

Optische Messung der Temperatur mit Pyrometern bei der Glasherstellung Teil 2: Grundlegendes zur Strahlungsthermometrie

B. Fleischmann, Hüttentechnische Vereinigung der Deutschen Glasindustrie e.V.,
Offenbach am Main

1. Einleitung

Die optische Erfassung von Temperatur beherrscht der Mensch auch ohne Messinstrument. Das Auge ist sozusagen ein „eingebautes“ Pyrometer, das uns ermöglicht elektromagnetische Strahlung in einem bestimmten Bereich „wellenlängenaufgelöst“ zu erkennen (Bild 1).

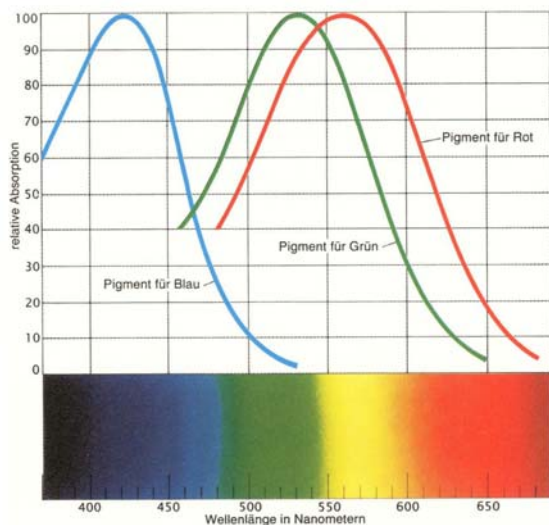


Bild 1: 3 menschlichen Farbrezeptoren für die Wahrnehmung elektromagnetischer Strahlung [1].

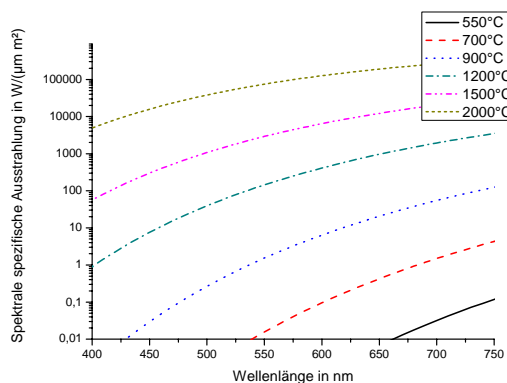


Bild 2: Plancksche Strahlung eines Schwarzen Strahlers bei unterschiedlichen Temperaturen im Bereich von 400 bis 750 nm im Vakuum (in erster Näherung auch in Luft).

Vergleicht man die Empfindlichkeit des menschlichen Auges mit der Emission von Körpern (Schwarze Strahler) unterschiedlicher Temperatur (Bild 2), so erkennt man, dass die Temperaturstrahlung ab ca. 550°C in relativ dunklen Räumen mit dem Auge zu erkennen ist und entsprechend heiße Körper kirschrot leuchtend erscheinen. Das menschliche Auge kann im Zusammenspiel mit dem Gehirn die Strahlungsintensität (Helligkeitsrezeptor: Stäbchen) und die Farbe (3 Farbrezeptoren: Zapfen) „auswerten“ und mit entsprechender Erfahrung die Temperatur „messen“. Noch höhere Temperaturen erkennt der Mensch an der Farbänderung entlang der Reihe rot – orange – gelb – weiß. Die Farbenreihe ergibt sich entsprechend der in Bild 2 erkennbaren Strahlungsemission als Funktion der Wellenlänge und aus der unterschiedlichen Empfindlichkeit der einzelnen Rezeptoren.

Strahlungsthermometrie mit Hilfe technischer Messeinheiten funktioniert im Prinzip genauso: Ein Detektor nimmt die Intensität elektromagnetischer Strahlung sowie eine Wellenlängenabhängigkeit wahr und dann wird diese Information verarbeitet, um eine Temperaturangabe zu machen.

2. Grundlagen der Strahlungsphysik

Jeder Körper emittiert elektromagnetische Strahlung, die durch seine absolute Temperatur definiert ist. Im Vakuum kann die emittierte Strahlung eines schwarzen Strahlers durch das Planck'sche Strahlungsgesetz beschrieben werden [2]:

$$L_{\lambda_s}(\text{Vakuum}) = \frac{3,7417749 \cdot 10^{-16} \text{ [Wm}^2\text{]}}{\pi \cdot \Omega_0} \cdot \lambda^{-5} \text{ [m}^{-5}\text{]} \cdot \left(\exp\left(\frac{1,438769 \cdot 10^{-2} \text{ [mK]}}{\lambda \cdot T \text{ [mK]}}\right) - 1 \right)^{-1} \quad (1)$$

mit L_{λ_s} als Strahldichte eines schwarzen Körpers der Temperatur T (in K), $\Omega_0 = 1\text{sr}$ und λ als Wellenlänge im Vakuum. Ist der Temperaturstrahler von einem Medium umgeben, so ist dessen Brechzahl n_L am Ort des Strahlungsmessgerätes zu berücksichtigen.

$$L_{\lambda_s}(\text{Medium}) = \frac{3,7417749 \cdot 10^{-16} \text{ [Wm}^2\text{]}}{\pi \cdot \Omega_0} \cdot n_L^{-2} \cdot \lambda^{-5} \text{ [m}^{-5}\text{]} \cdot \left(\exp\left(\frac{1,438769 \cdot 10^{-2} \text{ [mK]}}{n_L \cdot \lambda \cdot T \text{ [mK]}}\right) - 1 \right)^{-1} \quad (2)$$

Der Fehler bei Luft als umgebendem Medium ist je nach Temperatur und Wellenlänge sehr gering und kann durchaus vernachlässigt werden, wenn es sich nicht um sehr genaue Temperaturmessungen handelt (Fehler bei 655 nm und 3000 K ≈ 1 K [2]).

Die spektrale Strahldichte L_λ eines beliebigen Temperaturstrahlers wird mit Hilfe des Emissionsgrades $\varepsilon(\lambda, T)$ errechnet.

$$L_\lambda = \varepsilon(\lambda, T) \cdot L_{\lambda_s} \quad (3)$$

Der Emissionsgrad und der Absorptionsgrad eines Temperaturstrahlers sind durch das sog. Kirchhoff'sche Gesetz miteinander verbunden [3].

3. Aufbau von Pyrometern und Störeinflüsse

Der prinzipielle Aufbau eines Strahlungsthermometers ist bereits in Bild 1 des 1. Teiles der Veröffentlichungsreihe [4] dargestellt. Sowohl in Pyrometern mit als auch ohne Abbildungsoptik wird durch Blendensysteme dafür gesorgt, dass eine entfernungsunabhängige Anzeige sichergestellt ist, solange das Messobjekt eine homogene Strahlung erzeugt und die homogene Strahlungsfläche größer ist als der erfasste Messfleck. Verfälschungen der Temperaturmessung treten eher über den wachsenden Einfluss der Strahlungsabsorption durch in der Luft enthaltene Gase, Stäube und Wasserdampf mit wachsendem Abstand des Messobjektes zum Pyrometer auf (siehe Bild 2 in [4], [5]).

Bild 3 zeigt schematisch verschiedene Störfaktoren der Strahlungsthermometrie. Anlagenteile mit vom Messobjekt unterschiedlicher Temperatur können reflektiert werden bzw. Hintergrundstrahlung kann bei transparenten oder semitransparenten Messobjekten mit erfasst werden. Sichtfenster können durch ihre Absorption im Wellenlängenbereich des Pyrometerdetektors zu Messfehlern führen (Vorsicht: die Absorptionseigenschaften im sichtbaren Bereich stimmen in den seltensten Fällen mit der Absorption im IR-Bereich überein!).

Die Abhilfemaßnahmen sind in [5], S. 53-54 ausführlich beschrieben: Einsatz von Filtern, geschickte Wahl der Wellenlänge des Detektors, Abschattung störender Strahlungsquellen, rechnerische Berücksichtigung von Falschinformationen, ergänzende Messungen von Störflächen, Korrektur über den eingestellten Emissionsgrad, Einsatz eines Quotientenpyrometers,

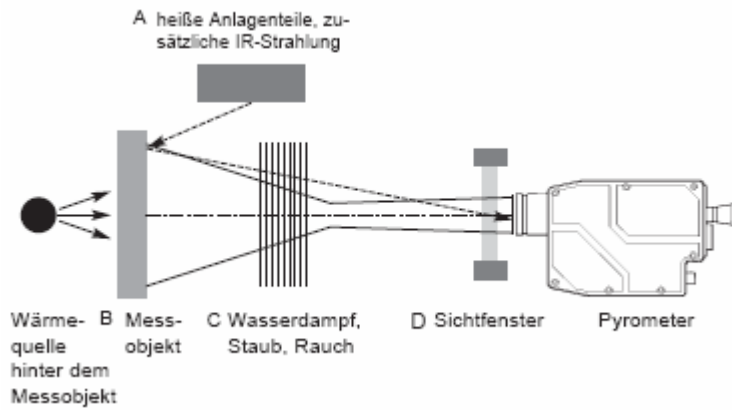


Bild 3: Störeinflüsse bei der Temperaturmessung mit Pyrometern [5].

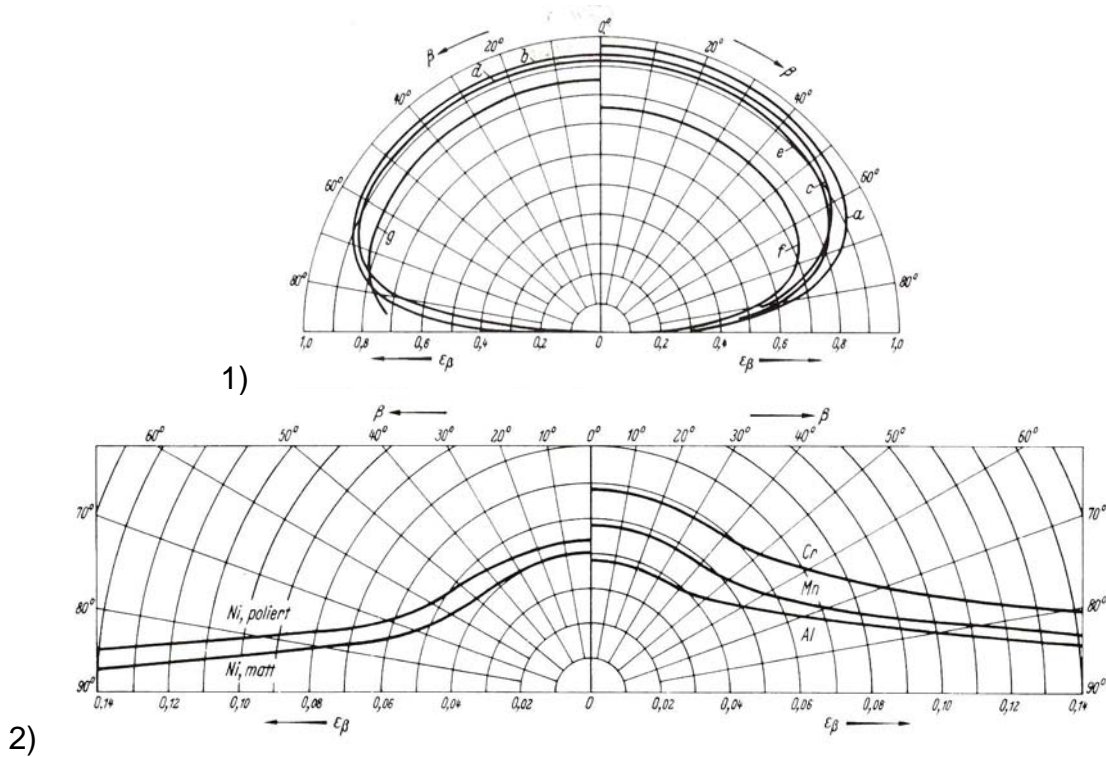


Bild 4: Richtungsverteilung des Emissionsgrades 1) bei einigen elektrischen Nichtleitern: a feuchtes Eis, b Holz, c Glas, d Papier, e Ton, f Kupferoxid, g rauer Korund. 2) bei einigen Metallen mit blanker Oberfläche. [6]

4. Eigenschaften technischer bzw. realer Flächen

4.1. Emissionsgrad

Der Emissionsgrad, das Verhältnis der Strahlungsdichte bei einer Wellenlänge und gegebener Temperatur einer realen Oberfläche im Vergleich zu einem schwarzen Strahler gleicher Temperatur, ist abhängig von der Beobachtungsrichtung (Bild 4), der Wellenlänge, der Temperatur und von Werkstoffeigenschaften (z.B. Oberflächenstruktur (Bild 4b, Tabelle 1)).

Aluminium										Aluminiumoxid	
walzblank		Hochglanz- poliert		poliert	Vor- poliert	Oxidiert bei 872 K		Stark oxidiert			
T= 443 K	773 K	500	850	373	373	472	872	366	777	550	1100
$\epsilon_n =$ 0,039	0,05	0,039	0,057	0,095	0,18	0,11	0,19	0,2	0,31	0,63	0,26

Tabelle 1: Einfluss der Oberfläche auf das Emissionsverhalten [6] am Beispiel von Aluminium für die Strahlungsemission in Richtung der Flächennormalen.

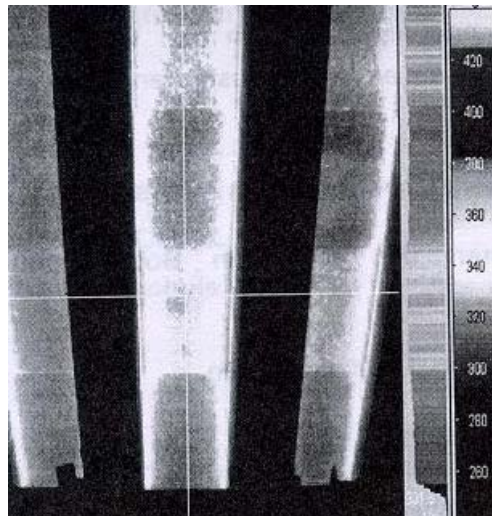


Bild 5: Temperaturbild der Wannenseite mit Hilfe einer Thermokamera [7].

Tabelle 1 demonstriert am Beispiel von Aluminium den Einfluss der Beschaffenheit der Oberfläche auf den Emissionsgrad. D.h., Farb-, Lack-, Oxidations- oder Korrosionsschichten sowie Oberflächenrauigkeit verändern das Emissionsvermögen von technischen Oberflächen. Im Falle von feuerfesten Materialien trifft dies zum Beispiel bei der Verglasung der Steine im Einsatz zu.

Ein Beispiel aus der Praxis ist die Aufnahme einer Wannenseite in Bild 5 mit einer Wärmebildkamera („bildgebende Pyrometrie“). Der hellere Stein, markiert mit dem Fadekreuz, zeigt im Vergleich zu den umliegenden Steinen eine erhöhte Strahlungsemission und assoziiert eine höhere Temperatur. Nach Kontrollmessungen mit Thermoelementen und einer genauen optischen Überprüfung konnte gezeigt werden, dass die erhöhte Strahlungsemission auf eine rauere Oberflächenbeschaffenheit zurückzuführen ist und nicht auf Grund erhöhter Temperatur zu Stande kommt.

4.2. Reflexionsgrad

Bei nicht transparenten Körpern gibt der Reflexionsgrad ρ das Verhältnis der in den Halbraum reflektierten Strahlung und damit die Abweichung vom Zustand der absoluten Schwärze an [2]:

$$\rho = 1 - \epsilon \tag{4}$$

In der Praxis bedeutet dies auch, dass eine Veränderung des Emissionsgrades (z. B. gläserne Überzüge) im Einsatz auch das Reflexionsverhalten im Einsatz im Vergleich zum Ausgangszustand verändert. Die „Spiegelungen“ an gläsern überzogenen Flächen nehmen z.B. zu, die Emissionsstrahlung anderer heißer Körper wird stärker reflektiert und der Messwert u.U. deutlich verfälscht.

4.3 Absorption

Bei transparenten Medien bzw. semi-transparenten Körpern wird ein Teil der Temperaturstrahlung schon im Körper absorbiert. Andererseits nimmt das Pyrometer Emissionsstrahlung aus dem Innern des Körpers wahr. Die „Eindringtiefe“ des Pyrometers hängt vom Absorptionsverhalten des Materials ab. Dieses ist in den allermeisten Fällen von der Temperatur und der Wellenlänge abhängig. Glasschmelzen sind semitransparente Materialien und erschweren damit eine definierte Temperaturmessung auf optischem Weg. Bei Weißglasschmelzen bzw. bei der Messung eines Tropfens einer Weißglasschmelze ist in den meisten Fällen die „Eindringtiefe“ größer als die Tropfendicke, so dass die Temperaturmessung mit einem Pyrometer, dessen Detektor bei entsprechenden Wellenlängen die Emissionsstrahlung erfasst, entsprechend dem Störeinfluss B in Bild 3 beeinflusst werden kann. Teil 3 der Veröffentlichungsreihe wird näher auf die Strahlungsthermometrie von Glasschmelzen und den damit verbundenen Problemen eingehen.

4.4. Brechzahl

Wie schon in Formel (1) und (2) zu erkennen, spielt die Brechzahl eines Mediums bei transparenten oder teiltransparenten Medien ebenfalls eine nicht unerhebliche Rolle. Auch auf diese Fragestellung wird in Teil 3 näher eingegangen werden, da bei der Strahlungsleitung in Glasschmelzen die Brechzahl und damit verknüpfte physikalische Erscheinungen (Brechung und Reflexion an Grenzflächen) eine wichtige Rolle spielen.

5. Literatur

- [1] Fischer, E. P.: Die Schichten der Farben. Edition Farbe; Bd. 3. Regenbogenverlag, Konstanz. 1999.
- [2] Kohlrausch, F.: Praktische Physik. B. G. Teubner, Stuttgart. 1996. §3.1.5 Strahlungsthermometrie (H. J. Jung)
- [3] Fleischmann, B.: Spektrale Messung der im Verbrennungsraum von Glasschmelzwannen vorhandenen Strahlung im Rahmen des AiF-Forschungsvorhabens Nr. 80ZN „Spektral“ - Teil 3: Physikalische und quantenmechanische Grundlagen und Interpretation der gemessenen Flammenspektren. HVG-Mitteilung Nr. 2068, August 2004.
- [4] Fleischmann, B.: Optische Messung der Temperatur mit Pyrometern bei der Glasherstellung. Teil 1: Bestimmung der Temperatur von feuerfesten Bauteilen im Verbrennungsraum von Glasschmelzwannen. HVG-Mitteilung Nr. 2103. Dezember 2005.
- [5] Pyrometer-Handbuch – Berührungslose Temperaturmessung. Eine Firmenschrift der IMPAC Infrared GmbH. Downloadadresse: <http://www.impac-infrared.de/DE>; weiter mit >> Informationen >> Grundlagen; download pdf: Pyrometer-Handbuch. Stand 15. August 2006

- [6] N.N.: VDI-Wärmeatlas. Springer-Verlag, Berlin. 1997. §K: Wärmestrahlung.
- [7] Hofmann, O.: Thermografie von Glasschmelzwannen. Glastech. Ber. Glass Sci. Technol. 74(2001)6, N63-N66.