)$, circadiane Anpassung $C(\lambda)$ und blue light hazard $B(\lambda)$)

4 Einmessen von bildauflösenden Messsystemen

4.1 Korrekturalgorithmen - Korrekturdaten

Für die Realisierung einer Leuchtdichtemesskamera sind die in Kap.2 erläuterten Zusammenhänge aufzuklären, die Parameter zu bestimmen und für entsprechende Korrekturalgorithmen zu hinterlegen. Dabei sind die verschiedenen Parameter für eine Kameraserie (z.B. Integrationszeiten) oder für die jeweilige Kamera (Dunkelsignaleigenschaften, Rauscheigenschaften) oder für die jeweiligen Kombination Kamera-Objektiv (Hellsignaleigenschaften) oder auch für die jeweilige Kombination Kamera-Objektiv bei der entsprechenden Einstellung (z.B. Focus des Objektivs) zu bestimmen. Für Farbmesskameras sind diese Parameter natürlich mehrfach (für die eingesetzten Filter) erforderlich.

	Zusammenhang	abhängig	Einfluss
Photonen- Ladungswandlung	$n_{e^{-}}(i, j) = \int L_e(i, j) \cdot s(\lambda) d\lambda \cdot T_{\text{int}} \cdot K1(i, j)$	ortsabhängig	Objektiv, Objektiv-einstellung
Dunkelsignal-generierung	$n_{DSe^{-}}(i, j) = K21(i, j) \cdot T_{\text{int}} \cdot f(\vartheta)$	ortsabhängig	Temperatur
Dunkelsignal-ungleichförmigkeit DSNU	$n_{DSe^{-}0}(i, j) = K22(i, j, T_{\text{int}})$	ortsabhängig	Integrationszeit
Signaltransport, Smear	$n_{SMEARe^{-}}(i, j) = K3 \cdot \sum_i E(i, j) \cdot \frac{T_{\text{transport}}}{T_{\text{int}}}$	Signal	
Signaltransport, Effektivität	$n_{e^{-}}(i, j, t+1) = \eta \cdot n_{e^{-}}(i, j+1, t) + \varepsilon \cdot n_{e^{-}}(i, j, t)$	Anzahl Schiebescritte	
Ladung-Spannungs-Wandlung	$U_{\text{Video}}(i, j) = c_1(n_{e^{-}}(i, j) + n_{DSe^{-}}(i, j) + n_{SMEARe^{-}}(i, j))$		Temperatur

Übertragung (Analogelektro-nik)	Tiefpassverhalten -> Korrelation benachbarter Pixel (in Zeile)		Tempera-tur
Analog-Digital-Wandlung	$S(i, j) = c_2(U_{Video}(i, j))$		Tempera-tur

Tabelle 1: Mathematische Beschreibung der Signalgenerierung

$L_e(i, j)$	Strahldichte in der abgebildeten Szene
n_{e^-}	Anzahl Elektronen (Photoelektrischer Effekt)
n_{DSe^-}	Anzahl Elektronen (Thermoelektrischer Effekt)
n_{SMEARe^-}	Anzahl Elektronen (Photoelektrischer Effekt in Schieberegistern)
T_{int}	Integrationszeit
$T_{Transport}$	Verweilzeit der Signalladungen in Schieberegistern
ϑ	Temperatur
U_{Video}	Spannung Ausgangsverstärker CCD-Matrix
S	digitales Videosignal
(i, j)	Pixelkoordinaten (Zeile, Spalte)
$K1(i, j)$	ortsabhängige Empfindlichkeit – PRNU, Shading
$s(\lambda)$	resultierende spektrale Empfindlichkeit (Sensor, Filter, Objektiv)
$K21(i, j)$	Dunkelsignalgenerationsrate
$K22(i, j)$	Dunkelsignalungleichförmigkeit – DSNU
$K3$	Smearkoeffizient
η, ε	Transfereffektivität, Transferineffektivität
c_1	Nichtlinearität Ladungs-Spannungswandlung
c_2	Nichtlinearität Analog-Digital-Wandler

Durch Zusammenfassung von in gleicher Art wirkenden Koeffizienten und Funktionen kann folgende Korrekturstrategie realisiert werden:

$$L(i, j) = K \cdot \frac{(f_{NL}^{-1}(S(i, j) - DSO_{offset}) - DSNU(i, j) - SMEAR(i, j)) \cdot k(i, j)}{T_{int}} \quad \text{Gleichung 4}$$

Dazu sind Daten erforderlich (siehe Tabelle 1), die entweder bei der Realisierung des Messsystems (Einmessen beim Hersteller) entstehen oder im Messbetrieb eingestellt (Integrationszeit) bzw. bei der Messung vom System geliefert werden.

Parameter	Bedeutung	Speicherbedarf	Zu bestimmen
$S(i, j)$	digitales Bildsignal	Bild	Messung
f_{NL}^{-1}	Umkehrfunktion der Nichtlinearität, ortsunabhängig	Tabelle	Einmessen
DSO_{offset}	alle Offsetgrößen (CCD-Matrix, Kameraelektronik), ortsunabhängig, temperaturabhängig	Wert	Messung
$DSNU(i, j)$	ortsabhängiges Dunkelsignal	Bild	Einmessen
$SMEAR(i, j)$	Smeareinfluss	Bild	Messung
$k(i, j)$	Inverse der Pixelempfindlichkeit, Shadingkorrektur	Bild	Einmessen
T_{int}	Integrationszeit	Wert	Messung
K	Kalibrierfaktor	Wert	Einmessen

Tabelle 2: Korrekturdaten

4.2 Einmessen

4.2.1 Anbindung an Normlicht Art A

Zum Einmessen ist endgültig ein Kalibrierfaktor K zum Umrechnen der ermittelten Signalwerte in Leuchtdichtwerte zu bestimmen. Zum Einmessen ist ein rückgeführtes Leuchtdichtenormal zu verwenden. Das Leuchtdichtenormal soll eine Ausstrahlcharakteristik ähnlich Normlicht Art A haben.

4.2.2 Anbinden an schmalbandige (LED) Normale [8]

Da die $V(\lambda)$ -Anpassung immer nur endlich genau erfolgen kann, sind für schmalbandige Lichtquellen größere Messabweichungen möglich. Diese Messabweichungen sind aber dann bei gleicher Ausstrahlcharakteristik der Lichtquellen stabil. Für den Einsatz der bildauflösenden Leuchtdichtemesser an schmalbandigen Quellen (z.B. farbige LED) können zusätzlich Kalibrierfaktoren bereitgestellt werden. Diese können durch Berechnung aus den tatsächlichen spektralen Charakteristiken der bildauflösenden Leuchtdichtemesser (**Abb. 10**) und den spektralen Ausstrahlcharakteristiken der Lichtquellen berechnet (Colour-Correction-Factor CCF) oder sinnvoll an entsprechenden LED-Leuchtdichtenormalen durch Messung bestimmt werden.



Abb. 21: LED-Normale

In Zusammenarbeit mit der HWAK Göttingen wurden stabile LED Lichtquellen entwickelt (Leuchtdichteabweichung $< 1\%$, Wellenlängenshift < 1 nm während 100 h Betriebszeit). Mit diesen LED Normalen, die einen großen Bereich des Farbraums umschließen können, ist es sowohl möglich, die Justage einer Farbkamera durchzuführen, als auch beim Nutzer selbst eine Kalibrierung vorzunehmen, ohne auf Spektroradiometer oder andere schwer kalibrierbare bzw. rückführbare Messgeräte zurückgreifen zu müssen.

5 Einsatz von Leuchtdichte- und Farbmesskameras im Nachtdesign im Fahrzeuginnenraum

5.1 Symbolmessung

Im Kfz werden heute Baugruppen von vielen unterschiedlichen Herstellern eingesetzt (Kombiinstrumente, Klimaregelung, Autoradio, Navigationssystem, usw.). Diese Baugruppen enthalten viele mit LED hinterleuchtete Symbole (Schalter, Tasten, Anzeigen) und Displays. Sowohl für die Entwicklung als auch die Produktion von Systemen oder Baugruppen sind Leuchtdichten und Kontraste sowie die Farbwerte in engen Grenzen zu halten. Zwischen den Herstellern und den Automobilbauern sind zur Sicherung einer ausreichenden Qualität ständig Messwerte auszutauschen. In diesem Bereich haben sich bildauflösende Leuchtdichte- und Farbmesskameras (LMK) etabliert.

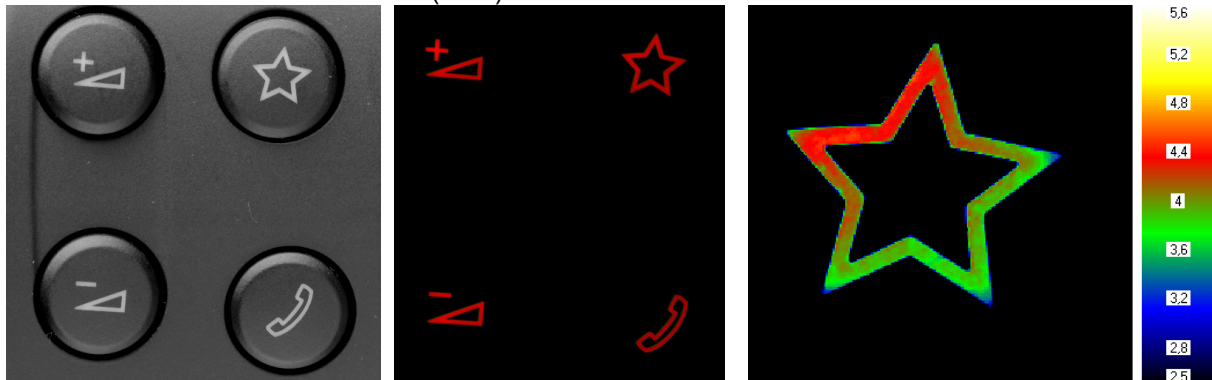


Abb. 22: Typische Einsatzfälle: Symbole eines Lenkradschalters Foto (links), Farbmessbild (mitte), Helligkeitswerte eines Symbols in Pseudocolorierung (rechts)

Die Leuchtdichten liegen im Bereich von wenigen cd/m^2 und sind eng toleriert (ca. $\pm 20\%$). Die Strichbreiten der Symbole sind sehr fein (0,3 mm). Für diese Messungen sind Leuchtdichtemesskameras erforderlich, die mit Objektiven ausgestattet sind, die diese Strichbreiten noch sicher auflösen können (ca. 10 Pixel/Strichbreite). Da die Objekte selbst aber immer größer werden (Autoradio, Navigationssysteme, Kombiinstrumente) müssen die Objekte durch Mehrfachmessungen erfasst werden. Für häufige Messungen (z.B. in der Produktionskontrolle) sind dann Verfahrenseinheiten notwendig.

Für die Messung solcher Objekte bietet sich dann auch der Einsatz hochauflösender Messsysteme mit Pixelzahlen von 4900×3280 (16 MPixel) sinnvoll.

Wichtig sind ebenfalls Farbinformationen. Mit der Farbmesskamera können sowohl Farbunterschiede durch Fehlbestückungen bei den LED's für die Hinterleuchtung, als auch eventuelle Farbbeeinflussungen durch die lichtleitenden Elemente gefunden werden. Gravierend wird dieses Problem bei der Hinterleuchtung mit weißen LED. Die Führung der unterschiedlich farbigen Lichtstrahlen (rot, grün, blau oder blau, gelb) in den vielfach geometrisch sehr komplizierten Lichtleitern ist nicht trivial und kann zu durchaus farbigen Erscheinungen an der Lichtaustrittsstelle führen.

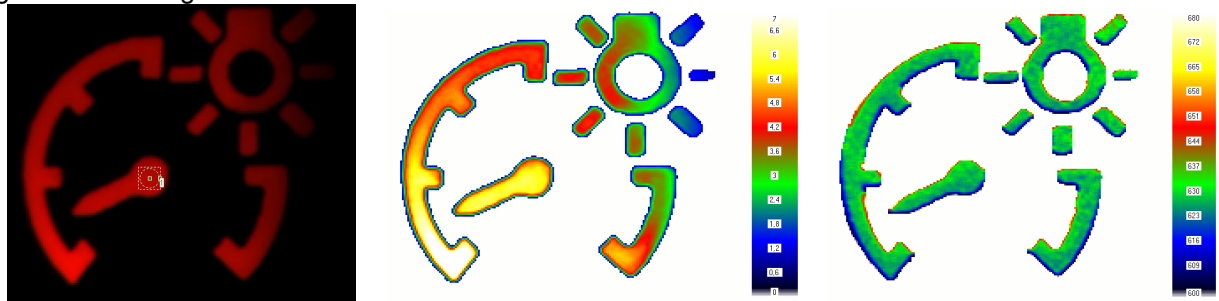


Abb. 23: Farbbild eines Symbols (links); Leuchtdichtekomponente (mitte); dominante Wellenlänge (berechnet für jedes Pixel, rechts)

5.2 Ambiente Beleuchtung

Neuere Erkenntnisse zeigen, dass mit geringer Beleuchtung im Fahrzeuginnenraum, sogenannter „ambien-ter Beleuchtung“, die Sehfähigkeit bei Nacht gesteigert werden kann. Deshalb werden in zunehmendem Maße Fahrzeuge angeboten, bei denen während der Fahrt Leuchten im Innenraum eingeschaltet sind.

Diese Ambiente Beleuchtung unterstreicht die Gestaltung des Innenraumes bei Nacht, erzeugt ein hochwertiges Ambiente und erleichtert die Orientierung im Innenraum. Sowohl im Entwicklungsprozess als auch bei der Produktion der Elemente und bei der Endkontrolle sind bildauflösende Leuchtdichte- und Farbmesssysteme unverzichtbar. So sind zur Gewinnung der Daten der Lichtquellen (Lampen, LED) z.B. für die Simulation von kompletten Leuchten oder auch von einzelnen lichtleitenden Elementen Messsysteme ebenso unverzichtbar (siehe Kap. 7), wie zur Beurteilung des Gesamteindrucks im fertigen Fahrzeug. Die zu messenden Leuchtdichten sind sehr klein, d.h. die Messsysteme müssen sehr empfindliche Messbereiche (bis $0,001 \text{ cd/m}^2$ sollen sicher messbar sein) aufweisen. Durch lange Integrationszeiten (bis 10s) und durch Binning ist dies sicher erreichbar.

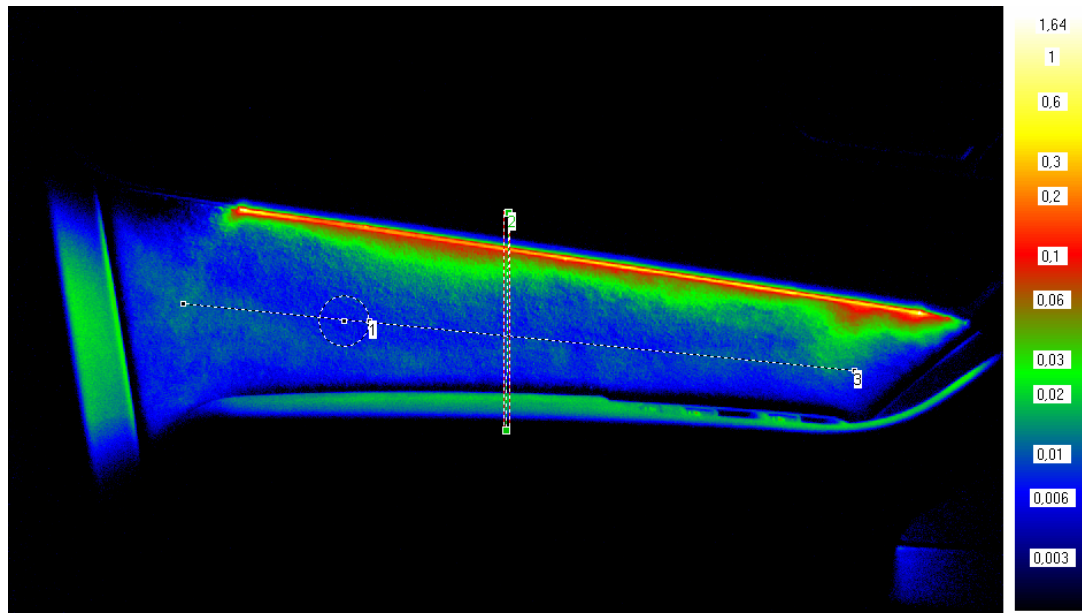


Abb. 24: Ambientes Licht im Innenraum eines Fahrzeuges (Armlehne in der Tür)
(©CML Innovative Technologies GmbH & Co. KG)

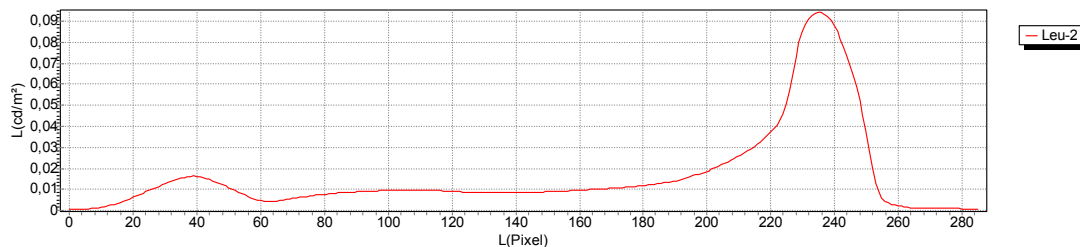


Abb. 25: Schnitt entlang der Region 2 in Abb. 24

Für die ambiente Beleuchtung im Kfz ist neben der Lichtverteilung auch die Lichtfarbe von Bedeutung. Beim Einsatz von LED, besonders weißer LED (blauer LED mit gelben Phosphoren oder RGB-LED) können auf Grund der unterschiedlichen Entstehungsorte der blauen und gelben (siehe Abb. 26) bzw. roten, grünen und blauen Strahlenanteile schnell „bunte“ Ausstrahlcharakteristiken entstehen, wenn in den nachfolgenden lichtleitenden Elementen keine ausreichende Mischung der Lichtstrahlen erfolgt.

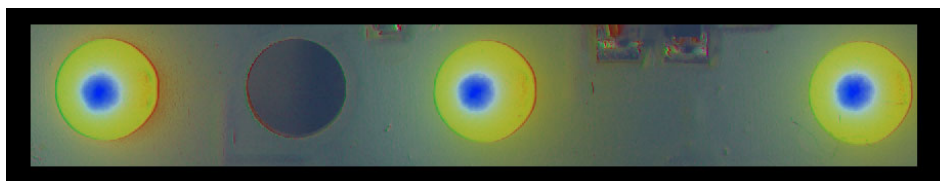


Abb. 26: Farbbild eines LED-Clusters (Darstellung 7 fach logarithmisch) – deutlich sichtbar die „Herkunft“ der blauen und gelben Lichtanteile

6 Messen – Prüfen von LED's und LED-Baugruppen

6.1.1 Einstellung und Bestückungskontrolle für LED-Module

Sollen mit Hilfe von LED's in Modulen von LED-Leuchten oder in Anzeigeeinstrumenten bestimmte lichttechnische Zielstellungen erreicht werden (Leuchtdichte, Farbwerte), dann ist es bei der Produktion dieser Bauteile häufig notwendig, diese Zielstellungen zu überprüfen oder Messwerte für bestimmte Einstellungen zur Verfügung zu stellen. Auf Grund der orts aufgelösten Messung können mit einer Aufnahme mehrere LED's vermessen werden. Dies reduziert die Messzeit und erübrigt in der Regel auch mechanische Systeme zur Positionierung der zu vermessenden Module.

Bei der Bestückung von LED-Bändern für Tagfahrlicht mit LED und Kühlkörpern sind die LED in einem Werkzeug definiert angeordnet (12 Stück in Reihe). Diese können zum Test bestromt werden. Wird die Lichtausstrahlung auf einer Streuscheibe erfasst, kann mit einem Weitwinkelobjektiv mit einer Aufnahme die komplette Reihe beurteilt werden.

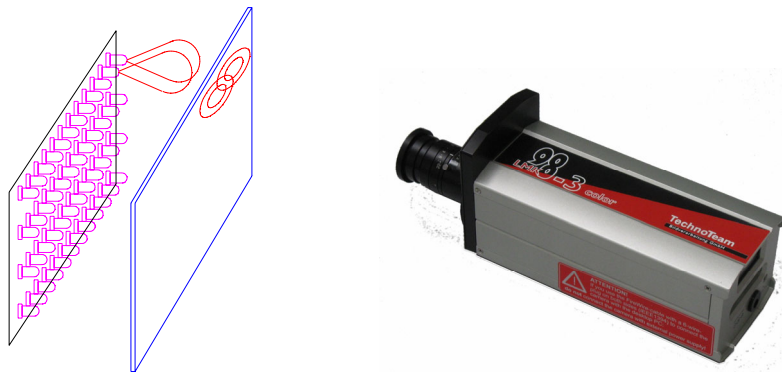


Abb. 27: Messanordnung zur gleichzeitigen Erfassung der Ausstrahlcharakteristiken mehrerer LED



Abb. 28: Aufnahme einer Reihe LED mit LMK Color und Objektiv TT8, Darstellung 2 fach logarithmisch

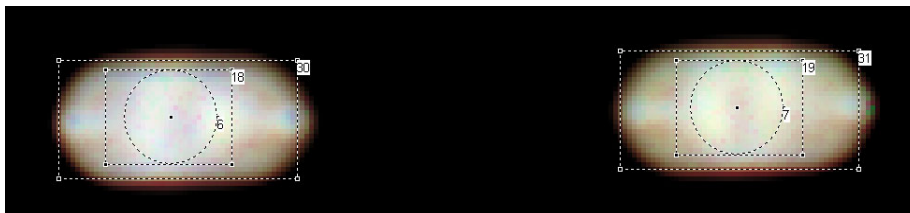
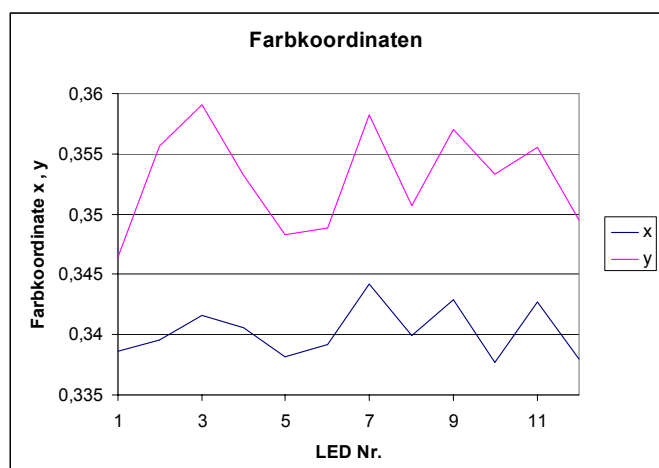


Abb. 29: Ausschnitt aus Abb. 28

Aus den Bilddaten können Leuchtdichte und Farbkoordinaten für jede einzelne LED bestimmt werden.

Wird als Messsystem die LMK-Color eingesetzt, können Farbkoordinaten exakt gemessen werden. Mit Hilfe dieser Messwerte kann eine Klassifizierung der LED's erfolgen. Durch den Vergleich mit vorgegebenen Toleranzen kann eine Auswahl in verwendbar oder nicht verwendbar getroffen werden.

Abb. 30: Farbkoordinaten (x, y) der 12 LED



7 LED – Nahfeldgoniophotometer [10] [11] [12] [13] [14]

7.1 Strahlendaten von LEDs und Lampen

Für die Entwicklung von Baugruppen mit LED werden Simulationswerkzeuge (SPEOS, ASAP, o.a.) eingesetzt. Als Eingangsdaten sind die Ausstrahlcharakteristiken der LED erforderlich. Diese werden in der Regel in Form von Strahlendatenfiles (RayData) bereitgestellt.



Abb. 31: LED

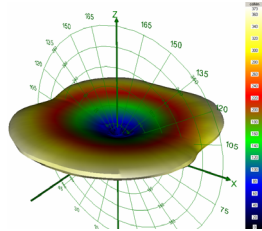


Abb. 32: Ausstrahlcharakteristik I (ϑ, φ)

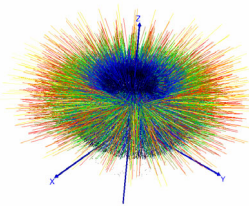


Abb. 33: Ausstrahlcharakteristik, RayData L (x, y, ϑ, φ)



Abb. 34: Modul mit LED-Lichtquellen

Um während des Entwicklungsprozesses optischer Baugruppen realitätskonforme Simulationsergebnisse zu erhalten, bedarf es einer hochqualitativen Beschreibung der Ausstrahlungscharakteristika der eingesetzten Lichtquellen in Form von Ray-Files. Diese können über komplexe physikalische Modelle oder durch Messungen gewonnen werden.

Die Erstellung physikalischer Modelle ist oftmals äußerst komplex und erfordert die exakte Definition der Geometrien und der optischen sowie der thermischen Eigenschaften aller optisch relevanten Elemente. Insbesondere bei modernen LED-Technologien und Bogenlampen ist der Aufwand für realitätskonforme Modelle immens. Abb. 35 zeigt beispielhaft schwer zu modellierende optische Verzerrungen an einer D2-Lampe.

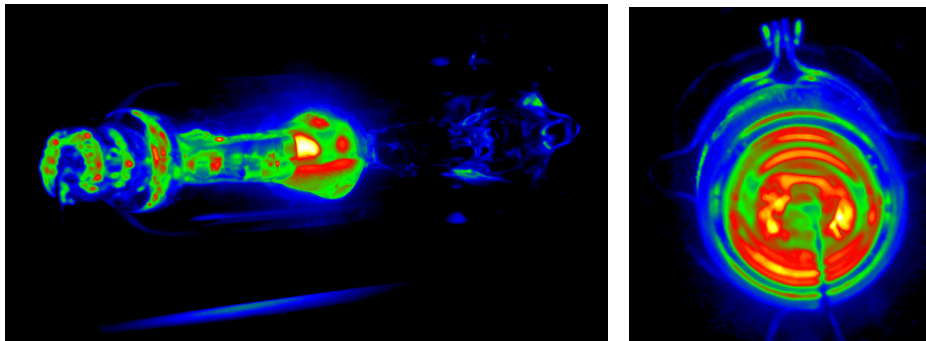


Abb. 35: Beispiele starker Verzerrungen an Glaselementen einer D2 Lampe

Gemessene Strahlendaten beschreiben die reale Lichtquelle und umgehen damit die Notwendigkeit eines komplexen physikalischen Modells. Eine Kombination der gemessenen Daten mit geometrischen Informationen der Lichtquellengeometrie ermöglicht die Berücksichtigung des Einflusses der Lichtquelle im optischen Strahlengang (z.B. Abschattung).

Die realen Strahlendatenmodelle enthalten ebenfalls die Auswirkungen von Fertigungstoleranzen, die sich insbesondere bei kleinen Leuchtmitteln, z.B. LEDs, störend auswirken. Hier besteht die Möglichkeit, mehrere Stichproben einer Lichtquelle zu vermessen, um so die Streuung der realen Parameter zu erhalten.

7.2 Messprinzip

Die vollständige Beschreibung der Ausstrahlungsverhältnisse eines Körpers $F(\lambda)$ erfordert die Angabe der Strahldichteverteilung $L_e(x, y, z, \vartheta, \varphi, \lambda)$ an allen Oberflächenpunkten $(x, y, z) \in \text{Oberfläche}$ des Körpers. Die Erfassung dieser Daten kann nur mit bildauflösenden Messverfahren realisiert werden. Bei den RiGO801 Nahfeldgoniophotometern wird eine Messkamera mittels einer Goniometermechanik auf einer Kugelfläche um das Messobjekt herumgeführt und in einem definierten Winkelrastrer Bilddaten aufgenommen. Die Messkamera ist mit einem speziell angepassten $V(\lambda)$ - Filter ausgestattet, um Leuchtdichten zu messen. Die Menge aller erfassten Leuchtdichteaufnahmen ergibt ein vierdimensionales Datenfeld $L(x', y', \vartheta_K, \varphi_K)$. Mit der Kenntnis der optischen Abbildung durch das Kameraobjektiv können

die Bildkoordinaten (x', y') mit der Information der Kamerapositionen (ϑ_K, φ_K) in räumliche Richtungen umgerechnet werden (siehe **Abb. 36**).

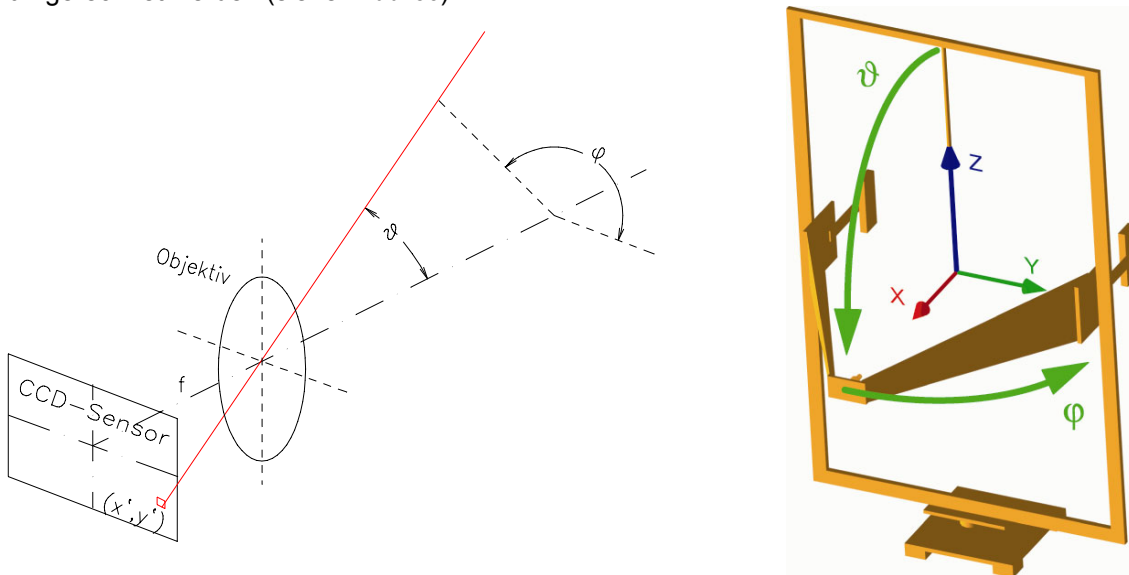


Abb. 36 : Strahlberechnung und Goniometerkoordinatensystem

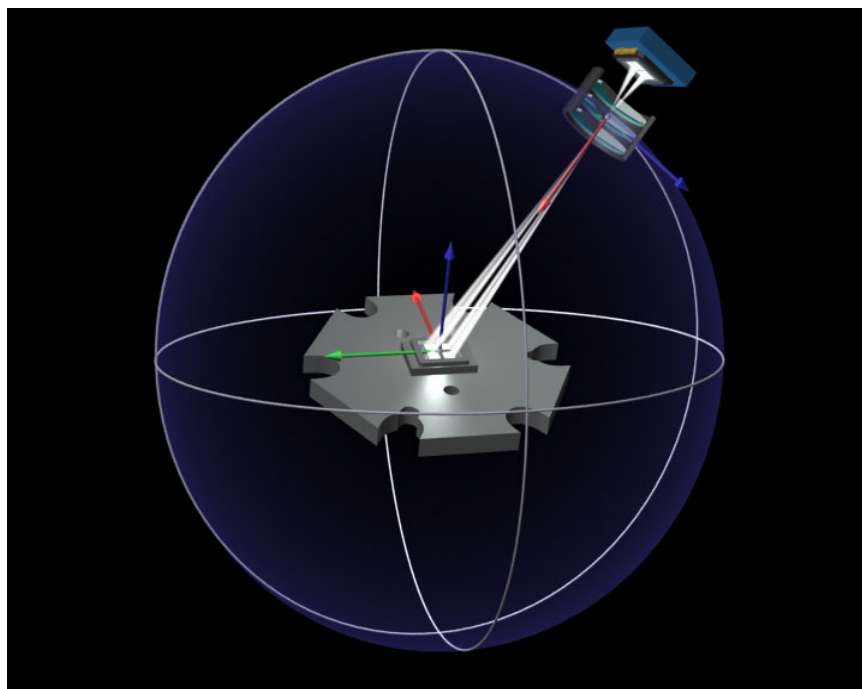


Abb. 37: Prinzip der Leuchtdichtebilderfassung

In dem gemessenen Datenfeld sind alle photometrischen Informationen der Lichtausstrahlung enthalten. Aus den Strahlendaten können selbstverständlich abgeleitete Messgrößen, wie der gemessene Lichtstrom Φ und die Fernfeld-Lichtstärkeverteilung $I(\vartheta, \varphi)$, berechnet werden. Die Ausgabe der Strahlendaten in die gewünschten Strahlendatenformate erfolgt mit einem Konvertierungsprogramm, das eine wählbare Anzahl von Strahlen vom internen Teamformat in verschiedene Standardformate exportiert. Aktuell stehen die Exportformate Asap, Speos, LightTools, LucidShape, Zeemax, TracePro, SimuLux zur Verfügung.

Da die tatsächliche Geometrie des Messobjektes vom Messsystem nicht erfasst werden kann, liegen die Startpunkte der Strahlen zunächst auf der Kugeloberfläche, die von der Eintrittspupille des Objektives beschrieben wird. Das Konvertierungsprogramm transformiert diese Startkoordinaten auf eine wählbare Hüllgeometrie, indem es die Schnittpunkte der Strahlen mit dieser Geometrie berechnet (s. **Abb. 38**). Strahlen, die die Geometrie nicht schneiden, werden nicht in das Zielformat exportiert.

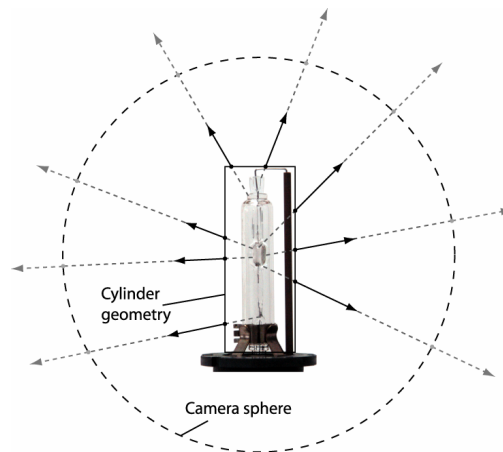


Abb. 38: Raytracing auf eine Hüllgeometrie

Als Hüllgeometrien stehen zur Zeit Kugel, Zylinder und Quader zur Verfügung. Die Geometrieparameter werden üblicherweise so gewählt, dass sich eine optimale konvexe Hüllgeometrie um das Messobjekt ergibt, um Hinterschnidungen mit evtl. vorhanden nahen Objekten in der Simulation zu vermeiden.

7.3 Messsysteme

Die RiGO801 - Modellreihe (s. **Abb. 39**) umfasst ein breites Spektrum von Messobjektgrößen, von LEDs über Lampen bis zu Leuchten mit 2000 mm Länge. Für die Vermessung kleiner Messobjekte, wie LEDs und kleine Lampen (bis zu $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$) wurde ein kompaktes LED-Goniophotometer konzipiert. Ein spezielles Goniophotometer für Lampen und kleine Leuchten (bis zu $300 \times 300 \times 300 \text{ mm}^3$) ist komplett schwenkbar, so dass sich beliebige statische Brennlagen realisieren lassen. Die großen Leuchtengoniophotometer sind bei der Konzeption der Messanlage in ihrer Größe skalierbar und somit an das zu messende Leuchtenspektrum adaptierbar (bis zu $2000 \times 2000 \times 2000 \text{ mm}^3$).



Abb. 39: LED – Goniophotometer, schwenkbares Lampengoniophotometer, Leuchtengoniophotometer

Die Goniometertypen decken jeweils ein gewisses Größenspektrum von Messobjekten ab, wobei natürlich nur Messobjekte vermessen werden können, die kollisionsfrei in das Goniometer passen bzw. vom Abbildungssystem vollständig erfasst werden. Andererseits dürfen die Objekte für Strahlendatenmessungen nicht zu klein werden, da sonst die mechanischen Toleranzen und die Abbildungseigenschaften keine ausreichend genaue Vermessung zulassen.

7.4 Farbige Strahlendaten

Ein weiterer wichtiger Gesichtspunkt ist die Erfassung der spektralen Eigenschaften von Lichtquellen. Eine vollständige orts aufgelöste Messung der Spektralverteilung ist messtechnisch nicht praktikabel. Bei farbigen LED (schmalbandig) ist die integrale spektrale Verteilung meist ausreichend, um Simulationen durchzuführen. Für weiße LED (Beispiel in **Abb. 40**) reichen diese Daten nicht aus. Man benötigt die Abhängigkeiten von der Wellenlänge, insbesondere, da diese auch ortsabhängig sind (blaue Diode und

gelber Farbstoff geometrisch getrennt (siehe **Abb. 41**)), d.h. eine fünfdimensionale Charakteristik $L_e(x, y, z, \vartheta, \varphi, \lambda)$. Durch den Einsatz von zwei Farbfiltern (Blaufilter, Gelbfilter) können die Strahlendaten durch zwei Messungen in „Blaue Strahlen“ und „Gelbe Strahlen“ separiert werden.

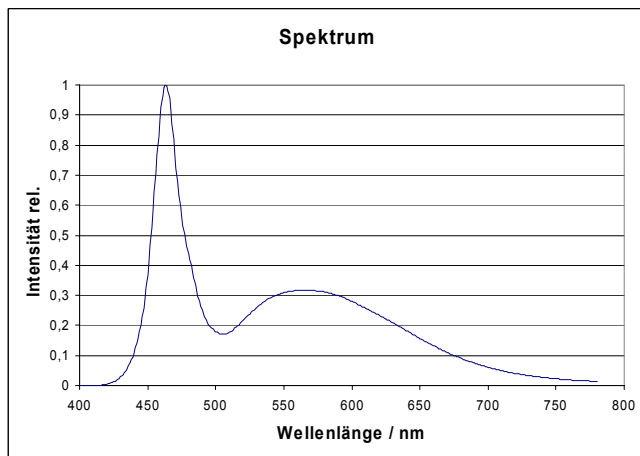


Abb. 40: Spektrum einer weißen LED

Weiterhin ist die richtungsaufgelöste Messung von Spektren mittels eines Spektrometers möglich (Option), welches zusammen mit der Kamera von der Goniometermechanik auf einer Kugelfläche bewegt wird. Beispielhaft soll die Entwicklung eines LED-Fahrradscheinwerfers (Optimierung von Reflektor und Abdeckkappe) aufgeführt werden, bei der gemessene Strahlendaten einer LED (Side Emitting) eingesetzt wurde.

7.5 Einsatz von Rayfiles

Die Nutzung von gemessenen Strahlendaten hat die schnelle von LED basierten Baugruppen in nur zwei Iterationen erst ermöglicht.

Applikationen, bei denen sich optische Bauelemente im extremen Nahfeldbereich befinden, lassen sich ohne reale Strahlendaten kaum simulieren. Ein Beispiel hierfür ist die Lichteinkopplung in Lichtleiter mittels LEDs, hier ein Bedienelement im Automobil- Innenraum.

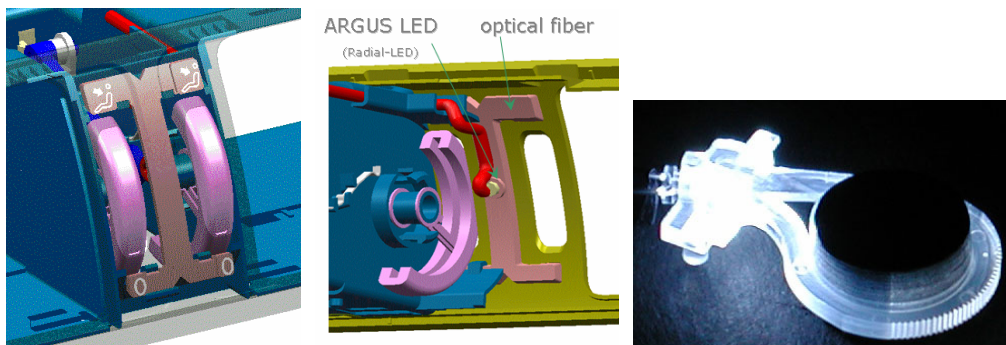


Abb. 42: Lichtleitersystem eines Bedienelementes

Mit dem Nahfeldgoniophotometer können neben kompletten Strahlendaten auch einzelne hochauflösende Leuchtdichteaufnahmen und Messserien mit der Leuchtdichte – Messsoftware LMK2000 vorgenommen werden.

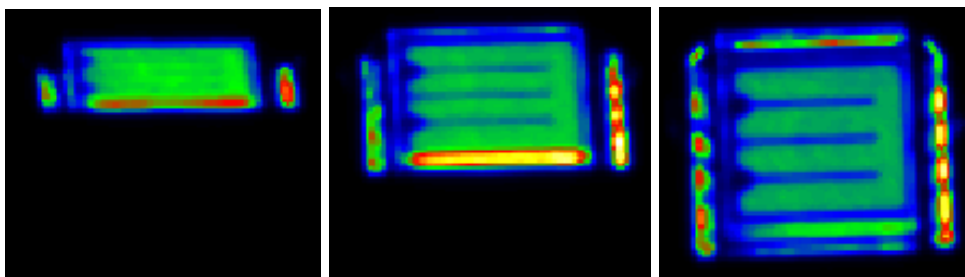


Abb. 43: Leuchtdichteaufnahmen eines LED – Chips
(aus unterschiedlichen Richtungen im LED-Goniometer aufgenommen)

8 Literatur

- [1] CIE: Measurement of LED's. Publication CIE127-1997, 1997
- [2] Muray, K.; Schanda, G., Schanda, J.: Filter fabrication techniques for LED photometry. CIE LED Symposium 97 on Standard Methods for Specifying and Measuring LED Characteristics, CIE013, pp.61-64, 1997
- [3] Jones, C.F.: Colorimetry, chromaticity space and LEDs. SPIE Conference on Illumination and Source Engineering, San Diego, California, July 1998, SPIE Vol. 3428, pp 100-114, 1998
- [4] Krüger, U.: Ausgewählte Aspekte der orts aufgelösten Erfassung stationärer Licht- und Farbverteilungen. Dissertation, Publikationsreihe des Fachgebietes Lichttechnik der TU Ilmenau Nr. 6, Der Andere Verlag Osnabrück 2004, ISBN 3-89959-167-4
- [5] Krüger, U. und Schmidt, F.: Ortsaufgelöste Farbmessung – Parameter und Kennwerte einer realisierten Filterradkamera, 9. Workshop Farbbildverarbeitung, 8.-9. Oktober 2003, Esslingen, 2003
- [6] Krüger, U. und Schmidt, F.: Ortsaufgelöste Licht- und Farbmessung - Technische Grundlagen und Anwendungsmöglichkeiten in der lichttechnischen Praxis, LuxEuropa, 19.-21.09.2005, Berlin, 2005
- [7] Krüger, U.; Schmidt, F.; Wolf, St. „Applications of image resolved light and colour measurement“ Light & Engineering 3/2005, Znack Publishing House Moscow
- [8] Burdick, R.; Krüger, U. und Bobey, K.: Verhalten von Farbproben mit Hochleistungs-LEDs. 11. Workshop Farbbildverarbeitung, 5.-6.10.2006, Ilmenau, 2006
- [9] Porsch, T.; Blankenhagen, C.; Gall, D.: Experimentelle Bestimmung der circadianen Lichtwirkung von Monitoren und TV-Bildschirmen. Licht 2004, 20.-22.09.2004, Dortmund, 2004
- [10] Nolte, R.; Bredemeier, K.; Poschmann, R., Schmidt, F.: 10 Jahre Nahfeldgoniophotometer – Grenzen und Möglichkeiten. Tagung LICHT 2004 Dortmund
- [11] Poschmann, R.; Riemann, M.; Schmidt, F.: Verfahren und Anordnung zur Messung der Lichtstärkeverteilung von Leuchten und Lampen; Patent DE 41 10 574 v. 30.03.1991
- [12] Riemann, M.; Schmidt, F.; Poschmann, R.: Zur Bestimmung der Lichtstärkeverteilung von Leuchten innerhalb der fotometrischen Grenzentfernung mittels eines bildauflösenden Gonimeters. LICHT 7-8/1993; S.592 – 597
- [13] Anordnung zur Messung der Lichtstärkeverteilung von Leuchten und Lampen, TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, Gebrauchsmuster 297 06 488.6 v. 11.04.1997
- [14] Bredemeier, K.; Poschmann, R.; Schmidt, F.; Nahfeldgoniophotometer – Systeme zur Messung der Lichtverteilung an Leuchten, Lampen und LED; LICHT 2006 Bern 10.-13.09. 2006, Tagungsband (CD)

Dr.-Ing. Udo Krüger

TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH
Werner-von-Siemens-Straße 10, D98693 Ilmenau
Udo.Krueger@TechnoTeam.de

PD Dr.-Ing. habil. Franz Schmidt

TU Ilmenau, Fak. Elektrotechnik und Informationstechnik
FG Grundlagen der Elektrotechnik
Helmholtzplatz 2, D98693 Ilmenau
Franz.Schmidt@TU-Ilmenau.de

TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH
Werner-von-Siemens-Straße 10, D98693 Ilmenau
Franz.Schmidt@TechnoTeam.de