



Personenbezogene Lichtexpositions- messungen in Feldstudien – Eine Handlungsanleitung zur Charakterisierung und Kalibrierung von Lichtexpositionsdetektoren

baua: Bericht

**Forschung
Projekt F 2355**

L. Udovičić
M. Janßen
D. Nowack
L. Price

**Personenbezogene
Lichtexpositionsmessungen in Feldstudien
– Eine Handlungsanleitung zur
Charakterisierung und Kalibrierung von
Lichtexpositionsdetektoren**

1. Auflage 2016
Dortmund/Berlin/Dresden

Diese Veröffentlichung ist ein Teilbericht zum Projekt „Ermittlung der tatsächlichen Lichtexposition aus natürlichen und künstlichen Quellen im Hinblick auf zirkadiane Wirkungen bei schichtarbeitenden Beschäftigten“ – Projekt F 2355 – im Auftrag der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

- Autoren: Dr. rer. nat. Ljiljana Udovičić
Dipl.-Ing. Marco Janßen
Dennis Nowack
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
- Luke L. A. Price, Msci MSLL
Public Health England (PHE)
Laser and Optical Radiation Dosimetry Group
Centre for Radiation, Chemical and Environmental Hazards
- Fachliche Beratung: Dr. Erik Romanus
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
- Titelfoto: Uwe Völkner, Fotoagentur FOX, Lindlar/Köln
- Umschlaggestaltung: Susanne Graul
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
- Herstellung: Druck & Verlag Kettler GmbH, Bönen
- Herausgeber: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA)
Friedrich-Henkel-Weg 1 – 25, 44149 Dortmund
Postanschrift: Postfach 17 02 02, 44061 Dortmund
Telefon 0231 9071-2071
Telefax 0231 9071-2070
E-Mail info-zentrum@baua.bund.de
Internet www.baua.de
- Berlin: Nöldnerstraße 40 – 42, 10317 Berlin
Telefon 030 51548-0
Telefax 030 51548-4170
- Dresden: Fabricestraße 8, 01099 Dresden
Telefon 0351 5639-50
Telefax 0351 5639-5210

Die Inhalte der Publikation wurden mit größter Sorgfalt erstellt und entsprechen dem aktuellen Stand der Wissenschaft. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der Inhalte übernimmt die BAuA jedoch keine Gewähr.

Nachdruck und sonstige Wiedergabe sowie Veröffentlichung, auch auszugsweise, nur mit vorheriger Zustimmung der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.



doi:10.21934/baua:bericht20161220 (online)

www.baua.de/dok/8564502

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Kurzreferat	4
Abstract	5
1 Einleitung	6
2 Technische Eigenschaften des <i>Actiwatch Spectrum</i>-Detektors	9
3 Experimentelle Methoden	11
3.1 Überprüfung der Linearität des Signals	11
3.2 Messungen des Dunkelsignals	11
3.3 Messungen der Richtungsempfindlichkeit der Sensoren	11
3.4 Messungen der spektralen Empfindlichkeit der Sensoren	12
3.5 Kalibrierung der Sensoren	15
4 Ergebnisse	17
4.1 Linearität des Signals	17
4.2 Dunkelsignal	19
4.3 Analyse der Richtungsempfindlichkeit der Sensoren	21
4.4 Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit der Sensoren	23
4.5 Bestimmung der Kalibrierungsfaktoren der Sensoren	26
5 Zusammenfassung	31
Literaturverzeichnis	35
Verzeichnis der Tabellen	37
Verzeichnis der Abbildungen	38
Anhang A Definitionen, Einheiten, Wirkungskurven	40
Anhang B Kalibrierung der <i>Actiwatch Spectrum</i>-Detektoren	42
B1 Leuchtstofflampe	42
B2 LED-Lampe, warm-weiß	44
B3 Tageslicht	46

Personenbezogene Lichtexpositionsmessungen in Feldstudien - Eine Handlungsanleitung zur Charakterisierung und Kalibrierung von Lichtexpositionsdetektoren

Kurzreferat

Sowohl natürliches Licht als auch die künstliche Beleuchtung wirken auf die Gesundheit und die Leistungsfähigkeit der Menschen durch ihren Einfluss auf zirkadiane Rhythmen ein. In vielen Feldstudien, die sich mit zirkadianen Beeinflussungen befassen, wird die personenbezogene Lichtexposition mit Lichtexpositionsdetektoren gemessen. Die auf dem Markt erhältlichen Detektoren für solche Messungen unterscheiden sich stark hinsichtlich ihrer messtechnischen Eigenschaften und ihre Einschränkungen werden oft nicht berücksichtigt. Verschiedene Studien verdeutlichen die Wichtigkeit einer vorheriger Charakterisierung und, falls erforderlich, der Kalibrierung der Lichtexpositionsdetektoren, um verlässliche Messergebnisse erzielen zu können.

Dieser Bericht stellt die Ergebnisse der Charakterisierung und Kalibrierung von 23 *Actiwatch Spectrum*-Detektoren der Firma Philips Respironics dar, die im Rahmen des Forschungsprojektes F 2355 „Ermittlung der tatsächlichen Lichtexposition aus natürlichen und künstlichen Quellen im Hinblick auf zirkadiane Wirkungen bei schichtarbeitenden Beschäftigten“ verwendet wurden. Die Detektoren wurden hinsichtlich ihres Linearitätsbereichs und Dunkelsignals sowie ihrer Richtungs- und spektralen Empfindlichkeit charakterisiert. Die Ergebnisse bestätigten die Notwendigkeit der Kalibrierung von *Actiwatch Spectrum*-Detektoren, die mittels dreier künstlicher Lichtquellen (einer Halogen-, einer Leuchtstoff- und einer warm-weißen LED-Lampe) sowie anhand des Tageslichts durchgeführt wurde.

Schlagwörter:

Lichtexpositionsdetektor, personenbezogene Lichtexpositionsmessungen, Kalibrierung

Personal light exposure measurements in field studies - A guideline for characterisation and calibration of light exposure detectors

Abstract

Both natural light and artificial lighting affect the health and performance of people by their influence on circadian rhythms. In many field studies which deal with circadian influences, the personal light exposure is measured by light detectors. Detectors for personal measurement of light exposure available on the market are very different in terms of their metrological characteristics, and their limitations are often not taken into account. Several studies illustrate the importance of a prior characterisation and, if necessary, the calibration of the light exposure detectors, in order to achieve reliable outcomes.

This report represents the results of the characterisation and the calibration of 23 *Actiwatch Spectrum* detectors (Philips Respironics), which were carried out within the framework of the research project F 2355 "Determination of the actual light exposure from natural and artificial sources with regard to circadian effects in shift-working employees". The detectors were characterized in terms of their linearity range, dark signal and their directional and spectral sensitivity. The results confirmed the need for calibration of *Actiwatch Spectrum* detectors, which was then carried out using three artificial light sources (a halogen, a fluorescent and a warm-white LED lamp) as well as the daylight.

Key words:

light exposure detector, personal light exposure measurements, calibration

1 Einleitung

Viele physiologische Prozesse im menschlichen Körper, wie Schlaf-Wach-Rhythmus, die Regulation der Körpertemperatur, die Hormonfreisetzung, die Urinproduktion sowie die Aufmerksamkeit und die kognitive Leistungsfähigkeit, unterliegen der zirkadianen Rhythmik - sie haben eine Periodenlänge von ungefähr 24 Stunden [5, 10]. Die zirkadiane Rhythmik wird durch die zentrale innere Uhr gesteuert, die sich in einem kleinen Areal des Hypothalamus, dem suprachiasmatischen Kern (SCN, von *suprachiasmatic nucleus*) befindet. Dieser zentrale Schrittmacher taktet weitere innere Uhren in Organen und Zellen des Körpers und koordiniert dadurch verschiedene Körperprozesse, die zirkadianer Rhythmik unterliegen.

Mit Hilfe von äußeren Reizen, den sogenannten Zeitgebern, wird die innere Uhr im SCN auf den externen 24-Stunden-Zyklus angepasst - man spricht von der Synchronisation. Der wichtigste Zeitgeber für die Synchronisation ist das Licht, hauptsächlich der Hell-Dunkel-Rhythmus von Tag und Nacht. Die Informationen über die Lichtverhältnisse werden über den nicht-visuellen Pfad übermittelt: Sie werden von intrinsisch photosensitiven retinalen Ganglienzellen (ipRGC von *intrinsically photosensitive retinal ganglion cells*) der Augen aufgenommen und zum SCN weitergeleitet [2, 13].

Die spektralen Empfindlichkeiten des visuellen und des nicht-visuellen Systems unterscheiden sich. Die ipRGC enthalten das Photopigment Melanopsin, das im blauen Spektralbereich am empfindlichsten ist. Das bedeutet, dass das Licht im blauen Spektralbereich die zirkadiane Rhythmik besonders stark beeinflussen kann. Die Wirkungskurve für die nächtliche Unterdrückung des Hormons Melatonin, $s_{mel}(\lambda)$, die derzeit auch für die Beschreibung anderer nicht-visueller Wirkungen des Lichts verwendet wird, hat ihr Maximum bei einer Wellenlänge von etwa 490 nm [1, 6, 9, 17] und unterscheidet sich wesentlich von der Wirkungskurve für das Tagessehen, $V(\lambda)$, die ihr Maximum im grünen Spektralbereich bei 555 nm hat (siehe Abbildung A1 im Anhang A). Die nicht-visuelle Wirkung des Lichts auf die zirkadiane Rhythmik ist nicht nur von der spektralen Zusammensetzung des Lichts abhängig, sondern auch von einer Vielzahl anderer Parameter, wie z. B. von der Intensität des Lichts, vom Zeitpunkt der Einwirkung und der Expositionsdauer sowie von der persönlichen „Lichthistorie“.

Die Desynchronisation der inneren Uhr kann Beeinträchtigungen wie Schlafstörungen und Konzentrationsschwäche begünstigen sowie zu depressiven Verstimmungen, Stoffwechselstörungen, Herz-Kreislauf-Erkrankungen und sogar zu einem erhöhten Krebsrisiko führen. Die Internationale Agentur für Krebsforschung (IARC) hat die Schichtarbeit, die mit einer Störung der Synchronisation zirkadianer Rhythmik verbunden ist, als wahrscheinliches Humankarzinogen eingestuft [14]. Die Einschätzung basierte vorwiegend auf epidemiologischen Studien bei Krankenschwestern und Stewardessen, die besonders häufig von rotierenden Schichten mit Nachtarbeit betroffen sind. Bei langzeitiger Nachtarbeit ist bei diesen Arbeitnehmerinnen das Risiko, an Brustkrebs zu erkranken, erhöht.

Als ein möglicher Link zur Krebsentstehung wird - unter anderem - die nächtliche Lichtexposition diskutiert. Künstliches Licht während der Nacht ist mit der Suppression der Melatoninproduktion verbunden [4, 15, 16]. Neben seiner wichtigen Funktion im Schlaf-Wach-Zyklus wirkt das Hormon Melatonin krebshemmend [3, 22]. Unter anderem ist das Melatonin ein wirksamer Radikalfänger, der Zellen vor Schäden durch freie Radikale schützt. Die Melatonin-Suppression durch künstliches Licht während der Nacht kann zu einem verminderten Abfangen freier Radikale führen, die dann lokale Gewebeschäden hervorrufen können.

Das Wissen über die tatsächliche Lichtexposition der Menschen im Allgemeinen und bestimmter Berufsgruppen im Besonderen ist noch begrenzt. Deswegen haben in Studien, die sich mit zirkadianen Rhythmen und ihren Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit befassen, Messungen der persönlichen Lichtexposition an Bedeutung gewonnen. Die Detektoren für personenbezogene Messungen der Lichtexposition können von Probanden über einen längeren Zeitraum hinweg (Tage bis Wochen) getragen werden. Auf diese Weise werden umfangreiche Datensätze aufgezeichnet, die die Intensität und die spektrale Zusammensetzung des Lichtes sowie ihre zeitlichen Veränderungen dokumentieren. Dabei muss Folgendes beachtet werden: Die Detektoren, die lediglich die auf $V(\lambda)$ bezogene Beleuchtungsstärke¹ erfassen, messen nur die Lichtexposition, die sich auf das visuelle System auswirkt, und sind für Studien der zirkadianen Beeinflussung nicht geeignet.

Die Lichtexpositionsdetektoren unterschiedlicher Designs, messtechnischer Eigenschaften und der Qualität werden derzeit in Feldstudien eingesetzt. Einige kommerziell verfügbare Lichtexpositionsdetektoren, wie der GENEactive (ActivInsights) [12] erfassen nur die auf $V(\lambda)$ bezogene Beleuchtungsstärke. Sie werden wie eine Uhr am Handgelenk getragen, genauso wie der *Actiwatch Spectrum* (Philips Respironics) [20], der allerdings neben der Beleuchtungsstärke auch die Bestrahlungsstärken² im blauen, grünen und roten Spektralbereich wiedergibt. Der LightWatcher (WOLF Technologieberatung - Object-Tracker) [25] misst die Beleuchtungsstärke und die Bestrahlungsstärken im ultravioletten, blauen, grünen, roten und infraroten Spektralbereich und kann an der Brille befestigt werden. Andere Lichtexpositionsdetektoren wurden von einigen Forschergruppen im eigenen Labor entwickelt und sind nicht kommerziell verfügbar, wie der Daysimeter [11] oder der LuxBlick [24]. Der Daysimeter verfügt über drei Sensoren, die die Bestrahlungsstärke im roten, grünen und blauen Spektralbereich messen und diese dann in die Beleuchtungsstärke sowie in die Größen „zirkadianes Licht“ und „zirkadiane Wirkung“ umrechnen. Der LuxBlick misst die Beleuchtungsstärke und die Bestrahlungsstärke im blauen Spektralbereich und wird, wie auch der Daysimeter, an der Brille befestigt.

Es ist anzunehmen, dass im eigenen Labor entwickelte Lichtexpositionsdetektoren gut charakterisiert und kalibriert sind. Allerdings reichen die Herstellerinformationen bei kommerziell verfügbaren Lichtexpositionsdetektoren meist nicht aus, um diese Detektoren in wissenschaftlichen Studien ohne vorherige Analyse anzuwenden. Um zuverlässige Ergebnisse aus Feldstudien zu liefern, sind Kenntnisse eini-

¹ Zur Definition siehe Anhang A.

² Zur Definition siehe Anhang A.

ger messtechnischer Eigenschaften der eingesetzten Lichtexpositionsdetektoren, wie des Linearitätsbereichs, des Dunkelsignals oder der Richtungsempfindlichkeit notwendig. Unter Umständen wird auch eine Kalibrierung der Detektoren erforderlich.

Im vorliegenden Bericht wird das Vorgehen bei der Charakterisierung und Kalibrierung am Beispiel des *Actiwatch Spectrum*-Detektors dargestellt. Die Charakterisierung und Kalibrierung von 23 *Actiwatch Spectrum*-Detektoren wurde im Rahmen eines Kooperationsprojekts der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) und der Public Health England (PHE) zur „Ermittlung der tatsächlichen Lichtexposition aus natürlichen und künstlichen Quellen im Hinblick auf zirkadiane Wirkungen bei schichtarbeitenden Beschäftigten“ durchgeführt. Es handelte sich um eine nicht-interventionelle Feldstudie der Lichtexposition von schichtarbeitendem Krankenpflegepersonal. Die Lichtmessungen wurden sowohl für unterschiedliche Arbeitszeiten als auch außerhalb der Arbeitszeit durchgeführt. Die *Actiwatch Spectrum*-Detektoren wurden, zeitgleich in Deutschland und Großbritannien, jeweils eine Woche und zu drei unterschiedlichen Jahreszeiten (Winter, Frühling und Sommer) getragen. Der vorliegende Bericht beinhaltet nicht die Ergebnisse dieses Projekts, die an anderer Stelle veröffentlicht werden.

Der Bericht gliedert sich wie folgt: Kapitel 2 erläutert die technischen Eigenschaften des *Actiwatch Spectrum*-Detektors. In Kapitel 3 werden die experimentellen Methoden zur Charakterisierung und Kalibrierung der Lichtexpositionsdetektoren beschrieben. Die Überprüfung des Linearitätsbereichs und des Dunkelsignals, die Analyse der Richtungs- und der spektralen Empfindlichkeit der Sensoren sowie die Kalibrierung der Detektoren werden in Kapitel 4 dargestellt. In Kapitel 5 werden die Ergebnisse zusammengefasst. Die Definitionen der physikalischen Größen Bestrahlungsstärke und Beleuchtungsstärke sowie die Wirkungskurven für das Tagessehen und die melanopische Lichtwirkung sind im Anhang A zu finden. Anhang B enthält die Ergebnisse der Kalibrierung der *Actiwatch Spectrum*-Detektoren mittels einer Leuchtstofflampe, einer warm-weißen LED-Lampe und des Tageslichts.

2 Technische Eigenschaften des *Actiwatch Spectrum*-Detektors

Der *Actiwatch Spectrum*-Detektor [20] der Firma Philips Respironics ist ein im Handel erhältliches Messgerät, das von einer Vielzahl von Forschergruppen eingesetzt wird. Typische Anwendungsgebiete sind die Studien der zirkadianen Rhythmik, z. B. des Schlaf-Wach-Rhythmus, Untersuchungen zur Schichtarbeit oder zur Aktivität und Ermüdung am Arbeitsplatz. Es ist ein kleines Messgerät mit Abmessungen von 48 mm × 37 mm × 14 mm und soll, wie der Name schon sagt, wie eine Uhr am Handgelenk des nicht-dominanten Arms getragen werden (Abbildung 2.1 a).

Der Detektor verfügt über drei Sensoren (Silizium-Photodioden), die die Lichtexposition im roten, grünen und blauen Bereich des sichtbaren Spektrums, zwischen 400 nm und 700 nm, erfassen (Abbildung 2.1 b). Die Messwerte der Sensoren („Rotes Licht“, „Grünes Licht“ und „Blaues Licht“, in der Einheit $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$) werden im Folgenden als *Actiwatch* Bestrahlungsstärke E_R , E_G und E_B angegeben. Die spektrale Empfindlichkeit des dazugehörigen „roten“, „grünen“ und „blauen“ Sensors (R-, G- und B-Sensor) wird vom Hersteller nicht spezifiziert. Anhand der gemessenen Bestrahlungsstärken des R-, G- und B-Sensors sowie einer vom Hersteller nicht veröffentlichten Funktion wird die Beleuchtungsstärke als Messwert „Weißes Licht“ E_W in der Einheit lx abgeleitet. Ein *Actiwatch Spectrum*-Detektor ermöglicht nach Herstellerangaben Messungen der Bestrahlungsstärke im Bereich zwischen $0,1 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ und $5500 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ sowie der Beleuchtungsstärke im Bereich zwischen 1 lx und 100000 lx. Es wird eine Genauigkeit von 10 % bei 1500 lx angegeben.



Quelle: Uwe Völkner / Fotoagentur FOX

a)

b)

Abb. 2.1 a) Ein *Actiwatch Spectrum*-Detektor der Firma Philips Respironics.
b) Drei optische Sensoren des *Actiwatch Spectrum*-Detektors für den roten (R), grünen (G) und blauen (B) Spektralbereich.

Als Aktimetrie-Gerät, erfasst ein *Actiwatch Spectrum*-Detektor auch die Aktivität. Die Bewegungen werden hier mit Hilfe eines piezoelektrischen Beschleunigungssensors erfasst, der eine Veränderung der Beschleunigung in eine elektrische Spannung umwandelt. Der Sensor misst Beschleunigungen zwischen 0,5 g und 2 g ($g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$). Wenn die Messdaten heruntergeladen werden, wird das Ausmaß der Bewegungen als einheitslose Größe „Aktivität“ angegeben. Über den für die Berechnung der Aktivität verwendeten Algorithmus sind keine Informationen seitens des Herstellers vorhanden. Im obengenannten Projekt wurde die Aktivität dazu verwendet, Zeiträume zu identifizieren, in denen sich das Messgerät eventuell nicht am Handgelenk befand, und damit nicht die persönliche Lichtexposition gemessen wurde. Da für diese Kontrolle die absoluten Aktivitätswerte nicht notwendig sind, wurden die Beschleunigungssensoren nicht kalibriert³.

Die Stromversorgung eines *Actiwatch Spectrum*-Detektors erfolgt durch eine integrierte Lithium-Knopfbatterie, die eine kontinuierliche Aufnahme der Lichtexposition und der Aktivität im Feld über längere Zeiträume - über Tage und Wochen - ermöglicht. Die Messintervalle können in einem Bereich zwischen 15 s und 1 min eingestellt werden. Die Bedienung der Messgeräte erfolgt mit der Actiware Software (Version 5.71.0, Philips Respironics), die die Konfiguration eines *Actiwatch Spectrum*-Detektors für die aktuelle Messaufgabe ermöglicht. Mit der Software werden auch die Messdaten abgerufen und in Form einer CSV-Datei zur weiteren Verarbeitung gespeichert.

Die Studien von Price et al. 2012 [21], Figueiro et al. 2013 [11] und Markvart et al. 2015 [18] haben sich mit messtechnischen Eigenschaften der *Actiwatch Spectrum*-Detektoren bereits befasst. Price et al. untersuchten die Richtungsempfindlichkeit, die Linearität und die spektrale Empfindlichkeit von 16 *Actiwatch Spectrum*-Detektoren und führten die Kalibrierung der Detektoren mittels einer Halogenlampe durch. Sie zeigten, dass die Wirkungskurve für melanopische Lichtwirkung durch eine geeignete lineare Kombination der Signale des B- und des G-Sensors approximiert werden kann. Dadurch wären die *Actiwatch Spectrum*-Detektoren für Feldstudien, die sich mit zirkadianen Wirkungen befassen, gut einsetzbar. Figueiro et al. untersuchten die *Actiwatch Spectrum*-Detektoren hinsichtlich ihrer Richtungsempfindlichkeit und ihres Linearitätsbereichs. Sie konnten zeigen, dass sich die spektrale Empfindlichkeit der *Actiwatch Spectrum*-Detektoren wesentlich von der Wirkungskurve für das Tagessehen unterscheidet, was zu großen Abweichungen bei den Messungen der Beleuchtungsstärke führt. Markvart et al. führten Kalibrierungen der *Actiwatch Spectrum*-Detektoren mittels unterschiedlicher Lichtquellen durch, bestimmten die Dunkelsignale von 48 *Actiwatch Spectrum*-Detektoren und untersuchten die Anwendung von Diffusoren, um die Richtungsempfindlichkeit dieser Detektoren zu verbessern.

³ Für die Kalibrierung der Beschleunigungssensoren, um die Aktimetrie-Geräte untereinander zu vergleichen und absolute Beschleunigungswerte berechnen zu können, siehe z. B. [23].

3 Experimentelle Methoden

3.1 Überprüfung der Linearität des Signals

Die Linearität der Signale E_R , E_G , E_B und E_W eines *Actiwatch Spectrum*-Detektors wurde mittels einer Xenon-Lampe (LXH 100, 75 W, Müller Elektronik-Optik) überprüft. Dafür wurden Neutraldichtefilter verwendet, die die Transmission der ursprünglichen optischen Strahlungsleistung reduzieren. Die Beleuchtungsstärke wurde mit einem kalibrierten Beleuchtungsstärkemessgerät⁴ der Firma Gigahertz-Optik ermittelt. Es handelte sich um das Optometer X1₁ mit dem Beleuchtungsstärke-Messkopf VL-3701, dessen photometrische Empfindlichkeit und Cosinus-Blickfeldfunktion der DIN 5032-7:1985 [7] Güteklasse A entspricht ($V(\lambda)$ -Anpassungsfehler $f_1 \leq 3 \%$, Cosinus-Anpassungsfehler $f_2 \leq 1.5 \%$).

Für jeden Neutraldichtefilter wurden die Messungen folgendermaßen durchgeführt: Ein Neutraldichtefilter wurde vor dem Beleuchtungsstärke-Messkopf befestigt, und die Beleuchtungsstärke wurde gemessen. Danach wurde der *Actiwatch Spectrum*-Detektor in dieselbe Position gebracht und für eine Dauer von 120 s dem Licht ausgesetzt. Da das Messintervall des Detektors auf 15 s eingestellt worden war, wurden so für jeden Neutraldichtefilter 8 Messungen der Signale E_R , E_G , E_B und E_W aufgezeichnet. Sie wurden bei der späteren Auswertung arithmetisch gemittelt. Alle Messungen fanden in einem abgedunkelten Labor statt und wurden in einer Entfernung durchgeführt, die eine gleichmäßige Ausleuchtung der Beleuchtungsstärke-Messkopfs und der Sensoren sicherstellte.

3.2 Messungen des Dunkelsignals

Um die Dunkelsignale einzelner Sensoren der *Actiwatch Spectrum*-Detektoren und die daraus abgeleiteten Beleuchtungsstärken zu messen, wurden die Detektoren mit der Sensorseite auf eine Unterlage gelegt, mit einem schwarzen Tuch abgedeckt und in dieser Position 30 min belassen. Das Messintervall der Detektoren betrug 15 s; so wurden für jeden Detektor 120 Messungen aufgezeichnet und bei der Auswertung arithmetisch gemittelt.

3.3 Messungen der Richtungsempfindlichkeit der Sensoren

Die Analyse der Richtungsempfindlichkeit des R-, G- und B-Sensors eines *Actiwatch Spectrum*-Detektors wurde für zwei Ausrichtungen der Sensoren - die horizontale und die vertikale Ausrichtung - durchgeführt. Als optische Quelle diente eine lasergetriebene Lichtquelle (EQ-99 LDLS der Firma Energetiq). Die Beleuchtungsstärke der Quelle wurde mittels des Optometers X1₁ mit dem Beleuchtungsstärke-Messkopf VL-3701 kontrolliert, um die Stabilität der Quelle sicherzustellen. Die Messungen fanden in einem abgedunkelten Raum statt.

⁴ Der Messkopf eines Beleuchtungsstärkemessgeräts ist mit einem optischen Filter ausgestattet, der die spektrale Empfindlichkeit des Auges für das Tagessehen berücksichtigt.

Bei den Messungen der Richtungsempfindlichkeit für die horizontale Ausrichtung der Sensoren wurde die Fläche des *Actiwatch Spectrum*-Detektors zuerst senkrecht zum Lichteinfall positioniert. Beginnend von dieser Position aus (Einfallswinkel 0°) wurde der Detektor um die Rotationsachse, die durch die Mitte des G-Sensors läuft, in Schritten von 10° im Uhrzeigersinn (negativer Winkel) und danach gegen den Uhrzeigersinn (positiver Winkel) gedreht (siehe Abbildung 3.1 a).

Für die Messungen der Richtungsempfindlichkeit in vertikaler Ausrichtung wurde der Detektor im Vergleich zu der vorherigen Position um 90° im Uhrzeigersinn gedreht. Der Detektor wurde danach um die Rotationsachse, die identisch ist mit der Achse durch die Sensoren, gedreht (Abbildung 3.1 b). Die Drehung verlief, wie bereits oben beschrieben, in Schritten von 10° .

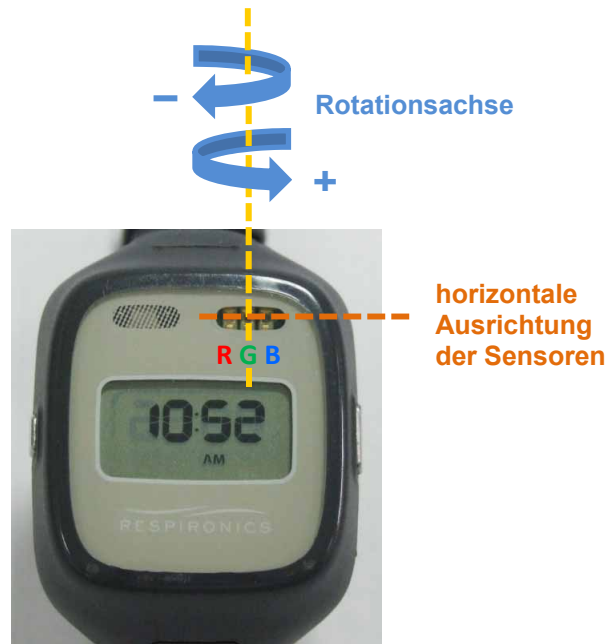
Der Detektor wurde in jeder Position für eine Dauer von 120 s dem Licht ausgesetzt, das Messintervall betrug 15 s. Damit wurden für jede Position des *Actiwatch Spectrum*-Detektors 8 Messungen der Signale E_R , E_G , E_B und E_W aufgezeichnet, die bei der späteren Auswertung arithmetisch gemittelt wurden.

3.4 Messungen der spektralen Empfindlichkeit der Sensoren

Für die Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit der R-, G- und B-Sensoren aller *Actiwatch Spectrum*-Detektoren wurde eine durchstimmbare monochromatische Lichtquelle der Firma LOT-Quantum Design eingesetzt. Es handelte sich um die Kombination einer Xenon-Lampe (300 W) mit einem Monochromator (Typ MSH 300). Alle spektralen Messungen wurden im Wellenlängenbereich zwischen 350 nm und 750 nm in 1 nm-Schritten durchgeführt. Sie fanden in einem Dunkelraum bei konstanter Umgebungstemperatur von 22°C statt.

Die spektrale Bestrahlungsstärke der Xenon-Lampe wurde mittels eines CCD-Array-Spektrometers (CAS 140 CT, Firma Instrument Systems) gemessen. Das Spektrometer wurde vorher hinsichtlich seiner Wellenlängengenauigkeit anhand einer Quecksilberdampf-Niederdrucklampe (L.O.T.-Oriol) überprüft. Im sichtbaren Spektralbereich lag die Wellenlängengenauigkeit bei $< 0,3$ nm und die spektrale Halbwertsbreite betrug 7 nm. Ein Messkopf (EOP-146, Instrument Systems; Durchmesser 15 mm), der vor dem Austrittsspalt des Monochromators positioniert wurde, koppelte das optische Eingangssignal über einen Lichtwellenleiter in das Spektrometer ein (siehe Abbildung 3.2).

Um die spektrale Abhängigkeit des Signals der R-, G- und B-Sensoren zu messen, wurden die *Actiwatch Spectrum*-Detektoren in dieselbe Position vor dem Austrittsspalt des Monochromators eingebracht und 60 s lang dem Licht einer definierten Wellenlänge ausgesetzt. Das Messintervall betrug 15 s. Während dieser Expositionsdauer wurden 4 Messungen durchgeführt. Um die Auswirkungen von Änderungen während der ersten und/oder letzten 15 s zu vermeiden, wurde für die spätere Auswertung immer der zweite Messwert genommen. Die Gesamtdauer der Messung der spektralen Empfindlichkeit eines *Actiwatch Spectrum*-Detektors betrug etwa 6,5 Stunden.



a)



b)

Abb. 3.1 a) Horizontale Ausrichtung der Sensoren: Die Rotationsachse und die Gerade durch die Sensoren stehen senkrecht zueinander und zum Lichteinfall.

b) Die vertikale Ausrichtung der Sensoren: In dieser Position wird der Detektor im Vergleich zu der vorherigen Position um 90° im Uhrzeigersinn gedreht. Die Rotationsachse und die Gerade durch die Sensoren sind identisch und stehen senkrecht zum Lichteinfall.

In beiden Fällen stellen die Pfeile die Drehrichtung des Detektors dar.

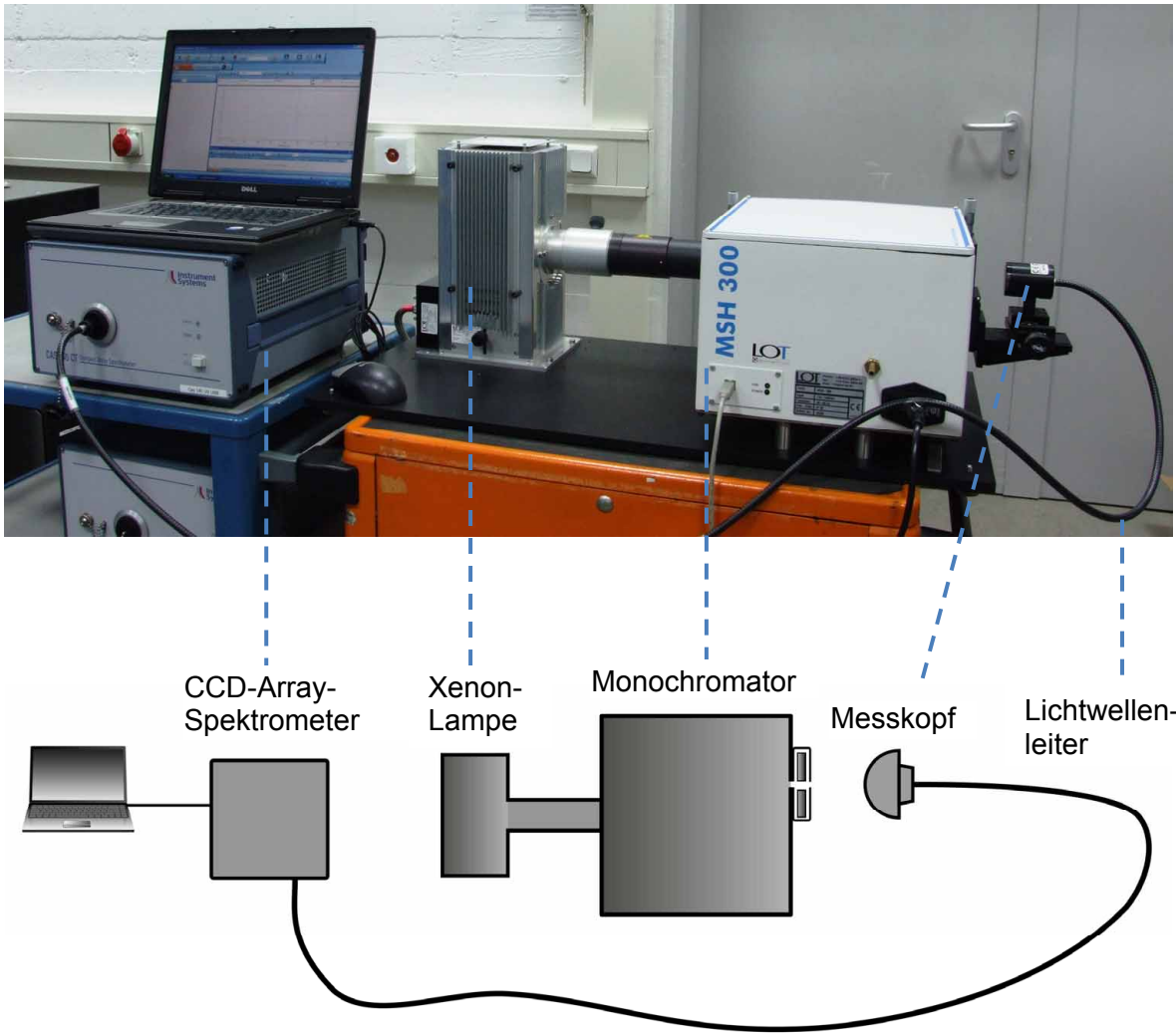


Abb. 3.2 Messungen der spektralen Bestrahlungsstärke der Xenon-Lampe vor dem Austrittsspalt des MSH 300 Monochromators anhand des CCD-Array-Spektrometers CAS 140 CT.

3.5 Kalibrierung der Sensoren

Zur Kalibrierung der *Actiwatch Spectrum*-Sensoren wurden drei künstliche Lichtquellen und Tageslicht eingesetzt.

Bei den künstlichen Lichtquellen handelte es sich um eine Halogenlampe (Masterline PLUS, 50 W, 12 V, Philips), eine Leuchtstofflampe (Spiral Tageslichtlampe 85 W, 5400 K, Proxistar) und eine warm-weiße LED-Lampe (MR-16, 3 W, 12 V, 3000 K, Omnilux). Die Halogen- und die LED-Lampe wurden entsprechend den Vorgaben bei den technischen Daten mit einem Netzgerät (E 3632 A, Agilent) betrieben. Die Messungen wurden erst gestartet, nachdem sich Stromstärke und Spannung stabilisiert hatten (etwa 15 min nach dem Anschließen). Um die Stabilität der optischen Strahlungsleistung der Quellen zu sichern, erfolgte die wiederholte Kontrolle der Beleuchtungsstärke mit dem Optometer X1₁ mit dem Beleuchtungsstärke-Messkopf VL-3701. Alle Labormessungen fanden in einem Dunkelraum bei einer konstanten Umgebungstemperatur von 22 °C statt.

Die spektrale Bestrahlungsstärke der Lampen wurde mit einem Doppelmonochromator (DTM 300, Bentham Instruments) im Wellenlängenbereich zwischen 350 nm und 750 nm gemessen. Vor dem Austrittsspalt des Doppelmonochromators wurde als Detektor eine Silizium-Photodiode (DH-Si, Bentham Instruments) eingesetzt. Der Doppelmonochromator wurde hinsichtlich seiner Wellenlängengenauigkeit mittels einer Quecksilberdampf-Niederdrucklampe (L.O.T.-Oriol) überprüft. Die Wellenlängengenauigkeit bei 404,6 nm betrug 0,05 nm. Die Kalibrierung der spektralen Bestrahlungsstärke wurde anhand einer 1000 W Wolfram-Halogen-Kalibrierlampe (LDV 1000 H, OMtec, rückführbar auf Normale von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt) mit einer spektralen Bandbreite von 2 nm durchgeführt. Als Eingangsoptik diente ein cosinus-korrigierter Messkopf (J1002-33, Schreder), der das optische Eingangssignal über einen Lichtwellenleiter in den Doppelmonochromator einkoppelte (siehe Abbildung 3.3).

Nach der oben beschriebenen Messung der spektralen Bestrahlungsstärke einer Lampe wurde anstelle des Beleuchtungsstärke-Messkopfs ein *Actiwatch Spectrum*-Detektor für eine Dauer von 120 s dem Lampenlicht ausgesetzt. Mit einem Messintervall von 15 s wurden 8 Messungen der E_R , E_G , E_B und E_W aufgezeichnet, die bei der späteren Auswertung arithmetisch gemittelt wurden. Die Messungen fanden in einer Entfernung statt, die eine gleichmäßige Ausleuchtung sowohl des Beleuchtungsstärke-Messkopfs als auch der Sensoren der *Actiwatch Spectrum*-Detektoren sicherstellte.

Die Tageslichtkalibrierung der Sensoren der *Actiwatch Spectrum*-Detektoren fanden unter freiem Himmel an einem sonnigen Tag (15.12.2015) statt. Auf dem Dach des Hauses I der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin in Dortmund (51° 30' N, 7° 27' O) wurden gleichzeitig die Bestrahlungsstärke des Tageslichts mittels des CCD-Array-Spektrometers CAS 140 CT (Instrument Systems) gemessen sowie die Signale E_R , E_G , E_B und E_W der *Actiwatch Spectrum*-Detektoren aufgezeichnet (siehe Abbildung 3.4).

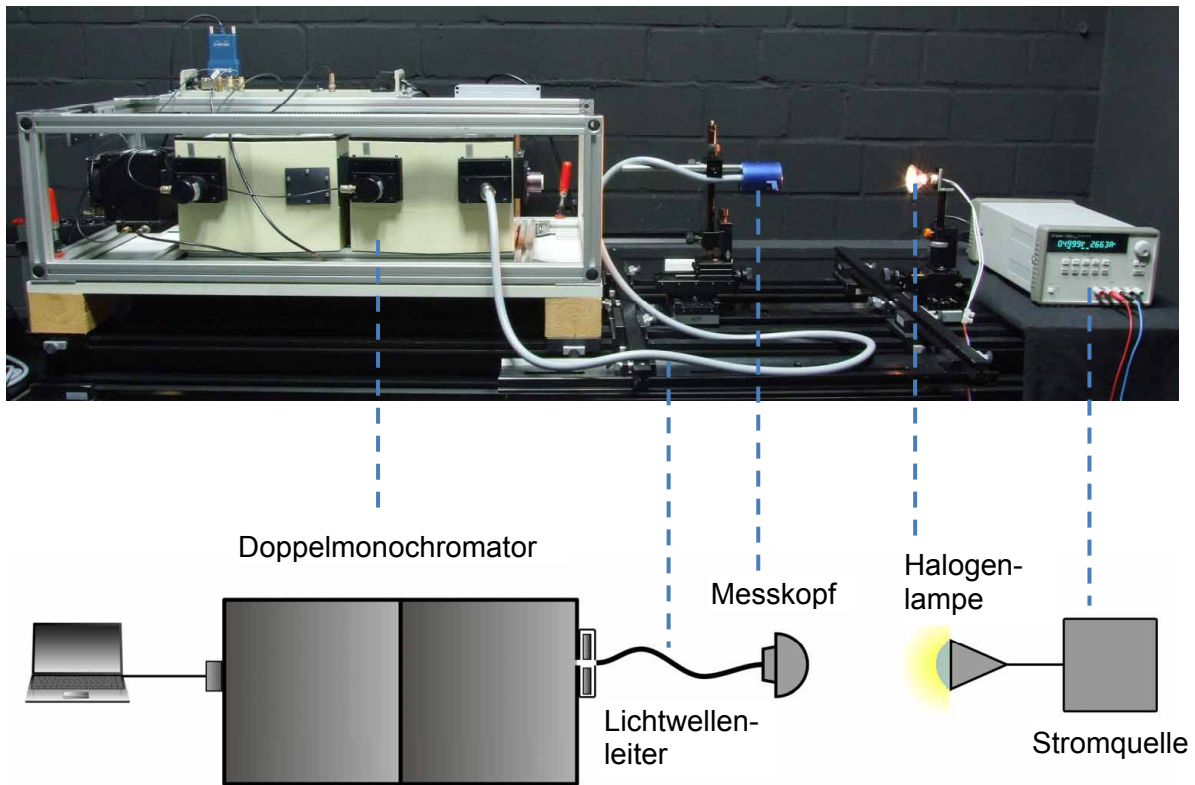


Abb. 3.3 Messungen der spektralen Bestrahlungsstärke der Halogenlampe anhand des Doppelmonochromators DTM 300.



Abb. 3.4 Messungen der spektralen Bestrahlungsstärke des Tageslichts mittels des CCD-Array-Spektrometers und der *Actiwatch Spectrum*-Detektoren am 15.12.2015.

4 Ergebnisse

4.1 Linearität des Signals

Der Linearitätsbereich ist der Bereich, in dem die Empfängerausgangsgröße (hier die *Actiwatch Spectrum* Signale E_R , E_G , E_B und E_W) proportional der auftreffenden Strahlungsleistung einer optischen Quelle ist. In diesem Bereich ist die Empfindlichkeit der Sensoren des Empfängers konstant.

Der Linearitätsbereich wurde (wie in Abschnitt 3.1 beschrieben) am Beispiel des *Actiwatch Spectrum*-Detektors mit der Seriennummer (SN) 08992 verifiziert. Hierfür wurden Neutralsichtfilter verwendet, zusätzlich fand eine Messung ohne Filter statt. Die Abbildungen 4.1 und 4.2 zeigen die Abhängigkeit der Signale E_W , E_R , E_G und E_B des *Actiwatch Spectrum*-Detektors SN 08992 von der tatsächlichen Beleuchtungsstärke E_v , ermittelt anhand des bereits erwähnten kalibrierten Beleuchtungsstärkemessgeräts. Jeder Punkt entspricht einem Mittelwert von 8 Messungen. Die Standardabweichungen lagen immer unter 2 %. Die Abbildungen bestätigen, dass die Signale des *Actiwatch Spectrum*-Detektors SN 08992 über mehrere Größenordnungen hinweg linear sind (hier bis 56000 lx). Die Messung ohne Neutralsichtfilter ($E_v = 106700$ lx) führte zur Sättigung der Signale dieses Detektors.

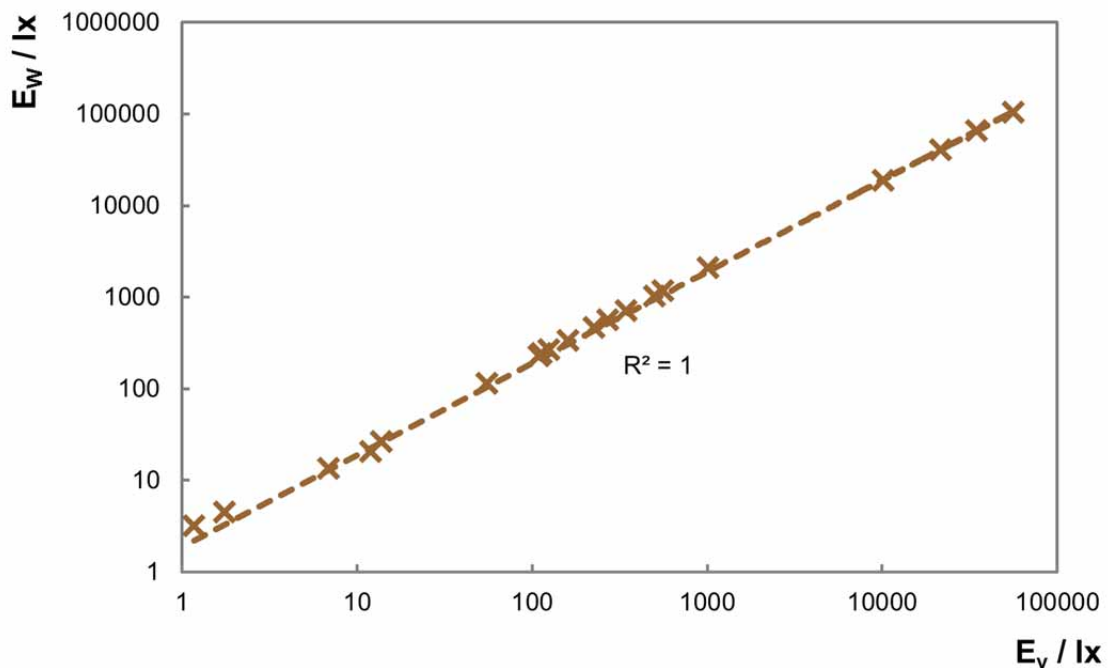


Abb. 4.1 Die Abhängigkeit des Signals E_W des *Actiwatch Spectrum*-Detektors SN 08992 von der Beleuchtungsstärke E_v ist im Bereich zwischen 1 lx und 56000 lx linear (Bestimmtheitsmaß $R^2 = 1$).

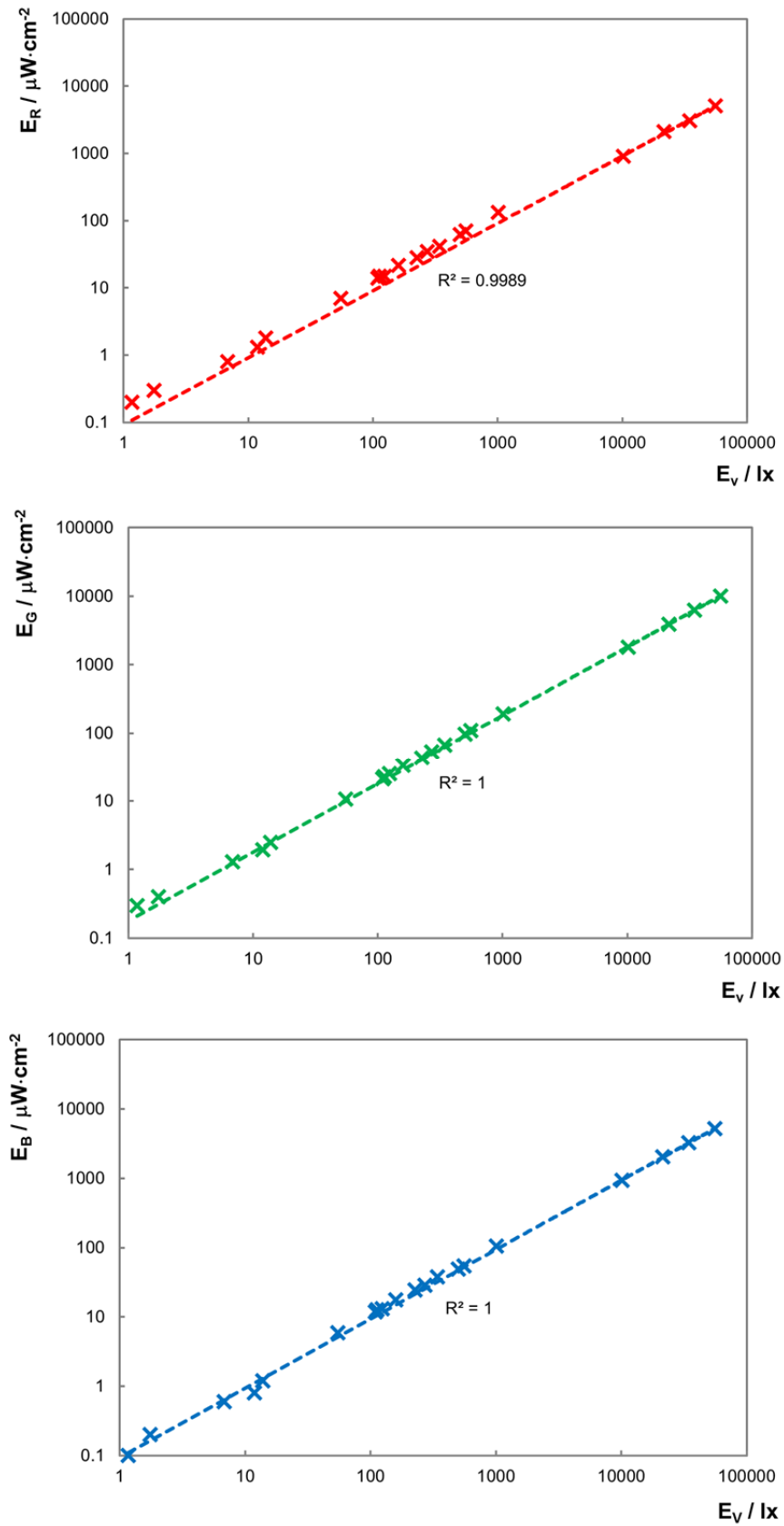


Abb. 4.2 Lineare Abhängigkeit der Signale des R-, G- und B-Sensors, E_R , E_G und E_B , des *Actiwatch Spectrum*-Detektors SN 08992 von der Beleuchtungsstärke E_v .

4.2 Dunkelsignal

Auch wenn kein Licht auf einen Silizium-Photodioden-Sensor fällt, fließt im Sensor ein geringer Strom - der sogenannte Dunkelstrom, der ein Signal erzeugt. Das Dunkelsignal begrenzt die untere Nachweisgrenze des Sensors für extrem geringe Lichtintensitäten.

Die Messungen des Dunkelsignals einzelner Sensoren und der abgeleiteten Beleuchtungsstärke wurden bereits in Abschnitt 3.2 beschrieben. Tabelle 4.1 zeigt die Mittelwerte aus 120 Messungen der Dunkelsignale E_R' , E_G' , E_B' und E_W' aller 23 *Actiwatch Spectrum*-Detektoren. Die Maximalwerte der Dunkelsignale sind $E_R' = 0,05 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$, $E_G' = 0,06 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$, $E_B' = 0,03 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ und $E_W' = 0,58 \text{ lx}$.

Tab. 4.1 Gemessene Dunkelsignale der R-, G- und B-Sensoren (E_R' , E_G' , E_B') sowie die daraus abgeleiteten Beleuchtungsstärken E_W' der *Actiwatch Spectrum*-Detektoren. Die Messwerte in der Größenordnung von 10^{-5} sind nicht aufgeführt.

<i>Actiwatch Spectrum</i> -Detektor	$E_R' / \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$	$E_G' / \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$	$E_B' / \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$	E_W' / lx
SN 08962	0,01 ± 0,00	-	0,01 ± 0,01	0,02 ± 0,01
SN 08963	0,01 ± 0,00	-	0,01 ± 0,01	0,04 ± 0,01
SN 08964	0,01 ± 0,00	-	-	0,01 ± 0,00
SN 08967	0,02 ± 0,00	-	-	0,05 ± 0,00
SN 08968	0,03 ± 0,00	0,06 ± 0,03	0,02 ± 0,00	0,58 ± 0,24
SN 08970	0,01 ± 0,00	0,02 ± 0,02	0,02 ± 0,01	0,22 ± 0,13
SN 08973	0,02 ± 0,01	0,04 ± 0,03	0,02 ± 0,01	0,39 ± 0,27
SN 08974	0,01 ± 0,00	-	0,01 ± 0,01	0,02 ± 0,01
SN 08977	0,03 ± 0,00	-	-	0,06 ± 0,01
SN 08978	0,01 ± 0,01	-	-	0,02 ± 0,02
SN 08980	0,01 ± 0,00	-	-	0,01 ± 0,00
SN 08983	0,03 ± 0,01	0,02 ± 0,03	0,02 ± 0,01	0,28 ± 0,25
SN 08988	0,04 ± 0,00	0,04 ± 0,02	0,03 ± 0,01	0,46 ± 0,18
SN 08991	0,02 ± 0,00	-	0,01 ± 0,00	0,06 ± 0,01
SN 08992	0,03 ± 0,01	0,02 ± 0,02	0,01 ± 0,00	0,28 ± 0,14
SN 08993	0,01 ± 0,00	0,03 ± 0,01	0,02 ± 0,01	0,23 ± 0,11
SN 08995	0,00 ± 0,00	-	-	0,01 ± 0,00
SN 08998	0,02 ± 0,00	0,04 ± 0,03	0,02 ± 0,01	0,45 ± 0,27
SN 08999	0,02 ± 0,00	0,04 ± 0,00	0,01 ± 0,00	0,35 ± 0,01
SN 09000	0,01 ± 0,00	-	0,01 ± 0,00	0,04 ± 0,02
SN 09001	0,02 ± 0,00	-	0,01 ± 0,01	0,05 ± 0,01
SN 09003	0,02 ± 0,00	0,03 ± 0,01	0,01 ± 0,00	0,34 ± 0,07
SN 09005	0,05 ± 0,06	0,03 ± 0,01	0,01 ± 0,00	0,39 ± 0,11

4.3 Analyse der Richtungsempfindlichkeit der Sensoren

Die Messungen der Bestrahlungs- bzw. Beleuchtungsstärke setzen voraus, dass die Richtungsempfindlichkeit eines Detektors proportional zum Cosinus des Lichteinfallswinkels ist. Eine offene Silizium-Planar-Photodiode würde eine nahezu perfekte cosinus-förmige Richtungsempfindlichkeit aufweisen [19]. Allerdings liegen die Sensoren der *Actiwatch Spectrum*-Detektoren in einer flachen Vertiefung hinter einem etwa $9\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ großen Fenster (Abbildung 4.3 a), was auf eine Einschränkung der idealen cosinus-förmigen Richtungsempfindlichkeit hinweist. Die Kanten des Fensters verhindern, dass das einfallende Licht die Sensoren erreicht. Da die Sensoren einiger *Actiwatch Spectrum*-Detektoren noch mit einer zusätzlichen Verschiebung zu der oberen Kante des Fensters verbaut wurden (Abbildung 4.3 b), wird diese Richtungsempfindlichkeit der Sensoren zusätzlich verschlechtert.

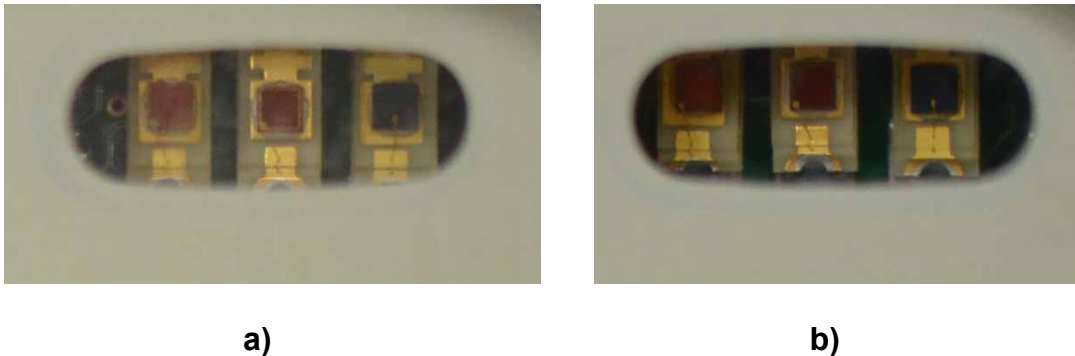


Abb. 4.3 Zwei unterschiedliche Positionierungen der R-, G- und B-Sensoren im Gehäuse der *Actiwatch Spectrum*-Detektoren.

Die Messungen der Richtungsempfindlichkeit der Sensoren wurden, wie in Abschnitt 3.3 beschrieben, am Beispiel eines *Actiwatch Spectrum*-Detektors (SN 08968), durchgeführt. Die horizontale und die vertikale Richtungsempfindlichkeit des R-, G- und B-Sensors im Vergleich zu der Cosinus-Funktion werden in Abbildungen 4.4 und 4.5 dargestellt. Jeder Punkt entspricht einem Mittelwert von 8 Messungen. Alle Standardabweichungen lagen unter 2 %.

Die Abweichungen von einer cosinus-förmigen Richtungsempfindlichkeit eines photometrischen Messgeräts werden durch die cos-getreue Bewertung f_2 beschrieben (Bezeichnung nach DIN EN 13032-1:2012 [8]). Ein niedrigerer Wert von f_2 deutet auf eine bessere Übereinstimmung mit der cosinus-förmigen Richtungsempfindlichkeit hin - im Idealfall beträgt diese 0 %. Die cos-getreue Bewertung f_2 für die horizontale und die vertikale Ausrichtungen der Sensoren des *Actiwatch Spectrum*-Detektors SN 08968 ist in Tabelle 4.2 dargestellt.

Die Abbildungen 4.4 und 4.5 sowie die Tabelle 4.2 zeigen, dass die horizontale Richtungsempfindlichkeit im Cosinus-Verhalten des *Actiwatch Spectrum*-Detektors SN 08968 einen kleineren Fehler als die vertikale Richtungsempfindlichkeit aufweist. Allerdings zeigt die vertikale Richtungsempfindlichkeit weniger Variabilität zwischen den Sensoren.

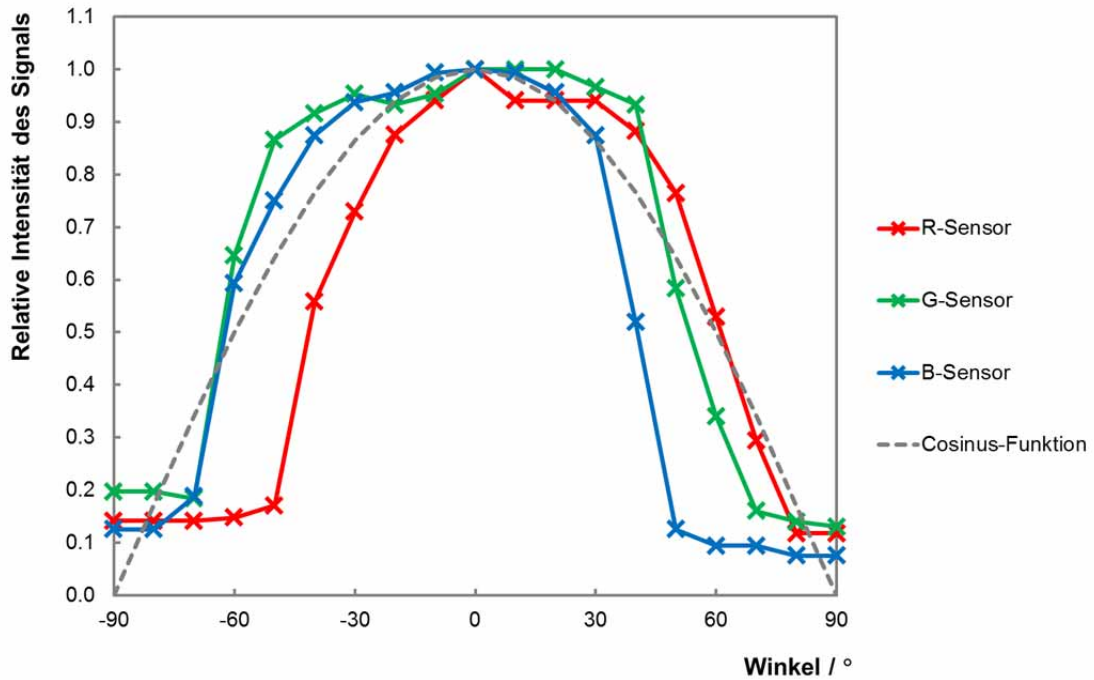


Abb. 4.4 Horizontale Richtungsempfindlichkeit der R-, G- und B-Sensoren des *Actiwatch Spectrum*-Detektors SN 08968 im Vergleich zur Cosinus-Funktion.

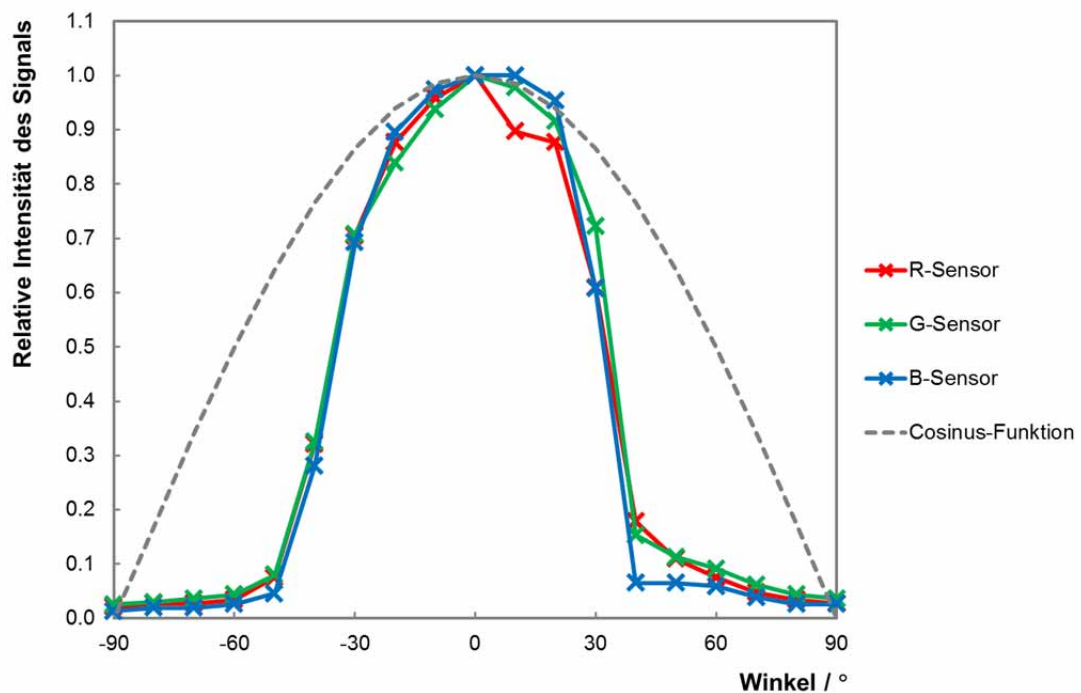


Abb. 4.5 Vertikale Richtungsempfindlichkeit der R-, G- und B-Sensoren des *Actiwatch Spectrum*-Detektors SN 08968 im Vergleich zur Cosinus-Funktion.

Tab. 4.2 Die cos-getreue Bewertung f_2 für die horizontale und die vertikale Ausrichtungen der Sensoren des *Actiwatch Spectrum*-Detektors SN 08968.

Sensor-Signal	Horizontale Ausrichtung der Sensoren	Vertikale Ausrichtung der Sensoren
	f_2	f_2
E_R	39 %	60 %
E_G	22 %	57 %
E_B	46 %	64 %

4.4 Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit der Sensoren

Bereits in Abschnitt 4.1 wurde deutlich, dass die anhand der *Actiwatch Spectrum*-Detektors gemessene Beleuchtungsstärke E_W von der tatsächlichen Beleuchtungsstärke, E_v , abweicht. Vor dem Einsatz dieser Detektoren in Feldversuchen ist es deshalb notwendig, sie zu kalibrieren. Falls sich eine Feldstudie vorrangig mit der sich auf das visuelle System auswirkenden Lichtexposition befasst, kann die Kalibrierung der Beleuchtungsstärke ausreichend sein. Da dies im obengenannten Projekt nicht der Fall ist, mussten auch die Sensoren kalibriert werden.

Um die spektrale Empfindlichkeit der Sensoren zu ermitteln, die für die Kalibrierung notwendig ist, wurden Spektren einer Xenon-Lampe sowohl mittels eines CCD-Array-Spektrometers als auch aller 23 *Actiwatch Spectrum*-Detektoren aufgenommen (Abschnitt 3.4). Abbildung 4.6 zeigt die gemessene spektrale Bestrahlungsstärke der Xenon-Lampe. In Abbildung 4.7 sind beispielhaft die spektralaufgelösten Signale der R-, G- und B-Sensoren, $E_R(\lambda)$, $E_G(\lambda)$ und $E_B(\lambda)$, eines *Actiwatch Spectrum*-Detektors (SN 08992) dargestellt. Die spektrale Empfindlichkeit der R-, G- und B-Sensoren des Detektors SN 08992 wurde anhand folgender Gleichungen berechnet

$$R(\lambda) = \frac{E_R(\lambda)}{E_{Xe}(\lambda)} \quad (4.1)$$

$$G(\lambda) = \frac{E_G(\lambda)}{E_{Xe}(\lambda)} \quad (4.2)$$

$$B(\lambda) = \frac{E_B(\lambda)}{E_{Xe}(\lambda)} \quad (4.3)$$

und in Abbildung 4.8 dargestellt.

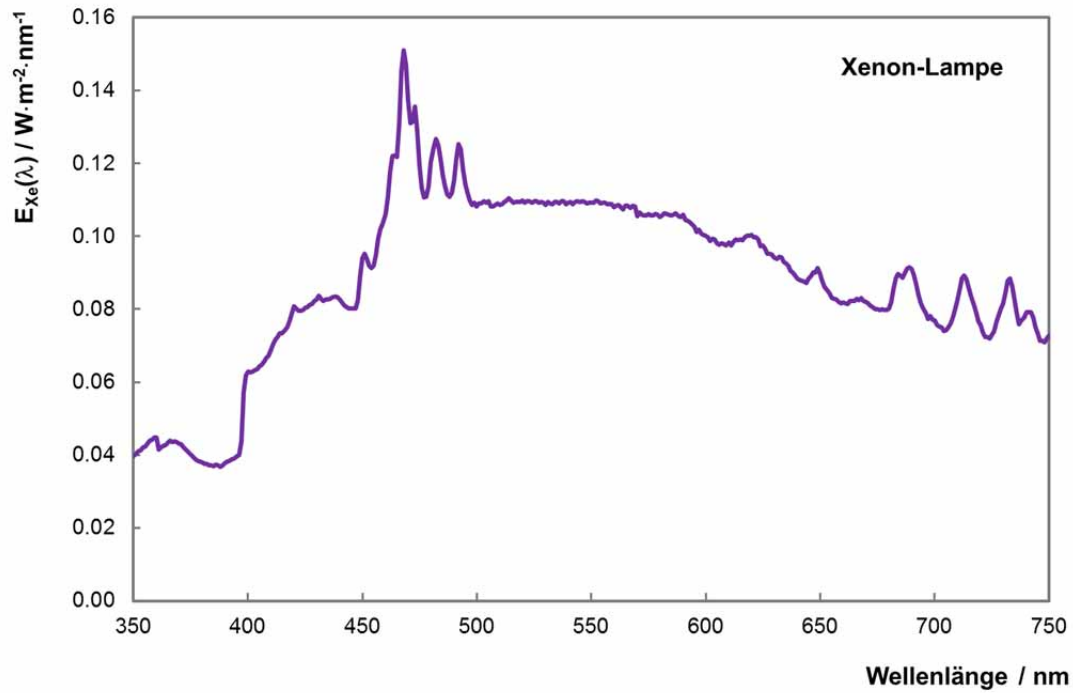


Abb. 4.6 Gemessene spektrale Bestrahlungsstärke der Xenon-Lampe, $E_{Xe}(\lambda)$, die bei der Messung der spektralen Empfindlichkeit der Sensoren eingesetzt wurde.

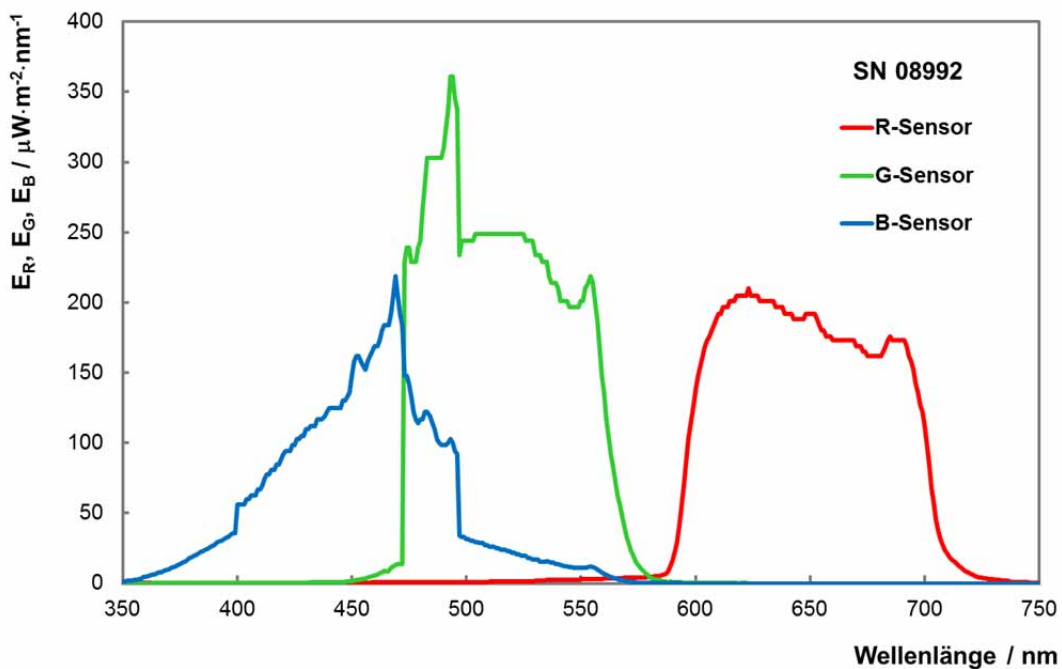


Abb. 4.7 Spektralaufgelöste Signale der Sensoren, $E_R(\lambda)$, $E_G(\lambda)$ und $E_B(\lambda)$, eines mit dem Licht der Xenon-Lampe ausgeleuchteten *Actiwatch Spectrum*-Detektors (SN 08992).

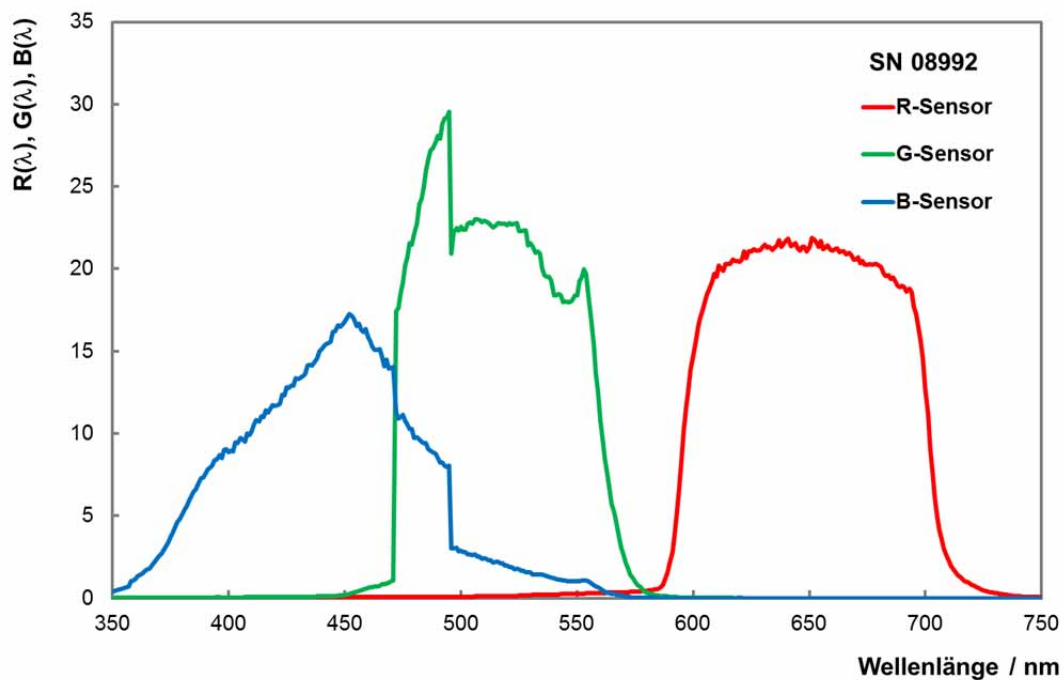


Abb. 4.8 Gemessene spektrale Empfindlichkeit des R-Sensors ($R(\lambda)$), des G-Sensors ($G(\lambda)$) und des B-Sensors ($B(\lambda)$) eines *Actiwatch Spectrum*-Detektors (SN 08992).

Die relative spektrale Empfindlichkeit des R-, G- und B-Sensors, ermittelt als arithmetisches Mittel der Messdaten aller 23 *Actiwatch Spectrum*-Detektoren, ist in Abbildung 4.9 dargestellt. Die maximalen spektralen Empfindlichkeiten der B-, G- und R-Sensoren (Tabelle 4.3) liegen bei 452 nm, 490 nm und etwa 651 nm. Die Halbwertsbreiten betragen 85 nm (B-Sensor), 80 nm (G-Sensor) und 100 nm (R-Sensor). Im Wellenlängenbereich zwischen etwa 560 nm und 595 nm sind weder der G- noch der R-Sensor empfindlich gegenüber Licht, d. h. die *Actiwatch Spectrum*-Detektoren erfassen die Lichtanteile dieses Spektralbereichs nicht.

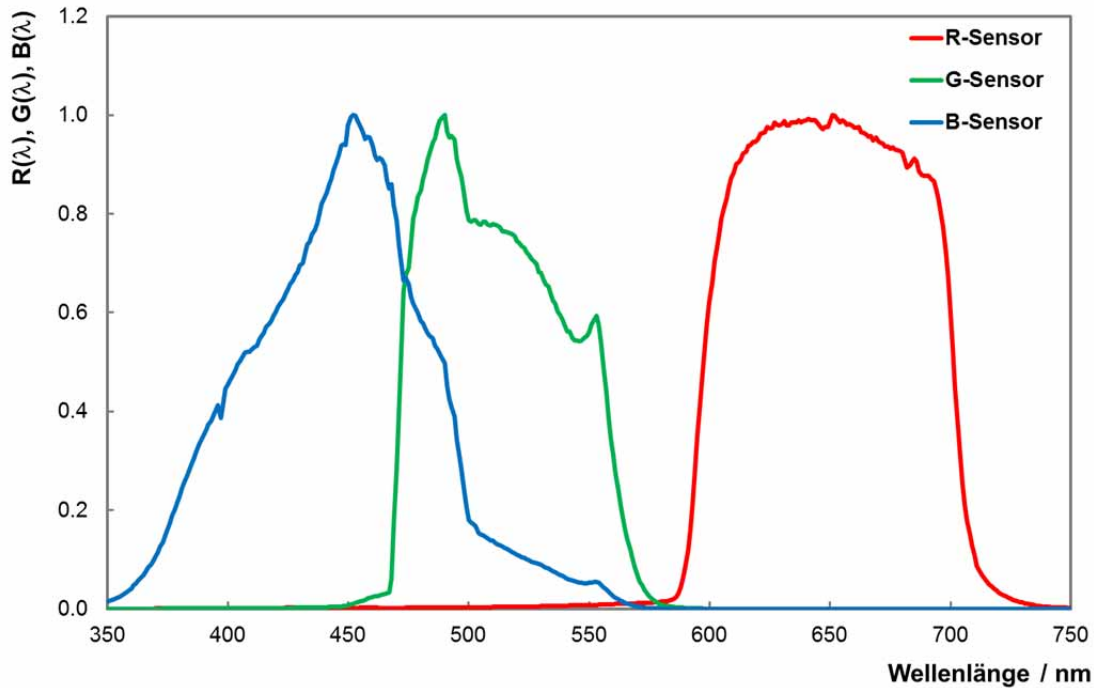


Abb. 4.9 Mittlere spektrale Empfindlichkeit der R-, G- und B-Sensoren der *Actiwatch Spectrum*-Detektoren, normiert auf ein Maximum von 1.

Tab. 4.3 Die Wellenlängen der maximalen Empfindlichkeit des R-, G- und B-Sensors und die Halbwertsbreiten der Empfindlichkeitskurven.

Sensor	Maximum der spektralen Empfindlichkeit	Halbwertsbreite
B-Sensor	452 nm	85 nm (405 nm - 490 nm)
G-Sensor	490 nm	80 nm (475 nm - 555 nm)
R-Sensor	651 nm	100 nm (600 nm - 700 nm)

4.5 Bestimmung der Kalibrierungsfaktoren der Sensoren

Die Kalibrierung der Sensoren aller 23 *Actiwatch Spectrum*-Detektoren wurde anhand von drei herkömmlichen Beleuchtungsquellen - je einer Halogen-, einer Leuchtstoff- und einer warm-weißen LED-Lampe - sowie bei Tageslicht durchgeführt (siehe Abschnitt 3.5). Dieser Abschnitt beschreibt den Vorgang und die Ergebnisse der Kalibrierung mit der Halogenlampe Masterline PLUS (50 W, 12 V, Philips). Die berechneten Kalibrierungsfaktoren der Leuchtstofflampe, der LED-Lampe und des Tageslichts befinden sich in Anhang B.

Bei der Kalibrierung mit der Halogenlampe wurde zuerst die spektrale Bestrahlungsstärke $E_H(\lambda)$ in einem Abstand von 30 cm ermittelt. Die gemessene spektrale Bestrahlungsstärke (Abbildung 4.10) wurde mit der spektralen Empfindlichkeit einzelner Sensoren aus dem vorigen Abschnitt bewertet und zwischen 350 nm und 750 nm integriert:

$$E_R = \int_{350\text{nm}}^{750\text{nm}} E_H(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot d\lambda \quad (4.4)$$

$$E_G = \int_{350\text{nm}}^{750\text{nm}} E_H(\lambda) \cdot G(\lambda) \cdot d\lambda \quad (4.5)$$

$$E_B = \int_{350\text{nm}}^{750\text{nm}} E_H(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot d\lambda \quad (4.6)$$

$$E_v = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1} \int_{350 \text{ nm}}^{750 \text{ nm}} E_H(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (\text{siehe Anhang A}) \quad (4.7)$$

Die so gewichteten Bestrahlungsstärken der Halogenlampe ergaben die folgenden Werte, die die R-, G- und B-Sensoren messen sollten (Sollwerte):

$$E_{R,\text{soll}} = 195 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$$

$$E_{G,\text{soll}} = 59 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$$

$$E_{B,\text{soll}} = 38 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$$

Die Beleuchtungsstärke der Halogenlampe wurde anhand der Formel (4.7) berechnet:

$$E_{v,\text{soll}} = 906 \text{ lx}$$

Eine Messung der Beleuchtungsstärke der Halogenlampe mit dem Beleuchtungsstärkemessgerät ergab eine minimale Abweichung von diesem Wert (903 lx).

In gleicher Entfernung (30 cm) wurden nacheinander alle 23 *Actiwatch Spectrum*-Detektoren dem Licht der Halogenlampe ausgesetzt. Die E_R -, E_G -, E_B - und E_W -Werte einzelner *Actiwatch Spectrum*-Detektoren sind zusammen mit den Sollwerten in der Tabelle 4.4 wiedergegeben. Jeder Punkt entspricht einem Mittelwert von 8 Messungen. Die Standardabweichungen lagen stets unter 2 %.

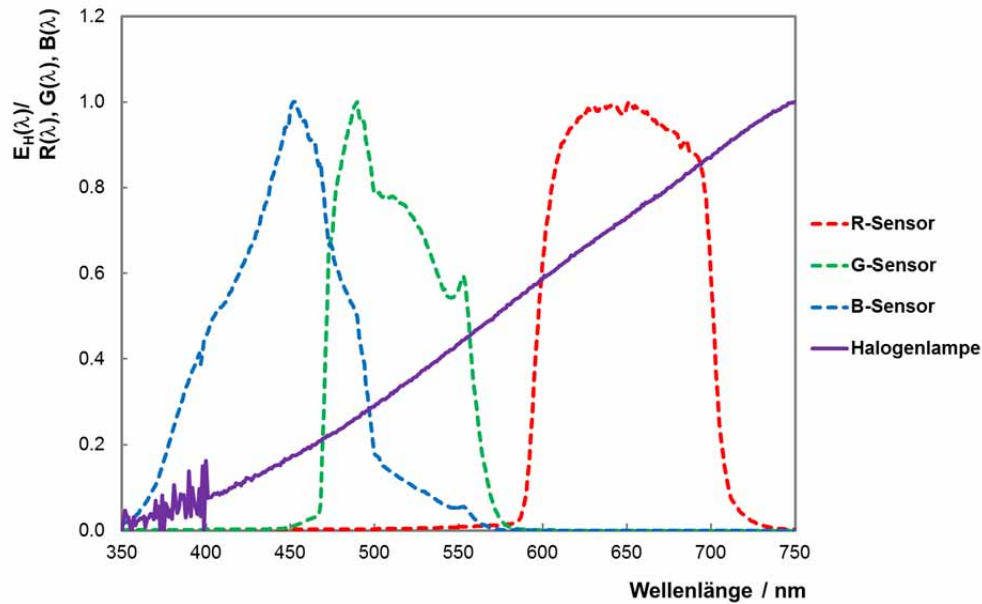


Abb. 4.10 Relative spektrale Bestrahlungsstärke $E_H(\lambda)$ der Halogenlampe Masterline PLUS (50 W, 12 V, Philips), die für die Kalibrierung benutzt wurde. Die Grafik zeigt auch die mittlere relative Empfindlichkeit des R-, G- und B-Sensoren aller 23 *Actiwatch Spectrum*-Detektoren aus Abb 4.9.

Die Kalibrierungsfaktoren werden hier als Quotienten des Messwertes und des Sollwertes definiert:

$$k_R = \frac{E_R}{E_{R, \text{soll}}} \quad (4.8)$$

$$k_G = \frac{E_G}{E_{G, \text{soll}}} \quad (4.9)$$

$$k_B = \frac{E_B}{E_{B, \text{soll}}} \quad (4.10)$$

$$k_W = \frac{E_W}{E_{W, \text{soll}}} \quad (4.11)$$

Ein Kalibrierungsfaktor größer als 1 bedeutet, dass ein Sensor einen höheren Messwert in Bezug auf den Sollwert misst, und die prozentuale Abweichung kann direkt entnommen werden.

Tabelle 4.5 zeigt die Ergebnisse der Kalibrierung mittels der Halogenlampe. Gemittelte Kalibrierungsfaktoren betragen $k_R = 1,00$, $k_G = 2,16$, $k_B = 1,25$ und $k_W = 1,77$. Das bedeutet, dass die Messwerte der Bestrahlungsstärke des G- und des B-Sensors um durchschnittlich 116 % bzw. 25 % höher sind als die tatsächlichen. Der Mittelwert des R-Sensors zeigt keine Abweichung. Der Messwert der Beleuchtungsstärke zeigt in Durchschnitt eine Abweichung von 77 %.

Tab. 4.4 Die Messwerte E_R , E_G , E_B und E_W aller 23 *Actiwatch Spectrum*-Detektoren bei der Kalibrierung mit der Halogenlampe Masterline PLUS (50 W, 12 V, Philips) im Vergleich zu den berechneten Sollwerten.

Actiwatch Spectrum- Detektor	$E_R / \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$	$E_G / \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$	$E_B / \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$	E_W / lx
SN 08962	188	122	46	1535
SN 08963	205	130	48	1647
SN 08964	192	122	43	1541
SN 08967	201	125	49	1590
SN 08968	180	125	43	1538
SN 08970	197	122	45	1553
SN 08973	173	119	40	1472
SN 08974	188	122	44	1533
SN 08977	201	136	48	1688
SN 08978	219	139	50	1756
SN 08980	184	125	52	1557
SN 08983	219	139	51	1758
SN 08988	176	117	48	1466
SN 08991	192	127	54	1600
SN 08992	180	125	44	1539
SN 08993	180	122	45	1518
SN 08995	214	136	50	1720
SN 08998	180	125	45	1540
SN 08999	219	139	51	1758
SN 09000	188	122	44	1533
SN 09001	219	142	57	1791
SN 09003	184	122	45	1525
SN 09005	192	133	47	1642
Sollwerte	$195 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$	$59 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$	$38 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$	906 lx

Tab. 4.5 Kalibrierungsfaktoren k_R , k_G , k_B und k_W für alle 23 *Actiwatch Spectrum*-Detektoren, ermittelt mittels der Halogenlampe Masterline PLUS (50 W, 12 V, Philips).

Actiwatch Spectrum-Detektor	k_R	k_G	k_B	k_W
SN 08962	0,96	2,07	1,21	1,69
SN 08963	1,05	2,20	1,26	1,82
SN 08964	0,98	2,07	1,13	1,70
SN 08967	1,03	2,12	1,29	1,75
SN 08968	0,92	2,12	1,13	1,70
SN 08970	1,01	2,07	1,18	1,71
SN 08973	0,89	2,02	1,05	1,62
SN 08974	0,96	2,07	1,16	1,69
SN 08977	1,03	2,31	1,26	1,86
SN 08978	1,12	2,36	1,32	1,94
SN 08980	0,94	2,12	1,37	1,72
SN 08983	1,12	2,36	1,34	1,94
SN 08988	0,90	1,98	1,26	1,62
SN 08991	0,98	2,15	1,42	1,77
SN 08992	0,92	2,12	1,16	1,70
SN 08993	0,92	2,07	1,18	1,68
SN 08995	1,10	2,31	1,32	1,90
SN 08998	0,92	2,12	1,18	1,70
SN 08999	1,12	2,36	1,34	1,94
SN 09000	0,96	2,07	1,16	1,69
SN 09001	1,12	2,41	1,50	1,98
SN 09003	0,94	2,07	1,18	1,68
SN 09005	0,98	2,25	1,24	1,81
Mittelwert ± Standardabweichung	1,00 ± 0,08	2,16 ± 0,13	1,25 ± 0,11	1,77 ± 0,11

5 Zusammenfassung

In Feldstudien, die sich mit zirkadianen Rhythmen und ihren Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit befassen, werden zunehmend Lichtexpositionsdetektoren mit unterschiedlichen messtechnischen Eigenschaften eingesetzt. Viele Forschergruppen verwenden in ihren Untersuchungen kommerziell erhältliche Lichtexpositionsdetektoren. Diese mögen vielleicht nicht die Qualität eines Laborgerätes haben, das muss sich jedoch auf Forschungsergebnisse nicht zwangsläufig negativ auswirken. Entscheidend ist eine sorgfältige Analyse der messtechnischen Eigenschaften der eingesetzten Lichtexpositionsdetektoren und der Messmethodik.

Der vorliegende Bericht dient deshalb als Handlungsanleitung zur Charakterisierung des Linearitätsbereichs, des Dunkelsignals sowie der Richtungsempfindlichkeit von Lichtexpositionsdetektoren am Beispiel des *Actiwatch Spectrum*-Detektors der Firma Philips Respironics. Es wurde die spektrale Empfindlichkeit der Sensoren von 23 *Actiwatch Spectrum*-Detektoren bestimmt sowie die Kalibrierung aller Detektoren anhand verschiedener Lichtquellen durchgeführt und dokumentiert.

Der Hersteller der *Actiwatch Spectrum*-Detektoren gibt an, dass Messungen der Beleuchtungsstärke im Bereich zwischen 1 lx und 100000 lx möglich sind. Vorherige Studien von Price et al. 2012 [21] und Markwart et al. 2015 [18] bestätigten, dass diese Detektoren über mehrere Größenordnungen hinweg linear sind. In diesem Bericht wurde beispielhaft der Linearitätsbereich eines *Actiwatch Spectrum*-Detektors bis zu einer Beleuchtungsstärke von 56000 lx verifiziert, da die maximale Beleuchtungsstärke bei der Kalibrierung etwa 50000 lx betrug. Eine Beleuchtungsstärke von 106700 lx führte zur Sättigung der Signale dieses *Actiwatch Spectrum*-Detektors.

Die untersuchten *Actiwatch Spectrum*-Detektoren zeigten nur geringe Dunkelsignale. Die Maximalwerte der Dunkelsignale des R-, G- und B-Sensors und der Beleuchtungsstärke der *Actiwatch Spectrum*-Detektoren betragen $0,05 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$, $0,06 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$, $0,03 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ und 0,58 lx. Sie stimmen gut mit den Ergebnissen der Untersuchung von Markwart et al. überein, in der die Mittelwerte der Dunkelsignale des R-, G-, B-Sensors und der Beleuchtungsstärke von $0,184 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$, $0,088 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$, $0,038 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ und 1,1 lx gemessen wurden. Bei den Messungen der Tageslichtexposition und der Lichtexposition aus künstlichen Quellen können diese Dunkelsignale als vernachlässigbar betrachtet werden. Wenn allerdings auch niedrige Lichtexpositionen erfasst werden müssen (z. B. nächtliche Lichtexposition im Schlafzimmer), sollten die Messwerte entsprechend korrigiert werden.

Die Messungen der Richtungsempfindlichkeit für die horizontale und die vertikale Ausrichtung der Sensoren wurden am Beispiel eines *Actiwatch Spectrum*-Detektors dargestellt. Die horizontale Richtungsempfindlichkeit dieses Detektors zeigte einen kleineren Fehler im Cosinus-Verhalten des R-, G- und B-Sensors (f_2 von 39 %, 22 % und 46 %) als die vertikale Richtungsempfindlichkeit (f_2 von 60 %, 57 % und 64 %). Diese Ergebnisse sind in Übereinstimmung mit den Ergebnissen vorheriger Studien [11, 18, 21]. Price et al. analysierten 16 *Actiwatch Spectrum*-

Detektoren und fanden Fehler im Cosinus-Verhalten von etwa 30 % bis 50 % in der horizontalen und 60 % bis 65 % in der vertikalen Ausrichtung der Sensoren. Sie haben bereits festgestellt, dass die horizontale Richtungsempfindlichkeit im Vergleich zur vertikalen Ausrichtung der Sensoren im Cosinus-Verhalten einen kleineren Fehler aufweist, allerdings war die Variabilität zwischen einzelnen Detektoren und zwischen den einzelnen Sensoren in jedem Detektor größer. Figueiro et al. 2013 [11] fanden eine Abweichung von 31 %, 39 % und 57 % für die horizontale Ausrichtung der R-, G- und B-Sensoren.

Um die Richtungsempfindlichkeit zu verbessern, untersuchten Markvart et al. die Anwendung von Diffusoren und berichteten, dass damit nur eine geringe Verbesserung der Richtungsempfindlichkeit der R-, G- und B-Sensoren der *Actiwatch-Spectrum* Detektoren erzielt werden konnte. Die deutlichsten Verbesserungen der Richtungsempfindlichkeit konnte mit R-Sensoren erzielt werden, während die Richtungsempfindlichkeit der B-Sensoren am wenigsten verbessert und manchmal sogar verschlechtert wurde.

Die Analyse der spektralen Empfindlichkeit aller 23 *Actiwatch Spectrum*-Detektoren ergab, dass die maximale spektrale Empfindlichkeit des B-, G- und R-Sensors bei 452 nm, 490 nm und 651 nm liegt. Diese maximalen spektralen Empfindlichkeiten unterscheiden sich um 4 nm bis 10 nm von den spektralen Empfindlichkeiten veröffentlicht in Price et al. (460 nm, 500 nm bzw. 655 nm). Der Grund dafür ist eine bessere Wellenlängenauflösung, die in dieser Untersuchung bei der Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit erzielen werden konnte.

Spektral aufgelöste Signale des B- und des G-Sensors sowie ihre spektrale Empfindlichkeit zeigen sprunghafte Änderungen bei etwa 471 nm und 495 nm (siehe Abbildungen 4.7 und 4.8), die in der Untersuchung von Price et al. nicht beobachtet wurden. Wie in Abschnitt 3.4 bereits erläutert, wurde die spektrale Bestrahlungsstärke der Xenon-Lampe in 1 nm-Schritten mit einer spektralen Halbwertsbreite von etwa 7 nm gemessen. In Price et al. betrug die spektrale Halbwertsbreite etwa 15 nm, die Messungen wurden in 10 nm-Schritten durchgeführt. Dies könnte erklären, warum dort die sprunghaften Änderungen nicht beobachtet werden konnten. In [21] wird auch bezüglich der Variabilität der spektralen Empfindlichkeit von Sensoren über einen großen und unerklärlichen Anstieg der Standardabweichung bei etwa 500 nm und einen kleineren Anstieg bei etwa 470 nm berichtet.

Die *Actiwatch Spektrum*-Detektoren sind nahezu unempfindlich gegenüber spektralen Lichtanteilen zwischen etwa 560 nm und 595 nm. In [11] wurde darauf hingewiesen, dass die *Actiwatch Spectrum*-Detektoren die Emissionslinien der Leuchtstofflampen oder Hochdruck-Entladungslampen in diesem Spektralbereich nicht erfassen können.

Die Kalibrierung der Sensoren aller 23 *Actiwatch Spectrum*-Detektoren wurde sowohl mit einer Halogen-, einer Leuchtstoff- und einer warm-weißen LED-Lampe als auch bei Tageslicht durchgeführt. Tabelle 5.1 zeigt die durchschnittlichen Kalibrierungsfaktoren für diese Lichtquellen. Während beim R-Sensor der Mittelwert kaum vom Sollwert abweicht, zeigt der B-Sensor relativ kleine Abweichungen von durchschnittlich 16 %. Die Abweichung des G-Sensors ist am größten und beträgt

durchschnittlich 122 %. Das Signal des G-Sensors und die *Actiwatch*-Beleuchtungsstärke weisen eine hohe Korrelation auf, und so liegen auch die Messwerte der Beleuchtungsstärke systematisch höher als die Sollwerte (34 % bis 116 %). Figueiro et al. fanden Abweichungen der Beleuchtungsstärke von 18 % bis 152 %.

Tab. 5.1 Mittlere Kalibrierungsfaktoren der *Actiwatch Spectrum*-Detektoren für vier typische Lichtquellen.

Lichtquelle	k_R	k_G	k_B	k_W
Tageslicht	0,98	2,28	1,11	2,16
Halogenlampe	1,00	2,16	1,25	1,77
Leuchtstofflampe	0,99	2,19	1,06	1,84
LED, warm-weiß	0,99	2,23	1,23	1,34
Mittelwert ± Standard-abweichung	0,99 ± 0,01	2,22 ± 0,05	1,16 ± 0,09	1,78 ± 0,34

Für die Kalibrierung der Sensoren in einer konkreten Studie sind natürlich nicht die Mittelwerte heranzuziehen, sondern die Kalibrierungsfaktoren einzelner *Actiwatch-Spectrum* Detektoren für die in der Studie verwendete Lichtquelle. Allerdings ist in einer Feldstudie die Lichtexposition meist eine Mischung von Expositionen durch mehrere Lichtquellen. Um die Kalibrierungsfaktoren in diesem Fall zu bestimmen, wird in [18] empfohlen, die Kalibrierung anhand des Tageslichts bei einem bewölkten Himmel durchzuführen. In diesem Bericht wird hingegen vorgeschlagen, den Mittelwert der Kalibrierungsfaktoren mehrerer Lichtquellen für jeden einzelnen Sensor eines *Actiwatch Spectrum*-Detektors zu verwenden.

In einer Feldstudie, die sich mit den Messungen der Lichtexposition im Hinblick auf zirkadiane Wirkungen anhand der Lichtexpositionsdetektoren befasst, ist es von großer Bedeutung, wie der Detektor getragen wird. Im Idealfall sollte die Lichtexposition am Auge in Blickrichtung erfasst werden. Die an der Brille montierten Detektoren erfassen genau diese Lichtexposition, können aber die Durchführung von Arbeitsaufgaben stören und zu einer Nichteinhaltung der Trageverpflichtung außerhalb der Arbeitszeiten führen. Tragen eines Detektors am Handgelenk ist diskret, allerdings unterscheidet sich die gemessene Lichtexposition von der tatsächlichen Lichtexposition am Auge und kann durch langärmelige Kleidung noch zusätzlich verfälscht werden. In der Studie „Ermittlung der tatsächlichen Lichtexposition aus natürlichen und künstlichen Quellen im Hinblick auf zirkadiane Wirkungen bei schichtarbeitenden Beschäftigten“ wurde die persönliche Lichtexposition durch an der Brust befestigte *Actiwatch Spectrum*-Detektoren (Abbildung 5.1) erfasst.

Diese Position kann als ein guter Kompromiss zwischen an der Brille und am Handgelenk getragenen Lichtexpositionsdetektoren betrachtet werden.



Quelle: Uwe Völkner / Fotoagentur FOX

Abb. 5.1 Erfassung der persönlichen Lichtexposition durch an der Brust befestigte *Actiwatch Spectrum*-Detektoren. Der B-Sensor ist nach unten ausgerichtet, um den Lichteinfall für diesen Sensor zu verbessern.

Literaturverzeichnis

- [1] **Bailes, H. J. and Lucas, R. J.:** Human melanopsin forms a pigment maximally sensitive to blue light ($\lambda_{\max} \approx 479$ nm) supporting activation of $G_{q/11}$ and $G_{i/o}$ signalling cascades, *Proc. R. Soc. B* **280**: 20122987 (2013)
- [2] **Berson, D. M.; Dunn, F. A.; Takao, M.:** Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock, *Science* **295**, 1070-1073 (2002)
- [3] **Blask, D. E.; Sauer, L. A.; Dauchy, R. T.:** Melatonin as a chronobiotic/anticancer agent: cellular, biochemical, and molecular mechanisms of action and their implications for circadian-based cancer therapy. *Curr. Top. Med. Chem.* **2**, 113-132 (2002)
- [4] **Brainard, G. C.; Rollag, M. D.; Hanifin, J. P.:** Photic regulation of melatonin in humans: ocular and neural signal transduction. *J. Biol. Rhythms* **12**, 537-546 (1997)
- [5] **Cajochen, C.; Münch, M.; Kobiacka, S.; Kräuchi, K.; Steiner, R.; Oelhafen, P.; Orgül, S. and Wirz-Justice, A.:** High sensitivity of human melatonin, alertness, thermoregulation, and heart rate to short wavelength light. *J. Clin. Endocrinol. Metab.* **90**, 1311-1316 (2005)
- [6] **CIE TN003:2015:** Report on the First International Workshop on Circadian and Neurophysiological Photometry (2013)
- [7] **DIN 5032-7:1985-12:** Lichtmessung; Klasseneinteilung von Beleuchtungsstärke- und Leuchtdichtemessgeräten, Beuth Verlag
- [8] **DIN EN 13032-1:2012:** Licht und Beleuchtung - Messung und Darstellung photometrischer Daten von Lampen und Leuchten - Teil 1: Messung und Datenformat; Deutsche Fassung EN 13032-1:2004+A1:2012, Beuth Verlag
- [9] **DIN SPEC 5031-100:2015-08:** Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik - Teil 100: Über das Auge vermittelte, melanopische Wirkung des Lichts auf den Menschen - Größen, Formelzeichen und Wirkungsspektren, Beuth Verlag
- [10] **Duffy, J. F. and Czeisler, C. A.:** Effect of light on human circadian physiology, *Sleep Med. Clin.* **4**, 165-177 (2009)
- [11] **Figueiro, M. G.; Hamner, R.; Bierman, A. and Rea M. S.:** Comparisons of three practical field devices used to measure personal light exposures and activity levels, *Light. Res. Technol.* **4**, 421-434 (2013)
- [12] **GENEActiv Original**
<http://www.geneactiv.org/actigraphy/geneactiv-original/>

- [13] **Hattar, S.; Liao, H. W.; Takao, M.; Berson, D. M.; Yau, K. W.:** Melanopsin-containing retinal ganglion cells: architecture, projections, and intrinsic photosensitivity, *Science* **295**, 1065-1070 (2002)
- [14] **IARC:** IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Volume 98: Painting, Firefighting and Shiftwork (2010)
- [15] **Jasser, S. A.; Hanifin, J. P.; Rollag, M. D.; Brainard, G. C.:** Dim light adaptation attenuates acute melatonin suppression in humans. *J. Biol. Rhythms* **21**, 394-404 (2006)
- [16] **Lewy, A. J.; Wehr, T. A.; Goodwin, F. K.; Newsome, D. A.; Markey, S. P.:** Light suppresses melatonin secretion in humans. *Science* **210**, 1267-1269 (1980)
- [17] **Lucas, R. J.; Peirson, S. N.; Berson, D. M.; Brown, T. M.; Cooper, H. M.; Czeisler, C. A.; Figueiro, M. G.; Gamlin, P. D.; Lockley, S. W.; O'Hagan, J. B.; Price, L. L.; Provencio, I.; Skene, D.J.; Brainard, G. C.:** Measuring and using light in the melanopsin age. *Trends. Neurosci.* **37**, 1-9 (2014)
- [18] **Markvart, J.; Hansen, Å. M. and Christoffersen, J.:** Comparison and correction of the light sensor output from 48 wearable light exposure devices by using a side-by-side field calibration method, *LEUKOS* **11**, 155-171 (2015)
- [19] **Nolting, J.:** Radiometrische und photometrische Messungen, Teil 15, *DOZ Optometrie* **11**, S. 30-38 (2006)
- [20] **Philips Respironics:** Actiwatch Spectrum. Activity Monitor.
<http://www.usa.philips.com/healthcare/product/HC1046964/actiwatch-spectrum-activity-monitor>
- [21] **Price, L. L. A.; Khazova, M. and O'Hagan, J. B.:** Performance assessment of commercial circadian personal exposure devices, *Light. Res. Technol.* **44**, 17-26 (2012)
- [22] **Reiter, R. J.:** Mechanisms of cancer inhibition by melatonin. *J. Pineal. Res.* **37**, 213-214 (2004)
- [23] **Siekierka-Kleiser, E.:** Funktionelle Erholung der Armfunktion bei Patienten nach Schlaganfall in der akuten Phase, *Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin*, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf (2004)
- [24] **Vandahl, C.; Wolf, S.; Schierz, Ch.:** Messung von Beleuchtungsstärken am Auge mit dem mobilen Messgerät LuxBlick, Tagung Licht 2010, 17.-20.10.2010, Wien
- [25] **Wolf, L.:** LightWatcher Datenrekorder, in 8. Symposium Licht und Gesundheit, 19.-20. März 2014, Berlin, Schriftenreihe des Fachgebiets Lichttechnik, Herausgeber Völker S., Schumacher, H., S. 133-142 (2014)

Verzeichnis der Tabellen

	Seite	
Tab. 4.1	Lineare Abhängigkeit der Signale der R-, G- und B-Sensoren, E_R , E_G und E_B , des <i>Actiwatch Spectrum</i> -Detektors SN 08992 von der Beleuchtungsstärke E_v . Die Messwerte in der Größenordnung von 10^{-5} sind nicht aufgeführt.	20
Tab. 4.2	Die cos-getreue Bewertung f_2 für die horizontale und die vertikale Ausrichtungen der Sensoren des <i>Actiwatch Spectrum</i> -Detektors SN 08968.	23
Tab. 4.3	Die Wellenlängen der maximalen Empfindlichkeit der R-, G- und B-Sensoren und die Halbwertsbreiten der Empfindlichkeitskurven.	26
Tab. 4.4	Die Messwerte E_R , E_G , E_B und E_W aller 23 <i>Actiwatch Spectrum</i> -Detektoren bei der Kalibrierung mit der Halogenlampe Masterline PLUS (50 W, 12 V, Philips) im Vergleich zu den berechneten Sollwerten.	29
Tab. 4.5	Kalibrierungsfaktoren k_R , k_G , k_B und k_W für alle 23 <i>Actiwatch Spectrum</i> -Detektoren, ermittelt mittels der Halogenlampe Masterline PLUS (50 W, 12 V, Philips).	30
Tab. 5.1	Mittlere Kalibrierungsfaktoren der <i>Actiwatch Spectrum</i> -Detektoren für vier typische Lichtquellen.	33
Tab. B1	Kalibrierungsfaktoren der R-, G- und G-Sensoren der 23 <i>Actiwatch Spectrum</i> -Detektoren bei der Kalibrierung mit der Leuchtstofflampe (Spiral Tageslichtlampe, 85 W, 5400 K, Proxistar).	43
Tab. B2	Kalibrierungsfaktoren der R-, G- und G-Sensoren der 23 <i>Actiwatch Spectrum</i> -Detektoren bei der Kalibrierung mit der warmweißen LED-Lampe (MR-16, 3 W, 12 V, 3000 K, Omnilux).	45
Tab. B3	Kalibrierungsfaktoren der R-, G- und G-Sensoren der 23 <i>Actiwatch Spectrum</i> -Detektoren bei der Kalibrierung mit dem Tageslicht am 15.12.2015 um 11:17 Uhr in Dortmund (51° 30' N, 7° 27' O).	47

Verzeichnis der Abbildungen

	Seite
Abb. 2.1	
a) Ein <i>Actiwatch Spectrum</i> -Detektor der Firma Philips Respironics.	
b) Drei optische Sensoren der <i>Actiwatch Spectrum</i> -Detektors für den roten (R), grünen (G) und blauen (B) Spektralbereich.	9
Abb. 3.1	
a) Horizontale Ausrichtung der Sensoren: Die Rotationsachse und die Gerade durch die Sensoren stehen senkrecht zueinander und zum Lichteinfall.	
b) Die vertikale Ausrichtung der Sensoren: In dieser Position wird der Detektor im Vergleich zu der vorherigen Position um 90° im Uhrzeigersinn gedreht. Die Rotationsachse und die Gerade durch die Sensoren sind identisch und stehen senkrecht zum Lichteinfall.	
In beiden Fällen stellen die Pfeile die Drehrichtung des Detektors dar.	13
Abb. 3.2	
Messungen der spektralen Bestrahlungsstärke der Xenon-Lampe vor dem Austrittspalt des MSH 300 Monochromators anhand des CCD-Array-Spektrometers CAS 140 CT.	14
Abb. 3.3	
Messungen der spektralen Bestrahlungsstärke der Halogenlampe anhand des Doppelmonochromators DTM 300.	16
Abb. 3.4	
Messungen der spektralen Bestrahlungsstärke des Tageslichts mittels des CCD-Array-Spektrometers und der <i>Actiwatch Spectrum</i> -Detektoren am 15.12.2015.	16
Abb. 4.1	
Die Abhängigkeit des Signals E_W des <i>Actiwatch Spectrum</i> -Detektors SN 08992 von der Beleuchtungsstärke E_V ist im Bereich zwischen 1 lx und 56000 lx linear (Bestimmtheitsmaß $R^2 = 1$).	17
Abb. 4.2	
Lineare Abhängigkeit der Signale der R-, G- und B-Sensoren, E_R , E_G und E_B , des <i>Actiwatch Spectrum</i> -Detektors SN 08992 von der Beleuchtungsstärke E_V .	18
Abb. 4.3	
Zwei unterschiedliche Positionierungen der R-, G- und B-Sensoren im Gehäuse der <i>Actiwatch Spectrum</i> -Detektoren.	21
Abb. 4.4	
Horizontale Richtungsempfindlichkeit der R-, G- und B-Sensoren des <i>Actiwatch Spectrum</i> -Detektors SN 08968 im Vergleich zu der Cosinus-Funktion.	22

Abb. 4.5	Vertikale Richtungsempfindlichkeit der R-, G- und B-Sensoren des <i>Actiwatch Spectrum</i> -Detektors SN 08968 im Vergleich zu der Cosinus-Funktion.	22
Abb. 4.6	Gemessene spektrale Bestrahlungsstärke der Xenon-Lampe, $E_{Xe}(\lambda)$, die bei der Messung der spektralen Empfindlichkeit der Sensoren eingesetzt wurde.	24
Abb. 4.7	Spektralaufgelöste Signale der Sensoren, $E_R(\lambda)$, $E_G(\lambda)$ und $E_B(\lambda)$, eines mit dem Licht der Xenon-Lampe ausgeleuchteten <i>Actiwatch Spectrum</i> -Detektors (SN 08992).	24
Abb. 4.8	Gemessene spektrale Empfindlichkeit des R-Sensors ($R(\lambda)$), des G-Sensors ($G(\lambda)$) und des B-Sensors ($B(\lambda)$) eines <i>Actiwatch Spectrum</i> -Detektors (SN 08992).	25
Abb. 4.9	Mittlere spektrale Empfindlichkeit der R-, G- und B-Sensoren der <i>Actiwatch Spectrum</i> -Detektoren, normiert auf ein Maximum von 1.	26
Abb. 4.10	Relative spektrale Bestrahlungsstärke $E_H(\lambda)$ der Halogenlampe Masterline PLUS (50 W, 12 V, Philips), die für die Kalibrierung benutzt wurde. Die Grafik zeigt auch die mittlere relative Empfindlichkeit des R-, G- und B-Sensoren aller 23 <i>Actiwatch Spectrum</i> -Detektoren aus Abb 4.9.	28
Abb. 5.1	Erfassung der persönlichen Lichtexposition durch an der Brust befestigte <i>Actiwatch Spectrum</i> -Detektoren. Der B-Sensor ist nach unten ausgerichtet, um den Lichteinfall für diesen Sensor zu verbessern.	34
Abb. A1	Die Wirkungskurve für das Tagessehen ($V(\lambda)$ -Kurve) hat ein Maximum bei 555 nm. Der Maximum der Wirkungskurve für melanopische Lichtwirkung ($S_{mel}(\lambda)$) liegt bei etwa 490 nm.	41
Abb. B1	Relative spektrale Bestrahlungsstärke der Leuchtstofflampe $E_L(\lambda)$ (Spiral Tageslichtlampe, 85 W, 5400 K, Proxistar). Die Grafik zeigt auch die mittlere relative Empfindlichkeit der R-, G- und B-Sensoren.	42
Abb. B2	Relative spektrale Bestrahlungsstärke der warm-weißen LED-Lampe $E_{LED}(\lambda)$ (MR-16, 3 W, 12 V, 3000 K, Omnilux) und die mittlere relative Empfindlichkeit der R-, G- und B-Sensoren.	44
Abb. B3	Relative spektrale Bestrahlungsstärke des Tageslichts $E_T(\lambda)$ am 15.12.2015 um 11:17 Uhr in Dortmund (51° 30' N, 7° 27' O) und die mittlere relative Empfindlichkeit der R-, G- und B-Sensoren.	46

Anhang A Definitionen, Einheiten, Wirkungskurven

Die Bestrahlungsstärke E ist eine radiometrische Größe, definiert als der Quotient der optischen Strahlungsleistung $d\Phi$, die auf ein Element mit der Fläche dA trifft:

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad (\text{A1})$$

Die Strahlungsleistung ist die Strahlungsenergie, die sich pro Zeiteinheit in Form einer elektromagnetischen Welle ausbreitet. Die SI-Einheit der Bestrahlungsstärke ist $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Neben radiometrischen Größen, die die optische Strahlung auf rein physikalischer Basis charakterisieren, werden im sichtbaren Spektralbereich auch die photometrischen Größen angewendet. Die photometrischen Größen berücksichtigen die spektrale Empfindlichkeit des Auges für die visuelle Wahrnehmung.

Für eine monochromatische Strahlung der Wellenlänge λ errechnet sich eine photometrische Größe durch die Multiplikation der entsprechenden radiometrischen Größe mit der spektralen Wirkungskurve des Auges für das Tagessehen $V(\lambda)$ und dem Maximalwert des photometrischen Strahlungsäquivalents $K_m = 683 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$. Im Maximum der Augenempfindlichkeit für das Tagessehen bei 555 nm entspricht die Strahlungsleistung Φ von 1 W einem Lichtstrom Φ_v von 683 lm. Die Beleuchtungsstärke, E_v , kann wie folgt berechnet werden:

$$E_v = K_m \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} E(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (\text{A2})$$

Die Symbole für photometrische Größen tragen oft einen Index „v“ (steht für visuell). Die Einheit der Beleuchtungsstärke ist Lux (lx).

Abbildung A1 zeigt die Wirkungskurven für das Tagessehen ($V(\lambda)$ -Kurve) und für die melanopische Lichtwirkung, $s_{\text{mel}}(\lambda)$ [9].

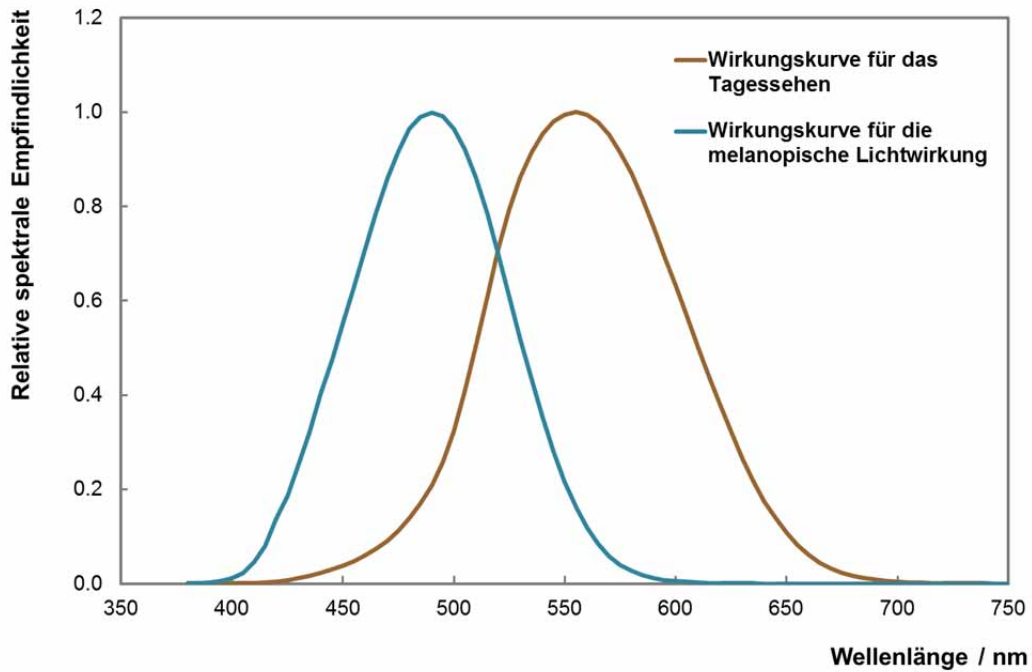


Abb. A1 Die Wirkungskurve für das Tagessehen ($V(\lambda)$ -Kurve) hat ein Maximum bei 555 nm. Der Maximum der Wirkungskurve für melanopische Lichtwirkung ($s_{\text{mel}}(\lambda)$) liegt bei etwa 490 nm.

Anhang B Kalibrierung der *Actiwatch Spectrum-* Detektoren

B1 Leuchtstofflampe

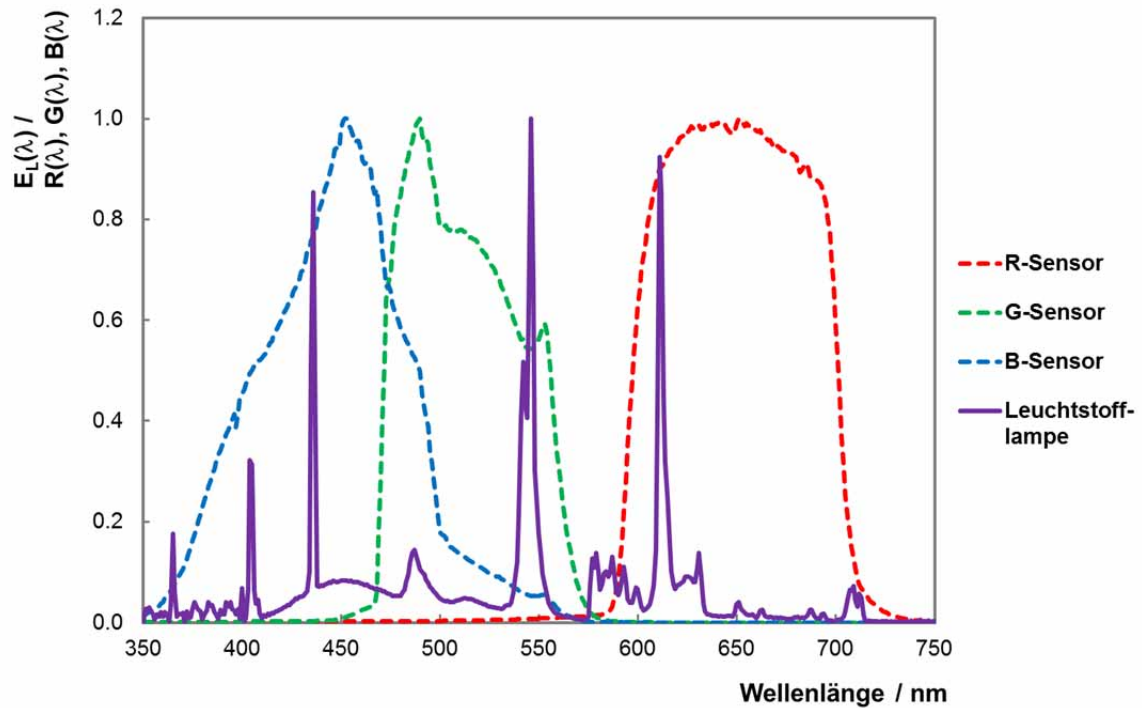


Abb. B1 Relative spektrale Bestrahlungsstärke der Leuchtstofflampe $E_L(\lambda)$ (Spiral Tageslichtlampe, 85 W, 5400 K, Proxistar). Die Grafik zeigt auch die mittlere relative Empfindlichkeit der R-, G- und B-Sensoren.

Tab. B1 Kalibrierungsfaktoren der R-, G- und G-Sensoren der 23 *Actiwatch Spectrum*-Detektoren bei der Kalibrierung mit der Leuchtstofflampe (Spiral Tageslichtlampe, 85 W, 5400 K, Proxistar).

Actiwatch Spectrum- Detektor	k_R	k_G	k_B	k_W
SN 08962	0,97	2,09	1,03	1,76
SN 08963	1,00	2,26	1,03	1,90
SN 08964	0,94	2,03	0,92	1,71
SN 08967	0,94	2,11	1,06	1,79
SN 08968	0,94	2,11	1,00	1,79
SN 08970	1,06	2,09	1,00	1,77
SN 08973	0,94	2,11	1,00	1,78
SN 08974	0,94	2,09	0,97	1,75
SN 08977	0,94	2,31	1,03	1,93
SN 08978	1,09	2,43	1,17	2,04
SN 08980	0,85	2,11	1,22	1,79
SN 08983	1,18	2,37	1,14	2,02
SN 08988	0,97	2,00	1,03	1,70
SN 08991	0,94	2,23	1,14	1,72
SN 08992	0,94	2,23	1,00	1,85
SN 08993	0,97	2,11	1,00	1,79
SN 08995	1,06	2,26	1,19	1,93
SN 08998	0,94	2,17	1,00	1,82
SN 08999	1,15	2,37	1,14	2,01
SN 09000	0,94	2,09	1,00	1,75
SN 09001	1,18	2,43	1,25	2,06
SN 09003	0,94	2,09	1,00	1,75
SN 09005	0,97	2,31	1,08	1,94
Mittelwert	0,99 ± 0,09	2,19 ± 0,09	1,06 ± 0,09	1,84 ± 0,11

B2 LED-Lampe, warm-weiß

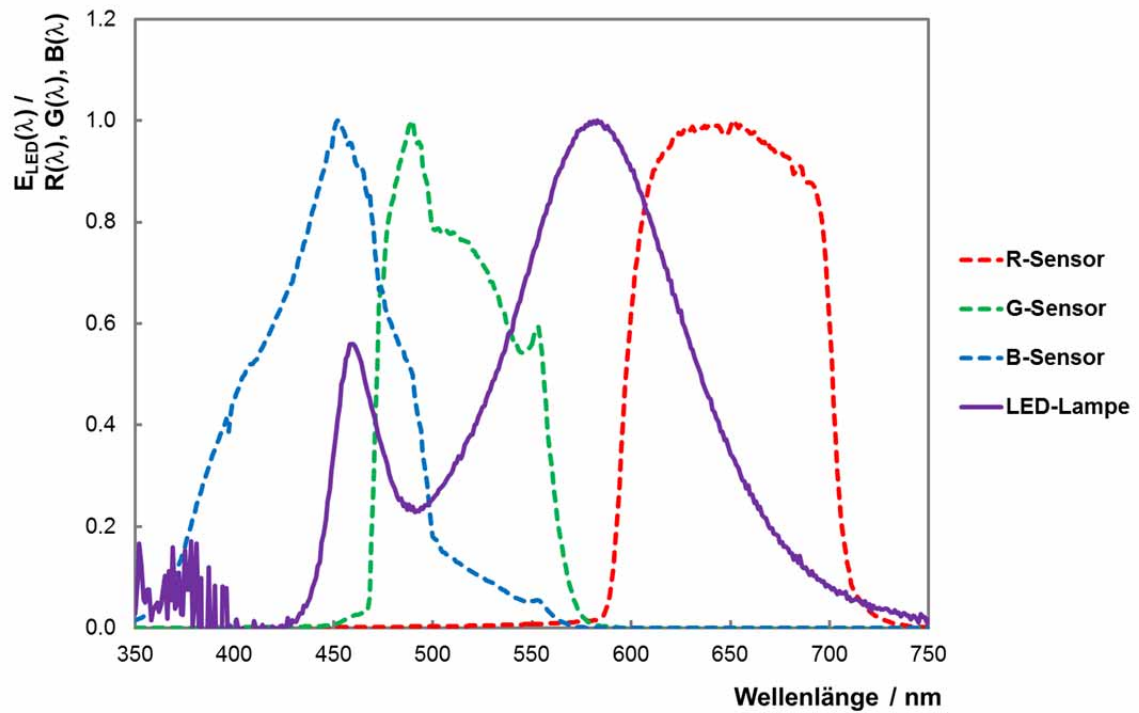


Abb. B2 Relative spektrale Bestrahlungsstärke der warm-weißen LED-Lampe $E_{LED}(\lambda)$ (MR-16, 3 W, 12 V, 3000 K, Omnilux) und die mittlere relative Empfindlichkeit der R-, G- und B-Sensoren.

Tab. B2 Kalibrierungsfaktoren der R-, G- und B-Sensoren der 23 *Actiwatch Spectrum*-Detektoren bei der Kalibrierung mit der warm-weißen LED-Lampe (MR-16, 3 W, 12 V, 3000 K, Omnilux).

Actiwatch Spectrum- Detektor	k_R	k_G	k_B	k_W
SN 08962	0,96	2,12	1,23	1,28
SN 08963	1,02	2,30	1,23	1,39
SN 08964	1,00	2,12	1,09	1,28
SN 08967	0,98	2,15	1,23	1,31
SN 08968	0,96	2,15	1,09	1,30
SN 08970	1,02	2,12	1,14	1,29
SN 08973	0,88	2,15	1,14	1,28
SN 08974	0,96	2,12	1,14	1,27
SN 08977	0,98	2,39	1,23	1,43
SN 08978	1,08	2,39	1,27	1,45
SN 08980	0,81	2,24	1,45	1,33
SN 08983	1,17	2,39	1,36	1,47
SN 08988	0,98	2,03	1,18	1,24
SN 08991	0,83	2,24	1,32	1,33
SN 08992	0,94	2,21	1,14	1,32
SN 08993	0,96	2,15	1,18	1,30
SN 08995	1,13	2,30	1,23	1,40
SN 08998	0,96	2,21	1,18	1,32
SN 08999	1,15	2,39	1,36	1,46
SN 09000	0,96	2,15	1,18	1,30
SN 09001	1,06	2,52	1,50	1,51
SN 09003	0,94	2,15	1,14	1,29
SN 09005	0,98	2,36	1,23	1,40
Mittelwert	0,99 ± 0,09	2,23 ± 0,12	1,23 ± 0,11	1,34 ± 0,08

B3 Tageslicht

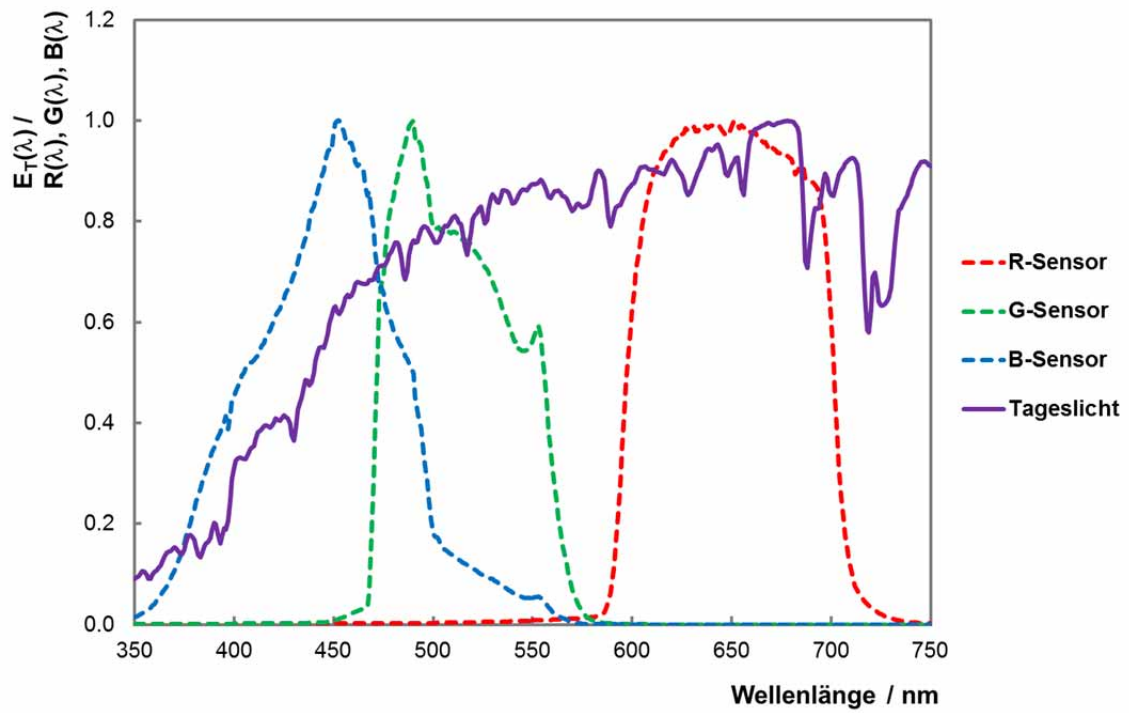


Abb. B3 Relative spektrale Bestrahlungsstärke des Tageslichts $E_T(\lambda)$ am 15.12.2015 um 11:17 Uhr in Dortmund (51° 30' N, 7° 27' O) und die mittlere relative Empfindlichkeit der R-, G- und B-Sensoren.

Tab. B3 Kalibrierungsfaktoren der R-, G- und B-Sensoren der 23 *Actiwatch Spectrum*-Detektoren bei der Kalibrierung mit dem Tageslicht am 15.12.2015 um 11:17 Uhr in Dortmund (51° 30' N, 7° 27' O).

Actiwatch Spectrum- Detektor	k_R	k_G	k_B	k_W
SN 08962	0,90	1,82	0,87	1,76
SN 08963	1,04	2,57	1,20	2,41
SN 08964	0,98	2,31	1,08	2,18
SN 08967	0,98	2,36	1,20	2,23
SN 08968	0,88	2,12	1,01	1,99
SN 08970	1,02	2,40	1,15	2,28
SN 08973	0,88	2,21	1,05	2,07
SN 08974	0,74	1,56	0,74	1,50
SN 08977	1,04	2,26	1,03	2,16
SN 08978	1,11	2,47	1,20	2,35
SN 08980	1,04	2,57	1,43	2,43
SN 08983	1,11	2,47	1,10	2,34
SN 08988	0,88	2,26	1,17	2,12
SN 08991	1,09	2,26	1,20	2,19
SN 08992	0,90	2,26	1,10	2,12
SN 08993	0,90	2,26	1,10	2,12
SN 08995	1,07	2,57	1,25	2,43
SN 08998	0,94	2,47	1,12	2,29
SN 08999	1,11	2,62	1,28	2,49
SN 09000	0,96	2,40	1,25	2,27
SN 09001	1,11	2,21	1,12	2,15
SN 09003	0,92	2,16	1,05	2,05
SN 09005	0,88	1,86	0,89	1,79
Mittelwert	0,98 ± 0,10	2,28 ± 0,26	1,11 ± 0,15	2,16 ± 0,24