

HVG-Mitteilung Nr. 2103

Optische Messung der Temperatur mit Pyrometern bei der Glasherstellung Teil 1: Bestimmung der Temperatur von feuerfesten Bauteilen im Verbrennungsraum von Glasschmelzwannen

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

1. Einführung

Die Temperaturmessung mit Hilfe von Pyrometern ist in der Glasindustrie weit verbreitet, da sie einfach und schnell anwendbar ist, die Handgeräte einen flexiblen Einsatz erlauben und eine berührungslose Messung auch über größere Distanzen möglich ist. Im Rahmen des AiF-Forschungsvorhabens „Spektral I“ im Forschungsprogramm ZUTECH der AiF (AiF-Nr. 80ZN) [1] ist durch die Auswertung der Emissionsspektren, die in Verbrennungsräumen von Glasschmelzwannen aufgenommen wurden, allerdings eine gewisse Diskrepanz zwischen optisch gemessener Temperatur und auf anderem Wege ermittelten Temperaturmesswerten aufgefallen. Die Beschäftigung mit diesem Problem führte zu einer genaueren Betrachtung der Vorgänge und der Vorgehensweise bei der Temperaturbestimmung mit Hilfe von Pyrometern, wobei sich zeigte, dass sich die Diskrepanzen auflösen lassen, wenn oft übersehene bzw. in der praktischen Anwendung vergessene physikalische Grundlagen bei der Interpretation der Messwerte berücksichtigt werden.

2. Optische Temperaturmessung

Die Emissionsspektroskopie und die Temperaturmessung mit Hilfe von Pyrometern beruhen auf vergleichbaren Messanordnungen, wobei bei der Pyrometrie einfach nur der erfasste Wellenlängenbereich im Vergleich zu Spektralradiometermessungen deutlich eingeschränkt ist. Bild 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Pyrometers.

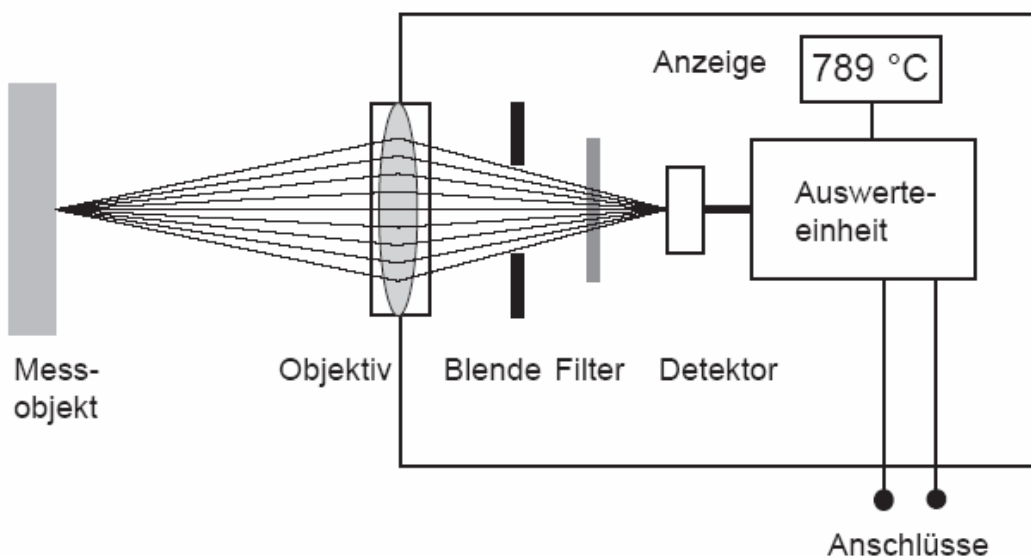


Bild 1: Prinzipieller Aufbau eines Pyrometers [2].

Optische Messung der Temperatur mit Pyrometern bei der Glasherstellung

Bild 2 zeigt typische Wellenlängenbereiche der unterschiedlichen Detektortypen bei Pyrometern, wobei die Detektoren den Bereichen an Luft angepasst sind, in denen keine Absorption durch Bestandteile der Luft erfolgt (graue Bereiche in Bild 2). Die neben dem Bild 2 stehende Tabelle gibt typische Detektortypen für die einzelnen Fenster mit hoher Transmission an Luft an.

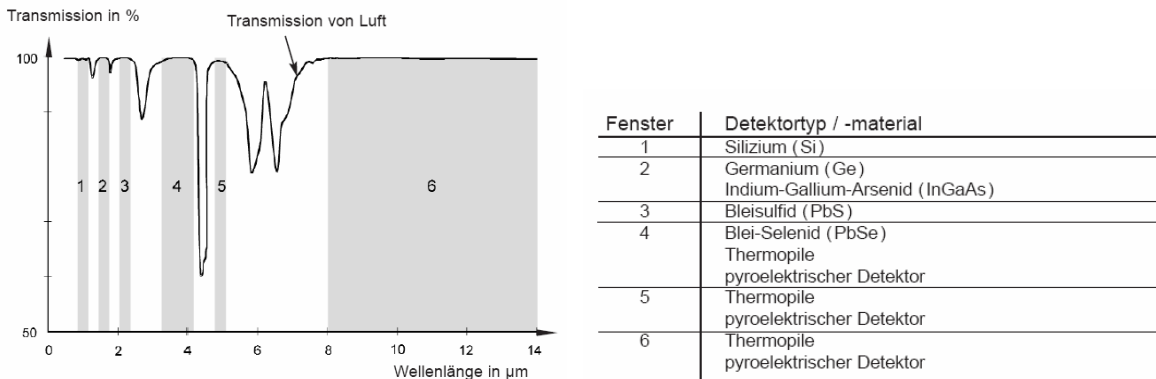


Bild 2: Transmission der Luft für elektromagnetische Strahlung (Wärmestrahlung) und Aufzählung der Detektortypen für die jeweiligen Wellenlängenbereiche, in denen eine störungsfreie Übertragung möglich ist [2].

Je nach zu erwartender Temperatur, Detektortyp, gewünschter Genauigkeit und Verfügbarkeit wird üblicherweise ein Pyrometer zur Messung aus dem Fundus ausgewählt. Am Pyrometer wird manchmal der Emissionsgrad bzw. das Emissionsvermögen eingestellt und dann eine Temperaturmessung vorgenommen.

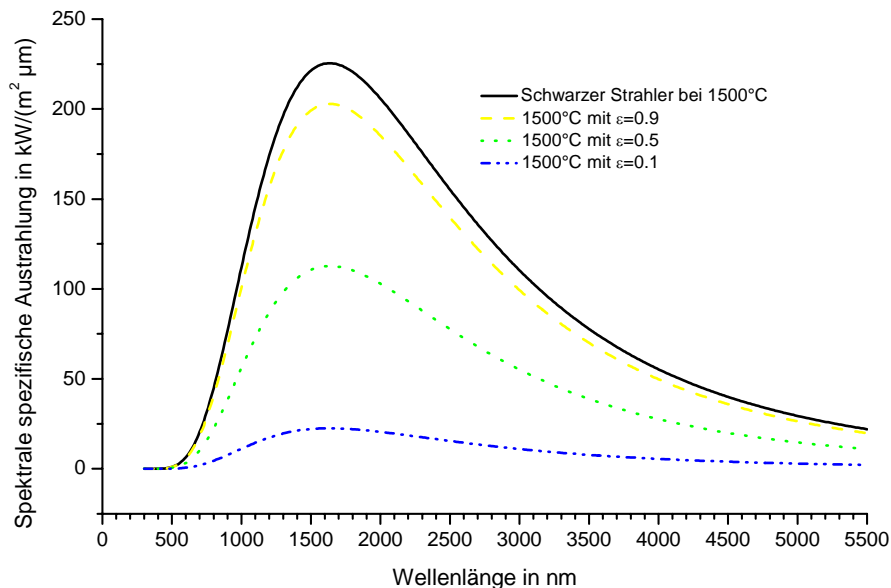


Bild 3: Wärmestrahlung eines Schwarzen Strahlers (Emissionsvermögen =1) oder sog. Grauer Strahler (Emissionsvermögen < 1, aber konstant) bei 1500°C.

3. Einfluss des Emissionsvermögens feuerfester Materialien auf die Strahlungsverhältnisse im Verbrennungsraum von Glasschmelzwannen

Betrachtet man die Wärmestrahlung einer unendlich ausgedehnten Wand von 1500°C, die nicht im thermischen Austausch mit einem andern Objekt steht (unendliche Wand im Universum), so erhält man die durchgezogene Kurve in Bild 3. Das Emissionsvermögen dieses Strahlers ist 1 und von der Wellenlänge unabhängig. Dies entspräche dem sog. Schwarzen Strahler.

Die anderen Kurven in Bild 3 geben die Strahlung dieser Wand mit unterschiedlichem, von der Wellenlänge unabhängigem Emissionsvermögen wieder. Dies sind sog. Graue Strahler. Das Emissionsvermögen realer Werkstoffe ist jedoch meist von der Wellenlänge abhängig. Von einer unendlich ausgedehnte AZS-Wand empfängt man dann die in der durchgezogenen Kurve des Bildes 4 dargestellte Wärmestrahlung.

Blickt man auf die Seitenwand einer Glasschmelzwanne, so handelt es sich jedoch um einen geschlossenen Reaktionsraum, bei dem die Strahlung der zu vermessenden Wand von der Wand mit dem Schauloch, durch die man in den Reaktionsraum hineinschaut, reflektiert wird. Damit erhält man die gestrichelte Kurve in Bild 4, wenn diese die gleiche Temperatur wie die der zu vermessenden Wand von 1500°C hat. Da die Wärmestrahlung zwischen den Wänden des Reaktionsraumes mehrmals reflektiert werden kann, erhält man bei Abwesenheit eines absorbierenden Mediums zwischen den Wänden die gepunktete Kurve in Bild 4, die dem Schwarzen Strahler bei 1500°C (Bild 4: □) entspricht.

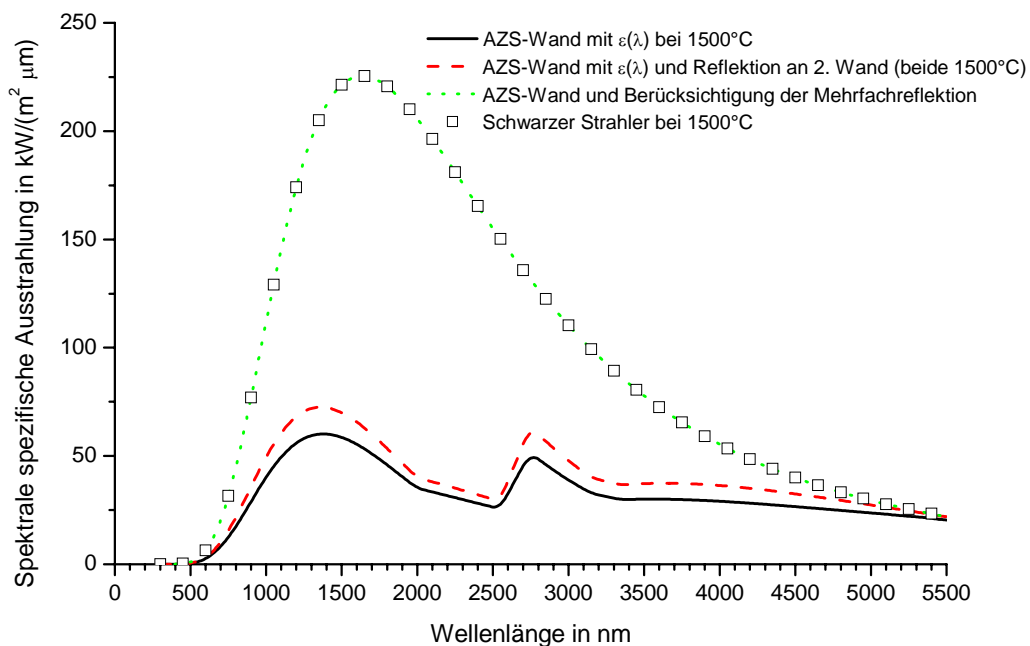


Bild 4: Wärmestrahlung einer AZS-Wand mit wellenlängenabhängigem Emissionsvermögen und Einfluss einer zweiten Wand im Strahlungsaustausch mit ihr.

Besitzen die beiden Wände im Strahlungsaustausch unterschiedliche Temperaturen, wie es bei U-Flammenwannen mit Feuerwechsel zu erwarten ist, und ist zwischen den beiden relevanten Austauschflächen ein Medium mit im interessierenden Wellenlängenbereich

absorbierenden Partikeln, so erhält man Emissionsspektren, wie sie in Bild 5 exemplarisch zu sehen sind.

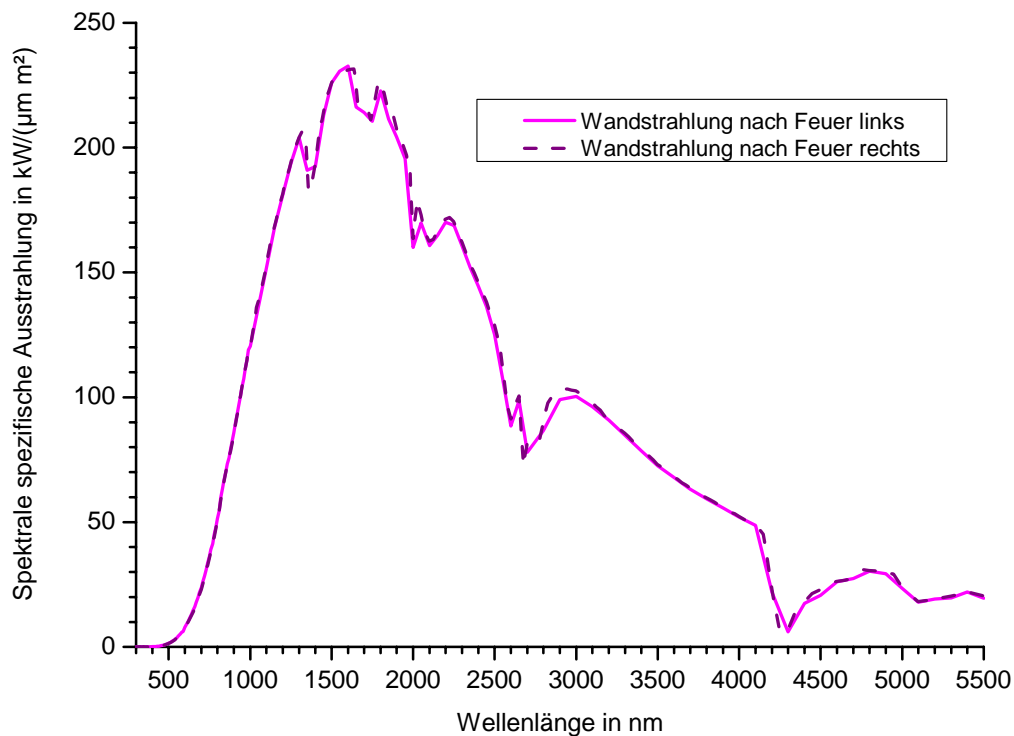


Bild 5: Gemessene Wärmestrahlung einer Seitenwand nach Feuer links bzw. Feuer rechts.

In der industriellen Praxis ergeben sich damit folgende Fragen bzw. Probleme bei der Messung der Temperatur mit Pyrometern:

- Welches Emissionsvermögen muss am Gerät eingestellt werden, da das Emissionsvermögen für viele Werkstoffe von der Wellenlänge abhängig ist?
- Wie groß ist die Absorption der Atmosphäre zwischen dem Messobjekt und dem Pyrometer, wenn es nicht nur Luft ist und zusätzliche oder verbreiterte Absorptionsbanden auftreten, die durch anwesende Gase verursacht werden?
- Mit welchen Flächen und Objekten steht das Meßobjekt im Strahlungsaustausch.

4. Modellierung des Strahlungsaustausches zwischen den Seitenwänden des Verbrennungsraumes von Glasschmelzwannen

Ist das wellenlängenabhängige Verhalten des Emissionsvermögens der Steinmaterialien bekannt, so lässt sich die Wärmestrahlung einer Seitenwand, die sich im thermischen Austausch mit der zweiten, gegenüberliegenden Seitenwand befindet, berechnen. Der Einfluss der restlichen Flächen des Verbrennungsraumes (Gewölbe, Stirnwände und Glasschmelzoberfläche) kann man in erster Näherung vernachlässigen [1]. Formel 1 ist die Grundlage für die wellenlängenabhängige Berechnung der Emissionsstrahlung einer

Seitenwand, die im Strahlungsaustausch mit einer zweiten Wand mit unterschiedlicher Temperatur ist.

$$\text{Wärmestrahlung Wand}_{\text{Feuer aus}}(\lambda) = \frac{\text{SStr}(T_1)(\lambda) \cdot E_1(\lambda) + \text{SStr}(T_2)(\lambda) \cdot E_2(\lambda) \cdot (1 - E_1(\lambda))}{1 - (1 - E_1(\lambda)) \cdot (1 - E_2(\lambda))} = \text{SStr}(T_m)(\lambda) \cdot E_{\text{eff}}(\lambda) \quad (1)$$

Dabei ist $\text{SStr}(T_i)(\lambda)$ die Wärmestrahlung eines schwarzen Strahlers bei der Temperatur T_i der Wand i in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ und $E_i(\lambda)$ das Emissionsvermögen der Wand i in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ .

Bild 6 zeigt die mit Formel (1) berechnete emittierte Wärmestrahlung bei Abwesenheit eines absorbierenden Mediums für zwei Wände bei unterschiedlichen Temperaturen. Dabei ist nur der Wellenlängenbereich zwischen 1000 und 2500 nm dargestellt, um die einzelnen Kurven besser unterscheiden zu können.

Man erkennt mit Hilfe des Bildes 6, dass die erfasste Wärmestrahlung, auf deren Grundlage das Pyrometer eine Temperatur ausgibt, unterschiedlich hoch ist. Je nach Wellenlänge, bei dem das Pyrometer mißt, ist der Unterschied der Intensität der Wärmestrahlung mehr oder weniger deutlich zu erkennen. Haben beide Wände die gleiche Temperatur von 1580°C ist die Intensität am höchsten. Besitzen beide Wände eine Temperatur von 1530°C wird die geringste Wärmestrahlung gemessen. Sind die beiden Wände unterschiedlich warm, im berechneten Fall 1530° und 1580°C, so ist die erfasste Wärmestrahlung davon abhängig, ob man auf die heißere oder die kältere Wand blickt. In beiden Fällen zeigt die gemessene Wärmestrahlung und damit die gemessene Temperatur Unterschiede zur realen Temperatur der Wand. Rechnerisch kann man für diesen beiden Fälle auch noch den Unterschied zu zwei Wänden mit der Temperatur von 1555°C erkennen. Messtechnisch ist dies mit handelsüblichen Pyrometern und auch mit dem Spektralradiometer jedoch noch mehr möglich.

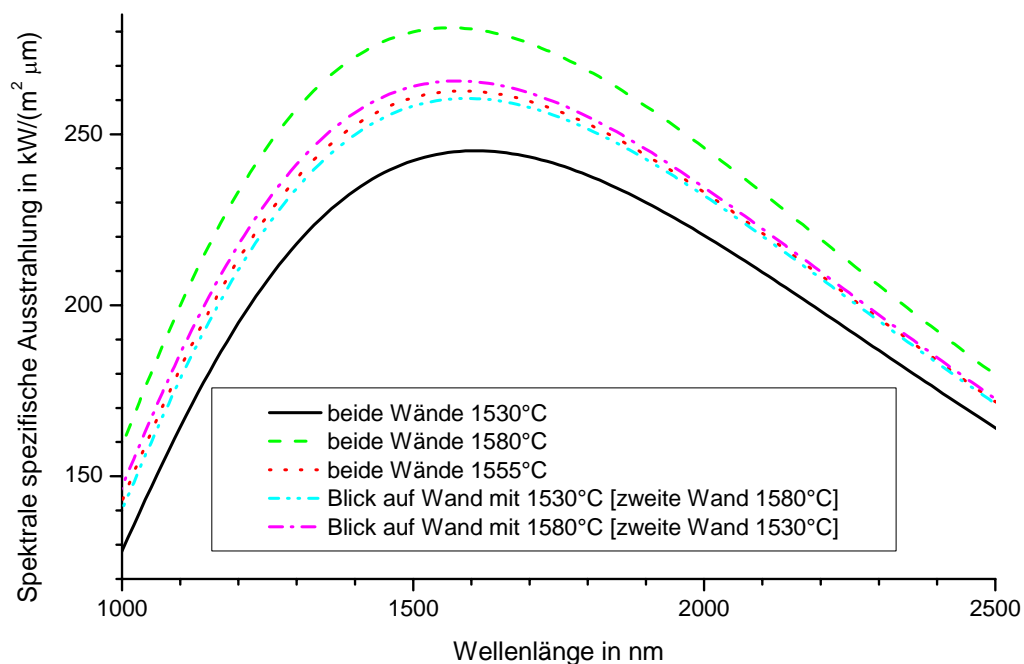


Bild 6: Emittierte Wärmestrahlung einer AZS-Seitenwand im Strahlungsaustausch mit einer zweiten AZS-Wand.

Im Idealfall zweier Wände ohne Absorption der Wärmestrahlung durch ein dazwischen befindliches Medium kann man die Wärmestrahlung zweier Wände in erster Näherung durch einen fast schwarzen Strahler mit einer mittleren Temperatur T_m der beiden Wände und einem effektiven Emissionsvermögen E_{eff} beschreiben (siehe Formel 1). Bestehen beide Wände aus dem gleichen Material so ist T_m wirklich der Mittelwert der beiden Wandtemperaturen und das effektive Emissionsvermögen des fast schwarzen Strahlers liegt nahe 1. Je unterschiedlicher die beiden Wandtemperaturen sind umso größer wird die Abweichung des effektiven Emissionsvermögens des angenommenen Strahler von 1. Bei Messungen an Glasschmelzwannen wurden so effektive Emissionsvermögen zwischen 0,95 und 1 ermittelt.

5. Bedeutung für die Temperaturmessung im Verbrennungsraum einer Glasschmelzwanne

Mit dem Pyrometer gemessene Temperaturen sind **immer** verfälscht durch den Strahlungsaustausch mit einer gegenüberliegenden Fläche, ausser beide Flächen haben die gleiche Temperatur, was in der industriellen Praxis selten der Fall ist. Kältere Flächen erscheinen so wärmer und heißere Flächen erscheinen auf diese Weise kälter zu sein!

Dies scheint auf den ersten Blick vielleicht nicht so wichtig zu sein, da Temperaturänderungen als Funktion der Zeit mit dem Pyrometer richtig wiedergegeben werden und nur der Absolutwert der Temperatur verfälscht wird. Wird jedoch die Einhaltung einer Maximaltemperatur des feuerfesten Materials überwacht (z.Bsp. 1620°C für Silikagewölbe) so ist dies unter Umständen von extrem wichtiger Bedeutung. Bild 7 verdeutlicht dies.

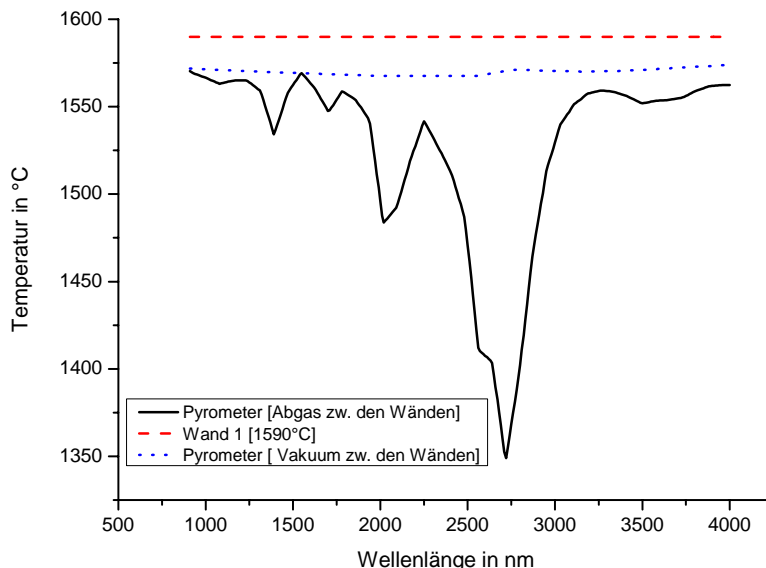


Bild 7: Temperatur der Wand 1 (1590°C) im Strahlungsaustausch mit einer 1540°C warmen Wand und Ergebnis einer optischen Temperaturmessung als Funktion der Wellenlänge wenn zwischen den Wänden keine Absorption stattfindet (Vakuum) und wenn Abgas zwischen den Wänden ist. Eingestellter Emissionsgrad am Pyrometer: 1,00.

Bild 7 verdeutlicht, dass alleine durch den Strahlungsaustausch mit einer geringfügig kälteren Wand ein Messfehler von ca. 20 K entsteht. Die Absorption der Wärmestrahlung durch vorhandene Abgase kann je nach Wellenlänge, bei der ein Detektor arbeitet, zu deutlich größeren Abweichungen führen. Bestimmt man die Temperatur des Gewölbes ($>1600^{\circ}\text{C}$), das im Strahlungsaustausch mit der Glasschmelzoberfläche ($1500^{\circ} - 1550^{\circ}\text{C}$) steht, so muss man auch hier davon ausgehen, dass das Pyrometer eine erniedrigte Temperatur anzeigt. Misst man mit dem Pyrometer also 1620°C , so hat das Gewölbe diese Temperatur bereits deutlich überschritten.

Das Pyrometer besitzt eine Möglichkeit die Anzeige der Temperatur zu beeinflussen. Es lässt sich der Emissionsgrad einstellen. Damit lässt sich die angezeigte Temperatur für eine Wellenlänge bzw. einen kleinen Wellenlängenbereich korrigieren. Bild 8 zeigt das Ergebnis bei einem eingestellten Emissionsgrad von 0,97 am Pyrometer.

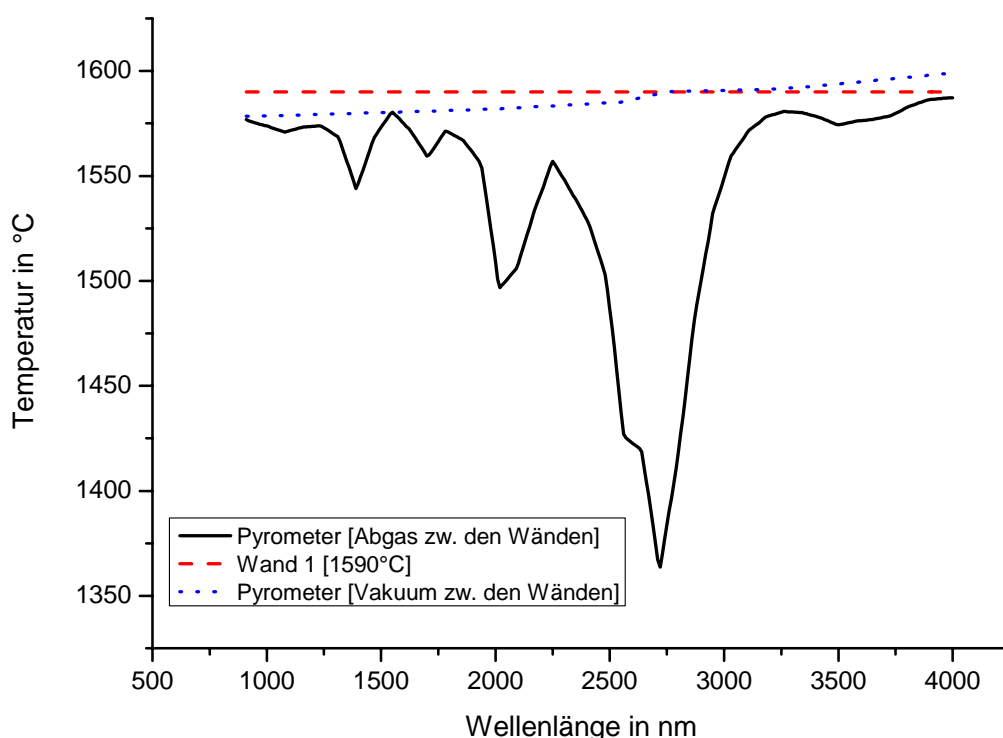


Bild 8: Temperatur der Wand 1 (1590°C) im Strahlungsaustausch mit einer 1540°C warmen Wand und Ergebnis einer optischen Temperaturmessung als Funktion der Wellenlänge wenn zwischen den Wänden keine Absorption stattfindet (Vakuum) und wenn Abgas zwischen den Wänden ist. Eingestellter Emissionsgrad am Pyrometer: 0,97.

Man erkennt, dass die Korrektur durch den Emissionsgrad jedoch nur für eine Wellenlänge bzw. bestimmte Wellenlängenbereich zu einer korrekten Messung der Temperatur führt.

6. Zusammenfassung

Bei der Messung einer absoluten Temperaturhöhe mit dem Pyrometer ist darauf zu achten, mit welchen anderen Flächen der anvisierte Messfleck im thermischen

Strahlungsaustausch steht. Durch Mehrfachreflektion der jeweiligen Wandstrahlung zwischen zwei räumlich nicht zu weit getrennten Flächen kommt es zur deutlichen Verfälschung der vom Pyrometer gemessenen Temperaturhöhe. Eine Abweichung von 20K von der wahren Temperatur einer Wand ist dabei keine Seltenheit. Dies kann bei der Überwachung von maximal erlaubten Werten schon zu Problemen bei der Korrosion von feuerfesten Materialien führen. Vor allem bei der Temperaturbestimmung der heißeren Wand der beiden Flächen im thermischen Austausch ist dies zu bedenken. Die Messung von Temperaturänderungen ist davon nicht so stark betroffen, solange die restlichen thermischen Randbedingungen annähernd gleich bleiben.

Bei der Auswahl des Pyrometers zur Messung der Temperatur von feuerfesten Steinen im Verbrennungsraum von Glasschmelzwannen ist außerdem darauf zu achten, dass der verwendete Detektortyp nicht in einem Wellenlängenbereich misst, in dem es durch Inhaltsstoffe der Luft und vor allem des Abgases zur Absorption der Wärmestrahlung kommt, wodurch die Temperaturwerte deutlich verfälscht würden.

7. Literatur

- [1] Fleischmann, B.; Bauer, J.; Baumann, P.; et al.: Verbesserung des Wärmeeintrags in die Glasschmelze unter Ausnutzung der spektralen Wärmestrahlung durch gezielte Brenneinstellungen zur Steigerung der Glasqualität. Abschlussbericht zum AiF-Forschungsvorhabens Nr. 80ZN „Spektral“. HVG, Offenbach am Main. Mai 2005.

- [2] 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 04. April 2006.