

Realisierung und Weitergabe der Einheit spektrale Bestrahlungsstärke in der PTB

S. Pape, P. Sperfeld, S. Nevas

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Bundesallee 100, 38116 Braunschweig
mailto:sven.pape@ptb.de

Die Einheit spektrale Bestrahlungsstärke - Maß für die Strahlungsleistung pro Fläche - wird in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) mittels eines Primärnormals realisiert und mittels Sekundär- und TransfERNormalen an Kunden aus Wissenschaft/Forschung, Industrie und Handel weitergegeben

Spektrale Bestrahlungsstärke

Die Bestrahlungsstärke E ist ein Maß für die auf eine Fläche A auftreffende Strahlungsleistung Φ gemessen in W/m^2 . Die spektrale Bestrahlungsstärke $E_\lambda(\lambda)$ ist die spektrale Dichte der Bestrahlungsstärke $dE(\lambda)/d\lambda$ gemessen in $W/m^2 \cdot nm^{-1}$.

Diese radiometrische Einheit wird in vielen Bereichen der Wissenschaft (Meteorologie, chem. Analyse, Medizin, Umweltmesstechnik, Astrophysik) und Industrie (Hersteller von Strahlern, Empfängern und Medizintechnik) benötigt. Messgeräte, die in diesen Bereichen zum Einsatz kommen, müssen entsprechend kalibriert und auf nationale (Strahler-) Normale zurückgeführt werden.

In der PTB werden Kalibrierungen bezüglich spektraler Bestrahlungsstärke im optischen Spektralbereich zwischen 200 nm und 2500 nm in der Arbeitsgruppe 4.11 „Spektroradiometrie“ durchgeführt.

Realisierung der Einheit spektrale Bestrahlungsstärke

Kalibrierungen von Strahlern bezüglich spektraler Bestrahlungsstärke werden rückgeführt auf einen Hochtemperatur-Hohlraumstrahler (Schwarzer Strahler) als nationales Primärnormal der PTB.

Wenn Temperatur, strahlende Fläche, Abstand zur bestrahlten Fläche und effektiver Emissionsgrad des Hohlraumstrahlers genau bestimmt werden, lässt sich die spektrale Bestrahlungsstärke nach dem Planckschen Strahlungsgesetz berechnen [1]:

$$E_{BB}(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda) \cdot \frac{A_{BB}}{d_{BB}^2} \cdot \frac{2hc^2}{n^2 \lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{n\lambda kT}\right)} \quad (1)$$

Primärnormal für die spektrale Bestrahlungsstärke

In der PTB wird ein Schwarzer Strahler vom Typ BB3200pg verwendet (Abb. 1). Es handelt sich um einen zylindrischen Hohlraum aus pyrolytischem Graphit, der mittels Gleichstrom auf bis zu 3100 K aufgeheizt wird [2]. Nach dem Erreichen stabiler Betriebsbedingungen lässt sich unter Kenntnis der

Strahlertemperatur und der geometrischen Randbedingungen die spektrale Bestrahlungsstärke des Schwarzen Strahlers berechnen. Um Transmissionsverluste zu vermeiden, wird der Strahler ohne Fenster mit Argon als Schutzgas unter leichtem Überdruck betrieben. Der 200 mm lange Hohlraum mit einem Durchmesser von 37 mm, einem Vorblendensystem und einem maximalen Öffnungsdurchmesser von 20 mm erreicht einen effektiven Emissionsgrad von 0,9998. Für den genutzten Temperaturbereich von 2800 K bis 3100 K wird eine elektrische Leistung von bis zu 14 kW benötigt.

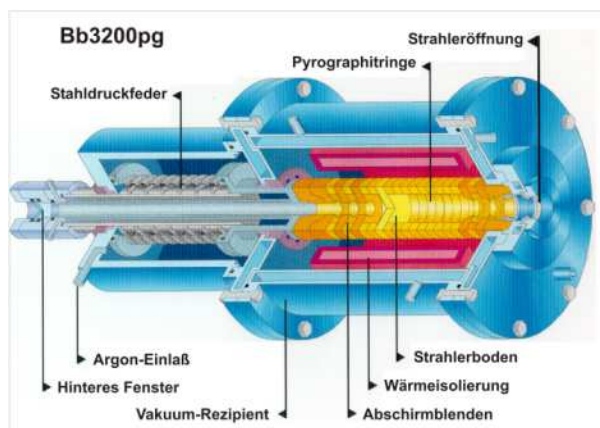


Abb. 1 Der Hochtemperatur Hohlraumstrahler Bb3200pg zur Realisierung der spektralen Bestrahlungsstärke.

Temperaturbestimmung mit Hilfe von Breitband-Filterdetektoren

Die Temperatur des Schwarzen Strahlers wird mittels Breitband-Filterdetektoren gemessen, die eigens hierfür in der PTB entwickelt wurden [3]. Es handelt sich hierfür um Si-Photodioden, die in einem thermostatisierbaren Gehäuse mit mehreren Vollfarbfiltern und einer definierten Blende eingebaut sind (Abb. 2). Die derart auf einen schmalen Spektralbereich begrenzte spektrale Empfindlichkeit $s_{FD}(\lambda)$ der Detektoren wird durch eine Kalibrierung rückgeführt auf ein Kryoradiometer als das nationale Primärnormal der PTB für empfangergestützte Radiometrie [4].

Mit Hilfe des Planckschen Strahlungsgesetzes lässt sich dann für jede Strahlertemperatur T_{BB} der Fotostrom $i_{FD}(T_{BB})$ der Filterdetektoren ermitteln:

$$i_{FD}(T_{BB}) = \int_{S_{FD}}(\lambda) E_{BB}(\lambda, T_{BB}) d\lambda . \quad (2)$$

Aus der Messung des Fotostromes der Filterdetektoren vor dem Schwarzen Strahler im Betrieb lässt sich dann mit kleiner Unsicherheit auf die Temperatur des Strahlers rückschließen.

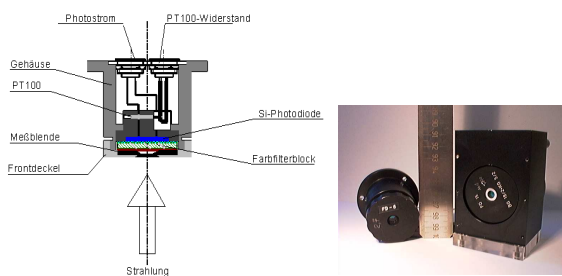


Abb. 2 Breitband-Filterradiometer. Aufbau und Muster

Weitergabe der Einheit spektrale Bestrahlungsstärke

Die mit dem Primärnormal realisierte spektrale Bestrahlungsstärke wird durch direkten Vergleich auf andere Strahlernormale (Sekundär- und Transfornormale) übertragen. Dabei wird die auftreffende Strahlung jeweils mittels eines Doppelmonochromators spektral zerlegt. Für verschiedene Wellenlängen optimierte Empfänger wandeln die derart spektral selektierte Strahlung in einen Photostrom um. Mit Hilfe von nacheinander durchgeführten Messungen von Primär- und Sekundärnormal, werden die Photoströme der Strahler miteinander verglichen (Substitutionsmethode).

Zur Weitergabe der Einheit spektrale Bestrahlungsstärke sind geeignete Strahlernormale erforderlich. Als Sekundär- und Transfornormale werden typischerweise Deuteriumlampen (Spektralbereich 200 nm – 400 nm) und Quarz-Halogen-Glühlampen (250 nm – 2500 nm) verwendet (Abb. 3).



Abb. 3 Typische Sekundär- und Transfornormale für spektrale Bestrahlungsstärke
links: 1000 W Quarz-Halogenglühlampe (Typ FEL)
rechts: 30 W Deuteriumlampe (Typ PTB-DLS)

Die PTB betreibt eine Gruppe von Sekundärnormalen, um die Einheit spektrale Bestrahlungsstärke über längere Zeiträume zu bewahren und auf Transfornormale von Kunden zu übertragen. Der komplette Weg der Rückführung lässt sich in der in Abb. 4 dargestellten Kalibrierkette schematisieren [5].

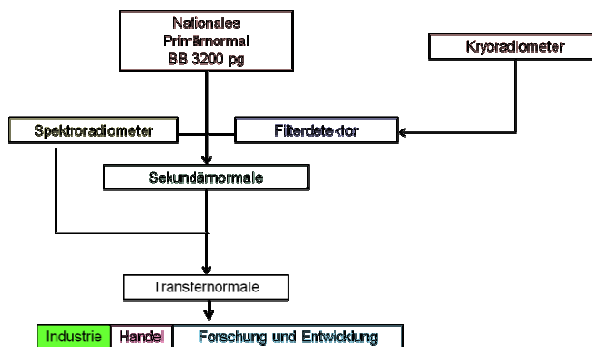


Abb. 4 Kalibrierkette für die Einheit spektrale Bestrahlungsstärke

Je nach Anwendung kommen in der PTB unterschiedliche Spektroradiometer und Strahlernormale zum Einsatz, um sicherstellen zu können, dass die spezifischen Anwendungen in Industrie, Handel, Forschung und Entwicklung lückenlos auf dem Internationalen Einheitensystem (SI) basieren [6].

Literatur

- [1] M. Planck, *Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum*, *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft* 2, (1900), 237-245.
- [2] P. Sperfeld, *Entwicklung einer empfängergestützten spektralen Bestrahlungsstärkeskala*, Braunschweig, (1999), <http://www.biblio.tu-bs.de/ediss/data/19990628a/19990628a.html>
- [3] J. Metzdorf, K.-H. Raatz, H. Kaase, "Broadband-filter detector for measuring blackbody temperature, in *Photonic Measurements*", in *Photonic Measurements (Photon-Detectors)*, Int. Measurement Confederation (IMEKO), 14.-17. Sept. 1987
- [4] L. Werner, J. Fischer, U. Johannsen, J. Hartmann, *Accurate determination of the spectral responsivity of silicon trap detectors between 238nm to 1015nm using a laser-based cryogenic radiometer*, *Metrologia* 37, 279, (2000).
- [5] P. Sperfeld, S. Pape, S. Nevas, *The spectral irradiance traceability chain at PTB*, *AIP Conf. Proc.* 1531, 801 (2013); doi: 10.1063/1.4804891
- [6] P. Sperfeld, S. Pape and B. Barton, *From primary standard to mobile measurements — Overview of the Spectral Irradiance Calibration Equipment at PTB*, *MAPAN - Journal of Metrology Society of India* 25, 11-19 (2010).