

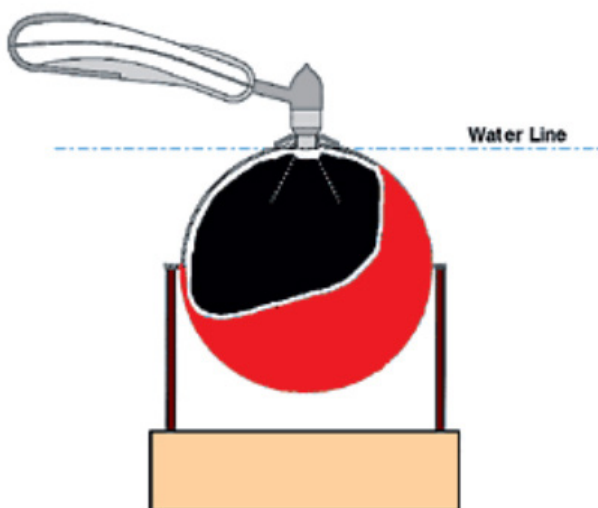
SCHWARZER STRAHLER MIT ZERTIFIZIERTEM EMISSIONSGRAD

Zur Kalibrierung von Infrarot Thermometern für klinische Anwendungen

Aus praktischen Gründen werden die meisten kommerziellen Infrarot-Thermometer mit selbstgebauten Schwarzen Strahlern kalibriert. Deren Emissionsgrad ist weder bekannt noch zertifiziert. Der hier vorgestellte Schwarze Strahler zur Temperierung im Tauchbad kann als einfacher und kostengünstiger Referenzstrahler genutzt werden. Die Anordnung ist zertifizierbar, vollständig mathematisch zu beschreiben und rückführbar auf anerkannte Standards.

Francesco Pompei, Exergen Corp.

Die berührungslose Temperaturmessung mit Infrarot-Thermometern beruht auf dem Emissionsvermögen von Objekten, und führt mathematisch direkt zur Idee des Schwarzen Strahlers. Die einzige mathematisch zwingende Verknüpfung zwischen Temperatur und Strahlungsenergie liefert ein Schwarzer Strahler mit genau quantifizierbaren Eigenschaften. Der Emissionsgrad ist darin ein Koeffizient zwischen 0 ... 1, der die tatsächlich emittierte Strahlungsenergie eines Objekts mit der theoretisch von einem Schwarzen Strahler bei gleicher Temperatur abgestrahlten Energie in Beziehung setzt. Die Begriffe Schwarzer Strahler und Emissionsgrad implizieren eine gleichförmige Temperatur der strahlenden Fläche, auch wenn nicht ausdrücklich darauf hingewiesen wird.



Ein kostengünstiger Schwarzer Strahler mit zertifiziertem Emissionsgrad bietet Genauigkeit, Rückverfolgung auf anerkannte Normale und Berechenbarkeit.

Zur Temperaturmessung durch Messung der Strahlungsenergie ist ein Schwarzer Strahler als Referenz mit bekanntem und zertifizierbarem Emissionsgrad erforderlich. Allerdings werden in der Praxis trotzdem die meisten kommerziellen Infrarot-Thermometer mit selbstgebauten Schwarzen Strahlern kalibriert, deren Emissionsgrad weder bekannt noch zertifiziert ist. Auch wenn die Größe der dadurch verursachten Messfehler für viele industrielle

Prozesse vernachlässigbar ist, ist sie bei medizinischen Anwendungen völlig inakzeptabel. Der hier vorgestellte, tauchfähige und zertifizierbare Schwarze Strahler kommt als einfacher und kostengünstiger Referenzstrahler zum Einsatz, ist mathematisch beschreibbar und auf Standards rückführbar. Der Emissionsgrad dieser Konstruktion liegt garantiert im Bereich von

$$0.9993 < \epsilon_{bb} < 0.9997$$

Für Temperaturmessungen im klinischen Alltag (42 °C bei Patienten und 16 °C Umgebung) liegt die dadurch verursachte Messunsicherheit bei maximal $\pm 0,01$ K.

Geschichtlicher Hintergrund der Infrarot-Thermometrie

Als erster hat Isaac Newton, etwa im Jahr 1665, das Sonnenlicht bewusst durch ein Prisma in Farben zerlegt und damit vorgeführt, dass sich Licht als Strahlungsenergie bei unterschiedlichen Wellenlängen beschreiben lässt. Erst 135 Jahre später fand ein anderer Wissenschaftler und Astronom in England, William Herschel, heraus, dass die durch Strahlung übertragene Wärmemenge von der Spektralfarbe abhängt. Er kam zu dem völlig irritierenden Ergebnis, dass sein Thermometer die höchste Temperatur im Bereich unterhalb des roten Spektrums zeigte, in einem Bereich, wo er mit seinen Augen kein Licht mehr sehen konnte. Herschel prägte damals den Namen Infrarot um Wärmestrahlung zu beschreiben. Herschel demonstrated that IR heat radiation and light are simply two forms of electromagnetic energy. Our eyes see light energy because we are equipped to detect the wavelengths of visible light but not the longer IR wavelengths (see Figure 1).

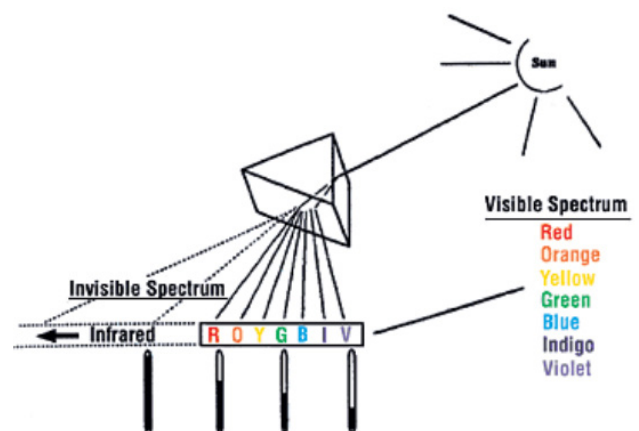


Bild 1: William Herschel entdeckte, dass Wärme auch außerhalb des sichtbaren Spektrums, im Infraroten, entsteht

Er konnte zeigen, dass Infrarot-Wärmestrahlung und Licht lediglich zwei Arten unterschiedlicher elektromagnetischer Strahlung sind. Unsere Augen sind für die Wellenlängen des sichtbaren Lichtes ausgelegt, aber eben nicht für das langwellige Infrarot (Bild 1). In der Tierwelt ist u.a. die

Grubenotter ein Beispiel für die Fähigkeit Infrarotstrahlung zu nutzen. Unterhalb der Augen befinden sich Organe, die auf Wärmestrahlung reagieren, so dass sie Warmblüter auch im Dunkeln erkennen kann. Infrarotsonden wie die von Herschel oder bei der Grubenotter zeigen das Auftreffen von Wärmestrahlung durch steigende Temperaturen am Messelement.

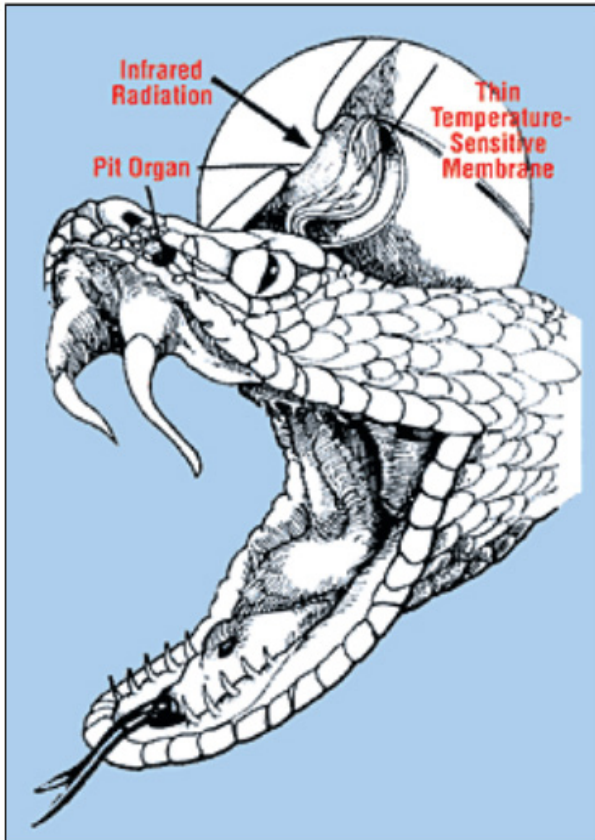


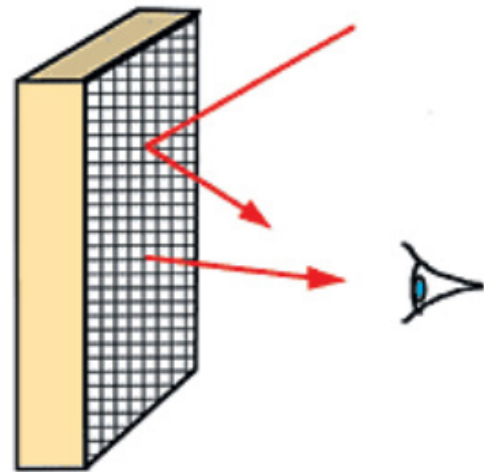
Bild 2: Grubenottern nutzen Wärmeempfindliche Bereiche unterhalb ihrer Augen um im Dunkeln warmblütige Baute zu erkennen

Erst zu Beginn des 20. Jahrhunderts entdeckte Max Planck den korrekten mathematischen Zusammenhang zwischen Temperatur und Infrarot-Strahlung. Er ebnete damit den Weg zur berührungslosen Temperaturmessung. Ein unerwartetes Ergebnis seiner Forschungsarbeit war die Entdeckung der Quantenphysik, zweifellos eine der wichtigsten wissenschaftlichen Entwicklungen des letzten Jahrhunderts.

Jüngste technologische Fortschritte in der Infrarot-Temperaturmessung haben Thermometer möglich gemacht, die förmlich milliardenfach empfindlicher sind als die Sonden, die William Herschel zur Verfügung standen. Endlich konnten Thermometer für medizinische Anwendungen entwickelt werden, die nicht-invasive Messungen an der Schläfe oder anderen Körperstellen erlauben; wichtig, wenn es um Geschwindigkeit und gleichzeitig Genauigkeit geht.

Grundlegendes zum Emissionsgrad

Der Emissionsgrad ist eine Eigenschaft von Oberflächen, die festlegt, wie gut man mittels Infrarot-Messungen die Temperatur eines Objektes messen kann. Zusammen mit der thermischen Hintergrundstrahlung ist der Emissionsgrad die wichtigste Fehlerquelle bei Infrarot-Temperaturmessungen.

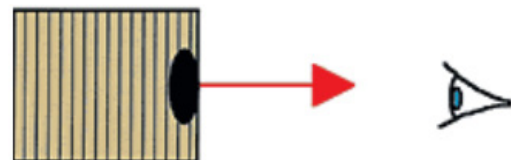


Poor Emitter

$$\begin{aligned} \text{Emissivity} &= 0.1 \\ \text{Reflectivity} &= \frac{0.9}{1.0} \end{aligned}$$

Bild 3: Ein schlechter Strahler zeigt ein hohes Reflexionsvermögen

Einfach gesagt ist der Emissionsgrad das Gegenteil des Reflexionsgrades. Ein perfekter Spiegel hat den Reflexionsgrad $\rho = 1$ und den Emissionsgrad $\epsilon = 0$. Ein idealer Schwarzer Strahler hat den Emissionsgrad $\epsilon = 1$ und den Reflexionsgrad $\rho = 0$. In Wirklichkeit haben alle realen Körper (einschließlich dem menschlichen) einen Emissionsgrad zwischen diesen Grenzwerten.

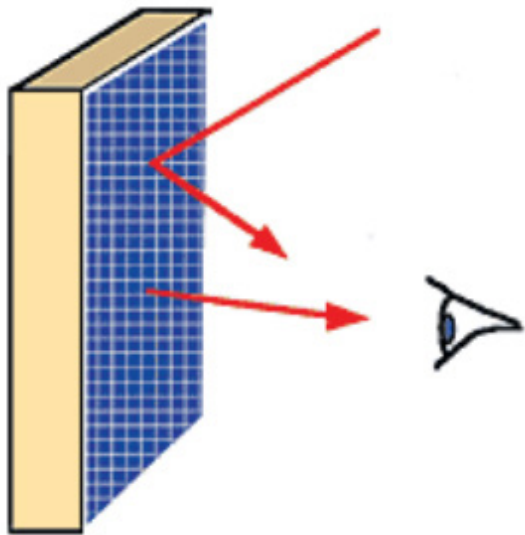


Blackbody

$$\begin{aligned} \text{Emissivity} &= 1.0 \\ \text{Reflectivity} &= \frac{0.0}{1.0} \end{aligned}$$

Bild 4: Ein Schwarzer Strahler emittiert, aber reflektiert keine Strahlung

In der Diskussion von Wärmestrahlung und Emissionsgrad spielen Spiegel eine wichtige Rolle. Da sich Wärmestrahlung und Licht sehr ähnlich verhalten, können wir das, was unsere Augen sehen, gut mit dem vergleichen, was eine Infrarot-Sonde sieht. Wenn man z.B. in einen Spiegel schaut, sieht man nur Reflektiertes und nichts von dem Spiegel selbst. Wenn der Spiegel perfekt ist, reflektiert er 100 % der Strahlung. Da er 100 % reflektiert, emittiert er nichts. In diesem Fall ist der Emissionsgrad $\epsilon = 0$.



Good Emitter
 Emissivity = 0.9
 Reflectivity = 0.1
 1.0

Bild 5: Ein guter Strahler zeigt ein niedriges Reflexionsvermögen

Wenn wir einen nicht-idealen Spiegel betrachten, dann sehen unsere Augen fast nur Reflektiertes, allerdings auch einige Verunreinigungen oder Kratzer auf der Oberfläche. Nehmen wir einen Spiegel, dessen Oberfläche zu 90 % ideal reflektierend und zu 10 % verunreinigt ist, dann reflektieren 90 % und 10 % emittieren. Damit beträgt der Emissionsgrad $\epsilon = 0,1$ (siehe Bild 3). Jetzt können wir das genaue Gegenteil eines idealen Reflektors – einen idealen Strahler – betrachten. Wenn das Auge auf einen idealen Emittler schaut, sieht es keinerlei Reflexionen – nur die Oberfläche selbst. Da die Oberfläche zu 100 % strahlt und nichts reflektiert, beträgt der Emissionsgrad $\epsilon = 1$. Objekte mit solchen Eigenschaften bezeichnet man als Schwarze λ :trahler (siehe Bild 4). Betrachten wir aber noch einen realen Strahler: wenn nur 10 % der Oberfläche reflektieren statt zu emittieren, dann beträgt der Emissionsgrad $\epsilon = 0,9$ (siehe Bild 5). Aus diesen Betrachtungen lässt sich eine einfache Regel aufstellen: Der Emissionsgrad einer Oberfläche ist einfach der Prozent-Anteil der Oberfläche, die emittiert. Die übrige Oberfläche reflektiert.

Der Emissionsgrad - mathematisch

Der Emissionsgrad lässt sich aus den physikalischen Grundlagen für die thermische Strahlung herleiten, wobei die mathematische Beschreibung der Energieverteilung im Wellenlängen-Spektrum dem Planck'schen Strahlungsgesetz folgt.

$$q_\lambda = \epsilon \frac{2\pi h c^2 \lambda^{-5}}{e^{hc/\lambda k T} - 1}$$

- q = abgestrahlte Energie bei gegebener Wellenlänge
- ϵ = Emissionsgrad
- T = absolute Temperatur

λ = Wellenlänge

h, c, K und e = verschiedene physikalische Konstanten

Die gesamte abgestrahlte Energie (q) folgt der Stefan-Boltzmann-Gleichung:

$$\int_0^\infty q_\lambda d\lambda = \epsilon \sigma T^4$$

Dabei muss man berücksichtigen, dass die Stefan-Boltzmann-Gleichung nur dann zutrifft, wenn bei Messungen der abgestrahlten Energie wirklich das gesamte Spektrum erfasst wird. Eine Näherungslösung für einen gefilterten (begrenzten) Strahlungsbereich ergibt sich aus dem Planck'schen Strahlungsgesetz zu:

$$q = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} q_\lambda d\lambda \approx \epsilon \sigma T^x$$

wobei $x \neq 4$ ist.

Entsprechend muss man vor der Anwendung der Stefan-Boltzmann-Gleichung prüfen, ob sich irgendwelche begrenzenden Filter im Strahlungsverlauf befinden. Die folgende Gleichung liefert Ergebnisse für einige interessante Wellenlängenbereiche, normalisiert auf eine Objekttemperatur, z.B. von 37,8 °C (100 F):

$$\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} q_\lambda d\lambda / \int_0^\infty q_\lambda d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} q_\lambda d\lambda / \int_0^\infty q_\lambda d\lambda} T_1$$

Wie man aus Tabelle 1 ersehen kann, muss ein spektraler Korrekturfaktor beachtet werden, wenn eine Kalibrierung über einen größeren Wellenlängenbereich gültig bleiben soll. Dazu müssen auch die spektralen Eigenschaften des Strahlers bekannt sein.

Tabelle 1: Spektrale Korrekturfaktoren

Temperatur (°F)	6-14µ	2-20µ	8-14µ	0.5-50µ
65	0.939	0.960	0.969	0.997
70	0.949	0.966	0.975	0.997
75	0.958	0.972	0.980	0.998
80	0.967	0.978	0.985	0.998
85	0.976	0.984	0.993	0.999
90	0.984	0.989	0.993	0.999
95	0.992	0.995	0.997	1.000
100	1.000	1.000	1.000	1.000
105	1.007	1.005	1.003	1.000
110	1.015	1.010	1.006	1.001

Um auch die reflektierte Energie zu berücksichtigen kommt das Kirchoff'sche Gesetz ins Spiel: Emission + Reflexion +

Transmission = 1 bzw. $\epsilon + \rho + \tau = 1$ Für undurchsichtige Körper gilt $\tau = 0$ woraus sich der Zusammenhang von Emission und Reflexion als $\epsilon + \rho = 1$ ergibt.

Betrachten wir die Situation in der Öffnung eines kugelförmigen Schwarzen Strahlers, dann kann reflektierte Energie nur aus der Umgebung der Öffnung eindringen. Bei Schwarzen Strahlern mit einem Emissionsgrad $\epsilon < 0,99$ ist dieser Einfluss nicht zu vernachlässigen. Wird eine Messsonde in die Öffnung des Schwarzen Strahlers eingeführt, dann ist die Quelle für Umgebungsstrahlung die Sonde selbst (Bild 6).

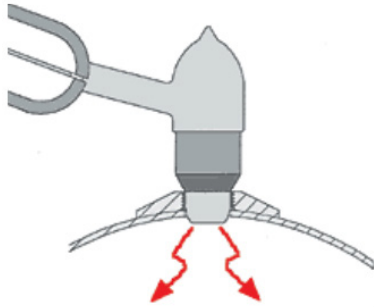


Bild 6: Weil die Sonde selbst in den Schwarzen Strahler einstrahlt, sollte für feinere Korrekturen ihre Temperatur und Geometrie bekannt sein.

Entsprechend müssen Geometrie und Temperatur der Sonde bekannt sein, falls eine Korrektur des Emissionsgrades erforderlich wird.

Lineare Approximation

Wenn die Temperatur in einem engen Bereich gehalten wird, lässt sich der Einfachheit halber mit Gleichung 2 eine lineare Approximation durchführen um Emissionsgrade zu vergleichen.

Das zeigt die folgende Herleitung:

$$q = \epsilon \sigma T^4$$

$$\text{let } \Delta q = c \Delta T$$

$$\text{then } \frac{c \Delta T}{q_1 - q_2} = \frac{c(T_1 - T_2)}{\epsilon \sigma (T_1^4 - T_2^4)}$$

$$\frac{\partial q}{\partial T} = 4 \epsilon \sigma T_m^3 = c$$

$$\text{then } \frac{c \Delta T}{q_1 - q_2} = \frac{4 T_m^3 (T_1 - T_2)}{(T_1^4 - T_2^4)}$$

Wenn die Soll-Temperatur des Schwarzen Strahlers innerhalb 0,5 K gehalten wird, ergibt sich eine Nichtlinearität von:

$$\frac{c \Delta T}{q_1 - q_2} = \frac{4 T_m^3 (T_1 - T_2)}{(T_1^4 - T_2^4)}$$

$$= \frac{4(273 + 37.25)^3 (37.5 - 37)}{(273 + 37.5)^4 - (273 + 37)^4}$$

$$= 0.99999935$$

Durch die geringen Abweichungen von nur 1 zu 1 Million bei kleinen Temperaturunterschieden, kann man die Berechnung von Fehlern durch Änderungen des Emissionsgrades bequem in einer linearen Form durchführen (siehe Bild 7).

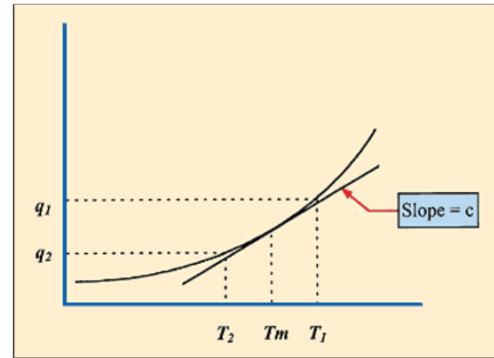


Bild 7: Bei Berechnung der Änderung des Emissionsgrades kann für kleine Variationen mit einem linearen Ansatz gearbeitet werden.

Entsprechend lassen sich auch die Änderung des Emissionsgrades eines Schwarzen Strahlers oder zwischen unterschiedlichen Schwarzen Strahlern (auf gleicher Temperatur) formulieren:

$$\epsilon_{BB1} - \epsilon_{BB2} = \frac{(T'_{BB1} - T'_{BB2})}{(T_{BB} - T_A)}$$

Dabei ist T' die effektive Temperatur entsprechend der Strahlung in der Kugelöffnung des Schwarzen Strahlers, die von der Sonde bei derselben Umgebungstemperatur T_A gemessen wird. Zu beachten ist die Temperatur der Messsonde, da der Unterschied der Emissionsgrade $T_A \rightarrow T_{BB}'$ nicht ermittelt werden kann.

Schwarzer Strahler mit zertifizierbarem Emissionsgrad

Die Form eines kugelförmigen Hohlraums wurde für die Zertifizierung des Schwarzen Strahlers (blackbody – BB) ausgewählt, weil es die einzige Geometrie ist, für die sich der Emissionsgrad berechnen lässt [1].

Der effektive Emissionsgrad – ermittelt nach der Methode von Bedford – lässt sich für eine kugelförmige Struktur einfach in [1] nachschlagen. Bei einem Verhältnis von Öffnungsradius zu Kugelradius von $R_a/R_s = 0,1$ und einem Emissionsgrad der Innenwandfläche aus eloxiertem Aluminium von $\epsilon_{WB} = 0,9$ ergibt sich ein effektiver Emissionsgrad von $\epsilon_{BB} = 0,9997$. Diesen Wert können wir als Grundlage nehmen um Fehler im Toleranzbereich $0,7 < \epsilon_{WB} < 0,9$ abzuschätzen auf $0,9989 < \epsilon_{BB} < 0,9997$. Der Emissionsgrad von Innenwänden aus eloxiertem Aluminium wurde von [2] abgeschätzt und mittels konischem Reflektor experimentell exakt ermittelt [3]. Dabei ergaben sich Werte im Bereich $\epsilon_{WB} = 0,9 + 0,02$ und $\epsilon_{WB} = 0,9 - 0,1$. Entsprechend lässt sich der Emissionsgrad unmittelbar aus Gleichung 8 berechnen:

$$0,8 < \epsilon_{WB} < 0,92 \Rightarrow 0,9993 < \epsilon_{BB} < 0,9997$$

Alle anderen denkbaren Fehlerquellen, wie Abweichungen von der Kugelgeometrie oder Störungen der Oberfläche entlang der Naht zwischen den beiden Kugelhälften, sind plausibel vernachlässigbar. Fehler aufgrund von Temperaturschwankungen im Wasserbad, das dafür sorgt, dass sich die ganze Kugel auf derselben Temperatur befindet, sind unabhängig von der Kugelgeometrie und werden bei sachgemäßer Isolation des Tauchbades ebenfalls als vernachlässigbar eingeschätzt.

Unter der Annahme, dass sich die Temperaturunterschiede innerhalb der Messanordnung im Bereich $< 0,01$ K bewegen, lässt sich der mögliche Fehler beim Emissionsfaktor nach

Gleichung 7 berechnen:

$$\begin{aligned}\epsilon_{BB1} - \epsilon_{BB2} &= \frac{(T'_{BB1} - T'_{BB2})}{(T_{BB} - T_A)} \\ &= \frac{0.01}{37 - 23} = 0.0007\end{aligned}$$

TBB = Temperatur des Schwarzen Strahlers im Wasserbad
TA = Umgebungstemperatur der Messanordnung

Für Vergleichsmessungen zwischen unterschiedlichen Schwarzen Strahlern - z.B. zur Zertifizierung - muss besonders auf eine homogene Temperaturverteilung im Wasserbad geachtet werden.

Zusammenfassung

Es wurde die Konstruktion eines einfachen und kostengünstigen Schwarzen Strahlers mit zertifizierbarem Emissionsgrad vorgestellt, der sich mathematisch beschreiben lässt und auf anerkannte Standards rückführbar ist.

Literatur

1. Theory and Practice of Radiation Thermometry. 1988. D.P. Dewitt and G.D. Nutter Eds., Wiley & Sons.
2. M.Q. Brewster. 1992. Thermal Radiative Transfer & Properties. Wiley & Sons.
3. F. Pompei. U.S. Patent No. 4,636,091.6

Exergen Global offices:

The Netherlands
Pastoor Clercxstraat 26
5465 RH Veghel
Tel: +31 (0)413 376 599
Fax: +31 (0)413 379 310

USA
400 Pleasant Street
Watertown, MA 02472
Tel: +1 617 649 6322
Fax: +1 617 923 9911

office@exergenglobal.com
www.exergenglobal.com