

HVG-Mitteilung Nr. 2057

Spektrale Messung der im Verbrennungsraum von Glasschmelzwannen vorhandenen Strahlung im Rahmen des AiF-Forschungsvorhabens Nr. 80 ZN „Spektral“
Teil 2: Messungen mit dem Spektralradiometer und Auswertung

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

1. Ergebnisse von Messungen mit dem Spektralradiometer

Im Rahmen des laufenden Forschungsvorhabens wurden bis jetzt an 5 Glasschmelzwannen Messungen mit dem Spektralradiometer der HVG vorgenommen. Die Messungen an der Grünglasschmelzwanne A sind die Grundlage zur Beurteilung der Maßnahmen, die im Laufe des Forschungsvorhabens ermittelt werden, um den direkten Wärmeeintrag in das Glasbad zu erhöhen. Die Messungen an der zweiten Wanne, in der Weißglas geschmolzen wird, sind aufgrund eines Defektes der Messanordnung bisher nicht verwertbar. Diese Messungen werden in der verbleibenden Zeit nachgeholt werden und in zeitlicher Nähe zu den Messungen stattfinden, die auch hier die Umsetzung der ermittelten Maßnahmen zur Optimierung der Wärmeübertragung protokollieren sollen. Zusätzliche Messungen wurden an zwei weiteren Grünglas- und an einer weiteren Weißglaswannen durchgeführt. Alle bisher untersuchten Glasschmelzwannen sind U-Flammenwannen, die mit Gas und dem Sauerstoffträger Luft befeuert werden.

2. Vorgehensweise zur Ermittlung des Anteils der Flamme an der Wärmestrahlung im Oberofen von Glasschmelzwannen

Bei der Messung von Wärmestrahlungsspektren im Oberofen von Glasschmelzwannen ist es nicht möglich, alle Wärmestrahlungsemittenten (Flamme bzw. Reaktionszone, Abgas, Staub und Ruß, Wände, Glasschmelze, Gewölbe) einzeln zu erfassen. Ohne Störung des Produktionsablaufes lassen sich nur zwei Emissionsspektren erfassen: die Strahlung im Oberofen während des Feuerwechsels (Flamme aus) mit Blick auf die gegenüberliegende Seitenwand und das Strahlungsspektrum des Oberofens mit Blick auf die Flamme (Flamme an). Aus diesen beiden Spektren kann mit der im Folgenden kurz skizzierten Vorgehensweise das Strahlungsverhalten der Flamme ermittelt werden. Eine wichtige Voraussetzung hierfür ist die Kenntnis des Emissionsvermögens der feuerfesten Materialien als Funktion der Wellenlänge und der Temperatur. Entsprechende Materialdaten sind in der Literatur zu finden bzw. liegen dem GWI aus anderen Forschungsvorhaben vor [1-4].

Bei der Messung der Emissionsstrahlung im Oberofen bei abgeschalteter Brennstoffzufuhr (Flamme aus) erhält man Messkurven (vgl. Bild 1), die hauptsächlich durch zwei Strahlungsteilnehmer geprägt sind.

1. Die Wärmeemissionsstrahlung der beiden Seitenwände des Ofens gibt eine Strahlung ab, die durch die Gesetze des grauen Strahlers beschrieben werden kann.
2. Im Abgas enthaltene Gasspezies und Kondensationsprodukte sowie Staubpartikel führen zu Absorptionserscheinungen, die zu Abweichungen vom Verhalten des grauen Strahlers führen.

Berechnet man die spektrale spezifische Ausstrahlung eines Raumes mit zwei Seitenwänden unter Vernachlässigung der vier restlichen Flächen (die unter den gegebenen Umständen mit etwa 1 % ihrer Strahlungsemission effektiv zur Strahlung auf die beiden Wände beitragen [5, 6]), so erhält man bei Berücksichtigung des realen Emissionsvermö-

gens der Wände als Funktion der Temperatur und Wellenlänge sowie der Mehrfachreflexion die in Formel (1) beschriebene Gesetzmäßigkeit.

$$\text{Strahlung}_{\text{Feuer aus}} = \frac{S\text{Str}(T_1) \cdot \varepsilon_1 + S\text{Str}(T_2) \cdot \varepsilon_2 \cdot (1 - \varepsilon_1)}{1 - (1 - \varepsilon_1) \cdot (1 - \varepsilon_2)} \approx S\text{Str}(T_m) \cdot \varepsilon_{\text{eff}} \quad (1)$$

Mit der Strahlung des schwarzen Strahlers $S\text{Str}$. Das reale Verhalten von zwei Seitenwänden kann durch einen grauen Strahler beschrieben werden, dessen Temperatur zwischen den Wandtemperaturen liegt und mit Hilfe eines effektiven Emissionsgrades ε_{eff} beschrieben werden kann, der ≤ 1 ist (Formel (1)). Die Abweichung des effektiven Emissionsvermögens dieses grauen Strahlers wird durch die Temperaturdifferenz der beiden Seitenwände bestimmt. Die reale Temperatur der Seitenwand ist von der Flammenlage abhängig, die sich in U-Flammenwannen alle 20 – 30 Minuten ändert. Je größer der Temperaturunterschied zwischen der Wand mit direkter Feuerbeaufschlagung und der Wand, an der das heiße Abgas vorbeistreicht, ist, desto größer weicht der effektive Emissionsgrad von 1 ab. Es hat sich bei mehreren Messungen an industriellen Glasschmelzwannen und auch am GWI Laborofen gezeigt, dass das Strahlungsverhalten der untersuchten Verbrennungsräume ohne Flamme in erster Näherung durch einen grauen Strahler mit einem effektiven Emissionsgrad und einer entsprechenden Temperatur beschrieben werden kann (Bild 1 und Formel (1)).

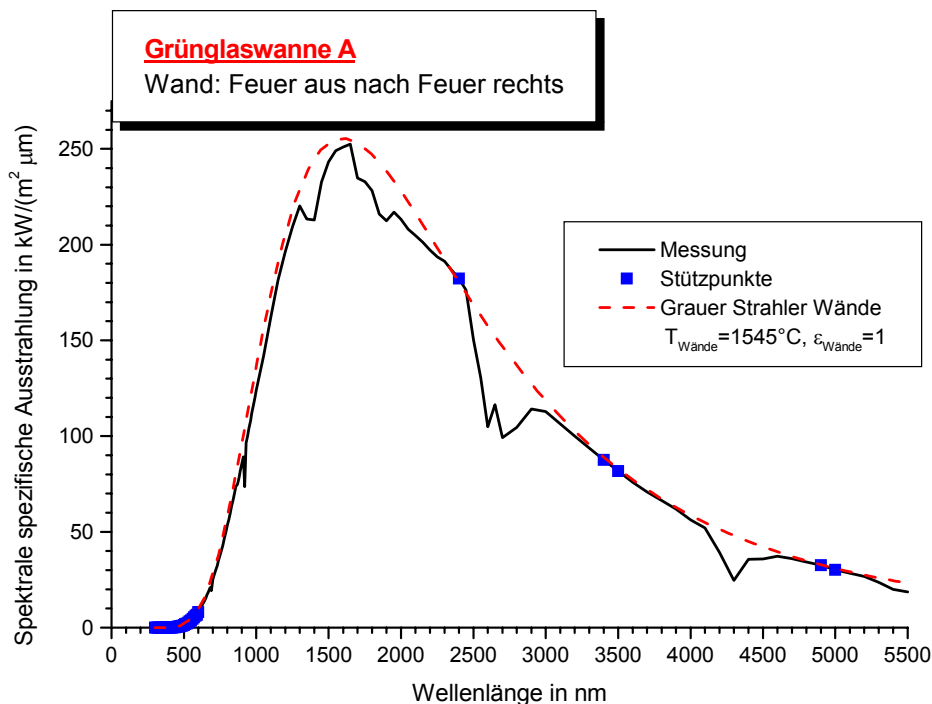


Bild 1: Spektrale spezifische Ausstrahlung im Oberofen einer Glasschmelzwanne bei abgeschalteter Brennstoffzufuhr (Feuerwechsel, Flamme aus)

Befindet sich zwischen diesen beiden Seitenwänden ein Medium (Flamme, Abgas, Staub, Kondensate) mit einer Temperatur größer oder gleich der Temperatur der Seitenwand und berücksichtigt man die Mehrfachreflexion der von diesem Medium ausgehenden Strahlung an den beiden Seitenwänden, so erhält man Gleichung (2) und (3).

$$M = S\text{Str}_{\text{Wände}} \cdot \varepsilon_{\text{eff}} + S\text{Str}_{\text{FL}} \cdot \varepsilon_{\text{FL}} \cdot K \quad (2)$$

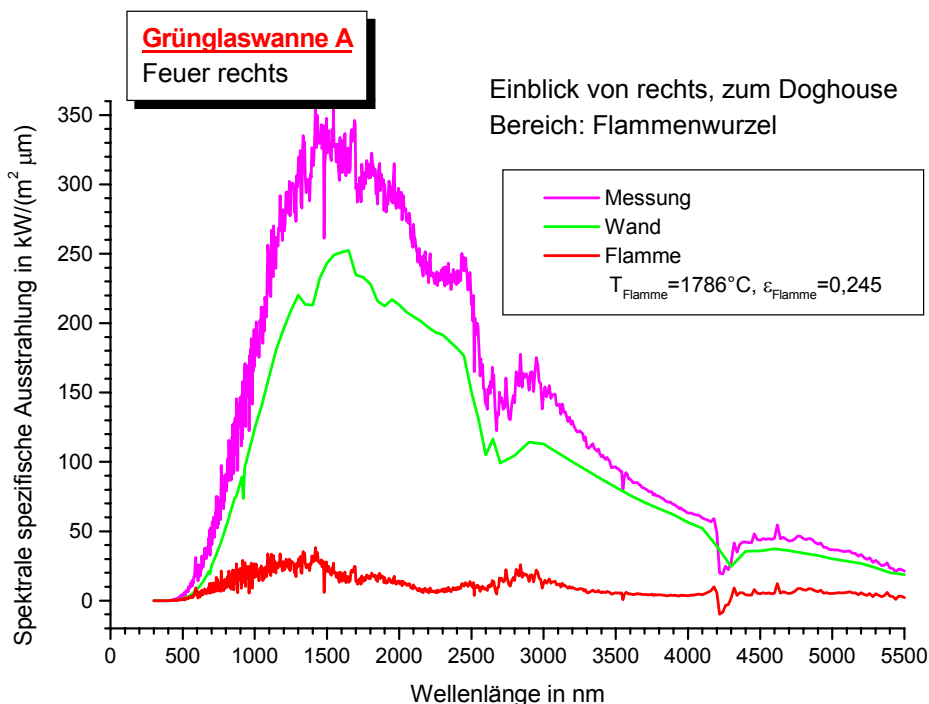


Bild 2: Spektrale spezifische Ausstrahlung an Grünglaswanne A

$$\text{mit } K = 1 + \frac{(1 - \epsilon_{AZS})^2 + (1 - \epsilon_{AZS})}{1 - (1 - \epsilon_{AZS})^2} \quad (3)$$

Dabei wird davon ausgegangen, dass das Medium zwischen den beiden Wänden ebenfalls durch die Gesetze eines grauen Strahlers beschrieben werden kann und keine nennenswerte Absorption zeigt. Dies beschreibt die Flamme bekanntermaßen nur in allererster Näherung, reicht aber für eine verwertbare Auswertung der Messdaten aus.

Die einzelnen Beiträge zur Gesamtstrahlung mit anwesender Flamme lassen sich so zusammenfassen, dass die Strahlung im Verbrennungsraum mit Flamme durch Gleichung (2) dargestellt werden kann. Die Strahlung setzt sich also zusammen aus einem grauen Strahler, der den Beitrag der beiden Seitenwände beschreibt, und einem grauen Strahler, der die Flamme und ihr Strahlungsverhalten beschreibt sowie einem Faktor, der durch das Emissionsvermögen der Seitenwandmaterialien als Funktion der Temperatur und Wellenlänge bestimmt ist (Formel (3)). Subtrahiert man die Wandstrahlung (Flamme aus) von der Strahlung des Oberofens mit Flamme, so erhält man den Strahlungsanteil der Gesamtstrahlung, der durch die Flamme (besser: Reaktionszone mit Radikalen und Emissionen strahlender Gasspezies) und ihre Mehrfachreflexion zwischen den Seitenwänden bestimmt ist. Will man das reine Strahlungsverhalten der Flamme bzw. Reaktionszone ermitteln, so muss diese Mehrfachreflexion der Flammenstrahlung zwischen den beiden Seitenwänden, die durch den Faktor K in Gleichung (2) repräsentiert wird, herausgerechnet werden. Mit Hilfe dieser Vorgehensweise kann die Flammenstrahlung in Glaschmelzwannen und auch am GWI Versuchsofen ermittelt werden (siehe Bild 2 und 3).

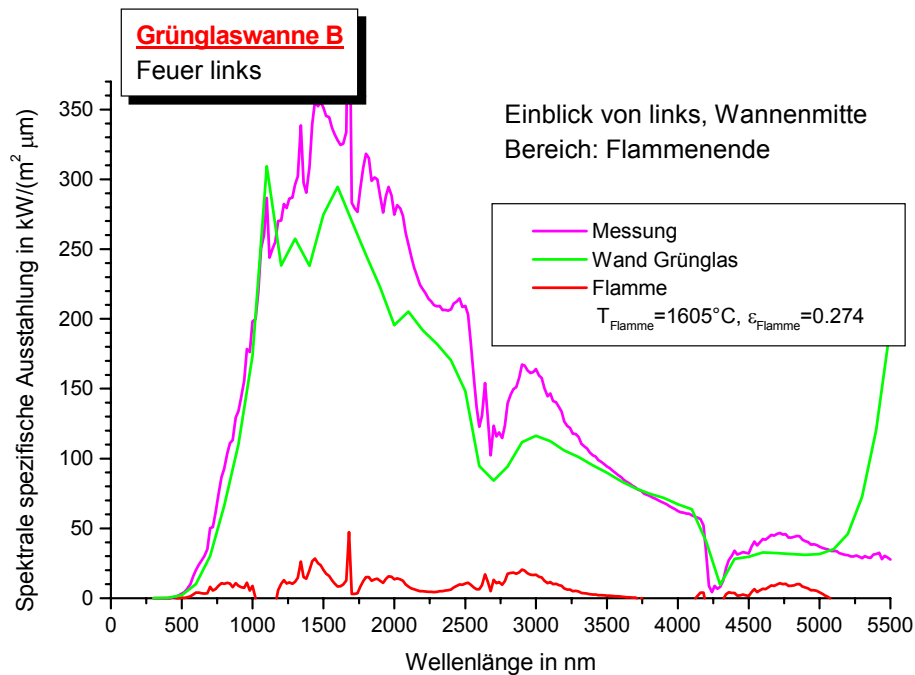


Bild 3: Spektrale spezifische Ausstrahlung an Grünglaswanne B

3. Ergebnisse von Messungen an industriellen Glasschmelzwannen

An zwei Grünglaswannen A und B gelang es, die nötigen Emissionsspektren zu messen, um nach der eben beschriebenen Vorgehensweise das Strahlungsverhalten der Flamme zu ermitteln. Bild 2 und Bild 3 zeigen die ermittelten Messkurven und das ermittelte Strahlungsverhalten der Flamme sowie die Temperatur und das Emissionsvermögen eines grauen Strahlers, der mit Hilfe der ermittelten Messdaten als Flammenstrahlung interpoliert wurde.

Bei den Messungen an den industriellen Glasschmelzaggregate zur Herstellung von Weißglas konnten die Emissionsspektren ohne Flamme wegen verschiedener gerätebedingter Probleme nicht gemessen werden. Damit ist eine Ermittlung des Strahlungsanteils der Flamme an der Gesamtstrahlung nicht möglich. Jedoch zeigt schon der Vergleich der gemessenen Gesamtstrahlung im Oberofen bzw. Verbrennungsraum, dass in den verschiedenen Glasschmelzaggregate je nach Wannenfahrweise, Glasart und Randbedingungen der Feuerung Unterschiede im gemessenen Spektrum zu sehen sind (Bild 4).

4. Ergebnisse bei Messungen am GWI-Versuchsofen

Wie in Bild 5 zu erkennen ist, sind die Strahlungsspektren aus dem Oberofen von Glasschmelzwannen und aus dem Verbrennungsraum des Laborofens des GWI vergleichbar und zeigen ein ähnliches Verhalten. Basierend auf der in Kapitel 2. beschriebenen Vorgehensweise wurde das Flammenspektrum einer oxidierend eingestellten und einer extrem reduziert eingestellten Gasflamme am GWI-Versuchsofen ermittelt. Die Ergebnisse sind in Bild 6 a) und b) dargestellt. Diese beiden Kurven und die berechneten Parameter des grauen Strahlers für die Flamme dokumentieren deutlich, dass Änderungen der Verbrennungsparameter zu veränderten Wärmestrahlungsspektren führen. Neben der Temperatur kann der Emissionsgrad der Flamme beeinflusst werden, was sich auf das Verhältnis direkte Wärmeeinstrahlung ins Glasbad zu Gesamtstrahlung auswirkt.

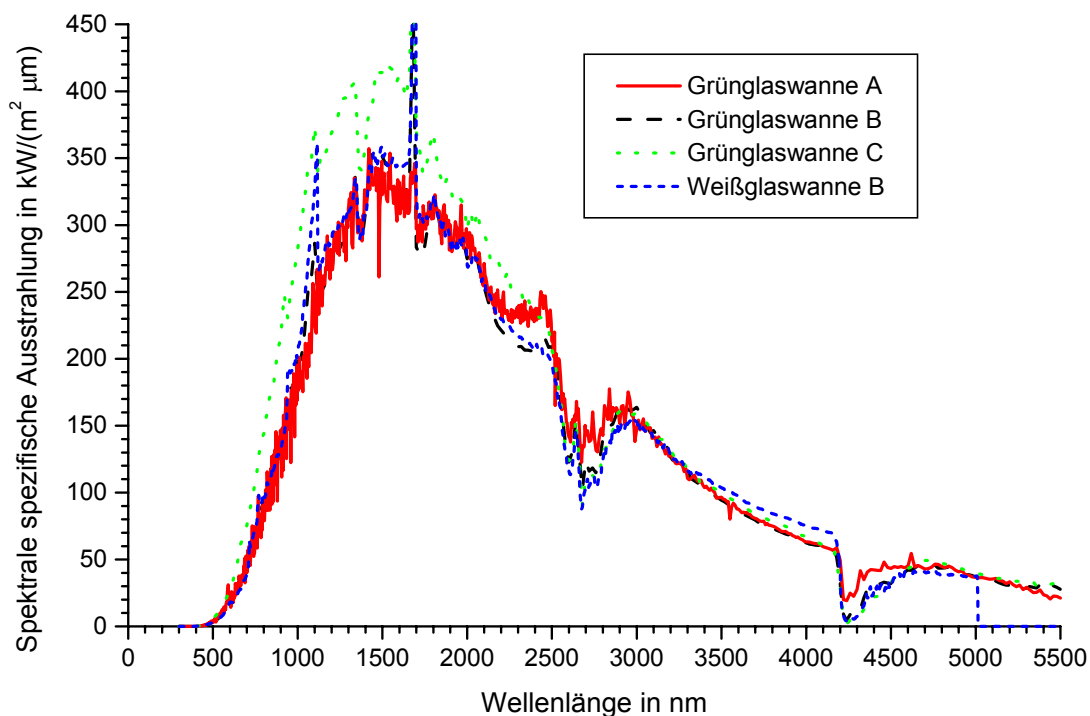


Bild 4: Vergleich der spektralen spezifischen Ausstrahlung im Oberofen von einer Weiß- und 3 Grünglaswannen mit Flamme

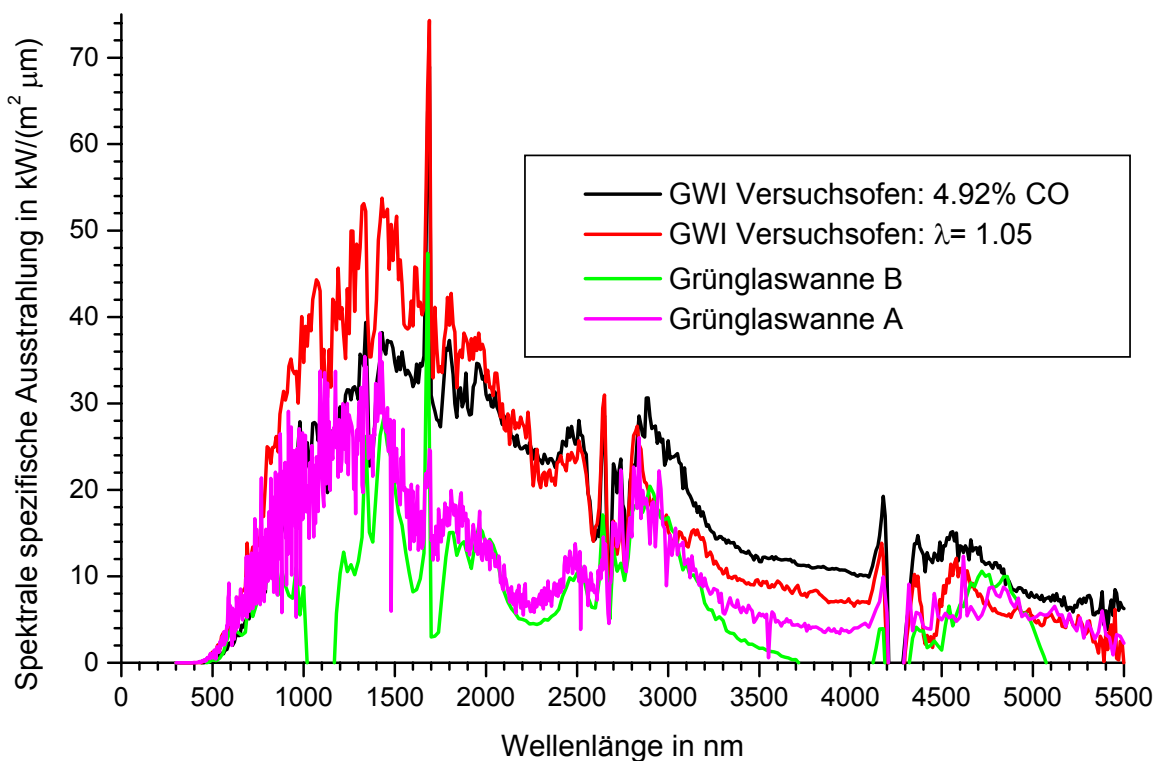


Bild 5: Vergleich der Strahlungsspektren einer oxidierend bzw. reduzierend eingestellten Flamme an GWI-Versuchsofen.

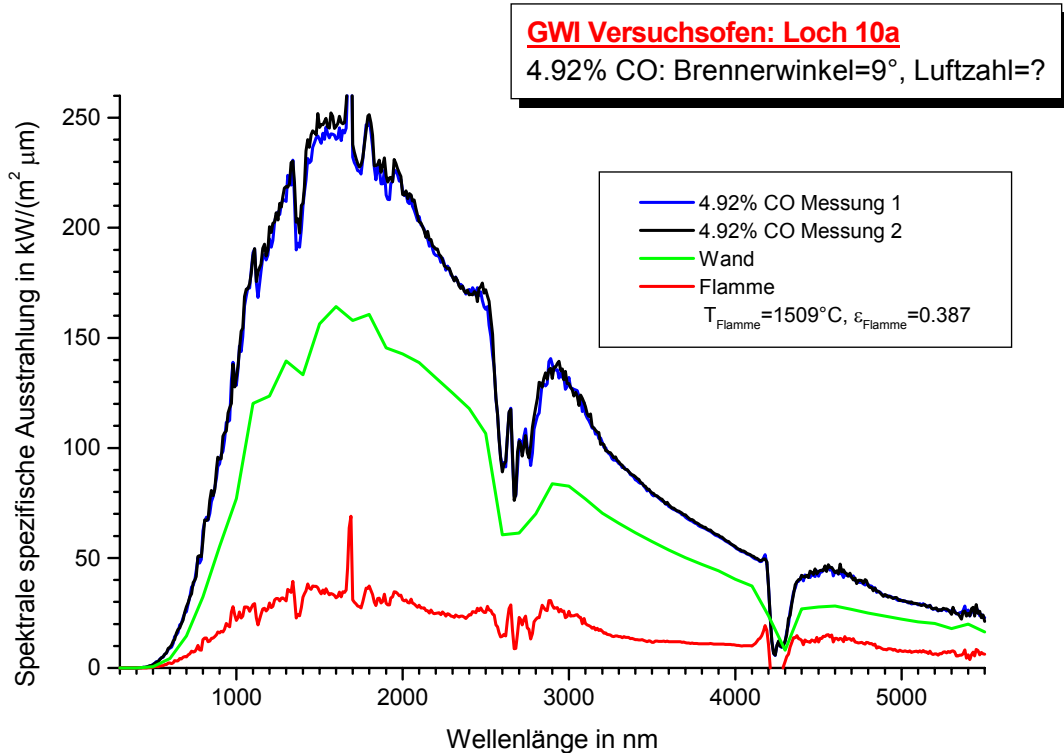
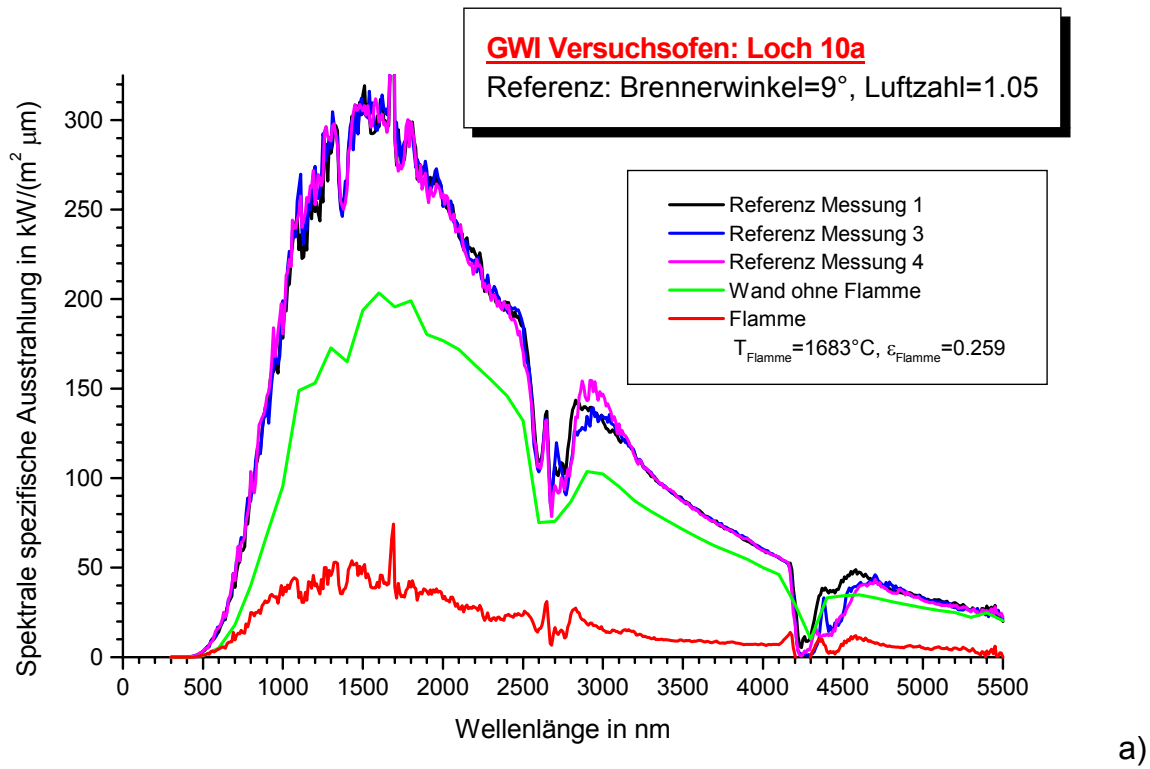


Bild 6: Vergleich der Strahlungsspektren einer a) oxidierend bzw. b) reduzierend eingestellten Flamme an GWI-Versuchsofen.

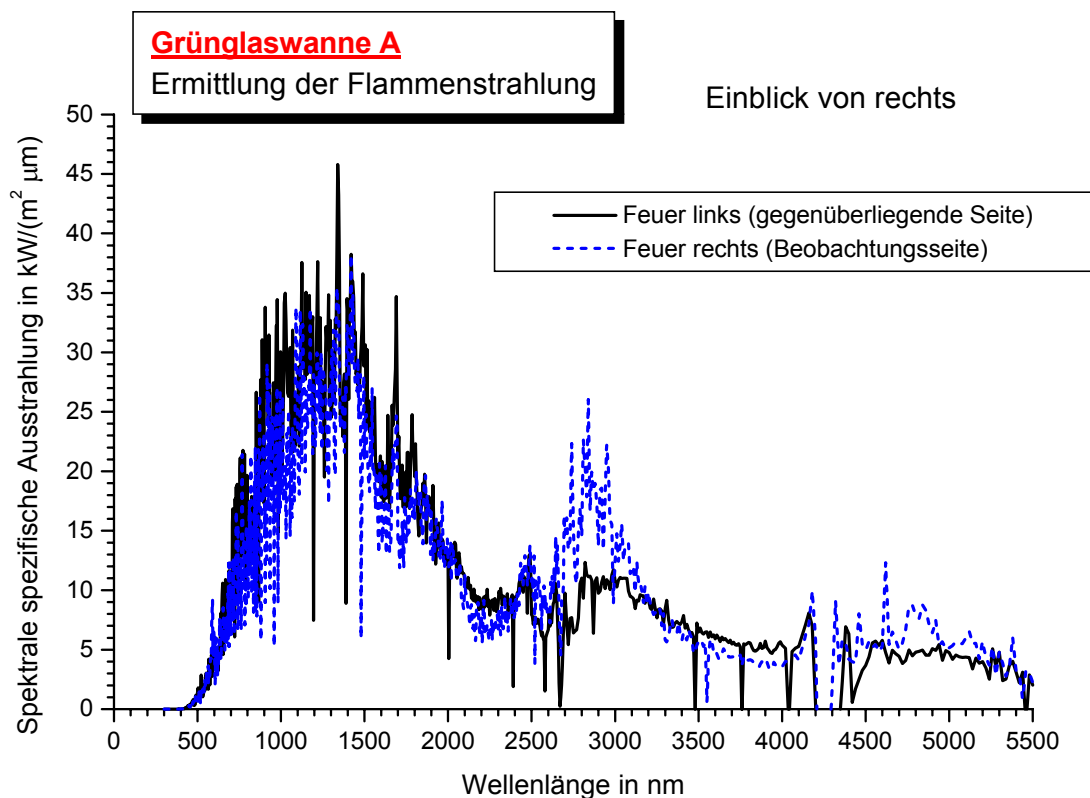


Bild 7: Strahlungsanteil der Flamme bei Feuer links und rechts in Grünlaswanne A

5. Interpretation der Emissionsspektren von Flammen

Bild 7 zeigt die Emissionsspektren der Flamme bei Feuer links und Feuer rechts in der Grünlaswanne A. Das Spektrum setzt sich aus einem grauen Strahler (Ruß und Staub bei hoher Temperatur → Teilchenstrahlung) und den Spektrallinien verschiedener Reaktionsprodukte der Verbrennung sowie von Radikalen zusammen (Linienspektren von Gasen). Beim Vergleich mit Literaturwerten und entsprechenden Datenbanken (HITRAN DATA BASE) kann eine Zuordnung in gewissen Grenzen erfolgen. Bild 8 zeigt die Linienstärke der meisten relevanten Gase in relativen Einheiten als Funktion der Temperatur. Um die Absorption quantitativ zu errechnen muss ausgehend von den Daten in Bild 8 noch die Eigen- und Fremdverbreiterung berücksichtigt und die Konzentration der einzelnen Spezies mit einberechnet werden. Trotzdem erlauben die Ergebnisse von Bild 8 eine Zuordnung einzelner Absorptions- und Emissionspeaks in Bild 7.

Für eine ausführliche Diskussion der einzelnen Effekte ist die Beschäftigung und Kenntnis mit quantenphysikalischen Methoden, Berechnungen und Gesetzmäßigkeiten notwendig, deren Diskussion den Rahmen dieser Veröffentlichung sprengen würden. Die ausführliche Darstellung und Diskussion ist daher im Teil 3 dieser Reihe vorgesehen. Die hier interpolierten Temperaturen von Flammen bzw. Reaktionszonen werden dann ebenfalls physikalischen Größen zugeordnet werden.

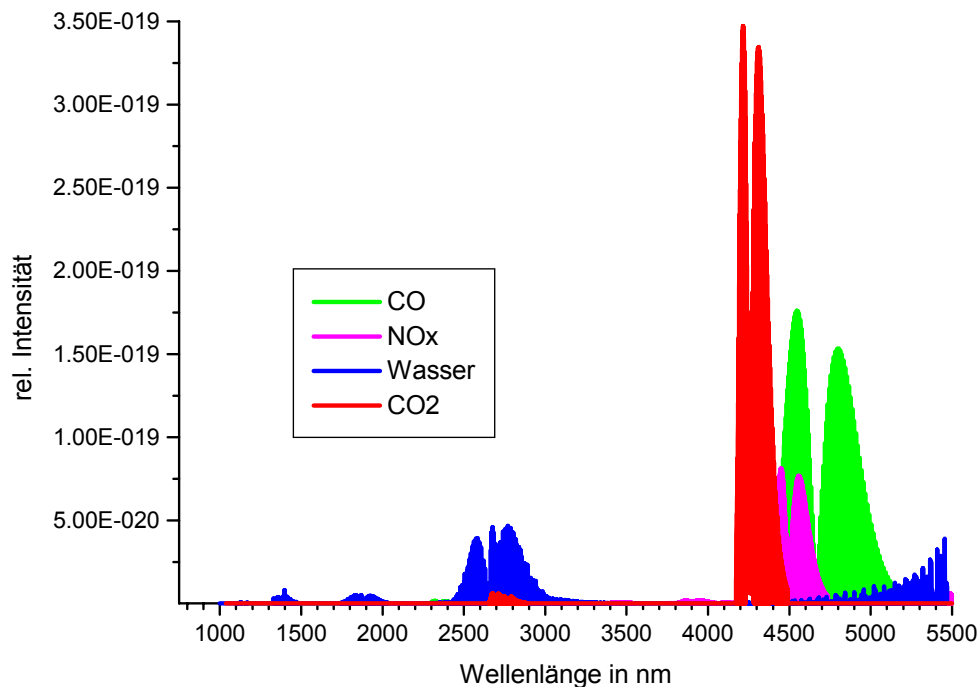


Bild 8: Linienstärke einzelner Gasspezies bei 1000°C berechnet mit Hilfe von HITRAN DATA BASE.

6. Literatur

- [1] Bauer, W. Kirchhoff, R. Oertel, H.: Messplatz zur Bestimmung von spektralen Emissionsgraden feuerfester Baustoffe. - Internationales Feuerfest-Kolloquium, 28.- 29. Sep. 1993 in Aachen.
- [2] Bauer, W.; Kirchhoff, R.; Oertel., H.: Meßplatz zur Bestimmung von spektralen Emissionsgraden feuerfester Baustoffe. – Preprints zum XXXVI. Internationalen Feuerfest-Kolloquium Aachen 27./28. September 1993. Düsseldorf, 1993.
- [3] Bauer, W.; Steinhardt, R.: Emissionsgrade feuerfester Baustoffe. - Gaswärme international, 39 (1990) Nr. 9, S. 388-391.
- [4] Funke, T. et al.: Messung der Emissionsgrade von Stählen und Ofenbaumaterialien in verschiedenen Atmosphären als prozessbezogene Stoffdaten für Wärmebehandlungsanlagen. Forschungsbericht 47/652. Forschungsgemeinschaft Industrieofenbau e.V., Duisburg, Oktober 1998. AiF-Nr. 10446N.
- [5] W. Heiligenstaedt: Wärmetechnische Rechnungen für Industrieöfen. Verlag StahlEisen, Düsseldorf, 1951.
- [6] VDI Wärmeatlas.



Die Forschungsarbeiten wurden durchgeführt mit der freundlichen Unterstützung der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF), Köln, (AiF-Nr.: 80ZN) und der Hüttentechnischen Vereinigung der Deutschen Glasindustrie (HVG), Offenbach am Main. Finanziert wurde das Projekt mit Mitteln des Bundesministers für Wirtschaft und Arbeit, Berlin. Wir danken allen genannten Institutionen.