

Lichttechnische Größen richtig messen

Beim Einsatz optischer Bauelemente, wie z. B. LEDs, Lampen oder auch Laserdioden, stellen sich oft die Fragen: Wie „hell“ ist mein Bauelement eigentlich? Wie gut ist es im Vergleich zu anderen? Um diese Fragen beantworten zu können, muss man wissen, wie die relevanten optischen Parameter gemessen werden können und was sie aussagen.

Mit diesem Thema befasst sich auch der zweite Teil unserer kleinen Artikelserie zur Messung und Beurteilung lichttechnischer Größen, die ihre Fortführung in der Vorstellung eines sehr universell einsetzbaren Beleuchtungsmessgerätes mit integriertem Datenlogger findet.

Messfehler und Abweichungen

Temperaturabhängigkeit

Sowohl die opto-elektronischen Eigenschaften der Strahlungsquellen als auch die der Fotodetektoren sind abhängig

von der Umgebungstemperatur. Bei Lichtquellen verschiebt sich z. B. die Peak-Wellenlänge (die am stärksten ausgestrahlte Wellenlänge) des Lichts mit steigender Temperatur, d. h., die Farbe ändert sich. Zudem nimmt die Lichtleistung einer Quelle mit steigender Umgebungstemperatur ab.

Bei Halbleiterdioden ist die Empfindlichkeit im Allgemeinen bei höheren Temperaturen schlechter (ca. $-0,2\%/K$), außerdem steigt das „Dunkelsignal“ an, d. h., das Signal-Rausch-Verhältnis verschlechtert sich.

Somit ist speziell für sehr genaue Messungen und bei Messungen kleiner Signale auf eine möglichst konstante Umgebungstemperatur zu achten bzw. eine zu starke Erwärmung von Lichtquellen durch eine geeignete Kühlung zu verhindern.

Wellenlängenabhängigkeit

Bei den meisten zur optischen Strahlungsmessung verwendeten Fotodetektoren ist die Empfindlichkeit stark wellenlängenabhängig. Für hochwertige lichttechnische Messgeräte wird daher je nach Wellenlänge des zu messenden Lichts ein entsprechender Korrekturfaktor angegeben. Mit Ausnahme von Lasern emittieren Lichtquellen jedoch ein mehr oder weniger breites Spektrum verschiedener Wellenlängen. Daher werden zur Anpassung des Spektrums der Lichtquelle an das Empfangsspektrum des Detektors häufig spezielle Filter vor

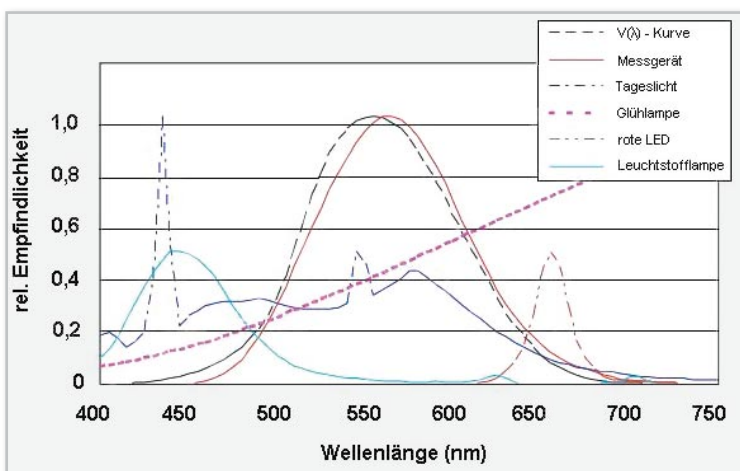


Bild 4: Spektrum eines Fotometers im Vergleich zu verschiedenen Lichtquellen

die Detektoren gesetzt. Die Qualität der Filter und die Anpassung an den jeweiligen Detektor bestimmen somit wesentlich die erreichbare Genauigkeit und entscheiden auch den Preis. Die größten Messfehler im optischen Bereich entstehen durch ungenügende derartige Anpassung bzw. Fehlanpassung. Abbildung 4 zeigt die mögliche Fehlanpassung des Empfangsspektrums eines Fotometers (rote Kurve) bei Messungen unterschiedlicher Lichtquellen.

Richtungsabhängigkeit

Viele lichttechnische Größen beziehen sich auf Licht mit annähernd parallelem Strahlungsverlauf, was in der Praxis jedoch nur schwer zu erreichen ist. Lichtstrahlen, welche nicht rechtwinklig auf den Detektor treffen können, z. B. gebeugt oder gebrochen oder teilweise reflektiert werden, beeinflussen das Mess-Ergebnis je nach Einfallswinkel der auftreffenden Strahlung unterschiedlich. Für präzise Messungen sollten Lichtquelle und Detektor daher möglichst genau positioniert werden. In lichttechnischen Labors werden diese daher meist auf einer langen Stahlschiene, der sog. optischen Bank, montiert.

Zur Messung ungerichteter Strahlung, z. B. der Beleuchtungsstärke an Arbeitsplätzen, werden vor die Detektoren Streuscheiben (z. B. aus Teflon), sog. Diffusoren, gesetzt. Damit erhält der Fotodetektor eine definierte Richtungsempfindlichkeit mit Cosinusverlauf. Dieses Verfahren wird als cos-Korrektur bezeichnet. Es beruht auf dem sogenannten lambertschen Gesetz, nach dem sich die Stärke einer auf eine Fläche auftreffenden Strahlung mit dem Cosinus des Einfallswinkels ändert. Folgt die Richtungsempfindlichkeit eines Detektors nun ebenfalls einem Cosinusverlauf, so wird dadurch für jeden Einfallswinkel das gleiche Signal erzeugt.

Entfernungsabhängigkeit

Die auf eine Fläche auftreffende Licht- bzw. Strahlungsenergie ist, wie bei allen elektromagnetischen Wellen, abhängig von der Entfernung der Fläche zur Strahlungsquelle. Ein elektromagnetisches Feld ist erst in einigem Abstand zur Quelle vollständig ausgebildet (dem sog. Fernfeld). Eine präzise Messung im Nahfeld ist fast unmöglich, da hier die Energieverteilung noch sehr ungleichmäßig ist. Im Fernfeld steht die Strahlungsenergie jedoch direkt im Zusammenhang mit der Entfernung zur Quelle, es gilt das sogenannte Quadratwurzel-Gesetz: Die ausgesendete elektromagnetische Strahlung einer Quelle nimmt quadratisch mit dem Abstand zur Quelle ab, d. h., im doppelten Abstand besitzt das Licht nur noch ein Viertel seiner Energie.

Man sollte daher darauf achten, dass Lichtmessungen, insbesondere bei gerichteter Strahlung, nur im Fernfeld erfolgen sollten. Als Faustregel gilt ein Mindestabstand vom Zehnfachen der Ausdehnung der leuchtenden Fläche.

Reflexion und Beugung

Ein großes Problem bei lichttechnischen Messungen ist die Beeinflussung durch Streulicht, d. h. die Reflexion vom zu messenden Licht oder von Fremdlicht in der Umgebung. Je nach Oberfläche, Material und Form von Gegenständen bzw. Flächen in der Messumgebung wird auftreffendes Licht re-

Bild 5: Ein UVC-Messgerät zur UV-Strahlungsmessung in Wasserdesinfektionsanlagen



flektiert bzw. gebeugt. Derartige Effekte können optische Mess-Ergebnisse verfälschen. Reflektierende Oberflächen in der Nähe des Messaufbaus sollten daher vermieden oder mit schwarzen Tüchern o. Ä. abgedeckt werden. Manche lichttechnischen Labore sind daher komplett in lichtabsorbierender, schwarzer Farbe gestrichen.

Zusätzlich zu den beschriebenen Effekten können außerdem weitere Beeinflussungen optischer Messungen auftreten, z. B. Wellenlängendispersion oder Interferenzeffekte. Eine hohe Messgenauigkeit bei lichttechnischen Messungen zu erreichen, ist daher sehr aufwändig.

Man sollte sich daher im Klaren sein, dass die in der Praxis auftretenden Genauigkeiten vergleichsweise gering gegenüber z. B. elektrischen Messungen sind. Preiswerte Messgeräte erreichen üblicherweise Genauigkeiten von ca. $\pm 20\%$, Geräte der Mittelklasse liegen in der Regel bei $\leq \pm 10\%$. Messgenauigkeiten von $< 5\%$ sind meist nur mit teuren Profigeräten in Laborumgebung erreichbar. Daher sollten Angaben mancher Hersteller preiswerter Messgeräte über erreichbare Messgenauigkeiten von 10% und kleiner mit Vorsicht betrachtet werden. Diese Angaben beziehen sich nämlich meist nur auf die Auswertelektronik und lassen Detektor und Messumgebung außer Acht. Nicht umsonst bewegen sich die Preise hochwertiger optischer Messgeräte im Bereich mehrerer tausend Euro. Selbst die Physika-

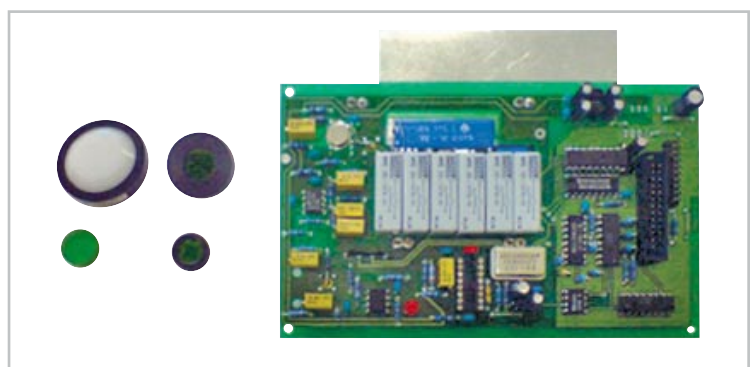


Bild 6: Die wesentlichen Komponenten eines Beleuchtungsstärke-Messgeräts

Wellenlänge λ [nm]	V_λ	Fotometer Klasse L	Abweichung
380	$3,90 \cdot 10^{-5}$	$5,85 \cdot 10^{-5}$	50 %
400	$3,96 \cdot 10^{-4}$	$5,15 \cdot 10^{-4}$	30 %
420	$4,00 \cdot 10^{-3}$	$3,24 \cdot 10^{-3}$	19 %
460	$6,00 \cdot 10^{-2}$	$6,90 \cdot 10^{-2}$	15 %
500	$3,23 \cdot 10^{-1}$	$3,26 \cdot 10^{-1}$	1 %
555	1,00	1,00	0 %
600	$6,30 \cdot 10^{-1}$	$6,24 \cdot 10^{-1}$	1 %
640	$1,75 \cdot 10^{-1}$	$1,61 \cdot 10^{-1}$	8 %
680	$1,70 \cdot 10^{-2}$	$1,50 \cdot 10^{-2}$	12 %
Integralwert	105,05	104,19	1 %

Tabelle 1: Relative Empfindlichkeit des menschlichen Auges bei den entsprechenden Wellenlängen und Empfindlichkeitswerte eines Fotometermesskopfes (Auswahl)

lich-Technische Bundesanstalt (PTB) gibt für viele ihrer licht-technischen Kalibrierungen an Messgeräten und für kunden-spezifische Vergleichsbaulemente nur eine Genauigkeit von ca. 5 % an, je nach Art der Kalibrierung.

Prinzipieller Aufbau von Licht- bzw. Strahlungsmessgeräten

Wichtigster Bestandteil eines optischen Strahlungsmessgerätes ist der Fotodetektor. Für die Wellenlängenbereiche von 300 nm bis 1000 nm werden fast ausschließlich Si-Fotodioden eingesetzt. Für andere Wellenlängenbereiche wie UV oder IR kommen Spezialdetektoren aus anderen Halbleitermaterialien zum Einsatz, wie z. B. InGaAs, SiC, GaP, GaN und Ge. Entscheidend für den jeweiligen Einsatz sind neben entsprechender Empfindlichkeit eine Linearität der messbaren Signale über mind. fünf Dekaden, gute Homogenität

der nutzbaren Empfängerfläche und möglichst hohe Langzeitstabilität.

Abbildung 5 zeigt als Beispiel aus der Praxis ein UVC-Handmessgerät mittlerer Preisklasse zur UV-Strahlermessung in Wasserdesinfektionsanlagen.

Vor dem Fotodetektor sind Elemente zur cos-Korrektur und zur Wellenlängenanpassung angebracht, wie z. B. Diffusoren und Filter für Wellenlängenbereiche (UVA, UVB, IR etc.) oder Filter zur Abbildung eines speziellen Spektralverlaufs, wie z. B. V_λ -Filter (Augenempfindlichkeit) und S_{er} (Erythemwirksamer Teil der UV-Strahlung). Je nach Güte der Anpassung an die gewünschte Wirkungsfunktion können solche Filter mehrere hundert Euro kosten.

Das Signal der Fotodiode, der Fotostrom, wird meist über I-U-Wandler in eine äquivalente Spannung umgesetzt, wobei die Diode im Kurzschlussbetrieb eingesetzt wird. Dadurch wird die Linearität des Ausgangssignals über die angestrebten fünf Dekaden erreicht. Die zu messenden Fotoströme können hierbei im Bereich weniger nA bis hin zu mehreren mA liegen. In Abbildung 6 sind beispielhaft die beschriebenen Komponenten für ein hochwertiges Beleuchtungsstärkemessgerät dargestellt.

Die nachfolgende Signalverarbeitung und Anzeige ist dann eine rein elektronische Angelegenheit, die sehr unterschiedlich ausfallen kann (analog/digital, mit/ohne Bereichsumschaltung, evtl. Nullpunkt-korrektur, Datenspeicherung etc.). Unterschiedliche Messgrößen (z. B. Ix, cd, Im, W/cm²) können über eine Umrechnung mit internen Korrekturfaktoren angezeigt werden, wobei die zu verwendende Messgeometrie (Messabstand, evtl. Vorsatzfilter etc.) durch den Hersteller der Messgeräte vorgegeben werden muss.

Messfehler in Zahlen

Eine wichtige Grundlage der Licht- und Strahlungstechnik ist die spektrale Anpassung der Fotodetektoren an die verschiedenen Wirkungsspektren der Strahlung. Für die Fotometrie ist das die Anpassung an die V_λ -Kurve. Für die Radiometrie wird eine möglichst wellenlängenunabhängige Empfindlichkeit des Fotodetektors in verschiedenen Bereichen z. B. UVA, UVB, UVC, IR gefordert. Andererseits sind bestimmte Funktionen wie z. B. die Erythemfunktion gefordert.

Alle diese sogenannten „Anpassungen“ werden durch Vorschalten von oftmals komplizierten Filterkombinationen vor die Fotodetektoren realisiert. Sie bestimmen sowohl die Messgenauigkeiten als auch den Preis entscheidend.

Messfehler bei fotometrischen Messungen durch Fehlanpassung

In der Tabelle 1 sind einige Werte für die relative Empfindlichkeit des menschlichen Auges bei den entsprechenden Wellenlängen (V_λ -Funktion) sowie die Empfindlichkeitswerte eines Fotometermesskopfes aufgeführt. Man erkennt, dass für kurzwelliges Licht bereits Abweichungen des Ausgangssignals im Promillebereich den Messwert stark verfälschen können.

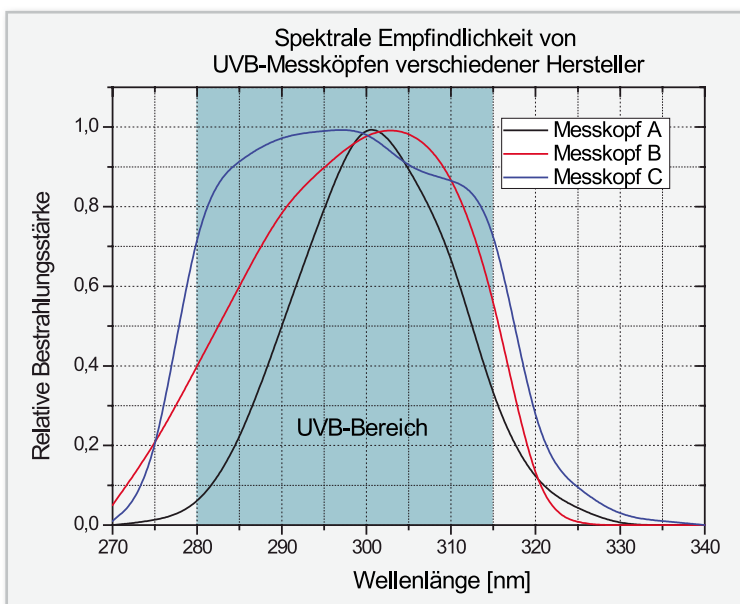


Bild 7: Empfindlichkeit verschiedener UVB-Messköpfe für Messlabore im Vergleich zur Definition

In der DIN 5032 sind die Qualitätskriterien für Fotometerköpfe festgelegt. So darf ein Messkopf der Güteklasse L (beste Klasse) einen maximalen integralen Fehler der Anpassung (über alle Wellenlängen) von 1,5 % bei Kalibrierung mit Normlicht A aufweisen.

Bei fotometrischen Messungen breitbandiger Lichtquellen wie Glühlampen oder der Sonne mit einem solchen Messkopf weicht das Mess-Ergebnis somit maximal 1 % vom tatsächlichen Wert ab.

Wird dagegen eine schmalbandige Lichtquelle (z. B. eine „blaue“ LED mit einer Wellenlänge von $\lambda = 465 \text{ nm}$) gemessen, wirkt die volle Abweichung der tatsächlichen Empfindlichkeitskurve des Messkopfes von der V_λ -Kurve auf das Mess-Ergebnis. Dadurch sind je nach Wellenlänge Messfehler von bis zu 50 % möglich, selbst wenn ein Klasse-L-Fotometerkopf verwendet wird.

Messfehler im UV-Bereich mit realen Radiometerköpfen

Die per Definition festgelegten Grenzen der UV-Bereiche, z. B. UVB von 280 nm bis 315 nm, werden durch reale Messköpfe nur annähernd nachgebildet.

Abbildung 7 zeigt die Empfindlichkeit von UVB-Messköpfen für Messlabore von drei verschiedenen Herstellern im Vergleich zur Definition.

Werden mit diesen Messköpfen zwei unterschiedliche UV-Strahler aus dem medizinischen Einsatzgebiet bewertet, ergeben sich die in Abbildung 8 dargestellten Messabweichungen (der tatsächliche UVB-Anteil ist schraffiert dargestellt).

Es wird deutlich, dass bei solchen Messungen mit Korrekturfaktoren gearbeitet bzw. der jeweilige Messkopf auf den zu messenden Lampentyp abgeglichen werden muss.

Eine wirklich exakte Messung für beliebige Strahler ist nur mit einem kalibrierten, mehrere tausend Euro teuren Spek-

Strahlertyp	Faktor
1	1,000
2	0,570
3	0,758
4	0,940
5	0,960
6	1,180

Tabelle 2: Korrekturfaktoren für ein UVB-Radiometer für 6 unterschiedliche Strahler aus dem medizinischen Bereich

tralradiometer möglich. Durch Vergleich mit solchen Messungen können dann die notwendigen Korrekturfaktoren für den jeweiligen Radiometer-Messkopf ermittelt werden, wodurch auch mit den Hand-Radiometern genaue Messungen möglich sind.

Die Tabelle 2 zeigt Korrekturfaktoren für ein UVB-Radiometer für 6 unterschiedliche Strahler aus dem medizinischen Bereich.

Die beschriebenen Verhältnisse zeigen, dass die Angaben mancher Hersteller über Messgenauigkeiten im unteren Prozent-Bereich nur bedingt und für ganz bestimmte Fälle gültig sind, insbesondere bei Messungen im Bereich der Medizintechnik ist daher äußerste Vorsicht geboten.

Viele zusätzliche Messfehler, die z. B. durch die unterschiedliche Richtungsempfindlichkeit des Messkopfes (sog. Kosinus-Korrektur) oder die tatsächliche geometrische Anordnung im Strahlungsfeld auftreten, sind hierbei noch gar nicht berücksichtigt.

Im dritten Teil unserer Serie beschreiben wir ein universell einsetzbares Beleuchtungsmessgerät mit integriertem Datenlogger, das ULM 500. **ELV**

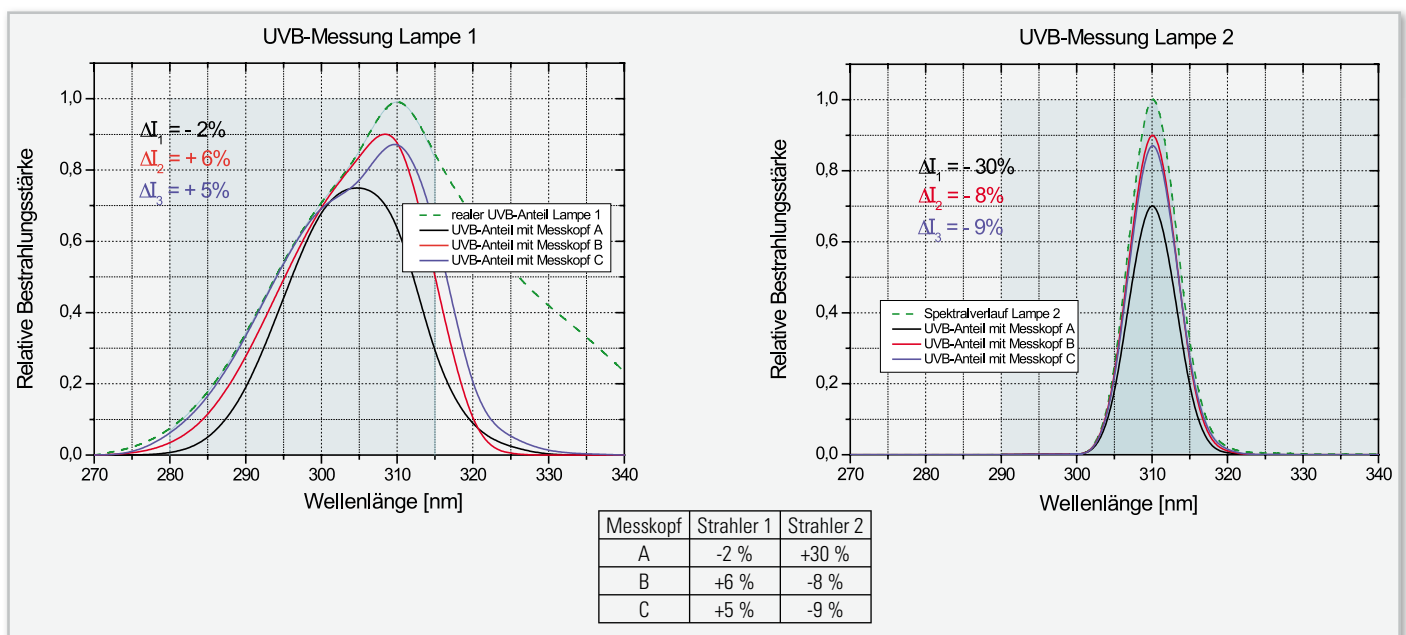


Bild 8: Messwertabweichungen bei der Bewertung unterschiedlicher UV-Strahler