

Ermittlung des Energieeintrags durch optische Strahlungsquellen

Ein Konzept für Arzneimittel in der parenteralen Produktion – Teil 1

Dipl.-Ing. Felix Krumbein und Dr. Tobias Posset • Roche Diagnostics GmbH, Mannheim

Korrespondenz: Felix Krumbein, Support Inspektionssysteme, Roche Diagnostics GmbH, Sandhofer Str. 116, 68305 Mannheim; **e-mail:** felix.krumbein@roche.com

Abstract

The present evaluation is a general approach to measure and assess the maximum exposure of a product to optical radiation during sterile production as part of a characterization study. In order to identify an approach to measure and assess such irradiation intensity in this process, a differentiation is made between source and location of radiation, as well as a separate assessment of the retention time of bottled drug products in the different production stages.

In doing so, values specific to products and production processes could be measured, supporting future assessments on potential risks of quality changes in the products caused by exposure to visible (VIS), ultraviolet (UV) or infrared (IR) radiation. Additionally, given the information available on the maximum exposure of a product to optical radiation, the irradiation intensity identified in the course of the present evaluation may now be compared to stability limits, provided that they had already been validated on a routine basis for the relevant product.

In the future, potentially new or rather additional sources of radiation (including inspection systems or modern light-emitting diode (LED) light sources) may be tested for their irradiation intensity and subsequently assessed. Hence, the implementation of additional sources of radiation does not necessarily require new photostability tests to be conducted, as long as the level of exposure to radiation does not exceed the previously measured and assessed worst case limits.

1. Einleitung

Im Herstellungsprozess parenteraler Arzneiformen lassen sich verschiedene Strahlungsquellen aufzeigen, die auf das Produkt einwirken können. Diese beinhalten die Umgebungsbeleuchtung, das Tageslicht oder optische Inspektionseinrichtungen, welche Strahlung in differenzierten Energieformen auf das Produkt abgeben.

Der Energieeintrag durch Strahlungsbelastung, dem die Arzneimittel während der Produktion ausgesetzt sind, kann zu molekularen Verände-

rungen sowohl bei den Wirkstoffen als auch bei den Hilfsstoffen führen. Insbesondere Proteine können verschiedene durch optische Strahlung verursachte Veränderungen aufweisen, wobei diese sowohl von der vorliegenden Proteinstruktur als auch von der Zusammensetzung der Produktlösung abhängen. Dies kann Aggregatbildung und Ausfällung zur Folge haben. Auch andere Eigenschaften der Proteinlösung, wie das Absorptionsverhalten, können beeinflusst werden [1].

Zusammenfassung

Im Rahmen einer Charakterisierungsstudie soll in einem allgemeinen Ansatz bestimmt werden, wie hoch die während der Produktion maximal auf ein Produkt einwirkende optische Strahlungsbelastung ausfällt.

Hierbei werden differenzierte Betrachtungen nach Strahlungsquelle und -ort sowie entsprechende Verweildauern der Produkte in den einzelnen Produktionsabschnitten berücksichtigt und ein Konzept aufgezeigt, wie sich ein solcher Energieeintrag messen und bewerten lässt.

Die so spezifisch nach Produkt und Herstellprozess erhobenen Werte zur optischen Strahlungsbelastung können in Zukunft zur Abschätzung des Risikos qualitativer Veränderungen der produzierten Arzneimittel nach Belastung durch Strahlung in differenzierten Energieformen (z. B. UV-/IR-Strahlung oder im Sichtbaren etc.) dienen. Darüber hinaus ermöglicht das Wissen um die maximal auf ein Produkt einwirkende optische Strahlung auch einen Vergleich mit Stabilitätsgrenzwerten, sofern diese für das entsprechende Produkt validiert worden sind. Potenziell neue oder zusätzliche Strahlungsquellen – z. B. neue Inspektionssysteme oder moderne LED-getriebene Raumbeluchtungen – können zukünftig auf ihre Strahlungsbelastung untersucht und bewertet werden. So sind nach Neuinstallation zusätzlicher Strahlungsquellen nicht zwangsläufig neue Photostabilitätstests notwendig, sofern sich die Strahlungsbelastung gegenüber dem zuvor ermittelten und untersuchten Worst-Case-Szenario nicht negativ verändert.

Key Words

- Energie
- Strahlungsquellen
- Arzneimittel
- Optik
- UV-Strahlung

Wie in Abb. 1 dargestellt, befindet sich das Absorptionsmaximum bei einer Lösung mit Antikörpern im Wellenlängenbereich des mittleren UV (ca. 280 nm). Proteine zeigen in diesem Bereich also eine hohe Photoempfindlichkeit, d. h. die Fähigkeit, Photo-

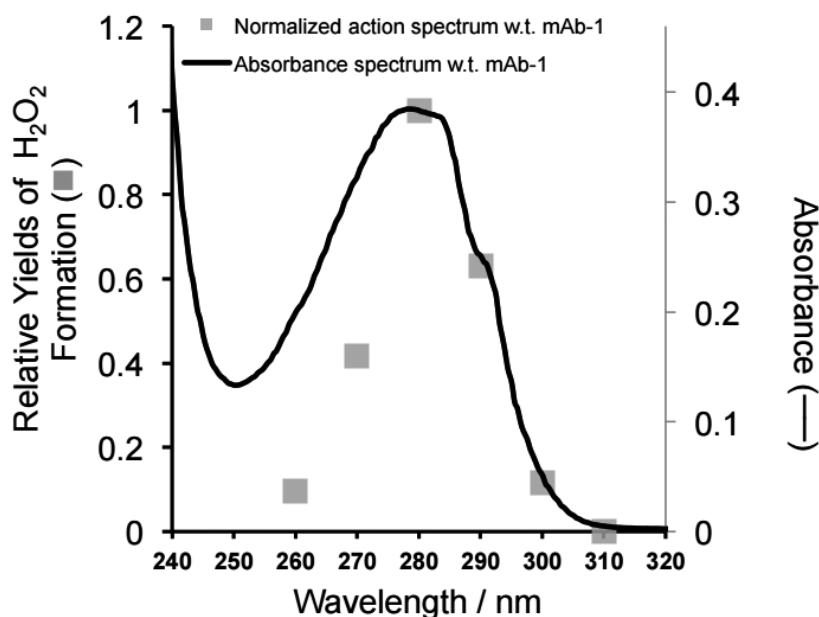


Abbildung 1: Beispiele für Absorptionsspektrum von verschiedenen mAb Antikörpern [2].

nen zu absorbieren, so dass vor allem im mittleren UV mit ausgeprägten molekularen Veränderungen gerechnet werden muss.

Die aufgezeigten chemischen und physikalischen Veränderungen am Wirkstoffmolekül können dessen pharmakologische Wirkung beeinträchtigen. Hierbei sind sowohl eine Verstärkung als auch eine Abschwächung der Wirkung möglich. Diese Veränderungen können die Qualität des hergestellten Arzneimittels beeinträchtigen und sollten daher durch Photostabilitätsstudien und daraus abgeleitete Maßnahmen minimiert werden.

2. Definition, Messung und Bewertung von optischer Strahlung

2.1 Definition der optischen Strahlung

Als optisch wird im Allgemeinen die elektromagnetische Strahlung zwischen der ionisierenden Röntgenstrahlung und den Mikrowellen im Spektralbereich von 100 nm bis 1 mm verstanden [3]. Mit „Licht“ bezeichnet man die Strahlung im sichtbaren Spektralbereich (kurz VIS) von 380 nm (violett) bis 780 nm (rot). An den visuellen Bereich schließt sich nach den langen Wellenlängen die Infrarotstrahlung (IR) an, wohingegen

dem kurzwelligen Bereich die ionisierende Ultraviolettstrahlung (UV) benachbart ist und den Wellenlängenbereich von 100–380 nm umfasst.

Die Ultraviolettstrahlung ist der energiereichste Teil der optischen Strahlung und für den Menschen nicht

sichtbar. Die UV-A-Strahlung („nahes UV“) schließt sich direkt an das sichtbare Licht an, ist mit Wellenlängen von 315–380 nm der langwelligste Bereich der UV-Strahlung und erreicht so im Gegensatz zur UV-B- und UV-C-Strahlung weitestgehend unbehindert die Erde, ausgehend von der Sonne als emittierende Strahlungsquelle. Die UV-B-Strahlung umfasst den Bereich von 280–315 nm und wird auch als „mittleres UV“ bezeichnet. Die Atmosphäre filtert – abhängig vom Zustand der Ozonschicht – diese Strahlung aus. Die besonders energiereiche UV-C-Strahlung (100–280 nm) wird von der Erdatmosphäre in den oberen Atmosphärenschichten vollständig ausgefiltert.

2.2 Strahlungsquellen

Licht als sichtbare Strahlung lässt sich zum einen durch sein Spektrum charakterisieren und zum anderen durch „Nebenprodukte“ wie Infrarot- oder Ultraviolettstrahlung, die bei der Erzeugung von Licht entstehen. Künstliche Lichtquellen, die für Beleuchtungszwecke eingesetzt werden, können unterschiedlich vom natürlichen Licht abweichen.

Autoren



Dipl.-Ing. Felix Krumbein

Dipl.-Ing. Felix Krumbein studierte Optotechnik und Bildverarbeitung an der Hochschule Darmstadt. Nach seiner Diplomarbeit zum Thema „Entwicklung von Algorithmen zur Formerkennung an pharmazeutischen Produkten“ begann er 2001 bei Scanware als Systementwickler mit der Konzeptfindung und Integration hochoptimierter Bildverarbeitungs-Algorithmen für die Anwendung im Bereich pharmazeutischer Packmittel- und Füllgutkontrollsysteme. 2003 ging er zu Laetus, wo er 2008 die Leitung der Gruppe Identifikationssysteme übernahm. 2011 wechselte Hr. Krumbein zur Roche Diagnostics Mannheim und übernahm dort die Verantwortung für die Einheit Support Inspektionssysteme – mit dem Tätigkeitsschwerpunkt Support und Qualifizierung vollautomatischer Kontrollsysteme im pharmazeutischen GMP-Umfeld.



Dr. Tobias Posset

Dr. Tobias Posset studierte Biochemie und Chemie. Nach seiner Promotion über die metallorganische Katalyse und Festkörper-NMR-Spektroskopie in der organischen Chemie hat er in der analytischen Entwicklung von biotechnologisch hergestellten Arzneimitteln bei der Roche Diagnostics in Mannheim begonnen. Aktuell leitet er dort die Einheit Produktions-Support in der parenteralen Pharmaproduktion. Hier ist er für die Inprozesskontrolle, die Betreuung der vollautomatischen optischen Kontrolle, die Betreuung der Schulungsaktivitäten zur manuellen Kontrolle sowie die Partikelanalytik (sichtbare und nicht-sichtbare Partikel) verantwortlich. Er ist auch der Vorsitzende der Gruppe „Visual Inspection“ der European Compliance Academy (ECA).

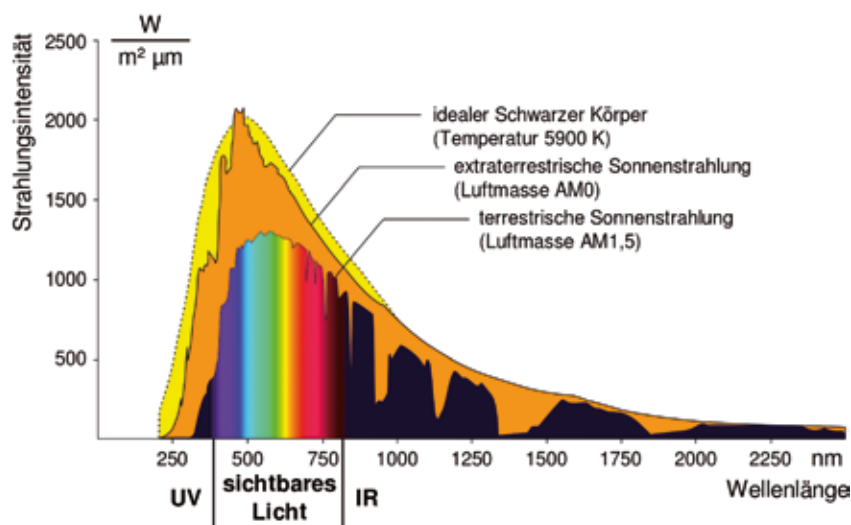


Abbildung 2: Bestrahlungsstärke oberhalb und auf der Erdoberfläche [4].

Monochromatische Lichtquellen emittieren „Licht“ in einem sehr begrenzten Spektral- oder Frequenzbereich (z.B. Laser). Halogenlampen wiederum gehören zu den breitbandigen Lichtquellen, die Emissionsspektren vom Ultravioletten bis ins Infrarote – einschließlich der sichtbaren Wellenlängen – und darüber hinaus erzeugen.

In einer parenteralen Produktion selbst gibt es verschiedenartige Lichtquellen, deren charakteristisches Emissionsspektrum es erlaubt, dieses anhand seiner spektralen Anteile bzw. Wellenlängenverteilung zu unterscheiden und so entsprechenden Strahlungsquellen zuzuordnen. Man unterscheidet klassische Strahlungsquellen, also Temperaturstrahler oder thermische Strahlungsquellen, von nichtthermischen Strahlungsquellen, den sog. Lumineszenzstrahlern.

2.2.1 Thermische Strahlungsquellen

Zu den thermischen Strahlungsquellen gehören die Sonne (Kernenergie), die Glüh- bzw. Halogenlampe (elektrische Energie) oder das Licht einer Kerze (chemische Energie).

Gemäß dem Planckschen Strahlungsgesetz gibt jeder Körper, dessen Temperatur über dem absoluten Nullpunkt liegt, Wärmestrahlung an seine Umgebung ab. Erwärmt man den Körper, beginnen seine Atome zu schwingen und er beginnt zu glühen. Die emittierte Strahlung wird dabei, für

Temperaturstrahler typisch, in einem breiten und kontinuierlichen Emissionsspektrum abgegeben, d.h., alle Wellenlängen über einen großen Bereich hinweg sind besetzt.

Der wichtigste Temperaturstrahler und gleichzeitig auch die Quelle allen Lebens ist die Sonne. Die Oberflächentemperatur der Sonne beträgt ca. 5 500 °C (~5 777 K). Das Strahlungsmaximum der spektralen Emissionsverteilung der Sonne liegt bei $\lambda_{\max} \approx 500 \text{ nm}$ (Grün), wobei auf den Bereich des sichtbaren Lichts rund 47 % der extraterrestrischen Solarstrahlung fallen. Umgekehrt bedeutet das, dass wiederum gut die Hälfte der Leistung als nicht sichtbare Strahlung, im Ultravioletten oder als Infrarotstrahlung, abgegeben wird (s. Abb. 2).

Da die in der Parenteraliaproduktion weiterverarbeiteten und abgefüllten Wirkstoffe molekular gesehen größtenteils Proteine sind, sind wegen der hohen Empfindlichkeit der Antikörper gegenüber ultravioletter Strahlung vor allem die Sonne wie auch andere thermische Strahlungsquellen von großer Bedeutung.

2.2.2 Nichtthermische Strahlungsquellen oder Lumineszenzstrahler

Lumineszenzstrahler basieren auf der Anregung atomarer oder molekularer Systeme durch Zufuhr von Energie. Beim Rückgang in energetisch tiefere Zustände bzw. in den Grundzustand

geben sie ihre Energie teilweise als Strahlung im sichtbaren Spektralbereich ab. Der optische Anteil der so entstehenden Strahlung heißt Lumineszenz.

Wesentlich für solche Systeme ist, dass sie nicht beliebige Energiezustände annehmen können. Da die Elektronen eines Atoms nur diskrete (quantenmechanische) Energieniveaus annehmen können, ist die Energie, die sie abgeben, wenn sie in ein niedrigeres Energieniveau zurückfallen, ebenfalls diskret. Bei zwei- oder mehratomigen Molekülen ergibt sich ein vielfältiger besetztes Emissionsspektrum als beim Einzelatom, da hier die emittierte Strahlung nicht allein durch den Elektronenabstand, sondern auch durch Schwingungen der Molekülteile sowie durch Rotationen des Gesamtmoleküls beeinflusst wird.

Das für Lumineszenzstrahler typische Spektrum des so entstehenden Lichts besteht daher hauptsächlich aus schmalen Banden- bzw. Linienspektren – abhängig von der Zahl der voneinander verschiedenen Energiezustände, welche die Atome oder Moleküle annehmen können. Lumineszenzstrahler ermöglichen gegenüber Temperaturstrahlern so zwar eine höhere Lichtausbeute, bieten aber – bedingt durch das meist lückenhaft besetzte Emissionsspektrum – auch nur eine schlechte Farbwiedergabe.

Zu den Lumineszenzstrahlern gehören verschiedene technisch bedeutsame Strahlungsquellen. Besonders die Gasentladungslampe, die inzwischen vielfältig eingesetzte Leuchtdiode (light-emitting diode, LED) sowie der Laser sind hier von großer Bedeutung.

2.2.2.1 Gasentladungslampen

Leuchtstofflampen etwa, die nach dem Prinzip der Gasentladung arbeiten, sind in der parenteralen Produktion häufig als Raumbeleuchtungen, als Beleuchtungen von Anlagen (z.B. im Abfüllisolator) oder als Beleuchtungen von Arbeitsplätzen zu finden – speziell auch im Bereich der optischen Kontrolle.

Technisch unterscheiden sich Gasentladungslampen in ihrem Aufbau und der Art der Lichterzeugung. So

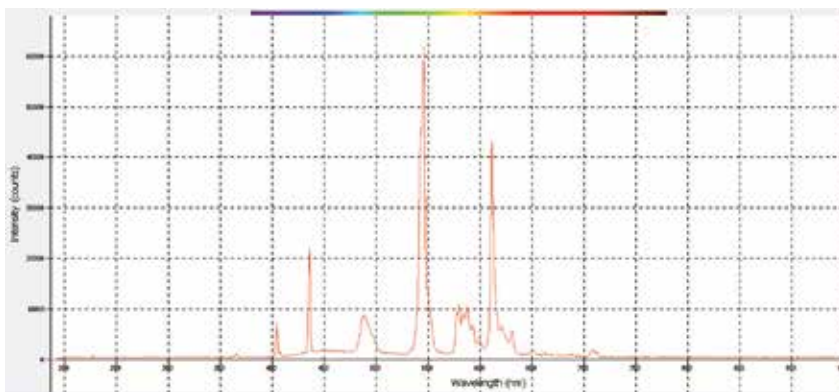


Abbildung 3: Charakteristisches Emissionsspektrum einer Dreiband-Leuchtstofflampe [5].

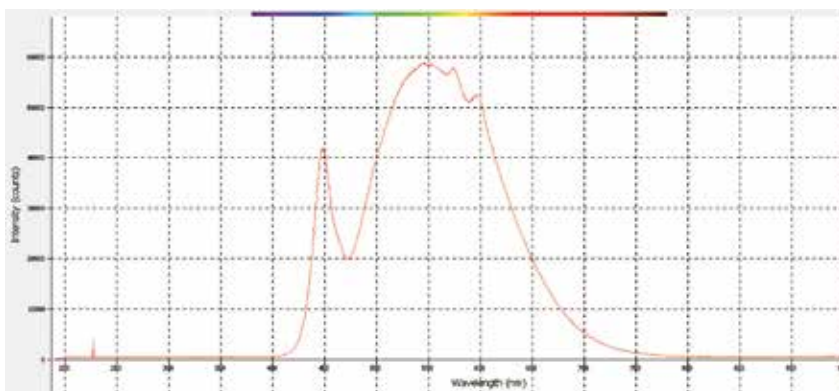


Abbildung 4: Charakteristisches Emissionsspektrum einer Dreiband-Leuchtstofflampe [6].

wird die in einer Leuchtstofflampe mittels Quecksilberdampf erzeugte (für den Menschen nicht sichtbare) Ultraviolettstrahlung mit Hilfe verschiedener Fluoreszenzfarbstoffe in sichtbares Licht, häufig in ein für das menschliche Auge Weiß erscheinendes Dreiband-Spektrum (Rot, Grün, Blau), umgewandelt. Der Rest der energiereichen, ultravioletten Strahlung wird durch das Glas der Lampe – zwar nicht vollständig, aber weitestgehend – absorbiert. Abbildung 3 zeigt das für Quecksilbergas typische Primärspektrum mit Peaks im Ultravioletten bei 313 nm (bei dieser Messung nicht nachweisbar) und 365 nm sowie im Sichtbaren bei 405 nm (Violett) und 436 nm (Blau), wobei die Leuchtstoffe, die im blauen, grünen und roten Bereich des sichtbaren Spektrums relativ scharfbändige Emissionen zeigen, die Ausbeute an sichtbarem Licht erhöhen.

Darüber hinaus werden in der parenteralen Produktion auch Xenon-

Gasentladungslampen verwendet, die in Tischprüfgeräten oder als Blitzbeleuchtung in vollautomatischen Inspektionssystemen verbaut sein können. Aufgrund der hohen Leuchtdichte, wegen ihres hohen Farbwiedergabeindex sowie der zum Tageslicht vergleichbaren Farbtemperatur wird die Xenon-Gasentladungslampe gerne als Tageslichtpendant eingesetzt, wobei aber auch hier stets ein Teil der Leistung im Ultravioletten emittiert wird.

2.2.2.2 LED

Eine weitere wichtige Strahlungsquelle ist die LED. LEDs gehören wie auch die Gasentladungslampen zu den Elektrolumineszenzstrahlern: Durch elektrische Energie werden Ladungsträger in einer Halbleiter-Diode freigesetzt. Bei der Rekombination von Elektronen und Löchern wird sichtbares Licht abgestrahlt, wobei meist ein schmales Bandenspektrum emittiert wird. Die Energie des emit-

tierten Photons wird dabei durch die Größe der Bandlücke bestimmt – also dem energetischen Abstand zwischen Leitungs- und Valenzband – und kann durch die chemische Zusammensetzung des Halbleiters gesteuert werden.

Zunächst waren nur LEDs mit größeren Wellenlängen auf dem Markt, also solche für gelbes, oranges oder rotes Licht. Nach Halbleitermaterialien, die „Licht“ im kurzwelligen Bereich (Blau, UV) effizient erzeugen, wurde lange gesucht. Seit der Entwicklung blauer LEDs, deren Entdeckung mit einem Nobelpreis geehrt wurde, ist es nun aber möglich, auch weißes Licht zu erzeugen, wofür verschiedene Verfahren der additiven Farbmischung zum Einsatz kommen. Meist wird hierfür eine blaue LED mit einem geeignetem Leuchtstoff kombiniert, so dass weißes Licht entsteht. Abbildung 4 zeigt das für eine Weißlicht-LED mit Phosphor-Konversion typische Emissionsspektrum, mit einem ausgeprägten Peak der blauen LED (bei ca. 450 nm) und dem Spektrum des Leuchtstoffes, der sein Maximum im Grünen (ca. 540 nm) und einen weiteren Peak im Gelben (ca. 575 nm) emittiert.

Im Produktionsbereich werden LEDs z. B. in Anzeigeelementen, Lichtschranken oder inzwischen auch als Raumbeleuchtungen eingesetzt. Vor allem aber sind sie aufgrund vielfältiger Vorteile, wie der hohen Lebensdauer, der einfachen Ansteuerung und nicht zuletzt wegen der mechanischen Robustheit in den heutigen vollautomatischen Inspektionssystemen nicht mehr wegzudenken.

2.3 Bewertung optischer Strahlung

Grundsätzlich lässt sich Strahlung auf 2 Arten messen und bewerten: Radiometrisch, d. h., die quantitative Messung und Bewertung von Strahlung erfolgt physikalisch, also über auf Energie basierenden Größen. Dagegen wurden die entsprechenden photometrischen Größen mit der genormten Hellempfindlichkeitskurve des menschlichen Auges gewichtet; sie beziehen sich daher auf den sichtbaren Spektralbereich.

2.3.1 Radiometrie: Quantitative Bewertung der Leistung und Energie optischer Strahlung

Die Messung der Leistung und der optischen Strahlungsenergie wird für die Bestimmung der Empfindlichkeit von Strahlungsempfängern (z. B. die Haut des Menschen), für die Beurteilung von Strahlungsquellen sowie zur Messung der Strahlungsleistung benötigt.

Wird die Leistung (bzw. Energie) der optischen Strahlung in Watt (bzw. Joule) bestimmt, so spricht man von Radiometrie. Die absolute Messung der Strahlungsleistung verlangt die Kalibrierung eines Detektors, welcher in der Lage ist, optische Strahlung zu empfangen und diese in elektrische Signale umzuwandeln.

Die Strahlungsleistung Φ_e (engl.: radiant power, Einheit: W) beschreibt die optische Energie, welche von einer Strahlungsquelle pro Zeiteinheit in den Raum abgestrahlt wird. Die Strahlungsleistung trifft eine Aussage über die generelle Leistung einer Lichtquelle und eignet sich daher zur Bestimmung des Wirkungsgrades und zum direkten Vergleich von Lampen und anderen Leuchtmitteln.

Die Bestrahlungsstärke E_e (engl.: irradiance, Einheit: $W m^{-2}$), gemessen in Watt pro Quadratmeter, beschreibt die Leistung der elektromagnetischen Strahlung pro effektiver Empfängerfläche.

Soll eine spezifische energetische Wirkung einer Strahlungsleistung auf ein Objekt quantitativ beschrieben werden, lässt sich die in einem definierten Energiebereich von einem Flächenelement abgegebene oder empfangene Strahlungsleistung durch Integration der spektralen Strahlungsleistung $E(\nu)$ (Einheit: $W m^{-2} Hz^{-1}$) über einen vorgegebenen Frequenzbereich bestimmen.

Das Integral über den Wellenlängenbereich von 280–380 nm der spektralen Strahlungsleistung ergibt ein Maß für die an einem Objekt gemessene Bestrahlungsstärke im mittleren und nahen UV-Bereich und damit eine für die Bewertung des Energieeintrags auf Proteinformulierungen besonders wichtige radiometrische Größe.

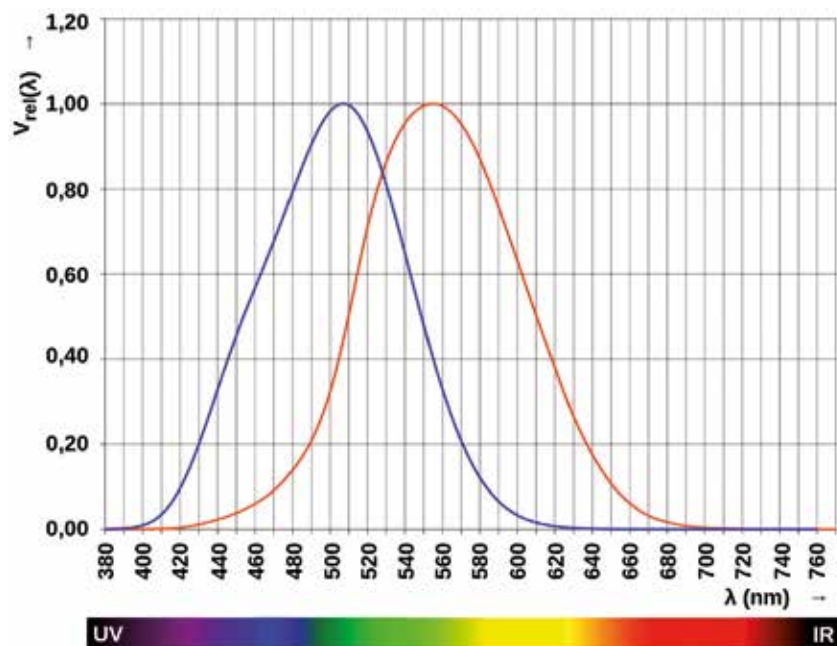


Abbildung 5: Spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Auges bei Tag (Rot)- und Nachtsehen (Blau) [7].

Die Bestrahlung H_e (engl.: irradiation, Einheit: $J m^{-2}$), gemessen in Joule pro Quadratmeter, beschreibt die an einem definierten Ortspunkt insgesamt empfangene Strahlungsenergie Q_e pro Fläche. Äquivalent dazu lässt sie sich auch als Integral einer Strahlung mit der Bestrahlungsstärke E_e über eine gegebene Zeit Δt ausdrücken. Sie ist also ein Maß für die auf eine Fläche bezogene Wirkung der Strahlung und eignet sich daher für die Bewertung des resultierenden Energieeintrags auf Proteinformulierungen.

2.3.2 Photometrie: Bewertung der optischen Strahlung gemäß dem menschlichen Auge

Einen wichtigen Spezialfall stellt die Bewertung gemäß der wellenlängenabhängigen Empfindlichkeit des menschlichen Auges dar. So ist die Beleuchtungsstärke E_V (engl.: illuminance, Einheit: $lm m^{-2}$ oder lx) die photometrische Entsprechung zur radiometrischen Bestrahlungsstärke gewichtet mit der spektralen Empfindlichkeit des helladaptierten menschlichen Auges (V -Lambda-Kurve $V(\lambda)$, s. Abb. 5). Diese – gemessen in Lumen pro Quadratmeter oder Lux – stellt die messtechnische Entsprechung zur

physiologischen Farbwahrnehmung des menschlichen Auges dar.

Für photometrische Messungen, z. B. die Bestimmung der Beleuchtungsstärke mit einem Luxmeter, bedeutet das, dass sowohl UV- wie auch IR-Anteile der vorliegenden Strahlung keinen Einfluss auf das Messergebnis nehmen.

Photometrische Größen finden daher Verwendung in Fragestellungen, bei denen die Empfindlichkeit des Betrachters eine Rolle spielt. So ist die Beleuchtungsstärke E_V ein wichtiger Parameter, um Anforderungen an die Lichtverhältnisse am Arbeitsplatz oder auf Verkehrs- bzw. Fluchtwegen zu definieren. In der optischen Kontrolle etwa ist für manuelle Untersuchungsarbeitsplätze eine minimale Beleuchtungsstärke von 2 000 Lux an der Untersuchungsstelle vorgesehen.

Die fotometrische Entsprechung zur Bestrahlung H_e ist die Belichtung H_V (engl.: luminous exposure, Einheit: lx s), gemessen in Luxsekunden. Sie beschreibt die an einem definierten Ortspunkt insgesamt empfangene Lichtmenge Q_V pro Fläche, wenn Licht mit der Beleuchtungsstärke E_V über eine gegebene Zeit Δt auf ein definiertes Flächenelement fällt.

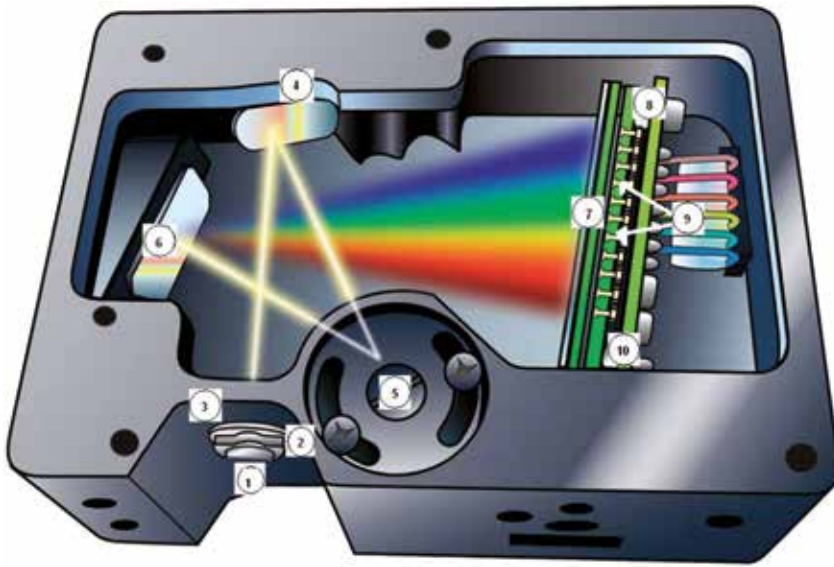


Abbildung 6: Aufbau und optischer Strahlengang eines USB2000+ [8].

2.4 Radiometrische und photometrische Größen richtig messen

Zur Bewertung der optischen Strahlung wird ein Spektralradiometer (Typ: USB2000+XR1-ES, S/N USB2+H15328) der Fa. Ocean Optics verwendet. Die einfallende polychromatische Strahlung wird über ein Gitter-Monochromator (s. Abb. 4, Pos. 5) kontinuierlich in seine spektralen Komponenten zerlegt und dann von einem 2048-Element (Pixel) großen CCD-Zeilensensor (s. Abb. 6, Pos. 8) ortsaufgelöst abgetastet. Mit dem Spektrometer lassen sich über einen Wellenlängenbereich von 200–1025 nm spektral aufgelöste radiometrische Messungen zur qualitativen Beschreibung des Emissionsspektrums einer Strahlungsquelle und zugleich zur quantitativen Bestimmung der Bestrahlungsstärke nach differenzierten Spektralbereichen (z.B. UV, VIS etc.) durchführen.

Grundsätzlich ist es sehr aufwendig, eine hohe Genauigkeit bei lichttechnischen Messungen zu erreichen. Der Messende sollte sich daher bewusst machen, dass die in der Praxis erzielbaren Genauigkeiten in der Regel z.B. im Vergleich mit elektrischen Messungen gering sind. Genauigkeiten von ca. $\pm 20\%$ sind für preiswerte Messgeräte üblich. Geräte im mittleren Preisseg-

ment liegen typischerweise bei $\leq \pm 10\%$, wobei Messgenauigkeiten von 10% und weniger mit Vorsicht betrachtet werden sollten, da sich diese Angaben häufig nur auf die Auswertelektronik beziehen, jedoch Detektor und Messumgebung außer Acht lassen.

2.4.1 Wellenlängenabhängigkeit

Die Empfindlichkeit der meisten zur optischen Strahlungsmessung verwendeten Photodetektoren hängt stark von der Wellenlänge ab. Für präzise Messungen ist daher je nach spektraler Zusammensetzung der vorliegenden Strahlung ein entsprechender Korrekturfaktor zu berücksichtigen. Mit Ausnahme von Lasern emittieren Lichtquellen jedoch ein mehr oder weniger breites Spektrum verschiedener Wellenlängen. So ist es wegen der Anpassung des Empfangsspektrums eines Detektors an das Emissionsspektrum der Lichtquelle in der Regel notwendig, den für die entsprechende Strahlungsart passenden Messkopf zu wählen oder spezielle Filter vor die Detektoren zu setzen. Die Wahl des richtigen Messkopfs bzw. die Qualität der verwendeten Filter und damit die Anpassung an die zu vermessende Strahlung bestimmen somit wesentlich die erreichbare Genauigkeit.

Bei dem vorliegenden Spektrometer wird die einfallende Strahlung

über ein Gitter-Monochromator kontinuierlich in ihre spektralen Komponenten zerlegt und dann von einem CCD-Zeilensensor ortsaufgelöst abgetastet. Die Messwerte liegen also über das gesamte Spektrum hinweg parallel an Einzelsensoren vor, wobei die Zuordnung von Wellenlänge zur Pixelposition auf dem Sensor (Wellenlängenkorrektur) wie auch die Abstimmung des Sensors auf absolute Bestrahlungsstärken im Rahmen einer Kalibrierung durch den Hersteller präzise ermittelt wurden. Messfehler im optischen Bereich aufgrund ungenügender Anpassung, z.B. durch die Wahl des falschen Messkopfs, entfallen damit weitestgehend.

2.4.2 Richtungsabhängigkeit

Viele strahlungsphysikalische oder lichttechnische Größen beziehen sich auf Licht mit annähernd parallelem Strahlenverlauf, was in der Praxis jedoch nur schwer zu erreichen ist. Tatsächlich aber hängt das Messergebnis vom Einfallswinkel der Strahlung zum Detektor ab. So wird Licht, das auf eine Oberfläche fällt, umso stärker reflektiert, je spitzer der Einfallswinkel wird. Für präzise Messungen sollten Lichtquelle und Detektor daher möglichst genau zueinander ausgerichtet werden, so dass die Strahlung im Idealfall senkrecht auf die Detektoroberfläche trifft.

2.4.3 Beeinflussung durch Fremd- bzw. Streulicht

Ein weiteres Problem bei lichttechnischen Messungen ist die Beeinflussung durch Streulicht, d.h. die Reflexion des zu messenden Lichts oder von Fremdlicht aus der Umgebung. Je nach Oberfläche, Material und Form von Gegenständen bzw. Flächen in der Messumgebung wird auftretendes Licht reflektiert bzw. gebeugt. Derartige Effekte können optische Messergebnisse verfälschen. Reflektierende Oberflächen oder Fremdlichteinfluss in der Nähe des Messaufbaus sollten daher vermieden oder – wenn nötig – entsprechend abgedeckt werden.

Teil 2 dieses Beitrags wird in Ausgabe 4/2017 erscheinen.