

# Aufbau und Anwendung von Spektroradiometern

**042** Steffen Görlich und Thomas Morgenstern, JETI Technische Instrumente GmbH, Jena

Optische Anzeigen und Displays spielen im täglichen Leben eine immer wichtigere Rolle. Neben der klassischen Bildröhre setzen sich neue Technologien wie das LCD oder LED-Anzeigen mehr und mehr durch. Für Beleuchtungszwecke wurden neue Lichtquellen entwickelt, und auch die LED wird sich in diesem Bereich noch weitaus stärker etablieren. Deshalb wachsen auch die Anforderungen und der Umfang messtechnischer Bewertungen derartiger Lichtquellen. Dabei spielen sowohl farbmess technische Größen wie der Farbort als auch lichttechnische Größen wie Leuchtdichte oder Beleuchtungsstärke eine Rolle, wobei insbesondere die Qualitätskontrolle im Produktionsprozess immer wichtiger wird.

Für derartige Messungen werden hauptsächlich Spektroradiometer verwendet. Im vorliegenden Beitrag wird ein Überblick zu Aufbau und Anwendung dieser Geräte gegeben, weiterhin werden die Eigenschaften am Beispiel zweier Messgeräte genauer dargelegt.

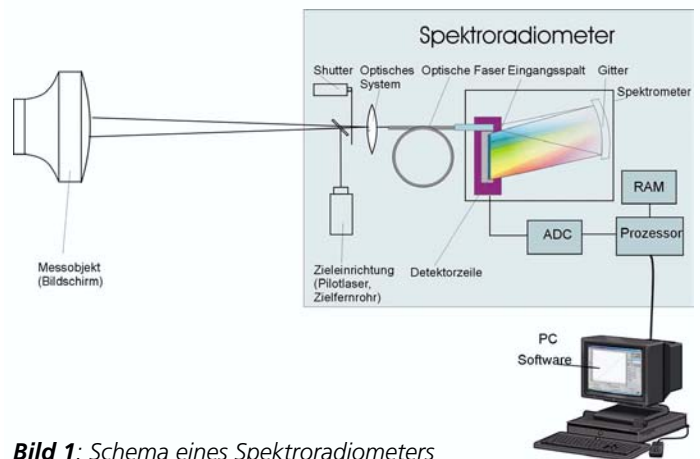
## 1 Einleitung

Spektroradiometer vermessen spektral verteilte optische Signale mit einem kalibrierten Spektrometer und werten die gewonnenen Spektren aus. Eine einfachere Messmethode für die o. g. Größen beruht auf der Verwendung von Siliziumempfängern, die mit verschiedenen Filtern versehen werden. Zur Ermittlung von photometrischen Größen reicht ein  $v(\lambda)$ -Filter aus, das der Empfindlichkeit des menschlichen Auges angepasst ist. Für Farbmessungen werden mindestens drei Filter für den roten, den grünen und den blauen Wellenlängenbereich benötigt. Diese Messmethode liefert aufgrund der prinzipiellen Abweichung der Transmissionscharakteristik der Filter ungenauere Ergebnisse als die Methode mit einem Spektroradiometer. So lässt sich die Augenempfindlichkeitskurve für photometrische Messungen wesentlich genauer durch Tabellenfunktionen mittels Software nachbilden, als dies mit Filtern möglich ist. Nachteilig bei der spektral aufgelösten Messung sind allerdings die im allgemeinen wesentlich längere Messzeit, die geringere Empfindlichkeit des Messsystems sowie der höhere technische Aufwand und die damit verbundenen höheren Kosten.

## 2 Aufbau eines Spektroradiometers

Bei einem Spektroradiometer handelt es sich, vereinfacht gesagt, um ein kalibriertes Spektrometer mit zusätzlichen Funktionen. **Bild 1** zeigt die Hauptbestandteile eines derartigen Gerätes.

Der Grundbaustein und das parameterbestimmende Element ist das Spektrometer. Es werden heute fast ausschließlich Gitterspektrometer mit Zeilendetektoren eingesetzt. Die Eingangsoptik des Gerätes richtet sich nach der Art des Messobjektes (siehe Abschnitt 6) und kann eine gerichtete oder eine diffuse Empfangscharakteristik aufweisen. Zusätzlich besitzt jedes Radiometer mit gerichteter Empfangscharakteristik eine Zieleinrichtung, um den Messfleck genau positionieren zu können. Außerdem ist ein mechanischer Verschluss (Shutter) notwendig, der zur



**Bild 1:** Schema eines Spektroradiometers

Ermittlung der Korrekturwerte für das Dunkelstromverhalten des Messsystems verwendet wird. Ein weiteres wichtiges Element jedes modernen Spektroradiometersystems ist die Software im Gerät (Firmware) bzw. für den PC. Sie ermöglicht eine hohe Flexibilität bei der Ermittlung von Messdaten aus den ermittelten Spektren, ihre Eigenschaften und Möglichkeiten stellen neben den optischen Parametern ein bestimmendes Qualitätsmerkmal des Systems dar. Es werden hauptsächlich sehr komplexe Softwarelösungen angeboten, die sich bis ins Detail konfigurieren lassen. Die wesentlichen Aufgaben der Software sind die Berechnung des Messspektrums aus den Rohdaten und der Eichkurve der spektralen Empfindlichkeit, die Berechnung der integralen Messwerte aus diesem Spektrum sowie die Datenausgabe und -speicherung. **Bild 2** zeigt die Bedienoberfläche einer Radiometriesoftware.

## 3 Kalibrierung

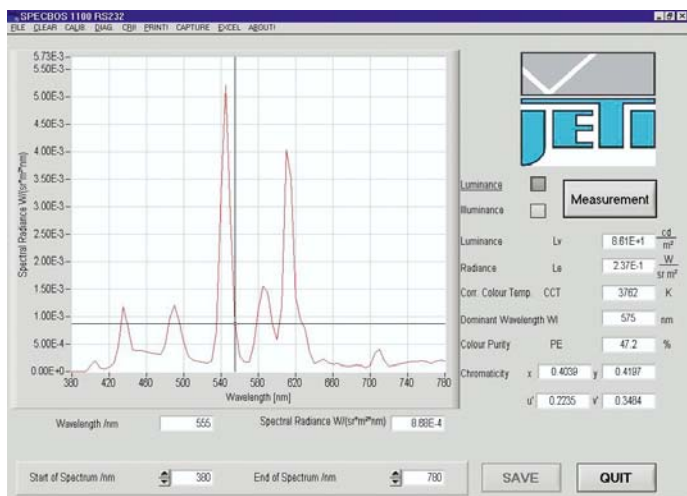
Die Kalibrierung jedes Spektroradiometers muss sowohl für die Wellenlängen- als auch für die Intensitätsachse erfolgen. Bei der Wellenlängenkalibrierung geht es um das Ermitteln der Pixelnummer-Wellenlängen-Zuordnung, wie es bei jedem Zeilenspektrometer notwendig ist. Diese Beziehung wird in der Regel durch ein Polynom erster bis vierter Ordnung ausgedrückt, wobei die einzelnen Koeffizienten im Gerät abgespeichert werden.

$$\lambda(n) = k_0 + n \cdot k_1 + n^2 \cdot k_2 + n^3 \cdot k_3 + n^4 \cdot k_4 \quad (1)$$

mit  $\lambda$  = Wellenlänge,  $k_i$  = Koeffizient i-ter Ordnung und  $n$  = Pixelnummer.

Die Wellenlängenkalibrierung wird meistens mit Hilfe einer Linienlichtquelle (Gasentladungslampe) vorgenommen, die möglichst über den gesamten Wellenlängenbereich des Spektrometers verteilte Linien aufweist.

Ein bezüglich der Intensität nicht kalibriertes Spektrometer liefert das gemessene Spektrum gewichtet mit der Apparatefunktion (Empfindlichkeitskennlinie). Dadurch wird das zu messende Spektrum verfälscht. Die Intensitätsachse kann in mehreren Schritten kalibriert werden. Man benutzt dafür Standardlichtquellen, beispielsweise kalibrierte Ulbrichtkugeln mit interner Lampe oder Lichtstärkelampen, von denen die jeweilige spektrale Verteilung bekannt ist.



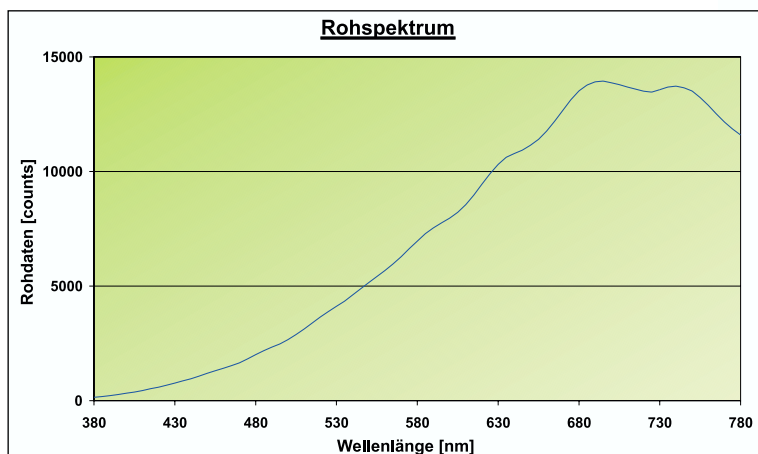
**Bild 2:** Bildschirmsicht einer Radiometriesoftware. Es ist zu erkennen, dass sowohl radiometrische als auch photometrische Größen angezeigt werden.

Die Intensitätskalibrierung eines Spektrometers erfolgt durch Vergleich des aufgenommenen Rohspektrums einer Kalibrierlampe mit den bekannten Lampendaten. Die somit gewonnene Transferfunktion wird bei den späteren Messungen zur Eliminierung des Systemeinflusses benutzt.

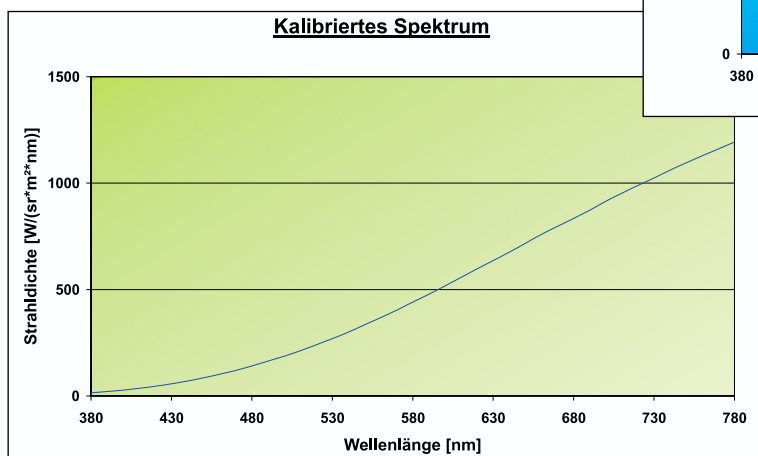
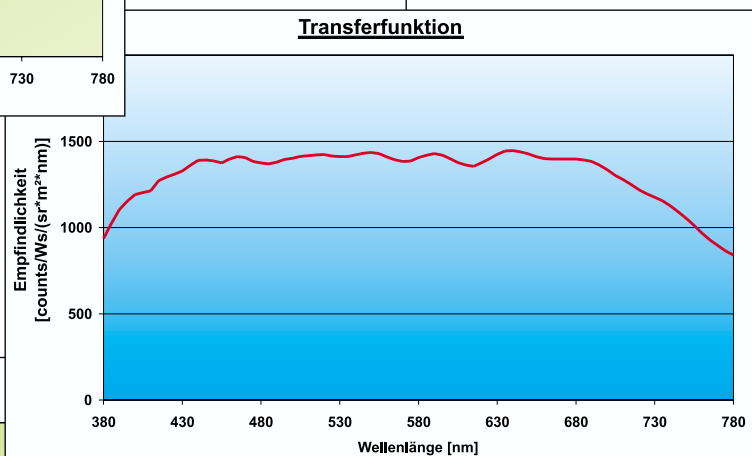
Eine relative Kalibrierung (Einheit der Intensitätsachse [%]) ist für die Farbmessung ausreichend. Für die Messung von radiometrischen und photometrischen Daten ist eine Absolutkalibrierung notwendig. **Bild 3** zeigt ein Rohspektrum, die Transfer- oder Empfindlichkeitsfunktion des verwendeten Gerätes sowie das schließlich unter Berücksichtigung der Integrationszeit ermittelte absolute Spektrum in spektraler Strahllichte (Einheit der Intensitätsachse  $[W/(sr \cdot m^2 \cdot nm)]$ ).

In einem weiteren Schritt kann eine applikationsspezifische Kalibrierung vorgenommen werden, um zielgerichtet die Messgenauigkeit für eine bestimmte Anwendung zu erhöhen. Dazu sind Proben erforderlich, die den eigentlichen Messobjekten entsprechen und von einem Kalibrierinstitut vermessen wurden. Man nennt diese Art der Kalibrierung auch Substitutionsmethode [1]. Die Rückführbarkeit der Kalibrierung auf die Werte einer nationalen Kalibriereinrichtung (z.B. NIST, NPL oder PTB) muss für jedes Spektoradiometer gegeben sein.

Das Intensitätsniveau eines Messobjektes weicht in der Regel vom Intensitätsniveau während der Kalibrierung ab, wobei jedoch eine möglichst vollständige Aussteuerung des Systems für reproduzierbare Messungen notwendig ist. Diese Dynamikanpassung (bis zu 6 Dekaden) erfolgt über eine entsprechende Veränderung der Integrationszeit. Deshalb muss das Messsystem zum Erreichen einer hohen Genauigkeit eine gute Linearität zwischen Intensität und Integrationszeit (Abweichungen im Promille-Bereich) aufweisen. Es können sich bei spektoradiometrischen Messungen von Lichtquellen geringer Intensität Messzeiten bis zu einer Minute ergeben. Damit sind thermisch generierte Dunkelströme des Photodiodenarrays des Spektrometers nicht mehr zu vernach-



**Bild 3:** Rohspektrum und absolutes Spektrum (Halogenlampe) sowie Transferfunktion eines Gerätes



lassen. Zur Ermittlung der optimalen Aussteuerung wird zunächst bei einer festgelegten Anfangsintegrationszeit gemessen. Aus dem Spektrum wird ermittelt, ob es sich um eine Über- oder Unterbelichtung handelt, und die Integrationszeit sukzessive so angepasst, dass die Dynamik des dem Photodiodenarray nachgeschalteten AD-Wandlers möglichst vollständig ausgenutzt werden kann. Abschließend ist noch eine Dunkelmessung mit der gefundenen Integrationszeit nötig,

lassen. Zur Ermittlung der optimalen Aussteuerung wird zunächst bei einer festgelegten Anfangsintegrationszeit gemessen. Aus dem Spektrum wird ermittelt, ob es sich um eine Über- oder Unterbelichtung handelt, und die Integrationszeit sukzessive so angepasst, dass die Dynamik des dem Photodiodenarray nachgeschalteten AD-Wandlers möglichst vollständig ausgenutzt werden kann. Abschließend ist noch eine Dunkelmessung mit der gefundenen Integrationszeit nötig,

lassen. Zur Ermittlung der optimalen Aussteuerung wird zunächst bei einer festgelegten Anfangsintegrationszeit gemessen. Aus dem Spektrum wird ermittelt, ob es sich um eine Über- oder Unterbelichtung handelt, und die Integrationszeit sukzessive so angepasst, dass die Dynamik des dem Photodiodenarray nachgeschalteten AD-Wandlers möglichst vollständig ausgenutzt werden kann. Abschließend ist noch eine Dunkelmessung mit der gefundenen Integrationszeit nötig,

bevor das Messergebnis errechnet werden kann. Durch diese Prozeduren kommt die im Vergleich zur Filtermethode wesentlich längere Messzeit zustande.

Bei Messungen an ähnlichen Messobjekten, beispielsweise in der Lampenproduktion, ist es zur Verringerung der Messzeit möglich, die Integrationszeitsuche und die Messung des Dunkelsignals unter der Voraussetzung, dass konstante Umgebungsbedingungen gegeben sind, nur einmal durchzuführen und weitere Messungen ebenfalls mit der gefundenen Integrationszeit durchzuführen.

#### 4 Gerätetechnik

Es gibt eine Reihe von Spektroradiometern (beispielsweise das CS-1000 von Minolta, **Bild 4**) für den allgemeinen Laboreinsatz, die sich durch folgende Punkte auszeichnen:

- Fokussierbarkeit des optischen Systems,
  - Zielanpeilung durch speziellen optischen Sucher,
  - hochauflösendes Spektrometer,
  - Software mit vielfältigen Funktionen und Konfigurationseinstellungen,
  - umfangreiches Zubehör zur Erweiterung der Messmöglichkeiten.
- Außerdem gibt es Geräte, die für spezielle Messaufgaben entwickelt wurden, beispielsweise zur spektroradiometrischen Vermessung von LEDs.

Zusätzlich zu diesen Laborgeräten sind seit einigen Jahren auch kompakte Geräte auf dem Markt, die zwar eine geringere Funktionalität aufweisen, aber deutlich preiswerter und einfach bedienbar sind. Damit sind sie insbesondere für den Einsatz in der Qualitätskontrolle geeignet oder direkt im automatisierten Produktionsprozess einsetzbar. Zu diesen Geräten gehört das in **Bild 5** dargestellte specbos 1200 der Fa. JETI Technische Instrumente GmbH. Es weist zum Ausrichten auf die Messposition anstelle eines Suchers einen internen Pilotlaser auf. Die Optik besteht aus einer asphärischen Linse und ist nicht fokussierbar. Das Gerät hat einen festen Öffnungswinkel von  $2^\circ$ . Weiterhin besitzt es einen externen Diffusor, mit dem der Messmodus von Leuchtdichte / Strahldichte in Beleuchtungsstärke / Bestrahlungsstärke verändert werden kann. Das Gerät ist auch deshalb für den online-Einsatz geeignet, da es die Möglichkeit bietet, aus dem Spektrum berechnete Werte direkt auszugeben (z. B. Leuchtdichte oder Farbwerte), die von einem Host-System zur Gut/Schlecht-Entscheidung oder zur Qualitätsdokumentation verwendet werden können.

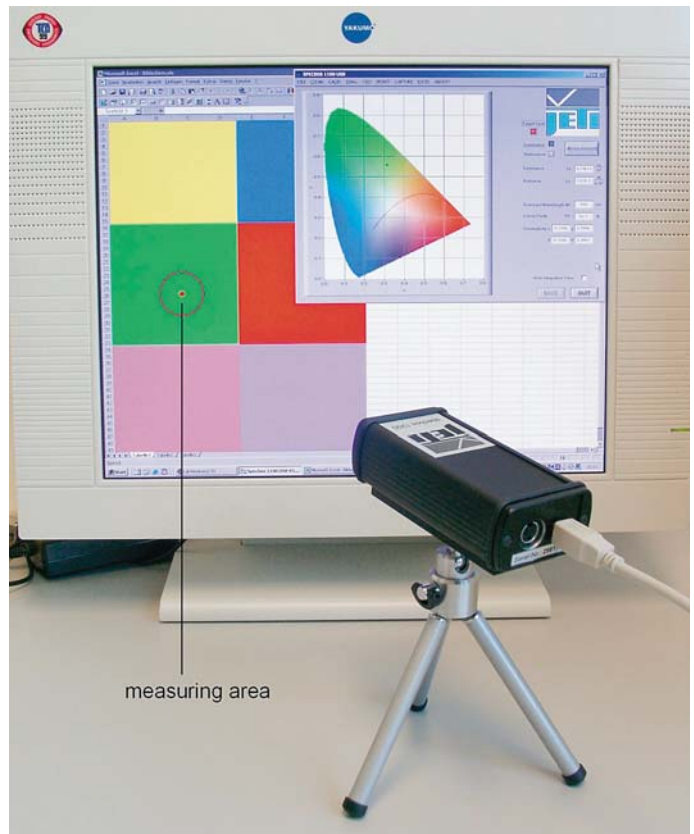
Der Empfangsteil eines Messgerätes zur Ermittlung der Farbkoordinaten von nichtselbstleuchtenden Objekten entspricht im wesentlichen dem eines Spektroradiometers. Deshalb sind vereinzelt auch Geräte am Markt, die sowohl Selbst- als auch Nichtselbstleuchter vermessen können.

Der Empfangsteil eines Messgerätes zur Ermittlung der Farbkoordinaten von nichtselbstleuchtenden Objekten entspricht im wesentlichen dem eines Spektroradiometers. Deshalb sind vereinzelt auch Geräte am Markt, die sowohl Selbst- als auch Nichtselbstleuchter vermessen können.

Der Empfangsteil eines Messgerätes zur Ermittlung der Farbkoordinaten von nichtselbstleuchtenden Objekten entspricht im wesentlichen dem eines Spektroradiometers. Deshalb sind vereinzelt auch Geräte am Markt, die sowohl Selbst- als auch Nichtselbstleuchter vermessen können.

#### 5 Kennwerte und Auswahlkriterien von Spektroradiometern

Die grundsätzlichen Kennwerte von Spektroradiometern entsprechen denen von Spektrometern. Hinzu kommen Angaben zu den eigentlichen radiometrischen und farbmesstechnischen Größen, wie Mess-



**Bild 5:** Kompaktes Spektroradiometer specbos 1200 (JETI GmbH)

bereich, Reproduzierbarkeit sowie Genauigkeit.

Die wichtigsten optischen Kennwerte eines Spektrometers [2] sind der Wellenlängenbereich und die optische Auflösung, d. h. die spektrale Breite, mit der eine Emissionslinie in diesem Bereich detektiert wird. Die optische Auflösung wird bestimmt durch die Eingangsspaltgröße, die Fokallänge des Systems und die Dispersion des Gitters. Die Dynamik des Systems wird wesentlich durch die Empfangszeile bestimmt. Es werden in Spektroradiometern vorzugsweise Photodiodenzeilen eingesetzt, die eine um mindestens 10-fach höhere Dynamik im Vergleich zu herkömmlichen CCD-Zeilen aufweisen. Die Geräteempfindlichkeit wird durch die Transmission der Empfangsoptik, die Beugungseffizienz des Gitters und die Empfindlichkeit der Empfängerzeile beeinflusst. Es gibt verschiedene Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Systemparametern – so kann man die Auflösung durch Verringern der Eingangsspaltbreite erhöhen, verliert allerdings dadurch an Signalintensität, was zu einem erhöhten Rauschen und zu einer verlängerten Messzeit führen kann.

Die Parameter und Methoden zur Charakterisierung von Spektroradiometern sind in [3] angegeben, Grenzwerte zur Klassifizierung finden sich in [4]. **Tabelle 1** vergleicht beispielhaft ein Labor- und ein Kompaktspektroradiometer.

#### 6 Eingangsoptik und Messgrößen

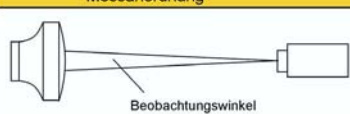
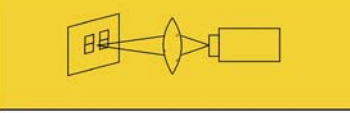


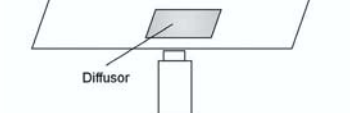
Die Eingangsoptik eines Spektroradiometers ist für Ermittlung von farbmetrischen Größen unabhängig von der Art der Lichtquelle. In den einzelnen Anwendungsgebieten werden lediglich unterschiedliche Farbmetriksysteme bevorzugt angewandt, z. B.  $x, y, Lab, u', v'$  oder Dominante Wellenlänge und Farbreinheit. Zusätzlich werden im Spektroradiometer weitere Farbgrößen wie die ähnlichste Farbtemperatur und der Farbwiedergabeindex von Lichtquellen (Color Rendering Index) ermittelt. Die Berechnungen erfolgen geräteintern oder mittels PC-Soft-

	<b>Minolta CS-1000 A [5]</b>	<b>JETI specbos 1200 [6]</b>
Messgrößen	Strahldichte / Leuchtdichte	Strahldichte / Leuchtdichte Bestrahlungsstärke / Beleuchtungsstärke
Optik	auswechselbar, 2 verschiedene Objektive, variabler Fokus	fest, divergent, Diffusor für Bestrahlungsstärkemessung
Messwinkel	1°	2°
Messfleckdurchmesser	7,9 mm bei 36 cm Abstand 1,2 mm bei 5 cm Abstand	6 mm bei 20 cm Abstand 20 mm bei 100 cm Abstand
Zielfindungssystem	Sucher (Monitor als Option)	Ziellaser
Niedrigstes Messniveau	< 0,25 cd/m <sup>2</sup>	1 cd/m <sup>2</sup>
Empfänger	512 Pixel, gekühlt	128 Pixel
Optische Auflösung	n.a.	9 nm FWHM
Pixelauflösung	0,9 nm	4 nm
Spektrale Genauigkeit	± 0,3 nm	± 0,5 nm
Messzeit bei 1 cd/m <sup>2</sup> 10 cd/m <sup>2</sup> 100 cd/m <sup>2</sup>	max. 33 s max. 15 s max. 5 s	25 s 10 s 5 s

**Tabelle 1:** Gegenüberstellung der wichtigsten Geräteparameter eines Labor- und eines Kompakt-Spektroradiometers

ware nach den entsprechenden Normen sowie den Empfehlungen der CIE.

Anders verhält es sich bei den lichttechnischen Angaben. In Abhängigkeit von der Art der zu vermessenden Lichtquelle werden sinnvollerweise unterschiedliche Messgrößen angewandt, die auch verschiedene Messanordnungen erfordern. **Bild 6** zeigt einige Beispiele von Messobjekten mit den dazugehörigen geeigneten Messmethoden. Mit

Messobjekt	Messanordnung	Messgröße
Bildschirme, Displays		<b>Leuchtdichte</b> [cd/m <sup>2</sup> ]
Segmente bei Displays		<b>Leuchtdichte</b> [cd/m <sup>2</sup> ]
gerichtet strahlende Lichtquellen (Reflektorlampen, LED)		<b>Lichtstärke</b> [cd] = [lm/sr]
Gesamt- abstrahlung bei nicht gerichteten Lichtquellen (Glohlampen, Fluoreszenz- lampen)		<b>Lichtstrom</b> [lm]
Beleuchtete Flächen (Arbeitsplätze), Digital- projektoren		<b>Beleuchtungsstärke</b> [lx] = [lm/m <sup>2</sup> ]

**Bild 6:** Ausgewählte Messobjekte und die jeweils geeignete Messmethode

Hilfe von Vorsatzoptiken können Messgeräte zur Ermittlung unterschiedlicher Größen eingesetzt werden.

**7 Zusammenfassung**

Typische Anwendungen von Spektroradiometern finden sich in der Lampenindustrie, in der Bildschirm- und Displayfertigung, in der LED-Produktion und -verarbeitung sowie in der Fertigung von Digitalprojektoren. Für diese Einsatzgebiete stehen sowohl Labor- als auch Produktionsmessgeräte zur Verfügung. Beide Arten von Geräten liefern eine Vielzahl von lichttechnischen und farbmtrischen Messgrößen.

**Literaturhinweise**

- [1] T. Nägele, R. Distl: LED-Meßtechnik. Photonik 4/1999, S. 12-15
- [2] S. Thomaßen: Miniaturisierte Spektrometer. Photonik 1/1998, S. 20-22
- [3] CIE Publication 69 (1987) Methods of Characterizing Illuminance Meters and Luminance Meters
- [4] DIN 5032/7 Lichtmessung – Klasseneinteilung von Beleuchtungsstärke- und Leuchtdichtemessgeräten
- [5] www.minoltaeurope.com/ii/d/lm/lightmeters\_german.html
- [6] www.jeti.com/Systems/SP.html

**Ansprechpartner**

Steffen Görlich, Thomas Morgenstern  
 JETI Technische Instrumente GmbH  
 Wildenbruchstr. 15, D-07745 Jena  
 Tel. 03641/675-450, Fax 03641/675-455  
 eMail: sales@jeti.com  
 Internet: www.jeti.com

**Die Autoren:**

Dr.-Ing. Steffen Görlich studierte von 1980 bis 1985 an der TH Ilmenau Elektronik-Technologie. Anschließend war er bei Carl Zeiss Jena als Entwickler und später Projektleiter für Technologieentwicklung und Produktion von optoelektronischen Bauelementen tätig, anschließend bis 1998 bei JENOPTIK auf den Gebieten Integrierte Optik und Entwicklung von Messprojektoren.  
 1998 Gründung des Unternehmens JETI Technische Instrumente GmbH, seitdem Geschäftsführender Gesellschafter.

Dipl.-Ing. Thomas Morgenstern studierte bis 1976 an der TU Dresden Informationstechnik. Von 1976 bis 1991 war er bei Carl Zeiss Jena zunächst Entwickler von Hard- und Software im wissenschaftlichen Gerätebau und später als Projektleiter CAD und Bauelemententwicklung tätig. Von 1991 bis 1998 Projektleiter Vorprojekte, Farbmesstechnik und Spektroskopie bei JENOPTIK.

1998 Gründung des Unternehmens JETI Technische Instrumente GmbH, seitdem Geschäftsführender Gesellschafter.