

White Paper

Beleuchtung des Beobachtungsfeldes zur Aufnahme von spektral aufgelösten Bildern (Hyperspektrale Abbildungen)

Autoren: H. Zeng, M. Hoppe, P. Rotsch (OSA Opto Light GmbH, Berlin),
Kontakt: Köpenicker Straße 325 Haus 201, 12555 Berlin, e- mail p.rotsch@osa-opto.com, Website
www.osa-opto.com

Abstrakt

Die Verfahren der hyperspektralen Bildaufnahme haben in den letzten Jahren zunehmendes Interesse für verschiedenste Anwendungen, beispielsweise bei fertigungsbegleitender Messtechnik, gefunden. Die erheblichen Fortschritte bei den Bildaufnahmekameras und bei der Analyse der Daten ermöglichen neue Einsatzfelder. Neben der Erarbeitung der Algorithmen zur Auswertung der Spektraldaten ist die Wahl und Auslegung der Beleuchtungseinheit für die Qualität und Reproduzierbarkeit der Messdaten von entscheidender Bedeutung, so wie die Wahl der Lichtquelle für den Erfolg der Einführung einer automatischen Bildverarbeitung entscheidend ist. Im Folgenden werden drei mögliche Strahlungsquellen für eine breitbandige Beleuchtung verglichen, die thermischen Strahler (Halogen- oder Glühlampen), aus LED verschiedener Wellenlänge zusammengesetzte Strahler und Strahler aus breitbandigen LEDs. Deren Eigenschaften in der Anwendung werden diskutiert.

Einleitung

Die von einer Strahlungsquelle ausgehende Strahlung ist unter anderem durch ihr Spektrum beschreibbar, im Wellenlängenbereich der Strahlung 100 nm bis 1 mm wird zwischen UV, VIS (sichtbar) und Infrarot unterschieden (1). Als Licht im sichtbaren Bereich wird elektromagnetische Strahlung der Wellenlänge 380-780 nm definiert. Teilt man den sichtbaren Bereich in 3 Bereiche ein, kann eine Farbinformation erhalten werden. Diese Bereiche werden allgemein als Rot / Grün / Blau bezeichnet (2). Diese drei Farbkanäle sind Basis des menschlichen Farbsehens (2), der additiven Farbmischung (aktive Displays) (3) und der digitalen Farbfotographie (4). Dabei wird das Spektrum jedes Bildpunktes in 3 Farbkanäle unterteilt, d.h. die Fläche des Sensors je Bildpunkt wird, da diese nebeneinander liegen, aufgeteilt. Ein Farbfilter absorbiert das dem Farbkanal nicht entsprechende Licht. Bei mehr als 3 Farbkanälen / Bildpunkt wird von multispektralen Bildern gesprochen, die mit verschiedenen Technologien aufgenommen werden können (4). Wenn man nun dem Spektrum am Bildpunkt mehr als 100 Wellenlängenkanäle zuweist, wird der Begriff hyperspektrale Bildaufnahme verwendet (5). Dieser Begriff wurde erstmals 1988 verwendet, als das Verfahren für die satellitengestützte Fernerkundung und Luftbildaufnahmen entwickelt wurde. Dabei handelt es sich um die Analyse reflektierter Strahlung, wobei das Verfahren der Bildaufnahme aber ebenso auf Lichtquellen selbst und die Absorption bei Transmission (Untersuchung von Dünnschliffen und Gewebeschnitten) anwendbar

ist. Das Potential dieser Technik kam auch im Innovationsforum Hyperspektraltechnologien für Prozessüberwachung und Medizintechnik (HyperInno) des Photonics BW e.V. zum Ausdruck, bei dem die Technik und potentielle Anwendungen dargestellt und diskutiert wurden (7) Der aktuelle Stand bei der Entwicklung von Kameras und Software wird auch im Heft 27/21 der Markt und Technik beschrieben (8).

Die hyperspektrale Bildaufnahme kann überall dort angewendet werden, wo aus den Absorptions- oder Reflexionseigenschaften relevante Informationen über die Eigenschaften des Objekts gewonnen werden können. Zur Illustration seien aufgelistet:

- Pflanzenzucht und Landwirtschaft, z.B. Bestimmung der Pflanzenart selbst, aber auch der Gesundheit und die Düngerversorgung der Pflanze (9), Bild 1
- Lebensmittelverarbeitung, z.B. Erkennung von Reifegrad und Druckstellen von Früchten (10)
- Elektronik, z.B. Erkennung thermischer Schäden auf Leiterplatten (Bild 2 OSA Opto Light GmbH)
- Medizintechnik, z.B. Analyse der Oberfläche von Haut, Wunden und Operationsfeldern (11)

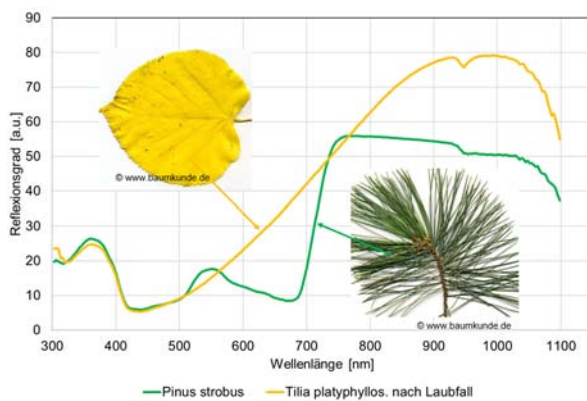


Abb. 1 Vergleich der Reflexionsspektren von Blättern, Bilder Sommerlinde *Tilia* nach Laubfall (12), Weymouths Kiefer *Pinus strobus* (13),

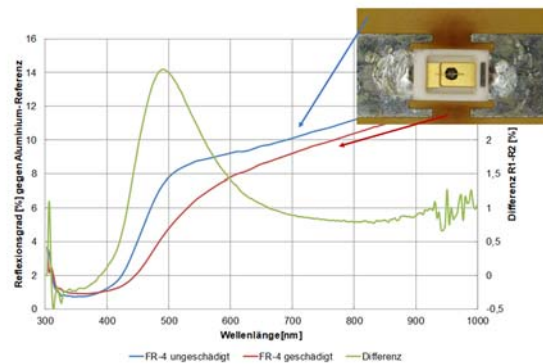


Abb. 2 Reflexionsspektrum und Bild einer geschädigten Leiterplatte

Gut verfügbare Detektoren basieren vorwiegend auf Silizium und III-V- Halbleitern wie (Ga,In)As für den nahen Infrarotbereich (14). Damit sind Strahlungswellenlängen von 220 nm (UVC) bis 4200 nm (Infrarot) adressierbar. Wählt man 120 Kanäle zur Bildaufnahme aus, umfasst bei einer Bildgröße von 1312 x 1082 Pixeln und 12 Bit Auflösung des AD- Konverters die reine Datenmenge ohne Adressdaten ca. 255 Mbyte. Damit wird verständlich, dass die Wahl der Parameter der Bildaufnahme und die des Auswertalgorithmus für einen erfolgreichen Einsatz entscheidend sind.

Die übliche Strahlungsquelle bei der Fernerkundung ist das gut beschriebene Sonnenlicht (15), Störungen, wie z.B. Einflüsse des Wetters und der Tageszeit werden durch Wahl des geeigneten Aufnahmezeitpunktes umgangen. Kann diese Strahlungsquelle nicht gewählt werden, müssen auf die Anwendung zugeschnittene, künstliche Strahlungsquellen eingesetzt werden. Der folgende Artikel konzentriert sich auf den Spektralbereich 400-1050 nm, der mit Silizium- Detektoren gut messbar ist.

Thermische Quellen

Unter thermischen Quellen werden vor allem Glühlampen und Halogen- Glühlampen zusammengefasst. Ihr Spektrum ist durch das Plancksche Strahlungsgesetz beschrieben (15), die entsprechenden Modellrechnungen und die Messwerte weisen eine gute Korrelation auf. Vor allem im roten Farbbereich und im NIR zwischen 660 und 2000 nm weisen thermische Strahler eine hohe Effizienz auf. Sofern keine Bande durch die Absorption eines Materials im Strahlengang hinzukommt, sind diese Quellen weitgehend homogen. Beispielsweise wird die Infrarot- Strahlung von Reflektoren wie im Bild 3 oben links bei Anwendungen der Allgemeinbeleuchtung gezielt abgeschwächt [(16),Folie 18]. So lange diese Lichtquellen einen wesentlichen Marktanteil an den Lichtquellen zur Allgemeinbeleuchtung aufwiesen, waren diese eine preiswerte Lösung bei sehr einfacher Ansteuerung.

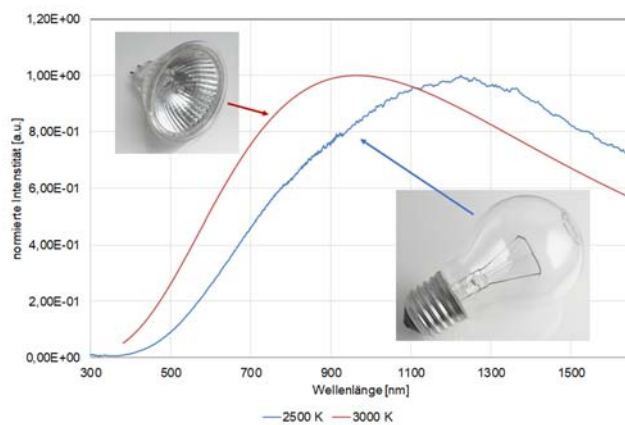


Abb. 3a: Thermische Strahler und ihre Spektren, Halogenglühlampe mit Spektrum 3000 K (modelliert), Allgemeingebrauchslampe mit Spektrum 2500 K (gemessen)

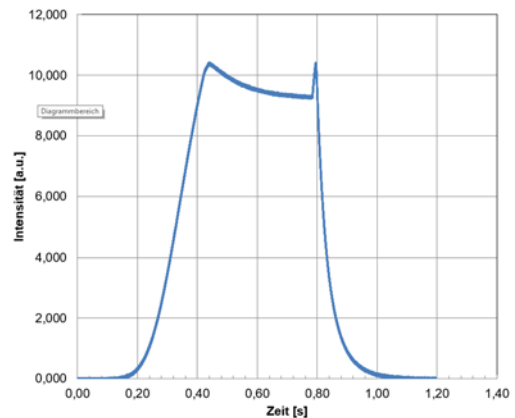


Abb. 3b: Schaltverhalten einer 2500 K Glühlampe, Einschaltzeit $t_{on}=167$ ms, Abschaltzeit $t_{off}=91$ ms

Glühlampen als Lichtquellen emittieren nur einen geringen Anteil des Spektrums bei Wellenlängen unterhalb 500 nm, UV- Licht ist also kaum vorhanden (siehe Bild 3). Eine Erhöhung der Wendeltemperatur auf 3500 K erhöht das Signal im Blauen und Grünen Bereich erheblich, geht aber drastisch zu Lasten der Lebensdauer [(16) Folie 10]. Eine weitere Herausforderung bei der Verwendung von Glühlampen ist das Ein- und Ausschaltverhalten. In Abb. 3b ist dieses gezeigt, neben der Schaltzeit von ca. 160 ms (hier an einer 2500 K Quelle mit 5 V und 12 W gemessen) ist eine längere Zeit erforderlich, bis die Glühwendel das thermische Gleichgewicht erreicht hat und die Emission gleichmäßig ist. Dies bedeutet entweder einen mechanischen Shutter oder eine thermische Belastung des Objektes, die vor allem bei Anwendungen in der Medizin und bei organischen Materialien unerwünscht ist. Ein weiterer Nachteil ist die geringe Lebensdauer, die sich durch Erschütterungen im Betrieb, wie Vibrationen an einem Transportsystem, zusätzlich erheblich verkürzen kann.

Multi- Chip- LED- Quellen

Ermöglicht durch die erhebliche Effizienzsteigerungen von LEDs im Bereich 365 – 1100 nm in den letzten Jahren ist es möglich breitbandige Strahlungsquellen aus mehreren LEDs zusammenzusetzen. Erste Anwendungen waren Sonnenlichtgeneratoren, die beispielsweise zum Testen von Solarzellen oder für Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Materialien unter Lichteinfluss eingesetzt werden können. Da

im Sonnenlicht auf der Erdoberfläche vergleichsweise wenig UVB und UVC- Strahlung enthalten ist, ist auch dieser Bereich mit LEDs gut darstellbar. Für die Emission eines Spektrums ähnlich dem des Sonnenlichts im Bereich 400-1100 nm sind LEDs mit 23 verschiedenen Wellenlängen („LED- Kanäle“) erforderlich, siehe Abbildung 4. Auf Grund der materialbedingt geringen Effizienz der direkt emittierenden LEDs im Bereich 520-580 nm werden häufig Konversions- LEDs für den grünen und gelben Bereich eingesetzt, am Beispiel im Bild 4 wurden LEDs mit einer Peak-Wellenlänge von 545 nm beziehungsweise 572 nm LED auf Konversions- Basis verwendet. In diesem Anwendungsbeispiel ist der UV- Bereich zwischen 265 und 385 nm noch nicht enthalten.

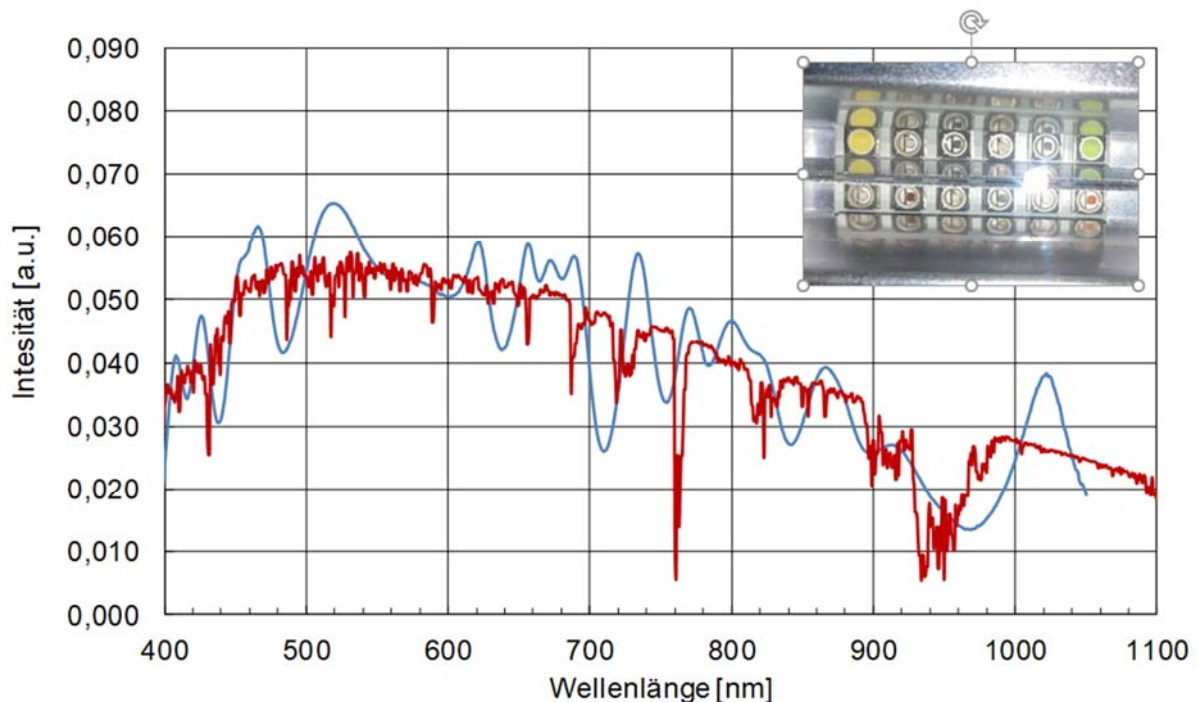


Abb. 4: Spektrum des Sonnenlichtes nach ASTM G-173-03 (17) und Emissionsspektrum (hier als Modell) einer LED- Anordnung mit 23 verschiedenen LEDs der Baureihe OCL-440. Eingefügt ist die Abbildung einer LED- Anordnung mit 12 Wellenlängen in der Baureihe OCL-440, die Konversions- LEDs mit gelber und grüner Emission sind gut zu erkennen.

Direkt emittierende LEDs zeichnen sich durch kurze Schaltzeiten aus, beispielsweise hat eine 635 nm LED mit 1 mm Kantenlänge des Chips bei einem Impulsstrom von 350 mA eine Schaltzeit $< 0,5 \mu\text{s}$. Dies ermöglicht eine Synchronisation der LEDs mit dem Kamera- Triggersignal. Ebenso kann in einer derartigen Anordnung ein Teil der LEDs, deren Emission für das konkrete Anwendungsszenario nicht benötigt wird, abgeschaltet werden. Dies reduziert den Aufwand für das thermische Management und den Energiebedarf erheblich. Weitere Vorteile dieses Designs einer Strahlungsquelle sind die Grundeigenschaften einer LED wie hohe Lebensdauer, Stabilität gegen Vibration und Schock und geringe Empfindlichkeit auf häufiges Ein- und Ausschalten.

Die hohe Anzahl der separat zu steuernden LED- Kanäle führen zu einer aufwändigen und kostenintensiven Ansteuerung und ebenso zu großem Aufwand bei der Steuersoftware. Wesentlich problematischer ist jedoch, dass durch das LED- Raster, welches je nach Package- Größe im Bereich einiger mm liegt, im Fall von nicht ebenen Messobjekten wie z.B. Pflanzen Farbschatten beobachtet werden, die die Interpretation der Messsignale erheblich erschweren. Durch sogenannte „Chip on Board“ Lösungen, bei

der die Chips in einem gemeinsamen Gehäuse montiert werden, kann dieser Effekt bei deutlich höheren Kosten deutlich abgeschwächt werden. Zudem sind auch bei sehr hoher Anzahl von LED- Kanälen im Spektrum immer noch die Einzel- Kanäle erkennbar. Die Weiterentwicklung der LED-Chiptechnologie hin zu höheren Wirkungsgraden führt zumeist auch zu einer Abnahme der Halbwertsbreite der Emission, dies bedeutet, dass dieser Effekt auch in Zukunft bei Multi- Chip- LED- Quellen erhalten bleiben wird.

Breitband- LED- Quellen

Die Konversion von Licht oder Strahlung durch Leuchtstoffe wird sowohl bei Leuchtstofflampen (Konversion von UV- Strahlung in sichtbares Licht) als auch bei weißen LEDs (zumeist Konversion von blauem Licht in gelbes oder grünes und rotes Licht) angewandt. In den Leuchtstoffen finden dabei strahlende und nicht strahlende Energieübergänge statt, dabei regt ein Photon die Emission eines Photons längerer Wellenlänge an. Die Kombination geeigneter Leuchtstoffe ermöglicht die Darstellung von breitbandigen LEDs sowohl im sichtbaren als auch im nahen Infrarot (NIR). In Abbildung 5 sind die Spektren 3 verschiedener, breitbandiger LEDs dargestellt, bei der durch Kombination geeigneter Leuchtstoffe mit einer Anregung mit blauem Licht (450 -460 nm) oder mit UVA – Strahlung (365-375 nm) eine entsprechend breitbandige Emission erreicht wird.

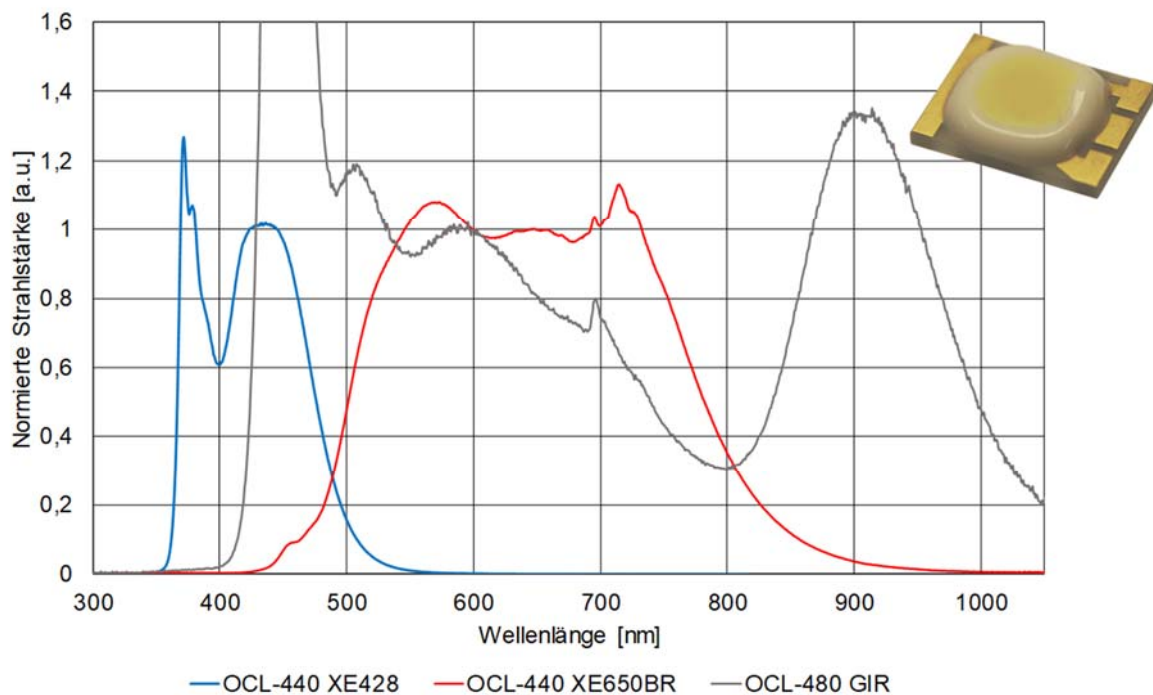


Abb. 5: Emissionsspektren von 3 verschiedenen Breitband- LED

- OCL-440 XE428, Anregung 365 nm, Halbwertsbreite 70 nm
- OCL-440 XE650BR, Anregung 450-460 nm, Halbwertsbreite 265 nm
- OCL-480 GIR, Anregung 450-460 nm, Nutzbarer Wellenlängenbereich 440-1050 nm

Die Verschiebung der Wellenlänge des sekundären Photons wird als Stokes- Shift bezeichnet, die Energiedifferenz zwischen anregendem Photon und sekundärem Photon fällt als Verlustwärme an. Aus der Differenz der Wellenlänge lässt sich diese Wärmemenge einfach gemäß

$$\Delta E_{\text{photon}} = hc \left(\frac{1}{\lambda_{\text{out}}} - \frac{1}{\lambda_{\text{in}}} \right) = 1,24 \cdot 10^3 \left(\frac{1}{\lambda_{\text{out}}} - \frac{1}{\lambda_{\text{in}}} \right)$$

bestimmen. In Tabelle 1 sind einige Energiedifferenzen bestimmt:

anregendes Photon	emittiertes Photon	Energiedifferenz	
		[eV]	[%]
[nm]	[nm]		
455	580	0,587	21,6%
455	780	1,136	41,7%
455	900	1,347	49,4%
365	900	2,019	59,4%

Tabelle 1: Energiedifferenzen zwischen anregender und emittierter Photonenenergie

Einen Wirkungsgrad der Leuchtstoffe für die Zahl der emittierten Photonen zur Zahl der anregenden Photonen größer 90% unterstellend, ist die Konversion von Blau nach NIR mit einem Energieverlust von 40-50% verbunden. Leuchtstoffe im sichtbaren Bereich erreichen diese Wirkungsgrade, Leuchtstoffe im NIR liegen häufig darunter. Diese Verlustwärme muss bei der Auslegung des Kühlkonzepts beachtet werden.

Direkt emittierende LEDs zeichnen sich in der Regel durch sehr kurze Schaltzeiten $< 1 \mu\text{s}$ aus. Ähnlich geringe Schaltzeiten haben Leuchtstoffe im sichtbaren Bereich. Leuchtstoffe im IR- Bereich haben längere Schaltzeiten, weiterhin weisen sie ein Nachleuchten aus. In Abbildung 6 sind die optischen Messsignale der Emission 3 verschiedener LEDs bei einem 350 mA Strom- Impuls dargestellt. Der eingesetzte Impulsgenerator erzeugt einen Strom- Impuls von 350 mA bei einer Anstiegs- und Abfallzeit kleiner $0,05 \mu\text{s}$, das Fotodiodensignal (Reaktionszeit kleiner 10 ns) wurde mit einem Digitaloszilloskop mit einer Abtastrate von 2,5 GSa/s aufgenommen. Die Pulslänge und das Tastverhältnis wurden so gewählt, dass das Nachleuchten vollständig abklingen kann.

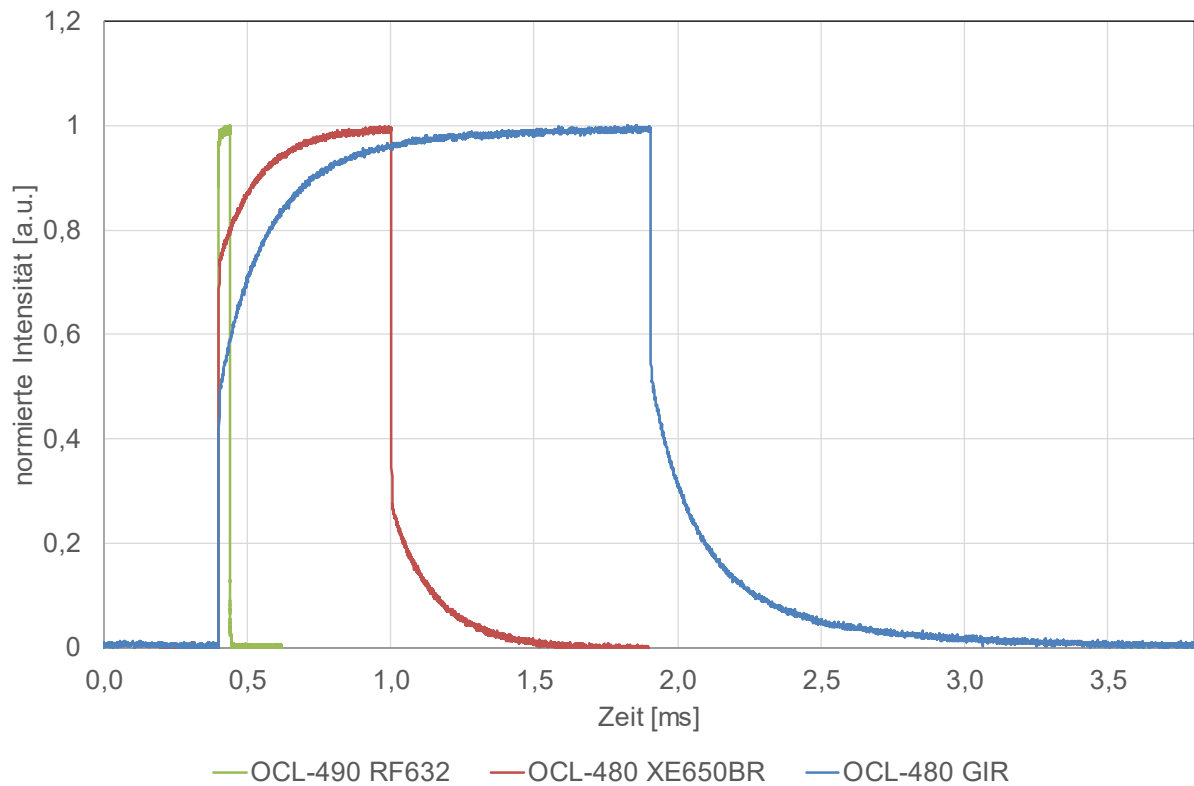


Abb. 6: Impulsverhalten von einem Direktmitter (OCL-490 RF632) und zwei Breitband – LEDs im Vergleich.

Während bei der OCL-490 RF623 (direkt emittierende LED roter Emission) eine Schaltzeit kleiner $0,15 \mu\text{s}$ beobachtet wird (Intensitätsanstieg von 10 % Grundsignal auf 90% des Maximalsignals), liegen die Schaltzeiten der Konversions- LED bei $t_{on}=320\mu\text{s}$ / $t_{off}=360\mu\text{s}$ für die OCL-480 GIR und bei $t_{on}=140\mu\text{s}$ / $t_{off}=150\mu\text{s}$ für die OCL-480 XE650BR. Wie in Abb. 6 zu erkennen ist, muss für ein stabiles Spektrum der Lichtquelle diese deutlich, beispielsweise ca. 1 ms im Fall der OCL-480 GIR, vor der ersten Aufnahme der Kamera eingeschaltet werden.

Die Breitband- LEDs können in verschiedenen Gehäusen gefertigt werden, eine Auswahl ist in Abbildung 7 dargestellt. Die Baureihen OCL-440 und OCL-450 sind für Maximalströme im DC- Betrieb von 350 mA ausgelegt, die Baureihe OCL-480 für einen Maximalstrom von 500 mA. Bei der Baureihe OMC-744 sind 4 Chips auf einer Fläche von $2,3 \times 2,3 \text{ mm}$ angeordnet, die in Reihe geschaltet werden können. Somit ist eine kompakte Strahlungsquelle darstellbar, die in der Variante OMC-744 GIR eine optische Strahlungsleistung von 220 mW @ 350 mA erreicht.

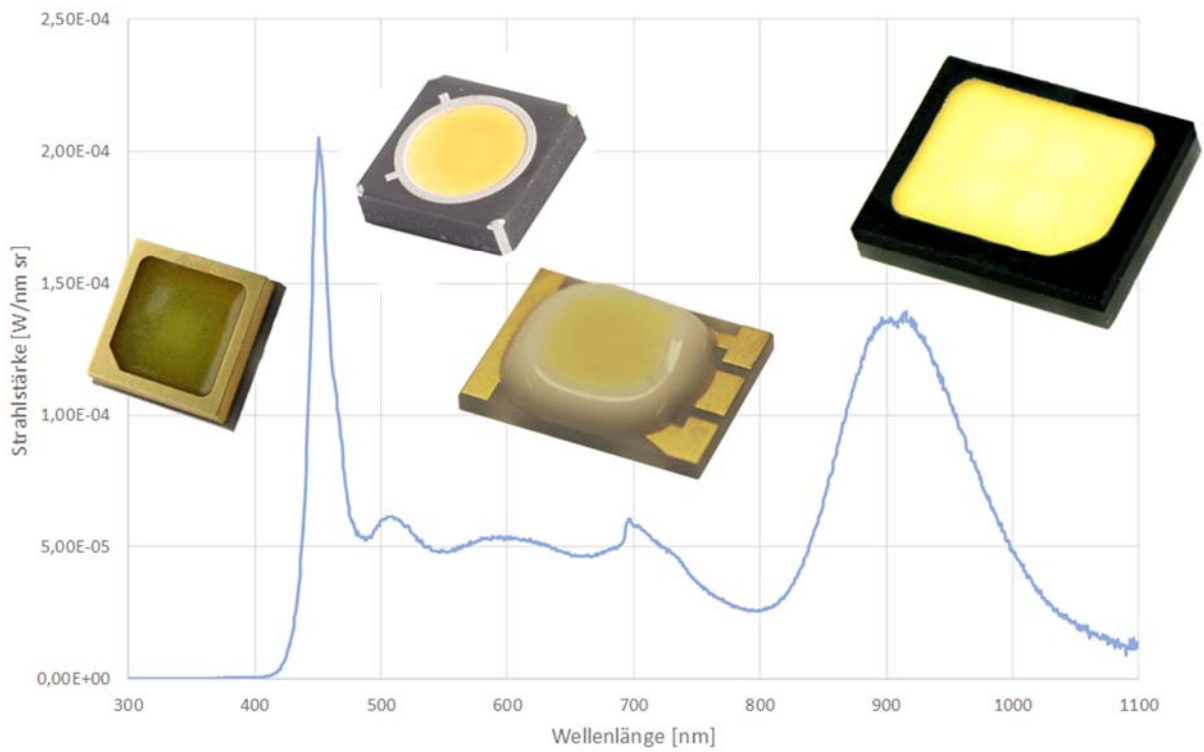


Abb. 7: Gehäusevarianten für Breitband- LED, von links die Baureihen OCL-440, OCL-450, OCL-480 und OMC-744

Die Abstrahlcharakteristik dieser LEDs entspricht weitgehend der eines Lambert-Strahlers mit 120° Öffnungswinkel und die emittierende Fläche entspricht der Vergussfläche. Bei allen Baureihen kann durch Anwendung von Reflektoren die Abstrahlcharakteristik angepasst werden, derartige Reflektoren sind von verschiedenen Anbietern bekannt. Durch die OSA Opto Light GmbH wurde ein Reflektorarray mit 12 Reflektoren und einem Öffnungswinkel von 15-20° realisiert, mit dem durch den Anwender leistungsstarke Beleuchtungseinheiten realisiert werden können. Die Demonstratoren der OSA Opto Light GmbH, dort für den UVA und UVC- Bereich entwickelt, ermöglichen die Integration von bis zu 240 LEDs der Baureihe OCL-480 in einem Strahler mit einer Emissionsfläche von 38 x 1140 mm (Abbildung 8).



Abb. 8: Demonstrator eines wassergekühlten LED- Strahlers für 72 LEDs der Baureihe OCU-480 oder OMC-747. Dieser Strahler wurde ursprünglich für den Einsatz von UVA- LED entwickelt, ist jedoch für Breitband- LEDs ebenso einsetzbar.

Vergleich der Strahlungsquellen

In Tabelle 2 sind wesentliche Eigenschaften der Strahlungsquellen und Vor- und Nachteile bei der Anwendung vergleichend zusammengestellt. Neben diesen 3 Strahlungsquellen großer Leistung sollen hier noch die lasergepumpte Plasma- Lichtquellen erwähnt werden, die den Spektralbereich von 400 nm bis 2400 nm bandenarm abdecken können und bei vergleichsweise geringer Leistung für den Dauerbetrieb (mit Vorwärmzeit) ausgelegt sind und eher für kleine Bildfelder geeignet sind (18).

	Thermisch	Multi- Chip	Breitband- LED
Wellenlängenbereich	500-2400 nm	Prinzipiell von 265 nm UVC bis 1700 nm SWIR, hier 365-1100 nm vorgestellt	430-1050 nm mit einer LED, 400-1050 nm mit Effizienz Verlust oder 2 LEDs
Ansteuerung (Komplexität, Betriebsart)	Einfach, Gleichspannung	Komplex, DC oder Impulsbetrieb	Einfach, DC oder Impulsbetrieb
Triggerbar	Nein	Ja	Ja mit Einschränkung
Farbschatten bei 3D-Objekten	Nein	Ja	Nein
Temperaturabhängigkeit des Spektrums	Gering	Mittel	Gering

Spektrum an die Messaufgabe anpassbar	Nein	Ja, auch bei Wechsel der Applikationsaufgabe	Bedingt beim Design der LED, am fertigen Gerät nein
Verfügbarkeit	zunehmend Kritisch	Gut	Sehr gut
Kosten	Noch gering	Diskrete SMD-LED gering, Ansteuerung und Software hoch	LED moderat, in der Tendenz fallend, Ansteuerung gering

Tabelle 2- Vergleich der Strahlungsquellen

Auswirkung verschiedener Strahlungsquellen auf das Reflexionsspektrum

Die Auswirkung der Anwendung verschiedener Beleuchtungsquellen auf das Reflexionsspektrum soll an einem Beispiel gezeigt werden.

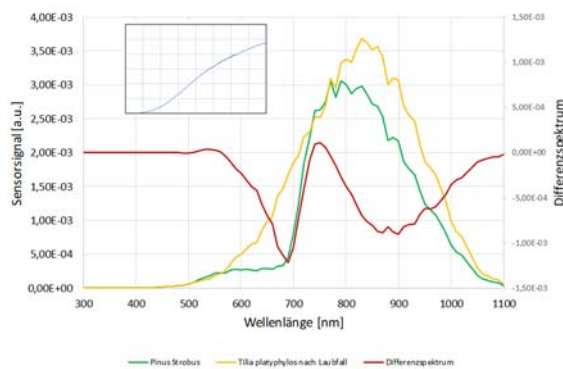


Abb. 9a: Reflexionsspektrum von Pflanzen bei Beleuchtung mit einem 3500 K thermischen Strahler

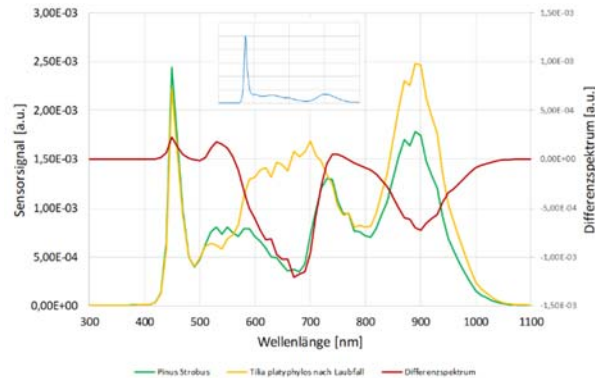


Abb. 9b: Reflexionsspektrum von Pflanzen bei Beleuchtung mit einer OCL-480 GIR

Die Reflexionsspektren der beiden Pflanzenblätter von Abbildung 1 unter Beleuchtung mit einem 2500 K thermischen Strahler und mit einer LED OCL-480 GIR sind in Abb. 8 vergleichend dargestellt. Zur Auswertung wird die Differenz zwischen den beiden Spektren herangezogen. An Hand dieser Daten lassen sich die Arbeitspunkte für die Auswertung der Bilder definieren. Die maximalen Unterschiede zwischen den beiden Messobjekten bei den Wellenlängen 670 nm und 890 nm sind in beiden Beleuchtungsszenarien gut erkennbar, die Wellenlängen gleichen Reflexionsgrades, die als Helligkeitsreferenz genutzt werden können, sind 490 nm und 750 nm. Das Messsignal bei 750 nm, 670 nm und 890 nm lässt bei beiden Quellen ein geringes Signalrauschen erwarten. Das Messsignal bei 490 nm ist bei Beleuchtung mit einer LED-Quelle für ein gutes Bild hinreichend hoch, während bei Beleuchtung mit einer thermischen Quelle die Messwerte auf Grund der geringen Beleuchtungsstärke ein sehr hoher Rauschanteil zu erwarten ist, der eine Auswertung erschwert.

Zusammenfassung

In diesem White Paper wurden die drei verschiedenen Lösungen für die künstliche Beleuchtung von Beobachtungsfeldern bei der Hyper- oder Multispektralen Bildaufnahme vorgestellt und diskutiert. Die LED-Technologie mit einer direkt vom Chip emittierten Strahlung und durch Leuchtstoffe konvertierter Strahlung ermöglicht effiziente Strahlungsquellen großer Bandbreite, mit denen die Vorteile breitbandiger Strahlungsquellen mit denen der LED-Technologie kombiniert werden können.

Diese LEDs ermöglichen Beleuchtungen mit:

- Kürzerer Belichtungszeiten durch getriggerten Impulsbetrieb der LED
- Geringerer thermischen Belastung des Objekts
- Mit im Vergleich zu thermischen Strahlern höherer Energieeffizienz und größerer Zuverlässigkeit
- Mit im Vergleich zu Multi- Chip Quellen vergleichsweise einfacher Ansteuerung
- Reproduzierbaren, stabilen und anforderungsspezifisch variierbaren Spektren

Bei der Auslegung der Ansteuerung und der Synchronisation mit der bildaufnehmenden Kamera ist das Einschaltverhalten der LED und das Nachleuchten der Leuchtstoffe, vor allem im infraroten Spektralbereich zu beachten.

Literatur

1. **Fachverband für Strahlenschutz e.V.** *Leitfaden „Sichtbare und infrarote Strahlung“*. Köln : Fachhochschule Köln – Forschungsbereich Medizintechnik und Nichtionisierende Strahlung , 15.12.2011.
2. **Feynmann, Richard P., Leighton, Robert P. und Sands, Matthew.** *Feynman Vorlesungen über Physik Band 1*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH : München, 2007.
3. **Joachim Herz Stiftung.** www.leifiphysik.de. [Online] Avonis - New Media, 2021. [Zitat vom: 24. 08 2021.] <https://www.leifiphysik.de/optik/farben/grundwissen/additive-farbmischung>.
4. **Sony.** www.sony.com. *www.sony.com*. [Online] 11. 06 2008. [Zitat vom: 24. 08 2021.] <https://www.sony.com/en/SonyInfo/News/Press/200806/08-069E/>.
5. **JAI A/S.** <https://www.jai.com>. [Online] 2021. [Zitat vom: 08. 08 2021.] <https://www.jai.com/multispectral-imaging-machine-vision-systems>.
6. **Geladi, Paul I.M., Grahn, Hans F. und Burger, E. James.** *Multivariate Images, Hyperspectral Imaging: Background and Equipment*. [Hrsg.] Hans F., Geladi, Paul L.M. Grahn. *Techniques and applications of hyperspectral image analysis*. 1. Chichester : John Wiley & Sons Ltd, 2007, S. 5.
7. **Photonics BW e.V.** [Online] 2021. [Zitat vom: 08. 08 2021.] <http://photonicsbw.de/projekte/hyperinno/>.
8. **Knoll, Alexander.** *Von der Kamera zur Komplettlösung. Markt und Technik*. 2021, Bd. 27, S. 30-31.
9. **MicaSense .** [Online] 23.02.2021. [Zitat vom: 08. 08 2021.] <https://micasense.com/researchers-and-academics/>.
10. **Fraunhofer-Institut für Photonische Mikrosysteme IPMS.** *Fraunhofer-Allianz Food Chain Management*. [Online] 2020. [Zitat vom: 08. 08 2021.] https://www.fcm.fraunhofer.de/de/beispiele12/optische_analysemithilfedernahinfrarot-spektralanalytik.html.
11. **Diaspective Vision GmbH.** diaspective-vision.com. [Online] Diaspective Vision GmbH, 2021. [Zitat vom: 08. 08 2021.] <https://diaspective-vision.com/technologie/>.
12. **Chris Gurk.** www.baumkunde.de. [Online] Gurkcity Webdesign, 2021. [Zitat vom: 24. 08 2021.] https://www.baumkunde.de/Tilia_platyphyllos/Blatt_Herbst/.
13. **Gurk, Chris.** www.baumkunde.de. [Online] Gurkcity Webdesign, 2021. [Zitat vom: 24. 08 2021.] https://www.baumkunde.de/Pinus_strobus/Bild2/.
14. **inno-spec GmbH.** [Online] 2020. [Zitat vom: 08. 08 2021.] <https://inno-spec.de/produkte/hsi>.
15. **Wyszecki, Günther und Stiles, W. S.** *Color Science, Seite 5 ff.* 2000. New York : John Wiley & Sons Inc, 2000.
16. **Jüstel, Thomas.** FH Münster. [Online] [Zitat vom: 25. 08 2021.] https://www.fh-muenster.de/ciw/downloads/personal/juestel/juestel/4-InkohaerenteLichtquellen-Glueh-und_Halogenlampen.pdf.
17. **National Renewable Energy Laboratory.** www.nrel.com. [Online] [Zitat vom: 25. 08 2021.] <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-am1.5.html>.
18. **NKT Photonics A/S.** *www.nktphotonics.com*. [Online] [Zitat vom: 24. 08 2021.] <https://www.nktphotonics.com/lasers-fibers/product/superk-evo-industrial-supercontinuum-lasers/>.