

## Strahlergestützte Spektroradiometrie

S. Pape, P. Sperfeld

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig  
e-mail Adresse: [sven.pape@ptb.de](mailto:sven.pape@ptb.de)

Die Darstellung, Bewahrung und Weitergabe der radiometrischen Einheit spektrale Bestrahlungsstärke im optischen Spektralbereich zwischen 200 nm und 2500 nm auf der Basis eines Hochtemperatur-Hohlraumstrahlers als primäres Strahlernormal in der PTB wird beschrieben.

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

Die genaue Kenntnis der spektralen Bestrahlungsstärke wird in vielen Bereichen der Forschung und Entwicklung, Industrie, Medizin und in der Umwelttechnik benötigt:

### Realisierung der spektralen Bestrahlungsstärke

Mittels eines Hochtemperatur Hohlraumstrahlers („Schwarzer Strahler“) wird unter Verwendung des Planckschen Strahlungsgesetzes die spektrale Bestrahlungsstärke realisiert.

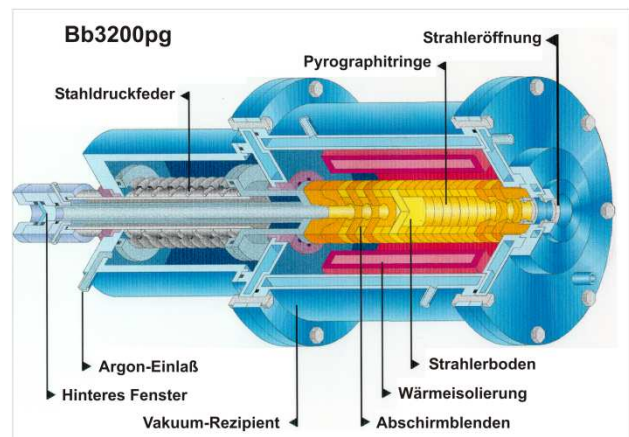


Abb.1: Primärstandard für spektrale Bestrahlungsstärke: Hochtemperatur-Hohlraumstrahler BB3200pg

Ein Schwarzer Strahler ist ein idealer, im thermischen Gleichgewicht befindlicher Temperaturstrahler, der auftreffende elektromagnetische Strahlung vollständig absorbiert, beziehungsweise in Abhängigkeit von seiner Temperatur nach dem Planckschen Strahlungsgesetz emittiert.[2]

Der Hochtemperatur-Hohlraumstrahler der Arbeitsgruppe „Strahlergestützte Spektroradiometrie“ besteht im Wesentlichen aus einer aus einzelnen Pyrographitringen zusammengesetzten Röhre (Emissionsgrad = 99,98 %).

An den Enden des Schwarzen Strahlers wird eine Spannung angelegt. Durch die Graphitröhre fließt ein Strom, der die Röhre auf Grund ihres ohmschen Widerstandes bis

auf ca. 2900 K erhitzt.

An der Vorderseite des Hohlraums befindet sich eine Öffnung, durch die die Strahlung austreten kann. Um ein Verbrennen des Graphits zu verhindern, wird der Hohlraum mit einem inerten Gas (Argon) geflutet.

Wenn der Strahler sich im thermischen Gleichgewicht befindet, wird die gewichtete emittierte Strahlung mit absolut kalibrierten Breitband-Filterradiometern gemessen und daraus die Temperatur des Strahlers berechnet.

Mit Hilfe des Planckschen Strahlungsgesetzes und mit Kenntnis der Messgeometrie (Öffnungsfläche des Strahlers, Abstand zu den Filterdetektoren und der Eingangsöffnung des Monochromators), wird die spektrale Bestrahlungsstärke bestimmt. [2]

Das Plancksche Strahlungsgesetz

$$E(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda) \cdot \frac{A_{BB}}{d_{BB}^2} \cdot \frac{2 \cdot h \cdot c^2}{n^2 \cdot \lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{h \cdot c}{n \cdot \lambda \cdot k \cdot T}\right) - 1}$$

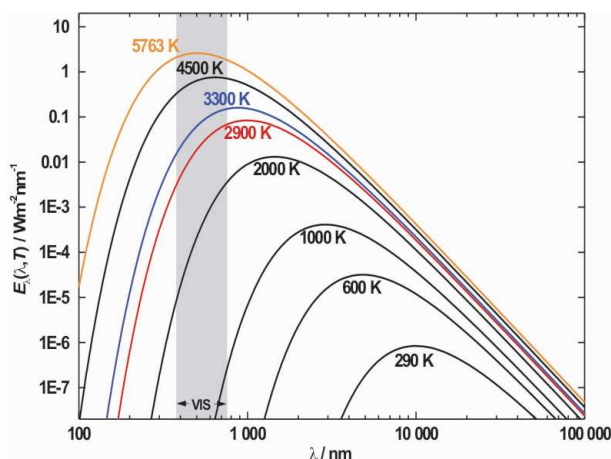


Abb.2: Spektrale Bestrahlungsstärke in Abhängigkeit von der Hohlraumstrahlertemperatur

## Messung der spektralen Bestrahlungsstärke

Die vom Strahler emittierte Strahlung wird durch eine integrierende Kugel (Ulbricht-Kugel) diffus reflektiert und in den Monochromator eingekoppelt. Dort wird sie spektral zerlegt und mit drei verschiedenen Detektoren (Photomultiplier/PMT, Si-Photodiode, InGaAs-Photodiode) gemessen.

Für die Messung der spektralen Bestrahlungsstärke im Wellenlängenbereich von 250 nm bis 2500 nm wird ein sogenannter Doppel-Doppel-Monochromator verwendet, der aus einem Vormonochromator und zwei auf den jeweiligen Wellenlängenbereich abgestimmten Hauptmonochromatoren besteht. Ein Hauptmonochromator ist für den Wellenlängenbereich 250 nm bis 1150 nm (UV-VIS-NIR), der andere für den Wellenlängenbereich von 800 nm bis 2500 nm (NIR-IR) optimiert.

Im Vor- und Hauptmonochromator sind jeweils zwei aufeinander abgestimmte Gittersätze vorhanden, um eine bessere Anpassung an die zu messenden Wellenlängen zu erreichen. [3]

In dem NIR-IR Monochromator werden z.B. zusätzlich goldbeschichtete Spiegel verwendet.

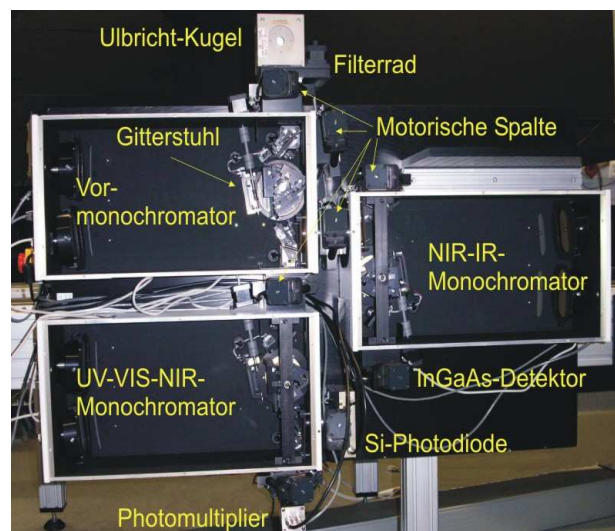


Abb.3: Doppel-Doppel-Monochromator (UV-VIS-NIR) mit Detektoren

Für den Wellenlängenbereich von 200 nm bis 400 nm (UV) wird ein einfacher Doppelmonochromator mit einem dem Wellenlängenbereich angepasstem Photomultiplier verwendet. Wie beim oben beschriebenen Doppel-Doppelmonochromator wird auch hier eine Ulbrichtkugel als Eingangsoptik verwendet.

### Transfer der spektralen Bestrahlungsstärke

Bei jeder Wellenlängeneinstellung wird durch die Messung mit dem Monochromator mit Hilfe der berechneten Strahlung des Hohlraumstrahlers ein Wert für die spektrale Bestrahlungsstärke zugeordnet.

Unmittelbar nach der Messung der vom Hohlraumstrahler emittierten Strahlung, wird die Strahlung einer Deuterium-Lampe (200 nm – 400 nm; UV-Messplatz), bzw. einer Quarz-Halogen-Lampe (250 nm – 2500 nm; UV-VIS-NIR-Messplatz) mit dem Monochromator gemessen.

So kann die vom Hohlraumstrahler dargestellte spektrale Bestrahlungsstärke auf mehrere, transportable Normale transferiert werden (TransfERNormale). Bei unmittelbar gegen den Hohlraumstrahler (Primärnormal) gemessenen TransfERNormalen spricht man auch von Sekundärnormalen.



Abb.4: TransfERNormale für die spektrale Bestrahlungsstärke. Links: 1000 Watt Quarz-Halogen-Lampe, Rechts: 30 Watt Deuteriumlampe mit aufgesetztem Monitor-Detektor.

Im Normalfall werden auch Kundenlampen gegen diese Sekundärnormale kalibriert. Man spricht dann von einer Kalibrierung durch Substitution: ein unbekannter Strahler wird mit einem bekannten Strahler (Sekundärnormal) verglichen.

Die in der PTB verwendeten Sekundärnormale werden in regelmäßigen Abständen gegen den Hochtemperatur-Hohlraumstrahler vermessen und damit auf das Primärnormal rückgeführt.

[1] P. Sperfeld, J. Metzdorf, S. Galal Yousef, K.D. Stock and W. Möller, *Improvement and Extension of the Blackbody-based Spectral Irradiance Scale*, Metrologia, 35 (1998) 267-271.

[2] P. Sperfeld, *Entwicklung und Realisierung einer empfangergestützten spektralen Bestrahlungsstärkeskala*, Dissertation, Braunschweig, 28.6.1999, <http://www.biblio.tu-bs.de/ediss/data/19990628a/-19990628a.html>

[3] 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, Vol. 25, No. 1, 2010, pp 11-19,