

Strahlende Präsenz

Grundlagen der optischen Messtechnik: Radiometrie

Radiometrie ist die objektive Bewertung der Intensität von Strahlung im Hinblick auf Anwendungen in der optischen Messtechnik. Sobald das Signal in einem optischen Sensor in Kombination mit einer Beleuchtungseinrichtung quantifiziert oder abgeschätzt werden soll, kommen die Messgrößen und Begriffe der Radiometrie ins Spiel. Wer z. B. vorab wissen will, ob 10 LEDs zur Ausleuchtung eines Prüflings ausreichen, damit das Kamerasignal voll angesteuert wird, kommt um die Beschäftigung mit dem Themengebiet Radiometrie nicht herum. Dasselbe gilt für den Vergleich von Lichtquellen oder Beleuchtungseinrichtungen verschiedener Hersteller.



Radiometrische Größen

Radiometrische Messgrößen bewerten die Energie von Strahlung. In diesem Artikel steht die Anwendung in der optischen Messtechnik im Vordergrund. Wir beschränken uns daher auf den sichtbaren Spektralbereich, das UV und den nahen Infrarotbereich, soweit diese mit Photodioden, CCD- und CMOS-Detektoren erfasst werden können. Die Strahlung soll unpolarisiert und inkohärent sein, d.h. die Welleneigenschaften der Strahlung sollen nicht in Erscheinung treten. Zur Vereinfachung gehen wir außerdem zunächst davon aus, dass wir es mit einer spektral schmalbandigen Lichtquelle zu tun haben. Eine typische Lichtquelle, die diese Bedingungen erfüllt, ist eine z.B. rot leuchtende LED mit einer Zentralwellenlänge von z.B. 620 nm und einer spektralen Halbwertsbreite von vielleicht 20 nm. Wenn der Hersteller den LED-Chip in eine Kunststofflinse mit z.B. 5 mm Durchmesser eingebettet hat, wird die Lichtemission in einen Strahlkegel mit vielleicht 20° Öffnungswinkel gebündelt. Betrachtet man diese LED aus genügend großer Entfernung, z.B. aus 50 cm, sieht es so aus, als gehe das Strah-

lenbündel von einer winzigen emittierenden Fläche aus, und wir können die LED als Punktlichtquelle betrachten. Wenn in diesem Strahlenbündel nun eine Photodiode oder eine Kamera montiert wird, kann man mit Hilfe weniger Kenngrößen abschätzen, welches Signal im Detektor entstehen wird.

Eine elementare radiometrische Größe ist die gesamte Strahlungsenergie Q einer Lichtquelle. Damit ist die Energie gemeint, die über alle Emissionsrichtungen integriert von der Quelle innerhalb eines definierten Zeitraums abgestrahlt wird, z.B. die Strahlungsenergie einer Blitzlampe in einem Blitz. Q ist eine Energie und trägt die Einheit Joule. Meist wird nicht Q , sondern die Strahlungsleistung Φ spezifiziert. Φ ist die zeitliche Änderung von Q , also die über alle Emissionsrichtungen der Quelle integrierte abgestrahlte Energie pro Zeiteinheit, angegeben in der Einheit Watt. Generell kann man die von einem Strahlenbündel transportierte Strahlungsleistung quantifizieren, indem man die Strahlungsenergie bestimmt, die pro Zeiteinheit durch den gesamten Querschnitt des Bündels hindurchtritt. Φ wird daher auch als Strahlungsfluss bezeichnet. Strahlungsenergie

Q und Strahlungsfluss Φ sind Erhaltungsgrößen, d.h. sie ändern sich entlang der Ausbreitungsrichtung des Strahlenbündels nicht, solange keine Verluste durch Absorption, Streuung oder Reflexion an Grenzflächen auftreten. Der Hersteller der LED könnte für definierte Betriebsbedingungen z.B. eine Strahlungsleistung von 10 mW spezifizieren, die in einem Kegel mit 20° Öffnungswinkel emittiert wird. Unabhängig vom Abstand von der Quelle treten immer 10 mW Strahlungsleistung durch den Querschnitt des Strahlenbündels. Mit zunehmendem Abstand von der Quelle nimmt jedoch der Querschnitt zu, so dass die Strahlungsleistung auf eine immer größer werdende Fläche verteilt wird. Diese Überlegung führt zur Definition der Strahlungsflussdichte, auch als Bestrahlungsstärke E bezeichnet. E ist der Strahlungsfluss Φ bezogen auf die Fläche, durch die die Strahlung hindurch tritt:

$$E = d\Phi/dA$$

E wird in der Einheit W/m^2 angegeben. Beispielsweise erzeugt die Sonne außerhalb der Erdatmosphäre in der Flughöhe der internationalen Raumstation ISS eine

「 INNOVATION AND SOLUTIONS 」

「 push the button 」



 **AUTOMATICA**
INNOVATION AND SOLUTIONS

4. Internationale Fachmesse für
Automation und Mechatronik

8. – 11. Juni 2010 | Neue Messe München

www.automatica-munich.com



Bestrahlungsstärke von 1350 W/m^2 . Unsere Beispiel-LED hingegen, senkrecht ausgerichtet auf ein weißes Blatt Papier in 50 cm Entfernung, würde eine kreisförmige Fläche mit 8,8 cm Radius ausleuchten und daher auf dieser Fläche von 244 cm^2 eine mittlere Bestrahlungsstärke von $10 \text{ mW}/244 \text{ cm}^2$, also etwa $0,4 \text{ W/m}^2$ liefern. Die Bestrahlungsstärke ist in Bezug auf die Fläche eine differenzielle Größe. Sie kann daher für jeden Punkt eines Strahlungsfeldes angegeben werden. Durch Multiplikation mit der Abtastfläche dA eines Detektors oder auch eines Pixels ergibt sich dann der Strahlungsfluss $d\Phi$, der diese Abtastfläche durchsetzt. Im Allgemeinen wird die Bestrahlungsstärke vom Ort abhängen, z.B. auf einer beleuchteten Fläche.

Photonenfluss

Die Bestrahlungsstärke ist gut zur radiometrischen Charakterisierung eines Strahlenbündels an einer definierten Stelle im Strahlengang geeignet. Da der Strahlungsfluss im Strahlengang eine Erhaltungsgröße ist und eine Abbildungsoptik in erster Näherung lediglich die Geometrie des Bündels, also dessen Öffnungswinkel und Querschnitt verändert,

kann man den Fluss durch die Optik rechnerisch von der Lichtquelle bis zur Detektorebene verfolgen und die Bestrahlungsstärke berechnen. Aus der Bestrahlungsstärke auf dem Detektor eines optischen Sensors oder auf dem Detektorarray einer Kamera kann man dann das Signal abschätzen. Bei Photodioden, CCD- und CMOS-Sensoren ist der Elementarprozess der innere Photoeffekt: Photonen werden im Detektormaterial absorbiert und erzeugen Elektronen, die entweder als Strom ausgekoppelt oder in Form von Ladungspaketen als Signal ausgelesen werden. Bei dieser Umwandlung von Licht in Ladung erzeugt jedes Photon höchstens ein Elektron. Die Wahrscheinlichkeit, mit der Photonen in Elektronen umgesetzt werden, ist die Quantenausbeute. Sie ist von der Wellenlänge der einfallenden Strahlung abhängig und wird bei guten Detektoren im Datenblatt spezifiziert. Man kann die Quantenausbeute daher bei Bedarf in die Abschätzung einbeziehen. Wesentlich bei dieser Überlegung ist aber ein anderer Aspekt. Die aufgeführten Detektoren erzeugen ihr Signal nicht dadurch, dass sie Strahlungsenergie in elektrische Ladung umsetzen, sondern sie setzen einzelne Photonen in einzelne Elektronen um. In

erster Linie ist also wichtig, wie viele Photonen auf den Detektor fallen, und nicht, welche Lichtenergie dort deponiert wird. Selbstverständlich hängen diese beiden Größen miteinander zusammen. Ein Photon der Wellenlänge λ trägt die Energie:

$$E_{\text{photon}} = hc/\lambda$$

Dabei ist h das Planck'sche Wirkungsquantum und c die Lichtgeschwindigkeit. In der optischen Messtechnik verwendet man als Einheit für die Photonenenergie nur ungern das Joule, weil die Zahlenwerte für Photonenenergien damit unhandlich klein werden. Stattdessen ist die Einheit eV („Elektronenvolt“) üblich, das Produkt aus der Elementarladung und der Einheit Volt der elektrischen Spannung. 1 eV sind $1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$. Wer häufiger Photonenenergien ausrechnet, merkt sich irgendwann den Wert des Produktes hc und weiß, dass die Energie eines Photons der Wellenlänge λ sich aus der einfachen Beziehung:

$$E_{\text{photon}} = (1240/\lambda) \text{ eV} \times \text{nm}$$

ergibt. 1240 dividiert durch die Wellenlänge in nm ergibt also die Photonen-

FUJINON
FUJIFILM



Keine Unschärfen. Keine Kompromisse.

**Fujinon Machine Vision Objektive
mit hochauflösenden 5 Megapixeln.**

www.fujinon.de

Medical TV CCTV **Machine Vision** Binoculars

Erleben Sie industrielle Bildverarbeitung ohne Wenn und Aber. Die 5 Megapixel Objektive von Fujinon vereinen eine hohe Auflösung mit Festbrennweiten von 12,5 mm bis zu 75 mm bei minimaler Bildverzerrung (nur 0,3% bis 0,02%). Das Ergebnis sind gestochen scharfe

Bilder mit maximaler Detaillierung dank 130 lp/mm bei 2/3" Format. Für mehr Zuverlässigkeit und Genauigkeit. Jedes Objektiv lässt sich durch das kompakte Design einfach in Ihr System integrieren und ist zugleich äußerst robust gebaut. Fujinon. Mehr sehen. Mehr wissen.

energie in eV. Beispielsweise hat ein IR-Photon mit 1240 nm Wellenlänge gerade die Photonenenergie 1 eV. Ein rotes Photon mit 620 nm Wellenlänge wie bei unserer Beispiel-LED hat eine Energie von 2 eV, ein blaues Photon mit ca. 413 nm Wellenlänge hat eine Energie von 3 eV. Langwellige Strahlung besteht folglich bei gleicher Strahlungsenergie aus einer größeren Zahl von Photonen als kurzwellige Strahlung. Das Strahlenbündel unserer Beispiel-LED mit der Wellenlänge 620 nm und einem Strahlungsfluss von 10 mW transportiert pro Sekunde die ungeheure Zahl von etwa 3×10^{16} Photonen durch den Strahlquerschnitt. Bei einer LED mit 10 mW Strahlungsleistung, jedoch bei der Emissionswellenlänge 413 nm, wären es nur 2×10^{16} Photonen pro Sekunde, und das Detektorsignal würde nur zwei Drittel des Signals bei 620 nm betragen, dieselbe Quantenausbeute bei beiden Wellenlängen vorausgesetzt. Für die Abschätzung des Detektorsignals sind daher die Photonenzahl N und der Photonenfluss dN/dt von Bedeutung. Der Photonenfluss ergibt sich aus der Strahlungsleistung:

$$dN/dt = \Phi/E_{\text{photon}}$$

Es ist offenkundig, dass diese Beziehung nur für annähernd monochromatische Strahlung verwendet werden darf. Beispielsweise kann aus der Angabe für die Bestrahlungsstärke von 1350 W/m^2 aufgrund der Sonneneinstrahlung auf der Flugbahn der ISS nicht ohne weiteres der Photonenfluss pro Flächeneinheit berechnet werden, denn das Spektrum der Sonnenstrahlung ist kontinuierlich vom UV bis ins IR. Erst die genaue Kenntnis der Spektralverteilung ermöglicht eine Umrechnung in spektrale Photonenflüsse und letztlich die Berechnung des gesamten Photonenflusses durch Integration über die spektralen Anteile. Wenn die Spektralverteilung auch noch variiert, wie das z.B. bei Anwendungen im Außenraum beim Sonnenlicht in Abhängigkeit von der Jahres- und Tageszeit der Fall ist, wird die Abschätzung des Signals zusätzlich erschwert. Schon bei Beleuchtungen mit modernen weißen LEDs unter kontrollierten Bedingungen werden radiometrische Berechnungen aufgrund des kontinuierlichen Spektrums erheblich komplizierter als bei quasi-monochromatischen LED-Beleuchtungen.

Strahlstärke

Zum Abschluss soll noch eine weitere radiometrische Größe erwähnt werden, die

beim Vergleich von Lichtquellen eine große Rolle spielt. Unsere Beispiel-LED emittiert 10 mW in einen Kegel mit 20° Öffnungswinkel. Ohne Fokussierlinse würde die Strahlungsleistung in den gesamten Halbraum oberhalb des Chips abgestrahlt, so dass in einem bestimmten Abstand von z.B. 50 cm die Bestrahlungsstärke E nicht mehr etwa $0,4 \text{ W/m}^2$ betragen würde, sondern erheblich weniger, weil sich die Strahlungsleistung nun auf eine Halbkugel mit 50 cm Radius verteilt und nicht mehr nur auf die Grundfläche des Strahlungskegels mit ca. 8,8 cm Radius im Abstand von 50 cm. Eine Größe, die die Divergenz der Abstrahlung und ihre Auswirkung auf die energetischen Verhältnisse des Strahlenbündels unabhängig vom Abstand zur Quelle beschreibt, wäre daher praktisch. Diese radiometrische Größe ist die Strahlstärke I , definiert als der Fluss $d\Phi$ pro Raumwinkel $d\Omega$. Der Raumwinkel beschreibt den kegelförmigen Ausschnitt aus einer Kugel, dessen Spitze im Zentrum der Kugel liegt. Zur Quantifizierung betrachtet man eine Kugel mit Radius r und berechnet die Fläche A der Kugelkalotte, die vom Raumwinkelkegel aus der Oberfläche dieser Kugel ausgeschnitten wird. Der zugehörige Raumwinkel ist dann $\Omega = A/r^2$ mit der Einheit Steradian (sr). Diese Begriffsbildung ist analog zum Bogenmaß für den ebenen Winkel als Verhältnis von Kreisbogen zu Radius in der Einheit Radiant (rad). Der Raumwinkel für die Vollkugel ist gleich der Fläche einer Kugel mit Radius r dividiert durch r^2 , also $4\pi r^2/r^2 = 4\pi$ sr, für die Halbkugel 2π sr, und für unsere Beispiel-LED etwa $244 \text{ cm}^2/50^2 \text{ cm}^2$, also etwa 0,1 sr. Für kleine Öffnungswinkel approximiert man meist $d\Omega = dA/r^2$ und nimmt als Fläche dA die auf dem Radius senkrecht stehende ebene Kegelgrundfläche anstelle der Kugelkalotte. Als Strahlstärke ergibt sich damit im Mittel $I = 10 \text{ mW}/0,1 \text{ sr} = 0,1 \text{ W/sr}$. Da die Strahlstärke in Bezug auf den Raumwinkel eine differentielle Größe ist, kann man sie für jeden Punkt des Strahlungsfeldes angeben. Multipliziert mit dem jeweils erfassten Raumwinkelelement ergibt sich daraus die zugehörige Strahlungsleistung. Im Unterschied zur Bestrahlungsstärke bleibt die Strahlstärke jedoch bei freier Strahlabreitung für Punktquellen unabhängig vom Abstand zur Quelle konstant, während die Bestrahlungsstärke mit $1/r^2$ abnimmt.

Photometrische Größen

Hersteller von LEDs geben oft die Strahlstärke auf der Symmetrieachse als Güte-

maß in der Einheit W/sr an. Beim Vergleich zweier LEDs sollte man beachten, dass dabei die Winkeldivergenz der Emission eingeht. Wenn es dem Hersteller gelingt, bei gleicher Strahlungsleistung die Winkeldivergenz von 20° Öffnungswinkel auf 10° zu halbieren, steigt die Strahlstärke um den Faktor 4, obwohl die LED nicht mehr Lichtleistung auf eine Probe einstrahlen kann. Bei gleichem Abstand zur Probe wird diese Lichtleistung lediglich auf einer kleineren Fläche deponiert, was für manche Anwendungen wesentlich sein kann, für andere hingegen vielleicht nicht. Hinzu kommt, dass LED-Hersteller leider nach wie vor gern „Intensitäten“ als Lichtstärke in der photometrischen Einheit Candela (cd) angeben. Die Lichtstärke ist begrifflich identisch mit der Strahlstärke, jedoch bewertet mit der Empfindlichkeitskurve des menschlichen Auges. Für messtechnische Zwecke ist die Sinnesempfindung des Menschen meist irrelevant. Das photometrische Analogon der Bestrahlungsstärke, also bewertet mit der Empfindlichkeitskurve des Auges, ist die Beleuchtungsstärke mit der Einheit Lux (lx). So findet man leider immer noch Empfindlichkeitsangaben für Kameras in der Form „0 lx“, was lediglich bedeutet, dass die Kamera im Infraroten empfindlich ist, denn Strahlung im IR ist für das menschliche Auge unsichtbar und führt daher photometrisch zur Beleuchtungsstärke 0 lx, unabhängig von der radiometrischen Bestrahlungsstärke in W/m^2 dieses Strahlungsfeldes, selbst wenn es vielleicht eine Intensität von 10 W/m^2 haben sollte. Für monochromatische Lichtquellen kann man im sichtbaren Spektralbereich die photometrischen Angaben anhand der genormten Empfindlichkeitskurve in radiometrische umrechnen. Bei spektral kontinuierlichen Lichtquellen ist eine allgemeine Umrechnung nicht möglich, sondern erfordert genaue Kenntnis der Spektralverteilung.

Literatur

- [1] Snell, J.F., Radiometry and Photometry, in Driscoll, W.G. (ed.), Handbook of Optics, McGraw-Hill, 1978, p. 1–1 ff.
- [2] Pedrotti, Pedrotti, Bausch, Schmidt, Optik, Prentice Hall 1996, p. 29 ff.

► **Autor**
Prof. Dr. Christoph Heckenkamp
 Hochschule Darmstadt
 Studiengang Optotechnik und
 Bildverarbeitung
 heckenkamp@h-da.de
 www.fbm.h-da.de

